

세부사업명: 북극해 현안대응 해빙-해양-해저 환경변화 연구

# 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발 기획보고서



# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 미답해역 해저지질탐사 및 자원분포특성 규명과 기후변화에 따른 해저환경 변화에 관한 기획 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2026. 03. 31



|       |         |
|-------|---------|
| 연구책임자 | : 강 승 구 |
| 참여연구원 | : 진 영 근 |
|       | : 홍 종 국 |
| "     | : 최 연 진 |
| "     | : 유 규 철 |
| "     | : 김 성 한 |
| "     | : 이 영 미 |
| "     | : 김 민 철 |
| "     | : 최 학 겸 |
| "     | : 김 수 환 |
| "     | : 김 형 준 |
| "     | : 박 광 규 |
| "     | : 이 민 제 |
| "     | : 서 현 교 |

## 보고서 초록

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                |                                                                                                                                                                                                                   |                                |             |                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 과제관리번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | PE25510        | 해당단계<br>연구기간                                                                                                                                                                                                      | 2025.04.01.<br>~2026.03.31     | 단계 구분       | (1단계) / (총1단계)                        |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 중 사 업 명        | 정책·지원과제                                                                                                                                                                                                           |                                |             |                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 세부사업명          | 정책·지원과제                                                                                                                                                                                                           |                                |             |                                       |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 중 과 제 명        |                                                                                                                                                                                                                   |                                |             |                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 세부(단위)과제명      | 북극해 미답해역 해저지질탐사 및 자원분포특성 규명과 기후변화에 따른<br>해저환경변화에 관한 기획 연구                                                                                                                                                         |                                |             |                                       |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 강승구            | 해당단계<br>참여연구원수                                                                                                                                                                                                    | 총 : 14명<br>내부 : 13명<br>외부 : 1명 | 해당단계<br>연구비 | 정부: 60,000천원<br>기업: 천원<br>계: 60,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 극지연구소 빙하지권연구본부 |                                                                                                                                                                                                                   | 참여기업명                          |             |                                       |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 상대국명 :         |                                                                                                                                                                                                                   | 상대국연구기관명 :                     |             |                                       |
| 위탁연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 연구기관명 :        |                                                                                                                                                                                                                   | 연구책임자 :                        |             |                                       |
| 요약                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                |                                                                                                                                                                                                                   |                                |             | 보고서<br>면수                             |
| <p>○ 지구온난화로 북극 해빙이 급격히 감소하면서 과거 접근이 어려웠던 고위도 미탐사 해역의 접근성이 확대되고 있으며, 해저연구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출 등 해저지질환경 변화도 빠르게 진행되고 있음. 이와 함께 북극항로 활용, 해저공간 이용, 해저자원 잠재성 평가, 관할권·대륙붕 관련 거버넌스 경쟁이 심화됨에 따라, 북극 해저지질·지구물리 자료는 기후변화 대응과 항로 안전성 검토, 전략자원 평가 및 국가 북극전략 수립을 위한 핵심 기초자료로 부상하고 있음.</p> <p>○ 미국, 캐나다, 중국, 일본 등 주요국은 북극 해저지형·해저지질·자원 데이터를 체계적으로 축적하고 있으며, 노르웨이는 북극 해저광물 탐사·개발을 위한 제도적 기반 마련을 추진하는 등 북극해 전략 자원 확보 경쟁이 본격화되고 있음. 이러한 국제 동향을 고려할 때, 우리나라도 북극해 미탐사 해역 및 핵심 연구지역에 대한 해저지질 정보와 독자적인 해저탐사기술을 선제적으로 확보할 필요가 있음</p> <p>○ 본 기획은 북극 프론티어 해역의 해저지질·환경·항로·자원 정보를 선제적으로 확보·자산화하고, 북서항로 개척을 위한 한국-캐나다 국제공동 지구물리탐사 및 해저지질조사를 추진하며, 북극 해저지질환경 변동성과 온난화 가속화 기작을 정밀진단하고 북극 공해상의 에너지·전략광물 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 수행함으로써 국가 북극전략 수립에 필요한 과학적 기초자료를 생산·축적하고자 하는 연구개발 사업을 기획하는 데 목적이 있음.</p> <p>○ 이를 위해 쇄빙연구선을 활용한 정기적 북극 해저지질·지구물리탐사, 척치고원·동시베리아해 북단·중앙북극해 등 북극 공해 및 고위도 프론티어 해역으로의 진출, 연안국과의 EEZ 내 국제공동탐사 추진, 종합 해저지질도 생산과 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 등을 핵심 과제로 도출하였음. 아울러 빙권해역 특화 해저무인탐사기(ROV), CSEM, 고해상 3차원 탄성파 탐사장비 개발과 인공지능 기반 자료분석 원천기술 확보를 중점 추진 내용으로 제시함으로써, 현장조사, 탐사기술 개발, 데이터 축적·활용이 유기적으로 연계되는 사업 구조를 마련하고자 함.</p> <p>○ 본 사업이 추진될 경우 북극 프론티어 해역 해저지질 정보의 선제적 확보, 북서항로 활용 기반 구축, 북극발 온난화 가속화 현상에 대한 정밀진단을 통한 기후위기 대응전략 수립, 에너지·전략광물 유망지역 도출, 빙권해역 특화 해저탐사기술 자립화, 통합 해저지질 정보체계 구축 등이 가능할 것으로 기대됨. 이를 통해 기후변화, 북극항로, 전략자원 등 주요 북극 현안에 대한 과학적 대응 기반을 강화하고, 국가 북극정책 수립에 기여하는 전략형 성과 창출이 가능할 것으로 전망.</p> |                |                                                                                                                                                                                                                   |                                |             |                                       |
| 색인어                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 한글             | 북극 프론티어 해역 해저지질조사, 북서항로, 해저환경변화, 해저 에너지·광물자원, 북극 연안국과의 국제협력 및 공동탐사                                                                                                                                                |                                |             |                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 영어             | Geological survey for the Arctic frontier region, Northwest passage, Seabed environmental change, Seabed energy and mineral resources, International cooperation and joint exploration with Arctic coastal states |                                |             |                                       |

## 요 약 문

본 기획 연구의 목적은 「북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발」 사업의 추진체계를 제안하고 최종 목표 설정과 달성을 위한 중점 추진 연구와 핵심 기술개발 내용을 도출하는 데 있다.

북극은 지구상에서 온난화가 가장 빠르게 진행되는 지역으로, 최근 해빙이 급격히 감소하면서 과거 접근이 제한되었던 고위도 미탐사 해역이 새롭게 열리고 있다. 이와 동시에 북극 해저에서는 온난화의 영향으로 해저영구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출, 해저 특이구조의 생성과 진화 등 해저지질환경 변화가 빠르게 진행되고 있으며, 이는 지구온난화를 다시 증폭시킬 수 있는 북극발 핵심 리스크로 작용할 수 있다. 아울러 해빙의 감소는 북극항로 활용 가능성 확대, 해저 케이블·관로 등 해저공간 이용 수요 증가, 에너지·전략광물자원 잠재성 평가 필요성 증대, 관할권·대륙붕·거버넌스 경쟁 심화에도 밀접하게 연계되고 있다. 이러한 변화에 대응하기 위해서는 해저지형과 수심, 퇴적층 구조, 기반암 분포, 해저면 안정성, 해저영구동토층 및 가스하이드레이트 분포, 사면붕괴 가능성 등 해저 기반 정보의 확보가 필수적이다. 이는 북극항로의 안전한 활용, 해저 인프라 입지 검토, 전략자원 잠재성 평가, 대륙붕·해양공간 이용 관련 과학적 판단을 가능하게 하는 근거가 된다. 이에 따라 북극 해저지질·지구물리 정보는 단순한 학술 자료를 넘어 기후변화 대응, 북극항로 활용, 해저공간 관리, 전략자원 평가 및 국가 북극정책 수립을 뒷받침하는 핵심 기초 자료로서 중요성이 커지고 있다.

본 기획에서는 이러한 변화에 선제적으로 대응하기 위하여, 해빙의 감소로 새롭게 접근 가능성이 확대되고 있는 북극해 고위도 미탐사 구역, 즉 프론티어 해역의 해저지질·환경·항로·자원 정보를 체계적으로 확보하고 국가 전략자산으로 활용할 수 있는 연구방향을 설정하였다. 또한 북서항로 활용 기반 구축을 위한 한국-캐나다 국제공동 지구물리탐사와 해저지질조사를 추진하고, 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 기작의 정밀진단, 에너지·전략광물 유망지 도출 및 잠재력 평가를 통해 국가 북극전략 수립을 위한 과학적 근거를 확립하고자 하였다.

이를 위해 쇄빙연구선을 활용한 북극해 정기 탐사, 척치고원·동시베리아해 북단 그리고 중앙북극해 진출, 미국 및 캐나다와의 국제공동탐사, 물리탐사 자료 기반 종합 해저지질도 생산, 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 핵심 추진 항목으로 설정하였다. 또한 독자적인 빙권해역 특화 해저탐사기술 확보가 본 사업의 성패를 좌우하는 핵심 요소라고 판단하고, 해저무인탐사기(ROV), 해양 전자탐사(CSEM), 고해상 3차원 탄성파 탐사 시스템 등 첨단 탐사장비 개발과 인공지능 기반 자료분석 원천기술 확보를 주요 기술 과제로 제안하였다. 아울러 해저영구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출 기원 추적, 고환경·고해양 기록 복원, 해저자원 잠재성 정량 평가 등 다학제 연구를 연계하여 프론티어 해역의 지질·환경·항로·자원 변동성을 통합적으로 해석할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다. 동시에 북극 해저영구동토층 시추 프로그램(IODP) 제안을 위한 기초자료 제공 등 국제거대과학프로그램과의 연계 가능성도 함께 검토하였다.

미국, 캐나다, 중국, 일본 등 주요국은 이미 북극 해저지형·해저지질·자원 관련 데이터를 체계적으로 축적하고 있으며, 노르웨이도 북극 해저광물 탐사·개발 추진 기반을 마련하는 등 북극 전략 자원과 해저 공간을 둘러싼 경쟁이 본격화되고 있다. 이에 우리나라도 차세대 쇄빙연구선 투입 이전에 북극 고위도 해역 내 핵심 탐사 대상 해역에 대한 기초 해저지질 정보와 빙권해역 특화 첨단 해저탐사기술을 선제적으로 확보하여, 본격적인 북극해 고위도 해역 조사·연구 활동에 대비할 필요가 있다. 또한 기존의 북극해 기초탐색 및 기반축적 단계를 넘어, 고위도 프론티어 해역 정보 선점과 국가 전략자산화 단계로 도약할 필요가 있다. 본 사업은 기존 서북극권 연구성과와 축적된 탐사자료를 기반으로 북극 고위도 프론티어 해역 진출, 북서항로 활용 기반 구축, 온난화 가속화 리스크 정밀진단, 전략자원 잠재성 평가, 통합 정보 플랫폼 구축을 결합한 정책 연계형 통합 연구 개발사업으로 기획하고자 한다.

본 기획 연구에서는 산·학·연 협력과 국제공동연구를 주요 추진 기반으로 설정하였다. 국내의 경우 대학, 정부출연연구기관, 산업계가 참여하는 북극 해저지질·자원 공동연구 협의체를 통해 해저 자원 정보의 공동 활용 체계를 마련하고자 하였다. 국제적으로는 캐나다 지질조사소(GSC), 미국 해군연구소(NRL), 미국 몬테레이 베이 수족관 연구소(MBARI) 등과의 긴밀한 협력을 바탕으로 북서항로 및 북극 프론티어 해역 국제공동탐사를 추진할 수 있는 기반을 구축하였다. 이를 통해 첨단 해저탐사기술 확보, 국제협력 네트워크 강화, 전문인력양성, 북극해 해저지질 관련 연구생태계 조성을 함께 도모하고자 하였다.

본 사업이 추진될 경우, 북극 프론티어 해역의 해저지질정보를 선점함으로써 해양과학영토 확장과 북극 거버넌스에서의 과학적 주도권 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 북서항로 활용기반 구축, 북극발 온난화 가속화 현상 정밀진단, 에너지·전략광물 유망지역 도출 및 국가 전략자원 포트폴리오 확대, 빙권해역 특화 해저탐사기술 자립화 등의 성과 창출이 가능할 것으로 전망된다. 아울러 본 사업을 통해 구축되는 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계는 국가 전략자산으로서 역할을 수행하며, 북극해에 대한 국가 차원의 과학적·정책적 판단 기반을 제공할 수 있다. 나아가 지질·환경·항로·자원뿐만 아니라 북극발 기후위기 대응까지 포괄하는 다목적 정보·자료 기반을 확보함으로써 북극해 신산업 창출, 국가 전략산업 지원, 국민 체감형 북극발 기후위기 대응체계 강화에 기여할 것으로 기대된다.

# S U M M A R Y

The purpose of this planning study is to propose an implementation framework for the project entitled "Integrated Seabed Geological Survey and Geo-environmental Assessment of the Arctic Frontier Region" and to identify the key research priorities and core technology development tasks required to achieve its final objectives.

The Arctic is the region where warming is progressing most rapidly on Earth. Recent rapid sea-ice retreat is opening previously inaccessible high-latitude and largely unexplored frontier waters. At the same time, the Arctic seabed is undergoing rapid geo-environmental changes driven by warming, including subsea permafrost degradation, gas hydrate dissociation, methane release, and the formation and evolution of distinctive seabed structures. These changes may act as critical Arctic-origin risks that further amplify global warming. In addition, sea-ice retreat is closely linked to the expanding potential use of Arctic shipping routes, increasing demand for subsea space utilization such as submarine cables and pipelines, growing needs for the assessment of energy and critical mineral resource potential, and intensifying competition over jurisdiction, continental shelves, and Arctic governance.

To respond to these changes, it is essential to secure fundamental seabed information beyond conventional sea-ice and ocean observations. Information on seabed topography and water depth, sedimentary structure, basement distribution, seafloor stability, subsea permafrost and gas hydrate distribution, and potential slope failure provides a scientific basis for safe Arctic route utilization, subsea infrastructure siting, strategic resource potential assessment, and decision-making related to continental shelves and marine space use. Accordingly, Arctic seabed geological and geophysical information is becoming increasingly important as a core foundation not only for scientific research, but also for climate change response, Arctic route utilization, subsea space management, strategic resource assessment, and national Arctic policy formulation.

To respond proactively to these emerging changes, this planning study designed a research program to systematically secure and transform into strategic assets geological, environmental, route-related, and resource information in Arctic frontier waters—high-latitude unexplored areas that are becoming newly accessible due to sea-ice retreat. It also aims to promote Korea-Canada joint geophysical exploration and seabed geological surveys for the future utilization of the Northwest Passage, precisely diagnose variability in the Arctic seabed geo-environment and mechanisms of warming acceleration, and establish a scientific basis for Korea's Arctic strategy through the identification of promising areas for energy and critical minerals and the assessment of their resource potential.

To this end, the plan sets the following as core implementation components: regular expeditions using icebreaking research vessels; expansion into frontier areas such as the Chukchi Plateau, the northern East Siberian Sea, and the central Arctic Ocean; joint surveys with the United States and Canada; production of comprehensive seabed geological maps;

and construction of an integrated geology-environment-route-resource information system. In addition, independent seabed exploration capability specialized for ice-covered waters is considered a critical determinant of the success of this program. Accordingly, the plan proposes the development of advanced exploration systems, including remotely operated vehicles (ROVs), controlled-source electromagnetic (CSEM) systems, and high-resolution 3D seismic survey equipment, together with core AI-based data analysis technologies.

These technology development efforts will be linked with multidisciplinary research on subsea permafrost change, gas hydrate dissociation, methane source tracing, paleoenvironmental and paleoceanographic reconstruction, and quantitative assessment of seabed resources. Through this approach, the program aims to establish a foundation for the integrated interpretation of geological, environmental, route-related, and resource variability in Arctic frontier waters. The plan also considers potential linkages with large-scale international science programs, including the provision of baseline data for future proposals related to Arctic subsea permafrost drilling under the IODP framework.

Major countries such as the United States, Canada, China, and Japan are already systematically accumulating Arctic seabed topographic, geological, and resource data, while Norway has also moved toward the commercialization of Arctic seabed minerals. Korea therefore needs to secure key information on high-latitude Arctic research areas and advanced seabed exploration technologies for ice-covered waters prior to the deployment of its next-generation icebreaking research vessel in 2030. In this regard, Korea must move beyond the previous stage of basic Arctic exploration and infrastructure building toward the preemption of information in high-latitude Arctic frontier waters and its conversion into national strategic assets. Building on Korea's accumulated research achievements and survey data in the western Arctic, this program is designed as a policy-linked, integrated R&D initiative that combines entry into high-latitude Arctic frontier waters, development of a scientific basis for the Northwest Passage, precise diagnosis of warming-acceleration risks, strategic resource assessment, and construction of an integrated information platform.

This planning study establishes industry-academia-research-government cooperation and international joint research as core implementation foundations. Domestically, it seeks to establish a shared-use framework for seabed resource information through a collaborative research consultative body involving universities, government-funded research institutes, and industry. Internationally, it has built a foundation for joint surveys in the Northwest Passage and Arctic continental shelf areas through close cooperation with the Geological Survey of Canada (GSC), the U.S. Naval Research Laboratory (NRL), and the Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI). Through these efforts, the program also aims to secure advanced seabed exploration technologies, strengthen international cooperation networks, foster specialized human resources, and promote the development of a sustainable research ecosystem related to Arctic seabed geology.

If implemented, this program is expected to contribute to the expansion of Korea's marine scientific frontier and the strengthening of its leadership in Arctic governance by securing priority access to seabed geological information in Arctic frontier waters. It is also expected to

generate strategic outcomes, including the establishment of a scientific foundation for Northwest Passage utilization, precise diagnosis of Arctic-driven warming acceleration, identification of promising areas for energy and critical minerals, expansion of Korea's national strategic resource portfolio, and self-reliance in seabed exploration technologies specialized for ice-covered waters. In addition, the integrated geology-environment-route-resource information system developed through this program is expected to serve as a national strategic asset and provide a scientific and policy decision-making basis for Korea's engagement in the Arctic.

Furthermore, by securing a multipurpose information and data foundation that encompasses not only geology, environment, routes, and resources, but also responses to Arctic-driven climate change, the program is expected to contribute to the creation of new Arctic maritime industries, support national strategic industries, and strengthen a public-facing response system for Arctic-origin climate risks.



# 목 차

## 요약문

|              |   |
|--------------|---|
| 제1장 서론 ..... | 1 |
|--------------|---|

|                    |   |
|--------------------|---|
| 제1절 기획연구 필요성 ..... | 1 |
|--------------------|---|

|                      |   |
|----------------------|---|
| 1. 추진 배경 및 필요성 ..... | 1 |
|----------------------|---|

|                    |    |
|--------------------|----|
| 2. 국고 지원 적합성 ..... | 11 |
|--------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 3. 연구개발 시급성 ..... | 26 |
|-------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 제2절 기획연구의 목표 및 주요내용 ..... | 30 |
|---------------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 1. 기획대상의 정의 ..... | 30 |
|-------------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| 2. 기획연구 범위 ..... | 30 |
|------------------|----|

|                      |    |
|----------------------|----|
| 제2장 환경 및 역량 분석 ..... | 35 |
|----------------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 제1절 국내외 정책 동향 ..... | 35 |
|---------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 1. 국내 정책 동향 ..... | 35 |
|-------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 2. 국외 정책 동향 ..... | 38 |
|-------------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 제2절 국내외 시장 동향 ..... | 47 |
|---------------------|----|

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. 국내 관련 시장 및 수요 ..... | 47 |
|------------------------|----|

|                        |    |
|------------------------|----|
| 2. 국외 관련 시장 및 수요 ..... | 50 |
|------------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 제3절 국내 기술수준 ..... | 53 |
|-------------------|----|

|                |    |
|----------------|----|
| 1. 분석 개요 ..... | 53 |
|----------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 제4절 국내외 연구 동향 ..... | 57 |
|---------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 1. 국내 연구 동향 ..... | 57 |
|-------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| 2. 국외 연구 동향 ..... | 70 |
|-------------------|----|

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 제5절 기존 연구와의 차별성 및 연구 성과 ..... | 97 |
|-------------------------------|----|

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 1. 기존연구와의 차별성 ..... | 97  |
| 2. 기존 연구 성과 .....   | 100 |

### **제3장 연구개발과제 및 추진계획 ..... 104**

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 제1절 사업 비전 및 목표 설정 .....                          | 104 |
| 1. 사업 추진 전략 도출 .....                             | 104 |
| 2. 사업체계도 .....                                   | 113 |
| 제2절 중점분야 세부 추진계획 .....                           | 117 |
| 1. (중점분야 1) 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 .....           | 117 |
| 2. (중점분야 2) 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 .....             | 133 |
| 3. (중점분야 3) 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 ..... | 145 |
| 4. (중점분야 4) 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 ..... | 155 |

### **제4장 소요예산 ..... 168**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 제1절 전체사업 소요예산 ..... | 168 |
|---------------------|-----|

### **제5장 사업 타당성 분석 ..... 177**

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 제1절 정책적 타당성 .....           | 177 |
| 제2절 과학기술적 타당성 .....         | 181 |
| 제3절 경제적 타당성(경제적 파급효과) ..... | 185 |
| 제4절 사업계획 적절성 .....          | 191 |

### **제6장 기대성과 및 활용방안 ..... 194**

|                |     |
|----------------|-----|
| 제1절 기대성과 ..... | 194 |
| 제2절 활용방안 ..... | 196 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 첨부1 국제공동연구 참여 의향서 및 관련 MOU ..... | 198 |
| 첨부2 신규사업 체크리스트 .....             | 206 |
| 첨부3 과제제안요청서(RFP) .....           | 208 |
| 첨부4 참고문헌 .....                   | 214 |



## - 표 차례 -

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <표 1-1> 국제협력 기반 확보 현황 .....                                         | 14  |
| <표 1-2> 사업 기획 추진 경과 .....                                           | 32  |
|                                                                     |     |
| <표 2-1> 주요국 북극정책의 추진 방향 및 해저지질·탐사 분야 시사점 .....                      | 46  |
| <표 2-2> 한국 조선업체 극지 선박 수주 실적(2020-2024) .....                        | 49  |
| <표 2-3> 북극항로 물동량 변화 추이(2020-2024) .....                             | 50  |
| <표 2-4> 북극 주요 자원개발 프로젝트 현황 (2024년 기준) .....                         | 51  |
| <표 2-5> 글로벌 쇄빙연구선 시장 규모 및 전망 .....                                  | 51  |
| <표 2-6> 글로벌 해저지질조사 시장 규모 .....                                      | 52  |
| <표 2-7> 주요 분석 대상 기술 항목 .....                                        | 53  |
| <표 2-8> 국가 핵심·중점기술 분석 결과 (해양 자원탐사기술·극한공간 인프라 기술) .....              | 54  |
| <표 2-9> 국가 핵심·중점기술 분석 결과<br>(해양광물자원·해양에너지자원·극지해양자원탐사·극한공학인프라) ..... | 55  |
| <표 2-10> 세부기술별 한계점 .....                                            | 56  |
| <표 2-11> 기존연구와 차별성 .....                                            | 97  |
|                                                                     |     |
| <표 3-1> 관측분야 이슈와 격차 및 수요 .....                                      | 106 |
| <표 3-2> 기술력 이슈와 격차 및 수요 .....                                       | 107 |
| <표 3-3> 통합화 이슈와 격차 및 수요 .....                                       | 108 |
| <표 3-4> 주권화 이슈와 격차 및 수요 .....                                       | 109 |
| <표 3-5> SWOT 분석, 전략 .....                                           | 110 |
| <표 3-6> 분과별 연구목적, 연구내용 .....                                        | 115 |
| <표 3-7> 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 연차별 연구목표, 내용 .....                     | 131 |
| <표 3-8> 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 연차별 연구목표, 내용 .....                       | 143 |
| <표 3-9> 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 연차별 연구목표,<br>내용 .....        | 153 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <p>&lt;표 3-10&gt; 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 연차별 연구목표,<br/> 내용 .....</p> | 164 |
| <p>&lt;표 4-1&gt; 전체사업 소요예산 .....</p>                                         | 168 |
| <p>&lt;표 4-2&gt; 연구내용 및 연차별 소요예산 .....</p>                                   | 169 |
| <p>&lt;표 4-3&gt; 2027년 소요예산 상세내역 .....</p>                                   | 172 |
| <p>&lt;표 5-1&gt; 상위계획 부합성 .....</p>                                          | 177 |
| <p>&lt;표 5-2&gt; 상위계획과 부합성 평가 .....</p>                                      | 179 |
| <p>&lt;표 5-3&gt; 2025-2029 관련분야 국가 자원배분계획 .....</p>                          | 180 |
| <p>&lt;표 5-4&gt; 이슈, 해결방향 및 영향 연계도 .....</p>                                 | 182 |



## - 그림 차례 -

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| [그림 1-1] 전 지구 평균 대비 북극권 기온 상승 추이 및 2025년 기온 편차 분석(NOAA and CIRES/University of Colorado Boulder, 2025) ..... | 2  |
| [그림 1-2] 북극 동토층 및 퇴적구조에서의 메탄 방출 과정(Geological Survey of Canada, 2022) .....                                  | 4  |
| [그림 1-3] 북극권 내 석유·가스 및 광물자원 분포 현황(European Environment Agency, 2017) .....                                   | 7  |
| [그림 1-4] 북극해 해빙 감소 및 북극항로 모식도 .....                                                                          | 9  |
| [그림 1-5] 기후위기에 따른 리스크 및 기회요인 .....                                                                           | 10 |
| [그림 1-6] 국가주도 북극 프론티어 해역 연구 추진 필요성 .....                                                                     | 11 |
| [그림 1-7] 캐나다 지질조사소 협의의향서 .....                                                                               | 15 |
| [그림 1-8] 3차원 탄성파탐사 취득 자료 및 시스템(KIGAM) .....                                                                  | 17 |
| [그림 1-9] 3차원 탄성파탐사 자료 볼륨(Geometrics) .....                                                                   | 19 |
| [그림 1-10] 첨단 해양 탐사 장비 AUV를 활용한 미국 MBARI 공동 연구 및 해저진흙화산<br>조정밀 해저지형도 .....                                    | 22 |
| [그림 1-11] 2022년 한국-캐나다-미국 국제공동연구 ROV 현장 탐사 .....                                                             | 22 |
| [그림 1-12] 2023년 북극 동시베리아해 지구물리탐사를 통해 확인한 해저 메탄 방출 현상<br>관측자료 .....                                           | 25 |
| [그림 1-13] 연구개발 시급성 .....                                                                                     | 26 |
| [그림 1-14] 기획 추진 체계 .....                                                                                     | 32 |
| <br>[그림 2-1] 국내 기술수준 분석에 활용한 보고서 .....                                                                       | 53 |
| [그림 2-2] 국가 핵심·중점기술 국가별 기술수준 .....                                                                           | 54 |
| [그림 2-3] 해양수산과학기술 국가별 기술수준 .....                                                                             | 56 |
| [그림 2-4] 2014년부터 2024년까지 수행한 다중채널 탄성파 탐사 축선 .....                                                            | 59 |
| [그림 2-5] 척치해에서 획득한 퇴적물 코어의 절개면 사진, 색도값, XRF .....                                                            | 60 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| [그림 2-6] 북극해 해저지질구조 정밀 탐사에 활용한 AUV 및 천부지층탐사 단면 .....                                                       | 61 |
| [그림 2-7] MiniROV 투입 및 시료 채취 장면 .....                                                                       | 61 |
| [그림 2-8] 라플라스 영역 파형역산을 통해 구축한 해저영구동토층 속도모델(Kang et al., 2021) .....                                        | 62 |
| [그림 2-9] 가스하이드레이트 부존 지역의 천부지층탐사 단면 및 샘플링 코어(Jin et al., 2019) .....                                        | 63 |
| [그림 2-10] 탄성파탐사 자료에서 산출한 가스하이드레이트 및 자유가스 포화도(Choi et al., 2022) .....                                      | 64 |
| [그림 2-11] ARA15B-C 메탄 방출구에서 획득한 스파커 탄성파 자료 및 천부지층 탄성파 단면도 .....                                            | 65 |
| [그림 2-12] 구축한 북극해 GIS DB 목록 및 UI .....                                                                     | 66 |
| [그림 2-13] 코어 ARA14C-ST12에서 산출한 IRD 시료의 현미경 이미지 .....                                                       | 68 |
| [그림 2-14] 북극해 망간 단괴 채취 정점 및 예시 이미지 .....                                                                   | 69 |
| [그림 2-15] 미국의 확장 대륙붕 경계 설정을 위한 다중빔 해저지형 및 천부지층탐사 자료(National Oceanic and Atmospheric Administration) ..... | 70 |
| [그림 2-16] 러시아 표류 플랫폼 Severny Polyus의 중앙북극해 표류 관측 궤적(Arctic and Antarctic Research Institute) .....         | 71 |
| [그림 2-17] 캐나다 북극해에서 관측한 해산의 다중빔 해저지형 및 탄성파탐사 자료(Geological Survey of Canada) .....                         | 72 |
| [그림 2-18] 노르웨이 해역에서의 다중빔 해저지형 탐사 지역(MAREANO) .....                                                         | 73 |
| [그림 2-19] 그린란드 해역에서의 지구물리탐사 및 시추 지역(Geological Survey of Denmark and Greenland) .....                      | 74 |
| [그림 2-20] 독일 Polarstern호의 표류 궤적(Alfred Wegener Institute) .....                                            | 75 |
| [그림 2-21] 중국 연구진이 공동연구로 수행한 북극 가젤 해령에서의 OBS 탐사 구역 및 탐사 단면(Ding et al., 2022) .....                         | 76 |
| [그림 2-22] 일본 쇄빙연구선 Mirai II 모식도(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) .....                | 77 |
| [그림 2-23] 국외 쇄빙연구선 및 연구선 .....                                                                             | 78 |
| [그림 2-24] IBCAO 5.0(Jakobsson et al., 2024) .....                                                          | 79 |
| [그림 2-25] 해저지질시료를 분석하여 도출한 고환경 변화(Stein et al., 2016) .....                                                | 81 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| [그림 2-26] 북극해 Gakkel Ridge에서 AUV/ROV로 확인한 열수 분출구(Isler et al. 2024)                               | 82  |
| [그림 2-27] 캐나다 보퍼트해의 대륙붕 가장자리를 따라 대륙붕 가장자리 형태와 해저 열<br>구조 간의 관계를 보여주는 지도 및 단면도(Paull et al., 2022) | 84  |
| [그림 2-28] 가스 하이드레이트에서 메탄 방출과 관련된 발생원 및 소멸원의<br>개략도(Ruppel & Kessler, 2017)                        | 86  |
| [그림 2-29] 가스 방출 지역에서의 다중빔, EK60, CTD 단면도(Westbrook et al., 2009)                                  | 87  |
| [그림 2-30] 해저 열수 분출 단일빔 소나 이미지 및 기포 분출 구역, 각 열수 분출구에서<br>방출된 메탄의 양(Chernykh et al., 2020)          | 89  |
| [그림 2-31] 메탄 방출 구조에서 미생물의 생물학적 필터 과정 모식도(Boetius &<br>Wenzhöfer, 2013)                            | 90  |
| [그림 2-32] 북극 대륙붕에서 사계절 동안 발생하는 퇴적물의 물리적 과정 모식도(Eidam<br>et al., 2025)                             | 92  |
| [그림 2-33] 북극해 미발견 석유 및 천연가스 자원 잠재성 분포(Gautier et al., 2009)                                       | 94  |
| [그림 2-34] 가켈 해령 오로라 열수 분출구의 사이드 스캔 소나 단면 및 지질도(German<br>et al., 2022)                            | 96  |
| [그림 2-35] 신규사업 연구해역 및 대상                                                                          | 99  |
| [그림 2-36] 북극해 해저 메탄 방출구조 연구                                                                       | 100 |
| [그림 2-37] 북극 보퍼트해에서 발달한 해저 얼음구조                                                                   | 100 |
| [그림 2-38] SCIE급 논문 32편 외(2025년 기준)                                                                | 101 |
| [그림 3-1] 비전체계도                                                                                    | 114 |
| [그림 3-2] 사업 로드맵                                                                                   | 117 |
| [그림 3-3] 북극권 국가 및 대한민국 탄성파탐사 지역 비교                                                                | 118 |
| [그림 3-4] 중점분야 1 로드맵                                                                               | 121 |
| [그림 3-5] 본 과제의 북극 연구해역 지도                                                                         | 125 |
| [그림 3-6] 구축한 북극 프론티어 해역 해저지질 정보체계 예시                                                              | 128 |
| [그림 3-7] 구축 예정인 첨단 해저지질탐사 장비                                                                      | 129 |

|                                                                 |         |
|-----------------------------------------------------------------|---------|
| [그림 3-8] AI 기반 고정밀 해저지질구조 분석 기술 예시 .....                        | 130     |
| [그림 3-9] 북극항로 모식도 .....                                         | 133     |
| [그림 3-10] 캐나다 지질조사소(GSC)와의 국제공동탐사 .....                         | 135     |
| [그림 3-11] 중점분야 2 로드맵 .....                                      | 136     |
| [그림 3-12] 캐나다 해역에서 취득한 MBES 해저지형자료 .....                        | 139     |
| [그림 3-13] MBES-SBP 연계 해석 자료 예시 .....                            | 140     |
| [그림 3-14] 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 결과 예시 .....                        | 142     |
| [그림 3-15] 가스하이드레이트 해리에 따른 메탄 이동 및 방출(Skarke et al., 2014) ..... | 145     |
| [그림 3-16] 중점분야 3 로드맵 .....                                      | 147     |
| [그림 3-17] 중점분야 3 탐사 및 분석 대상 모식도 .....                           | 149     |
| [그림 3-18] 북극 메탄 방출 단기 시나리오 평가 예시 .....                          | 150     |
| [그림 3-19] 북극 메탄 방출 특이구조 정밀관측 예시 .....                           | 151     |
| [그림 3-20] 고정밀 탄성파 이미징 분석 결과 예시 .....                            | 152     |
| [그림 3-21] 국제 거대과학 프로그램 (IODP, ICDP등), 동토층 시추 프로그램 참여 및 협력 ..... | 154     |
| [그림 3-22] 실제 가스층에 대한 탄성파 속성 분석 적용 결과 예시 .....                   | 156     |
| [그림 3-23] 중점분야 4 로드맵 .....                                      | 158     |
| [그림 3-24] 지구통계학적 보간기법 적용 결과 예시 .....                            | 161     |
| [그림 3-25] 북극해에서 채취한 망간단괴 분석 결과 예시 .....                         | 162     |
| [그림 3-26] 산·학·연 북극해 해저자원 부존 및 지질특성 정보체계 .....                   | 164     |
| <br>[그림 4-1] 연구내용별 연구비 소요예산 (단위: 백만원) .....                     | <br>170 |

## 요약문

### □ 사업개요

- 사업내용 : 북극 프론티어(미탐사) 해역 해저지질정보 선점과 북서항로 개척을 위한 국제 공동 해저지질조사 및 지구물리탐사, 지구온난화를 가속화시키는 북극 해저지질환경 변동성 정밀진단 및 에너지·전략광물자원 잠재성 평가를 통한 유망지역 도출

※ 북극 프론티어 해역 : 급격한 해빙 감소로 인해 선점이 시급한 북극 고위도 및 미탐사 해역

#### ※ 최종 성과물

- 북극 프론티어 해역 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축
- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 자료 확보
- 북극 연안국(캐나다, 미국 등)과의 국제공동탐사(연안국 EEZ 내 공동탐사) 2건 이상
- 북극해 전략자원(에너지·희토류 등) 잠재력 평가 보고서 2건 이상
- SCI(E)급 학술논문 연 10편 이상 출판(상위10% 이내 국제학술지 포함)
- 빙권해역 해저탐사 원천기술 특허 출원·등록 10건 이상
- 홍보 등 성과확산 (인력양성 10명, 대국민 홍보 30건 이상)

- 총사업비(사업기간) : 300억 원('27년~'31년)

(단위 : 억 원)

| 구 분  | 계   | '27 | '28 | '29 | '30 | '31 | 비고 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 총 소요 | 300 | 45  | 45  | 45  | 55  | 110 | -  |

### □ 추진근거

- [국정56] 북극항로시대를 주도하는 K-해양강국건설('25.9)
- 해양수산과학기술 육성법 제8조(연구개발사업등의 추진)
- 극지활동 진흥법 제6조(극지활동진흥기본계획 수립·시행), 제8조(연구개발 등의 지원), 제11조(극지활동 기반시설의 설치·운영)
- 해양수산발전기본법 제17조(해양과학조사 및 기술개발 등), 제20조(해양과학기지의 설치 및 조사·연구), 제21조(국제협력의 추진)
- 제1차 극지활동 진흥 기본계획('23~'27)의 차세대 쇄빙연구선·북극 고위도 진출 전략

- 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23~'27) 극지·대양 등 미지의 영역 도전 및 해양 자원 확보
- 제3차 해양수산발전 기본계획('21~'30) 해양과학기술 역량 강화 및 해양영토 관리 기반 확충
- 2050 북극활동전략('21.11, 국무회의)

## □ 사업 추진 필요성

- 북극 해빙 감소와 프론티어 해역의 전략적 가치 급부상에 따른 데이터 주권 확보
  - 해빙 감소로 고위도 해역 접근성이 확대됨에 따라 북극 프론티어의 전략적 가치가 급부상하고 있으며, 연안국 및 주변국(중국·일본)의 진출 가속화로 탐사 경쟁 심화
    - ※ 북극 연안국 간 관할권·대륙붕·해양공간 이용을 둘러싼 경쟁 심화 및 비연안 주요국의 고위도 해역 탐사활동 급증 추세
  - 북극 고위도 해역에 대한 해저지질·지구물리 자료는 단순 연구를 넘어 전략자원 잠재성 평가와 대륙붕·해양공간 이용 판단의 과학적 근거로, 각국이 이를 전략자산으로 축적·관리하고 있어 독자적 데이터 확보 시급
  - 우리나라의 비(非)연안 중견국 지위를 활용한 북극 거버넌스 참여 확대 및 신산업 창출 정책('대한민국 경제의 새로운 활로')을 뒷받침할 과학적 기반 마련 필요
  - 한-캐-미 국제공동연구 컨소시엄 등 기 확보된 북극해 국제공동탐사 인프라를 활용하여 북극 프론티어 해역에 대한 선제적 조사활동을 추진하고, 이를 통해 해양과학영토 확장 과 북극 해역 내 경제적 활동기반 확대에 기여함과 동시에, 향후 차세대 쇄빙연구선 취항 이후 본격화될 북극 고위도 탐사활동에 대비
- 북서항로 개척을 위한 한-캐 국제공동 지구물리탐사 필요
  - 북서항로는 북극해 해빙 감소에 따라 상업적·전략적 활용 가능성이 증대되고 있으나, 천해역, 해저지형 미확인 구간, 해저퇴적환경, 빙해 상호작용 등으로 인해 안전 운항과 인프라 구축에 필요한 정밀 해저지질정보가 부족한 상황
  - 캐나다는 북서항로 연안 및 북극 군도 해역에 대한 지리적 접근성, 현장 운영 경험, 연구 인프라와 협력 네트워크를 보유하고 있어, 우리나라가 북서항로 관련 해저지질·지구물리 기초자료를 확보하고 항로 활용 기반을 구축하는 데 있어 최적의 국제공동연구 파트너임
  - 한-캐 국제공동 지구물리탐사를 통해 북서항로 유망구간의 해저지형·수심, 퇴적층 구조, 해저지질재해 요소, 해저영구동토층 및 가스하이드레이트·가스 분포 특성을 정밀 규명함으로써, 향후 북서항로 활용, 해저 케이블·관로 등 인프라 입지 검토, 전략자원 잠재성 평가 및 해저환경 변화 대응을 위한 핵심 기초자료를 확보할 수 있음

- 이는 단순한 공동조사를 넘어, 북서항로 관련 과학기술 협력 확대, 극지 현장조사·자료 해석 역량 고도화, 북극 거버넌스 내 실질적 협력 네트워크 강화를 동시에 견인하는 전략적 사업 기반으로 기능할 수 있음

○ 북극발 기후리스크 대응을 위한 국가 위기관리 기반 마련

- 북극 해저영구동토층 붕괴와 가스하이드레이트 해리 그리고 이로 인한 대규모 메탄 방출은 지구온난화를 증폭시킬 수 있는 북극발 핵심 기후 리스크로, 전 지구 기후시스템과 한반도 이상기후에도 영향을 미칠 수 있음
- 해저지질환경 변화는 주로 북극 대륙붕에서 활발하게 나타나고 있으나 대륙붕 해역의 상당 부분은 연안국 관할 해역에 해당하므로, 북극 해저지질환경 변화를 정밀하게 관측·진단하기 위해서는 연안국과의 긴밀한 국제협력을 기반으로 한 EEZ 내 공동탐사가 필수적임
- 연안국 EEZ 내 대륙붕 공동탐사와 첨단 해저탐사기술을 활용한 정밀 관측을 통해 북극발 온난화 가속화 기작을 규명하고, 확보된 과학적 근거를 국가 기후위기 대응전략 수립과 위기관리체계 고도화에 활용

○ 글로벌 에너지·전략광물 공급망 경쟁 심화에 대응한 북극 전략자원 선점

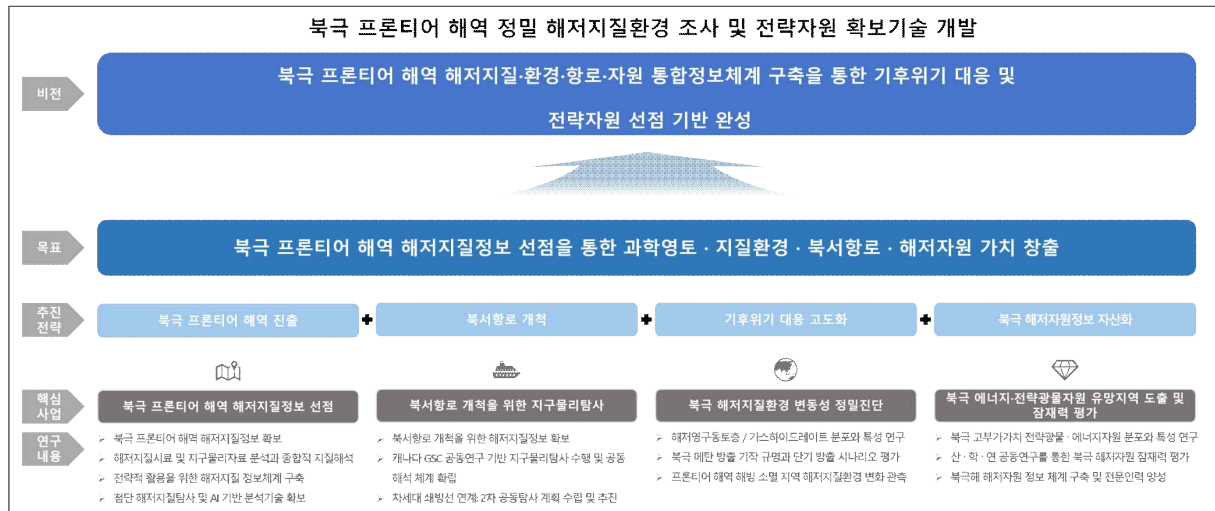
- 최근 주요국은 에너지 안보와 핵심광물 공급망 확보 차원에서 북극 해저자원에 대한 조사·평가를 확대하고 있으며, 노르웨이도 북극권 해저광물 탐사·개발을 위한 제도적 기반 마련을 추진하는 등 북극 전략자원을 둘러싼 국제 경쟁이 본격화되고 있음
- 본격적인 북극개발 및 활용 시대에 대비하여 산·학·연 북극 해저자원 공동연구 협의체를 구성하고, 북극 에너지자원 및 전략광물의 분포와 특성, 부존 잠재력을 사전에 규명·평가함으로써 국가 전략자원 포트폴리오 확대를 위한 체계적인 조사·연구 기반 마련이 필요함

※ 북극에는 전 세계 미발견 석유의 약 13%, 미발견 천연가스의 약 30%가 부존할 가능성이 있는 것으로 평가되며, 희토류·니켈 등 핵심광물 자원 잠재성도 함께 주목받고 있음

○ 차세대 쇄빙연구선은 '30년 취역을 목표로 막대한 예산이 투입되는 국가 핵심 연구 인프라이나, 사전 탐사기술과 핵심 해저지질정보가 미흡할 경우 취역 초기 운용 효율 저하, 조사 대상지 선정의 한계, 연구성과 창출 지연 등으로 초기 투자 효과가 충분히 발휘되지 못할 우려가 있음

- 차세대 쇄빙연구선의 초기 성과를 극대화하기 위해서는 취역 이전부터 북극 프론티어 해역의 탐사 대상지, 해저지질·지구물리 기초자료, 빙권해역 특화 탐사기술을 선제적으로 확보할 필요가 있으며, 이를 통해 취역 후 본격적인 고위도 해역 탐사활동의 효율성과 투자 효과를 높일 수 있음

## □ 비전체계도 도출



## □ 사업 목표

- (사업 목표) 북극 프론티어 해역의 해저지질정보를 선점하고, 한국-캐나다 공동 지구물리탐사를 통해 북서항로 활용 기반을 구축하며, 국제협력 기반의 해저지질환경 변동성 정밀 진단, 온난화 가속화 기작 규명, 에너지·전략광물 잠재력 평가를 통해 기후위기 대응과 국가 전략적 가치 창출에 기여
- (북극 프론티어 해역 진출) 독자적 빙권해역 침단 탐사기술을 활용한 북극 프론티어 해역 해저지질조사 및 해저지질 정보 선점
  - ※ 무인 해저탐사기(ROV·AUV), 고해상 3차원 탄성파 장비 개발을 통한 독자적 빙권해역 탐사기술 확보, 선제적 해저지질조사를 통한 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점
- (북서항로 개척을 위한 국제공동 지구물리탐사) 한국-캐나다 국제협력 기반 북서항로 유망해역 공동 지구물리탐사 및 전략적 해저정보 선점
  - ※ 캐나다와의 국제공동 지구물리탐사를 통해 북서항로 유망구간의 해저지형, 해저지질구조, 퇴적환경, 지질재해 요소 등을 정밀 규명하고 항로 안전성 평가와 향후 해저 케이블·관로 설치, 전략자원 잠재성 평가 및 환경변화 대응에 필요한 핵심 해저지질·지구물리 자료 확보
- (기후위기 대응) 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단
  - ※ 북극 해저영구동토층 붕괴 및 가스하이드레이트 해리 등 해저지질환경 변화와 메탄 방출 현상 규명을 통한 온난화 가속화 예측과 영향 평가
- (북극 해저자원정보 자산화) 북극 에너지 및 전략광물자원 유망지역 조사 및 잠재력 평가
  - ※ 산·학·연 북극 해저자원 공동연구 수행을 통한 에너지 및 전략광물자원에 대한 정량적 분포와 특성 연구

□ 사업의 세부 내용

| 분과                                         | 연구목적                                                                     | 연구 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 북극 프론티어<br>해역<br>해저지질정보<br>선점              | 북극<br>프론티어(미탐사)해역<br>해저지질조사 및<br>독자적 해저지질<br>정보체계 구축을<br>통한 해저지질정보<br>선점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극 해빙 감소에 따른 선제적 탐사를 통한 해저 지질정보 확보</li> <li>• 해저지형, 지질구조, 저질 정보 등 종합적 해석을 통한 구간별 해저지질도 작성</li> <li>• 전략적 활용(항로, 기후변화 대응, 자원 등)을 위한 해저지질 정보체계 구축</li> <li>• 독자적 첨단 해저지질탐사(ROV, 3D MCS 등) 및 AI 기반 자료분석 기술 확보</li> </ul>                                                                   |
| 북서항로<br>개척을 위한<br>지구물리탐사                   | 캐나다<br>지질조사소(GSC)와의<br>지구물리탐사<br>공동연구를 통한<br>북서항로 개척                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MBES 기반 해저지형 자료 확보 및 기본 지형 특성 도출</li> <li>• SBP 기반 천부지층 자료 확보 및 천부 위험징후 판독</li> <li>• 캐나다 GSC 공동연구 기반 지구물리탐사 수행 및 공동해석 체계 확립</li> <li>• 차세대 쇄빙연구선 연계: 2차 공동탐사 계획 수립 및 추진</li> </ul>                                                                                                     |
| 북극<br>해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀진단 | 첨단 해저탐사기술<br>기반 북극<br>해저지질환경 변동성<br>관측과 북극발<br>온난화 가속화 현상<br>정밀진단        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 온난화에 따른 해저환경변화 관측과 정밀진단</li> <li>• 해저영구동토층 붕괴에 따른 해저환경변화와 온난화 증폭 관계 규명</li> <li>• 북극 해저영구동토 시추 프로그램(IODP)을 위한 기초자료/연구결과 제공</li> <li>• 북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가</li> <li>• 고환경·고해양기록 복원과 연대층서 정립을 통한 과거 온난기 지질환경변화 연구</li> <li>• 프론티어 해역 해저지질 정보체계 기반 해빙 소멸 지역 해저지질환경 관측</li> </ul> |

| 분과                                          | 연구목적                                                           | 연구 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 북극<br>에너지·전략광물<br>자원 유망지역<br>도출 및 잠재력<br>평가 | 천연가스·하이드레이<br>트·해저망간 등 북극<br>에너지·전략광물자원<br>유망구역 도출 및<br>잠재력 평가 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극해 고부가가치 전략광물·에너지자원 탐사를 통<br/>한 분포와 특성 연구</li> <li>• 산·학·연 협동 연구를 통한 북극 에너지자원 잠재력<br/>평가</li> <li>• 국제협력(상호교환 등)을 통한 북극해 지질·지구물<br/>리 자료 확보</li> <li>• AI·첨단 분석 기술을 활용한 해저자원분포 및 특성<br/>규명</li> <li>• 북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성</li> </ul> |



## □ 투입 예산

○ 2027년부터 5년간 300억 원의 예산으로 계획

- 2031년에는 본격적인 차세대 해빙연구선 활용에 따른 예산 확대 추정

|                    |                                                    | 2027  | 2028  | 2029  | 2030  | 2031   | 합계     |
|--------------------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 예산<br>(단위:<br>백만원) | 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보<br>선점(현장탐사/해저지질 및<br>탐사장비 개발) | 1,900 | 1,500 | 1,800 | 2,300 | 4,000  | 11,500 |
|                    | 북서항로 개척을 위한<br>지구물리탐사(자료선점/국제<br>공동)               | 100   | 500   | 200   | 200   | 1,000  | 2,000  |
|                    | 북극 해저지질환경 변동성<br>관측과 온난화 가속화<br>정밀진단(환경/국제공동)      | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 2,000 | 4,000  | 10,500 |
|                    | 북극 에너지·전략광물자원<br>유망지역 도출 및 잠재력<br>평가(해저자원)         | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,000  | 6,000  |
|                    | 연도별 합계                                             | 4,500 | 4,500 | 4,500 | 5,500 | 11,000 | 30,000 |

## □ 사업 파급효과

○ 2027년부터 5년간 300억 원이 투입되었을 경우, 생산유발효과 474억 원, 부가가치유발효과 220.3억 원, 고용유발효과 175명으로 추정

○ (생산유발효과) 5년간 투입예산 300억 원 기준 158% 수준인 474억 원으로 추정

○ (부가가치유발효과) 부가가치유발효과는 약 220.3억 원으로 투입대비 73.5% 수준의 부가 가치를 창출

○ (고용유발효과) 5년간 약 175명의 고용이 유발되는 것으로 나타나 연간 약 35명 수준의 고용창출을 기대함

| 총 투입 예산(억 원) | 생산유발계수 평균       | 생산유발효과    |
|--------------|-----------------|-----------|
| 300          | 1.580           | 474억 원    |
|              | 부가가치유발계수 평균     | 부가가치유발효과  |
|              | 0.734           | 220.3억 원  |
|              | 고용유발계수 평균/10억 원 | 고용유발효과(명) |
|              | 5.818           | 174.5명    |

## □ 기대효과

- (영향력 확대) 북극 프론티어 해역 진출을 통한 고위도 해저지질정보 확보 및 해양과학 영토 확장
  - ※ 차세대 쇄빙연구선 활용 극대화로 북극 고위도 해역 국제공동연구 선도
  - ※ 한국-캐나다 국제공동 지구물리탐사를 통한 북서항로 유망해역 해저지질·지구물리 정보 확보 및 북극항로 활용 기반 마련
- (국격 제고) 북극 거버넌스 내 과학적 영향력 강화
  - ※ 북서항로 관련 국제공동조사 참여를 통해 북서항로 논의 및 협력 네트워크 내 우리나라의 전략적 위상 제고
- (사회·과학적 효과) 기후변화에 따른 북극 해저지질환경 변동성 관측을 통한 온난화 가속화 현상 규명, 기후변화 대응 리더십 확보
  - ※ 북극 국제거대과학프로그램 IODP 참여, 해저연구동토층 시추 관련 핵심자료 제공
- (정책적 효과) 북극해 신산업 창출 및 국가전략자산(해저자원, 항로 등)으로 활용 가능한 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축과 활용
  - ※ 북극 해저자원 활용 가능성 확대에 대비한 에너지 및 전략광물자원 유망구역 도출
  - ※ 산·학·연 북극 해저자원 공동연구를 통한 전문인력 양성과 관련 연구 생태 조성
- (기술적 효과) 극한지 맞춤형 무인·정밀 탐사 시스템 구축, 실증을 통한 기술자립 구현을 통한 첨단 빙권해역 해저탐사기술 자립화
  - ※ 무인 해저탐사기(ROV), 극한지용 고해상도 3차원 탄성파 장비 개발 및 활용
  - ※ 인공지능 기술을 활용한 고정밀 해저지질변동성 관측 기술 확보를 통한 연구효율 및 정확성 극대화

## □ 인포그래픽

### 연구 필요성



북극 해빙 감소로 인한 고위도 프론티어 해역의 전략적 가치 부상

북극해 진출 경쟁에 따른 북극 고위도 해역 진출과 선제적 탐사활동 필요



북극항로 · 해저자원 개발 경쟁 가속화에 따른 독자적 해저지질자료 및 정보체계 구축 필요



북극 중폭으로 인한 온실가스 방출, 지구온난화 가속화에 대한 국가적 차원의 대응 필요

북극개발시대를 대비하기 위한 체계적인 해저 자원 연구활동 수행과 북극 해저자원정보체계 구축 필요

### 연구 개요



북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점

북극 프론티어 해역 해저지질정보 확보  
해저지질시료 및 지구물리자료 분석과 종합적 지질해석 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 구축  
첨단 해저지질탐사 및 AI 기반 분석기술 확보



북서항로 개척을 위한 지구물리탐사

북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보



북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀 진단

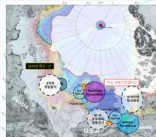
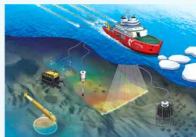
해저연구동토층 / 가스하이드레이트 분포와 특성 연구  
북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가  
프론티어 해역 해빙 소멸 지역 해저지질환경 변화 관측



북극 에너지·전략 광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가

고부가가치 전략광물 · 자원 분포 및 특성 연구  
산 · 학 · 연 협동 연구를 통한 북극 해저자원 잠재력 평가  
북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성

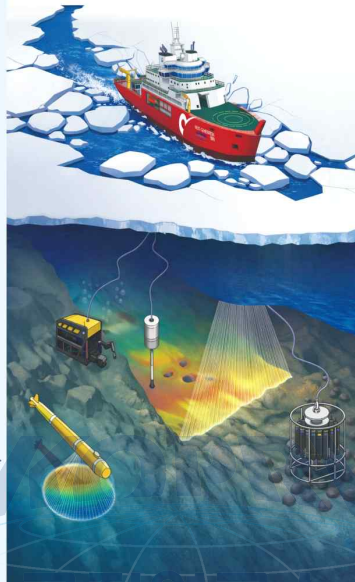
### 연구 차별성



북극해 연구/탐사 영역 확장 (북극 프론티어 해역 진출)  
산-학-연 공동 북극해 전략자원 잠재력 평가  
과거 온난기 환경변화 복원 연구  
메탄의 기원과 확산 예측 연구  
차세대 쇄빙연구선 활용기술 확보  
방권해역 탐사기술 고도화 추진 (해저탐사 원천기술 확보)

## 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발

연구기간: 2027년 ~ 2031년 (5년)



### 최종 목표

북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점을  
통한 과학영토 · 지질환경 · 북서항로 ·  
해저자원 가치 창출



해양수산부



국지연구소

### 차세대 쇄빙연구선



차세대 쇄빙연구선 고유의 임무 수행:

고위도 진출과 북극해 해저지질 및 자원탐사

건조 목적의 실현이 가능하도록 설계된 유일의 북극 연구과제

북극 해저지질 및 자원정보 선점의 차세대 쇄빙연구선 임무 수행

탐사와 탐사 시스템, 피스톤코어 등 핵심 장비 활용 및

북극해 해저정밀탐사 수행

연구선 활용기술 확보에 기여

### 추진체계

산 · 학 · 연 및 국제 기관과의 연구 추진체계 구성



### 활용방안 및 기대효과



---

## 제1장 서론

---

제1절 기획연구의 필요성

제2절 기획연구의 목표 및 주요내용



## □ 개요

- 최근 북극은 전 지구 평균보다 빠르게 온난화가 진행되면서 해빙 감소, 해양환경 변화, 해저영구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출 등 해저지질환경 변동이 복합적으로 심화되고 있음
- 이에 따라 과거 접근이 제한되었던 고위도 미탐사 해역의 과학조사 가능성이 확대되는 동시에, 북극항로 활용, 해저공간 이용, 전략자원 평가, 기후위기 대응 등 국가차원의 대응 수요가 증가하고 있음

## □ 추진 필요성

- 북극 해빙 감소와 해양 온난화는 해저면 안정성 저하, 퇴적환경 변화, 사면붕괴 가능성 증가 등과 연계되며, 특히 해저영구동토층 붕괴와 메탄 방출은 북극발 온난화 가속화 및 해저 인프라 안전성 문제와 직결될 수 있음
- 따라서 북극 프론티어 해역의 해저지형, 수심, 퇴적층 구조, 기반암 분포, 해저면 안정성, 가스하이드레이트 분포 등을 현장 기반으로 정밀 조사·진단할 수 있는 연구개발이 필요함

## □ 정책적·전략적 의미

- 북극 해저지질·지구물리 자료는 북극항로 안전성 검토, 해저 케이블·관로 등 해저공간 이용, 에너지·전략광물자원 잠재성 평가, 기후위기 대응 및 국가 북극전략 수립을 위한 핵심 기반자료임
- 북극해 탐사 경쟁이 심화되는 상황에서, 우리나라도 독자적 데이터 확보와 국제공동탐사 기반 강화를 통해 과학데이터 주권과 전략적 활용 역량을 선제적으로 확보할 필요가 있음

## □ 기획의 기본 방향

- 본 사업은 북극 프론티어 해역의 해저지질정보 선점, 해저지질환경 변동성 정밀진단, 북서항로 활용 기반 구축, 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 핵심 방향으로 설정
- 이를 위해 쇄빙연구선 기반 정기 탐사, 고위도 미탐사 해역 국제공동탐사, 빙권해역 특화 해저탐사기술 개발, 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 중점 추진하고, 기후위기 대응과 국가 북극정책 수립을 지원하는 국가 전략형 R&D 사업으로 기획하고자 함

# 제1장 서론

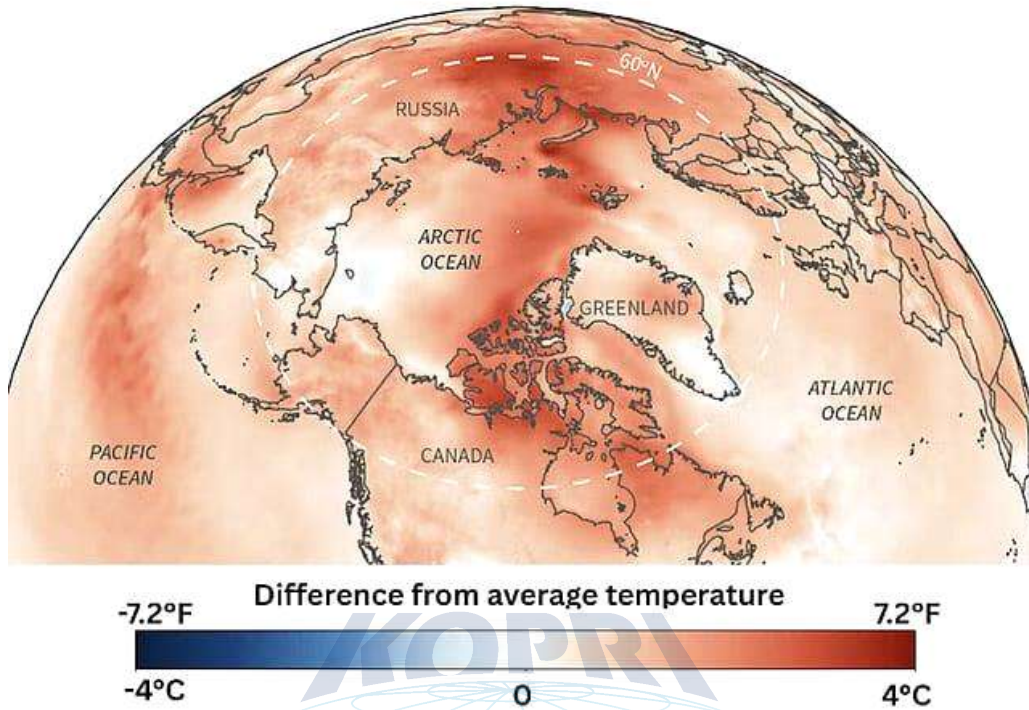
## 제1절 기획연구 필요성

### 1. 추진 배경 및 필요성

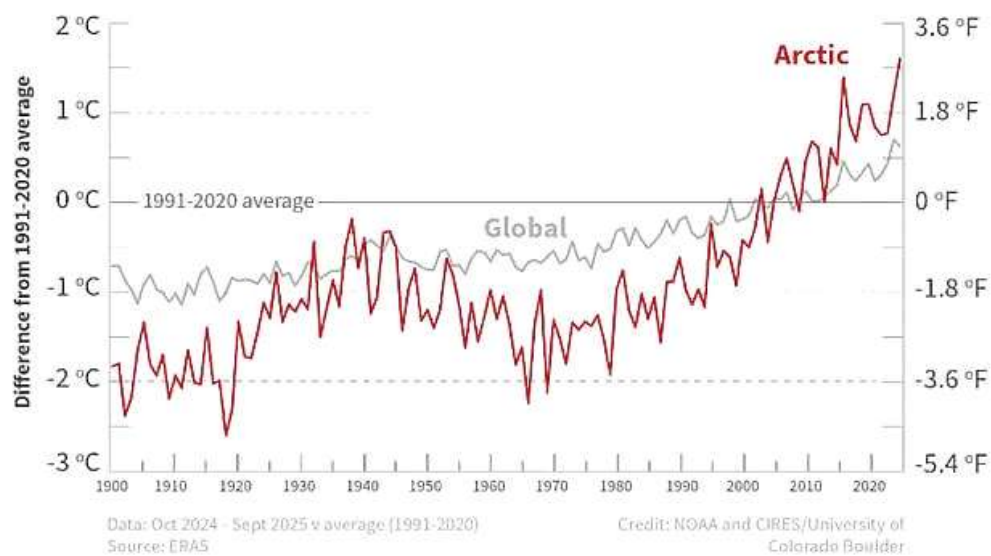
#### □ 북극 온난화 가속화 및 해빙의 급격한 감소

- 북극은 전 지구 평균보다 약 3~4배 빠르게 온난화가 진행되는 '북극 증폭(Arctic amplification)' 현상이 뚜렷하게 나타나는 지역으로, 하절기 해빙 면적과 두께가 장기적으로 감소하는 추세를 보이고 있음
- 특히 해빙 감소는 반사율이 높은 눈·얼음 표면을 줄이고 상대적으로 어두운 해수면 노출을 확대하여 표면 알베도를 낮추며, 이로 인한 태양복사 흡수 증가는 북극 온난화와 해빙 감소를 다시 촉진하는 빙-알베도 양의 되먹임으로 작용하고 있음
- 해빙 감소는 단순한 면적 축소에 그치지 않고 해빙 두께 감소, 다년생 해빙 비중 축소, 결빙·해빙 시기 변화로 이어지고 있으며, 이는 북극해의 열·염분 구조, 해양 순환 및 해양 환경 변화에도 영향을 미치고 있음
- 또한 해빙 감소로 노출 해역이 확대되면 파랑과 폭풍의 영향이 증가하여 연안 및 대륙붕의 침식, 퇴적물 이동, 퇴적환경 변화가 심화될 수 있으며, 이는 해저면 안정성과 해저지질환경 변화에도 영향을 줄 가능성이 있음
- 해양 온난화와 해저로 전달되는 열적 영향은 북극 대륙붕에 분포하는 해저영구동토층 붕괴와 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출 등과도 연계될 수 있어, 북극 해저지질환경 변화와 온난화 피드백을 함께 진단할 필요성이 커지고 있음
- 해빙 감소는 북극해 접근성을 높여 그동안 조사가 어려웠던 고위도 미답 해역에 대한 진출 가능성을 확대하고 있으며, 이에 따라 신규 해역의 해저지질 조사와 기초자료 확보 필요성이 더욱 커지고 있음
- 북극 온난화는 지역적 현상에 국한되지 않고 대기-해양 상호작용을 통해 중위도 이상기상, 해양생태계 재편, 탄소순환 변화 등 전 지구 기후시스템의 변동성 확대에 파급될 수 있음
- 따라서 북극 온난화와 해빙 감소에 따른 해양·해저환경 변화에 선제적으로 대응하기 위해서는 북극 프론티어 해역에 대한 국가 차원의 지속적 관측, 정밀 조사 및 과학적 진단체계 마련이 필요함

## 2025 Arctic temperatures were much warmer than average



## Arctic warming has outpaced global warming



[그림 1-1] 전 지구 평균 대비 북극권 기온 상승 추이 및 2025년 기온 편차 분석(NOAA and CIRES/University of Colorado Boulder, 2025)

#### □ 북극 프론티어 해역에 대한 해저지질정보 선점 필요

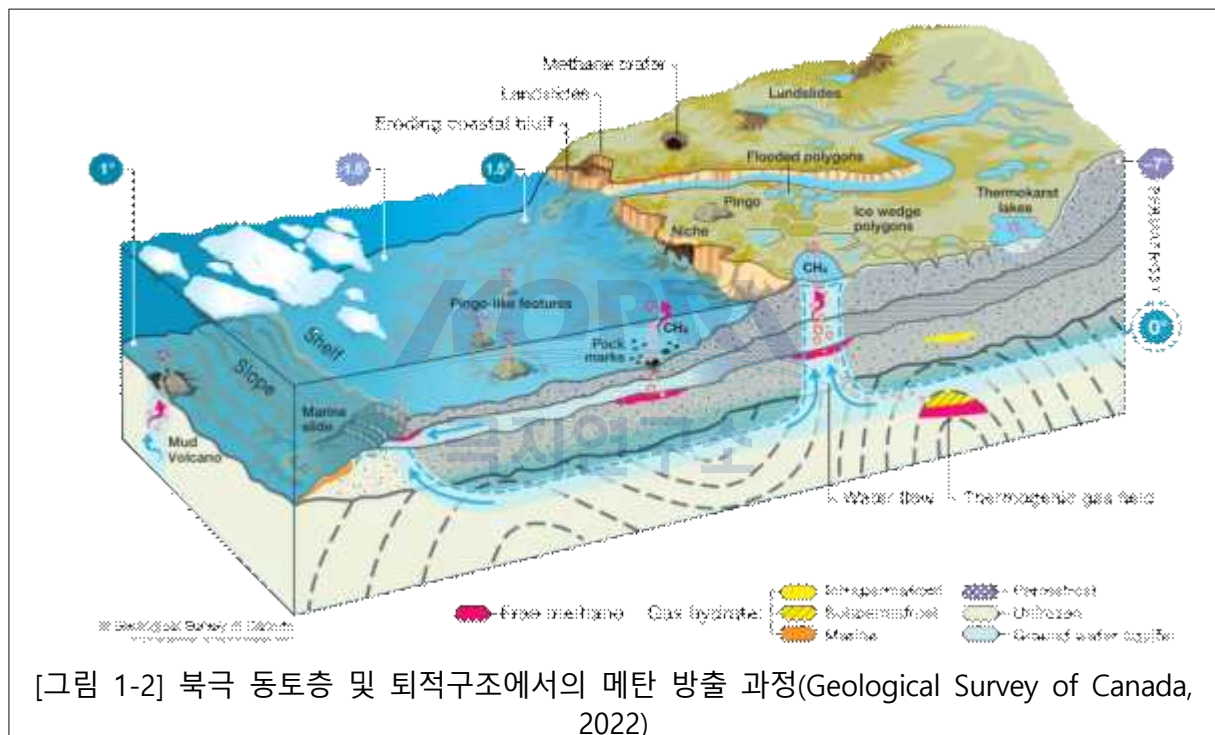
- 해빙 감소로 북극해 접근 가능한 해역이 확대되면서, 북극 연안국들은 자국 관할수역과 인접 해역을 중심으로 해저지형, 지질구조, 해양환경 자료 확보를 지속적으로 확대하고 있음
- 미국은 2026년 보퍼트해 탄성파 탐사 자료 5종을 추가 공개하는 등 북극 해역의 지질·지구물리 자료 축적과 활용 기반을 확대하고 있음. 또한, 캐나다는 북극항로의 안전 확보를 위해 수로조사와 해도 고도화를 계속 추진하고 있으며, 현재도 캐나다 북극해 핵심 항로 가운데 충분한 조사가 이루어진 구간은 44.7% 수준에 머물고 있어 추가 조사 수요가 큰 상황임
- 이처럼 북극 연안국들은 해저지질정보를 항로 안전, 자원 잠재력 평가, 해저환경 변화 대응을 위한 기초자료로 인식하고 관련 조사와 자료 축적을 선제적으로 추진하고 있음. 결국 초기 자료를 먼저 확보한 국가가 향후 연구 방향 설정과 국제협력, 정책 대응에서 유리한 위치를 차지할 가능성이 크므로, 우리나라도 북극 프론티어 해역에 대한 독자적 자료 확보를 통해 데이터 주도권을 선제적으로 확보할 필요가 있음
- 중국과 일본 등 비연안 주요국도 북극 관련 연구활동과 관측 인프라 확충을 지속하고 있음. 중국은 2025년 제15차 북극 과학조사를 수행하여 척치해 대지, 캐나다 분지, 중앙북극해에서 종합 해양환경 조사와 고위도 관측을 진행하였고 일본은 북극전용 쇄빙연구선 Mirai II를 2021년부터 건조 중이며 2026년 완공 예정임
- 중국과 일본은 모두 2013년부터 북극이사회 옵서버로 참여하고 있어, 과학조사와 국제협력을 함께 확대하며 북극 관련 정보와 경험을 꾸준히 축적하고 있음. 이러한 상황을 고려하면, 우리나라도 북극 프론티어 해역에 대한 해저지질조사를 확대하여 자료를 직접 확보하고 이를 바탕으로 국제공동연구와 정책 대응, 북극 관련 산업 진출에 활용할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있음

#### □ 지구온난화 가속화에 따른 해저환경 변화와 위험 증대

- 지구온난화에 따라 해저 영구동토층이 붕괴되면 퇴적물의 강도와 탄성 특성이 약화되고 공극수와 가스의 이동 경로가 변화할 수 있음. 이 과정에서 가스 시프(seep), 천부 가스 축적, 지반 약화와 같은 현상이 나타날 수 있으며, 동시에 해저 퇴적층 내 메탄가스가 해저면으로 방출될 가능성도 커짐
- 해저 영구동토층 붕괴에 따른 메탄 방출은 단순한 국지적 환경 변화에 그치지 않고 온실가스 증가를 통해 온난화를 더욱 가속화할 수 있는 요인으로 작용할 수 있음. 이러한 점에서 북극해 메탄 방출은 기후변화와 해저환경 변화를 함께 증폭시킬 수 있는 잠재적 위

험요인으로 논의되고 있으며, 특히 천부 지층에서의 가스 거동은 해저지질 및 지반 안정성과도 밀접하게 연결됨(그림 1-2)

- 또한 해저 영구동토층 붕괴와 천부 가스 거동 변화는 해저 사면 붕괴, 천부 가스 팽창, 퇴적층 내부의 압력 증가 등으로 이어질 수 있으며, 이는 해저지질 재해를 유발할 수 있는 주요 요인임. 향후 북극항로 이용 확대와 해양활동 증가를 고려하면, 이러한 변화는 해저 인프라와 운용 안전성 측면에서도 중요하게 검토될 필요가 있음
- 따라서 해빙 감소, 해저환경 변화, 가스 거동, 지반 안정성 문제를 개별 현상이 아닌 하나의 연계된 시스템으로 이해할 필요가 있음. 이에 대응하기 위해서는 현장 기반의 정밀 관측, 지구물리기반 분석, 검증자료 축적을 통해 관련 위험을 체계적으로 파악할 필요가 있음



#### □ 북극해 해저지질 자료의 부족 및 관측 공백

- 기존의 위성 및 표층 중심 관측은 해빙, 해수면, 표층 수온 등의 변화를 파악하는 데에는 유용하나, 해저에서 진행되는 퇴적층 구조 변화, 해저 영구동토층 변화, 천부 가스 분포, 유체 이동과 같은 현상을 직접 파악하는 데에는 한계가 있음
- 특히 해저 영구동토층, 가스하이드레이트, 천부 가스의 변화는 해저면 아래 얇은 지층에서 발생하기 때문에 변화 양상과 원인을 정확히 파악하기 위해서는 현장 기반의 정밀 자료 확보와 종합적인 분석이 필요함. 이를 위해서는 천부지층탐사(SBP), 다중채널 탄성파탐사(MCS), 다중빔음향측심(MBES), 코어링 및 공극수 분석 등 다양한 자료를 함께 확보하고

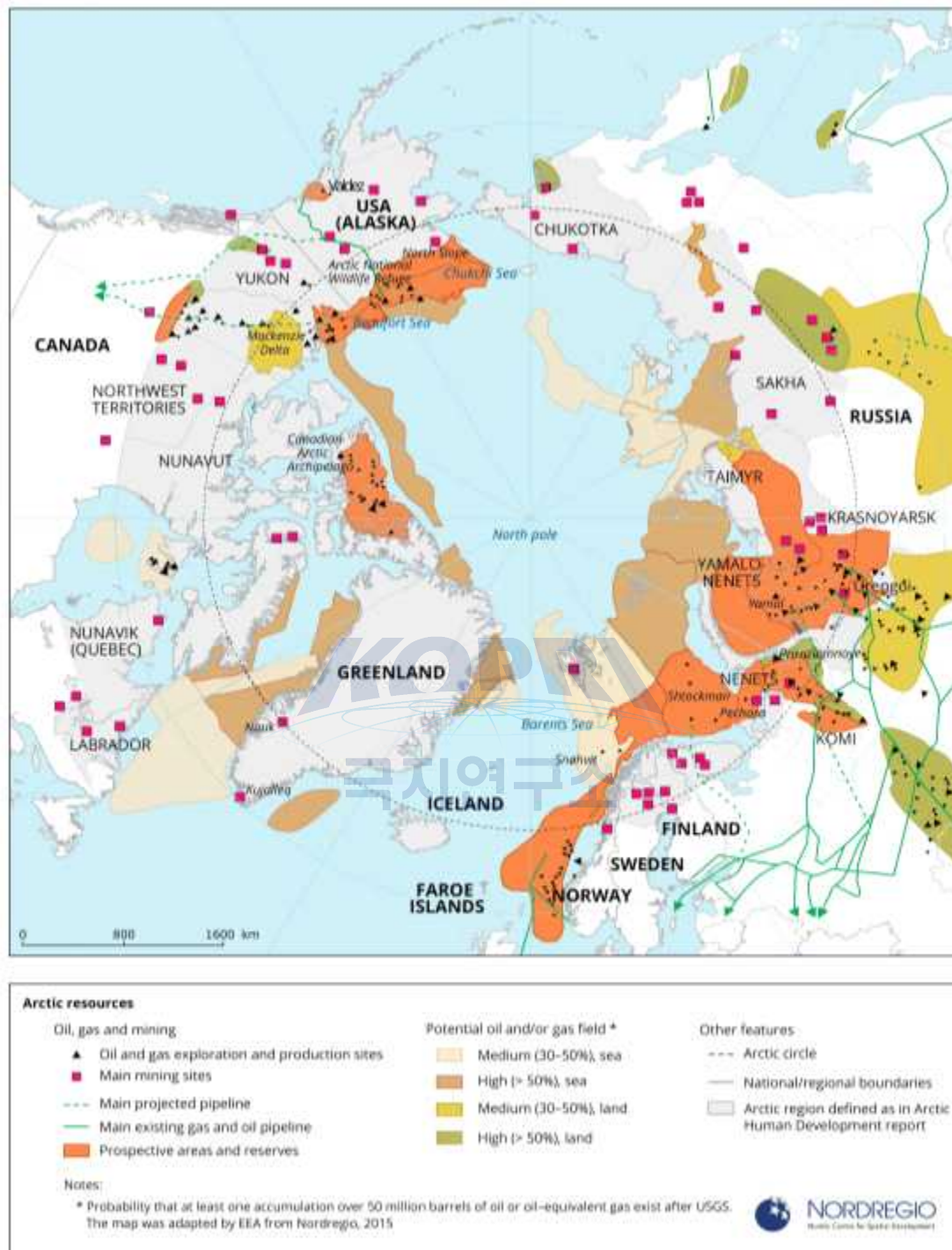
통합적으로 해석할 필요가 있음

- 북극해는 해역별로 지질 특성, 빙하기 이력, 퇴적 환경이 서로 달라 해저지질 변화 양상과 위험 요인도 다르게 나타날 수 있음. 따라서 자료 공백이 클수록 해역별 특성 비교, 변화 해석, 통합적 검증에 한계가 발생
- 자료 부족과 관측 공백은 해저지질 변화에 대한 예측의 불확실성을 높이고 해저지질 재해의 전조 현상을 조기에 식별하기 위한 기준 마련과 위험도 평가를 어렵게 만드는 요인으로 작용함
- 특히 고위도 해역은 오랫동안 해빙으로 인해 접근이 제한되어 조사가 충분히 이루어지지 못하였으나, 최근 해빙 감소로 접근 가능 범위가 점차 확대되고 있음. 이에 따라 그동안 조사 공백이 컸던 해역에 대한 선제적 탐사와 기초자료 확보의 필요성이 더욱 커지고 있음

#### □ 지질 재해 전조 규명 및 정밀 기준자료 확보의 시급성

- 해저 사면 붕괴, 가스 시프, 천부 가스 축적 등은 단발적으로 발생하는 현상이 아니라, 장기간 누적되는 미세한 지반 변화와 유체 이동의 결과로 나타날 수 있음. 따라서 이러한 현상을 조기에 파악하기 위해서는 발생 전 변화와 진행 과정, 결과를 종합적으로 파악할 수 있는 반복 관측과 기준자료 확보가 중요함
- 단기간의 일회성 탐사만으로는 계절 변화와 연차 변동을 구분하기 어렵기 때문에, 정기적이고 반복적인 탐사와 장기적인 자료 축적 체계가 필요함. 이러한 자료가 확보되어야 해저환경 변화의 진행 양상을 보다 정확하게 파악할 수 있음
- 현장 기반의 정밀 자료는 해저지질 변화 해석뿐 아니라 수치모델, 기후모델, 지반안정성 평가의 입력자료로 활용될 수 있으며, 이를 통해 예측 결과의 신뢰성을 높일 수 있음
- 특히 북극항로 이용이 확대될 경우, 해저지질 재해는 항로 주변 해저환경의 안정성과 해양활동의 안전성에 직접적인 영향을 줄 수 있음. 따라서 해저 사면 붕괴, 천부 가스 거동, 지반 약화와 같은 위험요인의 전조를 조기에 식별하고 변화를 지속적으로 추적하는 것은 향후 항로 운영과 해저 인프라 안전성 확보 측면에서도 중요함

- 북극해 에너지자원 잠재력에 대한 국제적 관심 증가 및 자원 확보 경쟁 심화
- 해빙 감소로 북극해 접근성이 높아지면서 북극권의 석유·가스 개발은 기후, 에너지, 안보 이슈와 맞물려 전략적 중요성이 커지고 있음
- 2025년 기준 북극 지역 총 생산량은 일일 평균 약 914.8만 배럴에 달하며, 2030년 이후에도 생산량 증가세가 지속될 것으로 전망됨(World Oil, 2026)
- 북극 지역에는 석유 약 900억 배럴, 천연가스 약 1,670조  $\text{ft}^3$  규모의 미발견 회수 가능 자원이 분포하는 것으로 제시된 바 있으며, 가스하이드레이트를 포함한 비전통 자원에 대한 잠재력도 지속적으로 논의되고 있음(U.S. Geological Survey, 2008)
- 다만 가스하이드레이트와 같은 비전통 자원은 상업성, 환경영향, 개발 규제 등에 대한 불확실성이 커, 개발 가능성을 판단하기 위해서는 정밀탐사와 검증, 위험요인 평가가 우선적으로 이루어질 필요가 있음
- 북극 지역의 미발견 자원은 전 세계 미발견 자원 대비 석유 약 13%, 천연가스 약 30% 수준을 차지하는 것으로 제시되고 있어, 북극해가 장기적인 에너지 공급원으로서 중요한 의미를 가진다는 점을 보여줌(U.S. Geological Survey, 2008)
- 따라서 북극해 에너지자원에 대한 기초자료를 선제적으로 확보하고 자원 잠재력과 위험요인을 종합적으로 평가할 수 있는 조사 역량을 갖추는 것이 중요함



[그림 1-3] 북극권 내 석유·가스 및 광물자원 분포 현황(European Environment Agency, 2017)

#### □ 자원 안보 확보를 위한 독자적 평가 역량 강화

- 연안국 중심의 자원 관리 강화와 국제 정세 변화에 대응하기 위해서는 공해상과 프론티어 해역의 자원 잠재력을 우리나라가 스스로 조사하고 판단할 수 있는 역량을 갖추는 필요가 있음
- 북극권 미발견 석유·가스 자원의 약 84%가 해상에 분포하기 때문에 외부 자료에만 의존하지 않고 해저지질 정보를 직접 확보하고 해석할 수 있어야 자원 안보 측면에서 안정적으로 대응할 수 있음
- 해양자원 비중이 높아 해저지질, 지반 안정성, 유체와 가스 거동에 대한 이해가 자원 개발 가능성 평가의 핵심 요소가 됨. 위성이나 표층 자료만으로는 이러한 정보를 충분히 파악하기 어려우므로 해저면과 천부 지층을 직접 조사할 수 있는 해저지질 자료 확보가 필요함
- 전략광물과 가스하이드레이트 등 잠재 자원에 대해서도 지구물리탐사, 지질시료, 지화학 분석을 함께 활용하는 평가체계를 갖추면, 유망지역을 보다 체계적으로 도출할 수 있고 공급망 다변화에 필요한 기초자료도 축적할 수 있음. 이는 단순한 자원량 추정에 그치지 않고 개발 가능성과 위험요인을 종합적으로 검토할 수 있는 기반이 된다는 점에서 중요함
- 확보한 해저자원 정보는 유망해역의 우선순위 설정, 후속 정밀탐사 대상 선정, 국제공동연구 및 협력사업의 근거 마련, 자원 개발과 해저 인프라 입지 검토, 위험요인 평가 등 다양한 정책·연구 판단에 활용할 수 있음
- 실제로 북극 해저지형과 해저면 정보는 연구자와 기관의 의사결정에 활용되는 기본 자료이며, 최근 북극권에서는 해빙 감소에 따라 선박 통항, 에너지 개발, 광업 활동이 늘어날 가능성에 대응해 연안과 해저면을 지속적으로 조사·지도화하고 있음

#### □ 북극항로 및 해저 인프라 시대 대응을 위한 해저지질정보 확보 필요

- 해빙 감소로 그동안 접근이 제한되었던 프론티어 해역이 점차 개방되면서 북극항로의 활용 가능성과 함께 해저 케이블, 관로 등 해저 인프라 설치 수요도 증가하고 있음. 이에 따라 북극해 해저환경과 해저지질 특성에 대한 정밀한 정보 확보 필요성이 더욱 커지고 있음
- 특히 이는 「국정과제 56」의 북극항로 대응 방향과도 맞닿아 있으며, 향후 우리나라의 북극항로 활용, 해운·물류 경쟁력 확보, 해양활동 안전성 제고를 위해서도 해저지질정보 확보가 중요한 정책 수요로 이어질 수 있음
- 다만 북동항로를 포함한 북극항로는 해빙 변화, 천부지층 특성, 해저지형, 퇴적환경, 해저지질 재해 가능성 등에 따라 운항 및 인프라 운영 위험이 달라질 수 있어, 단순한 항로

개방 가능성만으로 접근하기 어려움. 따라서 항로 주변 해역의 해저지질 특성과 잠재 위험요인을 함께 파악할 필요가 있음

- 정밀한 해저지형 및 해저지질 정보가 부족할 경우, 선박 운항 과정에서의 안전성 저하뿐 아니라 해저 케이블과 관로 설치, 유지관리 과정에서도 추가 비용과 운영 지연이 발생할 수 있음. 따라서 해저 인프라 안전성과 경제성을 높이기 위해서도 기초자료 확보가 중요함
- 한편 북서항로는 향후 대체 또는 보완 항로로서의 가능성이 있으나, 관련 해역에 대한 해저지질조사는 아직 충분하지 않은 구간이 많음. 따라서 북서항로 개척 가능성을 검토하고 장기적으로 활용 기반을 마련하기 위해서도, 선제적인 해저지질 탐사와 자료 축적이 필요



[그림 1-4] 북극해 해빙 감소 및 북극항로 모식도

#### □ 국가 차원의 체계적 지원과 중장기 연구 추진 필요

- 북극해는 항로, 자원, 기후, 환경, 안전 이슈가 동시에 맞물려 있는 해역으로 개별 분야를 각각 독립적으로 접근하는 방식으로는 효과적으로 대응하기 어려움. 따라서 북극에서의 전략적 기회 창출과 기후·환경 변화 대응을 함께 고려하는 국가 차원의 종합적인 탐사와 연구가 필요함
- 특히 북극 해빙 감소로 프론티어 해역 접근성이 높아지면서 북극항로 활용, 전략자원 확보, 해저환경 변화 대응에 필요한 자료 수요가 빠르게 증가하고 있음. 이러한 변화는 국가 경제·안보·외교와도 직결되는 사안이므로 정부가 중장기 관점에서 안정적으로 지원할 필요가 있음
- 북극 연구는 한 번의 탐사만으로 충분한 결론을 도출하기 어려우며, 선제 탐사를 통한 자

료 확보, 반복 관측을 통한 변화 추적, 장기적인 자료 축적과 활용체계 마련이 함께 이루어져야 함. 단발성 항차나 일부 장비 중심의 조사만으로는 위험요인, 자원 잠재력, 인프라 관련 정보를 종합적으로 파악하는 데 한계가 있음

- 북극항로와 같은 고위도 프론티어 해역은 조사 여건이 까다롭고 국제협력, 탐사 인프라, 자료 관리가 함께 뒷받침되어야 하므로, 개별 기관이나 단년도 과제로는 안정적으로 추진하기 어려움. 이에 따라 정부 주도의 지속적인 연구체계를 마련하여 탐사, 관측, 분석, 자료 활용이 연속적으로 이어지도록 할 필요가 있음
- 아울러 본 사업은 「국정과제 56」, 「극지활동 진흥법」, 「해양수산과학기술육성법」 등과 연계되는 과제로, 북극 해역 조사와 극지 연구개발, 국제협력 확대를 위한 국가 차원의 지원 필요성이 제도적으로 뒷받침되고 있음. 따라서 본 연구는 개별 연구에 머무르는 것이 아니라 정부가 정책적으로 추진하고 지속적으로 지원할 필요가 있는 중장기 사업임
- 2030년 차세대 쇄빙연구선 투입 이전에 핵심 해역의 기초자료와 탐사기술을 미리 확보하지 못하면, 향후 연구선 활용 효율이 저하되고 초기 투자 효과도 미비할 수 있음. 따라서 지금 시점의 선제적 투자와 중장기 연구 추진이 중요함

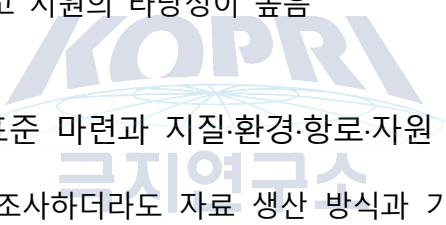


## 2. 국고 지원 적합성



### 가. 정책적 관점 필요성

- 국가 전략자산으로서의 해저지질자료 확보와 공공성 기반 투자 필요
- 북극은 항로, 에너지·전략광물, 기후변화 대응, 해저환경, 국제협력이 동시에 맞물려 있는 복합 전략공간으로, 개별 기관이나 민간이 단독으로 대응하기에는 한계가 큰 해역임. 따라서 북극 관련 탐사와 해저지질자료 확보는 국가 차원에서 방향을 정하고 지속적으로 추진할 필요가 있음
- 특히 해빙 감소로 프론티어 해역 접근성이 높아지면서, 북극항로 활용 기반 마련, 해저환경 변화 대응, 에너지·전략광물 유망지역 평가에 필요한 해저지질정보의 중요성이 빠르게 커지고 있음. 해저지질자료는 단순한 연구자료가 아니라 항로 안전 검토, 자원 잠재력 판단, 국가 전략 수립을 뒷받침하는 핵심 기초자료로 활용될 수 있음
- 그러나 고위도 프론티어 해역 탐사는 비용이 크고 장기간 자료 축적이 필요하며, 성과가 단기간에 가시화되기 어려운 특성이 있음. 또한 조사 결과는 항로, 자원, 해저환경, 국제협력 등 여러 분야에서 함께 활용되는 공공성이 큰 성격을 가짐. 이러한 점을 고려하면 민간이나 개별 기관이 단독으로 지속 추진하기보다 정부가 중장기 사업으로 안정적으로 지원하는 것이 타당함

- 과학적 근거에 기반한 정책 수립을 위해서는 자료를 지속적으로 확보하고 체계적으로 관리하며, 여러 기관이 함께 활용할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있음. 이러한 기반은 한 기관의 개별 연구만으로 구축하기 어렵기 때문에 국고를 바탕으로 꾸준히 축적·관리하는 방식이 보다 현실적임
  - 선제적으로 확보한 해저지질정보는 향후 북극항로 관련 정책 검토, 국제공동연구, 자원 유망지역 평가, 해저 인프라 검토, 차세대 쇄빙연구선 운용 등에 반복적으로 활용될 수 있음. 이처럼 한 번 확보한 자료가 다양한 정책·연구·산업 판단의 근거로 이어진다는 점에서 국고 지원의 효과는 단년도에 그치지 않고 장기적으로 확대될 수 있음
  - 반대로 우리나라가 독자적으로 확보한 자료가 부족할 경우, 국제협력, 공동연구, 산업 검토 과정에서 타국 자료에 의존할 가능성이 커짐. 이 경우 자료 활용 범위가 제한될 수 있고 해석과 판단의 주도권도 약화될 수 있으므로 국가 주도의 선제적 투자가 필요함
  - 또한 2030년 차세대 쇄빙연구선 투입 이전에 핵심 해역의 기초자료와 탐사기술을 선제적으로 확보해 두어야 향후 북극 고위도 해역으로 향하는 차세대 쇄빙연구선 운용 효율성과 활용도를 높일 수 있음. 따라서 본 사업은 대형 연구 인프라의 성과를 높이기 위한 사전 투자라는 점에서도 국고 지원의 타당성이 높음
- 
- 해저지질자료의 국가 표준 마련과 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 필요
  - 북극 해역의 해저지질을 조사하더라도 자료 생산 방식과 기록 체계가 다르면 결과를 직접 비교하거나 연계 해석하기 어렵고 후속 연구나 정책 검토 단계에서도 활용성이 떨어질 수 있음
  - 자료에 대한 설명 정보가 부족하거나 정리 기준이 일관되지 않으면, 이미 확보한 자료라도 다시 확인하고 재정리하는 데 많은 시간과 비용이 소요됨. 이는 연구의 연속성을 낮출 뿐 아니라, 정책 수립과 국제협력, 산업 검토 과정에서 필요한 정보를 적시에 활용하지 못하게 만드는 요인이 될 수 있음
  - 따라서 북극 해저지질자료는 국가 차원의 표준을 마련하고 이를 바탕으로 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계를 구축할 필요가 있음. 이를 통해 새롭게 생산되는 자료를 같은 기준으로 축적할 수 있고 해역별 자료를 체계적으로 연계하여 장기적으로 활용할 수 있는 기반도 갖출 수 있음
  - 국가 표준과 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계가 마련되면 새로 확보한 자료를 기존 자료와 바로 연결하여 비교·검토할 수 있고 북극항로 검토, 자원 유망지역 평가, 해저환경 변화 분석, 국제공동연구 협의 등 다양한 분야에서 공통으로 활용할 수 있는 기반이 형성됨. 이는 자료를 단순히 보관하는 수준을 넘어 정책·연구·산업 의사결정에 직접 활용할 수 있는 체계로 발전시킨다는 점에서 중요함

- 특히 북극 프론티어 해역은 단기간의 단발성 조사만으로 충분한 결론을 내리기 어려운 해역이므로 반복 탐사와 장기적인 자료 축적이 함께 이루어져야 함. 이때 자료가 동일한 기준 아래 지속적으로 축적되어야 시계열 변화 파악이 가능하고 해역별 특성 비교와 후속 정밀조사의 우선순위도 보다 체계적으로 수행할 수 있음
- 결국 북극 해저지질자료는 단순한 연구성과가 아니라 항로, 자원, 기후, 해저환경, 국제협력과 연결되는 국가 차원의 공통 자산으로 관리될 필요가 있음. 따라서 자료의 생산과 관리, 활용 전반에 적용할 수 있는 국가 표준을 선제적으로 마련하고 플랫폼을 구축하는 것은 향후 북극 정책과 연구를 안정적으로 추진하기 위한 핵심 기반이 됨

#### □ 국제협력 및 과학외교 수행 기반 강화

- 우리나라는 북극이사회 영구 옵서버 국가로서 북극 온난화, 해양환경 변화, 북극항로 등 주요 현안에 지속적으로 대응할 필요가 있음. 이러한 국제 논의에서 실질적인 기여와 발언권을 확보하기 위해서는 우리나라가 직접 확보한 현장자료와 이를 바탕으로 축적한 과학적 성과가 꾸준히 뒷받침되어야 함
- 북극에서의 국제공동탐사는 단순한 학술 교류에 그치지 않음. 협력 대상 해역 선정, 장비 운용, 역할 분담, 자료공유, 성과확산까지 함께 추진되어야 하므로 처음부터 중장기 협력 체계로 접근할 필요가 있음. 특히 북극은 해빙, 기상, 항차 운영 등 현장 제약이 커 탐사 기회가 많지 않기 때문에, 협력의 지속성과 신뢰를 유지하려면 정부 차원의 안정적인 지원이 필요함
- 또한 북극 프론티어 해역에 대한 탐사와 자료 확보를 초기 단계에서 선점하지 못하면, 향후 국제공동연구의 참여 범위와 자료 접근성, 협력 주도권이 제한될 가능성이 큼. 따라서 국제협력은 필요할 때마다 개별적으로 추진하기보다, 국가가 사업의 연속성을 보장하면서 장기적으로 관리하는 방식이 더 적절함
- 극지연구소는 그동안 캐나다 보퍼트해 공동연구를 통해 연안국과의 현장 탐사 경험을 축적해 왔으며, 최근에는 캐나다 지질조사소(GSC)가 본 사업의 국제공동탐사 참여 의사를 표명함에 따라 캐나다 북극해 및 북서항로를 포함한 후속 공동연구 확대 가능성을 보다 구체화하고 있음
- 미국 MBARI도 보퍼트해 공동탐사 성과를 바탕으로 연구인력 교류, 고해상도 해저지질관측과 시료 확보를 위한 첨단 탐사기술 교류 관련 협력 의향을 밝혔고 미국 해군연구소(NRL)는 알래스카 보퍼트해 해저영구동토층 대상 정밀탐사 및 공동연구에 높은 관심을 표명하고 있음. 이는 본 사업이 단순한 국내 연구기획이 아니라 해외 핵심 협력기관이 필요성과 연계 가능성을 인정한 실행형 국제협력 사업임을 보여줌

- 특히 캐나다와 미국은 북극에서 중요한 연안국가로 이들과의 협력은 북극 프론티어 해역 진출과 북서항로 관련 공동탐사 확대 측면에서 의미가 큼. 북서항로 관련 국제공동 지구 물리탐사 추진 가능성이 제시되고 있고 EEZ 진입을 포함한 전략적 국제공동탐사도 본 사업의 핵심 성과로 설정되어 있는 만큼, 해양수산부가 이를 정책적으로 뒷받침할 필요가 있음
- 따라서 본 사업은 국제공동탐사와 공동연구를 일회성 교류가 아니라 국가 차원의 지속 가능한 협력체제로 발전시키기 위한 기반사업이라 할 수 있음. 국고 지원을 통해 협력 기반을 안정적으로 운영할 경우, 우리나라의 북극 관련 국제협력 영향력을 높일 수 있을 뿐 아니라, 향후 북극항로, 해양환경, 전략자원과 관련한 국제 논의에서도 우리 측 협상력과 정책 활용 가능성을 함께 높일 수 있음

<표 1-1> 국제협력 기반 확보 현황

| 협력기관                  | 협력문서                        | 주요 내용                                                                                                                   | 본 사업과의 연계성                                                                   |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 캐나다<br>지질조사소<br>(GSC) | 협력의향서<br>(Letter of Intent) | 본 사업의 참여 의사를 표명하였으며, 캐나다 보퍼트해 공동연구 성과를 바탕으로 캐나다 북극해 및 북서항로를 포함한 후속 공동탐사 확대, 자료·전문성·인프라 공유 가능성을 제시함                      | 북서항로 관련 국제공동 지구물리탐사의 실현 가능성을 뒷받침하는 핵심 근거로 활용 가능하며, 정책적 타당성과 국제협력 기반의 구체성을 강화 |
|                       | 기존 협력 문서(MOU)               | 캐나다 측과의 기존 협력 기반을 바탕으로 현장 탐사, 후속 공동연구로 이어질 수 있는 협력 채널을 확보함                                                              | 기존 국제공동연구 경험과 협력 기반 위에서 추진되는 사업임                                             |
| 미국<br>MBARI           | 협력의향서<br>(Letter of Intent) | 최근 보퍼트해 공동탐사 성과를 바탕으로 향후 5년간 북극 연구 협력 확대 의향을 제시하였으며, 연구인력 교류, 해양·해저 탐사 기술 분야 기술 논의, 고해상도 매핑 및 장거리 수중 플랫폼 관련 협력 가능성을 제안함 | 첨단 해저탐사장비(AUV·ROV) 활용, 정밀 해저지질정보 확보, 첨단 탐사기술 내재화 연계 가능                       |
| 미국 NRL                | 협력의향서<br>(Letter of Intent) | 알래스카 보퍼트해에서의 해저연구동토층 공동연구 가능성에 대한 과학적 관심과 협의 의향을 표명함                                                                    | 캐나다 보퍼트해 중심의 기존 연구를 알래스카 연안-대륙붕까지 확대할 수 있는 연구로 확장 가능                         |



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

Ottawa, March 13, 2026

Dr. Hyoung Chul Shin  
President  
Korea Polar Research Institute  
26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu,  
Incheon, 21990  
Republic of Korea

**Letter of Support of Dr. Seung-Goo Kang application to the Research and Development Funding Program of the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) of the Republic of Korea.**

Dear President Shin,

I am writing to express the strong support of the Geological Survey of Canada (GSC) for the funding request submitted by Dr. Seung-Goo Kang, Principal Research Scientist at the Korea Polar Research Institute (KOPRI) for the project tentatively entitled "Integrated Seabed Geological Survey and Geo-environmental Assessment of the Arctic Frontier Region" to the Research and Development Funding Program of the Ministry of Oceans and Fisheries of the Republic of Korea.

Over the previous funding cycle, this collaboration has enabled important geoscientific surveys in the Canadian Beaufort Sea. These efforts have significantly contributed to improve our understanding of the geological characteristics of Canada's Arctic offshore regions. Such work is essential for advancing the geoscientific knowledge base required to inform responsible natural resource development and to better understand environmental change in the context of a rapidly warming Arctic.

This program will provide valuable opportunities to expand these efforts through additional geoscientific surveys conducted aboard icebreaker research vessels operated by KOPRI. Access to these platforms represents a unique and strategic capability that will enable the acquisition of high-quality datasets in remote and ice-covered regions that remain poorly understood.

This funding will also strengthen collaboration between KOPRI and the GSC. Continued engagement will support the exploration of future joint survey activities in the Canadian Arctic and including the Northwest Passage, fostering international scientific cooperation and the sharing of expertise, data, and infrastructure.

Our collaboration with KOPRI aligns strongly with the core mandate of the GSC, particularly in supporting initiatives that unlock the potential of Canada's North, strengthen international geoscience collaboration, enable climate adaptation and resilience across Canada, and improve our understanding of offshore natural hazards. Furthermore, advancing geoscientific knowledge of the Arctic contributes directly to Canada's capacity to reinforce its sovereignty and stewardship in this strategically important region.

Canada

[그림 1-7] 캐나다 지질조사소 협의의향서

□ 국가적 북극정책 이행을 위한 실행형 R&D 추진 필요

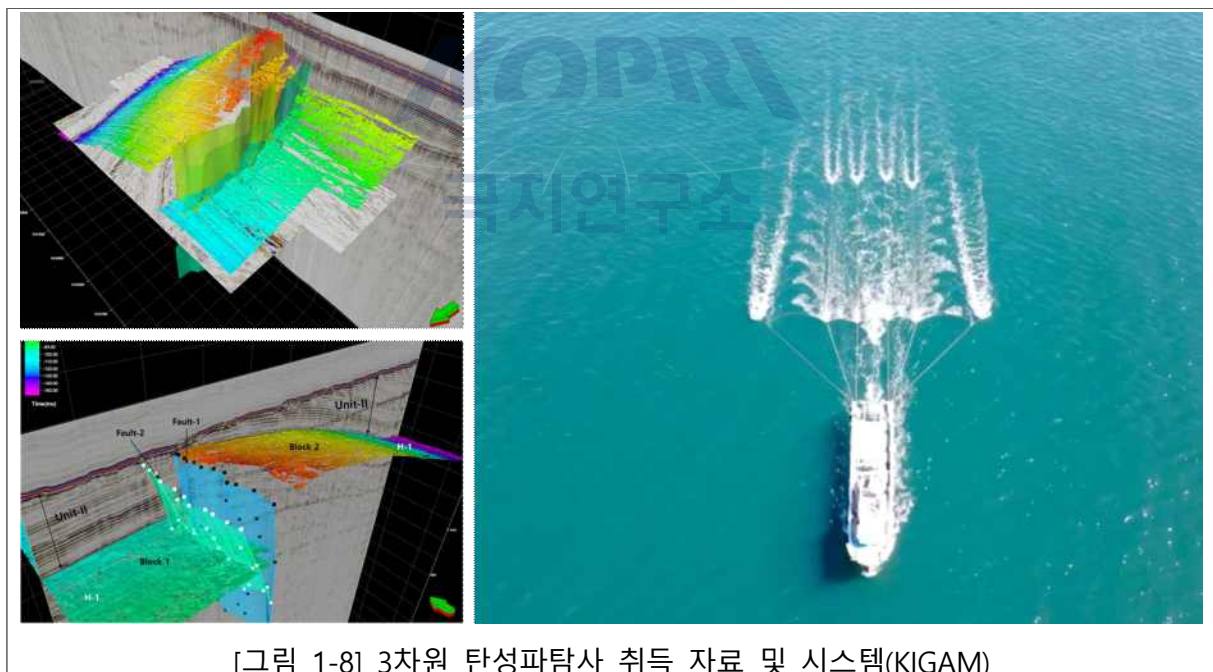
- 범부처 차원에서 추진 중인 북극 관련 정책의 주요 과제를 실제로 이행하기 위해서는 현장 기반의 조사·탐사·분석·평가가 뒷받침되어야 함. 북극 관련 정책은 선언이나 계획에 그치지보다, 해역별 자료를 직접 확보하고 이를 바탕으로 항로, 자원, 해저환경 정보를 축적하는 실행형 연구개발로 이어질 필요가 있음
- 특히 해빙 감소로 접근성이 높아지고 있는 프론티어 해역은 지금이 자료 공백을 줄일 수 있는 중요한 시기임. 이 시기에 선제적으로 조사에 착수하지 못하면, 향후 북극 관련 국제협력과 활용 구도에서 우리나라의 역할이 제한될 가능성이 있음
- 해저지질조사는 북극정책을 실제로 뒷받침하는 핵심 조사 수단임. 이러한 조사는 북극항로 관련 기초자료 확보, 해저환경 변화 진단, 전략자원 유망지역 평가를 동시에 가능하게 하는 기반이지만, 비용과 장비, 인력, 국제협력이 모두 필요한 영역이어서 민간이 단독으로 추진하기에는 한계가 큼. 이러한 점에서 국고를 바탕으로 안정적으로 추진하는 것이 타당함
- 본 과제는 항로 안전에 필요한 해저지형·지반 정보, 온난화 가속화 대응에 필요한 해저영구동토층·가스하이드레이트 변화 정보, 자원안보에 필요한 에너지·전략광물 정보까지 함께 확보하는 성격을 가짐. 즉, 특정 부처나 특정 목적에 한정된 사업이 아니라, 여러 부처가 공동으로 활용할 수 있는 국가형 사업이라는 점에서 국고 투자의 정책적 파급효과가 큼
- 또한 본 사업을 통해 확보되는 해저지질 자료와 분석 결과는 북극항로 대응, 해저환경 변화 진단, 전략자원 평가 등 여러 정책 수요에 공통으로 활용될 수 있음. 따라서 본 사업은 개별 연구성과를 축적하는 데 그치지 않고 범부처 북극정책을 실제로 추진하는 데 필요한 공통 기반을 마련한다는 점에서도 추진 필요성이 큼

## 나. 기술적 관점 필요성

- 북극해 해저자원 탐사 및 온난화에 따른 해저환경변화 정밀관측을 위한 지구물리탐사 기술 고도화 필요
- 북극 해역은 해빙, 저온, 기상 변화, 짧은 탐사 가능 기간 등 현장 여건이 까다로워 장비 운용과 관리가 어려움. 동시에 북극 해저는 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 천부 가스, 빙하성 퇴적체, 단층과 균열 구조 등이 복합적으로 분포하여 해저지질구조가 복잡하고 온난화에 따라 그 분포와 특성이 계속 변할 가능성이 큼. 따라서 일반 해역보다 더 높은 수준의 탐사 정확도와 해석 역량이 요구됨
- 특히 이러한 구조는 단순한 2차원 자료만으로는 구조의 연속성, 자원 부존 가능성, 변화

양상을 신뢰성 있게 파악하기 어려움. 이 때문에 단층, 가스 이동 통로, 불안정 지반, 해저 특이구조를 파악할 수 있는 3차원 탄성파탐사와 AUV, ROV 등 고도화된 지구물리탐사 및 정밀 해저관측 장비가 필요함

- 또한 북극해는 탐사 가능 기간이 짧아 한 번의 항차에서 확보하는 자료의 중요성이 매우 큼. 제한된 기간 안에 필요한 자료를 빠짐없이 확보하려면, 사전에 탐사 대상과 우선순위를 정하고 해빙·기상·항로 여건을 고려한 탐사 계획을 정교하게 수립할 필요가 있음. 즉, 북극 탐사는 단순히 현장에 가서 자료를 취득하는 수준이 아니라, 탐사 전 단계부터 대상 선정, 장비 운용 계획, 자료 확보 방안을 함께 준비해야 성과를 높일 수 있음
- 온난화 가속화와 연결되는 해저영구동토층 붕괴, 메탄 방출 구조, 천부 가스 분포와 같은 대상은 정밀 자료처리와 고도의 탄성파 이미징 기술이 뒷받침되어야만 보다 정확하게 해석할 수 있음
- 이러한 기술 고도화는 우리나라가 북극 해역에 적합한 탐사 방법과 자료 취득 역량을 빠르게 확보하는 데 도움이 되며, 결과적으로 탐사 성공 가능성과 자료 활용도를 함께 높이는 기반이 될 수 있음

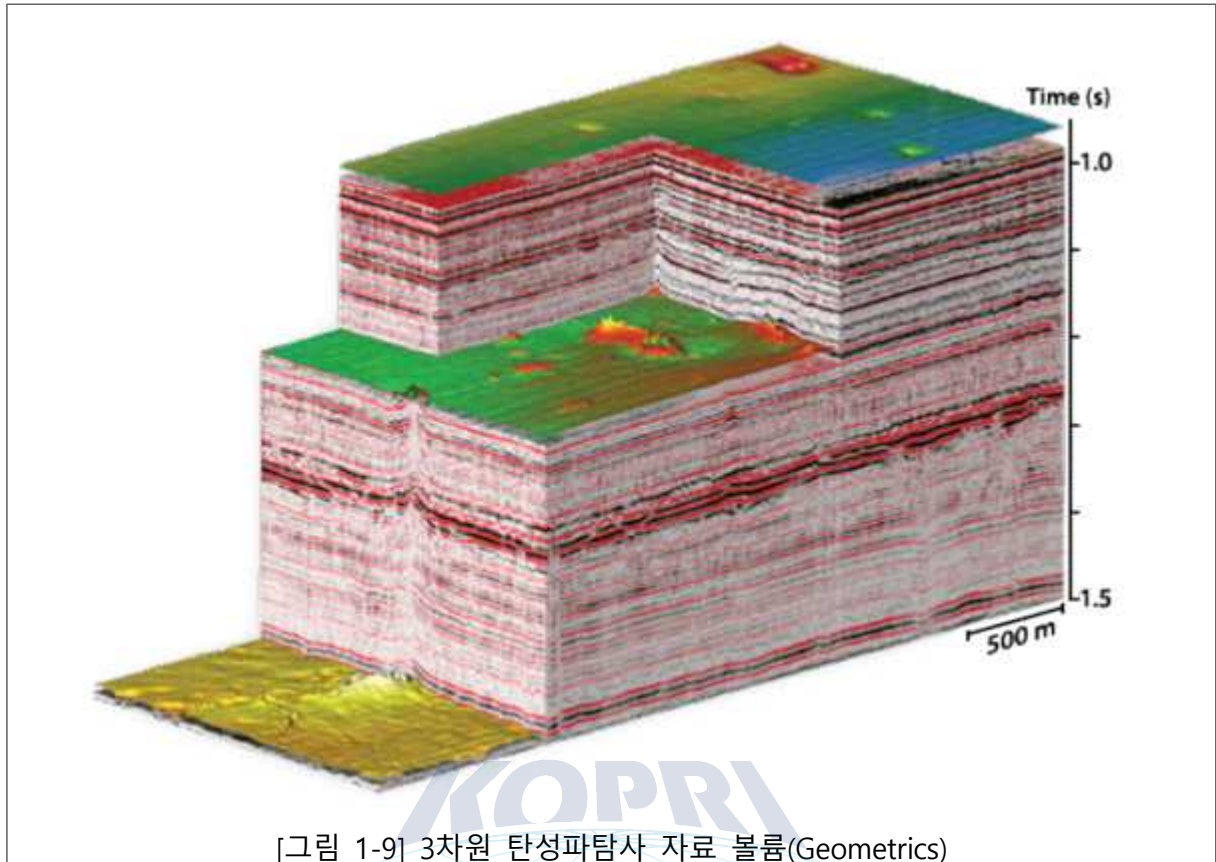


[그림 1-8] 3차원 탄성파탐사 취득 자료 및 시스템(KIGAM)

- 북극 대륙붕 해저영구동토층·가스하이드레이트 해리와 온난화 가속화 관련 해저 지질구조 변동 정밀진단을 위한 첨단 자료처리·이미징 기술 필요
- 북극 대륙붕에서는 해저영구동토층 및 가스하이드레이트 해리, 천부 가스 이동 등이 함께 나타나면서 해저면 아래 지질구조가 매우 복잡하게 나타남. 특히 이러한 변화는 메탄 방출과 연결될 수 있으며, 방출된 메탄은 온난화를 가속화하는 요인으로 작용할 수 있어 해

저지질구조 변화를 보다 정밀하게 파악할 필요가 있음

- 이와 같은 구조 변화는 지층 경계가 불규칙하고 층별 물성 차이도 커 일반적인 자료 해석만으로는 구조의 연속성이나 변화 양상을 정확하게 판단하기 어려움. 따라서 2차원 및 3차원 지구물리자료를 기반으로 지하구조를 보다 정확하게 구현할 수 있는 정교한 자료 처리 체계 구축이 필수적임
- 특히 3차원 탄성파 탐사는 단층의 연장 방향, 유체 이동 경로, 천부 가스 분포의 공간적 연결성, 해저영구동토층 및 가스하이드레이트 관련 구조의 입체적 기하를 파악하는 데 유리하므로, 복잡한 해저지질구조를 정밀진단하는 핵심 수단으로 활용될 필요가 있음
- 이를 위해서는 전처리, 속도모델 구축, 구조보정, 결과 검증으로 이어지는 자료처리 전 과정을 체계적으로 수행할 수 있어야 함. 이러한 과정이 충분히 갖추어지지 않으면 복잡한 해저지질구조를 정확하게 영상화하기 어렵고 해저영구동토층 경계나 천부 가스 분포와 같은 핵심 구조에 대한 해석 정확도도 낮아질 수 있음
- 또한 다중반사 제거, 신호 복원, 진폭 보존 처리와 같은 고난도 처리 기술이 함께 적용되어야 함. 이러한 기술이 뒷받침되어야만 복잡한 지질구조 속에서도 실제 지질학적 신호를 보다 분명하게 구분할 수 있고 온난화 가속화와 관련된 해저구조 변화를 신뢰성 있게 해석할 수 있음
- 해저지질구조 변동성의 규모를 정량적으로 파악하기 위해서는 심도영역 구조보정, 탄성파 속도모델링, 정밀 속도분석, 해석 결과의 신뢰도 검토 등 고급 자료처리 기술 확보도 필요함. 이는 단순히 구조를 도식적으로 보여주는 수준을 넘어, 변화의 범위와 특성을 비교·평가할 수 있는 기반이 된다는 점에서 중요함
- 북극 해역의 지구물리 특성에 맞는 자료처리·이미징 기술을 별도로 고도화할 필요가 있음. 북극 자료는 일반 해역보다 해빙, 저온, 짧은 탐사 기간, 복잡한 퇴적환경의 영향을 크게 받기 때문에 북극 해역에 적합한 처리 절차와 해석 방법이 필요하며 이를 실제 연구에 적용할 수 있도록 관련 연구를 지속적으로 추진할 필요가 있음
- 이와 함께 산·학·연 협력 기반의 자료처리 절차와 체계 정립을 위한 연구 추진도 필요함. 이를 통해 자료처리의 일관성과 신뢰성을 높이고 향후 북극 해저환경 변화와 자원 관련 탐사자료를 효과적으로 활용할 수 있는 기반을 마련할 수 있음



- 지구물리·시료·관측자료 통합 기반의 해저지질·자원·항로·환경 연계 해석 체계 구축 필요
- 북극 해역에서 확보되는 탄성파(2D/3D), MBES, SBP, 코어·공극수, 메탄 관측, 지화학·미생물 자료는 각각 제공하는 정보의 성격이 다름. 탄성파 자료는 해저면 아래 지질구조와 가스 이동 통로를 파악하는 데 유용하고 MBES와 SBP는 해저지형과 천부 지층의 형태를 보여주며, 코어와 공극수·지화학 자료는 퇴적물의 특성과 유체·가스의 성격을 확인하는 데 필요함. 따라서 어느 한 종류의 자료만으로는 해저지질변화의 원인, 진행 과정, 자원 잠재력, 환경 영향을 종합적으로 설명하기 어려움
- 이에 따라 서로 다른 자료를 동일한 위치와 해석 틀 안에서 연결해 보는 통합 체계가 필요함. 즉, 같은 해역에서 확보된 구조, 지형, 시료, 관측자료를 서로 맞추어 해석할 수 있어야 개별 자료의 의미를 보다 정확하게 파악할 수 있음
- 또한 자료마다 해상도와 관측 범위가 각각 다르기 때문에 이를 고려하여 비교·연계하고 가능하면 반복 관측 결과까지 함께 검토해야 해저지질구조 변화, 자원 부존 가능성, 환경 변화 징후를 하나의 흐름으로 해석할 수 있음. 이러한 체계가 갖추어져야 실제 활용 가능한 지질모델, 자원평가, 환경위험 진단으로 이어질 수 있음

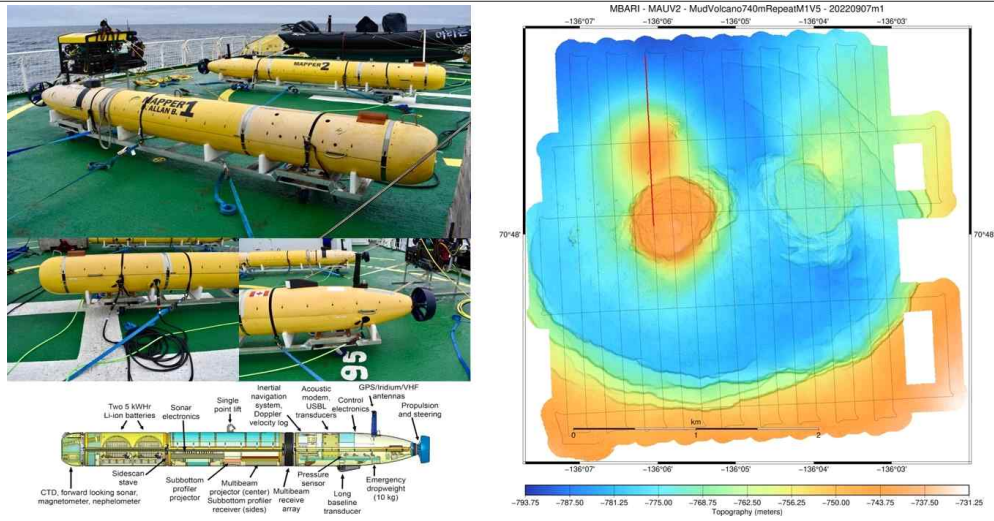
- 통합 체계가 구축되면 항로 안전 검토에 필요한 지반 안정성 정보, 자원평가에 필요한 부존 근거, 해저환경 변화와 온난화 가속화 대응에 필요한 진단 정보를 목적에 맞게 정리하여 제공할 수 있음. 동일한 자료를 바탕으로도 항로, 자원, 환경 분야의 정책 수요에 맞는 결과를 도출할 수 있으므로, 국고로 확보한 자료의 활용 범위를 넓히고 정책 활용성과 투자 효과를 함께 높일 수 있음

#### □ 북극 자료 특화 AI·기계학습 기반 탄성파 해석 기술 고도화 및 공동연구 추진 필요

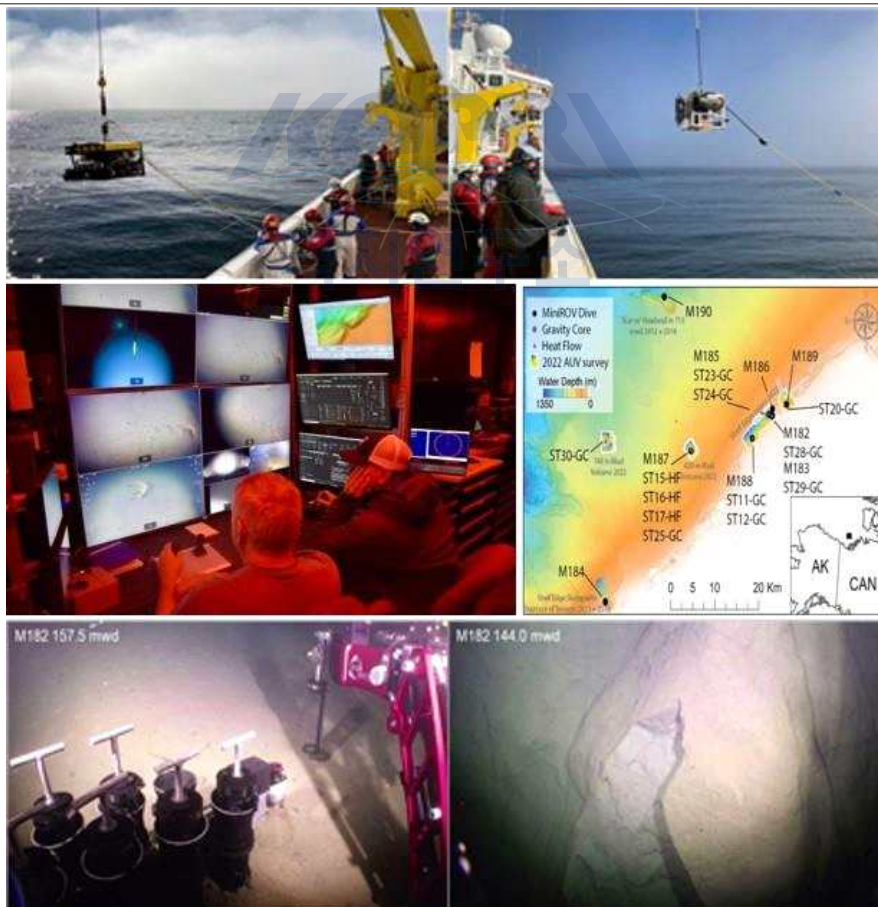
- 최근 탄성파 자료 해석 분야에서는 AI·기계학습을 활용한 속성분석, 구조 해석, 이상구조 탐지, 자동분류 기술의 활용 가능성이 빠르게 확대되고 있음. 이러한 기술은 방대한 자료를 신속하게 처리하고 해석자의 경험에 크게 의존하던 작업을 정량화할 수 있다는 점에서 해석 정확도와 업무 효율을 함께 높일 수 있는 수단으로 주목받고 있음
- 그러나 북극 해역의 탄성파 자료는 일반 해역과 달리 해빙, 기상, 탐사 제약, 짧은 항차, 불균질한 퇴적환경 등의 영향을 크게 받기 때문에 자료 품질의 편차가 크고 잡음과 결측도 빈번하게 나타날 수 있음. 또한 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 천부 가스, 불안정 지반과 같이 북극 특유의 탐사 대상은 구조와 물성 변화가 복합적으로 나타나므로 일반 해역 자료를 바탕으로 학습된 기존 모델을 그대로 적용하기에는 한계가 있음
- 따라서 북극 자료에 AI·기계학습을 실질적으로 적용하기 위해서는 북극 해역의 자료 특성과 해석 목적에 맞는 학습자료와 해석 기준을 별도로 마련할 필요가 있음. 특히 해저영구동토층 분포와 경계, 가스하이드레이트 부존 가능 구간, 천부 가스 이동 구조, 지반 불안정 구역 등 북극에서 중요한 해석 대상을 중심으로 자료를 구축하고 체계적으로 정리할 필요가 있음
- 또한 개발된 기술은 실제 북극 탐사자료에 적용하여 성능을 검토하고 지속적으로 보완하는 과정이 함께 이루어져야 함. 이를 위해서는 탄성파 AI 연구를 수행하고 있는 국내 대학과 연구기관이 협력하여, 방법론 개발과 현장자료 기반 검증을 함께 수행하는 공동연구 체계를 마련할 필요가 있음
- 특히 학·연 협동 연구를 통해 알고리즘 개발, 학습자료 구축, 해석 결과 검증, 현장 적용성 평가를 연계하면, 북극 해저지질 탐사에 특화된 AI 기반 자료처리·해석 기술을 보다 빠르게 고도화할 수 있음. 이는 향후 북극 해저지질구조 해석의 정확도 향상뿐 아니라, 대규모 탐사자료의 효율적 처리와 자원·환경·지반 관련 정보의 신속한 도출에도 기여할 수 있음
- 따라서 북극 해역에 적합한 AI·기계학습 기반 탄성파 해석 기술을 개발하고 이를 실제 자료에 안정적으로 적용하기 위한 공동연구 계획을 선제적으로 마련할 필요가 있음. 이러한 준비는 향후 북극 탐사자료의 활용성을 높이고 북극 해저지질·자원·환경 해석 역량을 한 단계 끌어올리는 기반이 될 수 있음

□ 북극 해저 정밀관측을 위한 ROV/AUV 운용역량 확장 필요

- 북극 해역은 해빙, 저온, 강한 기상 변동으로 탐사 여건이 매우 까다롭고 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 천부 가스, 빙하성 퇴적체 등이 복합적으로 분포하여 해저지질 구조도 복잡함. 이 때문에 기존 지구물리탐사만으로는 해저 특이구조의 형태와 활동성을 충분히 확인하기 어려움
- 특히 pingo, pockmark, 해저진흙화산, 연약지반 변형 구조와 같은 대상은 규모가 작고 국지적으로 발달하는 경우가 많아, 해저면 가까이에서의 정밀 관측이 필요함. 따라서 AUV와 ROV를 활용한 근접 탐사는 북극 해저지질 조사에서 중요성이 큼
- AUV는 초고해상도 해저지형과 미세지형을 정밀하게 파악하는 데 유리하고 ROV는 표적 구조를 직접 관찰하면서 시료채취와 현장 확인을 수행하는 데 강점이 있음. 두 장비를 함께 활용하면 지구물리탐사로 파악한 구조를 보다 정확하게 검증할 수 있음(그림 1-6, 7)
- 북극은 탐사 가능 기간이 짧아 한 번의 항차에서 확보하는 자료의 질과 정확도가 매우 중요함. 이때 ROV/AUV는 단순히 자료량을 늘리는 수단이 아니라, 해저지질구조와 표적 특성을 보다 정밀하게 확인하기 위한 핵심 장비로 활용될 필요가 있음
- 또한 ROV/AUV 기반 탐사는 해저지형, 구조 영상, 시료, 환경센서 자료를 한 자리에서 함께 확보할 수 있다는 점에서 의미가 큼. 이를 통해 유체 분출 구조, 지반 불안정 구역, 가스하이드레이트 및 해저영구동토층 관련 현상을 보다 종합적으로 진단할 수 있음
- 운용역량 확장은 단순한 장비 확보에 그치지 않고 임무 설계, 장비 투입과 회수, 자료 관리, 운용 인력 숙련도 확보까지 포함하는 종합적인 현장 수행 능력을 말하며 해저 정밀관측 및 탐사 기술 고도화를 위해 운용역량을 확장할 필요가 있음



[그림 1-10] 첨단 해양 탐사 장비 AUV를 활용한 미국 MBARI 공동 연구 및 해저진흙화산 소정밀 해저지형도



[그림 1-11] 2022년 한국-캐나다-미국 국제공동연구 ROV 현장 탐사

#### □ 국제공동탐사의 지속적 확대를 위한 중장기 국제협력 연구 필요

- 북극 해역에서의 첨단장비 운용과 정밀 해저관측은 단기간의 일회성 협력만으로는 안정적인 축적이 어려움. 장비 운용, 시료 확보, 자료 해석, 결과 검증이 함께 이어져야 하므로, 국제공동탐사를 중장기 공동연구 체계로 발전시킬 필요가 있음
- 이를 위해서는 협력 기관별 역할을 장비 운용, 기술교류 등으로 구체화하고 협력 구조를 미리 설계할 필요가 있음
- 또한 북서항로 관련 핵심 구간은 캐나다 관할 해역과 직접적으로 연계되어 있어, 향후 캐나다와의 공동탐사를 통해 항로 안전성 검토에 필요한 해저지형·천부지층 자료를 지속적으로 확보하고 조사 범위를 단계적으로 확대할 필요가 있음. 이는 단순한 협력 확대를 넘어, 북서항로 활용 가능성 평가와 후속 탐사 우선순위 설정에 필요한 기초자료를 안정적으로 축적하는 기반이 될 수 있음
- 우리 측은 캐나다 보퍼트해에서 한국·캐나다·미국 공동연구를 통해 ROV/AUV를 활용한 현장 탐사 경험을 축적해 왔음. 이는 새로운 협력관계를 처음부터 구축하는 단계가 아니라, 기존 성과를 바탕으로 공동연구의 범위와 수준을 확장할 수 있는 단계임을 보여줌
- 따라서 본 사업에서는 국제공동탐사를 통해 ROV/AUV 운용 경험과 정밀 해저관측 기술을 축적하고 이를 국내 연구역량으로 연결하는 방향의 연구 계획을 함께 마련할 필요가 있음. 이를 통해 북극 프론티어 해역 정밀진단 역량과 협력 주도성을 함께 높일 수 있음
- 나아가 이러한 중장기 국제협력 연구는 향후 대형 국제공동연구 참여 확대와 차세대 쇄빙연구선 활용 기반 강화로도 이어질 수 있음. 이러한 점에서 본 항목은 국제협력 확대뿐 아니라, 첨단 해저탐사 역량을 함께 고도화하기 위한 기반으로 볼 수 있음

## 다. 과학적 관점 필요성

#### □ 기후 피드백 규명과 예측 기반 확보 필요

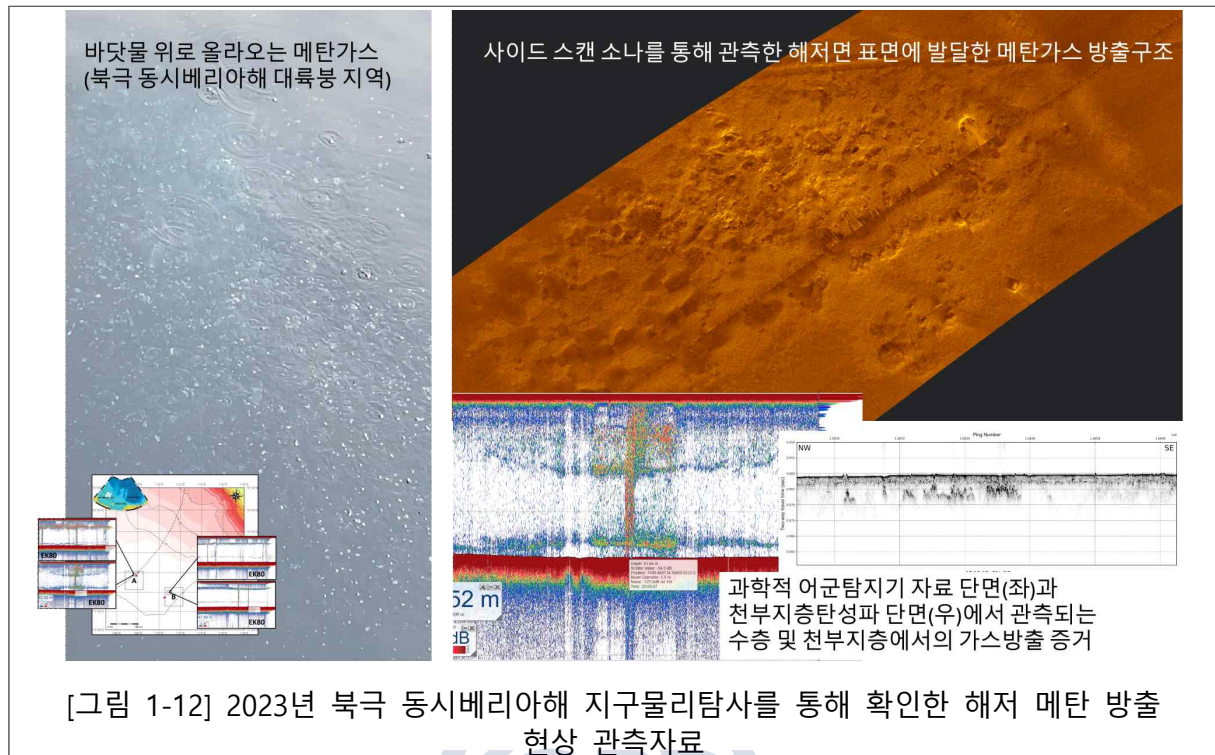
- 북극 대륙붕에서 나타나는 해저영구동토층 붕괴 및 가스하이드레이트 해리현상은 메탄과 이산화탄소 방출로 이어질 수 있으며, 이는 다시 온난화를 가속화하는 요인으로 작용할 가능성이 있음. 따라서 단순히 현상을 확인하는 수준을 넘어, 어떤 조건에서 방출이 일어나고 어떤 경로를 따라 이동하는지, 그 규모와 지속성이 어느 정도인지를 정량적으로 파악하는 연구가 필요함
- 이러한 변화는 해저 온도와 염분, 퇴적물의 물성, 유체가 이동하는 경로, 퇴적환경, 해저지형 변화 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 나타남. 따라서 메탄 방출의 원인과 과정을 정확히 이해하기 위해서는 지질, 지구물리, 지화학, 해양환경 자료를 함께 연계한

#### 종합적인 분석이 필요함

- 특히 현재 북극 해역에서는 메탄 방출이 나타나는 위치가 광범위하게 분포하거나 국지적으로 집중될 수 있고 연도에 따라 변화 양상도 달라질 수 있음. 따라서 먼저 현재 상태를 파악하는 기준자료를 확보하고 이후 동일한 해역과 조사방법을 반복적으로 관측하며, 장기적으로 시계열 자료를 축적하는 방식의 설계가 필요함.
- 또한 해저영구동토층 붕괴와 메탄 방출의 규모를 과학적으로 제시하기 위해서는 여러 종류의 자료를 함께 활용해야 함. 2D·3D 탄성파 자료를 통해 가스의 저장 구조와 이동 통로를 파악하고 SBP와 MBES 자료를 통해 분출 흔적과 미세지형을 확인하며, 코어·공극수·가스 시료 분석을 통해 생성과 이동, 소비 과정까지 함께 검토할 필요가 있음

#### □ 해저지질 안정성 저하와 재해 위험 대응 역량 강화 필요

- 해저영구동토층 및 가스하이드레이트 해리, 천부 가스 이동은 퇴적층의 강도를 약화시키고 지반의 안정성을 낮출 수 있음. 이러한 변화는 공극압 증가와 사면 안정성 저하로 이어질 수 있어, 단순한 기후변화 현상으로만 볼 것이 아니라 해저지질 재해의 관점에서도 정밀하게 진단할 필요가 있음
- 특히 메탄 방출은 온난화를 가속화하는 요인으로 작용할 수 있을 뿐 아니라, 해저에서는 급격한 유체 이동과 분출에 따른 지형 변화, 퇴적층 교란, 미세지형 형성 등의 형태로 나타날 수 있음. 따라서 메탄 방출 구조와 해저지질 변화는 기후위기 대응과 해저 재해 위험 대응을 함께 고려하여 해석할 필요가 있음
- 북극 해역은 관측 접근성이 낮고 변화가 넓은 해역에 걸쳐 나타날 수 있어, 위험이 뚜렷한 재해로 나타난 이후에 대응하는 방식만으로는 한계가 있음. 이에 따라 위험 발생 이후의 대응보다, 위험 징후를 미리 파악하고 변화 양상을 지속적으로 추적할 필요가 있음
- 이를 위해서는 가스 집적 구역, 단층·균열대, 연약지반 등 주요 위험요인의 분포를 해역별로 정리하고 반복 관측을 통해 변화 속도와 이상 징후를 함께 파악하는 연구가 필요함. 이러한 자료가 축적되어야 해저지질 안정성 저하가 어느 구간에서 어떻게 진행되는지 체계적으로 판단할 수 있음
- 이러한 지속 관측과 모니터링은 단기간의 개별 연구만으로 유지하기 어려우므로, 국고 기반의 장기 운영과 자료 인프라 연계가 함께 뒷받침될 필요가 있음. 이 점에서 해저지질 안정성 저하와 재해 위험 대응 연구는 과학적 필요성뿐 아니라 정책적 활용성과 공공성 측면에서도 추진 필요성이 큼



#### □ 다학제 통합 연구의 과학적 필요성

- 북극 해저의 유체 방출과 해저지질 변화는 단층과 균열 같은 구조지질 요인, 퇴적물 물성과 공극압 변화, 가스 조성과 지화학 반응, 수온·염분·해류·해빙 변화가 함께 작용하는 복합 시스템임. 따라서 단일 자료나 단일 전공의 해석만으로는 원인, 진행 과정, 영향을 일관되게 설명하기 어려우며, 지질·지구물리·지화학·해양환경을 함께 보는 다학제 연구가 필요함
- 탄성파나 MBES 자료에서 보이는 이상대와 미세지형은 해저지질 구조의 신호일 수 있지만, 실제로는 물성 변화, 유체 포화도, 잡음 환경의 영향이 함께 섞여 있을 수 있음. 따라서 이러한 구조가 실제 어떤 현상과 연결되는지를 판단하려면 시료 분석, 지화학 자료, 해양환경 자료를 함께 검토하는 교차검증이 필요함
- 또한 메탄 방출 연구의 핵심은 단순히 방출이 있는지 없는지를 확인하는 데 그치지 않음. 어떤 원인으로 발생하는지, 어떤 통로를 따라 이동하는지, 규모와 변동성은 어느 정도인지, 지반과 탄소순환, 생태계에는 어떤 영향을 주는지를 함께 밝혀야 하며, 이러한 내용은 여러 자료가 결합될 때에만 보다 정량적으로 설명할 수 있음
- 결국 다학제 통합 연구는 연구 범위를 넓히기 위한 선택이 아니라, 복합적인 북극 해저 시스템을 과학적으로 설명하고 정책과 산업에서 활용 가능한 수준의 검증된 근거를 생산하기 위한 필수 방법론이라 할 수 있음

### 3. 연구개발 시급성



#### □ 프론티어 해역 개방 확대에 따른 선제 착수 필요

- 해빙 감소로 프론티어 해역 접근성이 확대되는 전환기에는 기초자료를 언제 확보하느냐가 연구 성패를 좌우함. 지금과 같이 접근가능한 범위가 넓어지는 시기에 선제적으로 자료를 확보해야 이후 연구 방향과 조사 범위를 안정적으로 설정할 수 있음
- 초기 자료 확보가 늦어지면 자료 공백이 더 커지고 장기 시계열 비교, 기후변화에 따른 해저지질 변화 규명에도 한계가 생길 수 있음. 특히 북극과 같은 변화가 큰 해역에서는 초기 기준자료 확보가 늦어질수록 후속 분석의 신뢰도도 함께 낮아질 수 있음
- 북극은 해빙과 기상 변동이 커 관측 공백이 발생하기 쉬우므로, 연차별 탐사 일정과 대상 해역을 선제적으로 선정할 필요가 있음. 그래야 해마다 달라지는 현장 여건 속에서도 조사 연속성을 유지하고 자료를 비교 가능한 형태로 축적할 수 있음
- 특히 프론티어 해역은 기존 자료 공백이 크기 때문에 조기에 착수해야 후속 연구와 정밀 조사를 효율적으로 설계할 수 있음. 지금 확보한 자료는 이후 세부 조사와 장기 관측의 출발점이 된다는 점에서 시급성이 큼
- 또한, 2030년 차세대 쇄빙연구선 투입에 앞서 핵심 해역의 지구물리탐사자료와 탐사기술을 선제적으로 확보해야 향후 연구선 활용 효율과 초기 성과 창출을 높일 수 있음

#### □ 북서항로 관련 과학적 근거의 조기 확보 필요

- 해빙 감소로 북서항로 이용 가능성이 확대될수록, 항로 안전성은 해빙 정보뿐 아니라 해저지질 조건에 의해서도 크게 영향을 받게 됨. 따라서 북서항로 대응은 단순한 운항 가능성 검토를 넘어, 항로 주변 해저환경에 대한 과학적 자료 확보와 함께 추진될 필요가 있음.
- 북서항로에는 폭이 좁은 해역, 수심 변화가 큰 구간, 복잡한 해저지형이 포함될 수 있어, 고해상도 해저지형과 천부 지층, 지반 특성에 대한 자료가 부족하면 좌초, 접촉, 운항 제한과 같은 위험이 커질 수 있음. 이러한 구간은 선박 운항과 해양활동 안전성에 직접적인 영향을 줄 수 있음
- 따라서 항로 인접 해역에 대한 해저지형, 천부층서, 지반 특성 등을 반영한 해저지질 정보를 조기에 확보할 필요가 있음. 그래야 향후 항로 운영과 안전 검토에 활용할 수 있는 실질적인 기초자료를 마련할 수 있음
- 이러한 자료가 선제적으로 축적되어야 향후 북서항로 관련 정책 검토와 산업 활용, 국제 협력에서도 활용 가능한 과학적 근거를 마련할 수 있음. 결국 북서항로 대응의 실효성은 얼마나 이른 시점에 관련 자료를 확보하느냐에 달려 있음

#### □ 주요국 경쟁 심화와 국제공동탐사 준비의 시급성

- 북극 연안국과 주요국의 탐사 및 국제공동연구가 확대되는 상황에서 조기 참여를 통해 협력 구조를 유리하게 설계할 필요가 있음. 북극에서는 탐사 참여 시점에 따라 자료 접근 범위와 연구 참여 수준이 달라질 수 있으므로, 초기에 들어가는 것이 중요함
- 자료 접근 범위, 성과 공유 방식, 자료 활용 조건 등은 초기 협력 단계에서 결정되는 비중이 크므로, 사전 기획과 협상 준비가 중요함. 특히 한번 형성된 협력 구조는 이후에도 계속 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에, 뒤늦게 참여할수록 선택의 폭이 좁아질 수 있음
- 또한 EEZ 제약, 허가·규정, 자료공유 조건 등은 단기간에 해결되기 어려워, 협력 대상 선정과 공동탐사 설계를 조기에 추진할 필요가 있음. 국제공동탐사는 단순히 탐사선에 함께 승선하는 수준이 아니라, 준비와 협의 단계부터 시간이 많이 필요한 영역임
- 착수가 늦어질 경우 후순위 참여로 인해 자료 활용 범위가 제한되고 연구 확장성과 협력 주도성도 낮아질 가능성이 있음. 이런 점에서 국제공동탐사는 필요할 때 시작하는 방식이 아니라, 지금부터 준비해야 하는 과제로 볼 필요가 있음

□ 고난도 탐사·자료처리·AI 기술은 준비기간이 길어 조기 기획이 필수

- 3D 탄성파탐사와 고난도 처리·이미징은 해역 선정, 설계, 자료취득, 처리, 해석이 유기적으로 연결되어 있어 사전 기획이 미흡하면 성과가 크게 저하될 수 있음. 초기 설계 단계가 흔들리면 이후 자료 품질과 해석 정확도도 함께 영향을 받게 됨
- 특히 북극 특유의 해빙 영향, 잡음, 결측 자료에 대응하기 위해서는 전처리, 보정, 자료처리 절차를 단계적으로 정립할 필요가 있음. 이러한 기술은 단기간에 완성되기 어렵고 실제 자료를 적용하면서 지속적으로 보완해야 하므로 조기 착수가 중요함
- AI 기반 해석 고도화 역시 대상 특화 학습자료 구축, 라벨링, 검증체계 마련이 현장자료 축적과 병행되어야 하므로 초기부터 준비가 필요함. 특히 북극 자료는 일반 해역과 다른 특성이 많아, 적용가능한 해석 체계를 만들기 위해서는 충분한 준비 기간이 요구됨
- 조기에 탐사·처리·AI 적용 체계를 마련해야 연차별 자료가 누적될수록 비교 가능성과 해석 신뢰도를 함께 높일 수 있음. 기술은 뒤따라가는 방식보다 자료 축적과 함께 동시에 준비하는 방식이 훨씬 효율적임

□ 첨단장비 운용역량과 차세대 쇄빙연구선 연계 준비 필요

- ROV와 AUV 운용은 장비 확보에 그치지 않고 임무 설계, 자료관리, 후처리, 운용 인력 숙련도 확보까지 포함하는 종합적인 역량이 필요함. 따라서 실제 성과를 내기 위해서는 장비 도입과 함께 운용 체계를 단계적으로 준비해야 함
- 이러한 역량은 단기간에 형성되기 어렵기 때문에, 현장 경험을 조기에 축적하면서 단계적으로 고도화할 필요가 있음. 특히 북극과 같이 환경 조건이 까다로운 해역에서는 반복적인 시험 운용과 경험 축적이 곧 성과의 차이로 이어질 수 있음
- 또한 차세대 쇄빙연구선 탑재 장비의 활용성을 높이기 위해서는 인력양성, 시험운용, 운용지침 정비가 선행되어야 함. 연구선이 실제 투입된 이후에 준비를 시작하면 초기 활용도가 떨어질 수 있으므로 사전 준비가 중요함
- 조기 착수를 통해 운용 경험을 축적할수록 향후 현장 적용성과 자료 품질, 탐사 성과도 함께 높일 수 있음. 이는 단순한 장비 운용 능력을 넘어, 우리나라의 독자적 극지 탐사 역량을 높이는 기반이 될 수 있음

□ 국내 탐사 성과의 확장과 연구 연속성 확보 필요

- 아라온호 기반 탐사 성과와 국제공동연구 경험을 확장·심화하기 위해서는 후속 연구를 체계적으로 이어갈 필요가 있음. 기존 성과를 다음 단계 연구로 연결해야 자료 축적의 의미가 커지고 현장 경험도 지속적으로 발전할 수 있음
- 연구의 연속성이 확보될수록 자료 누적과 비교분석이 가능해지고 과학적 신뢰도와 정책 활용성도 높아질 수 있음. 특히 북극과 같이 단기간에 결론을 내리기 어려운 해역에서는 연속성 자체가 연구 경쟁력의 핵심이 됨
- 반대로 착수가 지연될 경우 기존 협력 네트워크와 현장 경험이 분산되어 재구성 비용과 재학습 기간이 늘어날 우려가 있음. 이미 형성된 협력 기반과 탐사 경험이 유지되지 못하면, 이후 다시 같은 수준의 준비를 갖추는 데 더 많은 시간이 필요할 수 있음
- 따라서 지금 시점의 조기 착수는 새로운 연구를 시작하는 차원을 넘어, 기존 성과를 국가 차원의 장기 역량으로 연결하기 위한 필수 조건이라 할 수 있음. 이는 연구의 지속성과 정책적 활용성을 동시에 확보하기 위한 시급한 과제임



## 제2절 기획연구의 목표 및 주요내용

### 1. 기획대상의 정의

#### □ 기획대상 정의

- 본 기획연구의 대상은 기후변화와 북극 해빙 감소에 따라 새롭게 접근 가능해진 북극 프론티어 해역을 대상으로, 해저지질정보를 선제적으로 확보하고 이를 국가 차원의 지질·환경·향로·자원 통합 정보체계로 구축하기 위한 연구개발사업임
- 단순한 해역 조사에 그치는 것이 아니라, 해저지질정보 선점, 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단, 북서향로 활용기반 마련, 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 함께 추진하는 사업으로 정의할 수 있음
- 특히 본 기획대상은 기존 서북극권 중심의 기초자료 축적 단계에서 나아가, 고위도 프론티어 해역으로 조사 범위를 확대하고 확보한 자료를 정책·산업적으로 활용 가능한 국가 전략자산으로 전환하는 데 목적이 있음
- 따라서 본 기획연구는 북극 해저지질정보를 독자적으로 확보하고 이를 기반으로 향로, 기후위기 대응, 전략자원, 국제협력, 차세대 쇄빙연구선 활용까지 연계하는 국가 전략형 연구개발사업으로 정의하는 것이 적절함. 이는 단순한 탐사과제가 아니라, 조사·기술·정책 활용이 결합된 북극 연구기획이라는 점에서 의미가 큼

### 2. 기획연구 범위

#### □ 주요 범위

##### ○ 사업 기간

- 2027년부터 2031년까지 5년간 추진하는 연구개발 사업

##### ○ 공간적 범위

- 북극해 전역을 대상으로 하되, 기존 조사·연구가 수행된 서북극권 해역을 포함하여 척치 고원 북단, 동시베리아해 북단, 중앙북극해, 캐나다 보퍼트해 및 북서향로 등 프론티어 해역까지 조사 범위를 확대하는 것으로 설정함

##### ○ 연구 대상 범위

- 북극 프론티어 해역의 해저지질조사 및 지구물리탐사, 북서향로 개척과 활용기반 마련을 위한 국제공동 해저지질조사, 해저영구동토층·가스하이드레이트·메탄 방출 등 해저지질환경 변동성 진단, 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 포함함

- 즉, 본 사업은 해저지질정보 선점과 함께 환경, 항로, 자원 분야를 포괄하는 통합형 연구범위를 가짐

#### ○ 기술적 범위

- 북극 프론티어 해역 해저지질조사 및 지구물리탐사 기반 해저지질정보 선점
  - 쇄빙연구선을 활용한 선제적 해저지질조사와 지구물리탐사를 수행하고 정밀 해저 지형, 천부 및 심부 구조, 저질 정보 등을 포함하는 종합 해저지질도와 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계를 구축함. 빙권해역 특화 해저탐사기술과 인공지능 기반 자료분석 기술 확보가 포함됨
- 북서항로 개척을 위한 국제공동 지구물리탐사
  - 한국-캐나다 국제협력 기반의 해저지질조사 및 지구물리탐사를 통해 북서항로 해저지질 특성과 항로 환경 이해도를 높이고 향후 북서항로 활용기반 마련에 필요한 과학적 자료를 확보함
- 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단
  - 북극 해저영구동토층 및 가스하이드레이트 해리, 핑고 및 해저진흙화산과 같은 해저특이구조의 생성과 진화, 메탄 방출 현상 등 북극 해저환경 변화와 온난화 가속화 요인을 정밀하게 진단함. 또한 메탄 방출 기원 추적과 단기 방출 시나리오 산출, 고환경·고해양 기록 복원과 연대층서 정립, 해빙 소멸지역 해저환경 특성 분석까지 포함할 수 있음
- 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가
  - 공해상과 프론티어 해역을 대상으로 지구물리탐사를 수행하고 산·학·연 협동 연구를 통해 에너지 및 전략광물자원에 대한 유망지역 도출과 잠재력 평가를 수행함.

#### ○ 자료 및 성과 범위

- 프론티어 해역 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축, 북극해 전략자원 잠재력 평가 및 유망지 도출 보고서, EEZ 진입을 포함한 전략적 국제공동탐사 수행, 빙권해역 특화 해저탐사 원천기술 확보 등으로 구체화될 수 있음
- 또한 이러한 연구성과는 북극항로 대응, 기후위기 대응, 자원 평가, 해양과학영토 확장, 국제협력 확대를 위한 국가 차원의 근거자료로 활용됨

## □ 기획 추진 체계 및 경과

- 극지연구소 내부 기획연구팀과 외부 전문가 등을 구성하여 기획연구를 추진



## □ 기획 추진 경과

- 사업 기획을 위하여 북극해 지구물리 전문가로 총괄팀을 구성하고 산·학·연 외부 전문가 의견을 수렴함
- 북극해 지구물리 경험 전문가와 산학연 관련 수요를 갖고 있는 전문가 등과 대면, 화상 및 서면 회의를 통하여 기획연구를 추진

<표 1-2> 사업 기획 추진 경과

| 시기                | 주요 내용                       |
|-------------------|-----------------------------|
| '25. 04           | ✓ 북극 프론티어 해역 해저지질조사 기획연구 착수 |
| '25. 04 - '25. 10 | ✓ 비전 및 목표 도출                |
| '25. 04 - '25. 08 | ✓ 국내연구 협력체계 구축              |
| '25. 05 - '25. 12 | ✓ 상세 기획 및 세부 내용 구조화         |
| '25. 07 - '25. 09 | ✓ 산·학·연 외부 전문가 의견 수렴        |
| '25. 07 - '26. 02 | ✓ 국제공동연구 협력체계 구축            |
| '26. 01 - '26. 03 | ✓ 기획보고서 작성                  |

## 제2장 환경 및 역량 분석

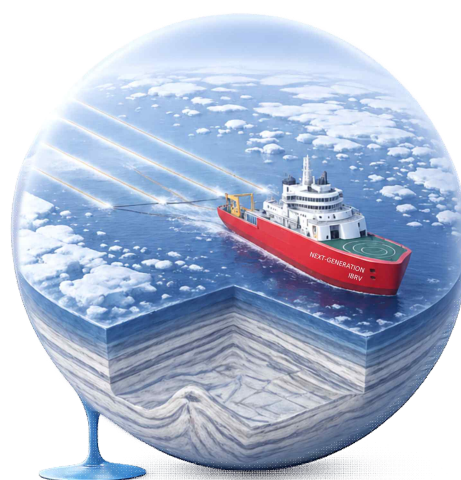
제1절 국내외 정책 동향

제2절 국내외 시장 동향

제3절 국내 기술수준

제4절 국내외 연구 동향

제5절 기존 연구와의 차별성 및 연구 성과



## □ 개요

- 북극 관련 정책, 시장 변화, 기술 수준, 국내외 연구동향, 기존 연구와의 차별성 및 연구성과를 종합적으로 분석
- 본 장은 사업 추진 필요성을 외부 환경과 내부 역량 측면에서 체계적으로 진단하고 향후 사업 추진의 근거를 제시하는 데 목적이 있음

## □ 정책 및 시장 환경 분석

- 정책은 북극항로 대응, 극지 진출 확대, 전략자원 확보, 기후위기 대응 역량 강화 방향으로 빠르게 전환
- 국내 상위계획은 차세대 쇄빙연구선 확보, 북극 고위도 진출, 극지·대양 등 미지 영역 도전, 해양자원 확보 등을 공통적으로 강조
- 시장 측면에서도 극지 선박, 북극항로, 쇄빙선 및 관련 탐사·활용 수요가 확대되고 있어 북극 해저지질 정보의 전략적 중요성이 높아짐

## □ 기술 및 연구역량 분석

- 국내 기술 수준은 일부 성과 축적에도 불구하고 선도국 대비 해양자원탐사, 극지해양자원탐사, 극한공학 인프라 분야에서 여전히 큰 격차가 존재하는 것으로 분석됨
- 특히 고위도 해역 현장탐사, 해저지질 자료의 장기 축적, 첨단 무인탐사장비 활용, 통합 정보체계 구축 측면에서 보완이 필요한 상황임
- 반면, 기존 연구를 통해 다중채널 탄성파탐사, 메탄 방출구조 연구, 북극해 GIS DB 구축, 해저시료 분석, 논문 성과 등 일정 수준의 기반은 확보함

## □ 사업 추진의 시사점

- 북극 해저지질환경 변화와 전략자원 확보 수요는 확대되고 있으나, 우리나라의 조사·탐사·분석·활용 역량은 아직 충분하지 않음
- 따라서 본 사업은 기존 성과를 기반으로 기술 고도화, 자료 축적, 국제협력 확대, 정보체계 구축을 동시에 추진하는 후속·확장형 사업으로 설계될 필요가 있음
- 정책·시장 수요는 확대되고 있으나 대응 역량의 미흡함을 확인할 수 있으며, 본 사업 추진의 타당성을 도출할 수 있음

## 제2장 환경 및 역량 분석

### 제1절 국내외 정책 동향

#### 1. 국내 정책 동향

- [국정과제 56] 북극항로 시대를 주도하는 K-해양강국 건설('25.09)
  - 북극 해빙 감소로 북극항로 활용 가능성이 확대되면서 북극은 글로벌 물류·자원·해양안보의 핵심 전략공간으로 부상하고 있음
  - 정부는 북극항로 시범운항 및 상업항로화, 국가 해상수송력 확충, 친환경 전환과 더불어 차세대 쇄빙연구선 건조 등을 통해 북극항로 시대에 대응하고 국가 신성장 동력 창출을 추진함
  - 북극항로 대응의 실효성 확보를 위해서는 단순 운항 추진을 넘어 해빙·해양·지형 등 운항·활동 기반자료의 확보와 운항 위험요소 정밀진단이 필수이며, 이에 따라 현장 관측·탐사 및 데이터 기반 역량 강화 수요가 확대됨
- 해양수산부 「2026년도 주요 업무계획」('25.12.23)
  - “북극항로 시대로의 대도약”을 비전으로 제시하고 북극항로 상업운항의 본격적인 준비와 지원체계 마련을 주요 과제로 설정하고 있음.
  - 정책 이행을 위해서는 항로 운항과 북극 관련 활동의 기반이 되는 해빙, 해양, 지형 등의 자료를 지속적으로 생산·축적할 필요가 있으며, 이는 곧 북극 현장 관측과 데이터 인프라 구축의 필요성으로 이어짐
  - 또한 북극 관련 활동은 쇄빙연구선, 극한환경 장비, 국제협상 및 협력체계 등 공공 인프라 의존성이 높은 영역이므로 안정적인 추진체계 마련이 정책 실행력 확보의 핵심 조건으로 작용함
- 「2050 북극활동전략」('21.11, 국무회의 보고)
  - 북극 거버넌스 선도국가 도약을 목표로 북극활동 전반을 범부처 중장기 전략으로 제시함
  - 추진방향은 과학조사·종합관측 및 데이터 기반 강화, 쇄빙연구선 등 관측 인프라 확충, 국제협력 강화, 새로운 경제활동 발굴로 요약됨
  - 본 전략은 ‘참여’ 중심 접근에서 현장자료 생산과 데이터 자산화(데이터 주권)로 정책의

중심축을 이동시키는 기반이 되었으며, 북극 프론티어 해역의 관측 공백 해소와 국가 전략자산(데이터·기술) 선제 확보의 필요성을 제도적으로 뒷받침함

□ 「제5차 과학기술기본계획」(‘23~’27)

- 국가적 현안 해결 및 미래 대응 관점에서 ‘우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대’ 임무와 직결되는 정책 프레임을 제공함
- 극한환경 탐사기술의 자립화 기조와 정합하며, 북극 고위도·프론티어 해역과 같은 미지영역에 대한 현장 기반 탐사·관측을 국가 차원의 전략적 투자 대상으로 위치시킴
- 따라서 북극에서의 데이터·기술 확보는 단일 과제가 아니라 과학영토 확장과 국가 전략자산 축적을 구현하는 핵심 실행수단으로 연결됨

□ 「제1차 극지활동 진흥 기본계획」(‘23~’27)

- 국가 극지활동 역량을 고도화하는 법정 종합계획으로 연구개발·인프라·국제협력·인력양성을 종합 추진하는 정책 프레임을 제시함
- 특히 차세대 쇄빙연구선 등 국가 극지 인프라와 연계하여 북극 고위도 프론티어 해역 진출 및 독자적 탐사역량 강화를 실천하도록 방향을 제시함
- 본 사업은 “고위도 진출 → 현장 관측 → 데이터 생산 → AI 기반 통합평가”의 전주기 체계를 통해 현장 관측 기반 국가역량 강화 축을 실질적으로 구현하는 이행수단임

□ 「제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획」(‘23~’27)

- 해양수산 R&D의 중기 투자·추진 로드맵으로 극지·대양 미지영역 도전, 해양자원 확보, 공공 서비스·데이터 기반 고도화 등 정책수요를 반영함
- 본 사업은 북극 고위도 미지영역의 관측 공백을 해소하고 축적 데이터를 표준화·품질관리·개방·공유하여 R&D 성과를 공공자산(데이터 인프라)으로 전환하는 구조로 계획에 부합함
- 또한 전략자원(천연가스, 망간 등) 잠재력 평가와 같은 미래 신산업·자원안보 수요를 지원할 수 있는 기반자료 생산 측면에서도 정합성이 높음

□ 「제3차 해양수산발전 기본계획」('21~'30)

- 향후 10년 해양수산 정책의 기본방향으로 해양과학기술 역량 강화 및 해양영토 기반 확충을 강조함
- 본 사업은 북극 고위도 관측역량 확보, 통합 데이터 인프라 구축, 기후·항로·자원 이슈에 대한 국가 의사결정 지원을 하나의 프로그램으로 통합하고 있어, 장기적 국가역량 축적형 투자라는 계획의 방향과 부합함
- 특히 공공성 높은 해저지질 데이터 인프라 구축은 해양영토 관리 기반 확충의 핵심 실천 수단으로 기능함

□ 「해양수산발전기본법」 제20조

- 정부가 남극·북극 등 특정지역에서의 해양과학기지 설치 및 해양 조사·연구 활성화를 위한 지원계획을 수립·시행하도록 규정함
- 북극 현장조사 및 연구활동, 데이터 인프라 구축의 법적·제도적 추진 근거를 제공하며, 공공 인프라 기반 투자 필요성을 뒷받침함

□ 「극지활동 진흥법」 제8조 및 제12조

- 국가는 극지 관련 연구개발 활성화를 위해 대학·연구기관·기업 간 협력 및 공동 연구개발 등을 예산 범위에서 지원할 수 있음
- 국제협력 촉진을 위해 외국과 정보교환, 기술협력, 공동 조사·연구 등의 활동을 추진하거나 지원할 수 있도록 규정함
- 이는 국제공동탐사(EEZ 포함) 및 자료공유를 정량 성과로 반영하는 거버넌스 실행체계 구축의 법적 근거로 기능함

□ 「해양수산과학기술육성법」 제8조

- 해양수산부 장관이 연도별·분야별 해양수산과학기술 연구개발과제를 선정하고 연구개발사업 및 전문인력 양성사업을 추진하도록 규정함
- 본 사업이 국가 R&D로서 추진될 수 있는 법적 기반을 제공하며, 데이터 기반 기술혁신과 공공자산화(표준·품질·공유체계) 추진의 근거로 기능함

## □ (시사점) 정책 연속성·거버넌스 실효성·정부지원 시급성

- 본 사업은 2026년 종료 예정 사업의 후속 신규 기획이라는 점에서 정책 연속성을 전제로 하며, 1단계('27~'29) 아라온호 기반 탐사·분석·플랫폼 구축과 2단계('30~'31) 차세대 쇄빙 연구선 기반 고위도 확장이라는 단계적 추진 구조를 핵심으로 함
- 프론티어 해역은 민간이 단독으로 접근하고 자료를 축적하기 어려운 공공 인프라 의존 영역이며, 해빙 감소로 미탐사·고위도 해역 접근성이 확대되고 있는 현시점에서 선제적 진입이 지연될 경우 선점형 탐사의 기회비용이 커질 수 있음
- 특히 차세대 쇄빙연구선 투입 시점에 맞추어 선제적인 자료와 기술 확보가 충분히 이루어지지 않으면, 취역 초기 성과 창출에 공백이 발생할 수 있음. 또한 국제 거대과학 프로그램(IODP, ICDP 등)과의 연계 시기를 놓칠 경우 국제협력 주도권 확보에도 불리하게 작용할 수 있음

## 2. 국외 정책 동향

### 가. 미국

#### □ 정책 개요

- 미국은 「A National Security Presidential Directive-66 / Homeland Security Presidential Directive-25」(2009)를 통해 북극에서의 국가이익, 국제협력, 과학연구, 자원관리 원칙을 제도화하였음
- 「Changes in the Arctic: Background and Issues for Congress」(2018.12), 「2024 Department of Defense Arctic Strategy」(2024) 등을 통해 북극정책을 고도화해 왔음. 최근에는 북극을 국가안보와 경제안보, 공급망, 과학연구가 결합된 전략 공간으로 인식하면서, 상황인식 강화와 동맹 협력 확대, 현장 대응 역량 확보를 중심으로 정책을 재정비하고 있음

#### □ 핵심 추진축

- 국가안보·국토안보와 연계한 북극 상황인식 강화
- 환경 보호와 지속가능한 자원관리 병행
- 북극항로 및 자원 관련 과학적 근거 축적 확대
- 동맹 및 파트너 국가와의 협력 강화

#### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 미국은 정밀 매핑, 수심측량, 탄성파, 지구물리·지질 시료 확보를 북극 정책 수행의 핵심 기반으로 보고 강화하고 있음. USGS의 매핑 프로그램과 Healy 쇄빙선 기반 탐사를 통해 미탐사 해역 자료 확보와 지도화 역량을 확대하고 있으며, NOAA도 정밀 해저지형 취득과 해도 갱신을 추진하고 있음
- 즉, 미국은 해저지질정보를 단순한 연구자료가 아니라 항로, 자원, 안보 판단을 뒷받침하는 국가 기반 정보로 활용하고 있으며, 과학적 자료 생산과 운용·역지 역량 강화를 함께 추진하는 특징이 있음

## 나. 러시아

#### □ 정책 개요

- 러시아는 「Basics of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic for the Period till 2020 and for a Further Perspective」(2008)를 통해 북극 정책의 기본 방향을 제시함
- 「Foundations of the Russian Federation State Policy in the Arctic for the Period up to 2035」(2020)와 「Strategy for Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Provision of National Security for the Period up to 2035」(2020)를 통해 안보, 자원, 북동항로(NSR) 중심의 장기 전략을 강화하였음

#### □ 핵심 추진축

- 주권·영토·자원을 결합한 국가이익 극대화
- 북동항로 물동량 확대와 물류축 운영 강화
- 대륙붕 외연 확정과 전략자원기지화 추진
- 북극 통제와 군사안보 요소의 정책화

#### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 러시아는 로모노소프 해령 등과 연계된 대륙붕 연장 과학근거를 지속적으로 축적하면서, 해저지질 연구를 영토와 패권의 과학적 근거로 활용하고 있음. 대륙붕 연장 승인과 연계하여 해저지질도 구축과 탐사선 기반 조사 확대를 추진하고 있으며, 이를 북동항로 운영

과 자원개발의 기반으로 연결하고 있음

- 즉, 러시아는 해저지질·지구물리 자료를 자원 확보와 항로 운영의 기초자료로 사용할 뿐 아니라, 국제법적 권리 주장의 정당성과 국가 통제력 강화를 뒷받침하는 핵심 수단으로 활용하고 있음

## 다. 캐나다

### □ 정책 개요

- 캐나다는 「Canada's Northern Strategy: Our North, Our Heritage, Our Future」(2009)를 통해 주권 강화와 지역 개발·환경보호의 기본 방향을 제시하였고 「Arctic and Northern Policy Framework」(2019)를 통해 원주민 권익과 공동개발 원칙을 제도화하였음. 북서항로(NWP)와 북극 권익은 캐나다 북극정책의 핵심 의제로 지속 관리되고 있음
- 캐나다의 북극정책은 단순한 영유권 관리에 그치지 않고 북부 지역 개발과 환경보전, 원주민 참여를 함께 고려하는 구조를 갖고 있음. 특히 북서항로와 연계된 해양권익 관리와 정책 수행의 정당성을 확보하기 위해 과학적 자료 생산을 중시하는 특징이 있음

### □ 핵심 추진축

- 북서항로를 포함한 북극 해역 관리와 권리 강화
- 북부 지역 인프라 및 산업 기반 개선
- 환경보호와 해양오염 대응역량 강화
- 원주민 참여와 공동 의사결정 체계 확대

### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 캐나다는 대륙붕 연장 입증에 필요한 과학적 근거를 확보하기 위해 정부 차원의 대규모 자료를 생산·축적하고 이를 국제 절차에 반영하는 방식으로 대응하고 있음. 특히 수심 자료와 수로·지형 정보, 탄성파, 중력, 자력 자료를 체계적으로 확보·통합하여 대륙붕 외연과 해양권익을 입증하는 과학적 기반을 강화하고 있음.
- 북서항로 관련 해저지질조사와 지구물리탐사는 이러한 정책 방향과 직접 연결되는 핵심 활동으로 볼 수 있으며, 캐나다는 자료 생산과 정책 연계를 함께 추진하는 전형적인 연안국 사례로 이해할 수 있음

## 라. 노르웨이

### □ 정책 개요

- 노르웨이는 「The Norwegian Government's High North Strategy」(2006)와 「New Building Blocks in the North: The Next Step in the Government's High North Strategy」(2009)를 통해 지속가능 성장, 연구활동, 안전과 감시, 국제협력을 결합한 북극정책 기반을 조기에 마련하였음
- 「The Norwegian Government's Arctic Policy」(2021)는 안보, 안정, 국제협력, 지역사회 발전, 기반시설을 함께 다루는 방향으로 정책을 정리하였고 「Norway in the High North – Arctic policy for a new reality」(2025)를 통해 새로운 고위도 전략을 제시하였음
- 노르웨이는 북극을 국가안보와 지역사회 유지, 자원과 환경관리, 국제협력이 동시에 맞물리는 공간으로 보고 있음. 특히 북극을 단순 자원개발 대상이 아니라 국가 영향력과 규범 기반 운영을 결합하는 공간으로 인식하고 있다는 점이 특징적임

### □ 핵심 추진축

- 주권 행사와 해양안전·감시 강화
- 지식·연구개발과 환경·자원관리 결합
- 지역사회와 원주민을 고려한 북극 운영체계 강화
- 기반시설과 통합관리 체계 발전

### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 노르웨이는 수로·해저지형에 대한 정밀조사를 정책과 산업활동의 기반으로 활용하고 있으며, 환경·안전 관리체계와 이를 연계하고 있음. 바렌츠해 지질조사와 정밀 해저지질도 작성, 환경기술 및 통합관리 기술 개발을 병행하고 있고 해양안전과 자원 활용, 환경보호를 함께 고려하는 접근을 취하고 있음
- 따라서 노르웨이는 해저지질정보를 자원 개발뿐 아니라 해양안전, 환경관리, 지역 기반 유지의 공통 기반으로 활용하는 정책 모델을 보여준다고 할 수 있음

## 마. 덴마크(그린란드)

### □ 정책 개요

- 덴마크는 「Kingdom of Denmark Strategy for the Arctic 2011-2020」(2011)을 통해 그린란드 자원개발을 포함한 북극 정책 방향을 제도화하였고 최근에는 그린란드 정부가 「Greenland in the World-Nothing About Us Without Us: Greenland's Foreign, Security and Defense Policy 2024-2033」(2024)을 발표하여 외교·안보·국방 전략의 장기 방향을 제시하였음
- 이는 그린란드의 자치권 확대와 자원개발 가능성을 바탕으로, 북극에서의 위상과 영향력을 강화하려는 흐름으로 이해할 수 있음. 특히 최근 전략은 북극을 외교, 안보, 경제, 자원 개발이 결합된 공간으로 바라보며, 그린란드가 국제사회에서 보다 직접적인 역할을 확대하려는 방향을 담고 있음

### □ 핵심 추진축

- 경제적 자립 기반 강화
- 지정학 경쟁 심화에 대응한 대외전략 강화
- 대륙붕 입증과 해양권익 확대 추진

### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 덴마크(그린란드)는 대륙붕 입증과 해양권익 확대를 자원개발 가능성과 연계하여 추진하고 있음. 그린란드 동부 해역을 포함한 자원 탐사와 광물 잠재력 평가를 통해 경제적·정책적 입지를 강화하려는 방향이 나타나며, 해저지질과 자원정보를 경제적 자립과 권익 확대의 기반으로 활용하는 경향이 강함
- 이러한 점에서 덴마크(그린란드)는 대륙붕 입증과 자원 가능성 평가를 함께 추진하는 사례로 볼 수 있으며, 북극 해저지질정보를 장기적인 대외전략과 경제전략의 기초자료로 활용하고 있음

## 바. 독일

### □ 정책 개요

- 독일은 북극 연안국은 아니지만, 기후변화 대응, 해양환경 보호, 다자협력, 과학연구를 중심으로 북극정책을 추진하고 있음. 독일 정부는 「Germany's Arctic Policy Guidelines: Germany and the Arctic in the context of climate change and the Zeitenwende」(2024)를 통해 북극을 기후위기, 안보 변화, 연구협력이 결합된 전략 공간으로 규정하고 다자협력과 환경보호, 규범 기반 질서 유지를 핵심 방향으로 제시하였음
- 독일은 북극에서 직접적인 영유권 확보보다 과학연구와 국제협력을 통해 영향력을 유지하는 접근을 취하고 있으며, 연구 인프라와 연구기관 네트워크를 통해 북극 관여를 지속하고 있음. 이는 비연안국이 과학기여와 정책 연계를 통해 북극에서 입지를 확보하는 전형적인 사례로 볼 수 있음

### □ 핵심 추진축

- 기후변화와 해양환경 보호를 중심으로 한 북극정책 추진
- 국제규범과 협력 체계 지지
- 과학연구 인프라와 연구 네트워크 기반 강화
- 책임 있는 자원 활용과 환경영향 검토 강조

### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 독일은 AWI, GEOMAR, German Arctic Office 등을 중심으로 북극 관련 과학연구와 정책 연계, 국제협력 기반을 운영하고 있음. Polarstern과 같은 연구 인프라를 활용하여 북극 해양·해저지형·기후변화 연구를 지속하고 있으며, 해저지형과 해양환경 자료를 국제공동연구와 데이터 기여의 형태로 축적하는 특징이 있음
- 따라서 독일은 해저지질·해양환경 자료를 직접적인 영토 주장보다는 국제적 과학기여, 환경관리, 규범 기반 협력 확대의 수단으로 활용하고 있다고 볼 수 있음. 이는 우리나라와 같은 비연안국에 시사하는 바가 큼

## 사. 중국

### □ 정책 개요

- 중국은 2013년 북극이사회 옵서버 가입 이후 쇄빙선 활용, 북극기지 운영, 전담조직 설치, 연구투자 확대 등을 통해 북극 연구 인프라를 강화해 왔음. 대표 정책문서인 「China's Arctic Policy」(2018)는 'Near-Arctic State' 정체성을 제시하며, 과학외교와 공동탐사를 통해 북극 거버넌스 발언권과 접근권을 확대하는 전략을 공식화하였음
- 중국은 북극을 자국 영토 밖의 공간으로 보면서도, 과학적 기여와 경제적 연계를 통해 북극 활용 기반을 넓히고 있음. 즉, 직접적인 권리 주장보다는 연구와 외교, 협력 참여를 통해 실질적인 영향력을 강화하는 방향이 뚜렷함

### □ 핵심 추진축

- 이해·보호·개발·거버넌스 참여의 정책 목표
- 연구협력과 외교·경제 협력 병행
- 전담 프로그램과 기금 기반의 지원체계 운영

### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 중국은 해저지질·해양·환경 연구를 국제협력과 공동탐사 형태로 확대하며, 과학기여를 통해 접근권과 발언권을 확보하는 전략을 취하고 있음. 쇄빙연구선을 활용한 통합 현장관측과 샘플링 역량을 지속적으로 확대하고 있으며, 해저지질 연구를 과학외교 수단으로 적극 활용하는 경향이 뚜렷함
- 따라서 중국은 북극 해저지질자료를 과학적 기여와 정책적 영향력 확대를 동시에 추구하는 수단으로 활용하고 있다고 볼 수 있음. 이러한 접근은 비연안국이 과학연구와 데이터 생산을 통해 영향력을 키우는 전략을 잘 보여줌

## 아. 일본

### □ 정책 개요

- 일본은 「Japan's Arctic Policy」(2015)를 기반으로 북극활동의 정책 일관성과 실행력을 강화해 왔으며, 총리실 산하 정책조정체계를 통해 북극정책을 총괄하고 있음. 연구 측면에서는 NIPR와 JAMSTEC 등을 중심으로 공동연구와 인프라 강화를 추진하고 있고 최근에는

ArCS III와 Mirai II를 통해 연구체계를 고도화하고 있음

- 일본은 북극에서 직접적인 권리 확보보다 연구 인프라, 거점 운영, 컨소시엄 기반 협력을 통해 단계적으로 역량을 축적하는 전략을 취하고 있음. 이는 안정적인 연구체계와 데이터 활용 기반을 동시에 강화하는 방식이라는 점에서 특징적임.

#### □ 핵심 추진축

- 외교·정책 실행력 강화
- 고위도 연구거점과 연구 인프라 확보
- 컨소시엄 기반 공동연구를 통한 역량 결집

#### □ 북극 정책 관련 해저지질·탐사 분야 현황 및 전략

- 일본은 단독 탐사보다 국제협력과 컨소시엄 기반 공동연구를 통해 자료와 해석 역량을 축적하는 접근을 취하고 있음. 최근에는 Mirai II 건조와 ArCS III 추진 등을 통해 관측 공백 해소, 다학제 연구, 자료 해석·모델링 역량을 함께 강화하고 있으며, 협력 네트워크와 연구 인프라를 결합해 북극 자료와 정책 활용 기반을 단계적으로 확대하고 있음
- 따라서 일본은 장기적 연구체계와 협력 네트워크를 결합하여 북극 대응 역량을 쌓아가는 비연안국 모델로 평가할 수 있음. 특히 자료 축적과 공동연구의 연속성을 중시하는 점은 우리나라에도 참고가 될 수 있음

## 자. 해외 북극정책 시사점

#### □ 북극권 국가는 북극해를 주권, 국가이익에 대한 전략 공간으로 인식

- 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, 덴마크 등 북극권 국가는 북극을 단순한 연구공간이 아니라 주권·관할권, 항로, 안보, 자원 확보와 연결되는 전략 공간으로 인식하고 있음
- 이들 국가는 해저지질조사, 수로·해저지형 매핑, 대륙붕 입증 자료 생산을 단순 연구가 아니라 국가이익을 뒷받침하는 기반 정보로 활용하고 있음

□ 비북극권 국가의 정책 동향

- 독일, 중국, 일본 등 비 북극권 국가는 직접적인 영유권 주장보다는 과학연구, 국제공동연구, 데이터 기여, 외교적 참여를 통해 북극에서의 존재감과 영향력을 확보하고 있음
- 비 북극권 국가 북극정책의 핵심은 소유보다 접근, 통제보다 참여, 영토 주장보다 기여를 통한 영향력 확보에 있다고 볼 수 있으며, 이는 우리나라가 독자적 자료 확보와 국제공동연구, 협력 기반 확대를 병행해야 하는 이유를 잘 보여줌

<표 2-1> 주요국 북극정책의 추진 방향 및 해저지질·탐사 분야 시사점

| 국가        | 정책 방향                           | 해저지질·탐사 관련 시사점                                    |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| 미국        | 국가안보, 상황인식, 동맹 협력, 자원·항로 판단 강화  | 정밀 매핑과 지구물리·지질자료를 항로·안보·자원 판단의 핵심 기반으로 활용         |
| 러시아       | 자원·물류·안보를 결합한 국가전략 추진           | 해저지질 연구를 대륙붕 권리 주장, 북동항로 운영, 자원기지화의 과학적 근거로 활용    |
| 캐나다       | 주권, 북서항로 관리, 지역개발, 환경보전, 원주민 참여 | 수심·탄성파·중력·자력 자료를 축적해 대륙붕 외연과 북서항로 관련 과학적 근거를 강화   |
| 노르웨이      | 안보, 지역사회, 연구개발, 환경·자원관리 결합      | 수로·해저지형·지질조사를 해양안전과 환경관리, 자원활용의 공통 기반으로 활용        |
| 덴마크(그린란드) | 자원개발, 대외전략, 대륙붕 입증, 해양권익 확대     | 해저지질과 자원정보를 경제적 자립과 권익 확대의 기초 자료로 활용              |
| 독일        | 기후변화 대응, 환경보호, 협력, 과학연구         | 해저지질·해양환경 자료를 국제공동연구와 정책 연계, 규범 기반 협력 확대의 수단으로 활용 |
| 중국        | 이해·보호·개발·거버넌스 참여, 과학외교 강화       | 해저지질 연구를 과학외교와 접근권·발언권 확보 수단으로 활용                 |
| 일본        | 정책조정, 연구거점 강화, 협력 네트워크 확대       | 단독 탐사보다 국제협력·컨소시엄 기반 공동연구를 통해 자료와 해석 역량을 축적       |

## 제2절 국내외 시장 동향

### 1. 국내 관련 시장 및 수요

#### □ 북극 해저지질탐사 직접시장 미형성

- 현재 국내에는 북극 해저지질탐사를 직접 대상으로 하는 상용 서비스 시장이 본격적으로 형성되어 있지 않으며, 민간 주도의 직접 거래시장도 아직 초기 수준에 머물러 있음
- 다만 북극항로 상업화, 전략광물 공급망 불안정, 기후위기 대응 수요가 확대되면서, 북극 해저지질탐사 성과를 활용할 수 있는 해운·물류, 해외 광물자원·공급망, 기후·탄소, 조선·해양, ICT·디지털, 공공정책 분야의 수요는 점차 커지고 있음
- 따라서 현 단계에서는 탐사 활동 자체의 시장규모보다, 향후 산업·정책 의사결정에 활용될 공공기반 데이터, 위험평가 정보, 입지·환경 판단자료, 극지 운항 지원기술의 기초정보에 대한 선제적 수요를 중심으로 접근하는 것이 타당함

#### □ 북극항로 상업화와 자원개발 확대에 따른 국내 산업의 북극 대응형 정보·기술 수요 증가

- 북극항로 상업화가 가속되면서, 국내 해운·물류 분야에서는 항로 안전운항을 위한 해빙·기상·해양환경 정보 수요가 증가하고 있으며, 이에 더해 항로 주변의 해저지형, 천부지질, 해저위험요소와 같은 기초 탐사정보의 활용 필요성도 점차 커지고 있음
- 북극항로의 거리·시간 단축 가능성이 부각되면서, 국내 항만·물류 기업은 환적·정비·보급 거점 전략 수립을 위한 환경·운항 데이터 확보가 요구되고 있으며, 이는 북극해역에 대한 종합적 해저지질·환경 정보 수요로 이어질 가능성이 큼
- 또한 북극 자원개발이 본격화될 경우, 국내 에너지·자원 기업은 탐사 대상지 선별, 개발 리스크(환경·안전) 평가, 사업성 분석을 위한 해저지질·환경 정보에 대한 수요가 확대될 것으로 예상됨

#### □ 북극항로 상업화에 따른 국내 해운·물류 분야의 북극 대응형 정보 수요 확대 가능성

- 해양수산부 보도자료에 따르면 2024년 국내 무역항의 컨테이너 물동량은 3,173만 TEU로 역대 최대를 기록하였고 이 중 수출입 물동량은 1,768만 TEU, 환적 물동량은 1,389만 TEU에 달하였음. 같은 해 부산항은 2,440만 TEU를 처리하여 국내 전체 컨테이너 물동량

의 약 77%를 담당하였고 환적 물동량도 1,350만 TEU로 국내 환적의 약 97%를 차지함. 이는 국내 해운·물류체계가 대형 환적항과 글로벌 해상운송 네트워크에 크게 의존하고 있음을 보여줌

- 향후 북극항로 활용이 현실화될 경우, 국내 해운·물류 부문에서는 기존의 해빙·기상·해양정보뿐 아니라 항로 주변 해저지형, 천부지질, 해저위험요소, 항만 연계 환경정보에 대한 수요가 함께 증가할 가능성이 큼. 특히 부산항과 같은 글로벌 환적거점은 북극항로와 연계한 환적·보급·정비 전략 수립 과정에서 북극 해역의 기초 탐사정보를 필요로 할 수 있음.
- 따라서 북극해저지질탐사 성과는 단순한 연구자료를 넘어, 향후 항로 운영 안정성 검토, 환적거점 전략 수립, 운항 리스크 저감, 항만 연계 의사결정 지원을 위한 기초자료로 활용될 수 있음

#### □ 해외 광물자원·공급망 대응 측면에서 북극 해저지질정보의 전략적 활용 가능성 증대

- 국제에너지기구(IEA)에 따르면, 구리·리튬·니켈·코발트·흑연·희토류 등 정제 핵심광물 시장가치는 2024년 2,300억 달러를 초과하였음. 이는 에너지전환과 첨단산업 확대에 핵심광물의 경제적 중요성이 빠르게 커지고 있음을 보여주는 지표임
- 우리나라는 핵심광물 공급망 측면에서 특정국 의존도가 높은 구조를 보이고 있음. 산업통상자원부와 한국무역협회 자료에 따르면, 2023년 1~9월 기준 대중국 수입의존도는 천연흑연 97.7%, 인조흑연 94.3%로 사실상 대부분을 중국에 의존하고 있음. 이에 정부는 2030년까지 10대 전략 핵심광물 재자원화율 20% 달성을 목표로 공급망 안정화 정책을 추진하고 있음
- 이러한 여건에서 북극해저지질탐사 성과는 단순한 학술정보를 넘어, 해외 광물자원 개발 가능성 검토, 공급망 다변화, 유망지역 선별, 개발 리스크 평가를 위한 전략자료로 활용될 수 있음. 즉, 북극해저지질정보는 당장 국내 직접시장으로 연결되기보다, 해외 자원개발 및 공급망 대응 역량을 뒷받침하는 선행 정보자산으로서 의미가 큼

#### □ 기후·탄소 관련 정책 수요 확대에 따른 북극 해저환경 변화 정보의 활용성 증가

- 세계은행에 따르면, 전 세계 탄소가격제는 2024년 1,000억 달러 이상의 재원을 창출하였으며, 현재 탄소가격제는 전 세계 온실가스 배출량의 약 28%를 포괄하고 있음. 이는 기후위험과 탄소관리가 이미 대규모 정책·시장 메커니즘과 연결되어 있음을 보여줌
- 국내에서도 배출권거래제가 기후정책의 핵심 수단으로 자리 잡고 있음. 환경부에 따르면 우리나라 배출권거래제는 국가 온실가스 배출량의 74%를 관리하고 있으며, 배출권 거래

량은 제도 초기인 2015년 566만 톤에서 2024년 1억 1,124만 톤으로 확대되었음

- 북극 해역의 해저 동토층 변화, 메탄 방출 가능성, 해저지반 불안정성 등은 직접적인 탄소거래 품목이라기보다, 기후리스크의 정량화와 정책 대응의 과학적 근거를 제공하는 정보로서 중요성이 큼. 따라서 북극해저지질탐사 자료는 향후 기후·탄소 관련 정책, 온실가스 위험 진단, 해양기후 변화 평가를 지원하는 공공·연구 기반 데이터로서 수요가 확대될 가능성이 높음

#### □ 조선·해양 산업 중심의 극지 선박 기술 수요 고도화

- 북극항로 활성화로 쇄빙 사양이 LNG선·유조선·컨테이너선의 핵심 요건으로 부상하면서, 쇄빙선체·극저온 화물·운항 안정성 기술에 대한 개발·검증 수요가 커짐
- 국내 조선업체는 쇄빙 LNG 운반선 등에서 경쟁력을 보유하고 있어, 수주 확대에 대응한 성능 기준 고도화, 설계·시험평가(인증) 역량 강화 요구가 증가함
- 극지 운항 서비스 시장이 형성되며, 단순 운송을 넘어 극지 항해 컨설팅, 에스코트, 운항 최적화 솔루션 등 연관 산업 수요가 동반 확대됨

<표 2-2> 한국 조선업체 극지 선박 수주 실적(2020-2024)

| 기업      | 주요 수주 실적                                      | 기술 수준    | 2024년 수주액 |
|---------|-----------------------------------------------|----------|-----------|
| 한화오션    | 쇄빙LNG 운반선19척 인도<br>Arctic LNG 2<br>프로젝트용Arc7급 | 세계 최고 수준 | 45억달러     |
| HD현대중공업 | PC3급 쇄빙 유조선5척<br>건조<br>노르웨이Equinor 쇄빙<br>셔틀탱커 | 세계 최고 수준 | 38억달러     |
| 삼성중공업   | 쇄빙LNG-FSRU 개발<br>극지용 드릴십 설계 기술<br>확보          | 선진 수준    | 22억달러     |

※ 자료: 각 기업 IR 자료, 2024

#### □ ICT·디지털 기반 북극 항해·운영 솔루션 수요 확대

- 극지 항로 운항은 결측·불확실성이 커 AI 기반 항해 의사결정(항로·속력·위험회피) 지원 기술 수요가 증가함
- 극지용 통신·센서·디스플레이 등 혹한 환경 대응 장비에 대한 산업 수요가 확대되며, 운항·정비·안전관리의 디지털화 요구가 커짐

□ 정부·공공부문 중심의 북극 진출 기반 조성을 위한 수요 증가

- 북극항로 거점항만 육성, 범부처 협의체/전담 TF 운영, 투자재원 조성 등 정책 추진이 확대되며, 정책 의사결정에 활용 가능한 관측·예측·위험평가 데이터의 필요성이 증대됨
- 또한 차세대 쇄빙연구선 운용과 연계하여 조사·탐사 역량, 장비·인력·데이터 체계를 선제적으로 준비할 필요가 커지고 있으며, 이는 민간시장보다 정부·공공부문 수요가 더 먼저 형성되는 이유이기도 함

## 2. 국외 관련 시장 및 수요

□ 북극항로 상업화 가속에 따른 글로벌 운항·안전·인프라 수요 급증

- 해빙 감소와 운항 가능기간 확대로 북극항로가 글로벌 해운의 핵심 변수로 부상하며, 2024년 북극항로 화물량은 37.8백만 톤으로 역대 최고치를 기록한 것으로 제시됨
- 통과항해(92회)·통과 화물량 등 통과 수요도 증가하는 흐름으로 제시됨
- 물동량은 LNG·원유·석탄 등 에너지 자원 중심으로, 에너지 개발과 연계된 항로 수요가 지속 확대되는 구조로 나타남

<표 2-3> 북극항로 물동량 변화 추이(2020-2024)

| 연도   | 물동량(백만톤) | 전년 대비 증가율 | 주요 화물     | 통과항해(회) |
|------|----------|-----------|-----------|---------|
| 2020 | 32.97    | -3.8%     | LNG, 석유제품 | 62      |
| 2021 | 34.85    | 5.7%      | LNG, 석탄   | 71      |
| 2022 | 34.11    | -2.1%     | LNG, 컨테이너 | 54      |
| 2023 | 36.25    | 6.3%      | LNG, 일반화물 | 84      |
| 2024 | 37.8     | 4.3%      | LNG, 원유   | 92      |

※ 자료: Rosatom 공식 발표, 2024

□ 거리·시간 단축에 기반한 경제성 부각으로 북극 해운 서비스 시장 성장

- 수에즈 대비 운항거리·시간 단축 가능성이 제시되며(부산-로테르담 기준 21,100 km 대비 15,000 km), 연료비 절감과 선박 운용 효율 개선 기대가 확대됨
- 이에 따라 운송뿐 아니라 극지 항해 컨설팅, 쇄빙선 에스코트, 극지 항만 운영 등 고부가가치 서비스 시장이 새롭게 성장함

□ 북극 에너지·자원개발의 본격화로 탐사·생산 기술 및 투자 수요 확대

- 북극 에너지 자원 잠재력에 대한 관심이 커지며, 석유·가스·가스하이드레이트 등 전략자원 확보 경쟁이 심화되는 양상이 나타남
- 서방 제재에도 불구하고 러시아는 중국과의 협력을 통해 개발을 지속하는 흐름이 제시되며, 극한환경 시추/생산, 친환경 채굴, 원격·무인 운영, 모듈화 설계 등 기술혁신 수요가 확대됨

<표 2-4> 북극 주요 자원개발 프로젝트 현황 (2024년 기준)

| 프로젝트           | 국가   | 자원   | 매장량                | 투자규모     | 현황       | 연간 생산량  |
|----------------|------|------|--------------------|----------|----------|---------|
| 야말LNG          | 러시아  | 천연가스 | 1.3조m <sup>3</sup> | \$270억   | 운영 중     | 1,650만톤 |
| 북극LNG 2        | 러시아  | 천연가스 | 1.9조m <sup>3</sup> | \$210억   | 부분 가동    | 1,980만톤 |
| Johan Castberg | 노르웨이 | 석유   | 6.5억배럴             | \$85억    | 2024년 가동 | 19만배럴/일 |
| Vostok Oil     | 러시아  | 석유   | 230억배럴             | \$1,200억 | 제재로 지연   | 3,000만톤 |
| Willow         | 미국   | 석유   | 6억배럴               | \$80억    | 개발 진행    | 18만배럴/일 |

※ 자료: 각국 정부 발표 자료 종합

□ 쇄빙선 및 극지용 선박 시장의 구조적 성장

- 북극항로 활성화와 자원개발 확대로 쇄빙선·극지용 선박 수요가 증가하며, 2030년 시장 규모가 135억 달러로 확대될 것으로 전망됨
- LNG 운반선·유조선·컨테이너선의 쇄빙 사양이 필수 요건으로 부상하면서, 설계·소재·안전·운항 기술 전반에 대한 수요가 확대됨

<표 2-5> 글로벌 쇄빙선 시장 규모 및 전망

| 구분             | 2020년    | 2022년   | 2024년           | 2030년(전망) |
|----------------|----------|---------|-----------------|-----------|
| 시장 규모<br>(억달러) | 45       | 58      | 72              | 135       |
| 연평균 성장률        | -        | 13.2%   | 11.8%           | 10.5%     |
| 주요 수요처         | 러시아, 북유럽 | 러시아, 중국 | 러시아, 중국,<br>아시아 | 글로벌 확산    |

※ 자료: Marine Insight, Arctic Shipping Market Report 2024

□ 해저자원 탐사·개발 및 해저지질조사 기술 시장의 고성장

- 노르웨이의 북극 해저 광물 탐사·채굴 승인(2024)과 라이선스 확대 추진 등으로 심해저 광물 개발이 부상함
- 희토류·망간단괴·가스하이드레이트 등 전략자원의 가치가 부각되며, 자원개발과 영유권 관련 이슈 대응을 위한 해저지질조사 수요가 급증함
- 해저지질조사 시장은 2030년 280억 달러, 북극 비중이 35%에 이를 것으로 전망되며, 관련 장비·처리·해석·플랫폼 시장이 동반 성장함

<표 2-6> 글로벌 해저지질조사 시장 규모

| 구분         | 2020년 | 2022년 | 2024년 | 2030년(전망) |
|------------|-------|-------|-------|-----------|
| 시장 규모(억달러) | 85    | 115   | 145   | 280       |
| 북극 비중(%)   | 15%   | 22%   | 28%   | 35%       |
| 연평균 성장률    | -     | 16.2% | 12.8% | 11.5%     |

※ 자료: MarketsandMarkets, Subsea Survey Market Report 2024



## 제3절 국내 기술수준

### 1. 분석 개요

- 국가 핵심·중점기술 및 해양수산과학기술 분야의 국내외 기술 수준을 비교·분석
- 국가 핵심·중점기술 기술수준평가(KISTEP): 과학기술 발전을 촉진하고 기술수준을 점검하기 위해 국가적 핵심기술(11대 분야 136개 기술)에 대해 2년 주기로 조사·분석 실시
- 해양수산과학기술 기술수준분석(KIMST): 해양수산 과학기술 분류체계의 중분류 기술에 대해 미국, EU, 일본, 중국과의 기술수준 및 기술격차 등을 분석

#### □ 주요 분석 대상 기술

- 국가 핵심·중점기술 기술수준평가(KISTEP) 및 해양수산과학기술 기술수준분석(KIMST) 보고서를 활용하여 본 사업과 연관된 기술의 수준 비교 및 분석

<표 2-7> 주요 분석 대상 기술 항목

| 주요 분석 대상 기술           | 기술명         |
|-----------------------|-------------|
| 국가 핵심·중점기술 분석(KISTEP) | 해양 자원탐사기술   |
|                       | 극한공간 인프라 기술 |
| 해양수산과학기술 분석(KIMST)    | 해양광물자원      |
|                       | 해양에너지자원     |
|                       | 극지해양자원탐사    |
|                       | 극지공학인프라     |



[그림 2-1] 국내 기술수준 분석에 활용한 보고서

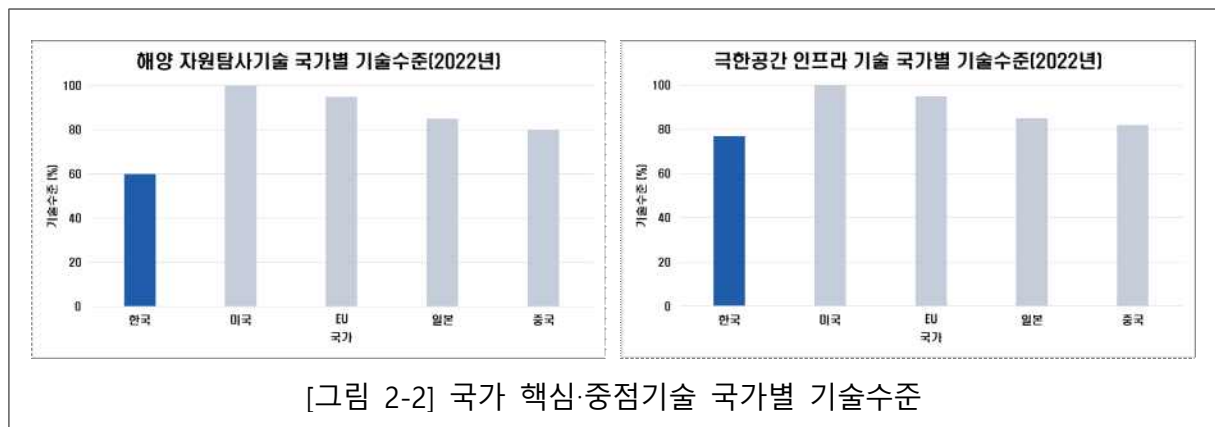
□ 국가 핵심·중점기술 분석 결과(KISTEP)

- 해양 자원탐사기술(60%, 7년 격차)이 특히 취약하며, 극한공간 인프라(77%, 5년 격차)는 상대적으로 양호하지만 여전히 격차가 존재함

<표 2-8> 국가 핵심·중점기술 분석 결과 (해양 자원탐사기술·극한공간 인프라 기술)

| 기술명         | 국가 | 2022년 기술수준 (%) | 기술격차 (년) |
|-------------|----|----------------|----------|
| 해양 자원탐사기술   | 한국 | 60             | 7        |
|             | 미국 | 100            | 0        |
|             | EU | 95             | 1        |
|             | 일본 | 85             | 2.0      |
|             | 중국 | 80             | 3.5      |
| 극한공간 인프라 기술 | 한국 | 77             | 5        |
|             | 미국 | 100            | 0        |
|             | EU | 95             | 1        |
|             | 일본 | 85             | 3.8      |
|             | 중국 | 82             | 4        |

※ 자료: 2022년 기술수준평가(2023)



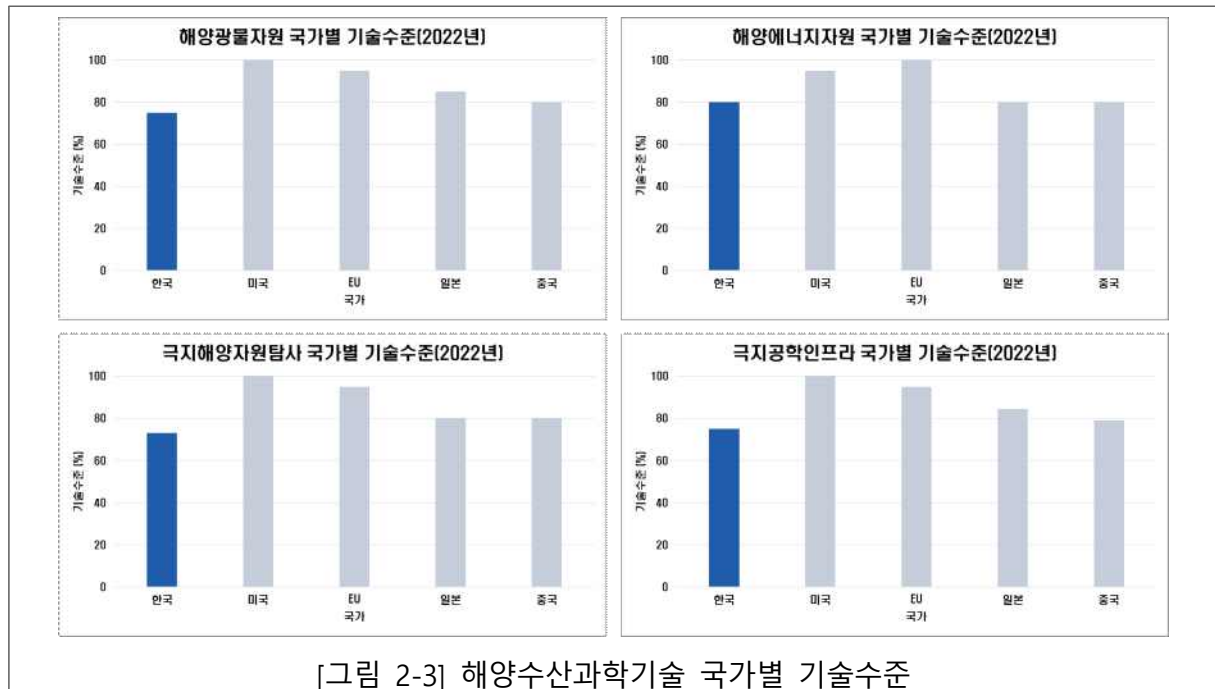
□ 해양수산과학기술 수준 분석 결과(KIMST)

- 한국은 4개 분야 모두 선도권(미국·EU) 대비 격차(약 3.5~5.3년)가 존재함
- 극지해양자원탐사(73%, 5년)가 취약 영역으로, 집중 투자·역량 축적 필요성이 큼

<표 2-9> 국가 핵심·중점기술 분석 결과  
(해양광물자원·해양에너지자원·극지해양자원탐사·극한공학인프라)

| 기술명      | 국가 | 2022년 기술수준 (%) | 기술격차 (년) |
|----------|----|----------------|----------|
| 해양광물자원   | 한국 | 75             | 5.3      |
|          | 미국 | 100            | 0        |
|          | EU | 95             | 1.5      |
|          | 일본 | 85             | 3        |
|          | 중국 | 80             | 5        |
| 해양에너지자원  | 한국 | 80             | 3.5      |
|          | 미국 | 95             | 1.2      |
|          | EU | 100            | 0        |
|          | 일본 | 80             | 3        |
|          | 중국 | 80             | 3.9      |
| 극지해양자원탐사 | 한국 | 73             | 5        |
|          | 미국 | 100            | 0        |
|          | EU | 95             | 1        |
|          | 일본 | 80             | 3.5      |
|          | 중국 | 80             | 4.3      |
| 극지공학인프라  | 한국 | 75             | 4.5      |
|          | 미국 | 100            | 0        |
|          | EU | 95             | 1        |
|          | 일본 | 84.5           | 2.8      |
|          | 중국 | 79             | 3.3      |

※ 자료: 제2차 해양수산과학기술육성 기본계획 수립연구(2023)



#### □ 기술별 한계점

- 전반적으로 선도국 대비 기술수준이 60~80% 수준이며 격차가 3.5~7년으로 나타나, 특히 해양 자원탐사·극지해양자원탐사 분야의 취약성이 큼
- 공통 취약점은 전문인력 부족, 운용·실증 경험 부족, 중장기 투자·거버넌스(연속 지원) 부족 등으로 요약됨. 따라서 기술격차 해소를 위해 국가적 지원이 필요함

<표 2-10> 세부기술별 한계점

| 기술명         | 기술수준(%) | 격차(년) | 주요 취약점 및 분석 내용               |
|-------------|---------|-------|------------------------------|
| 해양 자원탐사기술   | 60      | 7     | 전문 연구인력·전공 인력풀 부족            |
| 극한공간 인프라 기술 | 77      | 5     | 극한환경에서의 직접 운용·개발 경험 부족       |
| 해양광물자원      | 75      | 5.3   | 정부연구비 규모·연구인력·연구시설/장비 부족     |
| 해양에너지자원     | 80      | 3.5   | 정부연구비 규모·장기 안정적 연구지원·법·제도 미흡 |
| 극지해양자원탐사    | 73      | 5     | 연구비·연구인프라·연구인력 규모 제약         |
| 극지공학인프라     | 75      | 4.5   | 극지개발 필요성/시급성에 대한 사회적 공감 부족   |

## 제4절 국내외 연구 동향

### 1. 국내 연구 동향

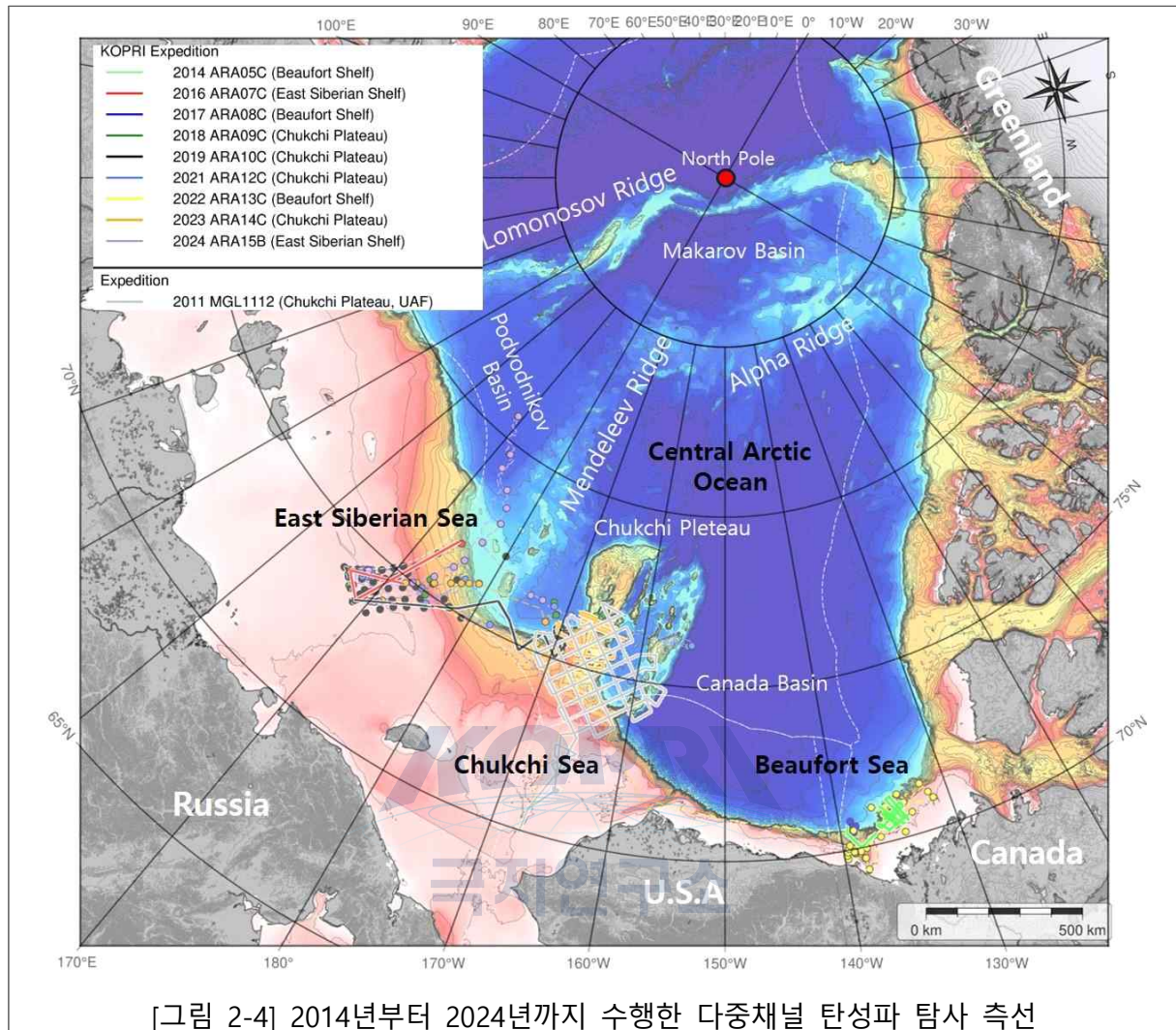
- 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 독자적인 지구물리탐사 수행
  - 극지연구소는 2010년부터 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해에서 독자적인 지구물리탐사를 수행해 왔으며, 이를 기반으로 해저지형 조사, 해양지질 연구, 퇴적물 코어 분석 등 다학제적 북극 연구를 지속적으로 확대해 왔음. 이는 국내 연구기관이 자체 관측 역량을 바탕으로 북극 해저환경을 직접 조사·해석할 수 있는 기반을 마련했다는 점에서 중요한 의미를 가짐
  - 해당 연구를 통해 해저지형, 천부지층, 퇴적물, 메탄 관련 환경자료 등 다양한 유형의 해양지질·지구물리 자료가 축적되어 왔으며, 축적된 자료는 해저지질 연구뿐 아니라 기후변화, 메탄 순환, 자원 잠재성 평가, 항로 안전성 검토 등 다양한 분야에서 활용되고 있음
  - 주요 확보 자료에는 다중채널 탄성파 탐사자료, 스파커 탄성파 탐사자료, 천부지층 탐사자료, 다중빔 해저지형자료, 메탄농도 관측자료, 해수시료, 퇴적물 시추자료, 미생물군집 및 지화학 분석자료 등이 포함됨
  - 아라온호 기반 탐사는 단순한 개별 관측을 넘어 북극 해저지질 정보의 축적과 자산화를 가능하게 한 핵심 기반으로 평가할 수 있으며, 향후 프론티어 해역 확장 연구의 출발점이라는 점에서 전략적 중요성이 큼
- [해양수산부R&D] 북극해 해저자원환경 탐사 및 해저메탄 방출 현상 연구
  - 극지연구소는 2016년 5월부터 2021년 4월까지 해양수산부 R&D '극지 및 대양과학연구' 사업의 일환으로 '해저자원환경 탐사 및 해저메탄 방출현상 연구'를 수행하며, 북극해 해저지질 및 자원환경 분야 연구를 본격화하였음
  - 해당 연구를 통해 척치고원 일대에서 가스하이드레이트 부존 가능성을 확인하고 동시베리아해 망간단괴 산출, 해저영구동토층 하부 경계 규명, 척치고원 과거 빙상 거동 추적 등 다양한 성과를 도출하였음. 이러한 성과는 북극해 해저자원과 지질환경 변화 연구를 국내 연구진이 주도적으로 수행할 수 있음을 보여주는 대표 사례임
  - 특히 이 시기 연구는 북극해를 대상으로 한 국내 해저지질 연구가 탐색적 수준을 넘어 구조·환경·자원 잠재성을 종합적으로 해석하는 단계로 진입하는 계기를 마련하였다는 점에서 의미가 큼. 또한 후속 연구사업의 기획과 국제공동연구 확대를 가능하게 한 선행 기반으로도 평가됨

#### □ [해양수산부R&D] 북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구

- 극지연구소는 2021년 4월부터 해양수산부 R&D '극지 해저환경 및 해저조사 연구' 사업을 통해 '북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구'를 수행하고 있음. 이는 기존 탐사 성과를 기반으로 해저환경 변화 메커니즘을 보다 정밀하게 규명하고 해저지질정보의 활용 범위를 확대하기 위한 심화 연구 단계로 볼 수 있음
- 현재까지 동시베리아해 메탄 방출구조 발견, 보퍼트해 해저영구동토층 붕괴에 따른 지형 변화 규명, 가스하이드레이트 부존에 대한 지구물리학적 특성 분석 등 기존 북극해 탐사 성과를 정밀화·고도화하는 연구가 추진되고 있음
- 이러한 연구는 북극해 해저환경 변화가 단순한 지역적 현상이 아니라 기후변화, 메탄 방출, 사면 안정성, 해저자원 잠재성과 연결되는 복합 현상임을 보여주며, 향후 국가 차원의 북극 대응전략 수립을 위한 핵심 과학 근거를 제공함

#### □ 북극해 해저지형 탐사 연구

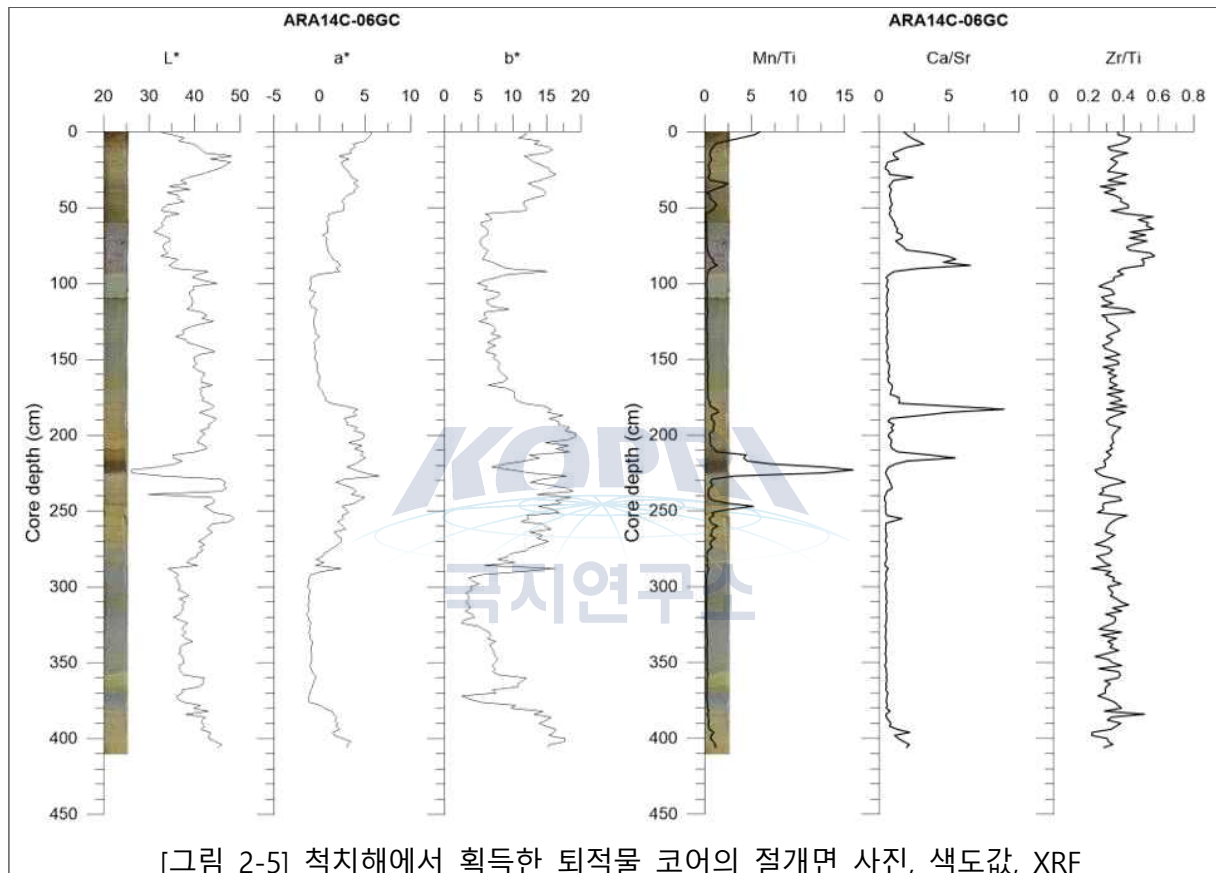
- 극지연구소는 북극해 해저지형 특성과 해저면 하부 구조를 파악하기 위해 다중채널 탄성 파탐사, 천부지층탐사, 다중빔 해저지형 탐사 등 다양한 지구물리탐사 기법을 적용해 왔음. 이러한 자료는 해저면 형상뿐 아니라 천부지층 구조와 퇴적환경을 함께 파악할 수 있게 해 주는 핵심 기반자료임
- 해저지형 탐사자료는 빙하 이동 흔적, 퇴적체 분포, 침식 및 퇴적 구조를 복원하는 데 활용되며, 북극해의 지질 연대기와 빙상 거동을 해석하는 데 핵심적인 역할을 함
- 해저지형 자료를 통해 빙하 찰흔, 퇴적 마운드 등 다양한 지형 요소를 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 빙하의 전진·후퇴 이력과 퇴적과정을 복원할 수 있음(Kim et al., 2021). 또한 북극 척치해에서 취득한 음향자료와 코어 분석을 결합하여 제4기 후기의 빙하 확장 후퇴 역사를 규명한 사례도 보고된 바 있음(Joe et al., 2025)
- 아울러 해저지형 자료는 메탄 방출구조 파악, 해저 사면 안정성 분석, 천부 지반 특성 평가 등으로도 활용될 수 있어 그 응용 범위가 넓음
- 특히 최근 북극항로 활용 가능성이 확대되면서 항로 개척과 안전 운항을 위한 해저지형 정보의 중요성이 더욱 커지고 있음. 따라서 해저지형 탐사는 단순한 학술 연구를 넘어 향후 북극항로 대응과 해상활동 안전 확보를 위한 기초 인프라로서도 필수적인 분야임



#### □ 해저지질시료를 통한 북극해 해저환경 변화 연구

- 극지연구소는 아라온호 기반 현장조사를 통해 중력코어, 다중코어, 박스코어 등을 활용하여 북극해 퇴적물을 확보하고 있으며, 이를 해저환경 변화 복원과 메탄 관련 지질현상 규명의 기초 자료로 활용하고 있음
- 확보된 코어는 단순 시료 보관에 그치지 않고 암상 기재와 다양한 비파괴 분석을 통해 층서 변화와 환경 변동 연구에 활용되고 있음
- 대표적으로 암상 기재, 색도값, 대자율, XRF(X-ray Fluorescence) 등의 비파괴 분석을 수행하여 코어 전 구간에 대한 연속적인 환경 변동 정보를 고해상도로 확보하고 있음. 퇴적물의 색, 조직, 입도, 구조 등을 포함한 암상 기재는 선상 및 실험실에서 수행되어 층서 단위 구분과 사건층, 상변화 기록을 체계화함

- 이러한 코어 기반 분석은 해역별 표층 및 천부 퇴적층 특성 차이를 파악하고 메탄 방출과 연계된 퇴적환경 변화, 유기물 유입 변화, 암상층서 체계 정립 등에 대한 핵심 근거자료를 제공함
- 따라서 북극해 퇴적물 코어 연구는 해저환경 변화의 시간적 기록을 복원하는 데 매우 중요하며, 향후 장기 변화 추세 산정과 환경-지질 연계 해석의 신뢰성을 높이기 위해 지속적으로 체계적인 코어 확보가 필요함

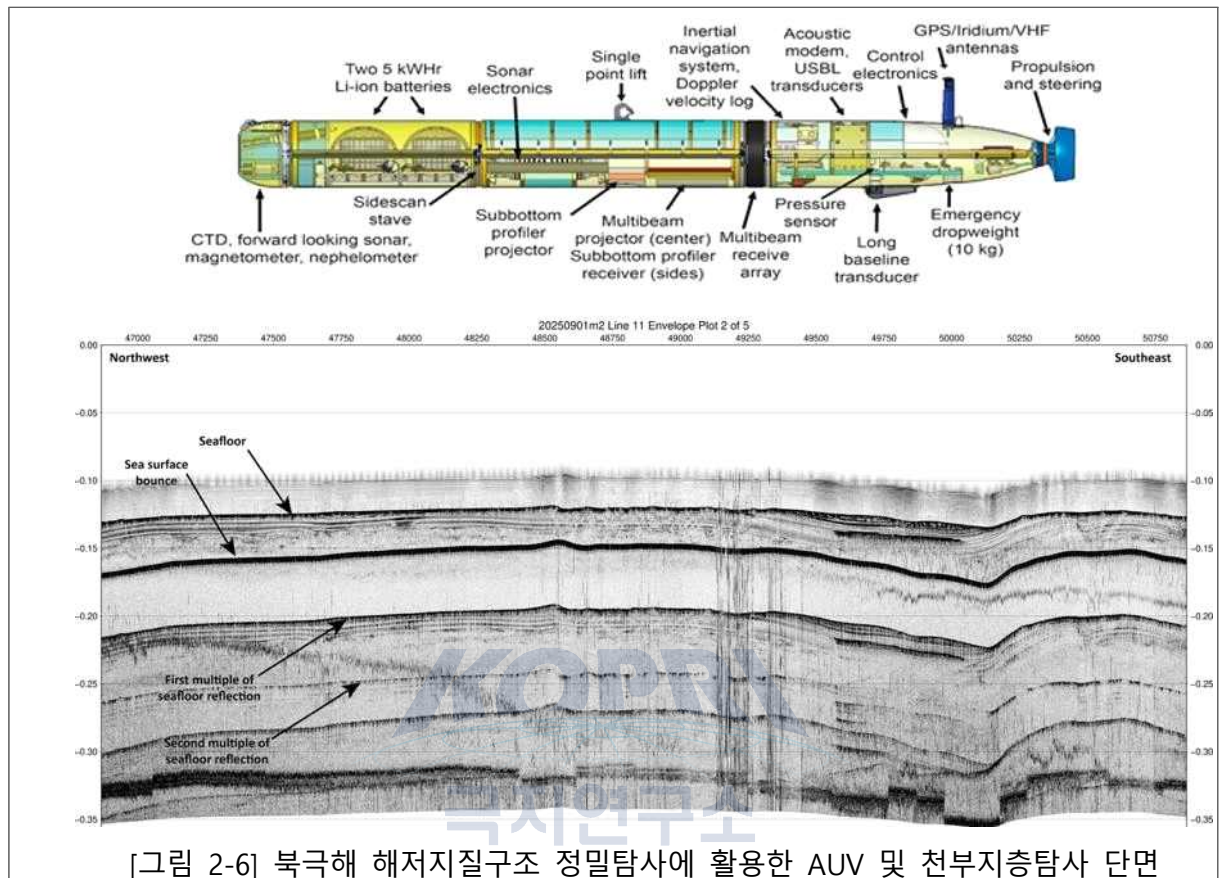


[그림 2-5] 척치해에서 획득한 퇴적물 코어의 절개면 사진, 색도값, XRF

#### □ [국제공동연구] 첨단 해저탐사장비를 활용한 해저지질구조 정밀탐사

- 극지연구소는 미국 MBARI와의 공동연구를 통해 AUV, ROV 등 첨단 해저탐사장비를 활용한 북극해 해저지질구조 정밀 탐사를 수행하고 있음. 이는 선박 기반 광역탐사로는 파악하기 어려운 미세지형 변화와 국지적 구조 특성을 정밀하게 관측할 수 있게 한다는 점에서 큰 의미가 있음
- 해저 변화를 정밀하게 감지하기 위해 반복적인 1m급 해상도의 AUV 해저지형 탐사를 수행하고 있으며, 이를 통해 해저면 하부 영구동토층의 해리, 사면 붕괴 가능성, 진흙화산 활동성 등 세부 지질 현상을 분석하고 있음

- AUV는 해저면에 근접한 상태에서 음향 신호를 송수신할 수 있어, 기존 선박 관측보다 훨씬 높은 해상도의 해저지형 자료를 취득할 수 있음



[그림 2-6] 북극해 해저지질구조 정밀탐사에 활용한 AUV 및 천부지층탐사 단면

- 또한 극지연구소는 2025년 북극 보퍼트해에서 6회의 MiniROV 다이빙을 수행하여 해저면의 상세한 형태를 직접 관측하고 시료를 채취하였음. 이러한 ROV 탐사는 해저지형 변화의 시기와 발생 메커니즘을 해석하는 데 매우 중요한 자료를 제공함
- ROV는 해저정밀 시료 채취, 해저환경 영상 기록, 국지 구조물의 직접 확인 등 현장 중심의 직접 자료 확보가 가능하다는 장점이 있음

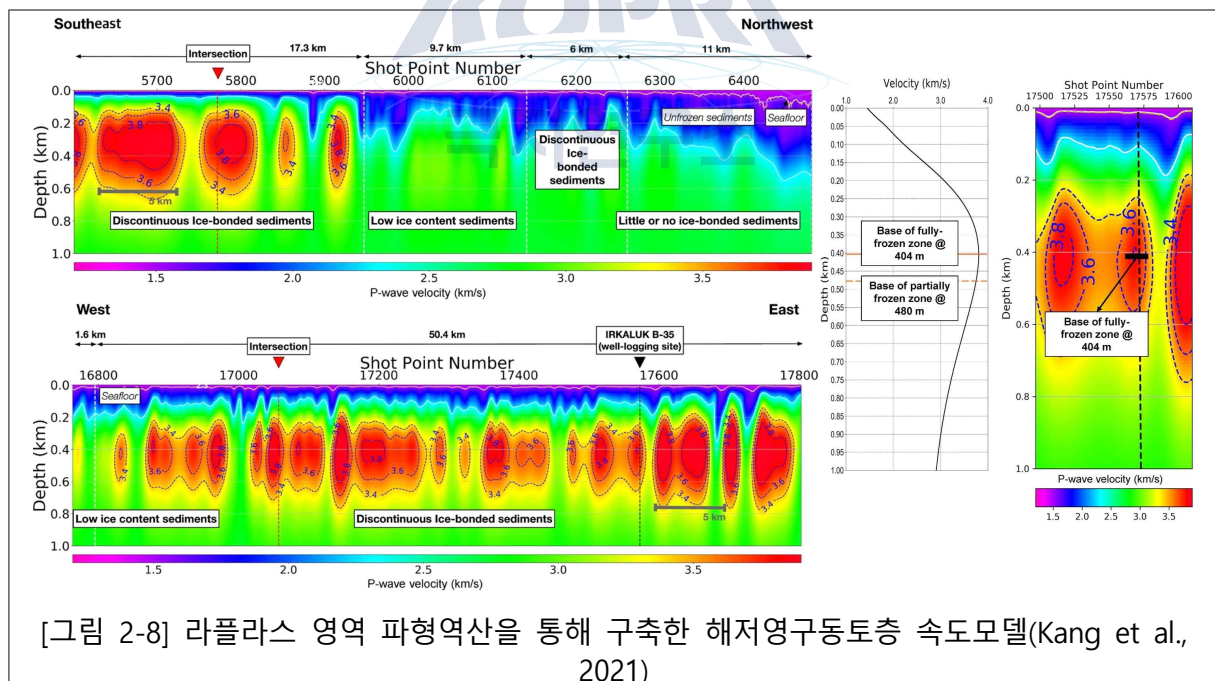


[그림 2-7] MiniROV 투입 및 시료 채취 장면

- 고해상도 지구물리탐사 자료 취득과 정밀 시료 확보를 위해서는 이러한 첨단 탐사장비가 필수적임. 그러나 현재 국내의 첨단 해저탐사는 여전히 해외 기관과의 공동연구에 크게 의존하고 있는 실정임
- 따라서 기후변화 대응과 북극 프론티어 해역에 대한 정밀 해저지형·지질 정보체계 구축을 위해서는 첨단 탐사장비 운용역량의 내재화와 장비 자립화가 중장기적으로 반드시 추진 될 필요가 있음

#### □ 해저영구동토층 분포 및 특성 규명 연구

- 극지연구소는 다중채널 탄성파 탐사자료와 지열자료 분석을 통해 보퍼트해 Mackenzie Delta 및 유콘 대륙붕 지역의 해저영구동토층 분포를 확인하고 구조보정 단면, 속도모델 해석, 굴절파 분석 등을 활용하여 그 분포 특성과 내부 구조를 규명해 왔음
- 특히 해저영구동토층의 P파 속도구조를 도출하기 위해 라플라스-푸리에 영역 파형역산을 적용함으로써 정밀 탄성파 속도모델을 구축한 바 있으며, 이는 북극 천부 지반의 물성 특성을 고해상도로 파악하는 데 중요한 성과임(Kang et al., 2021)



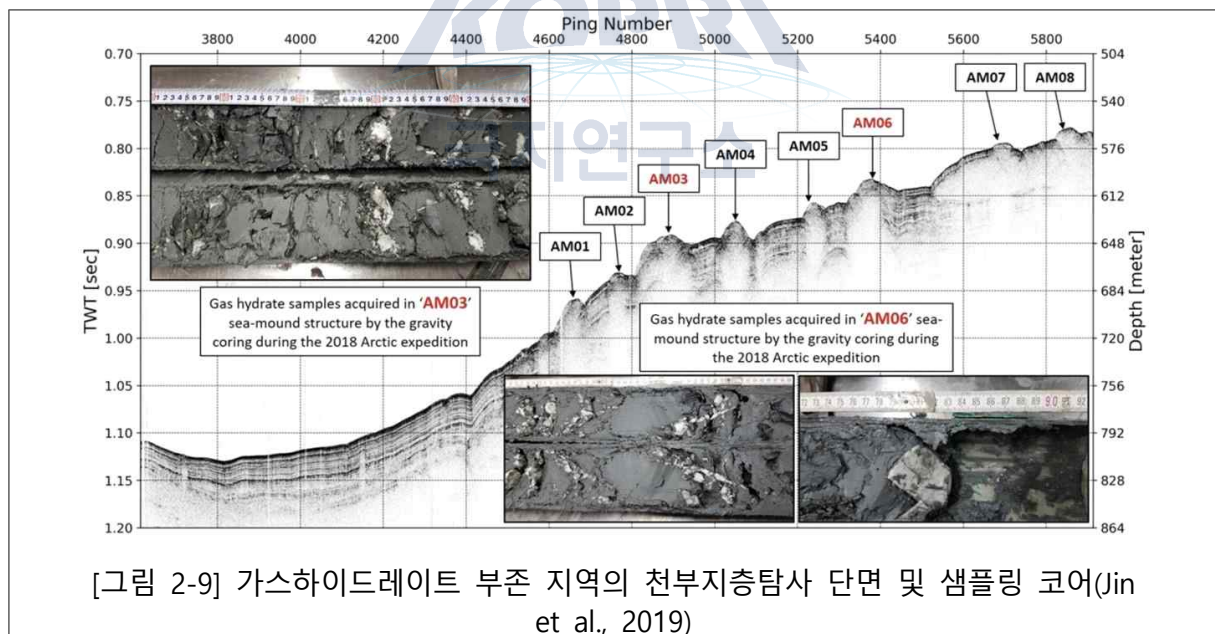
- 해저영구동토층은 기후변화, 고기후 복원, 미래 환경 예측, 에너지자원 탐사 등 다양한 분야와 직접 연결되는 핵심 연구 대상이며, 해저영구동토층 내에는 메탄이 저장될 수 있어, 온난화에 따른 융해가 진행될 경우 온실가스 방출과 연계될 가능성이 있음
- 해저영구동토층 약화는 해저 사면 불안정성과도 연결될 수 있어 재해·안전 측면에서도 중

요성이 큼. 또한 과거 빙하기 동안 육지였던 대륙붕이 해수면 상승 이후 해저로 전환되는 과정에서 형성된 기록을 담고 있어, 고기후 복원과 북극 환경변화 해석의 핵심 단서가 됨

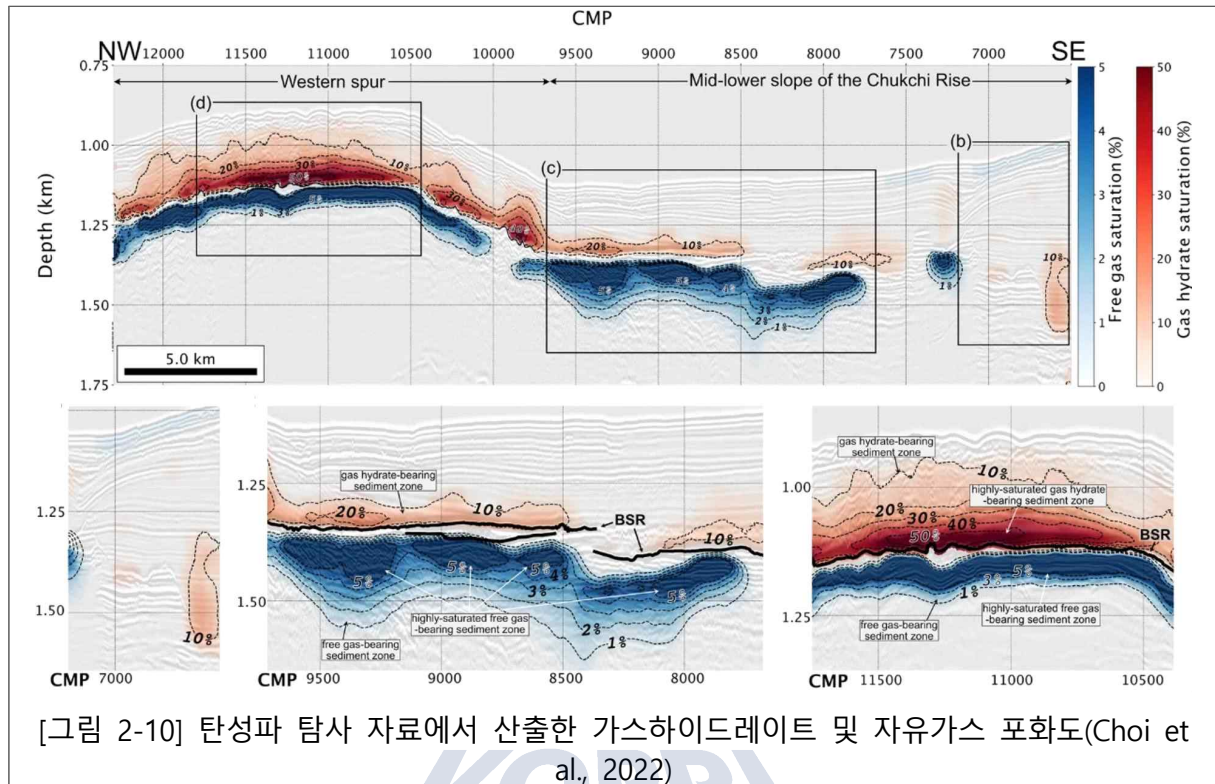
- 그러나 해저연구동토층은 급격한 에너지 감쇠, 산란, 다중반사 등의 영향으로 탄성파 자료 취득과 해석에 기술적 한계가 큼
- 따라서 향후에는 보다 정밀한 이미징 기술, 고성능 탐사장비, AI 기반 자료분석 기술을 결합하여 해저연구동토층의 구조와 변화 특성을 정밀하게 파악할 수 있는 연구체계 구축이 필요함

#### □ 북극해 가스하이드레이트 분포·부존특성·지구물리학적 특성 연구

- 극지연구소는 북극해 가스하이드레이트의 분포와 부존 특성, 지구물리학적 반응 특성을 규명하기 위한 연구를 지속적으로 수행해 왔음. 2019년 지구물리탐사에서 취득한 다중채널 탄성파 자료를 바탕으로 척치해 인근 해역의 가스하이드레이트 특성과 부존 가능성을 분석하였으며, 이는 북극해 가스하이드레이트 연구의 중요한 출발점이 되었음(Jin et al., 2019)



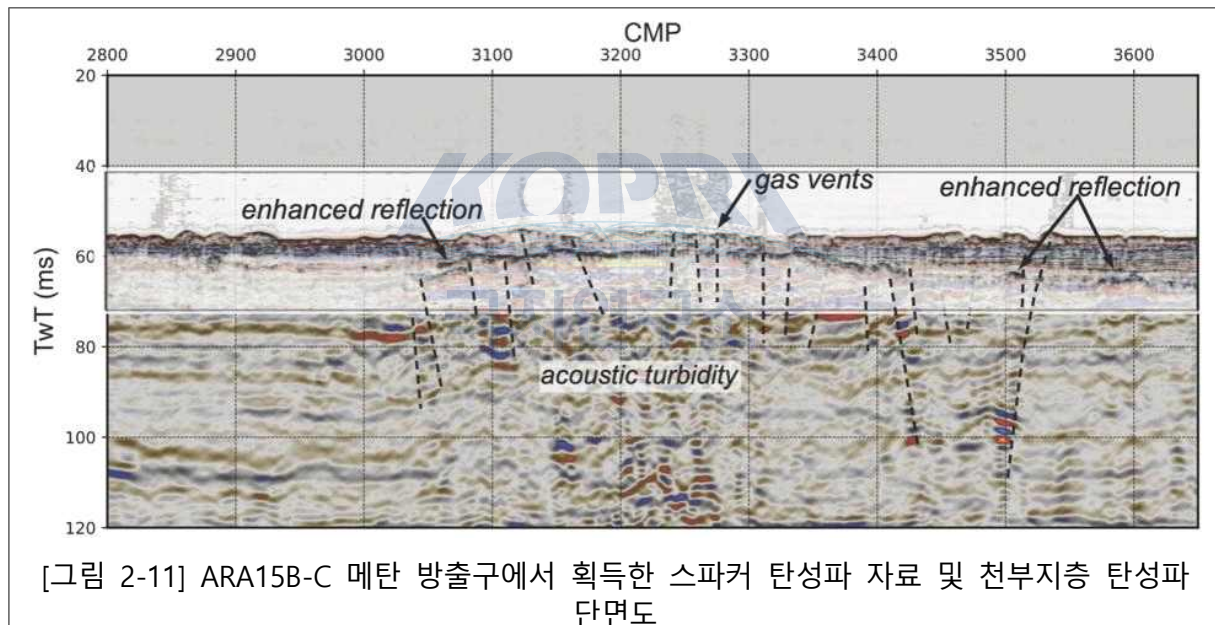
- 이후 다중채널 탄성파 자료에서 가스하이드레이트 지시자인 해저면 모방 반사면(Bottom simulating reflector, BSR)을 확인하고 속도-포화도 모델링을 통해 가스하이드레이트와 자유가스의 포화도를 산출하는 연구로 발전하였음. 이는 북극해에서 직접 시추자료가 제한적인 상황에서 지구물리자료 기반으로 가스하이드레이트 부존 특성을 정량적으로 해석하려는 시도라는 점에서 의미가 큼(Choi et al., 2022)



- 또한 보퍼트해에 분포하는 가스하이드레이트에 대해서도 해저면 모사 반사면, 가스하이드레이트 안정영역(Gas hydrate stability zone, GHSZ), 탄성파 속도모델 등을 활용한 지구물리학적 특성 분석이 수행되었음
- 특히 BSR은 역위상의 강한 반사계수를 보이며 수심 700 m 이상의 대륙사면에 발달하는 특징을 보여, 부존 가능성을 평가하는 핵심 지시자로 활용되고 있음
- 아라온호 탐사(ARA09C, ARA10C)를 통해 척치해의 아라온 마운드 일대에서 가스하이드레이트 시료를 확보하고 이를 천부지층탐사, PXRD 등과 연계하여 구조적·열역학적 특성을 해석한 연구도 수행되었음
- 북극해 가스하이드레이트는 잠재적 에너지자원이라는 측면뿐 아니라, 기후변화에 민감하게 반응하여 메탄 방출을 통해 전 지구 기후시스템에 강한 피드백을 줄 수 있다는 점에서 전략적·과학적 중요성이 매우 큼
- 다만 현재까지의 연구는 탐사 가능 해역과 장비 여건에 제한을 받아 공간적 범위에 제약이 있었음. 향후 차세대 쇄빙연구선과 고도화된 탐사장비를 활용하여 북극 프론티어 해역으로 연구를 확대할 필요가 있음

## □ 북극 메탄 방출 관측 및 방출구조 연구

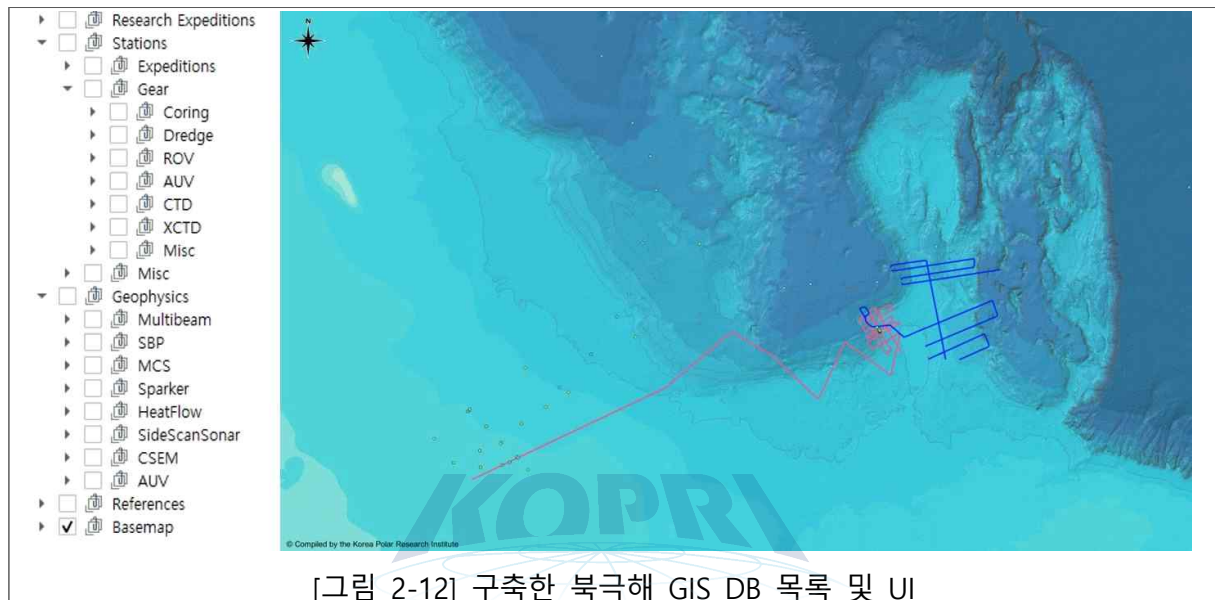
- 극지연구소는 ARA15B-C 해역에서 취득한 지구물리탐사 자료를 활용하여 메탄 방출구조의 탄성파 특성을 분석하는 연구를 수행하였음
- 퇴적층 내 가스 기포가 탄성파 신호를 흡수·산란시키면서 형성되는 음향혼탁층(acoustic turbidity), 가스 부존구역 상부경계의 큰 임피던스 차이로 인해 나타나는 고진폭 반사파(enhanced reflection) 등 다양한 가스 지시자가 확인되었음
- 북극해의 메탄 방출은 해저영구동토층의 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 퇴적환경 변화 등과 밀접한 관련을 가지며, 이 과정은 북극 기후변화와 직결될 수 있음
- 따라서 메탄 방출구조의 형성, 공간적 분포, 변동 특성을 파악하는 연구는 북극 해저환경 변화의 조기 징후를 이해하고 미래 위험요인을 예측하는 데 중요한 역할을 함



## □ 북극해 GIS 기반 DB 구축

- 극지연구소는 2025년까지 북극해에서 취득한 현장 조사자료를 기반으로 다중채널 탄성파 탐사, 다중빔 해저지형 탐사, 천부지층탐사, CTD, 퇴적물 코어 등 다양한 자료를 장비별·항차별 체계로 정리하여 GIS 기반 DB를 구축해 왔음. 이는 북극해 해저지질자료를 지속적으로 축적·관리하고 후속 연구와 융합 분석에 활용할 수 있는 기반을 마련했다는 점에서 중요한 성과임
- 다만 아라온호의 운항 여건과 해빙 환경의 제약으로 인해 현재 구축된 DB는 동시베리아해, 척치해, 보퍼트해 등 서북권 해역에 상대적으로 편중되어 있음

- 최근 급격한 해빙 감소는 과거 접근이 어려웠던 고위도 해역인 북극 프론티어 해역에 대한 과학적·전략적 진출 가능성을 높이고 있음. 이에 따라 기존 DB를 보다 확장·고도화하고 향후 접근 가능한 고위도 해역 자료를 선제적으로 확보하는 것이 중요해지고 있음
- 결국 북극해 GIS 기반 DB는 단순 자료 저장체계를 넘어, 대한민국의 북극권 과학 영향력 확대와 자원·기후 대응 주도권 확보를 뒷받침하는 핵심 인프라로 기능할 수 있음



#### □ 북극해 메탄 측정 및 메탄 방출량 추정 연구

- 극지연구소는 북극해 메탄 측정과 방출량 추정을 위해 2025년 보퍼트해 19개 정점에서 CTD-Rosette 기반 수층 구조 관측과 대기-해양 경계층 메탄 관측을 수행하고 수층-퇴적물-대기를 연계한 메탄 연구를 추진하였음
- 이러한 연구를 통해 북극 보퍼트해 아표층의 메탄 축적이 단순히 해저 퇴적물 기원만으로 설명되지 않고 수평 해류 수송과 생물학적 활동 등 복합적인 메커니즘과 연계되어 있음을 보여주었음(Kwon et al., 2025)
- 또한 MEMENTO DB와 문헌자료에 2010~2024년 아라온호 연속관측 자료를 추가 활용하여, 머신러닝 기반 전지구 메탄 방출량을 재평가하는 연구도 수행하였음. 아라온호 관측 자료를 학습자료에 활용한 경우, 선형회귀 모델 대비 예측력이 향상되었으며, 기존 공개 DB 대비 북극해 관측 범위를 약 2배 수준으로 확장하는 효과가 확인되었음
- 이는 신뢰도 높은 메탄 방출량 추정과 북극 메탄 순환 이해를 위해서는 연속적이고 광범위한 현장자료 축적이 필수적임을 보여줌
- 북극해 메탄은 해빙 감소, 가스하이드레이트 해리, 해저영구동토층 붕괴 등과 밀접하게

연계되어 기후변화 가속화에 직접적인 피드백을 줄 수 있으므로, 지속적이고 정량적인 관측 연구가 반드시 필요한 분야임

#### □ 북극해 해저환경변화에 따른 미생물 구조 및 반응 연구

- 보퍼트해와 척치해 아라온 마운드 등에서 메탄 분출, 공극수 화학, 미생물 군집, 생태 서식지가 상호 연동되는 메커니즘을 규명하는 연구가 수행됨(Lee et al., 2021). 이는 해저에서 발생하는 메탄 방출이 단순한 지질현상이 아니라 생지화학적 반응과 밀접하게 결합되어 있음을 보여주는 연구임
- 특히 진흙화산 환경에서 메탄 플럭스 차이가 황산염-메탄 전이대(SMTZ), 미생물 지표, 지화학 구배를 변화시키고 이 차이가 다시 서식지 특성에 반영된다는 점이 제시되었음
- 또한 척치해 아라온 마운드의 활성 가스하이드레이트 구역에서 확보한 자생 탄산염(Authigenic Carbonate)을 대상으로 메탄 산화 관련 미생물 지표와 미량원소를 분석하여 미생물 대사 경로와 금속 효소 메커니즘을 규명하는 연구도 수행되었음(Lee et al., 2022)
- 이러한 연구는 해저에서 방출되는 메탄이 실제로 대기 중으로 얼마나 유입되는지를 조절하는 핵심 생지화학적 완충 메커니즘이 미생물 과정에 의해 좌우될 수 있음을 보여주며, 해저지질환경 변동성과 북극 온난화 가속화 연구에 필수적인 연구분야임

#### □ 북극해 해저퇴적물 기원 및 특성 연구

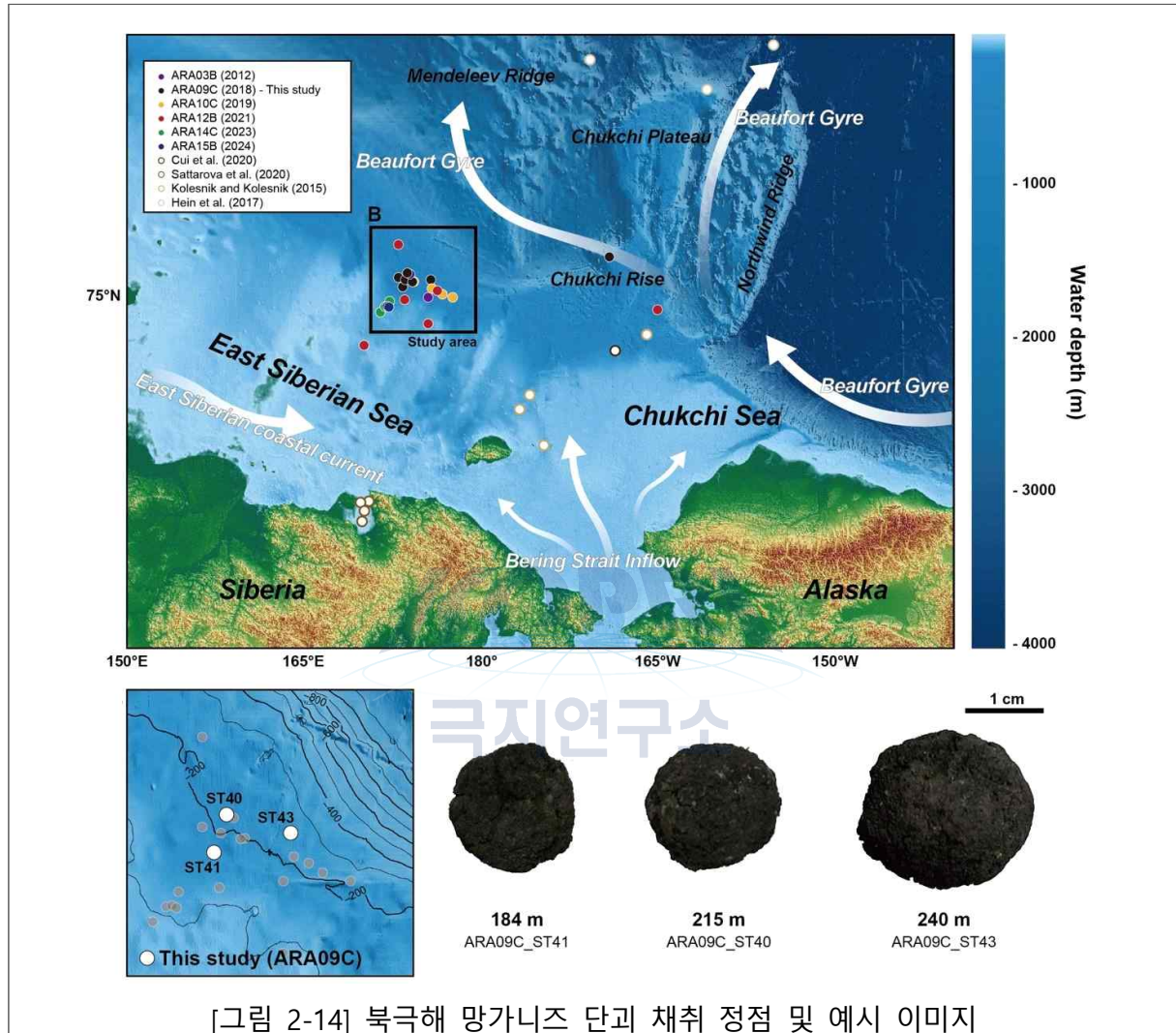
- 극지연구소는 캐나다 보퍼트해와 척치해에서 채취한 퇴적물을 대상으로 광물학·지화학 기반 퇴적물 특성 분석과 기원지 규명 연구를 수행하고 있음. 이는 퇴적물 자체가 과거 해양환경, 빙하 거동, 운반 경로, 퇴적 과정에 대한 기록을 포함하고 있어 기원 연구에 중요한 요소임
- 층서학적 특징과 광물·지화학 조성을 결합한 멀티 프록시 접근을 통해 마카로프 분지 코어 퇴적물의 기원지와 운반 경로를 추정하고 보퍼트해 표층 퇴적물의 벌크·점토광물 조성 분포를 활용하여 지역별 퇴적환경 차이를 도출한 바 있음
- 또한 ARA14C-ST12 코어에서 산출된 빙하쇄설물을 대상으로 현미경 이미지 딥러닝 모델을 구축하여, 이미지 분할, 암상 분류, 입자 계수 과정을 자동화하는 연구도 수행하였음. 이는 향후 대량 코어자료 처리와 정량적 분석 고도화 측면에서 매우 의미 있는 시도임
- 이러한 연구를 통해 퇴적물 기원과 퇴적환경을 연계 해석할 수 있는 기초자료가 축적되고 있으며, 향후 북극해 기후·환경 변화 복원 연구의 정밀도를 높이기 위해서는 더 고해상도의 코어 확보와 분석 체계 고도화가 필요함



#### □ 북극해 해저 광물자원 부존특성 연구

- 북극해에는 망간단괴를 비롯한 다양한 해저광물자원이 부존할 가능성이 있으며, 이들 자원은 Ni, Cu, Co 등 핵심광물을 포함하고 있어 전략적 가치가 높음. 해빙 감소로 북극해 접근성이 확대될 경우, 장기적으로 해저광물 탐사와 개발 논의도 점차 확대될 가능성이 있음
- 이에 따라 자원 분포와 함께 주변 환경, 생태, 지구화학적 특성을 선제적으로 확보해 두는 것은 향후 국제공동연구, 국제규범 대응, 자료 협상 측면에서 유리한 기반이 될 수 있음
- 또한 망간단괴는 단순한 광물자원에 그치지 않고 북극 해양순환과 산화·환원 환경 변화를 기록하는 지구화학적 기록체로서 기후·해양환경 변화 해석에도 활용될 수 있음
- 극지연구소는 동시베리아해에서 망간단괴를 채취하여 수심과 성장 단계에 따른 특성 변화, 원소의 공간 분포 특성 등에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 북극해 해저광물 자원의 형성과 분포 특성에 대한 기초자료를 확보하였음

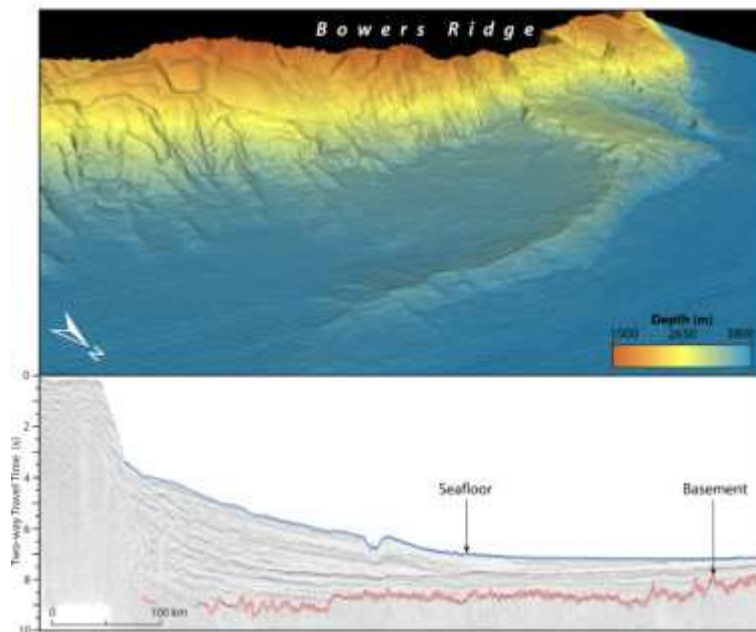
- 아라온호로 채취한 동시베리아해 철-망간단괴 분석 결과, 중심부에는 todorokite가 우세하고 외곽부로 갈수록 birnessite가 우세한 것으로 나타났으며, 성장 환경 변화와 광물 조성의 공간적 차이를 확인함(Kim et al., 2023)



## 2. 국외 연구 동향

### □ 미국

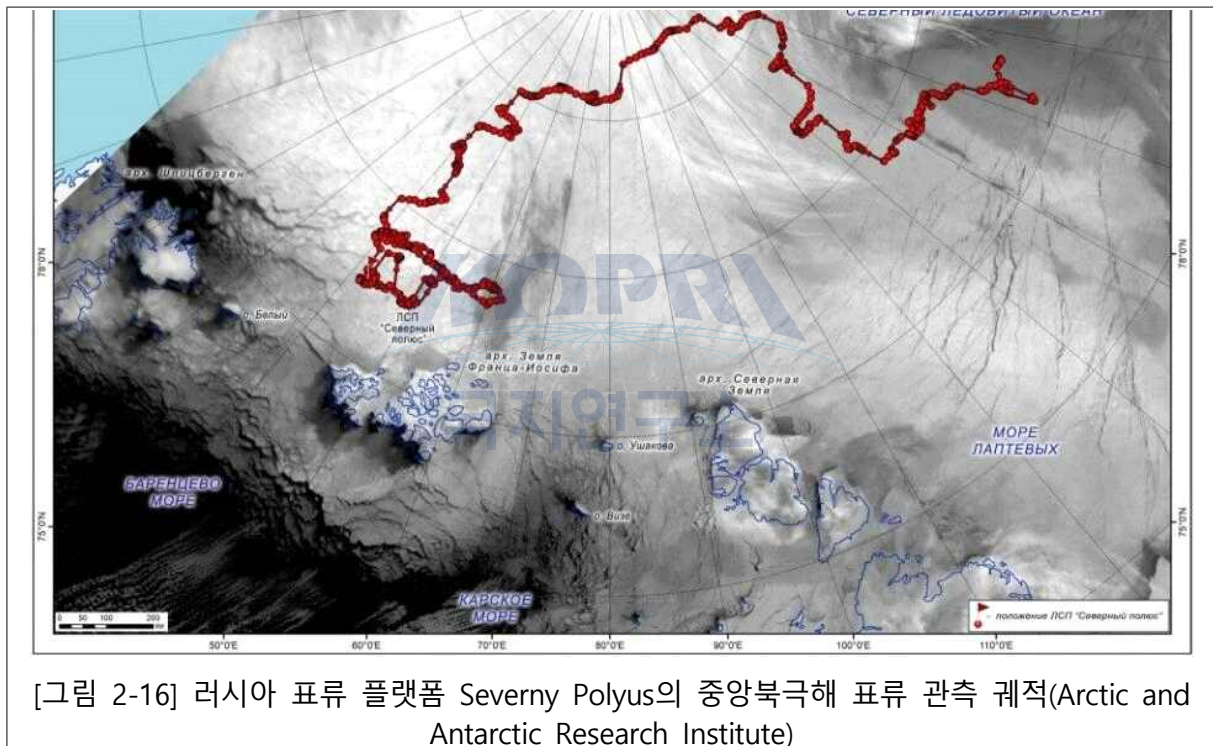
- 미국은 북극해에서 확장 대륙붕(ECS) 확정과 외대륙붕(OCS) 자원·지질위험 평가를 위해, 다중빔 수심자료, 천부지층 탐사자료, 탄성파를 포함한 지구물리 자료를 광범위하게 확보·축적하고 있음
- ECS 매핑과 알래스카 해역의 지질·지구물리 자료 관리·공개, 분지구조 및 자원잠재력 평가 체계를 통해 해저지질정보 기반 의사결정을 강화하고 있음
- 북극해 해저지질·지구물리·자원 관련 주요 연구기관
  - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
  - National Science Foundation (NSF)
  - Bureau of Ocean Energy Management (BOEM)
  - United States Geological Survey (USGS)
- 대표 쇄빙연구선/연구선
  - USCGC Healy
  - R/V Sikuliaq



[그림 2-15] 미국의 확장 대륙붕 경계 설정을 위한 다중빔 해저지형 및 천부지층탐사 자료(National Oceanic and Atmospheric Administration)

## □ 러시아

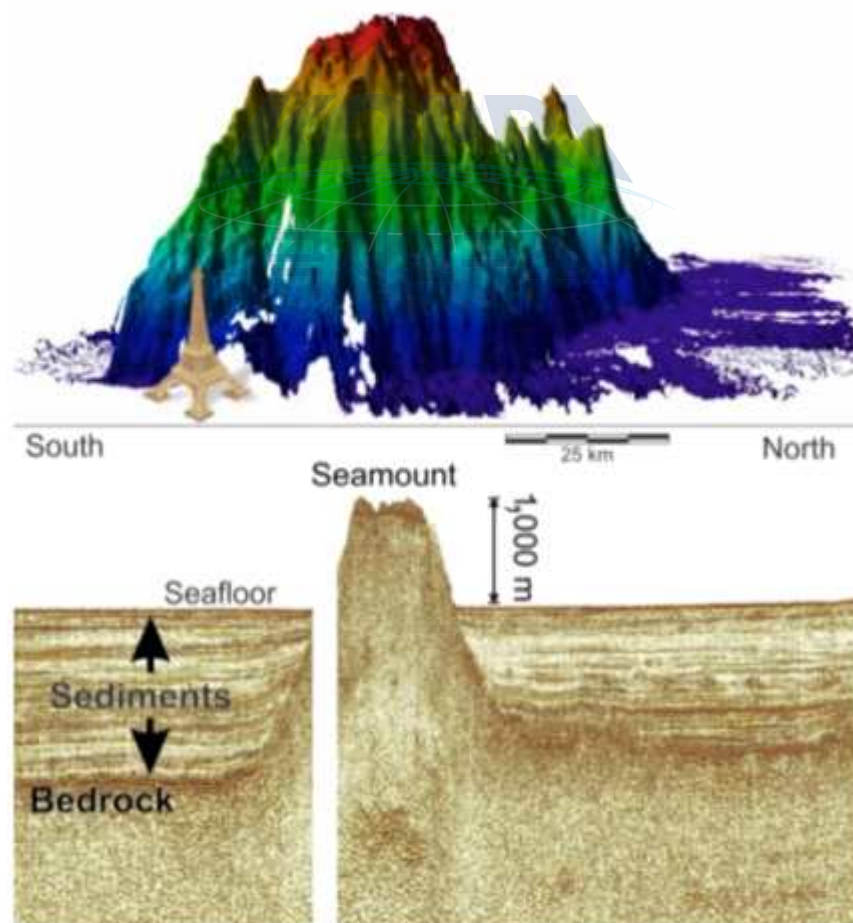
- 러시아는 북극해 연안부터 중앙북극해까지 광역 운영 체계를 갖추고 연구선과 함께 빙저항 표류 플랫폼을 병행하여 장기간 관측·조사를 수행하고 있음
- 특히 표류 플랫폼은 중앙북극해에서 장기 체류형 관측을 가능하게 하여 해빙 하부 환경과 해양·대기·빙권 연계 자료 확보를 보완하는 핵심 수단으로 활용되고 있음
- 대표 빙해 플랫폼/연구선
  - Ice-resistant drifting platform Severny Polyus
  - R/V Akademik Tryoshnikov



[그림 2-16] 러시아 표류 플랫폼 Severny Polyus의 중앙북극해 표류 관측 궤적(Arctic and Antarctic Research Institute)

## □ 캐나다

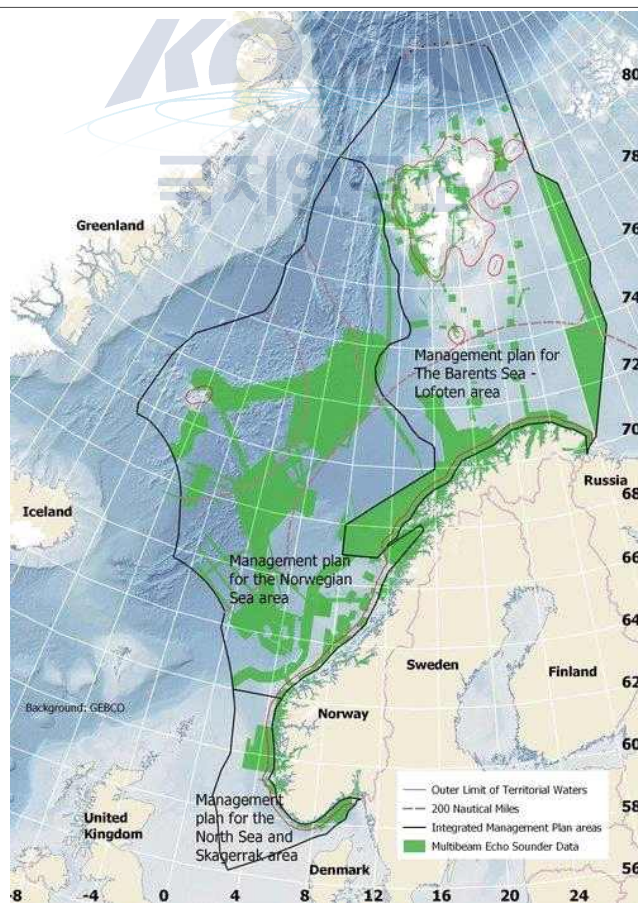
- 캐나다는 UNCLOS 기반 확장 대륙붕(ECS) 제출과 방어를 위해 해저지형 자료와 퇴적층 두께 자료를 장기적으로 확보·정리하는 국가 프로그램을 운영하고 있음
- 고위도와 중앙북극해 구간에서 다국 공동 항차를 수행하면서, ECS 과학근거가 되는 해저지형 및 지구물리 자료 확보에 집중하고 있음
- 북극해 해저지질·지구물리·ECS 관련 주요 수행기관
  - Geological Survey of Canada (GSC)
- 대표 쇄빙연구선/연구선
  - CCGS Louis S. St-Laurent
  - CCGS Amundsen



[그림 2-17] 캐나다 북극해에서 관측한 해산의 다중빔 해저지형 및 탄성파탐사 자료(Geological Survey of Canada)

## □ 노르웨이

- 노르웨이는 대서양 북극해인 바렌츠해와 스발바르 주변 해역에서 해저지도 구축과 산업 탐사자료 관리체계를 결합하여 해저지질정보의 활용성을 높이고 있음
- MAREANO와 같은 해저지도 프로그램을 통해 해저지형과 퇴적물 특성 등 공간정보를 체계적으로 생산·공개하고 있으며, 이를 자원개발·환경·안전 관련 의사결정에 활용할 수 있는 기반으로 발전시키고 있음
- 북극해 해저지질·지구물리·자료체계 관련 주요 기관/체계
  - MAREANO
  - Norwegian Offshore Directorate
  - Arctic Ocean 2050
- 대표 쇄빙연구선/연구선
  - RV Kronprins Haakon



[그림 2-18] 노르웨이 해역에서의 다중빔  
해저지형 탐사 지역(MAREANO)

□ 덴마크(그린란드)

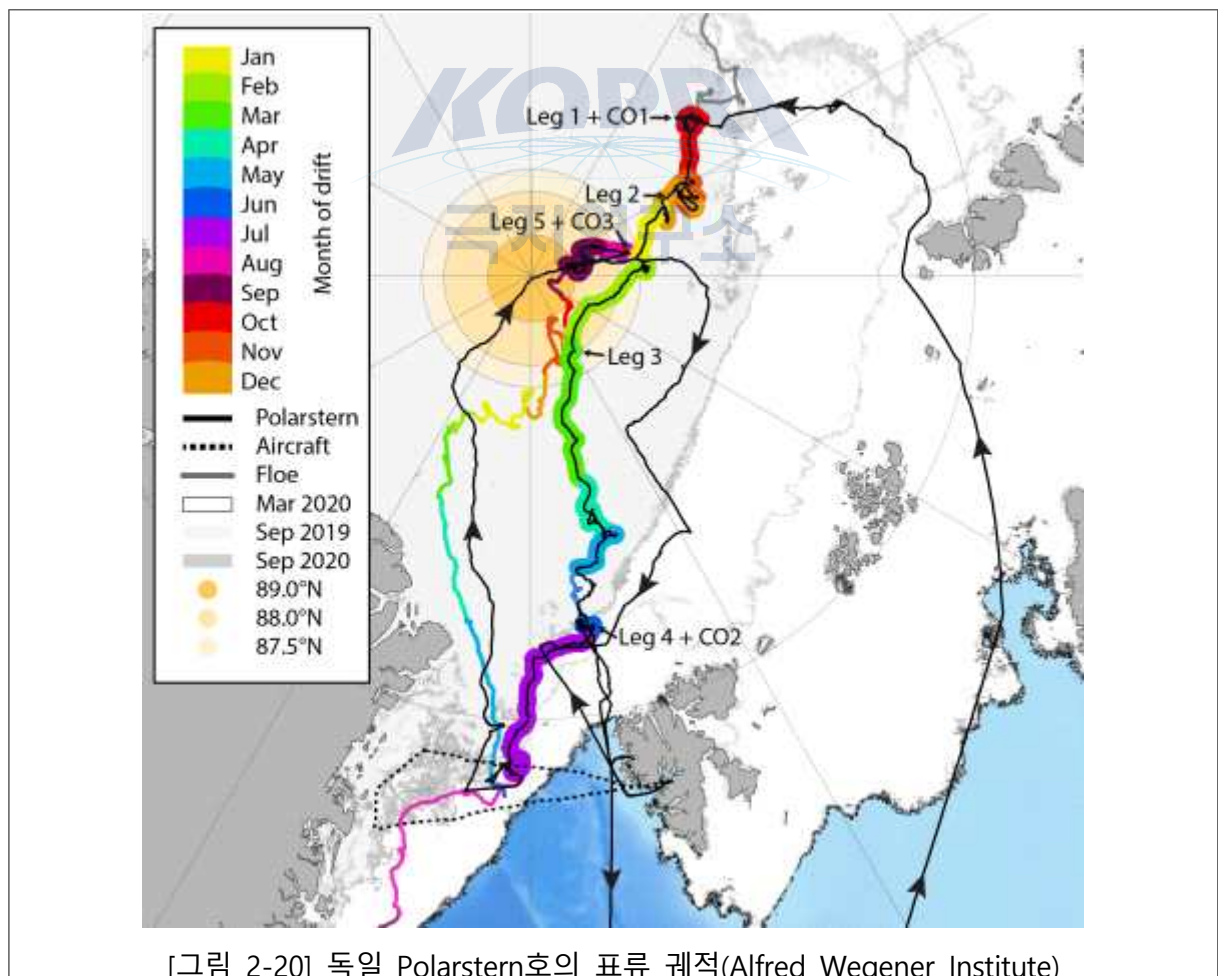
- 덴마크는 그린란드와 연계하여 북극 해역의 해저지형 및 지질자료 확보를 확대하고 이를 자원개발 가능성 평가와 해양권익 강화에 연결하는 방향으로 연구를 추진하고 있음
- 그린란드 주변 해역에서는 대륙붕 입증과 해양권익 확대를 위한 지형·지질 자료 축적과 함께 희토류를 포함한 전략광물 잠재력 평가를 위한 조사도 병행되고 있음
- 북극해 관련 주요 기관
  - Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS)
  - Greenland Institute of Natural Resources (GINR / Pinngortitaleriffik)
- 대표 연구선
  - Dana V
  - R/V Tarajog



[그림 2-19] 그린란드 해역에서의 지구물리탐사 및 시추 지역(Geological Survey of Denmark and Greenland)

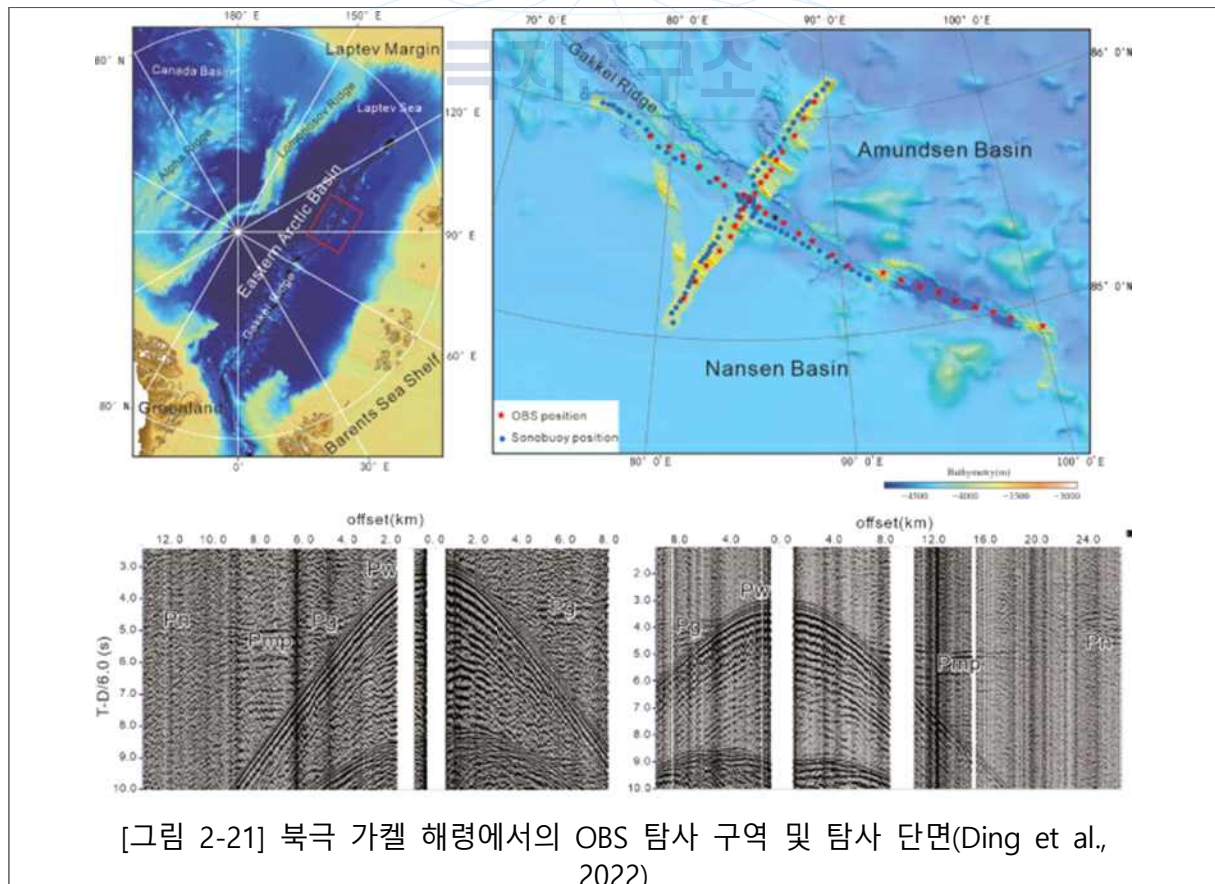
## □ 독일

- 독일은 북극 연안국은 아니지만, 대형 쇄빙연구선과 연구기관 네트워크를 바탕으로 북극 해양·빙권·해저·심해를 아우르는 종합 관측을 수행하고 있음
- AWI를 중심으로 한 연구는 해빙 하부까지 포함한 고위도 항차를 통해 해저지형과 해양환경, 기후변화 자료를 장기적으로 축적하는 데 강점을 보이고 있음
- 북극해 관련 주요 기관
  - Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI)
  - German Arctic Office
- 대표 쇄빙연구선
  - RV Polarstern
  - New Polarstern (도입 예정)



## □ 중국

- 중국은 Arctic Council 옵서버 국가로서 CHINARE(국가 북극 조사)를 통해 북극해 조사 범위를 확대하고 지질·지구물리 조사를 공식적으로 수행하는 방향으로 해저 관련 조사 기반을 강화하고 있음
- PRIC를 중심으로 항차 운영과 자료·시료 관리 체계를 갖추고 있으며, Xuelong와 Xuelong 2를 활용한 북극 항차를 지속 수행하는 구조를 유지하고 있음
- 북극해 연안국인 러시아와의 국제 공동 프로젝트 Joint Arctic Scientific Middle-ocean ridge Insight Expedition(JASMIInE)를 통해 고해상도 탄성파탐사 및 OBS탐사를 수행함
- 북극해 관련 주요 기관
  - Polar Research Institute of China (PRIC)
  - Chinese Academy of Sciences (CAS)
- 대표 쇄빙연구선
  - Xuelong
  - Xuelong 2



## □ 일본

- 일본은 국가 중심의 북극 연구를 지속하면서 JAMSTEC를 중심으로 채빙 기능을 갖춘 Mirai II 도입과 연구 인프라 확장을 추진하고 있음
- 기존 R/V Mirai의 북극 항차 경험을 바탕으로 향후 Mirai II를 통해 빙해권 관측과 해저를 포함한 탐사 기회를 확대하려는 구조를 갖추고 있음
- 북극해 관련 주요 연구기관
  - Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
  - National Institute of Polar Research (NIPR)
- 대표 연구선
  - R/V Mirai
  - R/V Mirai II (도입 예정)



[그림 2-22] 일본 연구채빙선 Mirai II 모식도(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

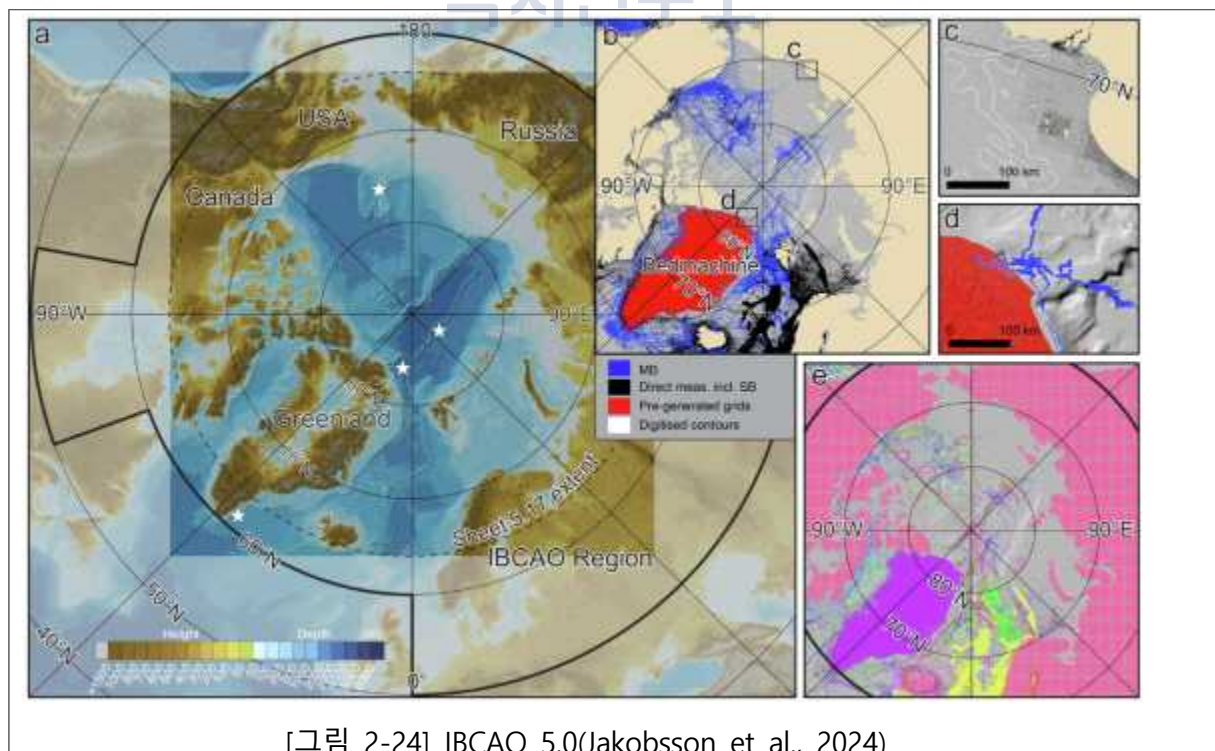
□ 연구선을 활용한 외국의 북극해 해저지질·지구물리 탐사 프로그램 운영 확대

- 미국은 USCGC Healy 등을 활용해 ECS 관련 항차를 수행하고 알래스카 OCS 지질·지구물리 자료체계를 통해 자원 및 지질위험 평가 기반을 강화하고 있음
- 러시아는 연구선과 표류 플랫폼을 병행하여 중앙북극해에서 장기간 관측·조사를 수행하는 운영체계를 갖추고 있음
- 캐나다는 Louis S. St-Laurent와 Amundsen 등을 활용해 ECS 과학근거가 되는 해저지형 및 퇴적층 두께 자료를 장기적으로 축적하고 다국 공동 항차도 병행하고 있음
- 노르웨이는 Kronprins Haakon 기반 현장 관측과 MAREANO 해저지도 프로그램, 탄성파 자료 관리체계를 결합하여 해저지질정보의 정책·산업 활용을 강화하고 있음
- 덴마크는 그린란드 연계 조사와 GEUS 중심의 지질·자원 탐사를 통해 북극 해역 자료 확보를 확대하고 있음
- 독일은 Polarstern 기반 대규모 고위도 항차를 통해 해빙 하부를 포함한 종합 관측자료와 해저·심해 자료를 축적하고 있음
- 중국은 CHINARE 기반으로 Xuelong와 Xuelong 2를 운용하며, 지질·지구물리 조사를 포함한 종합 조사를 지속 추진하고 있음
- 일본은 ArCS II 연구체계를 유지하면서 Mirai II 도입을 통해 빙해권 관측·탐사 기반 확장을 추진하고 있음



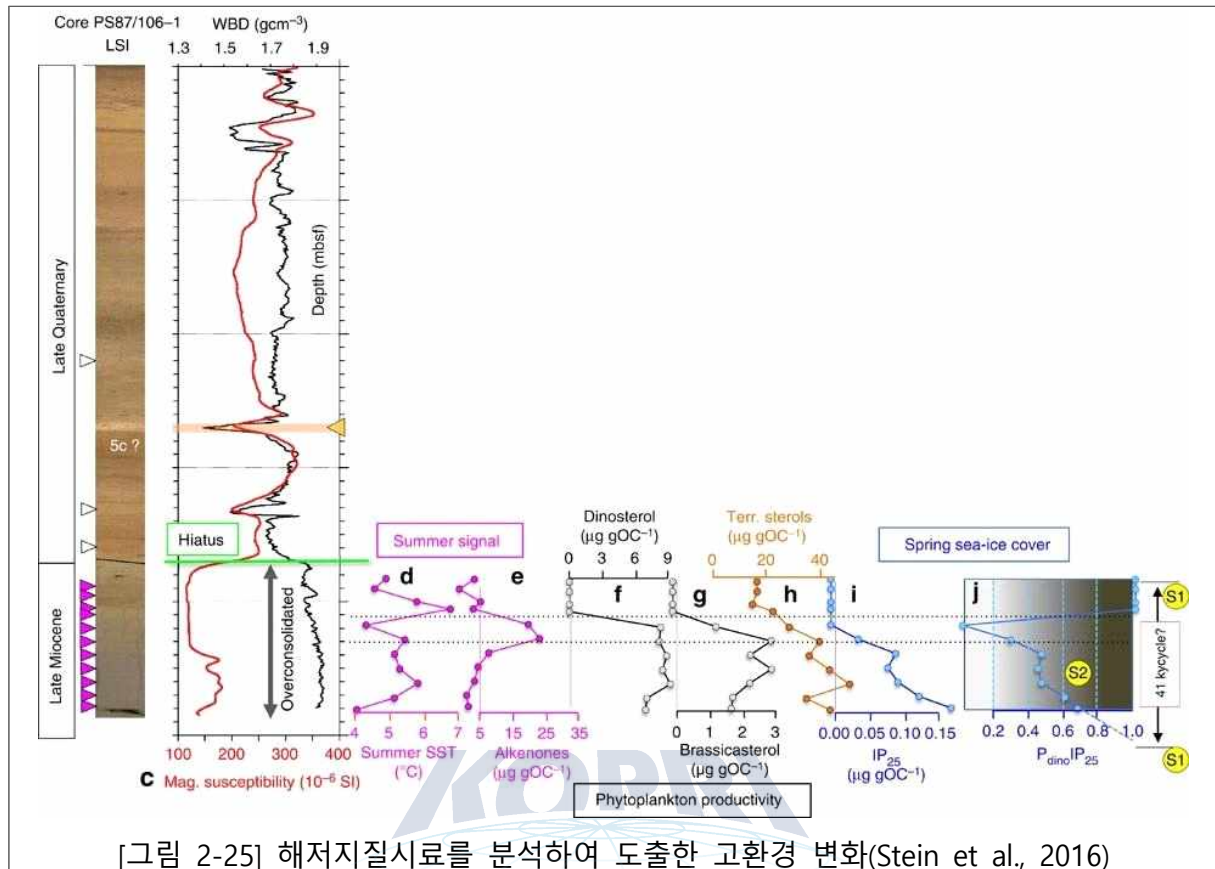
□ 북극해 해저지형 탐사와 국제 통합 지형도 구축 연구 확대

- 국외에서는 IBCAO(International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean)와 같은 다국적 연합 탐사를 통해 북극해 전역의 고해상도 수심자료를 통합하고 표준 격자 기반 정밀 지형도 제작 연구를 수행하고 있음(Jakobsson et al., 2020)
- IBCAO는 다중빔, 단일빔, 기존 해도, 등수심선 자료의 디지털화, 보간 등 다양한 자료원을 통합하여 북극해 지형 정보량을 지속적으로 확장하는 방향으로 고도화되고 있음
- 또한 Seabed 2030와 같은 국제 프로그램은 북극해를 포함한 고위도 해역의 수심자료 공백을 줄이고 고해상도 디지털 수심모델 구축 필요성을 강조하고 있음(Mayer et al., 2018)
- 특히 북극해는 해빙과 항로 제약으로 자료가 희소하기 때문에, 국제적 데이터 공유와 표준화가 지형도 품질을 좌우하는 핵심 요소로 제시되고 있음
- 최근에는 MBES와 AUV-ROV 기반 고해상도 측량을 통해 빙하 후퇴 경로, 빙하성 미세지형, 사면 미세 변형을 정밀 매핑하고 후방산란 자료를 활용해 해저면 저질 변화까지 함께 해석하는 연구가 확대되는 추세임
- 해저지형 탐사는 단순한 수심도 제작을 넘어, 경사·곡률·거칠기와 같은 분석을 통해 지형 분류와 위험지형 진단으로 확장되고 있으며, 항로 및 시설 리스크 평가와 연결되는 방향으로 활용 범위가 넓어지고 있음(Jakobsson et al., 2024)



## □ 해저지질시료를 통한 북극해 해저환경 변화 연구

- 국외에서는 Integrated Ocean Drilling Program(IODP, 2003-2013) Arctic Coring Expedition (ACEX, 2004) 등을 통해 확보한 해저 퇴적물 코어시료를 바탕으로, 물성·퇴적학·지화학·미화석·바이오마커를 종합적으로 결합하는 다중 프록시 분석 체계를 확립하고 과거 북극해의 고환경 변화를 복원하는 연구를 활발히 수행해 왔음(Backman et al., 2005; IODP Expedition 302)
- ACEX는 상시 해빙 해역에서 장주기 퇴적기록을 확보한 대표적 사례로 중앙북극해의 장기 기후 및 해양환경 변동 신호를 복원하는 기준 자료를 제공하였으며, 이후 북극 고환경 연구의 핵심 참조자료로 활용되고 있음
- 코어 기반 연구는 단순한 층서 대비를 넘어, 안정동위원소와 미화석 지표를 활용하여 과거 간빙기 동안의 해빙 분포, 표층수 환경, 해수 순환 패턴 변화 등을 정량적으로 해석하는 방향으로 발전하였음. 특히 마지막 간빙기를 미래 온난화 환경의 유사 사례로 보고 당시 북극해에서 계절적 해빙 감소가 나타났을 가능성을 제시한 연구가 대표적인 성과로 평가됨(Vermassen et al., 2023).
- 이러한 연구는 미화석 기반 증거를 통해 여름철 해빙이 크게 감소하였을 가능성을 제시하며, 마지막 간빙기를 미래 북극 환경 변화의 잠재적 아날로그로 해석하는 데 중요한 근거를 제공함
- 또한 중앙북극해 퇴적물 코어를 기반으로 후기 신생대 시기의 해빙 약화 또는 계절적 해빙 이동 가능성을 제시하는 등 코어 기반 프록시를 활용해 빙-해양-기후 간 상호작용을 확장적으로 해석하는 연구가 수행되고 있음(Stein et al., 2016).
- 최근에는 자료 통합 측면에서도 천부지층탐사 층서 해석 결과와 시추 코어의 퇴적상·연대·물성 정보를 교차 검증하여 퇴적 특성을 정량화하고 이를 다시 기후·해양 모델의 경계 조건 및 검증자료로 활용하는 연구 설계가 일반화되는 추세임. 이는 코어 자료가 단순한 현장 샘플을 넘어 북극 환경변화 해석의 정량 기반자료로 활용되고 있음을 보여줌

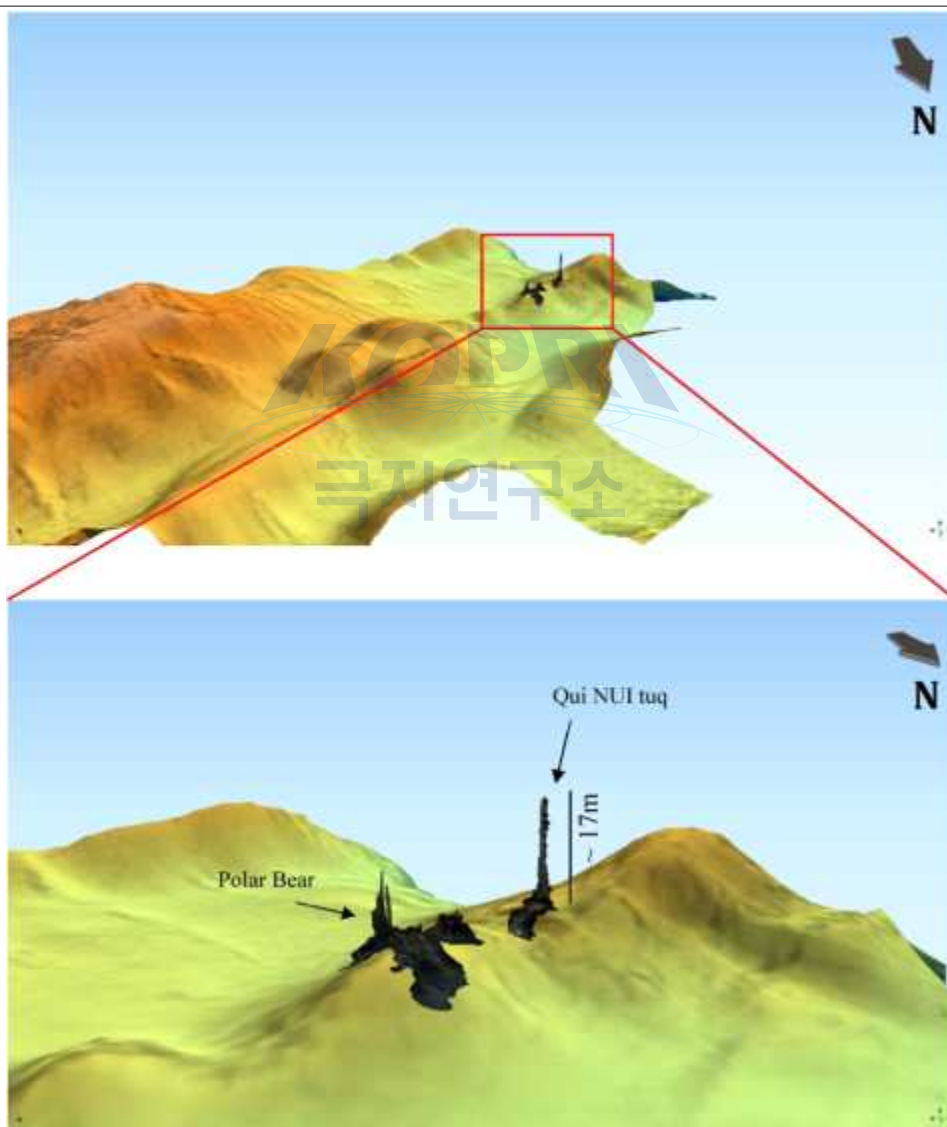


#### □ 첨단 해저탐사장비를 활용한 해저지질구조 정밀탐사

- AUV/ROV 기반 융복합 탐사를 통해 해저 미세지형과 천부 퇴적구조를 정밀하게 영상화하는 연구가 확대되고 있으며, 특히 해빙 또는 빙붕 하부처럼 선박 접근이 어려운 환경에서 고해상도 수심자료와 천부지층 자료를 동시에 확보하는 전략이 핵심 기술로 활용되고 있음(Dowdeswell et al., 2008)
- 이러한 접근은 기존 선박 기반 탐사로선 식별하기 어려운 미세 지형 요소와 천부 퇴적체의 분포를 정밀하게 규명할 수 있다는 장점이 있으며, 북극과 같은 고위도 해역에서 지질 환경 변화를 직접적으로 관찰할 수 있는 효과적인 수단으로 평가됨
- Batchelor & Dowdeswell(2015)는 빙하전진·정체·후퇴 과정에서 형성되는 grounding-zone wedge(GZW) 등 다양한 빙하성 퇴적체를 정리하고 고해상도 음향자료를 활용한 지질학적 해석 프레임워크를 제시함으로써 북극해 해저지형 해석의 기준을 제공하였음
- Isler et al.(2024)는 AUV/ROV 기반 고해상도 수심자료와 영상자료를 결합하여 열수지대와 같은 특이 지형의 공간 분포를 확장·정밀화하였으며, 탐사 단계에서부터 3D 모델과 지형도를 통합하여 구조와 서식지 단위의 해석을 수행하였음. 이는 북극 해저탐사가 단순 지형

도 작성 단계를 넘어, 정밀 구조 해석과 환경 단위 구분까지 확장되고 있음을 보여줌

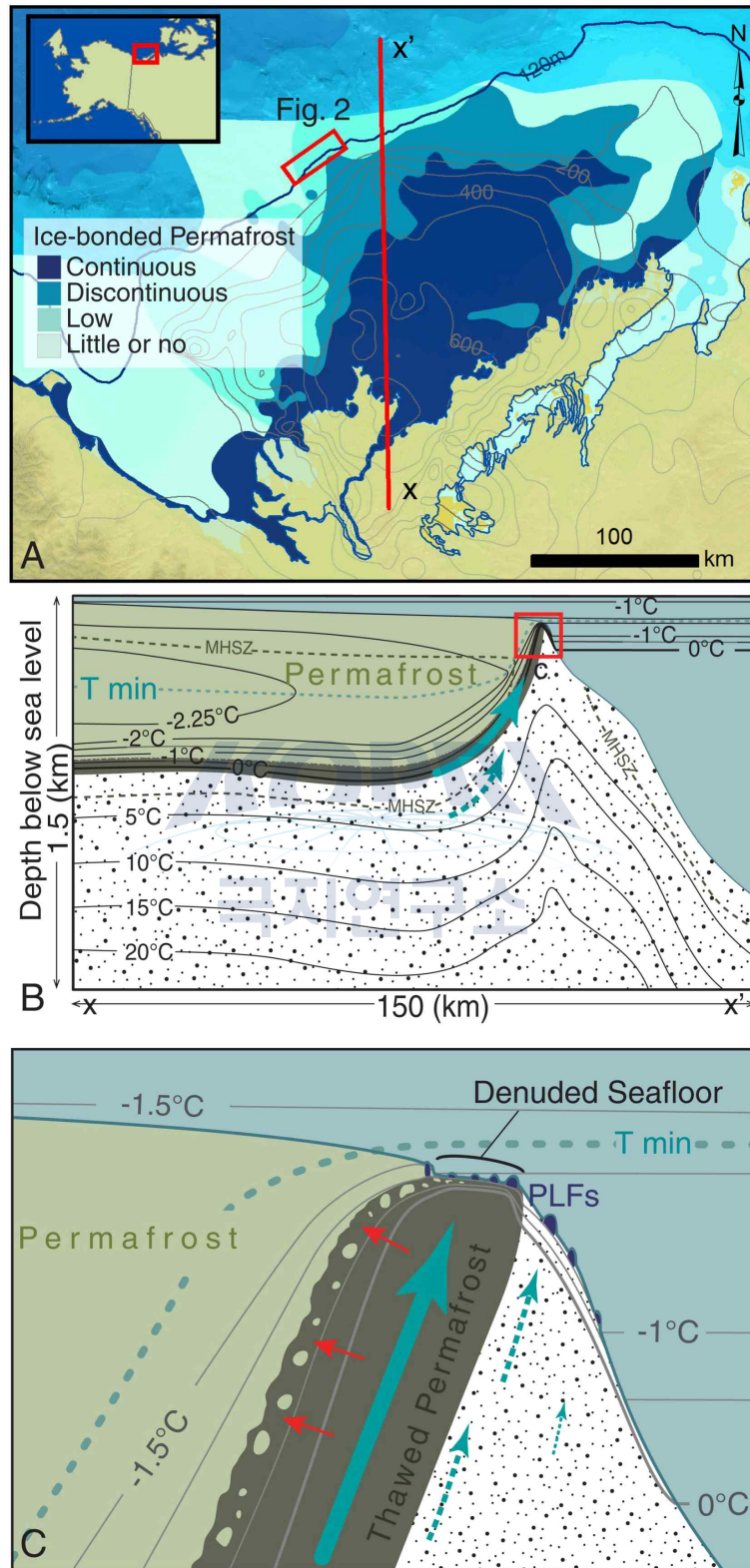
- AUV는 해저면 가까이에서 잠항하며 자료를 취득하기 때문에 선박 탑재 다중빔보다 훨씬 높은 해상도의 정밀 지형자료를 확보할 수 있으며, 다중빔 해저지형 탐사기뿐 아니라 카메라, 천부지층탐사기, acoustic Doppler current profiler (ADCP) 등 다양한 장비를 함께 탑재할 수 있어 다학제 융합 연구 수행에 매우 유리함(Wynn et al., 2014)
- 이처럼 국외 연구는 첨단 무인탐사장비를 중심으로 북극해의 고해상도 지형·지질·환경 자료를 확보하고 있으며, 향후 북극 프론티어 해역에서의 정밀 탐사와 현장 검증 연구는 더욱 확대될 것으로 전망됨



[그림 2-26] 북극해 Gakkel Ridge에서 AUV/ROV로 확인한 열수 분출구(Isler et al. 2024)

## □ 해저영구동토층 분포 및 특성규명 연구

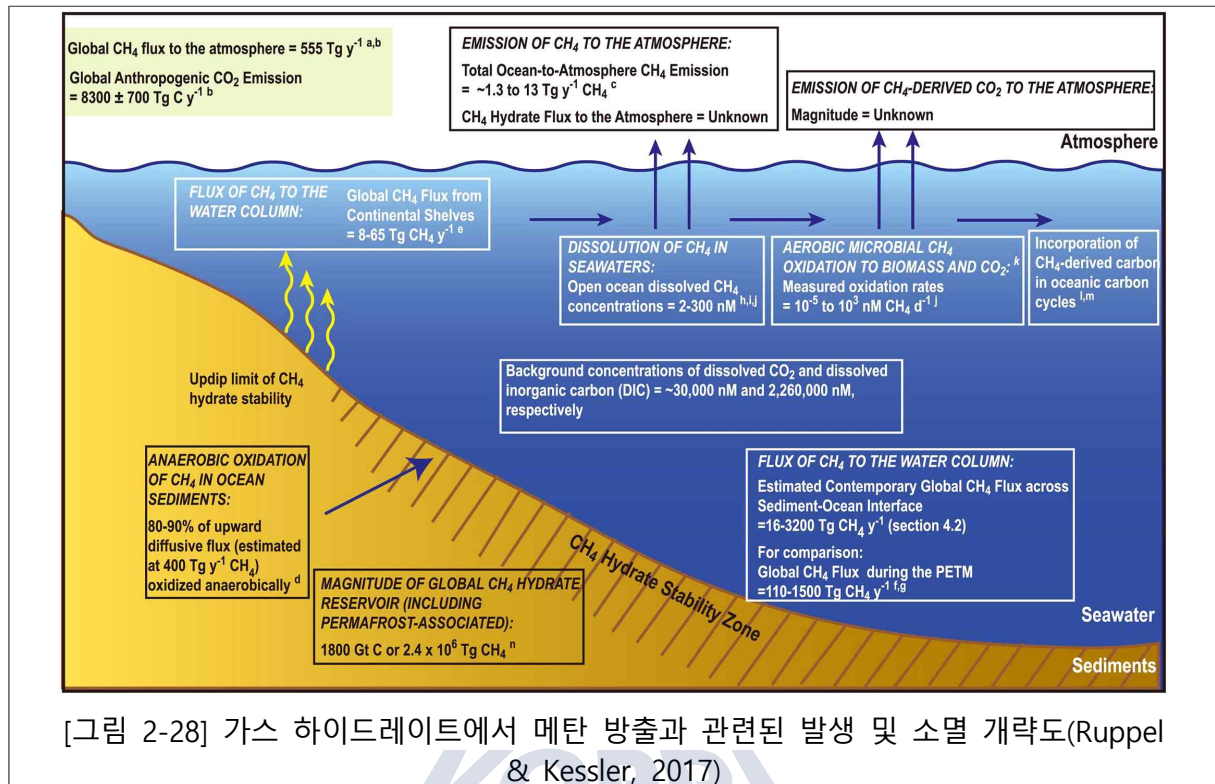
- 해저영구동토층은 대량의 메탄을 저장하고 있을 가능성이 높고 그 용해 과정이 기후변화 가속화 및 해저 사면 안정성과 밀접하게 연계될 수 있기 때문에 국외에서는 그 분포와 특성, 열화 양상에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있음
- Overduin et al.(2019)은 북극 대륙붕에서 해저영구동토층의 잠재 분포를 평가하기 위해 1-D 열전달 기반의 SuPerMAP을 구축하고 동시베리아해-라프테프해-보퍼트해 등 주요 해역에서 해저영구동토층의 열화 경계 변화를 제시하였음. 이는 광역 규모에서 해저영구동토층의 분포 가능성을 예측하고 비교할 수 있는 기초 틀을 제공하였다는 점에서 의미가 큼
- Sherman & Constable(2018)은 CSEM(controlled source electromagnetic)을 해저면에서 부근에서 예인하여 알래스카 보퍼트해의 해저영구동토층 분포를 연구하고 이를 시추공 기록과 비교·검증하는 연구를 수행하였음. CSEM은 전기전도도 차이를 이용하는 탐사기법으로 상대적으로 고비저항 특성을 보이는 해저영구동토층을 식별하는 데 유리하여 탄성파 자료와 상호보완적으로 활용될 수 있음
- Paull et al.(2022)은 극지연구소와의 공동연구를 통해 캐나다 보퍼트 사면에서 나타나는 급격한 해저지형 변화가 해저영구동토층의 장기적인 지질학적 영향과 관련될 수 있음을 제시하였음. 연구에서는 해저영구동토층 하부가 녹으면서 지하수가 배출되고 이 과정에서 submarine thermokarst와 핑고와 같은 독특한 지형이 형성될 수 있음을 보여주었음
- 탄성파 반사 특성, 속도 이상대, 전자기 탐사자료 등을 함께 해석하여 해저영구동토층과 가스하이드레이트의 결합 분포를 평가하는 연구도 제시되고 있음(Grob et al., 2023)
- 최근에는 단일 지구물리탐사 기법에 의존하기보다 탄성파·전자기·열모델·시추자료를 통합하는 다학제적 접근이 국제 연구의 주요 흐름으로 자리잡고 있음. 이러한 연구 경향은 해저영구동토층이 단순한 천부 지층 문제가 아니라, 기후변화, 메탄 방출, 사면 안정성, 자원 잠재성과 연결되는 복합 연구 주제임을 보여줌



[그림 2-27] 캐나다 보퍼트해의 대륙붕 가장자리를 따라 대륙붕 가장자리 형태와 해저 열 구조 간의 관계를 보여주는 지도 및 단면도(Paull et al., 2022)

## □ 북극해 가스하이드레이트 분포·부존특성·지구물리학적 특성 연구

- 가스하이드레이트는 자원 잠재성뿐 아니라 사면 안정성, 가스 누출, 기후 피드백 등과도 직결되기 때문에, 국외에서는 가스하이드레이트 안정영역(GHSZ), BSR, 자유가스층의 분포와 특성을 지구물리학적으로 정량 평가하는 연구가 활발히 수행되고 있음(Ruppel & Kessler, 2017)
- 특히 스발바르 인근에서는 가스하이드레이트 해리 원인을 단순한 해수 온난화만으로 보지 않고 빙후 융기에 따른 압력 감소 등 지질학적 요인을 함께 고려해야 한다는 통합 해석이 제시되었음(Wallmann et al., 2018). 이는 북극해 가스하이드레이트 시스템이 기후 요인과 지질 요인이 복합적으로 작용하는 구조임을 보여줌
- 북극해 자원 잠재력 평가와 지질위험 분석을 위해서는 가스하이드레이트 안정영역, BSR, 자유가스층에 대한 고해상도·정량적 해석이 필수적이며, 이를 위해 고해상도 3D 탄성파 자료를 활용한 연구가 확대되고 있음
- Bünz et al.(2012)와 Plaza-Faverola et al.(2015)은 3D 탄성파 자료를 이용하여 하이드레이트/자유가스 구조와 침니 등 유체 이동 경로를 정밀하게 영상화하고 이들이 활성 메탄 분출과 어떻게 연계되는지 분석하였음. 이러한 연구는 단순한 반사면 해석 이외에 유체 이동 네트워크 전체를 구조적으로 이해하는 방향으로 발전하고 있음을 보여줌
- 또한 Singhroha et al.(2016, 2019)은 탄성파 감쇠(Q-factor) 분석과 OBS 기반 다성분 속도 분석을 통해 하이드레이트 포화도와 부존 형태를 제약하는 방법론을 고도화하였음. 감쇠(Q-factor) 기반 분석은 속도 해석만으로는 분리하기 어려운 하이드레이트/자유가스 구간을 구분·탐지하는 데 유용하며, 속도-감쇠-구조 정보를 통합한 정량 해석의 가능성을 보여줌
- 최근에는 탄성파 감쇠와 속도 정보를 결합하여 가스하이드레이트 포화도를 추정하거나, 암석물리학적 모델링을 통해 퇴적물 내 가스의 미세한 존재 형태와 물성 변화를 해석하는 연구도 수행되고 있음(Liu et al., 2024; Meng et al., 2025)
- 이처럼 국외 연구는 북극해 가스하이드레이트를 단순 부존 여부 확인에서 나아가, 분포 구조, 포화도, 유체 이동계, 기후 및 지질위험과의 연계성까지 종합적으로 해석하는 방향으로 고도화되고 있음

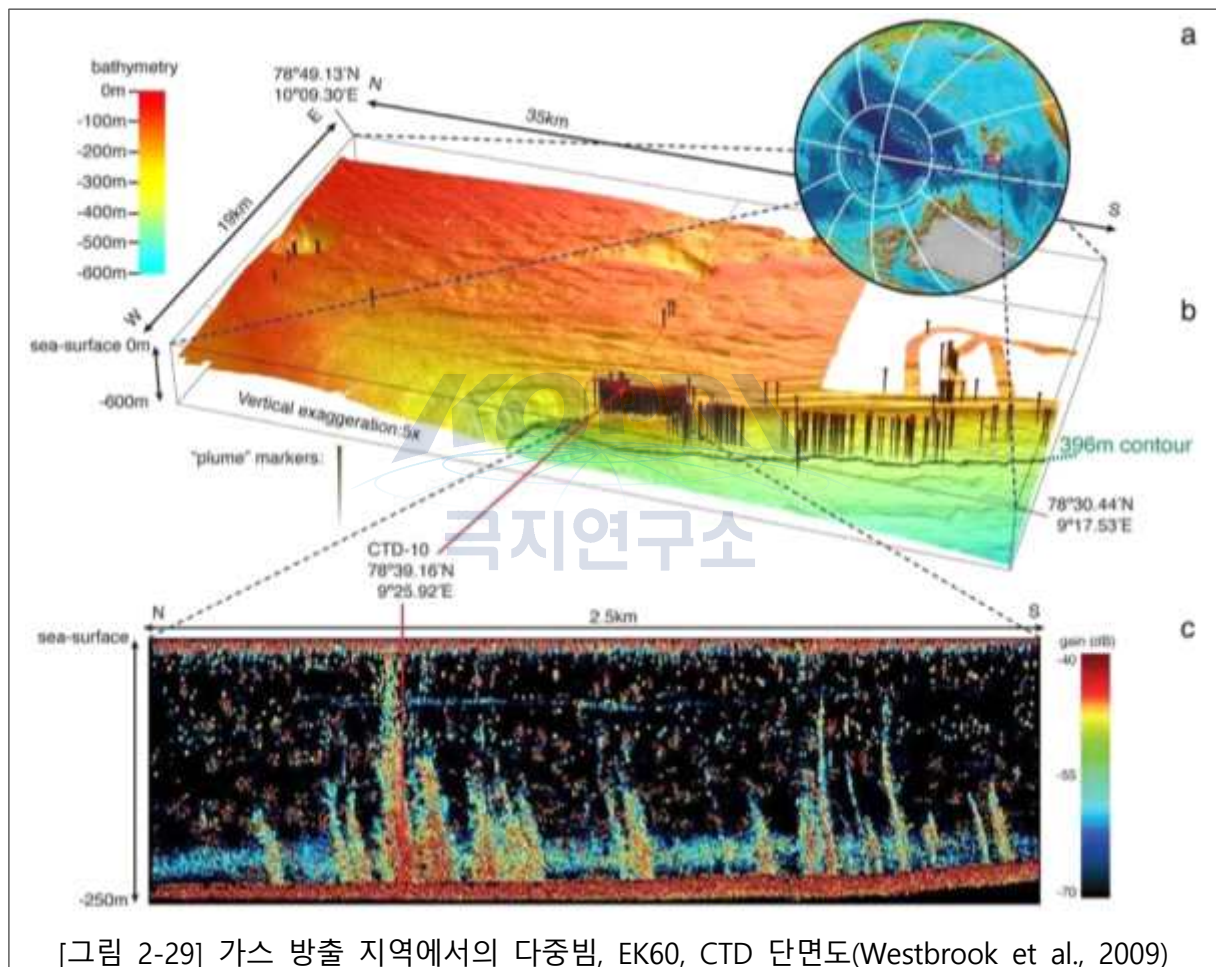


## □ 북극 메탄 방출 관측 및 방출구조 연구

- 북극 대륙붕과 대륙사면에서의 메탄 방출은 기후 피드백 논의의 핵심 주제로 인식되고 있으며, 최근 국외 연구는 단순 방출량 산정에 그치지 않고 심부 저장소-이동경로-해저면 분출 구조를 함께 규명하는 방향으로 발전하고 있음(Plaza-Faverola et al., 2015)
- Bünz et al.(2012)는 북극 Vestnesa Ridge에서 취득한 3D 탄성파 자료를 바탕으로 활성 가스 벤팅 구조와 유체 흐름 경로, 가스시프 분포의 불균질성을 제시하였음. 이는 메탄 방출이 특정 지점에서만 발생하는 것이 아니라, 구조지질적 통제 하에 공간적으로 복잡하게 분포할 수 있음을 보여줌
- Mau et al.(2017)은 스발바르 대륙사면에서 1,000개 이상의 가스 플레어를 탐지하여 seepage가 국지적인 현상이 아니라 광역적으로 발달할 수 있음을 제시하였음. Seepage 분포가 단층 및 균열과 같은 구조지질학적 요인과 밀접하게 연결되어 있으며, 응력장이 seep 위치와 발달 양상을 제어할 수 있음을 보여줌(Plaza-Faverola et al., 2015)
- 북극해에서는 메탄 또는 가스 방출 현상이 다양한 해역에서 반복적으로 관측되고 있으며, 이를 정밀 이미징하고 구조적으로 식별하려는 연구가 활발히 수행되고 있음(Westbrook et al., 2009; Lehmann et al., 2025)
- 최근에는 chirp 자료와 3D 탄성파 자료뿐 아니라 코어, piezometer, 지화학 자료를 결합

하여 메탄 방출 현상, 방출구조, 장기적인 방출 이력(빙기-간빙기 스케일)을 통합적으로 해석하는 연구가 수행되고 있음(Cooke et al., 2023; Plaza-Faverola et al., 2023)

- 또한 고해상도 3D 탄성파 자료에 머신러닝 기반 반자동 단층 추출 알고리즘을 적용하여, Vestnesa Ridge에서 가스 누출과 관련된 미세 단층 및 planar features를 분석하는 연구도 제시되고 있음(Cooke et al., 2025)
- 이러한 국제 연구 흐름은 북극 메탄 방출 연구가 단순 탐지 단계에서 벗어나, 구조·물성·유체 이동·시계열 변동성을 통합적으로 해석하는 정밀 연구 단계로 진입하고 있음을 시사함



[그림 2-29] 가스 방출 지역에서의 다중빔, EK60, CTD 단면도(Westbrook et al., 2009)

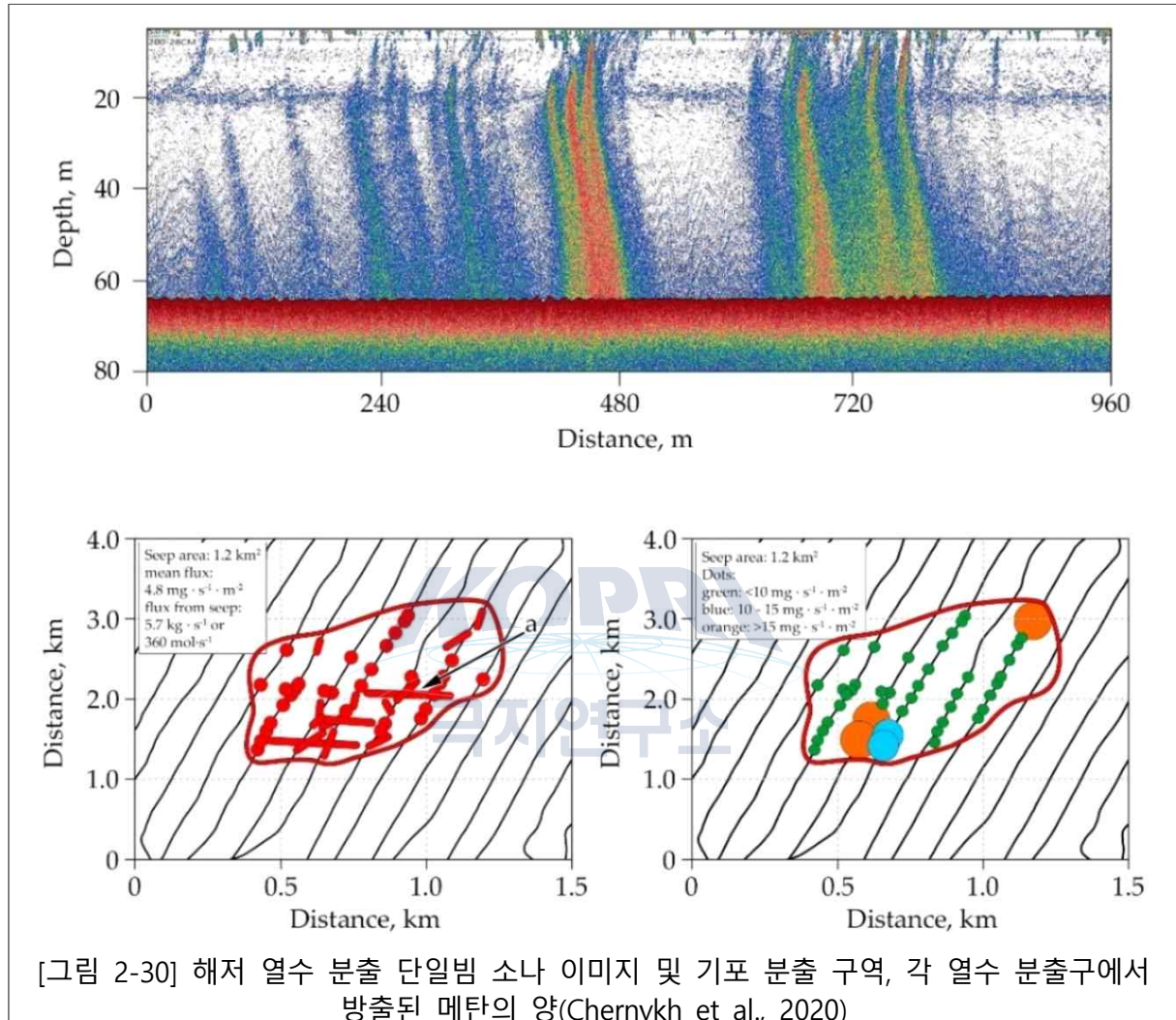
## □ 북극해 GIS 기반 DB 구축

- 북극 연구는 지형, 지구물리, 시료, 화학, 생태, 모델링 자료가 동시에 생산되는 특성을 가지므로 자료가 분산되어 관리될 경우 재현성과 비교 가능성이 크게 저하됨. 이에 따라 국내외에서는 표준 메타데이터와 Web-GIS 기반의 장기 자료 관리 체계를 구축하는 것이 필수 요소로 인식되고 있음(Chong et al., 2024)
- Arctic Data Center 등 주요 저장소를 중심으로 관측자료, 시료정보, 모델 결과, 소프트웨어를 함께 아카이빙하고 FAIR 원칙에 기반한 의미 체계·온톨로지 연결을 통해 자료 상호운용성을 강화하는 방향으로 발전하고 있음
- 다만 해저지형, 천부층서, 퇴적물 코어, 메탄 및 미생물 자료를 완전히 통합한 체계는 아직 정착 단계에 있으며, 북극해 특유의 복합 자료를 유기적으로 연결하는 부분은 지속적인 고도화가 요구되고 있음.
- 국외에서는 북극 자료를 단순 축적 대상이 아닌, 연구 재현성과 다학제 융합을 가능하게 하는 전략적 연구 인프라로 인식하고 있으며, 이는 향후 해저지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축의 중요한 참고 사례가 됨

## □ 북극해 메탄 측정 및 메탄 방출량 추정 연구

- 메탄 플럭스는 기후영향 평가에서 핵심적인 정량 지표이기 때문에 국외에서는 관측자료와 모델링(수송·용존·산화·대기 교환)을 결합하여 불확실성을 줄이려는 연구가 활발히 수행되고 있음. 특히 얇은 연안 및 대륙붕이 전지구 해양 메탄 방출에 큰 기여를 할 수 있다는 점이 제시되면서 북극 정량 관측의 중요성이 더욱 강조되고 있음(Weber et al., 2019)
- Tohjima et al.(2021)은 R/V Mirai(2012-2017) 관측자료를 활용하여 동시베리아해의 메탄 방출량을 추정하고 대기 CH<sub>4</sub> 관측·수송·역산을 결합한 정량 프레임워크를 제시하였음. 이는 북극 메탄 방출 연구가 단순 현장 측정에서 벗어나 대기과 해양을 아우르는 통합 수치분석으로 발전하고 있음을 보여줌
- Chernykh et al.(2020)은 소나 후방산란 자료로부터 해저 기포 플럭스를 환산하는 방법론을 정리하고 라프테프해 사례에 적용하여 현장 기반 정량 추정의 가능성을 제시하였음
- Sparrow et al.(2018)은 보퍼트해에서 고대(ancient) 탄소 기원의 메탄이 표층수에 기여하는 정도가 제한적일 수 있음을 보임으로써 메탄 방출량 평가 시 지질 기원, 수괴 이동, 수주 내 산화 필터 효과를 함께 고려해야 함을 시사하였음
- 최근에는 eddy covariance 기반의 직접 해기 메탄 플럭스 관측이 축적되면서, 해저에서 방출된 메탄이 실제로 대기까지 전달되는 양을 직접 제약하려는 연구도 제시되고 있음(Thornton et al., 2020; Workman et al., 2024)

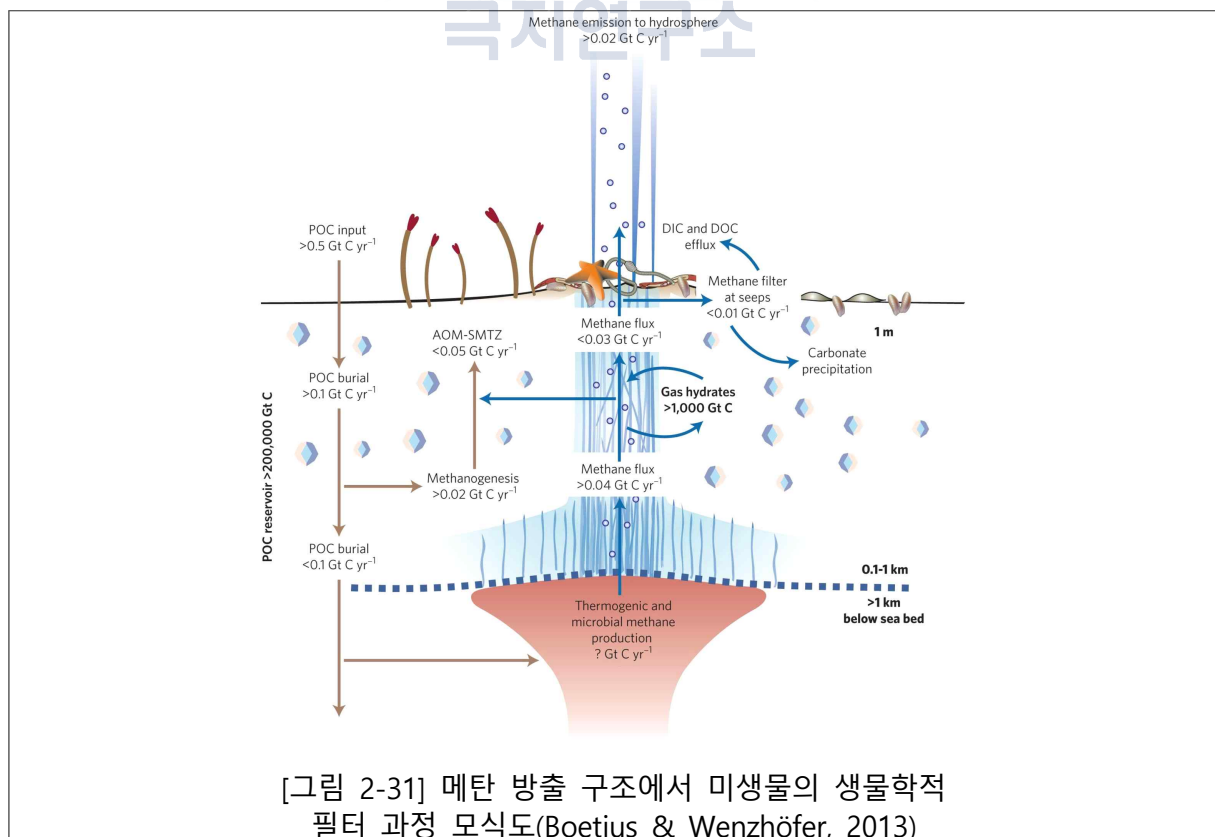
- 이처럼 북극해 메탄 방출량 추정은 단일 측정기법에 의존하기보다, 음향관측, 수층·대기 관측, 역산모델, 생지화학 해석을 포괄하는 다학제적 접근이 필수적인 연구 분야로 발전하고 있음



#### □ 북극해 해저환경변화에 따른 미생물 구조 및 반응 연구

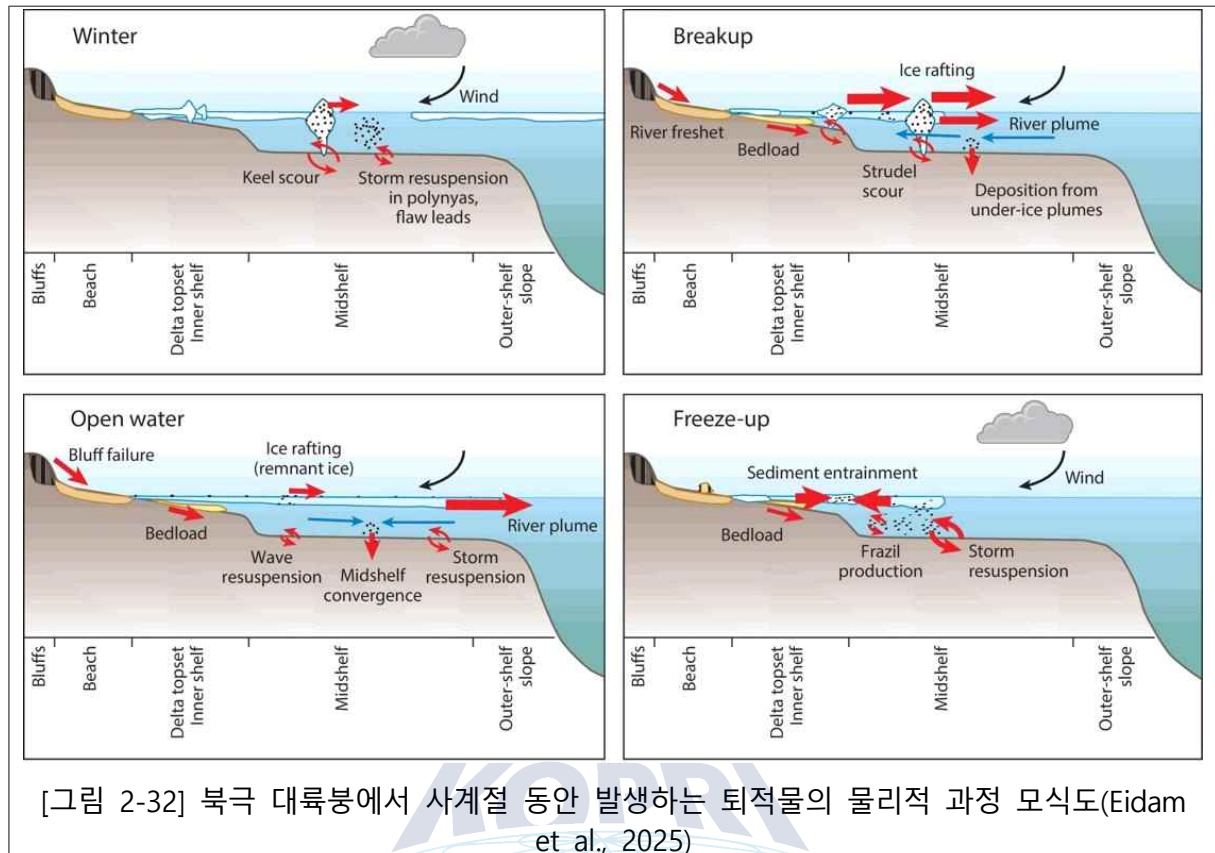
- 국외에서는 해저에서 방출된 메탄이 대기로 전달되기 전에 저서 및 수주 미생물에 의해 얼마나 산화·소비되는지가 실제 대기 유입량을 결정하는 핵심 요인으로 인식되고 있으며, 이에 따라 미생물 반응은 메탄 플럭스 및 기후 피드백 평가에서 중요한 완충 기작으로 다뤄지고 있음
- 혐기성 메탄 산화(AOM)는 메탄 산화 고세균(ANME)과 황산염 환원 박테리아(SRB)의 공생 작용을 통해 이루어지며, 해저 퇴적층에서 메탄을 소비하는 대표적인 생물학적 필터 역할을 수행함(Knittel & Boetius, 2009)

- 또한 해저면 미생물 활동은 메탄의 상향 이동을 차단하는 기능을 갖지만, 동시에 메탄 산화 과정에서 산소 고갈을 유발할 수 있어 저서생태계 환경 변화와도 밀접하게 연계됨 (Boetius & Wenzhöfer, 2013)
- Klasek et al.(2021)는 스발바르 하이드레이트 마운드에서 메탄 공급 상태에 따라 SMTZ 위치와 미생물 군집(ANME-SRB), 생물다양성 양상이 달라짐을 제시하였음. 이는 메탄 방출 강도 변화가 단순 화학적 신호를 넘어 미생물 생태계 구조까지 변화시킬 수 있음을 보여줌
- 최근에는 수주 내 메탄 산화 미생물(MOB)에 대한 현장 실측자료가 축적되면서 연구 초점이 단순한 미생물 분포 확인에서 벗어나 해저-수주 연계 시스템의 메탄 차단 효과를 정량적으로 평가하는 방향으로 진화하고 있음(Uhlig et al., 2018). 또한 가스시프 변동이 유기탄소 순환과 미생물 군집 구조를 변화시키는 메커니즘을 유전체 및 지화학 자료로 해석하는 연구도 증가하고 있음(Lv et al., 2022)
- 미생물 필터 효과를 실제 플렉스 추정 불확실성 저감으로 직접 연결하기 위해서는 지구 물리자료-공극수화학-미생물군집-수주 산화 과정을 동시에 관측하는 통합 연구가 필요하다는 점이 반복적으로 제기되고 있음(Klasek et al., 2021; D'Angelo et al., 2024)
- 이는 북극 메탄 연구에서 미생물학적 접근이 더 이상 보조적 요소가 아니라 해저지질-수주-대기 연계 해석의 핵심 축으로 자리 잡고 있음을 의미함



## □ 북극해 해저퇴적물 기원 및 특성 연구

- 중앙북극해와 주변 대륙붕에서 취득한 퇴적물 코어를 활용하여 수십만 년 규모의 지질학적 변화를 추적하고 퇴적물 기원과 운반 경로를 규명하는 연구가 꾸준히 수행되고 있음. 이러한 연구는 북극해 퇴적물이 빙하, 해빙, 해류, 육상 공급원의 변화를 기록하는 장기 환경 기록체라는 점에 기반함
- Fagel et al.(2014)은 점토광물 분석을 통해 빙기에는 Laurentide 빙하 기원의 물질이, 간빙기에는 유라시아 대륙 기원의 물질 유입이 우세하였음을 제시하였으며, 이를 통해 북극해 퇴적물 공급원이 기후 상태에 따라 크게 달라질 수 있음을 보여주었음
- Darby et al.(2009)은 척치해와 알래스카 마진 해역에서 해빙에 의한 퇴적물 이동을 광물 입자 추적을 통해 분석하고 연안 퇴적물이 해빙에 의해 원해까지 장거리 수송될 수 있음을 입증하였음. 이는 북극 퇴적물 분포 해석에서 해빙의 역할이 매우 중요함을 보여주는 사례임
- Deschamps et al.(2018)은 멘델레예프 리지 인근 퇴적물의 방사성 동위원소를 분석하여 지난 15만 년 동안의 공급원 변화를 추적하고 과거 빙하의 확장 범위를 추정하였음
- Alatärvas et al.(2023)는 점토광물과 동위원소 분석을 통해 북극 Transpolar Drift가 러시아 연안 물질을 중앙북극해로 운반하는 주요 통로임을 정량적으로 제시하였으며, 시대별 해류 경로 변화 해석에 중요한 근거를 제공하였음
- 퇴적물 기원과 물성은 빙하·해빙·해류 변화의 장기 기록이자, 해저지형·천부층서·자원 및 위험 평가의 해석 기반이 되기 때문에 광물·지화학·동위원소를 결합한 종합 진단이 필수적임(Eidam et al., 2025)
- 현재까지의 연구는 특정 해역이나 특정 항차 자료에 편중된 경우가 많아, 북극 전역을 포괄하는 광역·장기 시계열 기반 공급원 변화 평가에는 여전히 한계가 존재함. 따라서 향후에는 자료의 공간적 확장성과 시계열 연속성을 강화하는 연구가 필요함

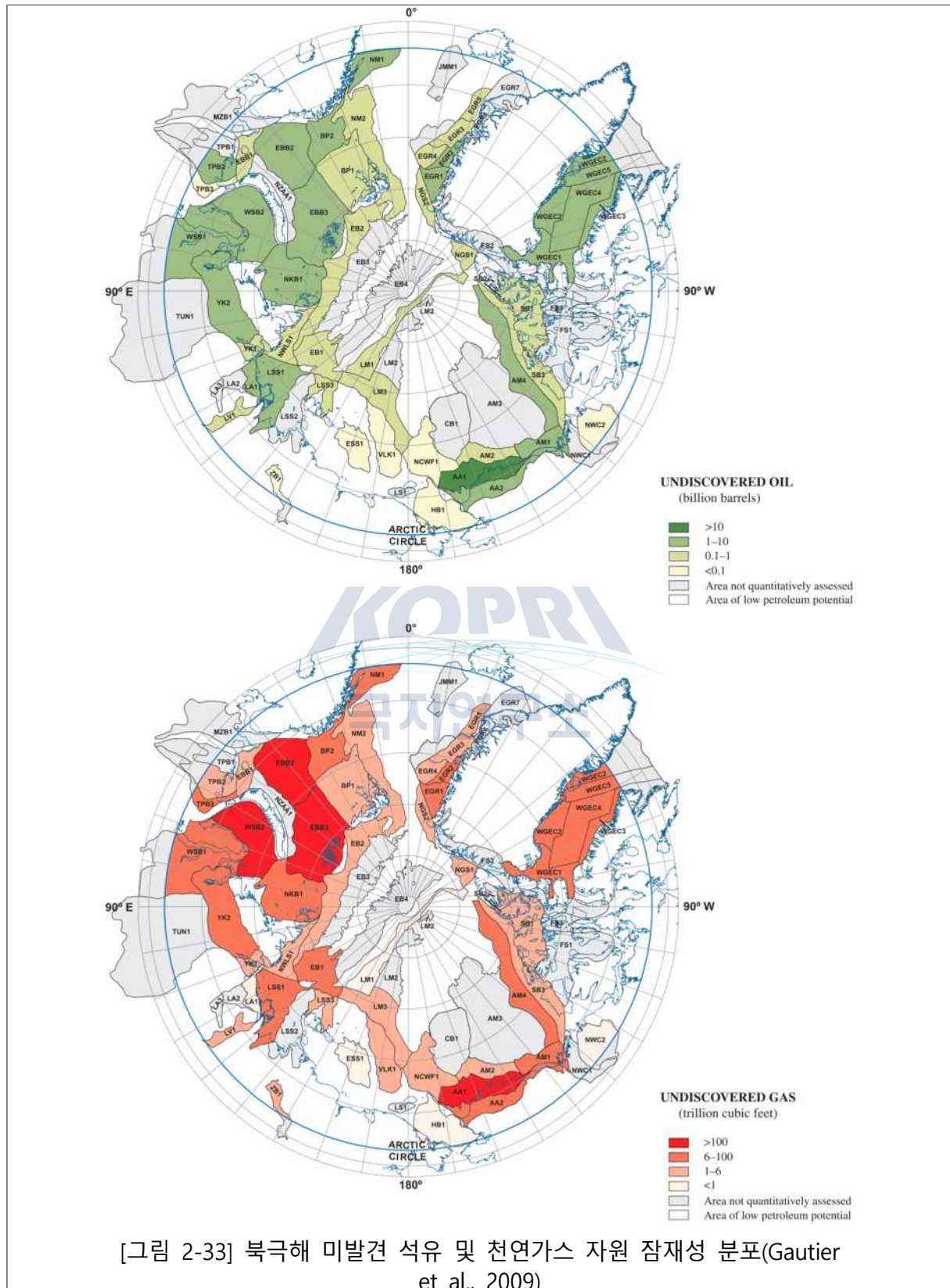


#### □ 북극해 석유·가스 탐사 및 생산

- 북극해에서의 석유·가스 연구는 주로 미발견 자원량 평가, 분지별 석유시스템 해석, 탐사·개발 가능성 검토를 중심으로 수행되고 있음. Gautier et al.(2009)은 미국 USGS의 북극권 자원평가를 통해 북극에 전 세계 미발견 천연가스의 약 30%, 미발견 석유의 약 13%가 분포할 가능성이 있으며, 이들 자원이 주로 수심 500 m 이내의 해상에 존재할 수 있다고 제시하였음. 동시에 중앙북극해와 같은 심해 분지는 상대적으로 석유 잠재성이 낮고 북극의 광범위한 대륙붕이 주요 유망 대상으로 남아 있다고 해석하였음
- 그러나 실제 탐사와 생산 관련 연구는 북극해 전역에 균등하게 분포하기보다, 사실상 연안국 관할 해역과 인접 대륙붕을 중심으로 축적됨. 노르웨이 바렌츠해의 경우, Lutz et al.(2021)은 남부 노르웨이 바렌츠해에서 1980년 이후 50개가 넘는 유·가스전이 발견되었고 이 지역이 노르웨이 예상 회수가능 자원의 21%를 차지한다고 정리하였음. 반면 북부 노르웨이 바렌츠해는 상업적 자원탐사가 개방되지 않았고 지구물리·지질 자료도 제한적이라고 설명하였음. 또한 Norwegian Petroleum Directorate(2017)는 동부 Barents Sea North에 대한 평가에서 아직 탐사정이 시추되지 않았으며, 향후 자원 잠재성 입증에는 실제 시추가 필요하다고 명시하였음. Amberg et al.(2024) 역시 Olga Basin 일대를 자료가 제한적인 프론티어 탐사 지역으로 규정하고 있음

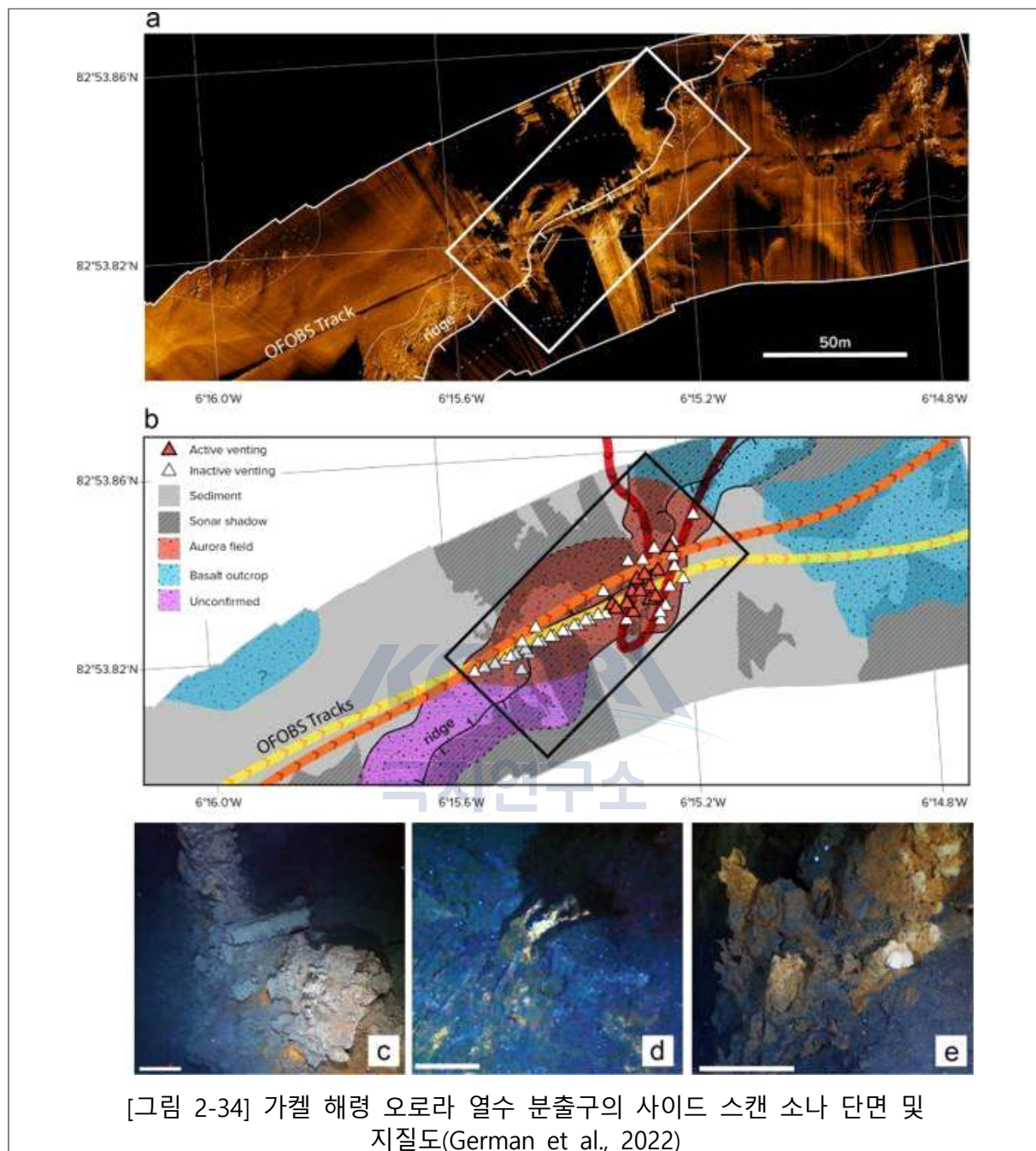
- 그린란드 주변 해역도 유사한 경향을 보이며, 그린란드의 탐사 활동이 offshore West Greenland, Baffin Bay, offshore North-East Greenland를 중심으로 전개되었고 특히 2010-2015년 사이 대규모 2D·3D 탄성파 탐사와 7공의 탐사정 시추가 이루어졌음 (Christiansen, 2021). Gregersen(2008)은 북동부 Baffin Bay의 Melville Bugt 해역을 새로운 프론티어 석유탐사 지역으로 제시하면서도 동부 Baffin Bay에는 아직 시추공이 없고 추가 자료 확보가 필요하다고 보았음. 이는 북극해 석유·가스 탐사가 주로 연안국의 인접 대륙붕·프론티어 해역에서 진전되어 왔음을 보여줌
- 미국 알래스카 해역에서도 평가와 탐사의 중심은 Alaska OCS의 계획구역, 특히 보퍼트해와 척치해 중심으로 수행되고 있음. BOEM(2026)은 Alaska OCS를 11개 계획구역으로 구분해 평가하고 있으며, 보퍼트해와 척치해를 핵심 계획구역으로 포함하고 있음. 이는 북극해 석유·가스 탐사 연구가 중앙 북극해 공해상보다는 국가 관할 하의 대륙붕 및 외대륙붕을 중심으로 축적되고 있음을 보여주는 또 다른 사례임
- 북극해 석유·가스 탐사 및 생산 연구는 광역 자원평가 단계에서는 북극권 전역을 대상으로 수행되어 왔지만, 실제 고해상도 지구물리 자료 축적, 탐사정 시추, 생산 검토가 이루어진 지역은 주로 연안국 관할 해역과 인접 대륙붕에 집중되어 있음. 반면 중앙 북극해 공해상 및 고위도 프론티어 해역은 지구물리탐사와 해석의 공백이 존재함. 따라서 향후에는 북극 프론티어 해역에 대한 선제적 탐사를 통해 해저지질·지구물리 기초자료를 확보하고 향후 자원 잠재성 평가와 국제협력 논의에서 해석 주도권을 선점할 필요가 있음

극지연구소



## □ 북극해 해저 광물자원 부존 특성 연구

- 북극 심해저와 해령, 대륙붕 주변의 광물자원은 자원 잠재성뿐 아니라 개발 과정에서의 생태계 영향까지 함께 고려되어야 하므로, 국외에서는 분포, 형성환경, 지형 및 구조 통제 요인을 정량적으로 평가하는 연구가 수행되고 있음
- Hein et al.(2017)은 북극해의 폐쇄적인 지형 조건, 육성 기원 물질 공급, 증상화된 수괴 구조 등으로 인해 북극 심해의 망간 퇴적물이 다른 대양보다 성장 속도가 빠르고 철 함량이 높을 수 있음을 제시하였음. 이는 북극 해저 광물자원의 형성과 진화가 다른 대양과 구별되는 환경적 특성을 가진다는 점을 보여줌
- Cui et al.(2020)은 척치해 대륙붕 및 사면의 철-망간 산화물이 수성 기원(hydrogenetic)과 속성 기원(diagenetic)이 혼합된 특성을 보인다고 해석하였음. 이는 해저 퇴적물 내부에서 망간이 재용출·농축되는 속성 작용이 활발하며, 척치해의 높은 유기물 생산성과 산화-환원 경계면 변화와 밀접하게 연계되어 있음을 시사함
- German et al.(2022)은 Gakkel 해령의 Aurora hydrothermal field에 대한 지질학적 및 생물학적 특성을 연구하였으며, 해당 열수장은 고온의 black smoker 활동과 금속 황화물 부존 가능성으로 인해 북극 열수 광상 연구의 대표 사례로 주목받고 있음
- 최근에는 AUV/ROV를 이용해 Aurora 열수장의 미세지형을 고해상도로 시각화하고 3D 모델을 구축하는 연구, 그리고 다양한 관측 자료를 통합하여 열수장 시스템의 장기 변화를 분석하는 연구가 수행되고 있음(Isler et al., 2024; Lapointe et al., 2025)
- 그러나 북극 심해 광물자원 연구는 여전히 접근성 제약이 크고 반복 관측 빈도가 낮으며, 광역 탐사망이 부족하여 지역 간 비교 가능한 자료 축적이 제한적인 상황임.
- 따라서 향후 북극 해저 광물자원 연구는 단순 자원 존재 여부 확인을 넘어, 형성과정, 주변 생태계, 환경변화 민감성, 국제규범 대응까지 포괄하는 방향으로 연구 범위를 확대할 필요가 있음



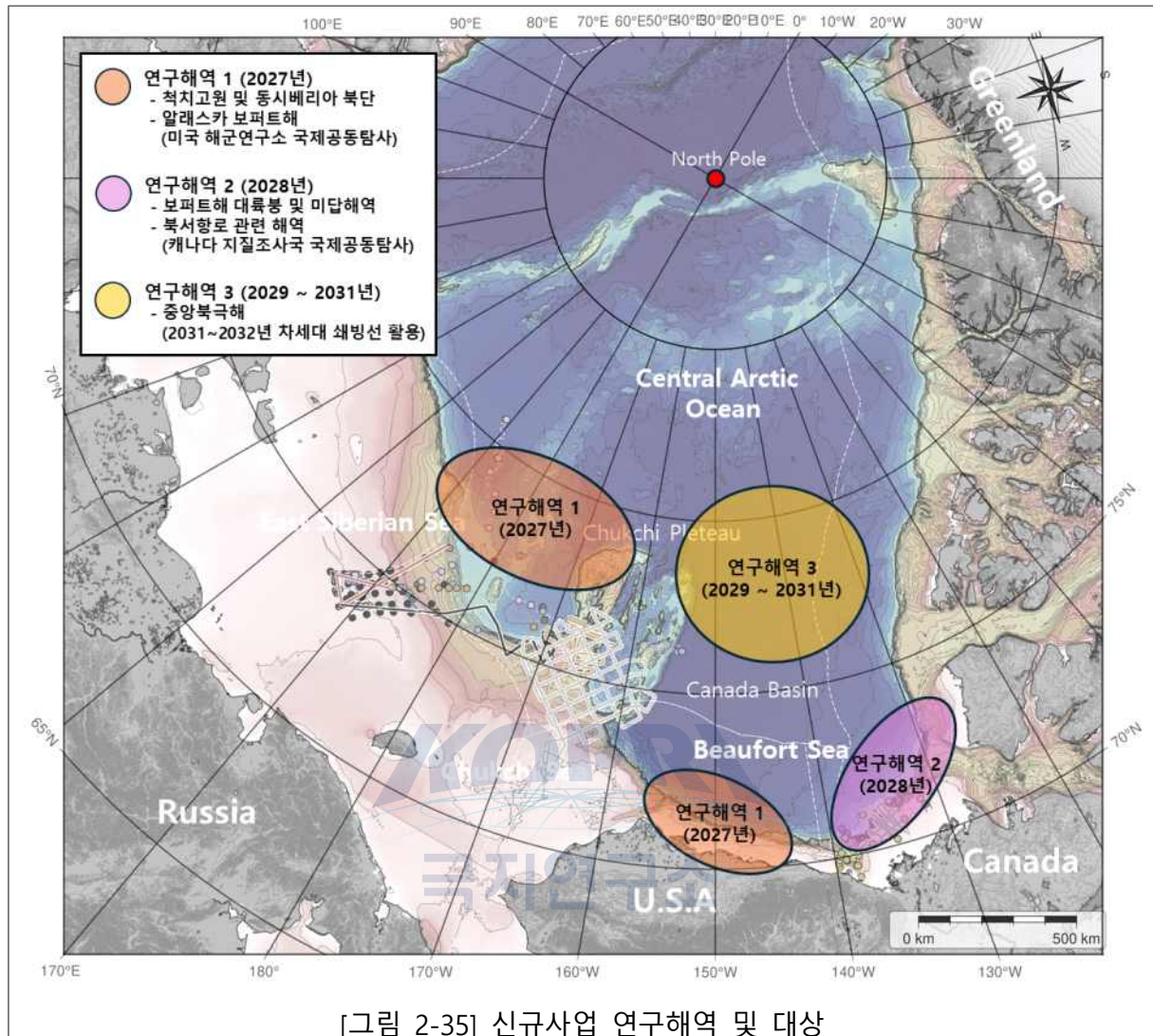
## 제5절 기존 연구와의 차별성 및 연구 성과

### 1. 기존연구와의 차별성

<표 2-11> 기존연구와 차별성

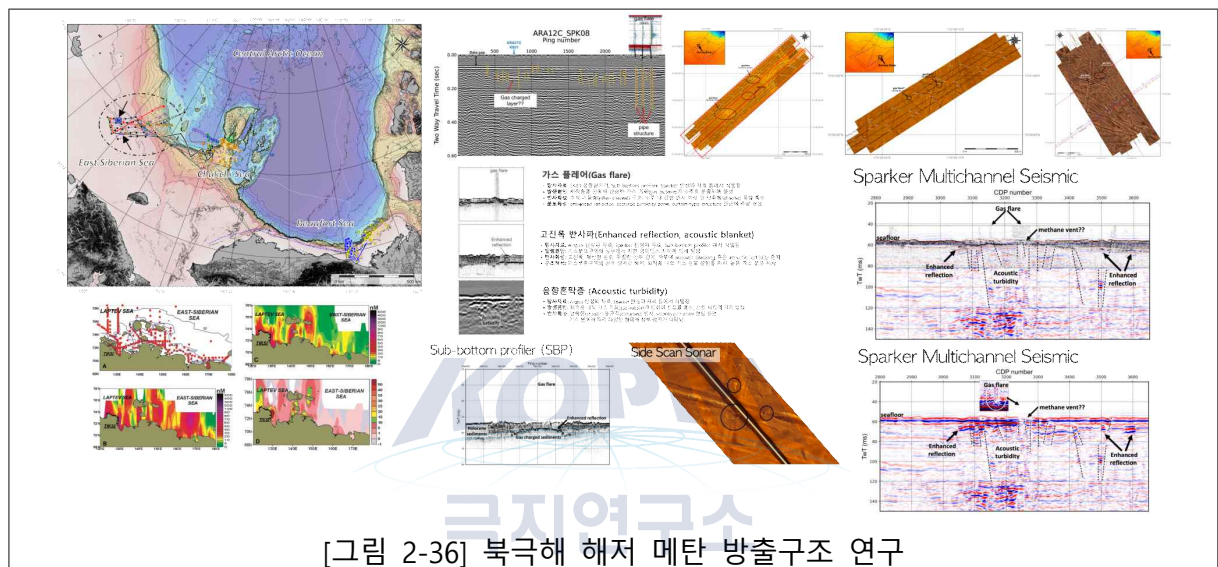
| 구분   | 선행사업('21~'26)                                                                              | 신규사업('27~'31)                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구제목 | - 극지 해저환경 및 해저조사 연구:<br>북극해 해저지질 조사 및 해저환경 변화 연구                                           | - 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발                                                                                                                                                                                         |
| 연구목표 | - 북극해 미답해역에서의 해저지질 정보 선점 및 지구온난화를 가속화시킬 수 있는 북극 해저환경 변동성 규명                                | - 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점을 통한 과학영토 · 지질환경 · 해저자원 가치 창출                                                                                                                                                                              |
| 연구해역 | - 척치해, 캐나다 보퍼트해, 동시베리아해<br>- 특정 해역·제한된 공간 범위 중심 수행                                         | - 프론티어 해역 진출 및 선제적 탐사 수행<br>- 척치고원 북단, 동시베리아해 북단 확장 (연구해역 1)<br>- 미국 알래스카 대륙붕 일부 지역 확장 (연구해역 1)<br>- 북서항로 개척을 위한 캐나다 보퍼트 해역 확장 (연구해역 2)<br>- 중앙 북극해 진출 (연구해역 3)                                                                  |
| 연구범위 | - 기존 서북극해역 중심 해저지질 자료 축적<br>- 해저영구동토층·메탄/가스하이드레이트 등 선행자료 확보<br>- 공해상 일부 해역 중심 해저자원 기초자료 보유 | - '30~'31 차세대 쇄빙연구선 활용 고위도 해역 탐사 확대<br>- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 자료 축적<br>- 해저지질환경 변화 및 구조 해석 및 온실가스 방출구조 규명<br>- 심부 퇴적물 기록 확보·연대층서 정립 및 ICDP 참여<br>- 물리탐사 기반 유망지 도출 및 산·학·연 평가로 잠재력 평가 보고서 작성<br>- 국제협력 기반 지질·지구물리자료 확보로 자원평가 정밀도 향상 |

| 구분       | 선행사업('21~'26)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 신규사업('27~'31)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 주요개선 사항  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 북극 해저-해양-대기 메탄순환과정 추적과 온난화에 미치는 영향 평가</li> <li>- 동시베리아해 대륙붕 지역에 군집되어 분포하고 있는 메탄 방출 구조 탐지 및 기원추적 연구</li> <li>- 한-캐-미 국제협력연구를 통한 보퍼트해 대륙붕 지역(캐나다 EEZ 내)탐사 수행</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 지구물리탐사 및 AI 기반 지구물리 자료해석 기술을 활용한 북극해 천연가스 등 주요 해저자원 탐사를 통한 해저자원 분포 및 특성 규명</li> <li>- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 수행</li> <li>- 미래 기후위기 대응을 위한 고해양 북원연구/지화학 분석, 북극해 기후변화 예측</li> <li>- 지구온난화 관련 해저 특이구조에 대한 3차원 정밀 관측 및 심도 탄성파 이미징 구현</li> <li>- 미국 보퍼트해 및 중앙북극해 미답해역 탐사 및 신규 탐사해역에 대한 DB 구축</li> <li>- 북극해 과학영토 확장과 차세대 쇄빙연구선을 활용한 미답해역 탐사 수행</li> </ul> |
| 차별성 및 연계 | <p>(해역) 특정-제한 해역 → 고위도 프론티어 해역 진출-확장<br/> (범위) 자료 축적 → 선점-자산화-통합 정보체계화<br/> (탐사 기술) 개별 관측 → ROV-CSEM-3차원 탄성파-AI 기반 자립화<br/> (차세대 쇄빙연구선 연계) 아라온호(1단계, '27~'29) - 차세대 쇄빙연구선(2단계, '30~'31)<br/> (인력 양성) 산학연 연계를 통한 극지 실무형 전문인력10명 이상 양성</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 10px; width: 45%;"> <p style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;">선행사업 ('21~'26)   탐색기 (기초체력 확보)</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">  <p>학술적 기초 조사<br/>(현상 규명)</p>  <p>연안·대륙붕 중심<br/>(접근 가능)</p>  <p>개별 데이터셋<br/>(DB)</p> </div> </div> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; width: 10%;"> <p style="background-color: #ff9900; color: white; padding: 5px; text-align: center;">핵심 차별성<br/>(Strategic Leap)</p> <div style="background-color: #ff9900; padding: 10px; text-align: center;"> <p>Science → National Strategy<br/>(국익 창출)</p> <p>Peripheral → Core<br/>(북극점 선점)</p> <p>Data → Solution<br/>(플랫폼 활용)</p> </div> </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 10px; width: 45%;"> <p style="background-color: #cc0000; color: white; padding: 5px; text-align: center;">신규사업 ('27~'31)   도약기 (전략자산 선점)</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">  <p>국가 전략자산 확보<br/>(영토·자원)</p>  <p>북극점·프론티어<br/>(핵심 해역)</p>  <p>통합 의사결정 플랫폼<br/>(디지털 트윈)</p> </div> </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

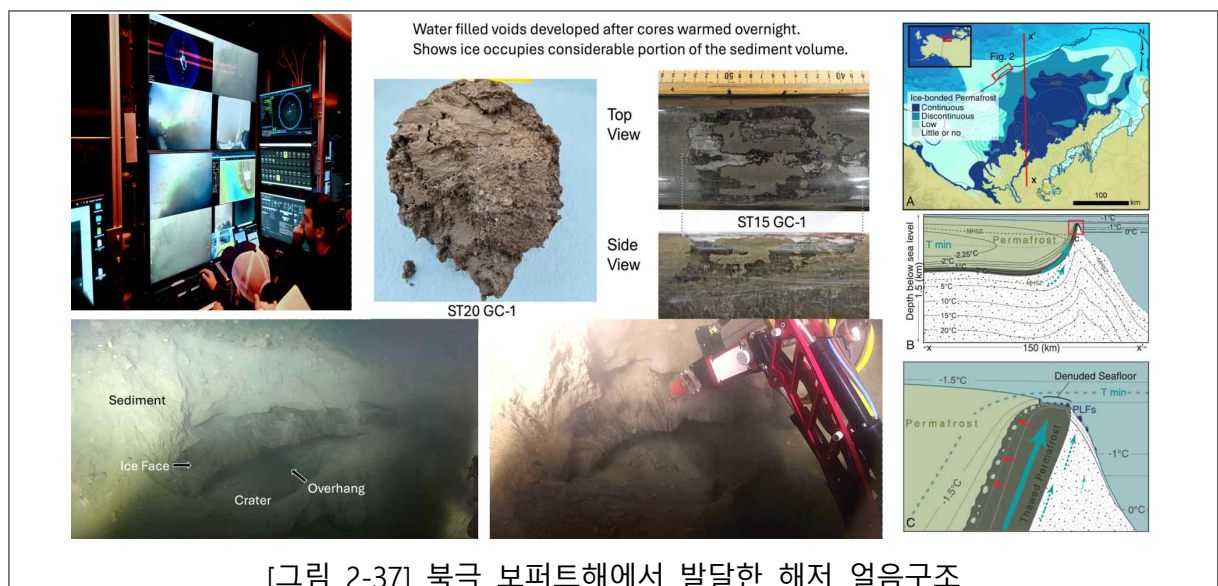


## 2. 기존 연구 성과

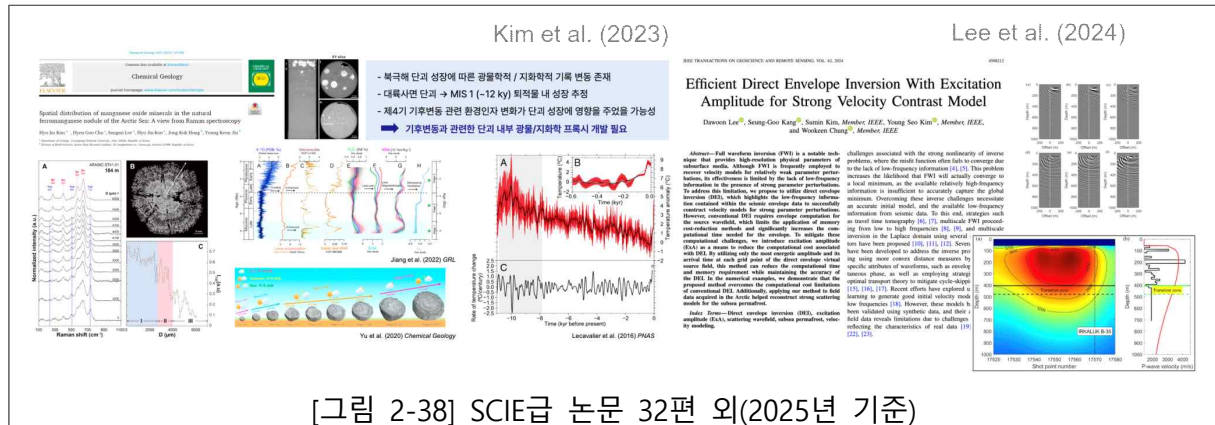
- (주요 성과물) 지구온난화에 따른 메탄 방출구조 탐사 및 대륙붕단에 발달한 해저 얼음구조 성인 규명
- 동시베리아해 대륙붕(공해상)에 발달한 가스플레어 최초 확인, 고진폭 반사파, 음향혼탁층 및 단층구조 등 메탄의 부존과 이동을 시사하는 지구물리학적 반사파 특징 발견 ('21, '23, '24)



- 캐나다 보퍼트해 대륙붕단에 발달한 해저 얼음 구조(해저동토층이 녹아 생긴 융빙수/지하수가 해저면 가까이 이동하여 생성) 최초 발견 ('22, '25)



- 동시베리아해 대륙붕단에 발달되어 분포하는 해저망간단괴에 대한 광물학적 특성 등 다수의 북극 해저지질 분야 연구논문 출간



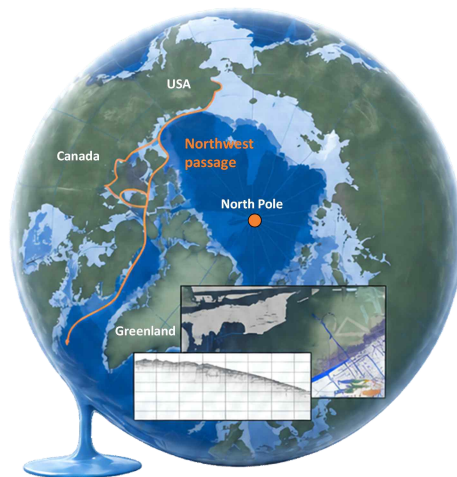
## □ (성과 우수성) 북극 진출에 필요한 고급 해저자료/정보 확보

- 동시베리아해 대륙붕(공해상)에서 해저 메탄가스 방출구조(가스플레어)를 조사 범위 내 최초 확인하고, 고진폭 반사파-음향혼탁층·단층구조 등 메탄 부존·이동을 시사하는 지구물리학적 핵심 징후를 체계적으로 도출('21, '23, '24)하여 북극 해저 메탄 방출 구조 탐사 역량을 실증. 향후 이를 기반으로 메탄 방출 기원 추적 및 확산 시나리오(예측모델) 구축을 추진
- 캐나다 보퍼트해 대륙붕단에서 해저 얼음구조를 조사 범위 내 최초 발견하고, 용빙수/지하수의 해저면 인근 이동에 따른 형성 메커니즘을 제시('22, '25)함으로써 해저영구동토층 붕괴·수리학적 변화 등 해저환경 변동성 정밀진단의 핵심 근거자료를 확보
- 동시베리아해 대륙붕단 해저망간단괴의 광물학적 특성 규명 등 북극 해저지질 분야 연구 성과를 축적하고, SCI(E)급 논문 32편(25 기준) 등 성과 창출을 통해 비북극권 국가로서 북극 해저지질 연구의 지속적 생산성과 국제 연구경쟁력을 확보
- 북극 연안국 수역(예: 캐나다 EEZ)에서 아라온호 기반 해저탐사를 수행함으로써 과학외교 및 국제공동협력 기반을 구축, 국제 공동 탐사 주도로 국제위상 제고

## 제3장 기획연구 연구개발과제 및 추진계획

제1절 사업 비전 및 목표 설정

제2절 중점분야 세부 추진계획



## □ 개요

- 본 사업의 비전과 목표를 구체화하고 중점 연구개발과제와 추진체계를 제시함
- 본 장에서는 관측 역량, 기술력, 통합화, 주권화의 주요 이슈를 바탕으로 사업 추진 전략을 도출하고 이를 실행하기 위한 세부 과제를 체계화하고 있음

## □ 사업 비전 및 목표

- 사업의 비전은 북극 프론티어 해역의 해저지질정보를 선점하고, 북서항로 활용 기반 확보를 위한 지구물리탐사를 수행하며, 해저지질환경 변동성 정밀진단과 전략자원 잠재력 평가를 통해 국가 전략적 가치를 창출하는 것임
- 이를 위해 북극 프론티어 해역 진출, 기후위기 대응, 항로 활용기반 구축, 해저자원 정보 자산화의 네 방향을 중심으로 사업 목표를 설정하고 있음
- 또한 독자적 빙권해역 탐사기술 확보와 국제협력 기반 확대를 통해 중장기적으로 북극 연구 주도권 확보를 지향하고 있음

## □ 중점 연구개발과제

- 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점을 통해 선제적 탐사와 해저지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 추진함
- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사를 통해 MBES·SBP 기반 기초자료 확보와 캐나다 지질조사소(GSC)와의 공동연구체계를 강화함
- 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단을 통해 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 메탄 방출 등 온난화 가속화 기작을 규명함
- 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 통해 자원 분포와 특성을 파악하고 자원정보의 전략적 활용 기반을 마련함

## □ 추진 방향 및 특징

- 본 사업은 단순 조사에 그치지 않고 현장탐사-자료생산-통합해석-정보체계 구축-전략 활용으로 이어지는 전주기형 연구개발 구조를 갖는다는 점에서 의미가 큼
- 또한 국제공동연구, 첨단 탐사장비 개발, AI 기반 분석기술 활용, 차세대 쇄빙연구선 연계를 통해 확장성과 지속성을 함께 확보하고자 함

## 제3장 연구개발과제 및 추진 계획

### 제1절 사업 비전 및 목표 설정

#### 1. 사업 추진 전략 도출

##### 가. 환경변화 문제점 도출(환경, 경제, 기술 및 거버넌스 관점)

- [환경·재난 안보] 북극발 지질·탄소 리스크의 증대에 대응하기 위해 해저 기반 위험 진단 역량 확보가 국가 재난안보의 핵심 과제로 부상
  - 북극의 해저영구동토층 붕괴, 메탄 분출, 해저 사면 불안정 등은 기후 시스템과 재난 위험에 직결되나, 현장 기반의 정밀 기준자료가 부족함
  - 기존의 기후·해양 관측은 주로 수층 및 표층(해빙, 수온, 염분 등)에 집중되어 있어, 해저 및 지하에서 진행되는 변화인 가스 이동, 지반 약화, 지질재해 발생 가능성을 정책·예측모델·대응체계에 충분히 반영하는 데 한계가 있음
  - 해저 위험요인과 탄소계 변동을 통합적으로 진단·추정할 수 있어야 국가 차원의 기후리스크 관리, 재난대응 시나리오 수립, 북극 관련 정책 의사결정의 실효성을 높일 수 있음
- [경제·인프라] 북극항로, 해저케이블, 해양플랜트 등 북극 인프라 수요 확대에 따라 정밀 해저지형·지반 정보의 전략적 중요성 증대
  - 북극항로의 활용 가능성은 단순히 항로가 개방되는 것만으로 확보되지 않으며, 안전한 항로, 정박지, 우회경로 등을 설계·운영하기 위한 정밀 해저지형, 장애물, 퇴적환경 정보가 필수적임
  - 해저케이블, 관로, 해양구조물의 설치와 유지관리에는 지지력, 침하, 사면 안정성, 퇴적물 이동 특성 등 지반공학적 설계값이 요구되나, 프론티어 해역은 관련 정보의 공백이 커 사업 리스크와 비용 불확실성이 높음
  - 따라서 본 사업은 단순한 학술연구를 넘어, 북극 경제활동을 가능하게 하는 안전·비용 절감형 데이터 인프라 구축 사업이라는 성격을 가짐

- [자원·공급망 안보] 전략광물·에너지 자원 잠재력의 선별·평가와 리스크 저감 역량 확보가 자원안보의 본질이며, 이를 위한 해저지질 탐사·평가 기술 자립 필요
  - 북극 자원은 단순한 존재 여부보다 유망지역의 불확실성을 얼마나 정밀하게 줄일 수 있는지가 핵심이며, 이를 위해 층서, 구조, 유체 및 가스계 시스템을 통합적으로 고려한 과학적 평가가 필요함
  - 자원 탐사는 고비용·고위험 사업인 만큼, 사전 단계에서 유망지 우선순위화와 지질 리스크(가스 분출, 지반 불안정 등)를 동시에 평가할 수 있다면 탐사 성공률 제고와 비용 절감에 크게 기여할 수 있음
  - 또한 공급망 측면에서는 해외 데이터와 기술 의존을 완화하고 국가가 보유·통제 가능한 자원평가 역량과 데이터 자산을 확보해야 향후 국제협력 및 협상에서 실질적인 선택지와 대응력을 가질 수 있음
- 
- [데이터 주권·과학영토화] 북극 거버넌스에서 고품질 해저지질 데이터는 국제협력과 협상력을 좌우하는 핵심 전략자산
  - 북극 관련 국제 논의와 협력체계에서 비연안국이 확보할 수 있는 실질적 영향력은 신뢰 가능한 독자 데이터와 해석 역량에서 출발함
  - 해저지질데이터는 단순한 관측 자료에 머무를 때보다, 정밀지도, 위험도, 자원 유망도 등 의사결정에 활용가능한 형태로 전환될 때 정책적·전략적 가치가 크게 높아짐
  - 국가 차원의 품질관리와 통합 정보체계를 바탕으로 데이터의 신뢰성과 활용성을 높일 경우, 향후 국제공동조사, 데이터 교환, 산업 활용에서 우리나라가 단순 수요자가 아니라 제공자이자 설계자로 참여할 수 있는 기반이 마련됨

## 나. 사업 추진 이슈 도출과 SWOT 분석

### □ [관측 역량] 고위도 극지 해역의 지질 정보 공백 및 데이터 확보 미흡

<표 3-1> 관측분야 이슈와 격차 및 수요

| 이슈(Issue)                      | 격차(Gap)                            | 수요(Needs)                       |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 현장 접근 제약에 따른 정보 공백과 국가적 리스크 전이 | 선박 단독 조사의 한계와 고정밀 연속 데이터(3D) 간의 괴리 | 입체 탐사 기술 도입 및 정밀 디지털 지질지도 선제 확보 |

#### ○ 이슈 (Issue): 현장 접근 제약에 따른 정보 공백과 국가적 리스크 전이

- 북극 고위도 해역은 해빙과 극한 기상으로 인해 운항 가능 기간이 제한되며, 이로 인해 장기간 조사되지 못한 정보 공백 해역이 지속적으로 남아 있음
- 이러한 지질정보의 공백은 단순한 학술적 미해결 문제가 아니라, 북극항로, 해저인프라, 자원 잠재력 평가의 불확실성으로 이어져 국가적 경제·안보 리스크를 증대시킴

#### ○ 격차 (Gap): 선박 단독 조사의 한계와 고정밀 연속 데이터 간의 괴리

- 기존 선박 단독 조사는 접근성 및 해상도 측면에서 한계가 있어, 단편적이고 불연속적인 자료 확보에 머무는 경우가 많으며 미탐사 해역도 여전히 광범위하게 남아 있음
- 반면, 정밀 의사결정과 인프라 설계를 위해서는 해저지형과 지하구조를 함께 반영하는 연속적이고 고해상도의 3차원 정보 확보가 필요함

#### ○ 수요 (Needs): 첨단 탐사 기술 도입 및 정밀 통합 정보체계 선제 확보

- 선박 중심의 평면적 조사에서 벗어나 쇄빙연구선-AUV/ROV-다중센서를 연계한 입체 탐사 체계로 전환할 필요가 있음
- 미탐사 해역을 대상으로 해저·지하 통합 정보체계를 선제적으로 구축함으로써 북극 진출에 필요한 국가 차원의 전략적 근거자료를 확보해야 함

□ [기술력] 극지 특화 탐사장비 부재와 정밀 지반공학 데이터 산출 역량의 한계

<표 3-2> 기술력 이슈와 격차 및 수요

| 이슈(Issue)                                  | 격차(Gap)                                 | 수요(Needs)                         |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| 핵심 탐사 장비의 해외 의존에 따른 운영 지속성 및 데이터 안보 리스크 상존 | 기초 연구 수준의 국내 기술과 산업 현장용 실증 장비 간의 기술적 간극 | 북극 전용 탐사 장비 국산화 및 전주기 현장 실증 체계 신설 |

- 이슈 (Issue): 핵심 탐사 장비 해외 의존에 따른 운영 지속성 및 데이터 안보 리스크 상존
  - 북극의 저온·고압·해빙 환경에서 안정적으로 운용되며 고정밀 지하구조와 지반물성을 산출할 수 있는 특화 장비 역량은 아직 충분하지 않음
  - 핵심 장비와 센서의 해외 의존은 유지보수 지연, 운용 차질, 조사 효율 저하뿐 아니라 원천 알고리즘 및 데이터 보안 측면에서도 잠재적 위험요인으로 작용함
- 격차 (Gap): 기초연구 수준의 국내 기술과 산업 현장용 실증 장비 간의 기술적 간극
  - 국내 기술은 주로 범용 연구장비 활용 수준에 머무는 경우가 많으며, 북극 환경에 특화된 국산 탐사시스템의 현장 적용 실적은 제한적임
  - 특히 항로 및 인프라 설계에 직접 활용할 수 있는 지반 설계 값을 안정적으로 산출할 수 있는 고정밀 탐사체계는 아직 충분히 확보되지 못함
- 수요 (Needs): 북극 전용 탐사장비 국산화 및 전주기 현장 실증 체계 신설
  - 북극 전용 3D 탄성파 탐사 시스템, 심해 시료채취 장비, 지반특성 측정장비 등 핵심 탐사 하드웨어의 독자 개발이 요구됨
  - 아울러 저온·해빙 환경에서의 성능 검증, 운용 프로토콜 정립, 단계적 현장 실증을 통해 연구 성과의 산업 현장 적용성을 높일 필요가 있음

□ [통합화] 지질 위험도와 자원 잠재력을 연계한 통합 평가체계 부재

<표 3-3> 통합화 이슈와 격차 및 수요

| 이슈(Issue)                                 | 격차(Gap)                                | 수요(Needs)       |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| 리스크와 기회의 분리 평가로 인한 의사결정 오류 및 투자 매물 리스크 증폭 | 단순 데이터 나열과 고도화된 '의사결정 지원 패키지' 간의 정보 격차 | 통합평가프레임워크 개발 필요 |

- 이슈 (Issue): 리스크와 기회의 분리 평가로 인한 의사결정 오류 및 투자 리스크 증폭
  - 지질재해 위험과 자원 잠재력은 지질학적으로 밀접하게 연계되어 있음에도, 현재는 이를 별개로 평가하는 경우가 많아 종합적 경제성 판단에 한계가 있음
  - 특히 위험요인을 충분히 반영하지 않은 유망성 평가는 탐사·개발 단계에서 과대 또는 과소평가로 이어져 의사결정 실패 가능성을 높일 수 있음
- 격차 (Gap): 단순 데이터 축적과 고도화된 의사결정 지원 패키지 간 정보 격차
  - 현재는 개별 자료와 지표를 중심으로 정성적으로 해석하는 수준에 머무는 경우가 많아, 복합 변수 기반의 정량적 등급화 역량이 부족함
  - 관측자료, 물리모델, AI·통계기법을 융합하여 유망도와 위험도를 동시에 제시할 수 있는 통합 가치평가 체계가 미흡함
- 수요 (Needs): 통합 평가 프레임워크 구축 필요
  - 지질재해 위험도와 자원 잠재력을 하나의 체계에서 진단할 수 있는 통합 평가체계와 알고리즘 개발이 필요함
  - 정밀지도, 위험도지도, 유망도지도를 연계한 의사결정 지원 패키지를 구축하여 국가 정책과 민간 투자 판단의 근거자료로 활용해야 함

□ [주권화] 자체 확보 데이터의 국제 활용성 부족과 전략자산화 한계

<표 3-4> 주권화 이슈와 격차 및 수요

| 이슈(Issue)                                 | 격차(Gap)                                   | 수요(Needs)                         |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| 단순 관측 데이터 축적의 한계 및 국제 거버넌스 내 '데이터 영향력' 부재 | 파편화된 개별 연구 데이터와 국제 호환 '전략적 산출물' 간의 신뢰도 간극 | 'K-북극 지질 정보 플랫폼' 구축 및 전략적 데이터 패키징 |

- 이슈 (Issue): 단순 관측자료 축적의 한계 및 국제 거버넌스 내 데이터 영향력 부족
  - 국제 공동조사와 협력 환경에서 실질적 영향력을 확보하기 위해서는 단순 로우데이터가 아니라 가공·검증된 전략적 산출물이 필요함
  - 데이터 해석 역량과 품질관리 체계가 국제 수준에 미치지 못할 경우, 국가 예산을 투입해 확보한 자료라도 국제사회에서 기여도를 충분히 인정받기 어려움
- 격차 (Gap): 파편화된 개별 연구자료와 국제 호환 전략산출물 간 신뢰도 간극
  - 연구자 또는 과제별로 데이터 형식과 품질관리 방식이 상이하여 자료 간 결합성, 대외 활용성, 확산성이 제한되는 문제가 있음
  - 국제사회가 요구하는 메타데이터, 품질관리, 추적성을 갖춘 지도·리포트 형태의 전략 산출물 생산 역량을 강화할 필요가 있음
- 수요 (Needs): 'K-북극 지질 정보 플랫폼' 구축 및 전략적 데이터 패키징
  - 국제 호환성을 갖춘 표준 정보플랫폼을 구축하여 데이터의 신뢰성과 상호운용성을 체계적으로 확보해야 함
  - 정밀지도, 위험도지도, 유망도지도를 통합한 전략적 데이터 패키지를 구축함으로써, 향후 국제 공동조사와 북극 산업 협력에서 주도적 역할을 수행할 수 있는 기반을 마련해야 함

□ SWOT 분석

<표 3-5> SWOT 분석, 전략

| 내부 역량 |  | 강점(S)                                                                                                                                                                                                                    | 약점(W)                                                                                                                                                                                                  |
|-------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 쇄빙연구선(아라온호) 기반 고위도 조사·운영 역량</li> <li>- 심해·해저지질(지구물리/퇴적/시료) 기초연구 및 융합 연구 수행 기반</li> <li>- 극지 관측·자료 축적 및 데이터 관리/공유 경험(KOPRI 등 전문기관)</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 해빙기상에 따른 조사 윈도우 제약으로 반복장기 관측 운영이 어려움</li> <li>- 극한환경 핵심 탐사장비/센서(3D 탄성파·지반물성) 해외 의존 및 실증 부족</li> <li>- 지반공학 설계값 산출·검증·표준(QA/메타데이터) 체계 미흡(산업 적용성 제한)</li> </ul> |
| 외부 환경 |  | SO전략                                                                                                                                                                                                                     | WO전략                                                                                                                                                                                                   |
|       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 해빙 감소 및 북극 활동 증가로 항로·케이블·관로·플랜트 등 해저 인프라 수요 확대</li> <li>- 전략자원·공급망 안보 강화로 유망지 선별·리스크저감형 탐사 역량의 가치 상승</li> <li>- 국제 공동조사 확산에 따른 표준화·고품질 데이터/산출물(지도·등급) 기반 기여 인정 수요 증가</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 북극 전용 탐사 장비·센서 국산화 및 현장 실증 트랙(실증 이력) 구축</li> <li>- 국가 해저지질정보체계 구축을 통한 데이터 교환가능성·신뢰도 확보</li> </ul>                                                             |
| 기회(O) |  | ST전략                                                                                                                                                                                                                     | WT전략                                                                                                                                                                                                   |
|       |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 북극권 국가의 접근·자료·인허가 규제 강화 및 자원 폐쇄성</li> <li>- 지정학적 긴장·제재로 국제 공동조사/장비 수급 불확실성 확대</li> <li>- 고위도 탐사의 안전·환경·비용 리스크(사고·지연·보험료) 상시 존재</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 핵심해역 우선순위 기반 단계형 입체탐사(선박-무인체-시료) 운영</li> <li>- 국제협력 변동성 대비 데이터 증화(공개·제한·보안) 및 표준 산출물 선제 확보</li> </ul>                                                         |

□ SO 전략: 강점을 기반으로 기회를 극대화하여 영향력·레버리지 확보

○ [SO-1] K-Arctic 정밀 해저·지하 디지털 아틀라스(Digital Atlas) 구축

- 쇄빙연구선 운용 역량(S)을 기반으로 항로·해저인프라·탐사 수요(O)가 집중된 핵심해역을 우선 선정하여, 정밀해저지도-3D 지질모델-(지질재해 위험도/자원 유망도) 등급지도-근거 리포트를 통합 구축
- 구축 산출물은 경로·입지·탐사 의사결정에 즉시 활용될 수 있도록 표준 포맷과 메타데이터를 함께 제공
- 단순 관측자료 생산에 그치지 않고 '지도·등급·근거'로 구성된 의사결정 패키지 형태로 제공함으로써 정책·산업 현장에서의 활용 전환 시간을 단축하고 핵심해역에 대한 자료 기여도와 협력 레버리지를 강화

○ [SO-2] 유망도×리스크 통합평가(Prospectivity-Risk Matrix) 자료 산출

- 축적된 기초연구 역량(S)을 활용하여 지질재해 위험도와 자원 잠재력을 동일 좌표계에서 동시 등급화하고 핵심해역별 유망도와 위험 등을 연계하여 자료 제공
- 평가 결과는 관측자료(지형·탄성파·시료)와 모델링 결과를 연계해 검증(ground truth) 가능성을 확보하고 갱신 주기와 버전 관리를 통해 장기적으로 자산화
- '기회(유망성)'와 '위험(지질재해)'을 분리하지 않고 통합 판단 기준으로 제시함으로써 투자·탐사 의사결정의 오류 가능성을 낮추고 타 사업 대비 평가 체계의 고도화를 통해 기술적·정책적 차별성을 확보

□ WO 전략: 약점을 보완하여 활용·시장 확산 기반을 구축

○ [WO-1] 북극 전용 탐사 장비·센서 국산화 및 현장 실증 트랙(실증 이력) 구축

- 해외 의존도가 높은 핵심 장비·센서(예: 3D 탄성파탐사, 지반 물성 계측, 시료채취/시추 관련 핵심 장비)를 대상으로 [R&D 개발-성능 시험-북극 현장 실증]으로 이어지는 전주기 패키지 지원체계를 구축
- 극저온·해빙 조건에서의 신뢰성 시험, 운용·정비 프로토콜, 데이터 품질 검증을 포함해 '실증 이력'을 체계적으로 축적
- 국산 장비의 북극 현장 실증 이력(운용·정비·품질)을 확보함으로써, 국내 기업의 극한지 탐사·계측 시장 진입장벽을 낮추고 장비·부품 공급 불확실성 및 데이터 보안 리스크를 동시에 완화

○ [WO-2] 국가 해저지질정보체계 구축을 통한 데이터 교환가능성·신뢰도 확보

- 표준·품질관리(QA) 체계를 내재화하고 메타데이터-버전관리-추적성(Traceability)을 갖춘

국가 해저지질 정보체계를 구축

- 데이터는 공개/제한/보안 등급에 따른 접근권한 체계를 마련하고 국제 공동조사·협력 시 활용될 수 있도록 표준 산출물(지도·등급·리포트)과 패키지 형태의 제공 체계 정립
- 단순 데이터 축적을 넘어 국제적으로 호환·검증 가능한 고품질 데이터·산출물 브랜드를 확립하여, 공동조사에서의 기여 인정과 데이터 교환가능성을 높이고 국내외 활용 확산(정책·산업 적용) 촉진

□ ST 전략: 강점을 활용해 외부 위협에 대한 사업 안정성을 제고

○ [ST-1] 핵심해역 우선순위 기반 단계형 입체탐사(선박-무인체-시료) 운영

- 지정학·규제·고비용 리스크(T)에 대응하여, 쇄빙 운용 역량(S)을 활용한 단계형 조사 설계 적용
- [광역(선박: 정밀지형/기초 탄성파)-정밀(무인체: 표적구간 고해상관측)-검증(시료/코어: 물성·지화학)]의 순차적 접근을 통해 조사 범위·정밀도·검증수준을 최적화
- 제한된 운항기간, 예산 제약 하에서도 의사결정에 필요한 핵심 변수를 우선 확보하는 고효율 조사 운영체계로, 데이터 생산성과 사업 실행 가능성을 동시에 강화

○ [ST-2] 국제협력 변동성 대비 데이터 증화(공개·제한·보안) 및 표준 산출물 선제 확보

- 국제 정세 변화(T)와 무관하게 독자적으로 표준 산출물(정밀지도·위험도·유망도 등급지도·근거 리포트)을 지속 생산하고 데이터는 공개/제한/보안으로 증화하여 관리
- 이를 통해 협력 환경 변화에 따라 공개·공유 가능한 범위를 조정하되, 핵심 성과는 누적·갱신될 수 있도록 장기 자산화 체계 유지
- 외부 환경 변화에 흔들리지 않는 지속 가능한 레버리지(협력 재개 시 즉시 활용 가능한 패키지)를 확보하여, 협력·공동조사 재개 시 기여 인정 및 협상력을 유지

□ WT 전략: 약점과 위협을 동시에 최소화하여 리스크를 구조적으로 저감

○ [WT-1] HSE(안전·환경) 내재화 및 전주기 운영 리스크 관리체계 구축

- 고위도 작업의 안전사고 및 환경 규제 리스크(T)를 선제적으로 관리하기 위해, 국제 기준을 참조한 HSE-품질(QA) 프로토콜을 사업 초기부터 설계에 반영
- 현장 운영(쇄빙·무인체 운용·시료채취) 단계별 위험요소를 사전에 식별·관리하고 교육·점검·감사 체계를 통해 무사고·준법 운영을 제도화 추진
- '안전·환경 준수 역량'을 사업의 핵심 운영체계로 내재화함으로써 국제 공동조사 및 민간 협력에서의 신뢰 비용을 낮추고 장기 수행의 지속 가능성을 강화

- [WT-2] 공급망·인력 리스크 저감을 위한 핵심부품 다원화 및 융합 인력 양성 트랙 운영
  - 장비 수급 불안정에 대비하여 핵심부품·소모품의 예비부품 확보, 정비체계 구축, 공급망 다원화 추진
  - [지구물리-지반-데이터 과학] 융합 인력 양성 트랙을 운영하여 조사·해석·플랫폼 운영을 연결하는 다학제 역량을 축적하고 장기적으로 지속 가능한 연구·산업 생태계 조성
  - 장기 사업의 성패를 좌우하는 핵심 자원(장비·인력)의 불확실성을 구조적으로 낮춰, 고 위도·프론티어 조건에서도 사업의 안정성과 성과 축적 가능성 확보

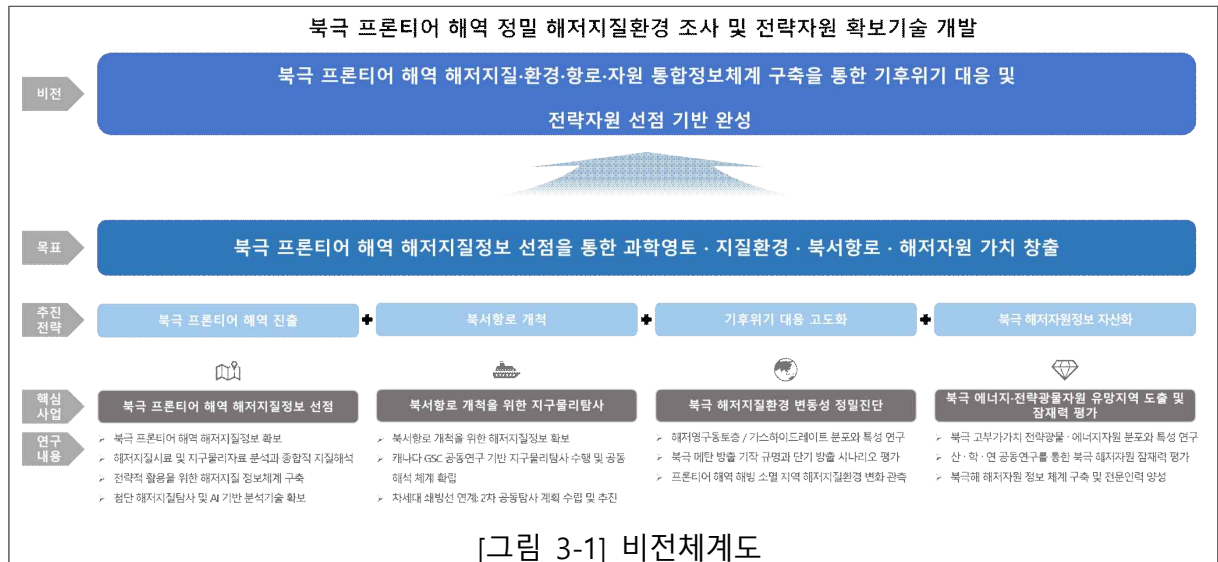
## 2. 사업체계도

### 가. 추진방향 및 비전체계

#### □ 추진방향

- 본 사업은 북극 해빙 감소로 새롭게 접근이 가능해진 북극 고위도 프론티어 해역을 대상으로 해저지질정보를 선제적으로 확보하고 이를 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계로 축적·활용하여 북극항로 활용기반 구축과 기후위기 대응, 에너지·전략광물 확보를 동시에 뒷받침하는 국가전략형 연구개발사업으로 추진함
- 단순한 기초자료 축적을 넘어 북극 해저지질정보를 국가 의사결정에 활용 가능한 전략자산으로 전환하는 데 사업의 기본 방향을 둠
- 이를 위해 첫째, 고위도 미탐사 해역에 대한 선제적 해저지질조사와 지구물리탐사를 통해 프론티어 해역 정보 선점 기반을 구축함. 둘째, 해저영구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 변화, 메탄 방출 등 북극 해저지질환경 변동성을 정밀진단하여 북극발 온난화 가속화에 대한 과학적 근거를 확보함. 셋째, 에너지·전략광물자원 유망지역 도출과 잠재력 평가를 통해 미래 자원개발 및 공급망 대응 기반을 마련함. 넷째, 조사 성과를 통합 정보체계로 연계하고 빙권 특화 탐사장비와 분석기술을 고도화하여 독자적 북극 해저탐사 역량을 내재화함
- 아울러 본 사업은 한국-캐나다 등 국제공동탐사 기반 확대, 첨단 해저무인탐사기술 및 고 해상 3차원 탐사기술 확보, 차세대 쇄빙연구선 활용성 제고, 산·학·연 협력체계 구축을 함께 추진함으로써 연구성과가 과학적 축적에 머무르지 않고 정책·산업·외교적 활용으로 이어지는 구조로 설계함

## □ 비전체계도 도출



## 나. 사업목표 및 범위

### □ 사업 목표 설정

○ 목표 : 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점을 통한 지질·환경·항로·자원 가치 창출

### □ 사업의 범위

<표 3-6> 분과별 연구목적, 연구내용

| 분과                                         | 연구목적                                                                      | 연구 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 북극 프론티어<br>해역<br>해저지질정보<br>선점              | 북극<br>프론티어(미탐사)<br>해역 해저지질조사<br>및 독자적 해저지질<br>정보체계 구축을<br>통한 해저지질정보<br>선점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>북극 해빙 감소에 따른 선제적 탐사를 통한 해저 지질정보 확보</li> <li>해저지형, 지질구조, 저질 정보 등 종합적 해석을 통한 구간별 해저지질도 작성</li> <li>전략적 활용(지질·환경·항로·자원)을 위한 해저지질 정보체계 구축</li> <li>독자적 첨단 해저지질탐사(ROV, 3D MCS 등) 및 AI 기반 자료분석 기술 확보</li> </ul>                                                                          |
| 북서항로<br>개척을 위한<br>지구물리탐사                   | 캐나다<br>지질조사소(GSC)와의<br>지구물리탐사<br>공동연구를 통한<br>북서항로 개척                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>MBES 기반 해저지형 자료 확보 및 기본 지형 특성 도출</li> <li>SBP 기반 천부지층 자료 확보 및 천부 위험징후 분석</li> <li>캐나다 GSC 공동연구 기반 지구물리탐사 수행 및 체계 확립을 통한 항로 활용기반 구축</li> <li>차세대 쇄빙연구선 연계: 2차 공동탐사 계획 수립 및 추진</li> </ul>                                                                                            |
| 북극<br>해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀진단 | 첨단 해저탐사기술<br>기반 북극<br>해저지질환경 변동성<br>관측과 북극발<br>온난화 가속화 현상<br>정밀진단         | <ul style="list-style-type: none"> <li>온난화를 증폭시키는 해저영구동토층의 분포와 특성, 불안정화에 따른 환경변화 진단</li> <li>해저영구동토층 붕괴에 따른 해저환경변화와 온난화 증폭 관계 규명</li> <li>해저영구동토 시추 프로그램(IODP)을 위한 기초자료/연구결과 제공</li> <li>북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가</li> <li>고환경·고해양기록 복원과 연대층서 정립을 통한 과거 온난기 지질환경변화 연구</li> <li>프론티어 해역 해저지질 정보체계 기반 해빙 소멸</li> </ul> |

| 분과                                          | 연구목적                                                           | 연구 내용                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |                                                                | 지역 해저지질환경 관측                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 북극<br>에너지·전략광물<br>자원 유망지역<br>도출 및 잠재력<br>평가 | 천연가스·하이드레이<br>트·해저망간 등 북극<br>에너지·전략광물자원<br>유망구역 도출 및<br>잠재력 평가 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극해 고부가가치 전략광물·에너지자원 탐사를 통한 분포와 특성 연구</li> <li>• 산·학·연 협동 연구를 통한 북극 에너지자원 잠재력 평가</li> <li>• 국제협력을 통한 북극해 지구물리 및 저질 자료 확보</li> <li>• AI·첨단 분석 기술을 활용한 해저자원 분포 및 특성 규명</li> <li>• 북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성</li> </ul> |



## 제2절 중점분야 세부 추진계획

| 중점분야                                     | 핵심항목                                     | 아라온호 활용 연구                               |                                          |                                          | 차세대 해빙선 활용 연구                            |                                          |
|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                          |                                          | 1단계('27~'29)                             |                                          |                                          | 2단계('30~'31)                             |                                          |
|                                          |                                          | 27년도                                     | 28년도                                     | 29년도                                     | 30년도                                     | 31년도                                     |
| 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 선점                  | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              |
|                                          | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             |
|                                          | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  |
|                                          | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 |
| 북서항로 개척을 위한<br>지구물리탐사                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    | 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보                    |
|                                          | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             |
|                                          | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  |
|                                          | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 |
| 북극 해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀 진단 | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             |
|                                          | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  |
|                                          | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 |
|                                          | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 북극 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 |
| 북극 에너지 전략<br>광물자원 유망지역 도출<br>및 잠재력 평가    | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              | 북극 고위도 및 동시베르니아해역 해저지질정보 선점              |
|                                          | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             | 해저지질정보 및 지구물리자료 분석과 종합적 자료작성             |
|                                          | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  | 전략적 활용을 위한 해저지질정보 체계 구축                  |
|                                          | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 | 중요 해저지질정보(RCDB, PDB 등) 구축 및 북극 자원물리자료 확보 |
| 소요예산                                     | 총 300억원                                  | 45억                                      | 45억                                      | 45억                                      | 55억                                      | 110억                                     |

[그림 3-2] 사업 로드맵

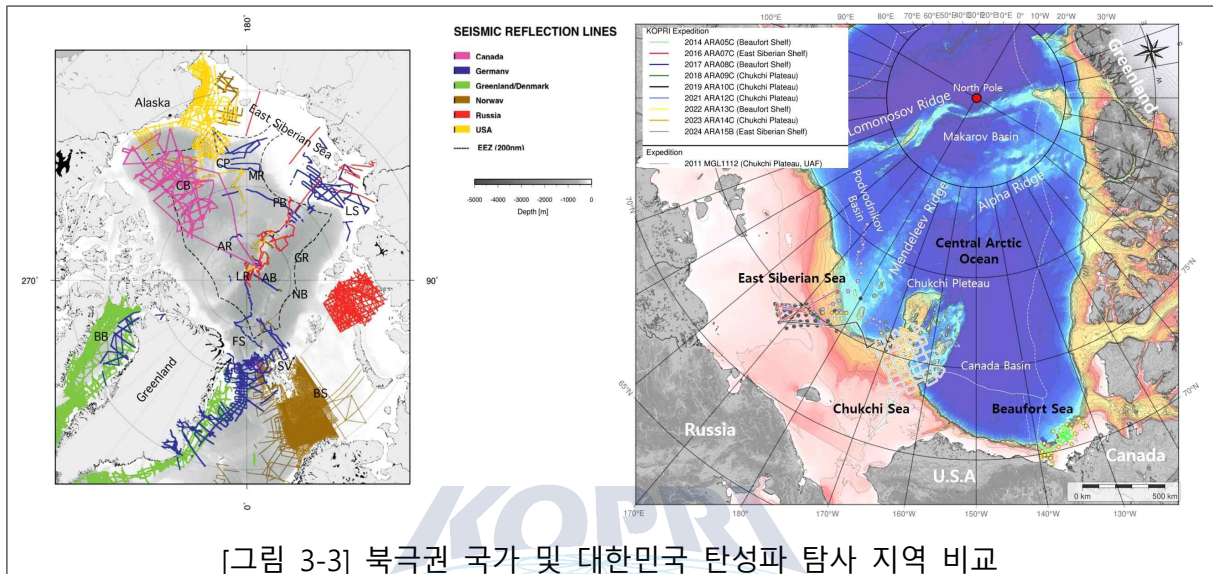
## 1. [중점분야 1] 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점

### 가. 연구의 배경 및 필요성

- 프론티어 해역 자료 공백 해소와 국가 해저지질정보 선점을 통한 전략자산형 질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 필요
- 북극 해빙 감소로 고위도 해역에 대한 접근 가능 기간이 확대되면서 과거에는 물리적인 용적 제약으로 관측이 제한되었던 북극 고위도 및 미탐사 프론티어 해역이 빠르게 개방되고 있음. 이러한 변화는 단순히 연구 대상 해역이 넓어지는 데 그치지 않고 지금까지 확보하지 못했던 실측자료를 어느 국가가 먼저 확보하느냐의 문제로 이어지고 있음
- 특히 프론티어 해역은 기존 자료 축적이 제한적이기 때문에 초기 단계에서 확보되는 해저지질·지구물리 자료의 가치가 매우 큼. 한 번 확보된 자료는 이후 해저지형 분석, 구조 해석, 해저지질도 작성, 후속 정밀탐사 대상 선정의 기준점으로 기능하며, 장기적으로는 항로, 자원, 기후, 안보 관련 정책 판단의 기초자료가 될 수 있음
- 북극 해저지질·지구물리 자료는 과학적 탐구의 대상일 뿐 아니라, 자원개발 가능성 판단, 위험요인 진단, 국제협력 및 거버넌스 논의에서 활용될 수 있는 전략적 정보라는 점에서

## 중요함

- 따라서 본 중점분야는 자료 확보를 단일 성과로 소진하는 방식이 아니라, 지구물리탐사를 통한 자료 확보, 해석을 통한 지도화, 통합 정보체계 구축을 하나의 흐름으로 묶어 추진함으로써 프론티어 해역의 구조적 자료 공백을 해소하고 국가 전략자산형 정보로 전환하는 것을 핵심 방향으로 삼을 필요가 있음



## □ 데이터 주권 관점에서 독자적 탐사와 자산화 추진 필요

- 북극 진출 경쟁이 심화될수록 해저지질·지구물리 자료는 국가별 전략자산으로 관리되는 경향이 강해지고 있음. 실제로 주요국은 해저지형, 탄성파, 지질시료, 자원 잠재력 평가자료를 자국의 정책·산업·안보 판단을 뒷받침하는 기반 정보로 축적하고 있으며, 이를 외부에 의존하지 않는 방향으로 운영하고 있음
- 이와 같은 환경에서 우리나라가 독자적인 실측자료를 충분히 확보하지 못할 경우, 북극항로 대응, 전략자원 검토, 국제협력 참여, 거버넌스 논의 등 국익과 직결되는 사안에서 구조적 제약이 발생할 수 있음. 특히 후발 참여 방식으로는 핵심 해역에 대한 자료 공백을 근본적으로 해소하기 어렵고 자료 접근 범위와 활용 수준도 제한될 가능성이 큼
- 데이터 주권은 단순히 자료를 보유하는 것만을 의미하지 않음. 반복 관측을 통해 자료를 지속적으로 갱신하고 고품질의 자료를 취득하며, 누적·관리할 수 있는 체계를 갖출 때 실질적 의미를 가짐
- 따라서 본 중점분야는 독자적 탐사를 통해 자료를 확보하고 이를 장기적으로 활용이 가능한 정보체계로 자산화하는 방향으로 추진될 필요가 있음

- 국내 축적 성과를 기반으로 프론티어 선점과 통합체계 구축 단계로의 도약 필요
- 아라온호 기반의 북극 탐사는 2010년 이후 지속적으로 수행되어 왔으며, 이를 통해 북극 고위도 탐사운용 경험과 함께 지구물리·시료 기반 조사 역량이 축적되어 있음. 선행 연구에서는 동시베리아해 대륙붕에서 가스플레어를 확인하고 고진폭 반사파, 음향혼탁층, 단층구조 등 메탄 부존과 이동을 시사하는 지구물리학적 징후를 체계적으로 도출한 바 있음. 또한 캐나다 보퍼트해 대륙붕단에서 해저 얼음구조를 확인하는 등 북극 해저환경 변화와 관련된 핵심 현상을 첨단 해저관측 기술을 활용해 면밀히 규명해 왔음
- 그러나 지금까지의 성과는 주로 개별 현상 규명과 기초자료 축적 단계에 머문 측면이 있음. 신규 단계에서는 이러한 축적 성과를 바탕으로 조사 범위를 중앙북극해, 척치고원 북단, 동시베리아해 북단 등 고위도 프론티어 해역으로 확장하고 분산된 자료를 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계로 집적하여 정책·산업 활용이 가능한 체계로 연결하는 도약이 필요함
- 본 중점분야는 기존의 현상 파악 중심 연구를 넘어, 프론티어 해역의 해저지질정보를 선점하고 이를 지도화·정보체계화·자산화하는 단계로 전환함과 동시에 첨단 해저지질 관측과 탐사기술 확보를 통한 기술 자립화 추진에 의의가 있음. 이러한 전환이 이루어져야만 기존 연구성과가 국가 차원의 장기 역량으로 이어질 수 있음
- 첨단 탐사기술과 AI 기반 분석기술 확보를 통한 정밀도와 효율 동시 제고 필요
- 북극 프론티어 해역은 해빙, 기상, 수심, 접근성 제약으로 인해 반복 관측과 정밀 검증이 쉽지 않으므로, 제한된 탐사 기회 안에 고정밀 자료를 확보하고 해석 신뢰도를 높일 수 있는 첨단 탐사기술의 선제적 확보가 필수적임. 동일한 탐사 기회에서도 장비 및 분석기술에 따라 자료 품질과 활용 범위가 크게 달라질 수 있음
- ROV는 정밀 관측과 시료 확보가 가능하며, 광역 자료의 해석 불확실성을 현장에서 직접 낮추는 데 유리함. AUV는 초고해상도 해저지형과 미세지형을 정밀하게 관측할 수 있음
- CSEM은 전기비저항을 이용하여 탄성파만으로는 구분이 어려운 물성 대비 정보를 제공함으로써 비교 분석을 통한 해석 신뢰도를 높이는 보완 수단으로 활용될 수 있음. 또한 3D 고해상 탄성파는 단층, 유체 이동 경로, 천부 구조 연속성, 지층 경계면의 3차원 기하를 규명하는 핵심 기술로서 핵심 구간의 해저지질도 정밀화와 위험요인 도출에 필수적임
- AI 기반 분석기술은 북극 자료의 품질진단, 자동 분류, 구조요소 자동 추출, 속성 기반 패턴 탐지 등을 통해 자료처리와 해석의 재현성과 생산성을 높이는 기반기술로 기능할 수 있음. 특히 자료 품질 편차가 큰 북극 환경에서는 탐사-처리-해석-검증 전 과정을 하나의 통합 워크플로우로 연결해야 하며, 이를 통해 제한된 탐사 기회 안에서도 고정밀·고효율 성과를 안정적으로 생산할 수 있는 기반을 마련할 필요가 있음

□ 국제 기술협력 기반의 첨단 탐사 역량 내재화 필요

- 본 중점분야에서 추진하는 첨단 탐사기술 확보는 단순한 장비 도입에 그쳐서는 안 되며, 실제 현장 적용 경험과 운용 역량 내재화로 이어져야 함. 이와 관련하여 미국 MBARI는 최근 보퍼트해 공동탐사 성과를 바탕으로 향후 북극 연구 협력 확대 의향과 함께 ROV 기반 정밀 탐사, 연구인력 교류, 해양·해저 조사기술 논의, 고해상도 해저지형 매핑 및 장거리 수중 플랫폼 관련 협력 가능성을 제시하고 있음. 이는 본 과제에서 추진하는 ROV/AUV 기반 정밀관측과 첨단 해저탐사기술 확보가 국제협력 기반의 기술 고도화와 운용역량 축적으로 확장될 수 있음을 보여주는 근거임
- MBARI와의 협력은 단발성 현장조사에 머무는 것이 아니라, 장비 운용 경험 축적, 연구인력 교류, 기술 논의와 운용 내재화로 이어질 수 있다는 점에서 의미가 큼. 이는 우리나라가 프론티어 해역 해저지질정보 확보와 정보체계 구축을 추진하는 동시에, 차세대 쇄빙연구선 기반의 독자적 첨단탐사 역량을 단계적으로 확보할 수 있는 기반이 될 수 있음
- 따라서 본 분야에 대한 지원은 단순한 장비 활용 지원을 넘어, 북극 프론티어 해역 정밀 탐사 역량의 선제 확보, 국제 기술협력 기반 강화, 향후 정책·연구·산업 활용이 가능한 고신뢰 해저지질정보 생산체계 구축이라는 점에서 필요성이 큼

□ 차세대 쇄빙연구선 연계 이전 단계의 사전 관측과 기술·자료 선제 확보 필요

- 2030년 취항 예정인 차세대 쇄빙연구선은 고위도 장거리·장기 탐사를 가능하게 하는 국가 핵심 인프라임. 그러나 취항 이전에 핵심 탐사기술과 프론티어 해역의 기준 자료가 충분히 확보되지 않으면 초기 운용 효율이 저하되고 연구선의 본격 활용 단계에서 성과 공백이 발생할 수 있음. 참고자료에서도 차세대 쇄빙연구선 투입 이전에 사전 탐사기술과 핵심 해저지질정보를 확보하지 못할 경우 운용 효율이 크게 떨어질 수 있다는 점이 주요 쟁점으로 제시되어 있음
- 이에 따라 1단계인 2027~2029년에는 아라온호를 기반으로 프론티어 해역 진출, 핵심 기술개발, 자료 축적, 플랫폼 기반 마련을 선제적으로 추진하고 2단계인 2030~2031년에는 차세대 쇄빙연구선과 연계한 고위도 정밀탐사로 확장·고도화하는 2단계 구조로 추진할 필요가 있음
- 이러한 단계적 접근은 차세대 쇄빙연구선의 활용성을 높이는 동시에, 취항 이후 즉시 고도화된 탐사와 자료 생산이 가능하도록 사전 기반을 갖추는 점에서 중요함. 결국 본 중점분야는 차세대 국가 인프라의 성과를 극대화하기 위한 선행 투자 성격도 함께 가짐

□ 정책·법령·상위계획과의 정합성 확보를 통한 추진근거 체계화 필요

- 본 중점분야는 북극항로 시대 대응, 기후위기 대응, 전략자원 확보, 과학영토 확장이라는 국가 차원의 정책 수요와 결합되며, 해양수산 분야 R&D의 공공성과 전략성을 동시에 갖는 사업으로서 추진 근거가 확보되어 있음
- 본 사업이 국정과제 56, 극지활동 진흥법, 해양수산과학기술육성법 등과 연계된 전략 과제이며, 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점과 통합 정보체계 구축, 온난화 가속화 리스크 정밀진단, 전략자원 유망지 도출·잠재력 평가를 통해 국가 북극전략의 과학적 근거를 확립하는 것을 목표로 제시하고 있음
- 따라서 본 중점분야는 단순한 개별 연구과제가 아니라, 국가 차원의 정책 수요를 실질적으로 뒷받침하는 실행형 중점분야로 추진될 필요가 있음. 이 점에서 추진 근거를 명확히 체계화하고 상위계획과의 정합성을 확보하는 것은 사업의 타당성과 지속성을 높이는 데 중요함

## 나. 연구목표 및 내용

| 중점분야                    | 핵심항목                                               | 아라온호 활용 연구                                    |                                   |                          | 차세대 채빙선 활용 연구                                 |      |
|-------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|------|
|                         |                                                    | 1단계('27~'29)                                  |                                   |                          | 2단계('30~'31)                                  |      |
|                         |                                                    | 27년도                                          | 28년도                              | 29년도                     | 30년도                                          | 31년도 |
| 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 선점 | 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 확보                            | 척지고령 및 동시베리아해 북단<br>미정사해역 해저지질 및 지구물리탐사       | 보피트해 내륙동 및 미정사해역<br>해저지질 및 지구물리탐사 | 중앙북극해 중앙해저지질 및<br>지구물리탐사 | 차세대 채빙선 구선을 활용한 북극 프론티어 해역 탐사                 |      |
|                         | 해저지질시료 및 지구물리자료<br>분석과 종합적 지질해석                    | 지질시료 및 지구물리자료 분석                              |                                   |                          |                                               |      |
|                         | 전략적 활용을 위한 해저지질<br>정보체계 구축                         | 고위도 해역 문헌조사 및 시선연구                            |                                   |                          | 탐사구역별 해저지질도 작성 및 지질환경 지질구조 지질해 대한 종합적 해저지질탐색서 |      |
|                         | 점단 해저지질탐사<br>(ROV, 3D 단성파 등) 및 AI 기반<br>자료분석 기술 확보 | 해저지질정보시스템 플랫폼 개발                              |                                   |                          | 원시자료 및 해석결과 빅데이터 체계 구축                        |      |
|                         |                                                    | 연구지질 기반 데이터 공유(OPEN) 시스템 개발                   |                                   |                          | 해저지질정보체계 구축                                   |      |
|                         |                                                    | 점단 해저지질탐사(ROV, CSBM, 3D 단성파) 구축 및 독자적 운용기술 확보 |                                   |                          | 점단 해저지질탐사기술을 활용한 북극해 광역 해저지질조사                |      |
|                         |                                                    | AI 기반 자료분석기술 개발                               |                                   |                          | 북극해 자료에 적용 및 활용성 진단                           |      |
|                         |                                                    |                                               |                                   |                          | 북극 해저지질구조 정보해석                                |      |
|                         |                                                    |                                               |                                   |                          | 3차원 자료에 대한 AI분석기술 확보                          |      |
|                         |                                                    |                                               |                                   |                          | 3차원 해저지질구조 정보해석                               |      |

[그림 3-4] 중점분야 1 로드맵

[그림 3-4] 중점분야 1 로드맵

## 1) 연구목표

□ 최종연구목표

- 북극 프론티어 해역 해저지질조사 및 독자적 해저지질 정보체계 구축을 통한 해저지질정보 선점
  - 북극 프론티어 해역에 대한 해저지질조사와 독자적 해저지질 정보체계 구축을 통해 해저지질정보를 선제적으로 확보하고 이를 지속적으로 축적·관리 가능한 국가 전략자산으로 전환하고자 함

- 이를 바탕으로 북극항로 대응, 기후변화 및 해저환경 변화 진단, 에너지·전략광물자원 평가, 해양안전 및 안보 대응 등 다양한 국가 수요를 뒷받침할 수 있는 과학적 기반을 마련하고자 함
- 궁극적으로는 프론티어 해역의 자료 공백을 해소하고 우리나라가 북극 고위도 해역에서 독자적인 자료 확보와 활용 역량을 갖춘 국가로 도약하는 것을 목표로 함

## □ 분야별 세부목표

### ○ 북극 프론티어 해역 해저지질정보 확보

- 정기적인 탐사 수행을 통해 공해상 척치고원, 동시베리아해 복단, 중앙북극해 등 고위도 프론티어 해역으로 단계적으로 진출하고 국제공동연구를 기반으로 연안국 EEZ 인접 해역 조사도 병행하여 조사 범위를 확대함. 미국 해군연구소(NRL)와의 공동탐사를 통해 2027년 미국 알래스카 보퍼트해의 해저영구동토층 관측을 위한 탐사 수행 예정임
- 프론티어 해역을 대상으로 지구물리자료, 지질시료, 해양시료를 체계적으로 확보하여 해저지형, 천부지층, 심부구조, 저질, 수층 특성을 함께 파악할 수 있는 기초자료를 축적함
- 이를 통해 기존에 자료 공백이 컸던 해역에 대한 기준자료를 마련하고 후속 정밀조사와 장기 시계열 연구로 확장할 수 있는 기반을 확보함

### ○ 해저지질시료 및 지구물리자료 분석과 종합적 지질해석

- 정밀 해저지형과 천부·심부 지질구조, 저질 정보를 종합적으로 해석하여 탐사구역별·구간별 해저지질도를 구축하고 연차별 누적 갱신을 통해 해석의 연속성과 비교 가능성을 확보함
- 시료 기반의 퇴적학·지화학·물성 정보와 지구물리 기반의 공간 연속성을 결합하여 구조 해석의 불확실성을 줄이고 해저지질구조와 퇴적환경을 보다 정밀하게 규명함
- 나아가 이러한 종합 해석 결과를 향후 해저지질환경 변동성 진단과 자원 잠재력 평가에 활용 가능한 공통 기반 자료로 발전시킴

### ○ 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 구축

- 단일 연구성과나 개별 도면 생산에 그치지 않고 원시자료-처리자료-해석결과를 통합 적재·갱신할 수 있는 플랫폼을 구축하여 국가 전략자산형 데이터셋으로 운영함
- 정보체계는 단순 저장 기능을 넘어서 자료의 연차별 누적, 시계열 비교, 탐사 관리, 분석결과 추적, 정책·연구·산업 활용을 위한 검색과 시각화 기능을 함께 갖춘 구조로 설계함
- 또한 국내 산·학·연의 공동활용과 국제협력 과정에서의 데이터 교환을 함께 고려하여 권한관리, 공개수준 단계화, 자료 제공 원칙과 운영 거버넌스를 체계적으로 확립함

○ 첨단 해저지질탐사 및 AI 기반 자료분석 기술 확보

- 해저무인탐사기(ROV/AUV), 고해상 3차원 탄성파, CSEM 등 극한지용 첨단 탐사장비와 운용기술을 확보하여, 프론티어 해역의 정밀 관측과 구조 규명 역량을 강화함
- 광역 탐사자료로 도출된 핵심 구조를 첨단 장비를 통해 현장에서 정밀 검증함으로써 해석의 신뢰도를 높이고 해저지질도 및 위험요인 분석의 정확도를 향상시킴
- 또한 AI 기반 해석 자동화와 시계열 변화 탐지 기술을 개발·적용하여 처리-해석으로 이어지는 과정을 고도화하고 자료처리와 해석의 재현성과 생산성을 함께 높임

□ 연차별 목표

○ 1차년(2027): 기반확보·초기 프론티어 진출(척치고원·동시베리아해 북단 및 미국 알래스카 보퍼트해)

- 기존 조사자료를 검토하여 우선 탐사구간을 선정하고 정기탐사와 국제공동연구를 병행할 수 있는 추진 기반을 마련함
- 척치고원과 동시베리아해 북단에서 해저지형, 천부지층, 탄성파, 시료 확보를 추진하여 후속 연구의 기초자료를 축적함
- 미국 해군연구소(NRL)와의 국제공동연구를 통해 2027년 미국 알래스카 보퍼트해에서 해저영구동토층을 대상으로 한 공동탐사를 수행할 예정임

○ 2차년(2028): 탐사확대·정보체계 고도화(보퍼트해 대륙붕 포함)

- 보퍼트해 대륙붕을 포함한 탐사 확대로 해역별 해저지질 특성 파악 범위를 넓히고 프론티어 해역의 조사 범위를 보다 본격적으로 확대함
- 연차별 탐사 성과를 종합하여 해저지질 정보를 고도화하고 후속 정밀조사의 기반을 강화함

○ 3차년(2029): 광역탐사·종합해석 전환(중앙북극해 진출)

- 중앙북극해까지 탐사구역을 확대하여 광역 해저지질 구조와 퇴적환경 특성 파악을 본격화함
- 해저지형, 천부지층, 심부구조, 시료 분석 결과를 연계한 종합해석으로 전환하여 해역별 해저지질도 작성 기반을 마련함

○ 4차년(2030): 차세대 쇄빙연구선 연계·고위도 확대(2단계 전환)

- 차세대 쇄빙연구선과 연계하여 고위도 해역까지 조사범위를 확대하고 첨단 탐사기술의 현장 적용을 본격화함
- 정밀 탐사와 고도 처리기술을 활용하여 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 유체이동구

조 등에 대한 정밀도를 높임

○ 5차년(2031): 해저지질 정보체계 구축 및 해저지질도 고도화

- 5개년간 축적된 조사성과를 종합하여 북극 프론티어 해역 해저지질 정보체계를 구축함
- 주요 해역별 해저지질도를 고도화하고 향후 변동성 진단과 자원 잠재력 평가에 활용할 수 있는 기반을 마련함

## 2) 연구내용

### □ 북극 프론티어 해역 해저지질정보 확보

○ 정기(연 1회) 탐사 수행과 공해상 진출, 국제공동연구 기반 EEZ 탐사 병행

- 공해상 프론티어 해역인 척치고원, 동시베리아해 북단, 중앙북극해 진출을 핵심 축으로 하되, 연안국 EEZ 인접 해역은 국제공동연구를 통해 자료 확보 범위를 확대함
- 특히 EEZ 진입을 포함한 전략적 국제공동탐사 목표(2건 이상)를 설정하여, 단순 교류 수준이 아니라 실질적인 탐사성과 확보로 이어질 수 있도록 사업 운영 구조를 구체화함
- 프론티어 해역의 자료 공백을 실질적으로 해소하기 위해, 연차별 탐사 이전에 기존 자료의 공간 커버리지, 해상도 등을 검토하고 자료 공백, 지질학적 중요도, 향후 변동성 및 자원 연계 가능성을 반영한 우선순위 구간을 선정함. 특히, 해역별 목적·중요도·우선순위에 따라 정리하여 현실적으로 수행이 가능한 연차별 추진계획으로 구체화함
- 빙권 환경의 불확실성에 대응하기 위해 대체 해역, 대체 측선 등을 사전에 구성하고 결측 구간 최소화를 위한 체계를 운용함

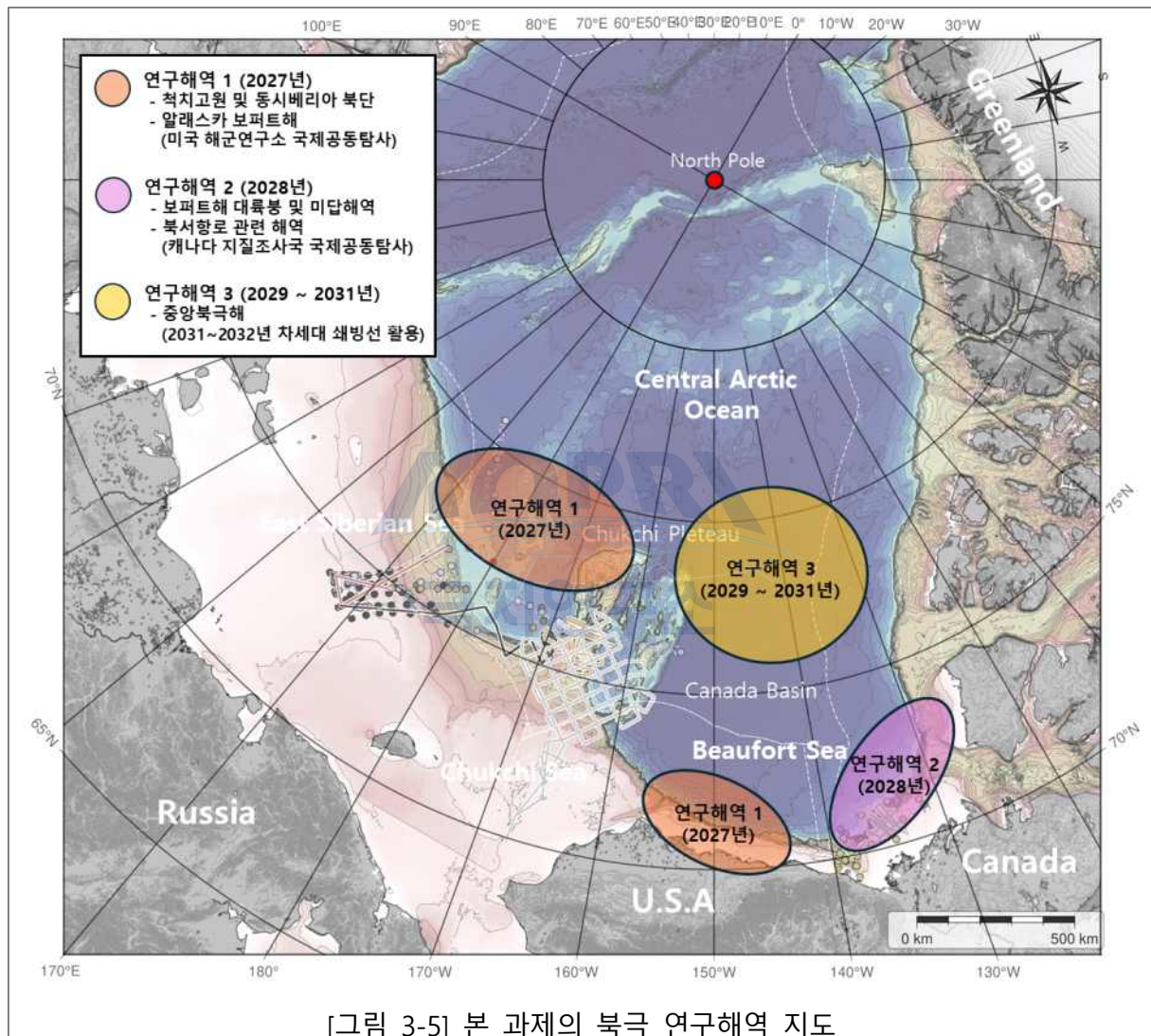
○ 관측항목(다중 플랫폼/다중 센서) 기반 자료 확보

- 지구물리자료, 지질시료, 무인탐사, 해양시료를 결합하여, 지형-천부-구조-저질/시료-수층 정보가 동시에 확보되도록 구성함
- MBES는 해저지형, 경사, 지형요소를 정량화하고 위험지형 후보를 탐지하는 데 활용하며, SBP는 천부층서, 매물구조, 천부 가스 징후를 파악하고 저질 분류의 근거를 제공함
- 2D·3D MCS는 단층, 층서 경계, 유체 이동 경로 등 심부 구조를 규명하는 핵심 자료로 활용하고 CSEM은 탄성파만으로 구분이 어려운 물성 대비를 확보하여 유체 및 하이드레이트 관련 해석을 보완함
- AUV·ROV는 핵심 목표물(특이구조, 방출구조, 위험지형)에 대한 정밀 관측과 정밀 샘플링을 통해 해석의 실증 근거를 확보하며, CTD는 음속 보정과 수층 구조 파악을 통해 지구물리 처리 정확도와 해저환경 해석의 기반자료를 제공함
- 이러한 다중 플랫폼·다중 센서 기반 접근은 해저지형, 천부층서, 심부 구조, 저질·시료를

결합한 종합 해석을 가능하게 하여, 지도화가 가능한 기초자료의 품질과 재현성을 높이는 데 핵심적임

- 특히 무인탐사 기반의 고해상 관측은 핵심 구간의 정밀 지도화와 지질해석 근거를 강화하는 수단으로 활용함

○ 탐사해역별 목적·우선순위에 따른 단계적 확대



- 본 사업의 탐사해역은 단순 면적 확대가 아니라 북서항로 활용성·기존 성과 연계성·기후 리스크·차세대 쇄빙연구선 운용성을 기준으로 목적과 우선순위를 부여하여 단계적으로 확대함
- 캐나다 보퍼트해·북서항로 연계 해역을 북서항로 개척 및 항로 안전성 검토를 위한 기준선 자료 확보의 1순위 핵심 전략해역으로 설정, 척치해의 경우 기존 성과 연계 사전 탐사·기술검증 해역으로 설정, 알래스카 보퍼트해역과 동시베리아해 북단 탐사해역은 해저영구동토층·가스하이드레이트·메탄 방출 등 기후리스크 진단 해역으로 설정, 중앙북극

해는 고위도 광역 확장 해역(2029년 진출)으로 구분함

- 2027년 척치해·동시베리아해 및 미국 알래스카 보퍼트해, 2028년 보퍼트해 대륙붕, 2029년 중앙북극해로 탐사구역을 단계적으로 확대하고 2030~2031년에는 차세대 쇄빙 연구선과 연계한 고위도 광역탐사로 전환함
- 이러한 단계적 확대는 접근성, 운영 안정성, 국제협력 및 허가 여건, 차세대 쇄빙연구선 전력화 시점과의 정합성을 종합적으로 고려한 운영전략으로서 연차별 성과 누적과 위험 관리 측면에서 유리함
- 또한 해역별로 지도화(중점1)-변동성 진단(중점3)-자원평가(중점4)에 필요한 관측항목과 목표 구조(단층, 퇴적체, 특이구조)를 사전에 정의하여 탐사 확대가 단순한 면적 확장에 그치지 않고 연구가설 검증 범위의 확장으로 연결되도록 함
- 동일 해역과 핵심 구간에 대한 반복 관측도 함께 설계하여 향후 중점분야 3의 시계열 변동성 진단으로 연계 가능하게함

#### ○ 국제공동연구 연계 기반 마련

- EEZ 인접 및 연계 해역은 접근 조건이 복잡하므로 국제협력 프레임을 활용하여 공동탐사 구조를 사전에 설계함
- 특히 2027년에는 미국 해군연구소(NRL)와의 국제공동연구를 통해 미국 알래스카 보퍼트해에서 해저영구동토층을 대상으로 한 공동탐사를 추진함으로써, 보퍼트권 해역에서의 국제협력 범위를 확대하고 해저영구동토층 관련 정밀 탐사·해석 기반을 강화함
- 공동탐사 시에는 자료 형식, 공개·공유·엠바고 조건을 사전 협의하여 데이터 주권과 활용성을 동시에 확보할 수 있도록 함
- 워크숍, 공동 성과물(지도, 보고서) 제작 등을 통해 협력의 실질성을 강화하고 국제공동연구가 탐사 이후에도 성과확산으로 이어질 수 있도록 운영함
- 국제공동연구는 단순한 동승이나 협력 수준을 넘어서 첨단장비 운용기술 이전과 성과확산으로 이어질 수 있도록 함

#### □ 해저지질시료·지구물리자료 분석 및 종합적 지질해석

##### ○ 종합 해저지질도 구축

- 확보된 자료를 단일 항목별로 보관하는 데 그치지 않고 해저지형-천부지층-심부지질구조-저질시료 정보를 종합해석하여 탐사구역별·구간별 해저지질도로 체계화함
- 종합 해저지질도는 단순 도면이 아니라, 이후 중점분야 3의 변동성 정밀진단을 위한 기준면과 중점분야 4의 자원 잠재력 평가를 위한 구조·층서 입력자료로 활용될 수 있는 공통 기반 레이어를 제공한다는 점에서 사업 전체의 핵심 인프라 기능을 가짐

- 이를 위해 해저지형 및 반사강도 기반 지형요소 분류, SBP 기반 천부층서·매물구조·천부 가스 징후 추출, 2D·3D MCS 기반 단층·층서 경계 및 심부구조 해석, 시료 기반 퇴적상·입도·물성·지화학 결과를 종합적으로 연구에 활용함
- 최종적으로는 해저지형-천부-심부 구조-저질 정보를 통합하여 구간별 지질구역을 구분하고 해저지질도 경계를 확정함으로써 후속 연구와 정책 활용에 적합한 지도자료를 생산함

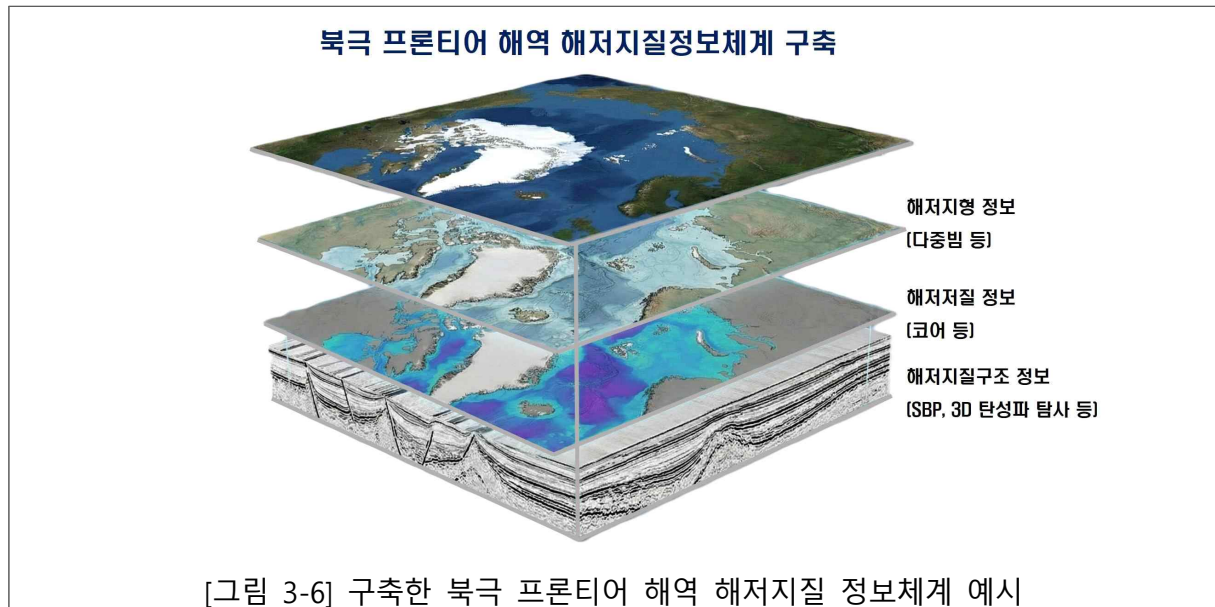
#### ○ 빙권해역 자료 처리·해석 고도화

- 고위도 빙권 환경에서는 잡음, 결측, 운용 제약으로 자료 품질 편차가 발생할 수 있으므로 지도화의 신뢰도를 확보하기 위해서는 자료 처리와 해석의 고도화가 필수적임
- 이를 위해 다중반사 제거, 잡음 제거, 고정밀 속도모델링 등을 적용한 이미징 체계를 구축하여 해저영구동토층과 가스하이드레이트 구조 등 핵심 대상의 해석 불확실성을 낮춤
- 특히 해저영구동토층과 가스하이드레이트는 천부부터 중간 심도까지 구조가 복잡하게 나타날 수 있으므로 심도 이미징과 속도모델링 기반의 구조 규명 역량이 구간별 지질해석의 품질을 좌우함
- 이러한 처리·해석 고도화는 종합 해저지질도의 신뢰도와 재현성을 높이고 후속 분석과 비교 및 검토가 가능하도록 만드는 핵심 기반이 됨

#### □ 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 구축

##### ○ 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축

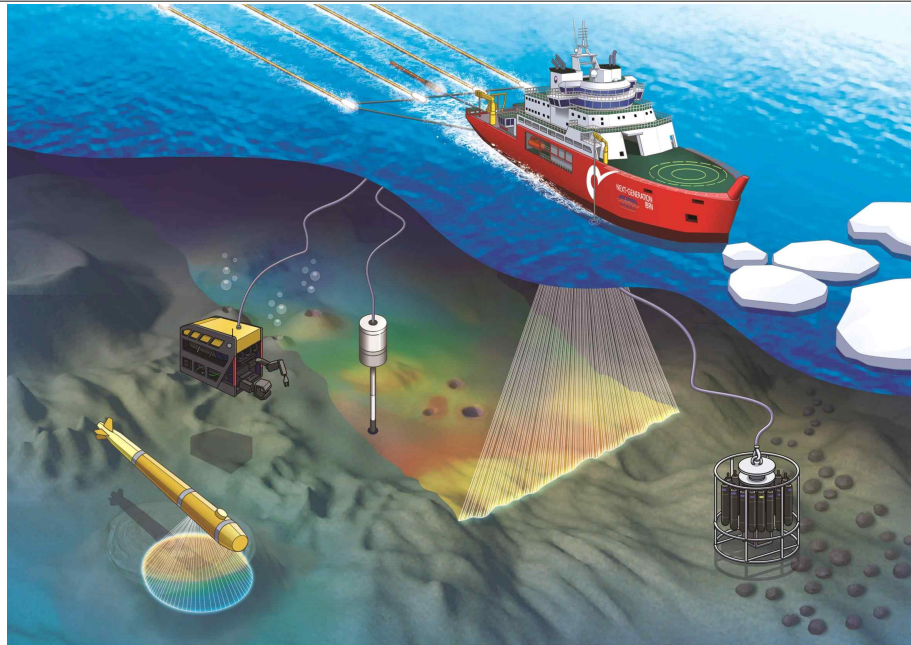
- 본 사업의 핵심은 프론티어 해역에서 확보되는 지질·환경·항로·자원 정보를 통합 정보체제로 집적하여, 상시 운영 가능한 국가 전략자산형 데이터셋으로 전환하는 데 있음
- 플랫폼은 단순 저장소가 아니라, 탐사구역별 데이터 레이어(지형, 천부, 구조, 저질, 시료)를 누적하고 분석·해석 결과의 추적 가능성을 확보하며, 정책·산업·연구 활용을 위한 검색·시각화·제공 체계로 기능하도록 설계함
- 정보체계는 관측자료의 확보, 처리·해석 고도화, 동일 구간 시계열 자료의 비교 기반 제공, 핵심 구간의 지구물리탐사 및 시료 자료를 통해 연구 결과의 신뢰도와 활용성을 높이는 인프라로 작동하도록 설계함
- 플랫폼은 연차별로 데이터셋과 레이어가 구축·갱신되는 운영형 체계로 관리되며, 해저지질정보 확보량, 지구물리탐사 수행량 등과 연동하여 관리함
- 이를 통해 동일 해역을 다년도 관점에서 비교·추적할 수 있는 기반을 확보하고 후속 탐사 설계에도 객관적 근거를 제공함



#### □ 첨단 해저지질탐사 및 AI 기반 자료분석 기술 확보

##### ○ 첨단 탐사장비 및 독자 운용기술 확보

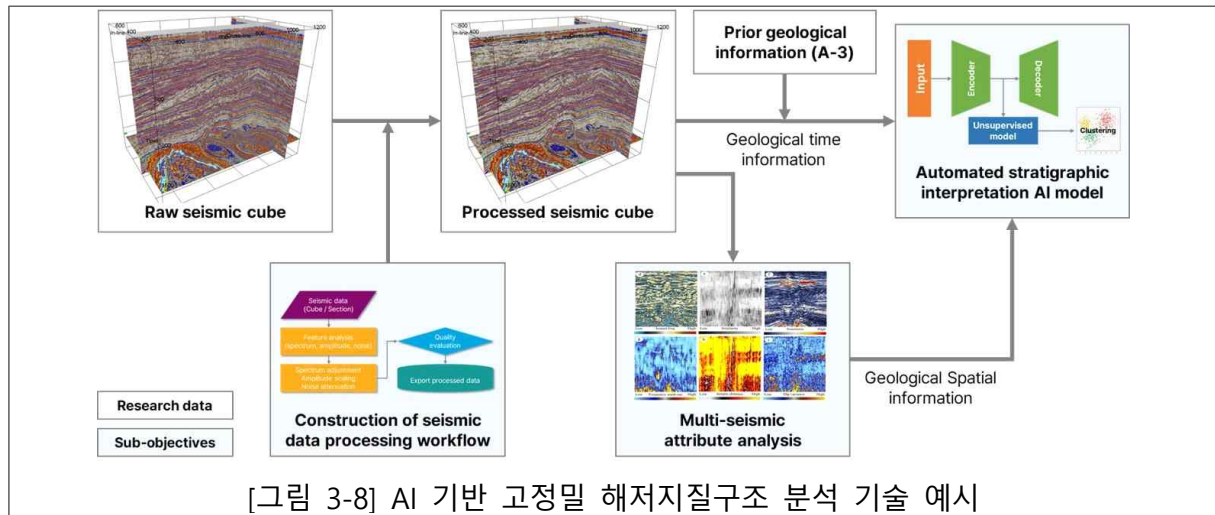
- MBARI와의 협력은 고해상도 해저지형 조사, 장거리 수중 플랫폼, ROV 응용기술 등 북극 프론티어 해역 정밀탐사에 직접 활용 가능한 기술영역을 포함하고 있어 본 사업의 첨단 장비 확보와 독자 운용기술 내재화 목표와 높은 정합성을 가짐
- 이에 따라 본 사업은 공동 현장연구를 통해 확보한 경험을 바탕으로 향후 인력 교류와 기술 논의를 병행하여 ROV/AUV 기반 정밀 탐사기술의 운용성과 현장 적응성을 단계적으로 고도화하고자 함
- 극한지 맞춤형 무인·정밀 탐사체계를 구축하여 광역(2D) 자료에서 도출된 핵심 구조의 정밀 검증, 시각·지형·시료 확보를 통한 해석 불확실성 감소, 가스하이드레이트 관련 물성 대비 확보, 고해상 3D 탄성파를 통한 핵심 구간의 3차원 구조 규명 등을 단계적으로 추진함
- ROV/CSEM 기술이전 및 국제공동연구, 소형 고해상 3차원 탄성파 장비 개발 및 활용, 차세대 쇄빙연구선 장착 장비 운용기술 확보 등을 연계하여, 장비 확보-현장 실증-운용 내재화로 이어지는 기술자립 기반을 마련함
- 특히 1단계('27~'29)에는 아라온호 기반으로 장비 운용성, 자료품질 기준선 검토 등 차세대 쇄빙연구선 활용 극대화를 위한 방안을 마련하고 2단계('30~'31)에는 이를 차세대 쇄빙연구선의 고위도 장거리·장기 탐사에 적용함



[그림 3-7] 구축 예정인 첨단 해저지질탐사 장비

#### ○ AI 기반 자료분석 및 해석 체계 구축

- 북극 탄성파 자료에 대해 지질·지구물리학적 특성과 다중 탄성파 속성을 체계적으로 분석하고 이를 바탕으로 북극 해저지층 자료에 적합한 AI 모델을 선정·고도화하여 자동 해석 기반을 마련함. 이를 통해 방대한 북극 지층 자료를 보다 효율적이고 객관적으로 처리할 수 있는 자료분석 체계를 구축하고자 함
- 특히 다중 탄성파 속성의 공간 정보를 활용한 학습자료를 구축하고 비지도 학습 기반의 해저지층 자동 해석 프로그램을 개발·적용함으로써 기존에 전문가의 수작업에 크게 의존하던 해석 과정을 보다 일관되고 재현 가능하게 개선하고자 함. 이는 해석 결과의 객관성을 높이는 동시에 자료가 누적될수록 처리 효율과 비교 가능성을 함께 높이는 기반이 될 수 있음
- 또한 지층 해석에 그치지 않고 탄성파 해양학 자료의 특성 분석과 전처리, 해양 물리 자료와의 연계 분석을 단계적으로 수행하여 북극해 물성 정보까지 도출할 수 있는 AI 기술로 확장하고자 함. 이를 통해 해저 지층과 수층을 분리된 자료가 아니라 하나의 연속된 관측 대상으로 다룰 수 있는 분석 체계를 마련할 수 있음
- 나아가 최종적으로는 지층 시계열 변화, 가스 하이드레이트 영역 변화, 수층 환경 변화 탐지 가능성까지 검토함으로써 AI 기반 자료분석 체계가 단순한 자동화 도구를 넘어 북극해 환경 모니터링과 기후변화 연구를 지원하는 기술 기반으로 작동하도록 하고자 함
- 이러한 접근은 북극해 취득 자료의 분석 신뢰도를 높이고 과거 자료와의 비교를 가능하게 하며, 향후 시계열 모니터링 자료 취득과 환경변화 감시체계 구축에도 활용될 수 있다는 점에서 의미가 큼



## 다. 최종 연구 성과물

- 프론티어 해역 해저지질정보·지도 산출물
  - 프론티어 해역에서 확보한 지구물리자료·지질시료·해양시료 기반의 누적 데이터셋(정점/측선/시료 포함)
  - 정밀 해저지형, 천부 및 심부 지질구조, 저질 정보를 포함하는 탐사구역별 종합 해저지질도
- 정보체계(플랫폼) 산출물
  - 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계(신규 플랫폼) 구축 및 데이터셋/레이어 갱신 체계 확립
- 기술/협력 성과물
  - EEZ 진입을 포함한 전략적 국제공동탐사 2건 이상
  - 빙권해역 특화 해저탐사 원천기술 확보 및 관련 특허 10건 이상
  - 극지 실무형 전문인력 양성 10명 이상 및 성과확산 30건 이상

## 라. 연차별 연구목표와 주요 내용

<표 3-7> 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 연차별 연구목표, 내용

| 연도             | 연구목표                                 | 주요연구내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년<br>(2027년) | 기반확보·초기 프론티어 진출<br>(척치고원·동시베리아해 북단)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 척치고원·동시베리아해 북단 프론티어 해역 탐사 착수</li> <li>• 미국 해군연구소와의 국제공동연구를 통한 미국 알래스카 보퍼트해 해저영구동토층 탐사 수행</li> <li>• 기존 자료 공백·편중성 진단을 통해 우선순위 해역·핵심 구간 도출, 공해상 중심 기초자료 확보 개시</li> <li>• 해저지질정보체계 플랫폼 및 AI 기반 데이터 큐레이션 개발 착수</li> <li>• ROV·CSEM·3D 탄성파 구축 및 운용기술 확보 착수, AI 기반 자료분석 기술 개발 착수</li> </ul> |
| 2차년<br>(2028년) | 탐사확대·정보체계 고도화<br>(보퍼트해 대륙붕 포함)       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 보퍼트해 대륙붕 및 프론티어 해역 탐사 확대</li> <li>• 플랫폼 개발 지속 및 AI 큐레이션 고도화, 자료 적용·활용성 진단</li> <li>• 첨단 장비 운용성 점검 및 자료 품질관리 체계 강화</li> </ul>                                                                                                                                                          |
| 3차년<br>(2029년) | 광역탐사·종합해석 전환<br>(중앙북극해 진출)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙북극해 광역 탐사 수행, 지질시료·지구물리자료 본격 분석 착수</li> <li>• 탐사구역별 해저지질도 작성 및 종합 해석 착수</li> <li>• 원시-처리-해석 결과 연계 빅데이터 구축 착수</li> <li>• 구조 정밀해석 심화 및 AI 적용 범위 확대</li> </ul>                                                                                                                         |
| 4차년<br>(2030년) | 차세대 쇄빙연구선 연계·고위도 확대<br>(2단계 전환)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 차세대 쇄빙연구선 기반 고위도 장거리/장기 탐사 수행, EEZ 국제공동연구 연계 확대</li> <li>• 3D 기반 지질도·종합 해석 범위 확장 및 정밀도 향상, 핵심 구간 구조 규명 강화</li> <li>• 3D 자료 AI 분석기술 확보 및 플랫폼 3D 대응 고도화</li> </ul>                                                                                                                      |
| 5차년<br>(2031년) | 해저지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 및 해저지질도 고도화 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3차원 해저지질구조 정밀해석 및 지질도/종합해석 최종본 확정</li> <li>• 해저지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 완성 및 상시운영 체계 확립</li> <li>• 지질·환경·항로·자원 등 전략적 활용 체계화</li> </ul>                                                                                                                                                     |

## 마. 기대효과 및 활용방안

### □ 기대효과

- (데이터 주권/전략자산) 프론티어 해역 실측 데이터의 독자 확보와 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 통해, 국가 전략자산형 데이터셋으로의 전환 가능
- (해양과학영토 확장) 중앙북극해 등 고위도 프론티어 진출과 차세대 쇄빙연구선 활용 극대화를 통해 국제공동연구 선도 기반을 확보하고 거버넌스 주도권(First mover) 확보 가능성 향상
- (기술자립/운용효율) ROV·고해상 3D 탄성파·AI 기반 분석 등 극한지 맞춤형 탐사기술의 실증·내재화를 통해 차세대 쇄빙연구선 운용과 연계한 기술자립 기반 구축

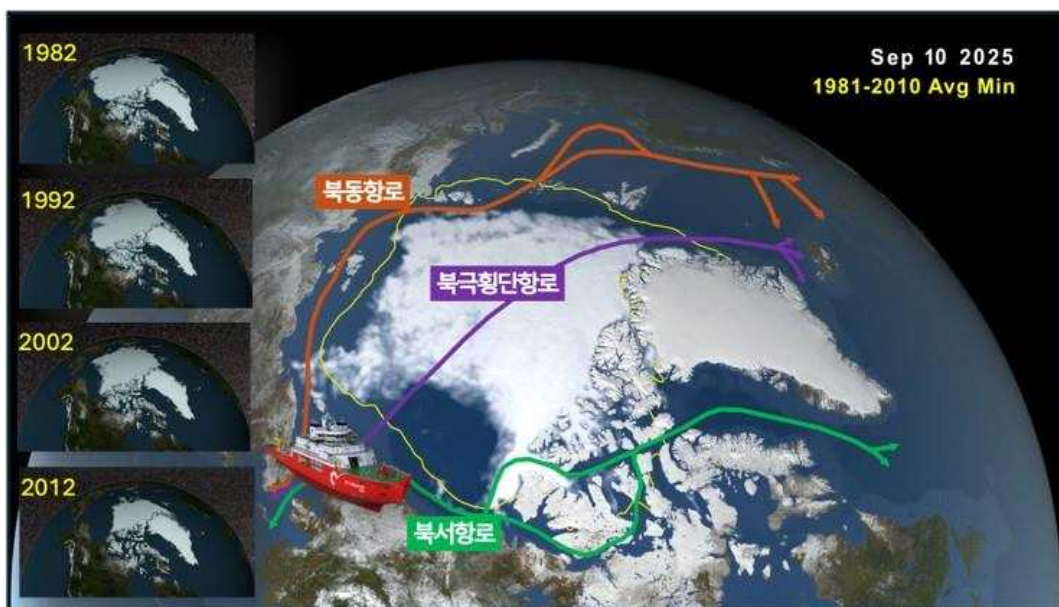
### □ 활용방안

- (항로/안전) 해저지형·천부지층·지반 안정성 관련 자료를 기반으로 북극항로 운항 안전정보 제공 및 항로 안전성 평가의 기초자료로 활용
- (정책/전략) 기후위기 대응과 북극정책 수립에 필요한 과학적 근거자료를 제공하고 국제협력 협상에서 활용 가능한 기반 데이터로 활용
- (국가안보/방위산업) 해저 저질 및 지음향 정보 등은 국가안보·방위산업 활용이 가능한 핵심 데이터로 확장될 수 있어 향후 부처 간 공동활용의 기반으로 활용

## 2. [중점분야 2] 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사

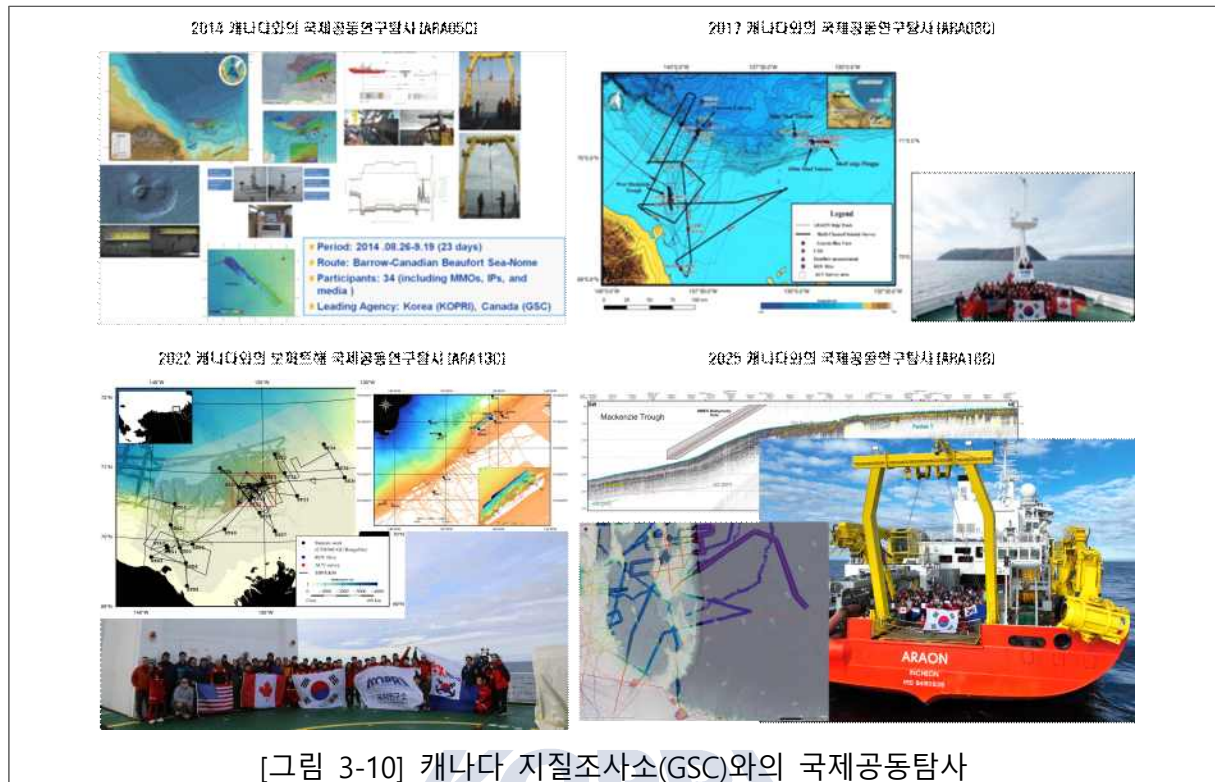
### 가. 연구의 배경 및 필요성

- 북서항로(Northwest Passage, NWP) 활용 가능성 확대에 대한 지구물리 근거자료 확보 필요
- 해빙 감소와 계절적 개방 기간 확대는 북서항로의 실질적 활용 가능성을 높이고 있으나, 해당 해역은 섬과 해협이 복잡하게 분포하고 수심 변화가 큰 구간이 많으며, 빙성 기원의 해저지형이 발달할 가능성도 있어 해저지형과 천부지층 정보의 중요성이 매우 큰 해역임
- 북서항로의 개척은 단순히 통과 가능한 항로선을 정하는 문제에 그치지 않음. 실제로는 운항이 가능한 수심과 폭, 선박 제약 조건을 만족하는 구간의 도출, 해저 장애물과 천부 위험요소의 식별, 지반 안정성 검토, 위험 저감형 대안 구간 검토와 운항 가이드라인 마련이 함께 이루어져야 실효성을 가질 수 있음
- 따라서 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사는 해저지형과 천부지층 정보를 객관적으로 확보하여 운항 안전성 판단에 필요한 기본 근거자료를 마련하고 향후 추가 조사와 후속 해석의 기준이 되는 기초 자료체계를 구축하는 방향으로 추진될 필요가 있음
- 특히 북서항로 관련 해역의 기초 자료는 향후 항로 운영 안전성 검토, 추가 정밀조사 대상 선정, 항만 및 보급 거점과의 연계 검토, 국제공동연구 확대를 위한 기반으로 활용될 수 있다는 점에서 초기 단계의 자료 확보가 중요함



[그림 3-9] 북극항로 모식도

- 캐나다와의 국제공동탐사는 북서항로 핵심 구간 접근과 자료 축적의 실효성을 높이는 필수 조건
- 북서항로는 캐나다 연안국 관할 해역을 포함하고 있으며, 탐사 허가, 운용 안전, 자료 공유, 성과 활용까지 연안국과의 협의가 필요한 구간이 많아 단독 탐사만으로는 핵심 해역 접근과 자료 연계에 한계가 있을 수 있음
- 특히 본 과제의 핵심은 지구물리탐사를 통해 기본 자료를 확보·축적하고 이를 바탕으로 항로 안전성과 관련된 위험요소 후보를 도출하는 데 있음. 따라서 대상 구간 선정, 탐사 수행, 결과 검토까지 포함하는 공동탐사 체계가 함께 마련되어야 함
- 극지연구소는 캐나다 지질조사소(GSC) 등 캐나다 측 기관과 다년간 북극 현장 탐사와 자료 기반 공동연구를 수행해 오면서 협력 채널과 실무 운영 경험을 축적해 왔음. 이를 바탕으로 본 과제에서도 공동탐사, 공동성과 확산으로 이어지는 지속 가능한 협력체계를 유지·확대할 수 있음
- 특히 GSC는 본 사업의 해양수산부 연구개발사업 신청에 대한 지지 의사를 표명하였으며, 기존 캐나다 보퍼트해 공동연구 성과를 바탕으로 캐나다 북극해와 북서항로를 포함한 후속 공동조사 확대 가능성을 보다 구체화하고 있음. 이는 본 과제가 단순한 협력 희망 수준이 아니라, 북서항로 관련 핵심 해역 조사에 대해 연안국 핵심 연구기관의 공감과 협력 기반을 이미 확보하고 있음을 보여주는 점에서 의미가 큼
- 이러한 협력체계는 탐사 구간 선정과 허가·운용 리스크를 낮추고 자료 축적과 성과확산의 실효성을 높이는 데 핵심 역할을 할 수 있음
- 따라서 본 중점분야에서 추진하는 GSC 공동연구 기반 지구물리탐사는 기존 협력 채널과 현장 경험을 바탕으로 북서항로 관련 해역에서의 단계적 국제공동탐사를 실질화할 수 있다는 점에서 추진 타당성이 높음
- 또한 이를 통해 확보되는 해저지형과 천부지층 자료는 항로 안전성 검토의 기초자료로 활용될 뿐 아니라, 향후 차세대 쇄빙연구선과 연계한 고위도 구간 확장 탐사와 후속 국제 공동연구를 위한 기준자료로도 활용될 수 있음
- 결국 본 과제에 대한 해양수산부의 지원은 단순한 탐사 수행 지원을 넘어, 북서항로 핵심 구간에 대한 국제협력 기반 선점, 자료 축적 주도권 확보, 향후 정책·연구·산업에 활용이 가능한 기초자료의 선제적 확보라는 측면에서 필요성이 큼



- 북서항로 개척을 위한 기본 해저지형·천부지층 자료의 확보와 축적 체계 확립 필요
- 북서항로 관련 해역은 수심 변화가 크고 빙성 지형의 흔적이나 미세지형 요소가 남아 있을 가능성이 있어, 운항 안전성 검토의 출발점은 MBES 기반의 정밀 수심·해저지형 자료 확보라고 할 수 있음
- 또한 천부 위험요소는 SBP를 통해 판독 가능한 경우가 많기 때문에 MBES와 SBP를 결합한 탐사를 통해 해저지형과 천부지층 특성을 함께 확보하는 것이 효과적임. 이러한 자료는 향후 위험요소 후보 구간을 식별하고 추가 조사의 우선순위를 정하는 데에도 중요한 기준이 될 수 있음
- 따라서 본 중점분야는 MBES와 SBP 중심의 지구물리탐사를 수행하여 대상 해역의 기본 자료를 선점·축적하고 이를 향후 단계적 확장과 후속 정밀조사로 연결할 수 있는 기반으로 구축하고자 함
- 나아가 초기 단계에서 확보된 기본 해저지형·천부지층 자료는 북서항로 관련 해역에 대한 해저지질도 작성, 위험구간 검토, 추가 관측 설계, 국제공동탐사 대상 구간 선정 등 후속 연구 전반을 뒷받침하는 기준자료로 기능할 수 있다는 점에서 조기 확보의 필요성이 큼

## 나. 연구목표 및 내용

| 중점분야               | 핵심항목                   | 아라온호 활용 연구            |                          |                         | 차세대 쇄빙선 활용 연구                 |                                            |
|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
|                    |                        | 1단계('27-'29)          |                          |                         | 2단계('30-'31)                  |                                            |
|                    |                        | 27년도                  | 28년도                     | 29년도                    | 30년도                          | 31년도                                       |
| 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 | 북서항로 개척을 위한 해저지질 정보 확보 | 북서항로 개척을 위한 사전연구 및 협의 | 캐나다 지질조사소(GSC)와의 지구물리 탐사 | 최악의 북서항로 도출을 위한 해저지질 해석 | 차세대 쇄빙선연구선을 활용한 북서항로 개척 방안 연구 | 차세대 쇄빙선연구선을 활용한 북서항로 사:GSC와의 2차 지구물리탐사 계획안 |

[그림 3-11] 중점분야 2 로드맵

### 1) 연구목표

#### □ 최종연구목표

- 캐나다 지질조사소(GSC)와의 지구물리탐사 공동연구를 통한 북서항로 개척 기반 마련
  - 북서항로 관련 해역에서 아라온호를 활용한 MBES-SBP 중심의 지구물리탐사를 수행하여 해저지형과 천부지층에 대한 기본 자료를 확보·축적하고자 함
  - 확보된 자료를 바탕으로 항로 안전성과 관련된 위험요소 후보를 도출하고 향후 차세대 쇄빙연구선과 연계한 후속 탐사가 가능하도록 기초자료와 추진 여건을 마련하고자 함
  - 궁극적으로는 북서항로 관련 핵심 해역에 대한 과학적 근거를 축적하여 향후 항로 안전성 검토와 추가 탐사, 국제협력 확대의 기반을 확보하는 것을 목표로 함

#### □ 분야별 세부목표

- 북서항로 관련 해역 지구물리탐사 수행을 위한 기본 체계 구축
  - 대상 해역의 조사 필요성과 접근 여건을 종합적으로 검토하고 탐사 구간 선정부터 자료 취득, 현장 확인, 결과 정리까지 이어지는 단계별 추진체계를 마련함
  - 탐사 과정에서 확보되는 자료의 현장 확인 기준과 보완이 필요한 구간을 도출하는 절차를 마련하여 후속 연차 탐사와 자연스럽게 연계될 수 있는 운영 기반을 구축함
  - 이를 통해 북서항로 관련 지구물리탐사가 일회성 조사에 머물지 않고 연차별로 자료를 보완하고 확장할 수 있는 구조를 갖추도록 함
- 캐나다 GSC와의 국제공동 지구물리탐사 수행 및 자료 검토 체계 확립
  - 기존 북극 현장조사 경험과 협력 기반을 바탕으로, 탐사 수행, 자료 확인, 결과 검토를 함께 추진할 수 있는 실무 협력체계를 보다 구체화함
  - 국제공동탐사를 통해 확보된 자료에 대해 결과 검토를 함께 수행함으로써 자료의 신뢰도를 높이고 후속 활용성과 국제협력의 실질성을 강화함

- 이를 통해 단순한 협력 관계를 넘어, 북서항로 관련 핵심 해역에서 지속 가능한 탐사 협력 기반을 마련함

○ MBES·SBP 자료 해석을 통한 해저지형·천부지층 기반 위험요소 후보 도출

- MBES 자료를 활용하여 수심 변화, 급경사 지형, 장애물 가능 구간 등 운항 및 탐사 과정에서 주의가 필요한 지형 요소를 체계적으로 정리함
- SBP 자료를 통해 천부층서의 연속성, 매물 구조, 연약지반 가능 구간, 천부 이상징후를 판독하고 이를 MBES 결과와 연계하여 주의 구간을 도출함
- 이를 통해 북서항로 관련 해역의 해저지형과 천부지층 특성을 보다 객관적으로 파악하고 향후 추가 조사의 우선순위를 정할 수 있는 근거를 마련함

○ 차세대 쇄빙연구선 연계 기반의 후속 탐사 계획 수립 및 추진

- 1단계 탐사 결과를 바탕으로 고위도 구역 확장 가능 후보지를 도출하고 조사 우선순위와 접근 여건을 종합적으로 검토함
- 차세대 쇄빙연구선의 운용 범위와 장기 항해 여건을 반영하여 후속 탐사 대상 구간, 목표, 준비 절차를 구체화함
- 이를 통해 북서항로 관련 탐사가 단기 성과에 머무르지 않고 차세대 쇄빙연구선 활용 단계까지 이어질 수 있는 중장기 추진기반을 마련함

□ 연차별 목표

○ 1차년(2027): 사전연구 및 협의 기반 구축

- 북서항로 관련 해역의 기존 자료와 탐사 여건을 검토하여 우선 조사 대상 구간 후보를 도출하고 탐사 설계의 기본 방향을 마련함
- 캐나다 GSC와의 사전 협의를 통해 국제공동탐사 추진을 위한 실무 협력 기반과 연구체계를 정비함
- 또한 조사 대상 해역의 접근성, 자료 공백, 운항상 주의요소를 함께 검토하여 후속 탐사의 준비 수준을 높임

○ 2차년(2028): 캐나다 GSC와 국제공동 지구물리탐사 수행

- MBES·SBP 탐사를 수행하여 핵심 해저지형과 천부지층 자료를 확보함
- 확보된 자료를 바탕으로 해저저질 통합해석의 기초자료를 마련하고 추가 보완이 필요한 구간을 도출함
- 이 단계에서는 실제 자료 확보와 동시에 현장 운용 경험을 축적하여 이후 연차 탐사의 효율성을 높임

○ 3차년(2029): 최적 북서향로 도출을 위한 해저지질 통합해석

- MBES와 SBP 자료를 연계 해석하여 구간별 해저지형과 천부지층 특성을 종합 정리하고 주의가 필요한 구간과 추가 확인이 필요한 구간을 도출함
- 1단계 탐사 결과를 바탕으로 향후 고위도 진출 가능 후보지를 검토하고 후보지별 조사 필요성과 접근 여건을 비교·정리함

○ 4차년(2030): 차세대 쇄빙연구선 연계 후속 탐사 추진 방안 정리

- 차세대 쇄빙연구선의 운용 특성과 고위도 접근 여건을 반영하여 후속 지구물리탐사 수행방안을 구체화함
- 기존 탐사에서 확인된 자료 공백 구간과 보완이 필요한 구간을 정리하고 우선 조사 후보지와 추진 절차를 마련함
- 이를 통해 차세대 쇄빙연구선이 실제 투입되는 시점에 맞추어 탐사 범위와 목표를 구체적으로 연결할 수 있도록 준비함

○ 5차년(2031): 차세대 쇄빙연구선 활용 GSC 2차 지구물리탐사 계획 및 추진

- 전 단계 성과를 반영하여 GSC와의 2차 공동탐사 대상 구간, 목표, 역할 분담, 자료 공유 및 결과 검토 계획을 확정함
- 해역 여건과 협의 결과가 충족될 경우 고위도 후보지를 포함한 2차 공동탐사에 착수하여 후속 확장 기반을 확보함
- 이를 통해 북서향로 관련 탐사를 1단계 결과 정리에 그치지 않고 고위도 확장 탐사로 이어지는 구조로 발전시킴

## 2) 연구내용

### □ MBES 기반 해저지형 자료 확보 및 기본 지형 특성 도출

○ 대상 구간 선정 및 탐사 설계

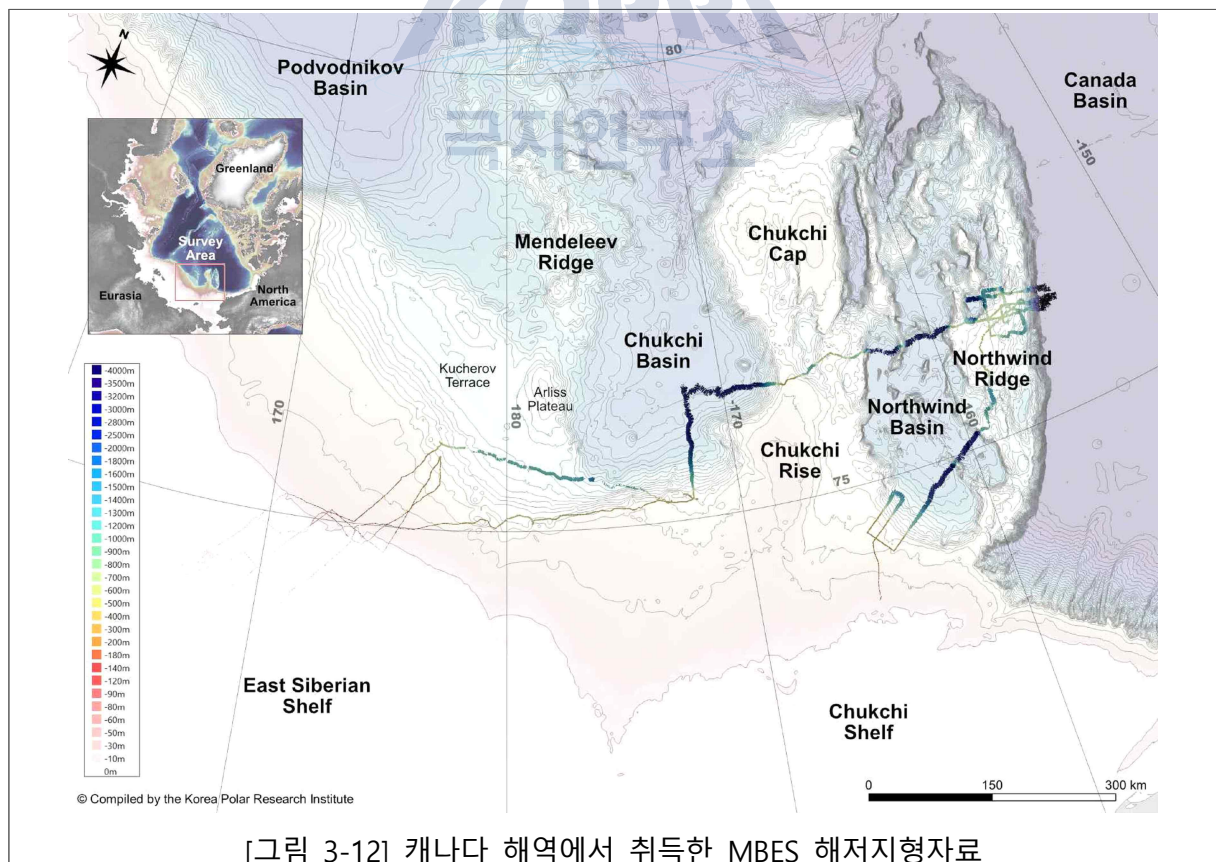
- 대상 구간을 선정하고 운항 안전과 직접 연결되는 관측요소인 수심 변화, 급경사 지형, 장애물 가능 구간 등을 중심으로 탐사 설계를 수립함
- 탐사 설계 단계에서는 기존 자료의 해상도와 품질을 검토하고 자료 공백 구간과 주의가 필요한 지형 요소를 우선적으로 반영하여 조사 효율을 높이도록 함
- 이를 통해 조사 범위를 무리하게 넓히기보다, 향로 안전성과 후속 활용 가능성을 고려한 우선 조사구간 중심의 설계를 마련함

○ MBES 자료 확보 및 기본 지형 특성 도출

- MBES를 활용하여 기본 수심과 해저지형 자료를 확보하고 급경사 구간, 지형 급변 구간, 장애물 가능 구간 등 위험요소 후보를 1차적으로 도출함
- 현장에서 자료의 커버리지와 품질 상태를 확인하여, 결측이나 잡음이 큰 구간을 식별하고 보완이 필요한 구간을 다음 연도 탐사 설계에 반영함
- 확보된 MBES 자료는 단순한 수심 자료를 넘어, 항로 안전성 검토와 후속 천부지층 조사 설계의 기초자료로 활용함

○ 해저지형 결과 정리 및 위험요소 후보 도출

- 확보된 수심과 해저지형 자료를 구간별로 정리하고 장애물 가능 구간, 급경사 구간, 빙성 지형 흔적 가능 구간 등 위험요소 후보를 도출함
- 이러한 결과는 후속 천부지층 해석과 연계하여 주의구간과 보완 필요 구간을 식별하는데 활용함
- 궁극적으로는 북서항로 관련 해역의 해저지형 특성을 체계적으로 정리하여 후속 탐사와 위험요소 검토의 기초자료로 활용함



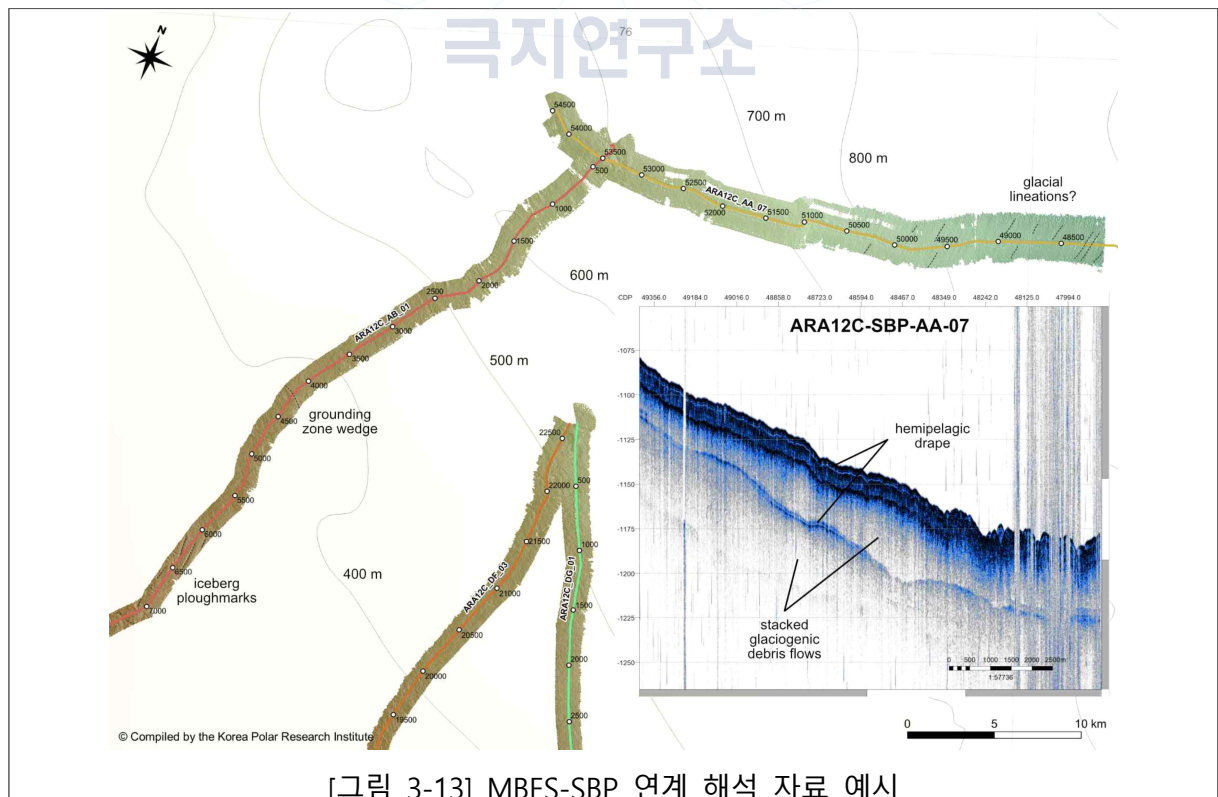
## □ SBP 기반 천부지층 자료 확보 및 천부 위험구조 해석

### ○ SBP 자료 확보 및 천부층서·매물 구조 해석

- SBP를 활용하여 천부층서의 연속성, 매물 구조, 연약지반 가능 구간, 천부 이상징후 등을 판독하고 MBES 기반 해저지형 자료와 함께 위치와 범위를 해석함
- 특히 천부지층 자료는 단순한 층서 파악을 넘어, 운항상 주의가 필요한 구간이나 추가 조사가 필요한 구간을 식별하는 데 중요한 정보를 제공함
- 이를 통해 북서항로 관련 해역에서 MCS만으로는 확인하기 어려운 천부 위험구조를 정밀하게 파악할 수 있도록 함

### ○ MBES-SBP 연계 해석을 통한 주의 구간 도출

- MBES와 SBP에서 판독된 이상대를 함께 검토하여 주의가 필요한 구간과 추가 확인이 필요한 구간을 정리함
- 이를 통해 해저지형 변화와 천부지층 특성을 함께 고려하여 입체적인 위험구간 판단이 가능해지도록 함
- 나아가 이러한 결과는 향후 추가 조사의 우선순위 설정과 후속 탐사 설계의 근거자료로 활용



[그림 3-13] MBES-SBP 연계 해석 자료 예시

## □ 캐나다 GSC 공동연구를 통한 지구물리탐사 수행 및 체계 확립

- GSC의 LOI는 본 사업을 통해 캐나다 북극해에서의 추가 지구물리탐사 확대와 북서항로를 포함한 협력 가능성에 대해 긍정적 의향을 제시하고 있어 본 과제의 탐사 체계를 제도적·실무적으로 뒷받침하는 중요한 외부 기반으로 작용함
- 이에 따라 본 사업은 기존 보퍼트해 공동연구 경험을 바탕으로 MBES·SBP 중심의 공동탐사를 수행하고 이후 고위도 후보지 확장과 2차 공동탐사 계획 수립으로 연계하고자 함
- 사전 협의 및 탐사 설계
  - 대상 구간 선정, 운용 안전 및 허가 관련 협의, 자료 공유 범위와 결과물 작성 방식에 대한 사전 협의를 수행함
  - 또한 탐사 설계 원칙과 현장 자료 확인 기준을 함께 조율하여 공동탐사 준비를 완료함
- 국제공동 지구물리탐사 수행
  - GSC와 함께 지구물리탐사를 수행하여 MBES·SBP 중심의 핵심 자료를 확보하고 현장 및 후처리 단계에서 자료 품질을 점검함
  - 확보된 자료를 바탕으로 해저지형과 천부지층, 이상대 분포를 정리하고 필요한 보완 구간을 도출함
- 결과 정리 및 후속 확장 기반 마련
  - 회의와 자료 검토를 통해 구간별 해저지형과 천부지층 특성을 정리하고 자료 공백과 추가 확인 필요 구간을 도출함
  - 1단계 결과를 바탕으로 기존 조사 범위를 넘어 고위도 구역 진출 가능성이 있는 후보지를 도출하고 후보지별 조사 필요성과 접근 여건을 비교하여 후속 탐사 계획 수립의 근거로 활용함

## □ 차세대 쇄빙연구선 연계 2차 공동탐사 계획 수립 및 추진

- 결과 정리 및 후속 확장 기반 마련
  - 차세대 쇄빙연구선의 장거리·장기 운용 여건을 고려하여 MBES·SBP 중심 지구물리탐사 수행방안을 마련함
  - 1단계에서 확인된 이상대와 자료 공백 구간을 정리하고 우선적으로 보완해야 하는 구간을 검토함
  - 또한 1단계 결과를 종합하여 고위도 구역 진출 가능성이 높은 후보지를 도출하고 접근 여건과 자료 확보 필요성을 고려하여 우선 조사 후보지를 선정함

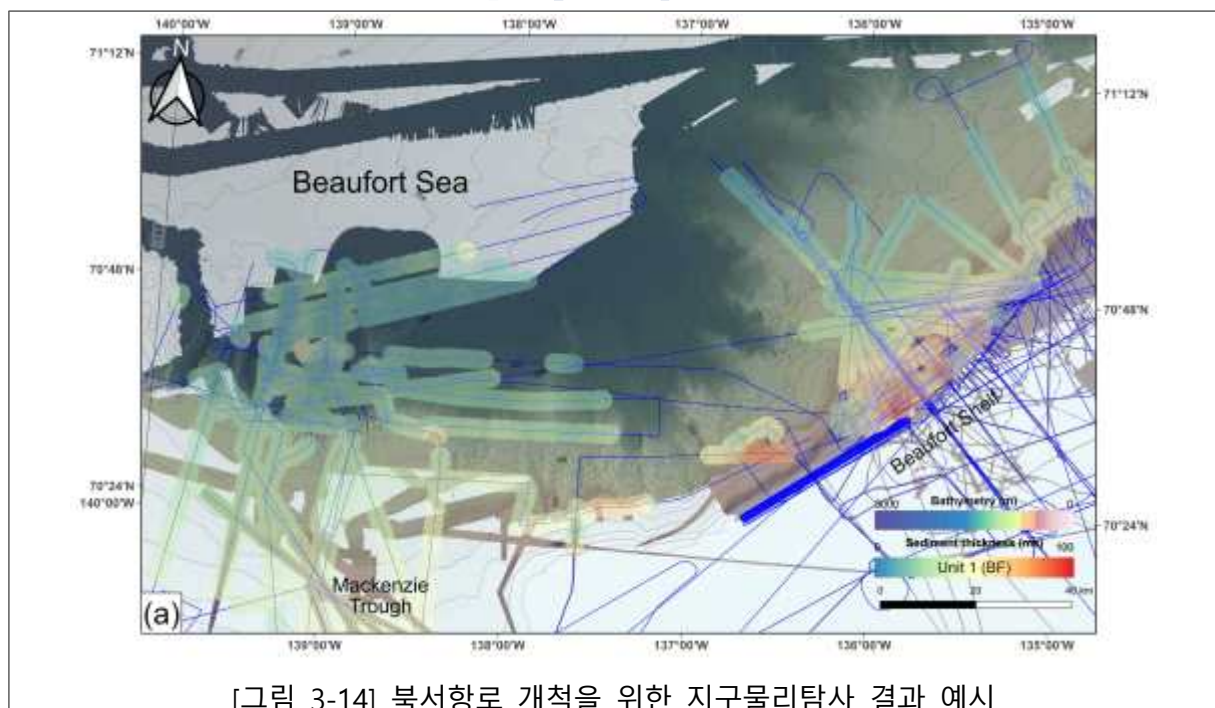
○ GSC와 2차 공동탐사 계획 수립 및 추진

- 1단계 결과와 2030년 추진방안 정리 결과를 바탕으로 후속 공동탐사 대상 구간과 목표를 확정하고 실행 계획을 수립함
- 계획 수립에 그치지 않고 GSC와의 협의 및 준비 절차(운용, 허가, 자료 공유, 결과 검토)를 추진하여 해역 여건과 협의 결과가 충족될 경우 공동탐사에 착수함
- 이를 통해 북서항로 관련 해역의 자료 축적을 일회성 조사에서 끝내지 않고 차세대 쇄빙연구선과 연계한 확장 단계로 발전시키고자 함

## 다. 최종 연구 성과물

□ 북서항로 개척 지구물리탐사 산출물

- 아라온호 MBES 기반 수심·지형 자료(구간별 정리) 및 지형 급변/급경사/장애물 가능 구간 등 위험요소 후보 목록
- SBP 기반 천부층서 연속성, 매물 구조, 연약지반 가능 구간, 천부 이상징후 해석 결과 및 MBES와 결합한 주의 구간 정리 결과
- 1단계 탐사 결과를 바탕으로 도출된 고위도 우선 조사 후보지 목록 및 후보지별 조사 필요성 정리



## 라. 연차별 연구목표와 주요 내용

<표 3-8> 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 연차별 연구목표, 내용

| 연도             | 연구목표                               | 주요연구내용                                                                                                                                                                               |
|----------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년<br>(2027년) | 사전연구 및 협의 기반 구축                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상 구간 후보 선정 및 탐사 설계 수립</li> <li>• 캐나다 GSC와 공동탐사 추진 협의 및 실무 채널 운영</li> <li>• 현장 자료 확인 기준 마련 및 차년도 탐사 준비</li> </ul>                           |
| 2차년<br>(2028년) | 캐나다 GSC와 국제공동 지구물리탐사 수행            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GSC와 국제공동 지구물리탐사 수행</li> <li>• MBES 기반 기본 수심·지형 자료 확보 및 1차 이상 대 도출</li> <li>• SBP 기반 천부층서/천부 이상대 판독</li> </ul>                              |
| 3차년<br>(2029년) | 최적 북서항로 도출을 위한 해저지질 통합해석           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MBES-SBP 연계 해석을 통한 주의 구간/추가 확인 구간 정리</li> <li>• 구간별 해저지형·천부지층 특성 분석 및 보완 구간 도출</li> <li>• 1단계 결과 기반 고위도 구역 진출 후보지 도출 및 조사 필요성 비교</li> </ul> |
| 4차년<br>(2030년) | 차세대 쇄빙연구선 기반 북서항로 개척방안 연구          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 차세대 쇄빙연구선 운용 여건을 반영한 지구물리 탐사 수행방안 마련</li> <li>• 고위도 우선 조사 후보지 선정 및 수행계획 구체화</li> </ul>                                                      |
| 5차년<br>(2031년) | 차세대 쇄빙연구선 활용 GSC 2차 지구물리탐사 계획 및 추진 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GSC와 2차 공동탐사 실행 계획 수립</li> <li>• 고위도 후보지 포함 조사 구간 확정 및 준비 절차 추진</li> <li>• 여건 충족 시 2차 공동탐사 착수</li> </ul>                                    |

## 마. 기대효과 및 활용방안

### □ 기대효과

- (기본자료 선점) MBES-SBP 기반 지구물리탐사를 통해 북서항로 관련 해역의 해저지형·천부지층 기본 자료를 확보·축적하고 주의 구간을 체계적으로 도출
- (독자 수행 기반) 아라온호 기반 탐사 수행 경험을 축적하여 향후 차세대 쇄빙연구선 연계 탐사 확장에 필요한 수행 기반을 마련
- (국제협력 강화) GSC와 공동탐사·공동 검토를 통해 접근성·자료 연계·성과 활용성을 높이

고 후속 공동탐사로 이어지는 협력 기반을 강화

□ 활용방안

- (정책/협력) 북서항로 관련 해역의 지구물리 자료를 국제협력 협상 및 공동연구 확장 근거로 활용
- (연구/인프라) 중점분야 1 정보체계와 연계하여 후속 진단/평가 연구의 기초자료로 활용
- (산업) 운영 리스크 저감형 사전검토 자료로 활용 가능

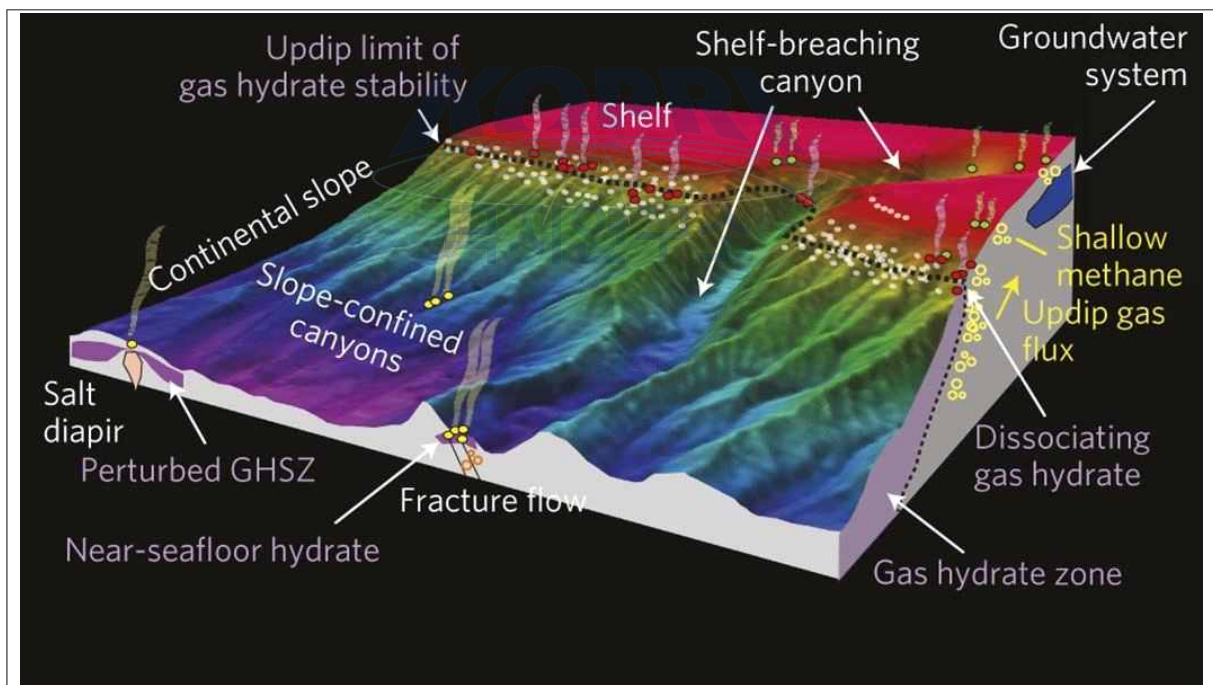


### 3. [중점분야 3] 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단

#### 가. 연구의 배경 및 필요성

##### □ 해저영구동토층·가스하이드레이트 해리와 북극발 기후리스크

- 북극 온난화가 가속화되면 해저영구동토층 및 가스하이드레이트의 안정성이 약화되고 이에 따라 해리, 메탄 방출, 해저지형 변화, 지반 안정성 저하 등이 복합적으로 나타날 수 있음. 특히 북극 대륙붕은 해저영구동토층과 가스하이드레이트가 넓게 분포하는 구간으로 기후변화에 따른 반응을 관측 및 분석할 필요성이 큼
- 따라서 단순히 메탄 방출구조의 존재를 확인하는 수준을 넘어 방출구조의 활동성, 지질구조 변화, 해저환경 변동 간의 연계를 정밀하게 규명해야 함. 이는 기후위기 대응뿐 아니라 해저지질 안정성과 재난·안전 관점의 위험도 평가 기반 마련에도 직접 연결됨



[그림 3-15] 가스하이드레이트 해리에 따른 메탄 이동 및 방출(Skarke et al., 2014)

##### □ 시계열 관측과 고정밀 이미징 기반 구축 필요

- 가스하이드레이트 분포가 확인된 척치고원과 해저영구동토층이 분포하는 보퍼트해 대륙붕은 북극 해저지질환경 변동성을 대표적으로 보여주는 핵심 해역으로 반복적인 지구물리탐사를 통해 구조와 특성의 변화를 직접 추적할 필요가 있음
- 이를 위해서는 고도화된 다중반사 제거, 잡음 제거, 고정밀 속도 모델링, 심도변환, 3차원

구조 해석 등 처리·이미징 역량이 필수적이며, 천부 구조, 유체 이동 경로, 단층·층서 연속성, 해저면과 천부지층의 미세 변화까지 함께 살펴보아야 함. 이를 통해 단순 탐지 수준을 넘어 정밀진단 수준의 결과를 확보할 수 있음

#### □ 메탄 방출 기작 규명과 지화학·미생물 연계 분석 필요

- 해저 메탄 방출은 지하 구조, 유체 이동, 산화·확산 과정, 미생물 작용이 함께 작동하는 복합 현상이므로, 지구물리 탐사만으로는 방출 기작과 규모를 충분히 설명하기 어려움. 따라서 신규 메탄 방출구조에 대해서는 메탄 기원 추적, 공극수와 퇴적물 지화학 분석, 메탄산화 미생물 군집 및 활성 분석이 함께 수행되어야 하며, 시계열 관측과 연계한 생지화학적 특성 변화 진단이 필요함
- 특히 방출 규모를 객관적으로 제시하기 위해서는 현장관측 기반 메탄 방출 플럭스 DB 구축이 필요하고 단기 방출 시나리오를 제시하기 위해 기포 이동과 확산, 반응·수송 과정을 포함하는 모델링 기반이 함께 마련되어야 함

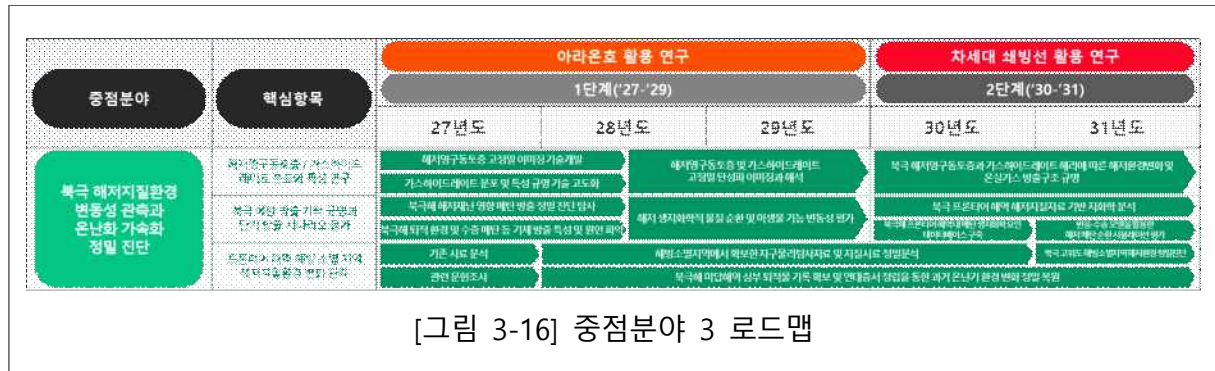
#### □ 수층 구조·해양환경 변화와 메탄 이동 연계 진단 필요

- 북극 해저에서 방출된 메탄은 해저면에서 끝나는 것이 아니라 기포 상승, 용존 상태 이동, 수층 내 확산 과정을 거쳐 해양환경과 상호작용함. 따라서 메탄 방출의 영향과 확산 범위를 평가하기 위해서는 해저 지층뿐 아니라 수층 구조와 해양환경 변화도 함께 고려할 필요가 있음
- 수온, 염분, 산소, 수층 안정도와 같은 해양환경 요인은 메탄의 이동 경로와 용해율, 표층 도달 가능성에 영향을 줄 수 있으므로 지구물리탐사, CTD 등 해양관측, 메탄 플럭스 측정 결과를 연계하여 해석해야 함. 이러한 접근은 북극 해저지질환경 변동성을 단순한 지층 변화가 아니라 해저-수층 연계 시스템으로 진단하는 데 중요한 기반이 됨

#### □ 북극해 특이구조 기반 정밀관측 확대 필요

- 해저진흙화산, 핑고 분출 흔적 구조 등은 해저영구동토층 붕괴, 유체 이동, 메탄 방출, 지반 변화가 집중적으로 나타나는 대표적 현장 지시자로서, 해저환경 변동의 징후를 구조적으로 해석하는 데 중요한 근거를 제공함. 보퍼트해 미탐사 해역에 대한 자료 확보와 해저영구동토층 정밀탐사를 병행하면서 이러한 특이구조의 형태, 분포, 활동성을 반복적으로 관측할 경우, 해저환경 변화의 공간적·시간적 특성을 명확하게 파악할 수 있음
- 이를 위해서는 ROV/AUV 기반 정밀관측, 해저면 영상 확보, 표적 시료 채취, 고해상도 해저지형 조사, 3차원 탄성파 기반 정밀탐사를 결합한 다중 관측 체계가 필요함

## 나. 연구목표 및 내용



### 1) 연구목표

#### □ 최종연구목표

- 첨단 해저탐사기술 기반 북극 해저지질환경 변동성 관측과 북극발 온난화 가속화 현상 정밀진단

- 첨단 해저탐사기술을 기반으로 북극 해저지질환경 변동성을 고정밀로 관측·분석하고 해저영구동토층·가스하이드레이트 해리와 메탄 방출을 중심으로 북극발 온난화 가속화 요인을 정밀진단하여 예측 근거가 되는 정량 지표, DB, 시나리오를 제시하고자 함

#### □ 분야별 세부목표

- 해저영구동토층·가스하이드레이트 분포와 특성 연구

- 해저영구동토층과 가스하이드레이트에 대한 고정밀 탄성과 이미징과 해석을 통해 분포와 특성, 그리고 시계열 변화 가능성을 규명함

- 북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가

- 메탄 방출구조의 정밀 관측, 플렉스 정량화, DB 구축, 단기 확산 시나리오 평가를 통해 기원, 확산, 영향 범위를 정량적으로 제시함
- 심부 퇴적물 기록 확보와 연대층서 정립을 통해 과거 온난기 환경 변화를 정밀 복원하고 복원 결과를 모델 시뮬레이션과 비교하여 근미래 변화 예측의 근거를 강화함

- 프론티어 해역 해빙 소멸 지역 해저지질환경 변화 관측

- 프론티어 해역 해빙 소멸지역에서 확보한 지구물리탐사자료·지질시료의 정밀분석을 통해 고위도 해저환경 변화를 진단함

## □ 연차별 목표

### ○ 1차년(2027): 기반확보·초기 프론티어 진출

- 보퍼트해 해저영구동토층과 척치고원 가스하이드레이트를 대상으로 초기 진단 대상 구간을 설정하고 시계열 관측과 정밀진단을 위한 탐사·분석 기반을 마련함
- 기존 지구물리·지화학·생물 자료를 재검토하고 우선 관측 후보지를 선정하여 후속 고정밀 이미징과 메탄 방출 진단을 위한 기초 체계를 구축함

### ○ 2차년(2028): 기술고도화·다학제 분석체계 확립

- 고도화된 탄성파 처리·이미징 기술과 생지화학·미생물 분석을 연계하여 해저영구동토층, 가스하이드레이트, 메탄 방출을 통합적으로 진단할 수 있는 분석체계를 확립함
- 메탄 플럭스, 생지화학 특성, 시계열 지구물리 자료를 연계하는 기반을 마련함

### ○ 3차년(2029): 고정밀 이미징·핵심 구간 구조 규명

- 핵심 대상 구간에 대한 고정밀 탄성파 이미징과 구조 해석을 통해 해저영구동토층 경계, 가스하이드레이트 분포, 메탄 이동 경로 및 특이구조의 공간적 특성을 정밀 규명함
- 해빙 소멸지역 장주상 시료 확보와 연대층서 정립을 본격화하여 과거 온난기 환경 복원과 시추 연계 기초자료 생산을 추진함

### ○ 4차년(2030): 고위도 정밀탐사·기작 규명 본격화

- ROV/AUV, 3D 탄성파, 지화학·미생물 분석을 결합한 고위도 정밀탐사를 통해 해리-메탄 방출-지질환경 변화의 연계 기작 규명을 본격화함
- 메탄 방출구조의 활동성·플럭스·환경영향을 정량적으로 진단할 수 있는 분석 역량을 고도화함

### ○ 5차년(2031): 관측-분석-모델 통합 및 예측근거 제시

- 시계열 관측, 고정밀 이미징, 지화학·미생물 분석, 플럭스 DB, 이동·확산 모델 결과를 통합하여 북극 해저지질환경 변동성에 대한 정량 진단 체계를 완성함
- 메탄 방출 단기 시나리오와 온난화 가속화 관련 예측근거를 제시하고 국제 DB와 국제 시추 프로그램 연계에 활용 가능한 종합 성과를 도출함

## 2) 연구내용

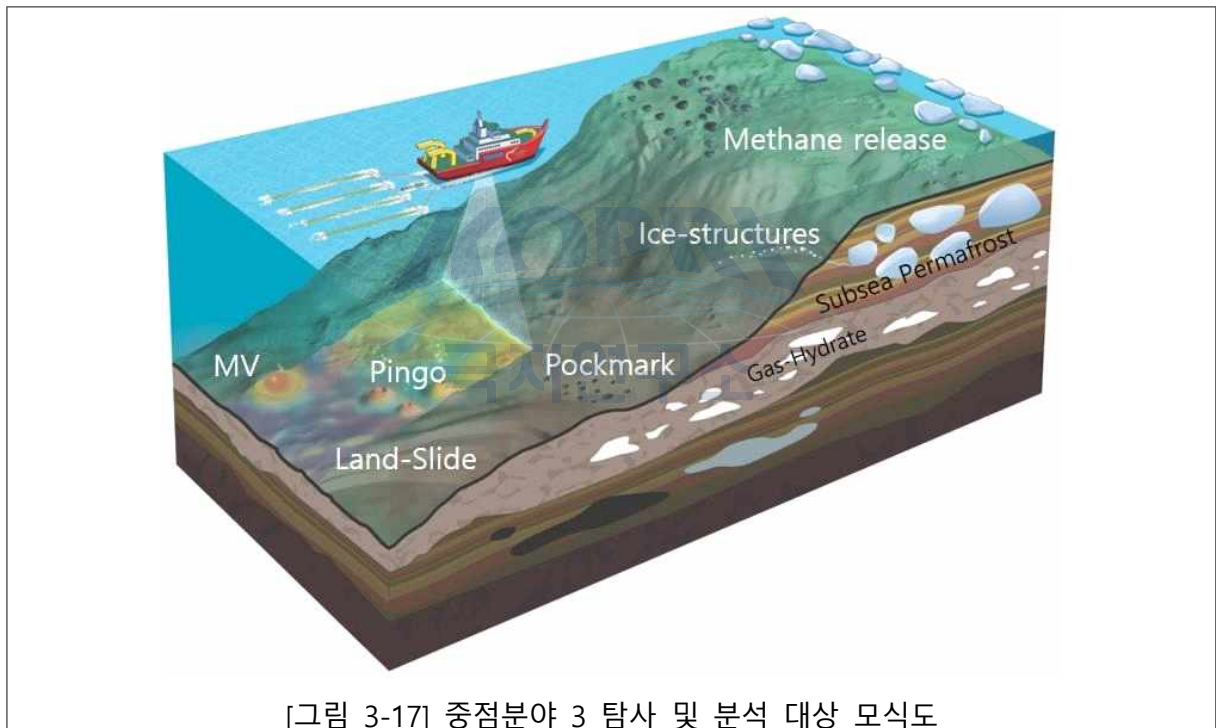
### □ 해저영구동토층·가스하이드레이트 분포와 특성 연구

#### ○ 시계열 관측 기반 지구물리탐사 수행

- 보퍼트해 대륙붕 해저영구동토층과 척치고원 가스하이드레이트를 대상으로 구조 시계열 관측을 수행하여, 경계 변화, 반사 특성 변화, 구조 변화와 같은 변동성을 진단함
- 해저진흙화산, 핑고 등 특이구조를 포함한 핵심 대상에 대해서는 ROV/AUV와 3차원 탄성파를 활용한 정밀관측을 수행하여 구조 변화와 환경 변화를 함께 파악함

○ 자료처리·이미징 기반 해석 고도화

- 시계열 자료 기반 변동성 확인을 위해 고도화된 다중반사 제거, 잡음 제거, 고정밀 탄성파 속도 모델링을 적용하여 해저영구동토층 분포와 지구물리학적 특성을 정밀 규명함
- 해저영구동토층 관련 가스하이드레이트 구조에 대한 심도 이미징을 수행하고 척치고원과 알래스카 보퍼트해 대륙붕의 가스 및 가스하이드레이트 분포·특성을 규명하여 진단의 신뢰도를 높임

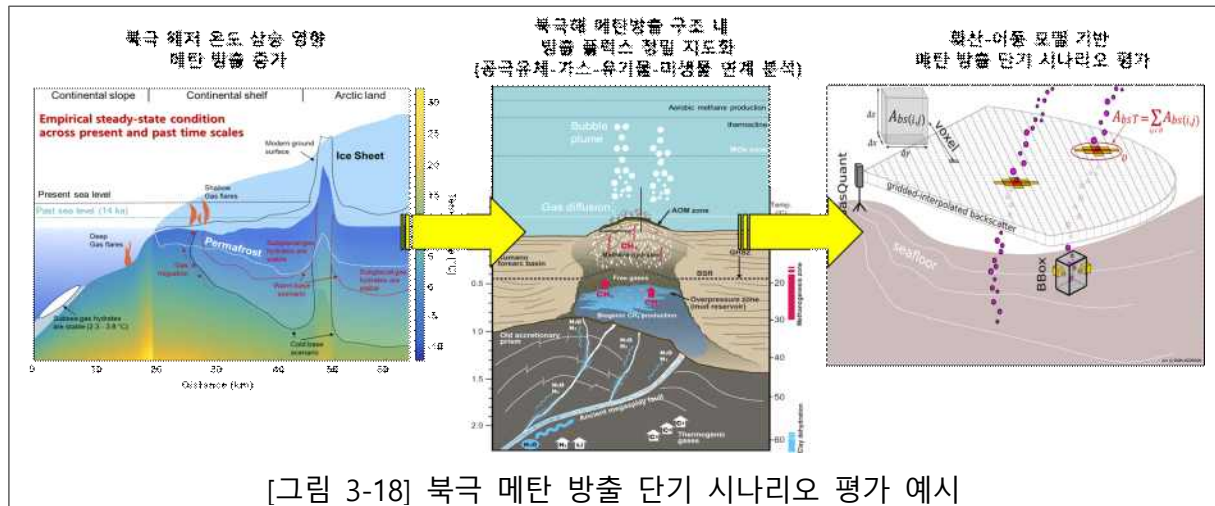


[그림 3-17] 중점분야 3 탐사 및 분석 대상 모식도

□ 북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가

○ 메탄 방출구조 기원·확산 메커니즘 규명

- 해저지질구조 변동성과 연계하여 메탄의 기원과 확산 메커니즘을 규명하고 퇴적환경 내 유기·무기 원소의 지화학적 변동성까지 포함하여 구조-환경-방출의 연계성을 해석함
- 동시베리아해에서는 대륙붕 메탄 방출구조를 ROV 및 3차원 탄성파로 정밀 관측하고 메탄 기원 추적과 확산 예측까지 연결하여 방출구조-기원-확산을 하나의 흐름으로 분석함



#### ○ 생지화학·미생물 기능 변동성 평가

- 해저 생지화학적 물질순환과 미생물 기능 변동성을 평가하여 메탄 방출의 생성·소비 과정과 환경조건의 연결고리를 정량화함
- 신규 메탄 방출구조에 대해 메탄 기원 추적과 메탄산화 미생물 연구를 수행하고 시계열 메탄 특성과 미생물 군집·활성 변화를 관측하여 변동성 진단의 해석력을 강화함

#### ○ 메탄 방출 플럭스 DB 구축 및 단기 확산 시나리오 평가

- 집중 방출 정점에 대해 플럭스를 정밀 측정하고 현장관측 기반 메탄 방출 플럭스 DB를 구축하여 방출 규모를 객관적으로 제시함
- 메탄 방출구조 중심 기포 이동·확산 모델을 구축하고 수심·수온·기포 크기·배출 농도 등을 고려한 단기 시나리오 모델링과 환경 영향 분석을 수행함
- 방출 플럭스 지도화와 확산·이동 모델 기반의 시나리오 평가를 결합하여 관측값에서 예측모델로 이어지는 검증 가능한 체계를 확립함

#### ○ 국제 DB 연계 및 국제 확산

- CASCADE와의 연계를 통해 국내 메탄 플럭스 DB를 국제 데이터와 비교 가능하게 하여 결과를 확산함
- 이를 통해 서북극 생지화학 메탄 거동과 정밀 방출량 정보를 제공하고 국제 기후평가 체계에 기여할 수 있는 데이터 기반을 마련함

#### □ 프론티어 해역 해빙 소멸 지역 해저지질환경 변화 관측

##### ○ 해빙 소멸 지역의 현재 해저환경 특성 진단

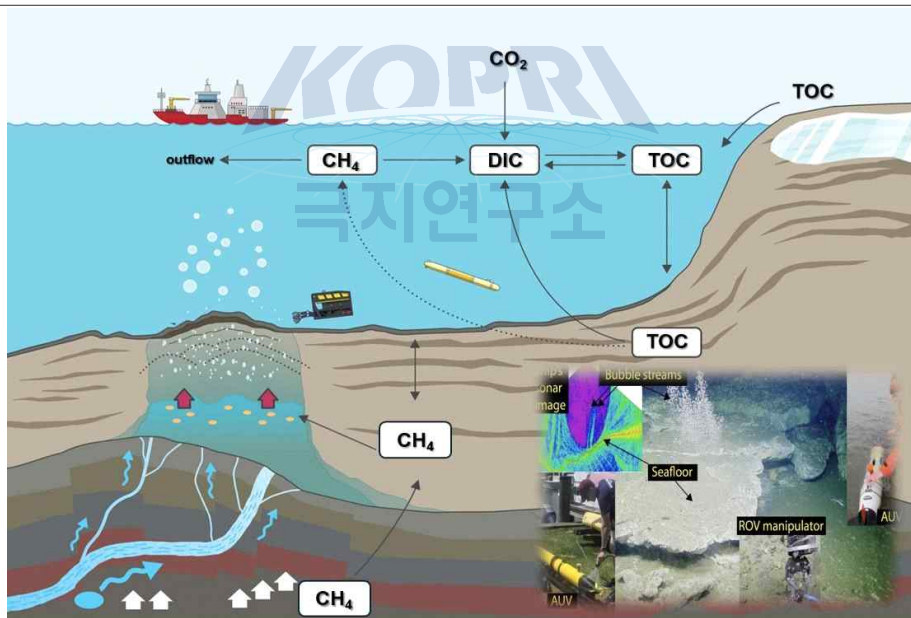
- 해빙 소멸이 빠르게 진행되는 프론티어 해역에서 지구물리탐사자료와 지질시료, 수층

자료를 활용하여 해저지형 변화, 천부지층 이상대, 유체 이동 흔적, 지반 불안정 징후를 진단함

- 해빙 감소와 함께 나타나는 수층 구조 변화, 수온·염분·산소 변화, 기포 상승 및 용존 메탄 확산 특성을 함께 고려하여 해저-수층 연계 변동성을 파악함

○ 특이구조 중심 정밀관측 및 변화 관측

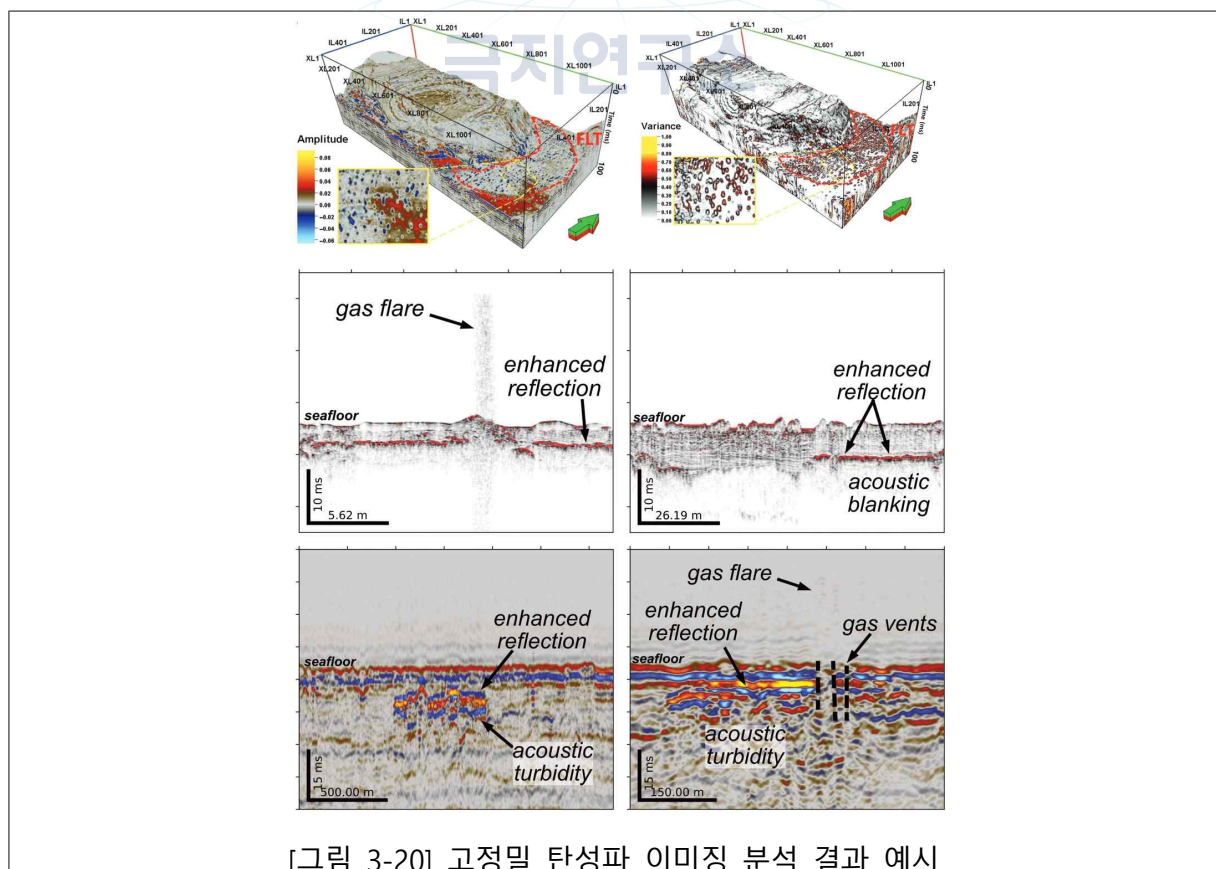
- 빙고 해저진흙화산, 방출 흔적 구조 등 해저환경 변화가 집중되는 지점을 대상으로 고 해상도 해저지형 조사, 해저면 영상 확보, 표적 시료 채취를 수행함
- 이를 통해 특이구조의 형태, 분포, 활동성 차이를 비교하고 해저환경 변화의 공간적 집중 구간을 보다 명확히 진단함
- 해빙 소멸 지역에서 확보한 자료를 기준자료로 축적하고 이후 반복 관측과 비교가 가능하도록 정보체계와 연계해 관리함
- 이를 통해 향후 북극 해저지질환경 변화 감시체계와 위험도 평가에 활용할 수 있는 장기 기반을 마련함



[그림 3-19] 북극 메탄 방출 특이구조 정밀관측 예시

## 다. 최종 연구 성과물

- 해저영구동토층·메탄 방출 정밀진단 성과물
  - 해저영구동토층·가스하이드레이트 고정밀 탄성파 이미징 및 심도 이미징 결과와 분포·특성 규명 성과
  - 메탄 방출 플럭스 DB, 방출 플럭스 정밀 지도화 결과, 이동·확산 및 기포 이동 기반 단기 시나리오 평가와 환경 영향 분석 결과
  - 해저 생지화학적 물질순환 및 미생물 기능 변동성 평가 결과와 메탄 생지화학 요인 DB 구축 성과
  - 해빙 소멸 지역의 수층 구조·해양환경 변화와 메탄 이동 연계 진단 결과
- 국제 프로그램 연계 및 활용 성과물
  - 해빙 소멸 지역 해저지질환경 정밀진단 결과
  - IODP-ICDP 등 국제 시추 프로그램 제출 및 협력에 활용이 가능한 기초자료



## 라. 연차별 주요 연구 목표 및 내용

<표 3-9> 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 연차별 연구목표, 내용

| 연도         | 연구목표                  | 주요 연구내용                                                                                                                                         |
|------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년(2027년) | 기반확보·초기 진단 착수         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 해저영구동토층 이미징 기술개발 착수</li> <li>• 메탄 방출 정밀진단 탐사 착수</li> <li>• 기존 자료 재검토 및 우선 관측 후보지 설정</li> </ul>         |
| 2차년(2028년) | 기술고도화·다학제 분석체계 확립     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 영구동토층·하이드레이트 분포·특성 규명 고도화</li> <li>• 생지화학·미생물 기능 평가 착수</li> <li>• 메탄 플렉스와 지구물리 자료의 연계 기반 마련</li> </ul> |
| 3차년(2029년) | 고정밀 이미징·핵심구간 구조규명     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵심구간 고정밀 탄성파 이미징과 구조규명 수행</li> <li>• 메탄 방출구조와 주변 퇴적환경·수층 구조 정밀분석 착수</li> </ul>                         |
| 4차년(2030년) | 고위도 정밀탐사·기작 규명 본격화    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ROV/AUV, 3차원 탄성파, 지화학·미생물 분석을 결합한 정밀탐사 확대</li> <li>• 보퍼트권 비교관측 확대, 플렉스 및 환경영향 정량화</li> </ul>           |
| 5차년(2031년) | 관측-분석-모델 통합 및 예측근거 제시 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 시계열 관측, 이미징, 생지화학 분석, 플렉스 DB, 이동·확산 모델 통합, 단기 시나리오 및 정책 활용 근거 제시</li> </ul>                            |

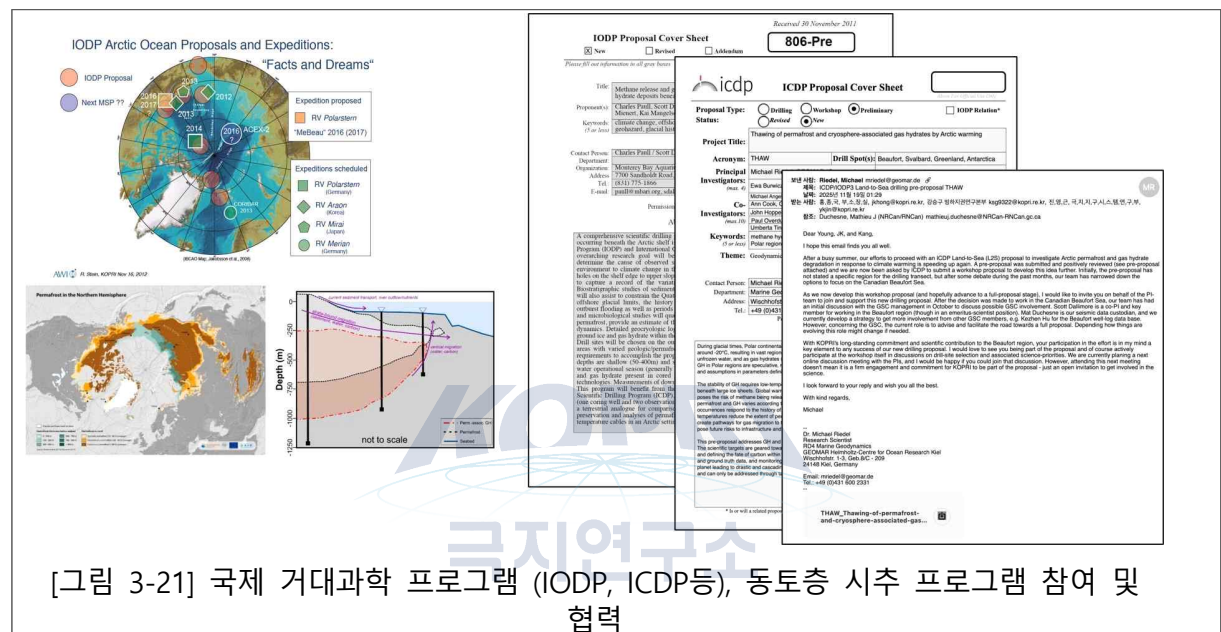
## 마. 기대효과 및 활용방안

### □ 기대효과

- (기후위기 대응) 해저영구동토층 붕괴와 메탄 방출 등 온난화 가속화 요인을 정밀진단함으로써 북극발 기후리스크의 과학적 불확실성을 낮추고 선제적 대응역량을 강화할 수 있음
- (국제협력/시추) 북극 대륙붕 메탄 방출량을 보다 정량적으로 제시하고 해저지질환경 변화와 온난화 가속화의 연계를 규명함으로써 기후변화 예측과 환경위기 대응을 위한 과학적 근거를 강화할 수 있음
- (해양환경 모니터링) 수층 구조와 해양환경 변화까지 함께 고려한 해저-수층 연계 진단을 통해 북극 해양환경 변화 모니터링과 온실가스 이동 경로 평가의 정밀도를 높일 수 있음
- (국제협력/과학외교) 국제 DB 연계와 국제 시추 프로그램 활용 기반을 마련함으로써 국제 공동연구 주도권과 과학외교 역량 제고에도 기여할 수 있음

## □ 활용방안

- (정책/위기관리) 메탄 플럭스 DB, 단기 시나리오, 위험구간 지도화 결과를 기반으로 기후 위기 대응과 북극발 기후재난 위험 관리의 과학적 근거자료로 활용함
- (국제협력/시추) CASCADE, IODP, ICDP 등 국제 프로그램과 연계하여 국제 공동연구와 공동 시추 추진의 기초자료로 제공하고 국제 비교가 가능한 표준 데이터셋 생산과 확산에 활용함

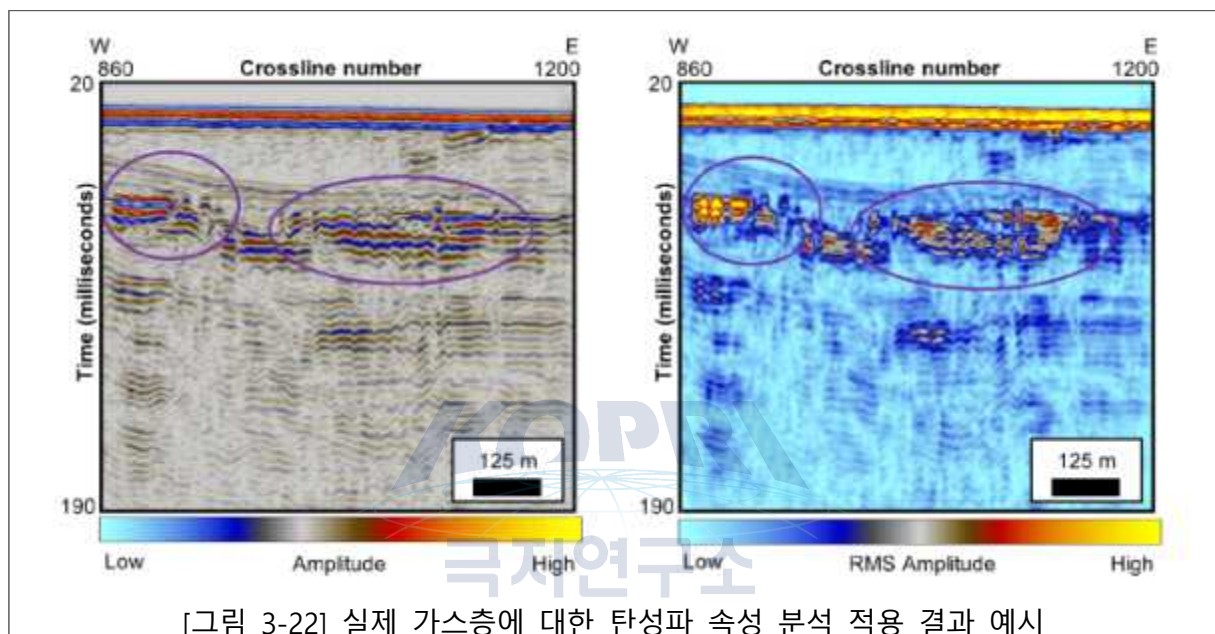


## 4. [중점분야 4] 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가

### 가. 연구의 배경 및 필요성

- 북극 전략자원 평가 수요 확대 및 자원 확보 경쟁 심화에 대비한 유망지역 선점 필요
- 북극항로 접근성 확대와 함께 북극권 에너지·광물 개발의 경제성 검토가 활발해지면서 천연가스, 가스하이드레이트, 해저 망간단괴, 희유금속 등 북극 해저자원에 대한 관심이 높아지고 있음
- 북극 해역은 기상과 해빙, 접근성 제약으로 인해 탐사 기회가 제한되므로 초기 단계에서 확보되는 지질·지구물리·시료 자료가 향후 유망지역 선정에 미치는 영향이 매우 큼. 따라서 프론티어 해역을 포함한 선제적 자료 축적과 함께, 확보된 자료를 정량 지표 기반으로 평가하여 유망지역을 도출하는 체계 구축이 필요함
- 단순히 후보지를 나열하는 방식이 아니라 구조·층서·지구물리 신호·광물 조성·지화학 특성·불확실성까지 함께 제시할 수 있어야 정책과 산업에서 활용이 가능한 수준의 결과가 됨
- 에너지자원과 전략광물 특성을 반영한 정량 평가 체계 마련
- 에너지자원과 전략광물은 형성 환경과 탐사 방법, 평가 기준이 서로 다르기 때문에 단일 자료만으로 잠재력을 설득력 있게 제시하기 어려움. 에너지자원은 다중채널 탄성파 자료를 통해 구조, 층서, 유체 이동 경로, 직접 탄화수소 지시자, 저류 가능성을 해석해야 하며, 전략광물은 시료 기반 광물학·지화학 분석을 통해 분포, 품위, 농집 특성, 형성 환경을 규명해야 함
- 결국 본 중점분야는 물리탐사-시료분석-해석-평가를 하나의 흐름으로 연결하여 자원 유형별 평가 논리를 분명히 하면서도 최종적으로는 동일한 공간 체계에서 유망지역을 비교·도출하는 방식으로 추진될 필요가 있음
- 탄성파 속성분석과 자료 품질 향상 기술의 확보
- 가스 또는 가스하이드레이트 부존 가능성 평가는 탄성파 반사 신호, 임피던스 변화, 신호 감쇠, 굴뚝 구조, 단층·트랩 구조와 같은 지구물리학적 징후를 얼마나 객관적으로 추출하느냐에 크게 좌우됨

- 진폭, 주파수, 에너지, 연결성 등과 같은 탄성파 속성을 함께 활용하여 유체 판별과 유망 구조를 도출할 수 있음. 또한 북극 해역에서는 다중반사, 잡음, 제한된 2차원 측선 자료라는 제약이 크기 때문에 자료 품질 향상과 해석 신뢰도 확보를 위한 전처리 기술과 2차원 자료의 3차원 확장 기법이 필수적임
- 에너지자원 유망지역 도출의 핵심은 단순 해석이 아니라, 품질 개선-속성분석-부존 평가-불확실성 분석으로 이어지는 정량 평가 체계를 갖추는 데 있음



#### □ AI 기반 자료처리·속성분석 기술을 활용한 평가 고도화 필요

- 북극 해역의 해빙과 기상, 취득 조건의 제약으로 인해 자료 품질 편차와 공간적 공백이 크게 나타날 수 있음. 이러한 조건에서는 전통적인 수작업 해석만으로 구조적 유망구조와 가스 관련 이상대를 일관되게 식별하는 데 한계가 있으므로 AI 기반 자료처리와 속성분석 기술을 함께 도입할 필요가 있음
- 특히 탄성파 속성분석에서는 진폭, 주파수, 에너지, 연결성 등과 같은 탄성파 속성을 함께 활용하여 가스 부존 가능성을 평가하는 경우, AI·기계학습 기반 접근을 적용하면 다중 속성의 조합을 효율적으로 분류·탐지하고 해석의 객관성과 재현성을 높일 수 있음. 이는 유망구조와 직접 탄화수소 지시자의 식별 정확도를 높이고 후보지 도출 단계의 불확실성을 줄이는 데 기여할 수 있음
- 또한 북극 탄성파 자료에는 다중반사와 비주기적 잡음, 취득 환경 차이에서 비롯되는 품질 저하 요소가 빈번하게 포함되므로 AI 기반 잡음 제거와 자료 품질 향상 기술은 유망 지역 평가의 선행 조건이라 할 수 있음. 따라서 본 중점분야에서도 AI를 단순 보조 도구

가 아니라 정량 평가의 정확도와 효율을 높이는 핵심 기반기술로 포함할 필요가 있음

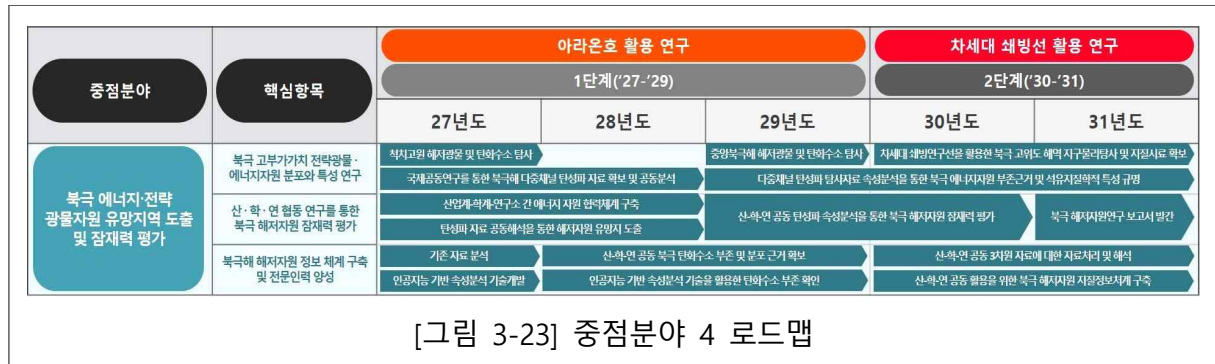
□ 동시베리아해 망간단괴 분포·부존기작 규명 필수

- 동시베리아해 대륙사면에서는 수심 약 150-240m 구간에서 고농도 망간 함량과 높은 망간/철 비를 갖는 망간단괴가 국내 연구진에 의해 확인되었으며, 이는 기존에 주로 심해 환경에서 보고된 단괴와는 다른 분포 심도와 조성 특성을 보임
- 이러한 고농도 망간단괴가 저층수 유입과 용존산소 조건과 연계될 가능성을 제시하고 있으며, 대륙사면 환경에서의 단괴 형성 기작과 분포 범위, 금속원소 농집 특성을 규명하는 것이 북극 금속자원 부존 양태를 이해하는 데 필수적임
- 따라서 전략광물 분야에서는 단괴의 분포 자체를 확인하는 데 그치지 않고 단괴와 공극수·퇴적물의 지화학 관계, 금속·미량원소의 정량 분포, 성장 특성과 형성 환경을 함께 해석하는 연구가 필요함

□ 산·학·연 협동연구와 정보체계 구축 필요

- 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출은 단순 탐사자료 확보만으로 완결되는 과제가 아니며, 산업계의 활용 수요와 리스크관리 경험, 학계의 자원 형성 메커니즘 및 평가모델 연구역량, 연구기관의 현장조사·자료처리·정보체계 구축 기능이 유기적으로 결합될 때 실효성 있는 성과를 창출할 수 있음
- 북극해 전략자원 연구 분야에서는 국내 에너지 공기업, 대학, 연구기관 간 역할과 연계 구조를 명확히 설정한 협력체계 구축이 필요함. 이를 위해 한국가스공사, 한국석유공사 등 에너지 공기업과 출연연(KIGAM, KIOST 등), 그리고 에너지자원공학 분야 역량을 보유한 대학(서울대, 해양대 등)을 유기적으로 연계하여 북극해 전략자원의 탐사·평가, 자료 해석, 시료 분석, AI 기반 데이터 처리 등 분야별 전문역량을 공동 활용하는 연구협력 체계를 마련할 필요가 있음.
- 이러한 산·학·연 협력체계를 바탕으로 탄성파 자료, 시료분석 결과, 자료해석, 유망지역 평가 결과를 통합한 북극 해저자원 정보체계를 구축해야만 후속 탐사, 정책 수립, 산업 활용, 국제공동연구로 연계될 수 있음

## 나. 연구목표 및 내용



### 1) 연구목표

#### □ 최종연구목표

#### ○ 천연가스·하이드레이트·해저망간 등 북극 에너지·전략광물자원 유망구역 도출 및 잠재력 평가

- 다중채널 탄성파 기반의 정량 해석과 전략광물 시료 기반의 특성 규명을 결합하여 북극 에너지자원과 전략광물자원에 대한 유망지역을 도출하고 잠재력을 평가함

#### □ 분야별 세부목표

#### ○ 북극 고부가가치 전략광물·에너지자원 분포와 특성 연구

- 다중채널 탄성파 자료와 기존 축적 자료를 활용하여 천연가스와 가스하이드레이트 부존 가능 구간의 구조, 층서, 유체 징후를 해석하고 해역별 분포 특성을 정리함
- 공해상의 프론티어 해역에서 드래지, 멀티코어, ROV 등을 활용한 현장탐사를 수행하고 시료 기반 광물학·지화학 분석을 통해 망간단괴와 금속원소의 분포와 형성 특성을 규명함
- 에너지자원과 전략광물 결과를 해역별로 종합하여, 유망구간의 근거자료와 추가 확인 필요 요소를 함께 제시함

#### ○ AI 기반 자료처리·속성분석 기술 확보와 평가 자동화 기반 구축

- 북극 해역 탄성파 자료를 대상으로 AI 기반 잡음 제거, 다중반사 억제, 자료 품질 향상 기술을 개발하여 속성분석과 부존 평가의 입력자료 품질을 높임

- 다중 속성 기반 이상대 탐지와 유망구조 추출 과정을 반자동화하여 해석의 객관성과 재현성을 높이고 해석자 의존성을 줄임
- 2차원 탄성파 자료에 대해 지구통계학적 보간과 결합 가능한 AI 보조 해석 체계를 마련하여 제한된 측선 자료를 평가가 가능한 공간정보로 확장할 수 있는 기반을 구축함

○ 정량 평가를 통한 유망지역 도출과 잠재력 비교

- 에너지자원은 구조, 층서, 속성, 자료 품질, 불확실성 분석 결과를 바탕으로 후보지를 도출하고 후보지별 강점과 제약요인을 정리함
- 전략광물은 시료 분석 결과를 기반으로 분포, 품위, 미량원소 농집, 형성 환경을 비교하여 해역별 후보지를 도출하고 우선순위를 제시함
- 최종적으로는 에너지자원과 전략광물에 대한 해역별 유망지역을 지도와 보고서, 공간자료 형태로 제시하여 실질적 의사결정 자료로 활용될 수 있도록 함

○ 북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성

- 탄성파 자료, 시료 분석 결과, 공간분포도, 평가 결과를 통합 정리하여 산·학·연이 함께 활용할 수 있는 해저자원 정보체계를 구축함
- 자료 갱신·관리 절차를 마련하고 자료공유와 보안, 결과 환류 원칙을 정리하여 지속적인 활용 기반을 강화함
- 자료처리-속성분석-해석-평가를 수행할 수 있는 실무형 전문인력을 양성하여 후속 탐사와 국제협력 확산 기반을 마련함

□ 연차별 목표

○ 1차년(2027): 협력기반 구축·탐사 착수

- 탄성파 속성분석과 가스 부존 평가 기법에 대한 선행 사례를 정리하고 북극해 환경에 적합한 분석 기준을 마련함
- 망간단괴의 고해상도 금속·미량원소 정량기법을 개발하고 전략광물 시료 분석 기반을 구축함
- 산·학·연 협력체계와 국제협력 기반을 정비하여 후속 탐사와 평가를 위한 추진체계를 마련함

○ 2차년(2028): 탐사확대·평가 착수

- 북극해 탄성파탐사 자료에 탄성파 속성분석을 적용하고 가스 부존 여부와 현장 적용성을 검증하여 에너지자원 후보지 도출을 본격화함
- 북극해 프론티어 해역 망간 단괴 탐사를 확대하고 단괴의 분포 범위와 형태·특성을 규

명함

- 해역별 자원 특성 차이를 반영한 초기 평가 결과를 정리함

○ 3차년(2029): 대상 해역 확대·공동평가 심화

- 자료 품질 향상 기술과 지구통계학적 가스 외삽 기법을 개발하고 2차원 자료 기반 3차원 가스 분포 추정과 불확실성 분석을 고도화함
- 기계학습 기반 잡음 제거와 자료 품질 개선 기술을 적용하여 속성분석과 부존 평가의 입력자료 품질을 높임
- 망간단괴의 연대-성장속도와 단괴-미생물 상호작용 연구를 수행하여 단괴 형성 기작과 잠재력 평가 근거를 확장함

○ 4차년(2030): 고위도 정밀탐사·3차원 해석 고도화

- 신규 취득 자료에 기존 속성분석·품질 향상·부존 평가 기법을 적용하여 실증연구를 수행하고 AI 기반 자료처리 결과를 반영해 변수 조정과 기법 개선을 진행함
- 핵심 후보지에 대한 정밀탐사와 3차원 해석을 수행하여 에너지자원 평가의 불확실성을 줄임
- 단괴, 공극수, 퇴적물 지화학 결과를 통합한 GIS 기반 전략광물 분포도를 본격적으로 구축

○ 5차년(2031): 성과도출·정보체계 운영체계 완성

- 권역별 에너지자원 분포 DB와 전략광물 분포·특성 DB를 종합하고 유망지역 지도와 잠재력 평가 보고서를 완성함
- 유망지역, 평가기준, 데이터셋, 정보체계를 통합 제공하여 정책·산업 활용이 가능한 운영체계를 확립함
- 후속 탐사와 국제공동연구에 활용할 수 있는 성과확산 기반을 정착시킴

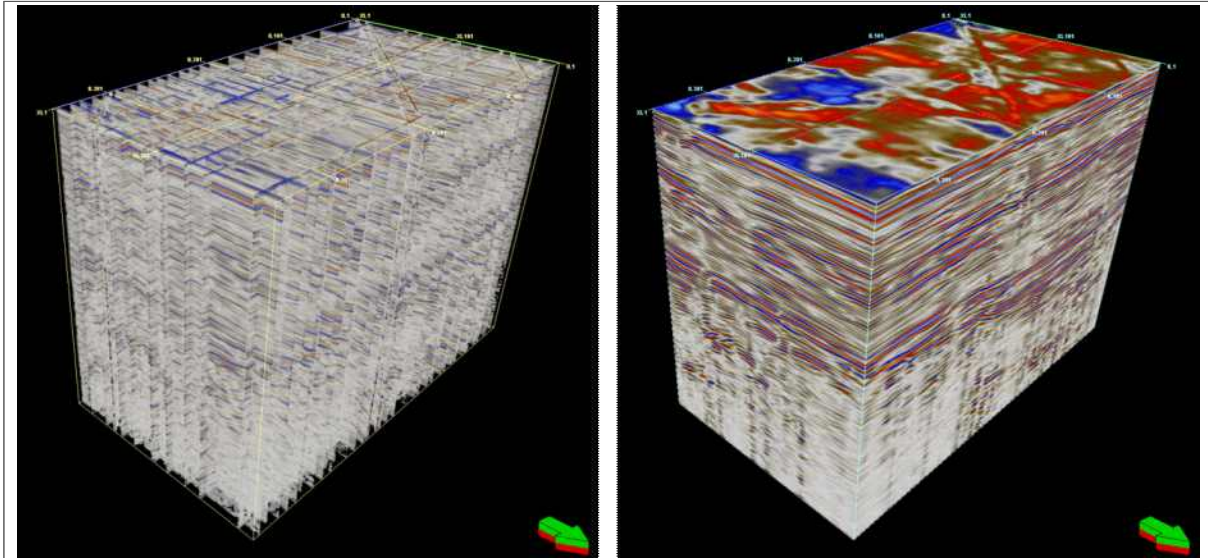
## 2) 연구내용

### □ 북극 고부가가치 전략광물·에너지자원 분포와 특성 연구

○ 탄화수소·가스하이드레이트 대상 탄성과 속성분석과 정량 평가 기반 구축

- 탄성과 속성분석 기법에 대한 선행 사례를 정리하고 북극해 환경에 적합한 신호적 속성과 구조적 속성을 선정하여 가스 특화 분석 기준을 마련함
- 기존 보유자료 및 신규 취득 자료에 대해 속성분석을 적용하여 가스층의 반사 신호, 구조적 유망구조, 직접 탄화수소 지시자, 가스하이드레이트 이상대를 검토하고 2차원 자료 기반 부존 평가와 불확실성 분석을 수행함

- 이후 자료 품질 향상 기술, 지구통계학적 보간 기법, 속성분석 기법을 연결한 통합 작업 흐름을 구축하여 제한된 2차원 측선 자료를 유망지역 도출과 잠재력 평가로 연결하는 정량 평가 기반을 마련함



[그림 3-24] 지구통계학적 보간 기법 적용 결과 예시

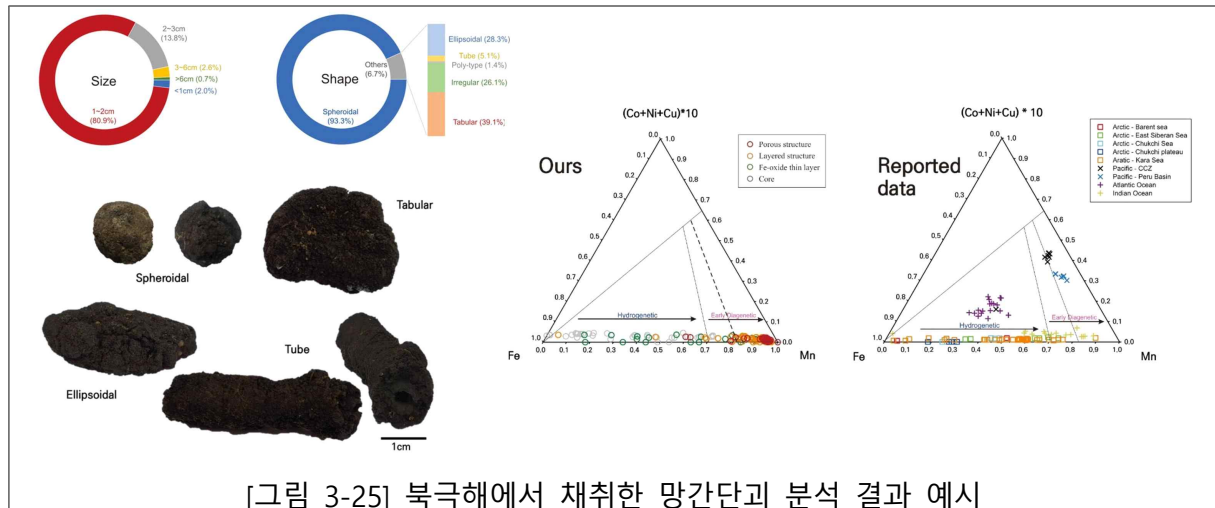
#### ○ AI 기반 자료 품질 향상 및 속성분석 고도화

- 북극 해역의 탄성파 자료는 다중반사, 비주기적 잡음, 취득 조건 차이로 인한 품질 편차가 크기 때문에 가스 신호와 구조적 유망구조를 안정적으로 식별하기 위해서는 자료 품질 향상 기술이 선행되어야 함. 이를 위해 기계학습 기반 잡음 제거, 다중반사 억제, 중합 자료 품질 향상 기술을 개발·적용하여 속성분석 입력자료의 품질을 높이고자 함
- 속성분석 단계에서는 진폭, 주파수, 에너지와 같은 탄성파 속성을 함께 활용하여 가스 신호와 유망구조를 탐지하며, AI 기반 분류·탐지 기술을 접목하여 속성 조합의 최적화와 이상대 추출의 객관성을 높임
- 또한 자료 품질 향상, 속성분석, 가스 부존 평가, 불확실성 분석을 하나의 연속된 작업 흐름으로 연결하여 신규 취득 자료에도 반복 적용 가능한 반자동 해석 체계를 구축함. 이러한 체계는 서북극해 권역별 가스 분포 DB 구축과 유망지역 도출의 속도와 재현성을 높이는 데 기여할 수 있음

#### ○ 전략광물(망간·금속) 시료 기반 분포·특성 규명 및 DB·분포도 구축

- 동시베리아해 미답해역에서 드렛지, 멀티코어, ROV를 활용해 망간 단괴 현장탐사를 수행하고 단괴의 출현 범위와 수심 분포를 확대 확인함
- 단괴 내부의 고해상도 광물종 분포와 금속·미량원소 정량화를 위해 Raman, EPMA, LA-ICP-MS를 활용한 분석체계를 구축하고 내부 보정 절차를 통해 실제 함량 단위의 정량 자료를 확보함

- 또한 단괴의 연대-성장속도 연구와 단괴-공극수-퇴적물 지화학 연계를 통해 형성 환경과 농집 특성을 해석하고 탐사점점별 수심, 광물조성, 지화학 데이터를 통합한 GIS 기반 망간 및 금속자원 분포도를 구축함



[그림 3-25] 북극해에서 채취한 망간단괴 분석 결과 예시

## □ 산·학·연 협동연구를 통한 북극 해저자원 잠재력 평가

### ○ 협력체계 구축과 역할 분담

- 산업계는 유망지 정의와 활용 시나리오, 리스크 검토 기준을 제시하고 학계는 자원 형성 모델과 지질·광물학적 검토를 담당하며, 연구기관은 관측·처리·평가 결과를 연결하는 중심 역할 수행
- 이를 통해 탄성파 자료처리, 속성분석, 시료 분석, 후보지 평가가 분절되지 않고 하나의 잠재력 평가 체계로 연결되도록 함

### ○ 정량 평가 결과의 지도화와 후보지 도출

- 에너지자원은 구조, 층서, 속성, 자료 품질, 불확실성 분석을 바탕으로 후보지를 도출하고 후보지별 강점과 제약요인을 정리함
- 전략광물은 시료 분석 결과를 기반으로 분포, 품질, 금속원소 농집, 형성 환경을 비교하여 해역별 후보지를 도출하고 우선순위를 제시함
- 최종적으로는 유망지역 지도, 후보지 목록, 평가기준, 보고서를 연계하여 정책·산업 의사 결정에 활용 가능한 형태로 결과를 정리함

## □ 북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성

### ○ 해저자원 정보체계 구축과 공동활용 기반 마련

- 다중채널 탄성파 자료와 시료 분석 결과, 분포도, 평가 결과를 통합한 해저자원 정보체계를 구축하여 산·학·연이 함께 활용할 수 있도록 함
- 이 정보체계는 단순 자료 저장소가 아니라, 유망구역 도출과 부존 특성 규명을 고도화하고 후속 탐사와 민간 투자 검토, 탐사 설계에 필요한 근거자료를 제공하는 기반으로 운영함

### ○ 실무형 전문인력 양성 및 성과 확산

- 산·학·연 협동연구를 통해 탄성파 속성분석, AI 기반 자료 품질 향상, 시료 기반 지화학 분석, GIS 공간정보 구축, 잠재력 평가를 수행할 수 있는 실무형 전문인력을 양성함
- 축적된 성과는 논문, 기술보고서, 분포도, DB, 정보체계 등 다양한 형태로 확산하여 후속 연구와 국제공동연구 기반을 강화함

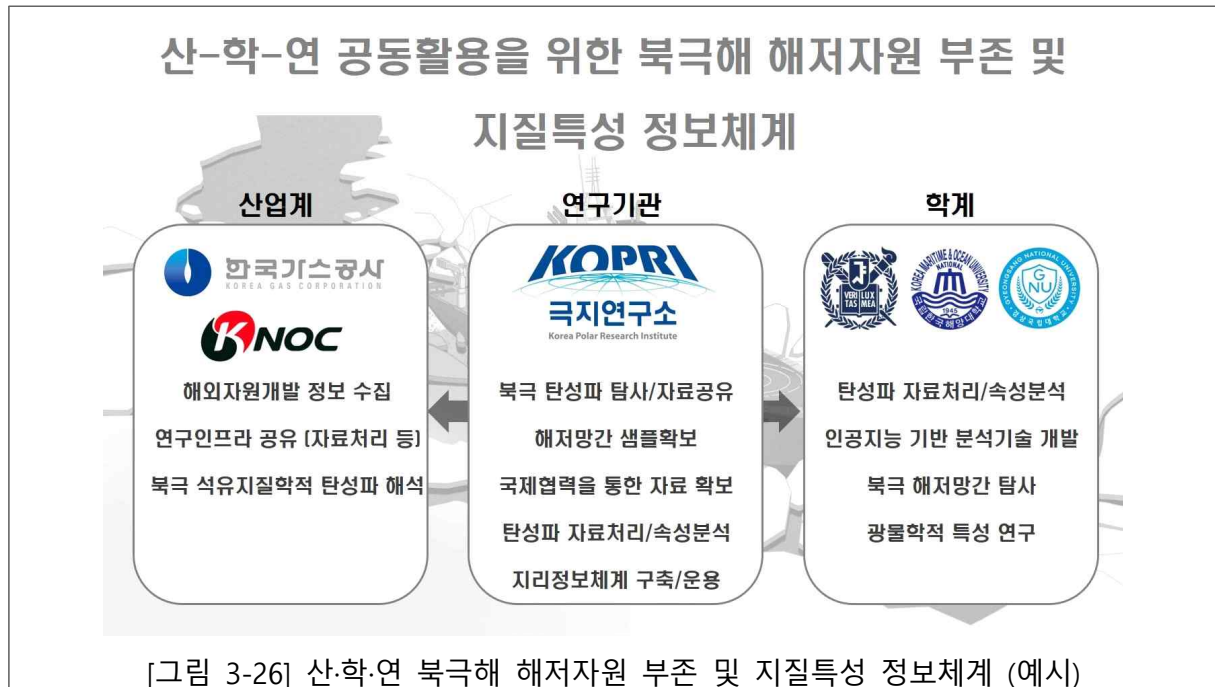
## 다. 최종 연구 성과물

### □ 유망지역 도출·잠재력 평가 핵심 산출물

- 탄성파 기반 해저자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 결과
- AI 기반 속성분석과 자료 품질 향상 결과를 반영한 에너지자원 분포 DB
- 북극해 전략자원 잠재력 평가 및 유망지 도출 보고서

### □ DB·정보체계 및 협력·인력 성과

- 다중채널 탄성파 자료와 시료 분석 결과를 통합한 해저자원 정보체계 구축
- 에너지자원 및 망간·금속 자원 분포도 구축
- 산·학·연 협력체계 정착과 실무형 전문인력 양성 및 성과 확산



## 라. 연차별 주요 연구 목표 및 내용

<표 3-10> 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 연차별 연구목표, 내용

| 연도         | 연구목표          | 주요연구내용                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년(2027년) | 협력기반 구축·탐사 착수 | <ul style="list-style-type: none"> <li>산·학·연 협력체계를 구축, 국내 에너지기업과의 자료 활용 및 평가 협력 기반 마련</li> <li>국제협력 기반의 다중채널 탄성파 자료 확보에 착수, 자료처리·속성분석·AI 기반 품질 향상 기술 적용 기반 마련</li> <li>동시베리아해 전략광물 탐사 착수, 시료 분석 및 정량화 체계 구축</li> </ul> |
| 2차년(2028년) | 탐사확대·평가 착수    | <ul style="list-style-type: none"> <li>다중채널 탄성파탐사 자료를 바탕으로 속성분석과 이상대 해석 AI 기법 적용, 가스 부존 평가 검증과 유망지역 후보 도출 본격화</li> <li>전략광물에 대한 고해상도 금속·미량원소 정량분석 및 품위와 농집 특성 연구, 분포 DB 구축 본격화</li> </ul>                              |

| 연도         | 연구목표                      | 주요연구내용                                                                                                                                                                                                                |
|------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3차년(2029년) | 대상 해역<br>확대·공동평가 심화       | <ul style="list-style-type: none"> <li>다중채널 탄성파탐사 자료 품질 향상, AI 기반 잡음 제거, 지구통계학적 공간 확장 기법 고도화</li> <li>북극해 에너지자원 분포 DB 확장·갱신, 잠재력 평가와 불확실성 분석 절차 고도화</li> <li>망간 단괴-공극수-퇴적물 연계 DB를 구축·보완, GIS 기반 자원 분포도 고도화</li> </ul> |
| 4차년(2030년) | 고위도<br>정밀탐사·3차원 해석<br>고도화 | <ul style="list-style-type: none"> <li>차세대 쇄빙연구선과 첨단탐사 기술 연계한 정밀평가 수행, 3차원 해석과 불확실성 저감 추진</li> <li>자원정보체계 구축 본격화 및 AI 기반 평가 워크플로우의 현장 적용</li> <li>자료처리·속성분석·시료기반 평가를 수행할 수 있는 실무형 전문인력 양성 병행</li> </ul>               |
| 5차년(2031년) | 성과도출·정보체계<br>운영체계 완성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>탄성파 기반 유망지역 도출 및 잠재력 평가 결과를 종합한 보고서 발간</li> <li>유망지역 지도, 정보체계를 통합 제공하여 정책·산업 활용과 연계되는 운영체계 완성</li> </ul>                                                                       |

## 마. 기대효과 및 활용방안

### □ 기대효과

- (자원안보·전략) 공해상 해저자원 활용 가능성 확대에 대비하여 에너지·전략광물 유망지역과 잠재력 평가 결과를 확보함으로써 국가 전략자원 포트폴리오 확장의 기반을 마련할 수 있음
- (평가 신뢰도) 국제협력 기반 탐사자료와 탄성파 속성분석, AI 기반 자료 품질 향상, 시료 기반 광물·지화학 분석을 결합함으로써 평가의 객관성과 재현성을 높일 수 있음
- (인프라·인력) 해저자원 정보체계 구축과 실무형 전문인력 양성을 통해 후속 탐사, 자원 평가, 국제협력으로 이어지는 지속가능한 연구 인프라를 확보할 수 있음
- (기술 축적) 북극 해역 특성을 반영한 AI 기반 자료처리·속성분석 기술을 확보함으로써, 제한된 2차원 자료 환경에서도 유망구조와 자원 신호를 효율적으로 탐지·평가할 수 있는 기반을 마련할 수 있음

□ 활용방안

- (정책·외교) 유망지와 잠재력 평가 결과를 북극 정책 수립, 국제협력 협상, 자원외교의 근거자료로 활용하고 국제공동탐사와 자료 상호교환 협력의 기반으로 제공함
- (산업) 민간의 후속 탐사·투자 검토와 탐사 리스크 저감, 후보지 사전검토, 자료처리·속성 분석·AI 해석 인프라 활용에 적용할 수 있음
- (연구·확산) 산·학·연 협동연구 생태계를 조성하고 DB·분포도·보고서·정보체계를 바탕으로 후속 R&D와 국제공동연구 확산을 촉진할 수 있음
- (후속 탐사 설계) 차세대 쇄빙연구선 활용 단계에서 정밀탐사 대상 후보지와 우선순위를 설정하는 기준자료로 활용할 수 있음

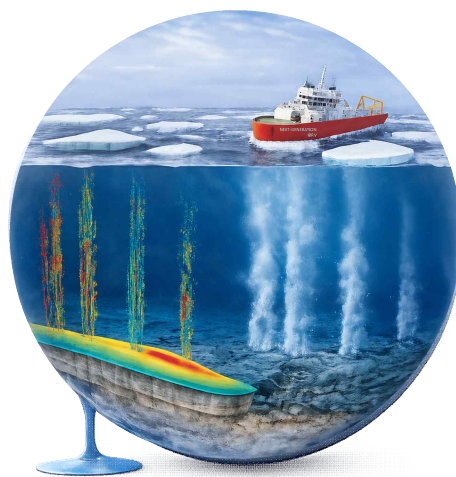


---

## 제4장 소요예산

---

### 제1절 전체사업 소요예산



## 제4장 소요예산

### 제1절 전체사업 소요예산

□ 총 연구비(기간): 300억 원('27~'31)

- 5년간 총 300억 원 국비로 추진함. 2027~2029년 연간 45억 원, 2030년 55억 원, 2031년 110억 원으로 2030년부터는 본격적인 차세대 쇄빙연구선을 활용한 현장탐사 수행과 첨단 해저관측 장비 도입을 반영하여 연구비를 점차 증액하여 구성함

<표 4-1> 전체사업 소요예산

(단위: 백만원)

| 구분   | '27   | '28   | '29   | '30   | '31    | 합계     |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 소요예산 | 4,500 | 4,500 | 4,500 | 5,500 | 11,000 | 30,000 |

□ 연구내용 및 연차별 소요예산

- 연차별 예산은 단순 균등 배분이 아니라, 연도별 중점 추진내용과 현장조사 수행계획의 차이를 반영하여 편성함. 2028년은 북서항로 관련 지구물리탐사를 수행하는 연차로 관련 예산을 확대 반영하였으며, 이에 따라 프론티어 해역 탐사 예산은 동일 연차 내 병행 추진 구조를 고려하여 일부 조정함
- 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 분야는 2028년에 북서항로 탐사와 프론티어 해역 탐사를 함께 추진하는 사업 구조를 반영하여 2027년 대비 일부 감액 편성하였으며, 이는 해당 분야의 중요도 축소가 아니라 복수 탐사 수행에 따른 연차 내 예산 조정임. 이후 2029년 이후에는 프론티어 해역 중심의 탐사 및 정보 선점 수요를 반영하여 다시 확대 편성함
- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 분야는 2028년에 실제 북서항로 관련 탐사를 수행함에 따라 예산을 증액하였으며, 2027년·2029년·2030년은 북서항로 직접 탐사보다 프론티어 해역 중심 탐사를 우선 수행하는 구조를 반영하여 상대적으로 소규모로 편성함. 해당 연차의 예산은 북서항로 관련 사전 기획, 자료 연계, 후속 분석 및 협력 준비를 중심으로 반영한 것임
- 2031년은 차세대 쇄빙연구선 활용을 통한 연구 확장 가능성과 캐나다 지질조사소와의 2차 북서항로 공동탐사 추진 가능성을 고려하여 관련 예산을 증액 편성함. 이에 따라 최종

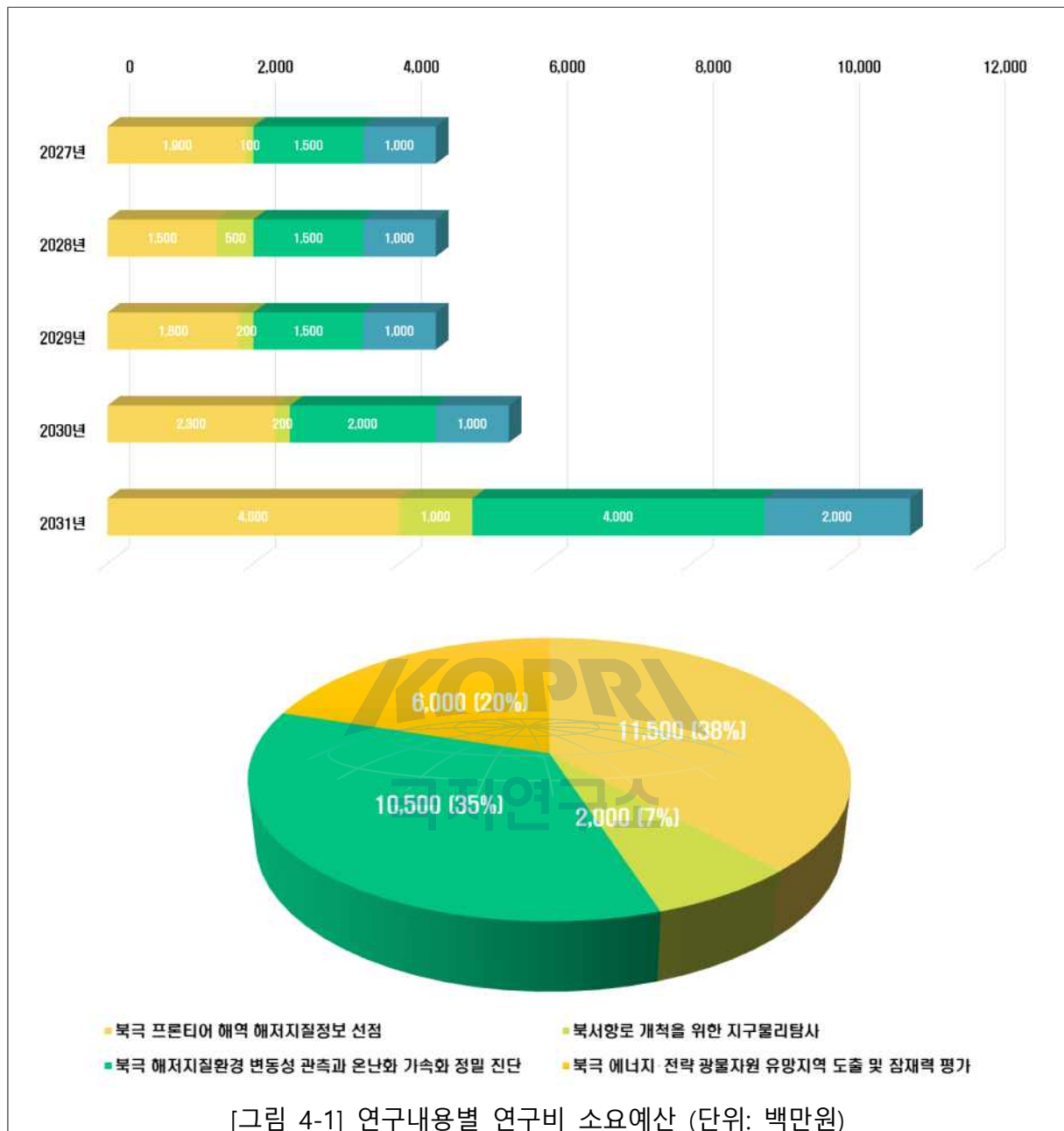
연차에는 북서항로와 프론티어 해역을 연계한 현장조사 및 국제협력 기반 연구를 확대 추진할 수 있도록 반영함

<표 4-2> 연구내용 및 연차별 소요예산

(단위: 백만원)

| 구분                                   | '27   | '28   | '29   | '30   | '31   | 합계     |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 선점              | 1,900 | 1,500 | 1,800 | 2,300 | 4,000 | 11,500 |
| 북서항로 개척을 위한<br>지구물리탐사                | 100   | 500   | 200   | 200   | 1,000 | 2,000  |
| 북극 해저지질환경 변동성<br>관측과 온난화 가속화<br>정밀진단 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 2,000 | 4,000 | 10,500 |
| 북극 에너지·전략광물자원<br>유망지역 도출 및 잠재력<br>평가 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,000 | 6,000  |





#### □ '27년 소요예산 상세내역

- 2027년 소요예산은 총 4,500백만원으로 편성하였으며, 사업 착수 연도인 점을 고려하여 프론티어 해역 진출 기반 확보, 해저지질·지구물리 기초자료 축적, 정밀진단을 위한 분석 체계 마련, 국제공동연구 및 후속 탐사 준비에 중점을 두어 구성함
  - 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 분야에는 1,900백만원을 반영함
  - 척치고원, 동시베리아해 북단 미탐사해역 및 미국 알래스카 보퍼트해를 대상으로 해저

지질 및 지구물리탐사 추진을 위한 현장조사 예산 700백만원을 편성함

- 취득 자료의 분석과 종합적 지질해석, 고위도 해역 문헌조사 및 사전연구 수행을 위해 60백만원을 반영함
- 향후 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 플랫폼과 인공지능 기반 데이터 큐레이션 체계의 기초 구축을 위해 40백만원을 편성함
- 또한, ROV·3D 탄성파 등 첨단 해저지질탐사 기반과 AI 기반 자료분석 기술 확보를 위한 예산 1,100백만원을 반영하여 초기 단계부터 탐사·분석 역량을 체계적으로 확보할 수 있도록 구성함

○ 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 분야에는 100백만원을 반영함

- 2027년은 북서항로 직접 탐사 수행보다는 캐나다 지질조사소와의 사전연구 및 협의, 조사구역 검토, 협력체계 마련 등 후속 탐사 추진을 위한 준비 단계에 중점을 두어 편성함

○ 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 분야에는 1,500백만원을 반영함

- 해저영구동토층 및 가스하이드레이트의 분포와 특성 규명을 위한 고정밀 이미징 및 관련 기술 고도화에 500백만원을 편성함
- 북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가를 위한 정밀진단 탐사, 퇴적환경 및 수층 내 기체 방출 특성 분석에 900백만원을 반영함
- 해빙 소멸 지역의 해저지질환경 변화 관측을 위한 시료 분석, 문헌조사 및 사전연구에 100백만원을 편성하여 후속 시계열 관측의 기반을 마련하도록 함

○ 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 분야에는 1,000백만원을 반영함

- 척치고원 해저광물 및 탄화수소 탐사, 국제공동연구를 통한 다중채널 탄성파 자료 확보 및 공동분석에 670백만원을 편성함
- 산·학·연 협동연구 기반 구축과 공동해석을 통한 유망지 도출에 130백만원을 반영함
- 해저자원 정보체계 구축, 자료 분석, 인공지능 기반 속성분석 기술개발 및 전문인력 양성을 위해 200백만원을 편성함

<표 4-3> 2027년 소요예산 상세내역

(단위: 백만원)

| 구분                                      | 내용                                                                                                                                                                    | 예산    |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 선점                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극 프론티어 해역 해저지질정보 확보</li> <li>- 척치고원, 동시베리아해 북단 미탐사해역 및 미국 알래스카 보퍼트해 해저지질 및 지구물리탐사</li> </ul>                                | 700   |
|                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 해저지질시료 및 지구물리자료 분석과 종합적 지질해석</li> <li>- 지질시료 및 지구물리자료 분석</li> <li>- 고위도 해역 문헌조사 및 사전연구</li> </ul>                            | 60    |
|                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 구축</li> <li>- 해저지질정보체계 플랫폼 개발</li> <li>- 인공지능 기반 데이터 큐레이션 시스템 개발</li> </ul>                             | 40    |
|                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 첨단 해저지질탐사(ROV, 3D 탄성파 등) 및 AI 기반 자료 분석 기술 확보</li> <li>- 첨단 해저지질탐사 장비 구축 및 독자적 운용기술 확보</li> <li>- AI 기반 자료분석 기술 개발</li> </ul> | 1,100 |
|                                         | 소계                                                                                                                                                                    | 1,900 |
| 북서항로 개척을<br>위한 지구물리탐사                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북서항로 개척을 위한 해저지질정보 확보</li> <li>- 북서항로 개척을 위한 캐나다 지질조사소와의 사전연구 및 협의</li> </ul>                                                | 100   |
|                                         | 소계                                                                                                                                                                    | 100   |
| 북극 해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀진단 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 해저영구동토층 / 가스하이드레이트 분포와 특성 연구</li> <li>- 해저영구동토층 고정밀 이미징 기술개발</li> <li>- 가스하이드레이트 분포 및 특성 규명 기술 고도화</li> </ul>                | 500   |
|                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 북극 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가</li> <li>- 북극해 해저재난 영향 메탄 방출 정밀진단 탐사</li> <li>- 북극해 퇴적환경 및 수층 메탄 등 기체 방출 특성 및 원인 파악</li> </ul> | 900   |
|                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 프론티어 해역 해빙 소멸 지역 해저지질환경 변화 관측</li> <li>- 해저지질 시료 분석</li> <li>- 관련 문헌조사 및 사전연구</li> </ul>                                     | 100   |
|                                         | 소계                                                                                                                                                                    | 1,500 |

(단위: 백만원)

| 구분                                       | 내용                                                                                                                                                           | 예산    |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 북극<br>에너지·전략광물자<br>원 유망지역 도출<br>및 잠재력 평가 | <ul style="list-style-type: none"><li>• 북극 고부가가치 전략광물·에너지자원 분포와 특성 연구</li><li>- 척치고원 해저광물 및 탄화수소 탐사</li><li>- 국제공동연구를 통한 북극해 다중채널 탄성파 자료 확보 및 공동분석</li></ul> | 670   |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"><li>• 산·학·연 협동연구를 통한 북극 해저자원 잠재력 평가</li><li>- 산업계·학계·연구소 간 에너지 자원 협력체계 구축</li><li>- 탄성파 자료 공동해석을 통한 해저자원 유망지 도출</li></ul>  | 130   |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"><li>• 북극해 해저자원 정보체계 구축 및 전문인력 양성</li><li>- 해저광물 자료 분석</li><li>- 인공지능 기반 속성분석 기술개발</li></ul>                                | 200   |
| 소계                                       |                                                                                                                                                              | 1,000 |



□ '27~'31년 세부 연구내용 및 연구비 소요내역

| 세부 연구내용 및 연구비 소요내역 (단위: 백만원)     |                                             |                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                                    |                                                                                             |                                                                             |        |
|----------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------|
| 주요내용                             | 핵심연구항목                                      | 세부내용                                               | '27                                                                                  | '28                                                                                   | '29                                                                                                | '30                                                                                         | '31                                                                         | 소 계    |
| 북극<br>프론티어<br>해역<br>해저지질정보<br>선점 | 북극 프론티어<br>해역<br>해저지질정보<br>선점               | 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보 확보                            | 700<br>척지고원 및<br>동시베리아해 북단<br>미탐사해역<br>해저지질 및<br>지구물리탐사                              | 260<br>보퍼트해 대륙붕 및<br>미탐사해역 해저지질<br>및 지구물리탐사                                           | 700<br>중앙북극해 광역적<br>해저지질 및<br>지구물리탐사                                                               | 900<br>차세대 쇄빙연구선을 활용한 북극<br>프론티어 해역 탐사                                                      | 2,000                                                                       | 11,500 |
|                                  |                                             | 해저지질시료 및<br>지구물리자료 분석과<br>종합적 지질해석                 | 50<br>10<br>고위도 해역<br>문헌조사 및<br>사전연구                                                 | 50<br>50<br>탐사구역 별 해저지질도 작성 및 지질환경·지질구조·저질에 대한 종합적<br>해저지질해석                          | 50<br>50<br>50                                                                                     | 100<br>100                                                                                  | 150<br>150                                                                  |        |
|                                  |                                             | 전략적 활용을 위한<br>해저지질 정보체계 구축                         | 20<br>해저지질정보체계 플랫폼 개발<br>20<br>인공지능 기반 데이터 큐레이션 시스템<br>개발                            | 20<br>20                                                                              | 50<br>원시자료 및 해석결과 빅데이터 체계<br>구축                                                                    | 100<br>200                                                                                  | 200                                                                         |        |
|                                  |                                             | 첨단 해저지질탐사 (ROV,<br>3D 탄성파 등) 및 AI<br>기반 자료분석 기술 확보 | 950<br>점단 해저지질탐사장비 (ROV, CSEM, 3D<br>탄성파) 구축 및 독자적 운용기술 확보                           | 1,000                                                                                 | 850<br>첨단 해저탐사기술을 활용한 북극해 정밀 해저지질조사                                                                | 900<br>1,200                                                                                |                                                                             |        |
|                                  |                                             |                                                    | 150<br>AI 기반<br>자료분석기술 개발                                                            | 100<br>북극해 자료에 적용<br>및 활용성 진단                                                         | 100<br>북극 해저지질구조<br>정밀해석                                                                           | 200<br>3차원 자료에 대한<br>시분석기술 확보                                                               | 300<br>3차원 해저지질구조<br>정밀해석                                                   |        |
|                                  | 북서항로<br>개척을 위한<br>지구물리탐사                    | 북서항로 개척을 위한<br>해저지질정보 확보                           | 100<br>북서항로 개척을<br>위한 사전연구 및<br>협업                                                   | 500<br>캐나다<br>지질조사소(GSQ)와의<br>지구물리탐사                                                  | 200<br>최적의 북서항로<br>도출을 위한<br>해저지질해석                                                                | 200<br>차세대<br>쇄빙연구선을<br>활용한 북서항로<br>개척 방안 연구                                                | 1,000<br>차세대<br>쇄빙연구선을<br>활용한 캐나다<br>지질조사소(GSQ)와<br>의 2차<br>지구물리탐사<br>계획(안) | 2,000  |
|                                  |                                             |                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                                    |                                                                                             |                                                                             |        |
|                                  | 북극<br>해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀진단  | 해저영구동토층 /<br>가스하이드레이트 분포와<br>특성 연구                 | 200<br>해저영구동토층 고정밀 이미징 기술개발<br>300<br>가스하이드레이트 분포 및 특성 규명<br>기술 고도화                  | 200<br>400                                                                            | 600<br>해저영구동토층 및<br>가스하이드레이트<br>고정밀 탄성파<br>이미징과 해석                                                 | 600<br>북극 해저영구동토층과<br>가스하이드레이트 해리에 따른<br>해저환경변화 및 온실가스 방출구조<br>규명                           | 1,000                                                                       | 10,500 |
|                                  |                                             | 북극 메탄 방출 기작<br>규명과 단기 방출<br>시나리오 평가                | 500<br>북극해 해저저년 영향 메탄 방출<br>정밀진단 탐사<br>400<br>북극해 퇴적환경 및 수층 메탄 등 기체<br>방출 특성 및 원인 파악 | 500<br>300                                                                            | 500<br>해저 생지화학적<br>물질 순환 및<br>미생물 기능 변동성<br>평가                                                     | 500<br>북극 프론티어 해역 해저지질자료 기반<br>지화학 분석<br>400<br>북극해 프론티어<br>해역 내 메탄<br>생지화학 요인<br>데이터베이스 구축 | 1000<br>1000<br>반응-수송 모델을<br>활용한 해저 메탄<br>순환 시뮬레이션<br>평가                    |        |
|                                  |                                             | 프론티어 해역 해빙 소멸<br>지역 해저지질환경 변화<br>관측                | 50<br>기존 시료 분석<br>50<br>관련 문헌조사                                                      | 50<br>해빙소멸지역에서 확보한 지구물리탐사자료 및 지질시료<br>정밀분석                                            | 200<br>200                                                                                         | 250<br>500                                                                                  | 500<br>북극 고위도<br>해빙소멸지역<br>해저환경 정밀진단                                        |        |
|                                  |                                             | 북극 고부가가치<br>전략광물·에너지자원<br>분포와 특성 연구                | 600<br>척지고원 해저광물<br>및 탄화수소 탐사<br>70<br>국제공동연구를 통한 북극해 다중채널<br>탄성파 자료 확보 및 공동분석       | 70<br>30<br>산·학·연 협동연구를<br>통한 북극 해저자원<br>잠재력 평가                                       | 500<br>중앙북극해<br>해저광물 및<br>탄화수소 탐사<br>100<br>다중채널 탄성파 탐사자료 속성분석을 통한 북극 에너지자원<br>부존근거 및 석유지질학적 특성 규명 | 600<br>차세대 쇄빙연구선을 활용한 북극<br>고위도 해역 지구물리탐사 및 지질시료<br>확보<br>100<br>100                        | 1400<br>200                                                                 |        |
|                                  | 북극<br>에너지·전략<br>광물자원<br>유망지역 도출<br>및 잠재력 평가 | 산·학·연 협동연구를<br>통한 북극 해저자원<br>잠재력 평가                | 100<br>탄성파 자료 공동해석을 통한<br>해저자원 유망지 도출                                                | 300<br>300                                                                            | 100<br>산·학·연 공동 탄성파 속성분석을 통한<br>북극 해저자원 잠재력 평가                                                     | 100<br>100                                                                                  | 50                                                                          |        |
|                                  |                                             | 북극해 해저자원정보체계<br>구축 및 전문인력 양성                       | 100<br>기존 자료 분석<br>100<br>인공지능 기반<br>속성분석<br>기술개발                                    | 100<br>산·학·연 공동 북극 탄화수소 부존 및<br>분포 근거 확보<br>500<br>인공지능 기반 속성분석 기술을 활용한<br>탄화수소 부존 확인 | 150<br>150                                                                                         | 100<br>산·학·연 공동 3차원 자료에 대한<br>자료처리 및 해석<br>100<br>200                                       | 150                                                                         |        |
|                                  |                                             |                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                                    |                                                                                             |                                                                             |        |
|                                  |                                             |                                                    |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                                    |                                                                                             |                                                                             |        |
|                                  | 소 계                                         |                                                    | 4,500                                                                                | 4,500                                                                                 | 4,500                                                                                              | 5,500                                                                                       | 11,000                                                                      | 30,000 |

## 제5장 사업 타당성 분석

제1절 정책적 타당성

제2절 과학기술적 타당성

제3절 경제적 타당성(경제적 파급효과)

제4절 사업계획 적절성



□ 개요

- 본 사업의 정책적 타당성, 과학기술적 타당성, 경제적 타당성, 사업계획 적절성을 종합적으로 검토
- 본 장은 사업 추진의 필요성을 정성적·정량적 측면에서 확인하고 공공재원 투입의 적절성을 입증하는 데 목적이 있음

□ 정책적 타당성

- 본 사업은 극지활동 진흥 기본계획, 해양수산과학기술 육성 기본계획, 해양수산발전 기본계획 등 상위계획과의 부합성이 높음
- 민간이 수행하기 어려운 고위험·고비용 영역으로, 공공재 성격의 데이터 인프라 구축을 위해 국고 지원이 타당함

□ 과학기술적 타당성

- 지질 정보 '블랙박스' 해소를 위해 탐사-해석-자산화를 연결하는 전주기 체계를 설계하여 과학적·기술적 타당성을 확보함
- 북극 해저지질환경 변화, 해저영구동토층 붕괴, 메탄 방출, 해저지반 안정성, 전략자원 잠재력 평가는 국가 차원의 선제적 연구가 필요한 핵심 분야임

□ 경제적 타당성

- 300억 원 투입 시 약 474억 원의 생산 유발, 220.3억 원의 부가가치 창출, 175명의 고용 유발 효과가 기대됨
- 본 사업은 단순한 연구개발 투자에 그치지 않고 관련 산업과 고용에 대한 경제적 파급효과를 함께 창출할 수 있음

□ 사업계획의 적절성

- 본 사업은 이슈-해결방향-연구과제-성과-활용방안이 상호 연계되는 구조를 갖추고 있으며, 기존 연구성과를 기반으로 후속성과 확장성을 동시에 확보하고 있음
- 또한 국제협력, 현장탐사, 정보체계 구축, 전략자원 평가가 유기적으로 연결되어 있어 사업 구성의 논리성이 높음

## 제5장 사업 타당성 분석

### 제1절 정책적 타당성

#### □ 정부 상위계획과의 부합성

- 본 사업은 국가 과학기술 혁신 정책과 해양수산 및 극지 연구 강화 기조에 긴밀히 부합하는 전략적 과제임
  - 특히 급격한 북극 환경 변화에 대응하여 국가 전략 자산인 데이터와 기술을 선제적으로 확보하고 과학 영토를 확장하려는 정부의 강력한 추진 의지를 뒷받침함
- 범부처 및 중앙부처가 수립한 주요 법정 계획과의 연계성을 검토한 결과, 본 사업은 미답지인 북극 프론티어 해역의 해저지질 정보를 국가 자산으로 축적하고 자원안보와 정책 대응 역량을 강화하기 위한 실질적 이행수단으로 평가됨

<표 5-1> 상위계획 부합성

| 검토 대상 상위계획                 | 주요 부합 내용 및 전략적 연계성 분석                                                                 | 부합도 |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 제5차 과학기술기본계획 ('23~'27)     | 전략 3(국가적 현안 해결 및 미래 대응)의 '우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대' 임무와 직결되며, 극한 환경 탐사 기술의 자립화 기조에 정합함 | 최상  |
| 2050 극지(북극) 활동전략           | 과학영토 확보, 데이터 주권 확립, 자원·항로 리스크 대응을 동시에 충족하는 실행형 프로그램으로서, 북극권 선도 국가 도약을 위한 핵심 동력을 제공함   | 최상  |
| 제1차 극지활동 진흥 기본계획 ('23~'27) | 차세대 쇄빙연구선 등 국가 극지 인프라와 연계하여 북극 고위도 프론티어 해역으로의 진출 및 독자적 탐사 역량 강화를 실천함                  | 최상  |
| 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획       | 극지·대양 미지영역에 대한 도전적 탐사와 전략 자원(천연가스, 망간 등) 확보를 통한 미래 신산업 창출 및 기술 자립화 방향에 부합함            | 최상  |
| 제3차 해양수산발전 기본계획 ('21~'30)  | 해양과학기술 역량 강화 및 해양영토 기반 확충을 목표로 하며, 공공성 높은 해저 지질 데이터 인프라 구축의 법적·정책적 근거를 실현함            | 최상  |
| 법적 근거 (육성법, 진흥법 등)         | 「극지활동 진흥법」 및 「해양수산과학기술 육성법」에 명시된 국가 R&D 추진 및 극지 인프라 활용 조항에 따라 명확한 사업 추진 당위성 보유        | 최상  |

○ 제1차 극지활동 진흥 기본계획('23~'27)과의 부합

- 제1차 기본계획은 국가 극지활동 역량을 고도화하기 위한 정책 프레임으로 북극 고위도 진출 기반 확대와 차세대 쇄빙연구선 활용, 고위도 관측·연구 확대를 핵심 방향으로 제시하고 있음
- 본 사업은 고위도 진출-현장 관측-데이터 생산-통합 평가로 이어지는 전주기 체계를 구성함으로써, 기본계획이 지향하는 현장 관측 기반 국가역량 강화 방향을 실질적으로 구현함
- 특히 차세대 쇄빙연구선 건조를 통해 북위 80도 이상 고위도 북극해 진출과 현장 관측 확대가 제시되어 있어, 본 사업의 고위도 관측 및 데이터 주권 확보 목표와 직접 연결됨

○ 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23~'27)과의 부합

- 제2차 기본계획은 해양수산 R&D의 중기 투자·추진 방향을 제시하며, 극지·대양 미지영역에 대한 도전적 탐사, 전략자원 확보, 공공 서비스 및 데이터 기반 고도화를 주요 과제로 반영하고 있음
- 본 사업은 북극 고위도 해역의 관측 공백을 해소하고 축적된 데이터를 체계적으로 관리·활용함으로써 연구개발 성과를 공공자산 형태의 데이터 인프라로 전환한다는 점에서 기본계획의 방향과 잘 부합함

○ 제3차 해양수산발전기본계획('21~'30)과의 부합

- 제3차 기본계획은 향후 10년간 해양수산 정책의 기본방향을 제시하며, 해양과학기술 역량 강화와 해양영토 기반 확충을 강조하고 있음
- 본 사업은 북극 고위도 관측역량 확보, 고신뢰 데이터 인프라 구축, 기후·항로·자원 관련 국가 의사결정 지원을 하나의 프로그램으로 통합하고 있어, 장기적 국가역량 축적형 투자라는 기본계획의 방향과 정합성이 높음

○ 2050 북극 활동전략과의 부합("과학영토·데이터 주권 + 기후·자원·항로" 동시 충족)

- 정부의 「2050 북극 활동전략」은 범부처 차원의 중장기 북극활동 방향을 제시하며, 기후위기 대응, 북극 현안 해결 기여, 외교협력 확대, 경제·산업 기회 발굴 등 북극활동 전반의 역량 강화를 강조하고 있음
- 본 사업은 고위도 관측 공백 해소, 데이터 관리 및 활용체계 강화, 자원 유망성 및 위험요인 평가를 통한 경제·안보 의사결정 지원이라는 구조를 갖추고 있어, 2050 전략의 다층적 목표를 실질적으로 구현하는 실행형 사업의 성격을 가짐

○ 종합적으로 볼 때, 본 사업은 국가 상위계획과의 부합성이 매우 높고 정부의 북극 정책 방향을 구체적인 연구개발사업으로 실현하는 수단으로서 정책적 타당성이 충분한 것으로 판단됨

<표 5-2> 상위계획과 부합성 평가

| 선택군 계획 \ 기본계획 | 부합도 낮음  | 부합도 보통  | 부합도 높음        |
|---------------|---------|---------|---------------|
| 부합도 높음        | 보통      | 대체로 적절  | <b>적절 (✓)</b> |
| 부합도 보통        | 대체로 부적절 | 보통      | 대체로 적절        |
| 부합도 낮음        | 부적절     | 대체로 부적절 | 보통            |

□ 정책 연속성·거버넌스 실효성

- 본 사업은 2026년 종료 예정인 기존 사업의 성과를 기반으로 후속 신규 기획으로 이어지는 구조를 갖고 있어 정책 연속성이 높음
- 사업 추진은 1단계('27~'29) 아라온호 기반 탐사·분석·플랫폼 구축과 2단계('30~'31) 차세대 해빙연구선 기반 고위도 확장으로 구분되며, 단계별 성과를 누적하면서 점진적으로 고도화하는 방식으로 설계되어 있음
- 또한 국제공동탐사, EEZ 연계 조사, 자료 공유와 공동 검토를 정량 성과와 연계함으로써 단순 협력 선언 수준이 아니라 실제로 작동하는 실행형 거버넌스 체계를 확보할 수 있음

□ 정부 지원 필요성 및 시급성

- 프론티어 해역은 민간이 단독으로 접근하거나 장기적으로 자료를 축적하기 어려운 영역으로 국가 주도의 공공 연구개발이 필수적임
- 해빙연구선, 극한 환경용 탐사장비, 국제협상 및 협력 채널 등은 모두 공공 인프라 의존성이 높은 요소로 정부의 지원 없이는 안정적인 추진이 어려움
- 본 사업에서 생산되는 해저지질·환경·항로·자원 정보는 항로, 자원, 안보, 기후위기 대응을 위한 국가 의사결정 자료로 활용될 수 있어 공공적 성격이 매우 큼
- 우리나라가 독자적인 탐사자료를 충분히 확보하지 못할 경우, 북극 거버넌스와 국익 경쟁에서 자료 접근성과 활용 측면에서 구조적 약점으로 작용할 수 있음
- 해빙 감소로 미탐사·고위도 해역에 대한 접근성이 확대되는 현 시점은 선점형 탐사에 유리한 기회 구간이며, 착수가 지연될수록 기회비용이 커질 수 있음
- 특히 차세대 해빙연구선이 2030년 취역 예정인 점을 고려할 때, 그 이전에 핵심 자료와 탐사기술을 충분히 확보하지 못하면 취역 초기 성과 창출에 공백이 발생할 우려가 있음

- 아울러 국제 대형 과학프로그램(IODP, ICDP 등)과 연계 가능한 데이터 축적 시기를 놓칠 경우, 국제협력 주도권 확보가 더욱 어려워질 수 있음

## 2. 사업 추진 위험요인

### □ 자원 조달 가능성

- 본 사업은 북극 해저지질정보를 고해상도 자료, 3차원 지질구조, 지질재해·자원유망성 통합평가 형태의 국가 공공자산으로 구축하는 공공 R&D 성격이 강하므로 민간 투자보다는 정부의 전액 국고 지원이 타당함
  - 북극해 해저지질 조사는 쇄빙연구선 운항비, 고가 장비(MCS, SBP, MBES 등)의 운영·유지, 대규모 자료처리, 장기 데이터 관리체계가 결합되는 사업임
  - 따라서 연차별 예산이 불안정할 경우 관측과 탐사의 공백이 발생, 이는 자료 연속성과 사업 성과를 훼손할 가능성이 있으므로 다년도 안정 자원 확보가 중요함
- 국가 재정 운용 계획 분석 결과, R&D 분야의 재량 지출은 연평균 약 8.8% 증가가 계획되어 있어 주관 부처인 해양수산부의 자원 조달 능력에는 무리가 없을 것으로 판단됨
  - 관련 세부 분야별로도 산업·중소기업·에너지 분야 연평균 6.9%의 증가율을 보이고 있어서 충분한 자원 지원이 가능하다고 판단됨
- 특히 차세대 쇄빙연구선 건조에 약 3,361억 원 규모의 대규모 투자가 이미 추진되고 있다는 점은, 본 사업과 같은 북극해 해저지질 조사 사업에 대한 국가 차원의 정책 의지와 인프라 지원 가능성을 뒷받침하는 근거가 됨
- 따라서 본 사업은 재정적 측면에서도 안정적 추진 가능성이 높으며, 국가 인프라 투자와 연계된 후속 연구개발사업으로서 자원 조달의 타당성이 충분한 것으로 판단됨

(단위: 조 원, %)

<표 5-3> 2025-2029 관련분야 국가 자원배분계획

| 구분          | '25         | '26         | '27         | '28         | '29         | '25~'29<br>연평균 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| 총지출         | 673.3 (2.5) | 728.0 (8.1) | 764.4 (5.0) | 802.6 (5.0) | 834.7 (4.0) | 5.5            |
| 환경          | 13.0 (3.8)  | 14.0 (7.7)  | 14.5 (3.4)  | 14.9 (3.1)  | 15.3 (2.7)  | 4.2            |
| R&D         | 29.6 (11.5) | 35.3 (19.3) | 37.3 (5.8)  | 39.4 (5.5)  | 41.4 (5.1)  | 8.8            |
| 산업·중소기업·에너지 | 28.2 (0.7)  | 32.3 (14.7) | 34.0 (5.2)  | 35.6 (4.6)  | 36.8 (3.4)  | 6.9            |

※ 출처: 2025-2029 국가재정운용계획, 기획재정부, 2025. 8. 29.

## □ 법·제도 위험요인

- 국내 법·제도 측면에서 본 사업의 추진을 직접적으로 제약할 만한 요인은 크지 않은 것으로 판단됨
- 다만 북극권의 지정학적 긴장 고조로 인해 국제공동조사 일정이 지연되거나 협력 범위가 일부 조정될 가능성은 있음. 그러나 이러한 위험은 사업 초기 단계에서 조사 대상 해역과 조사 범위를 합리적으로 설정하고 단계적으로 접근하는 방식으로 상당 부분 완화할 수 있음
  - 사업 설계 단계에서 조사 해역의 법적 지위(공해/EEZ/대륙붕), 조사 방식(비침습/탄성파), 산출물의 공개 범위와 활용 수준을 구분하여 설계할 필요가 있음
  - 아울러 국제협력 대상국과의 협의 과정에서는 허가, 자료공유, 결과 활용 범위 등에 대한 사전 검토를 충분히 수행하여 법·제도적 불확실성을 최소화할 필요가 있음

## 제2절 과학기술적 타당성

### 1. 문제/이슈 도출의 적절성

#### □ 문제/이슈 도출의 배경

- 본 사업은 북극 해빙 감소로 새롭게 개방되고 있는 고위도 및 미탐사 해역(프론티어 해역)을 대상으로 국가 차원의 과학영토 확장과 자원안보 확보를 위해 해결이 필요한 핵심 지질·지구물리 이슈를 도출하고자 한 것임
- 특히 북극권 선점 경쟁이 심화되는 상황에서 우리나라의 독자적 정보 부족이 향후 국가 전략 수립과 국제협력 추진 과정에서 중대한 제약요인으로 작용할 수 있다는 점에 주목하였으며, 이러한 문제의식은 학계와 산업계의 요구를 함께 반영한 것임

#### □ 북극 고위도 프론티어 해역의 접근성 증대와 선점 경쟁 심화

- 기후변화에 따른 해빙 감소는 과거 접근이 어려웠던 해역에 대해 항로 활용과 자원개발 가능성을 확대시키는 한편, 주요국 간 과학적 영향력과 자료 선점 경쟁을 촉발하고 있음
- 특히 프론티어 해역에 대한 선제적 탐사자료 확보 여부는 향후 북극 거버넌스 내 발언권과 국제협력 주도성에 영향을 미치는 핵심 요소로 부상하고 있음

□ 미탐사 해역의 독자적 정보 부재에 따른 전략 수립의 한계

- 북극 해저지형, 지층 구조, 저질 정보와 같은 기초 지질자료의 부족은 북극항로의 안전 운항과 해저 인프라 구축 전략 수립 과정에서 큰 불확실성을 초래함
- 외부 자료에 의존하는 기존 방식만으로는 국가 차원의 독자적 극지 전략을 수립하는 데 한계가 분명하며, 이를 해소하기 위해서는 정밀 해저지질정보를 직접 확보하고 체계적으로 자산화하는 노력이 필요함

□ 자원 안보 요구에 부합하는 전략 자원 유망구역 정보 시급성

- 천연가스, 가스하이드레이트, 해저망간 등 북극권에 부존할 가능성이 큰 전략자원에 대해 독자적인 평가기술과 유망구역 도출 역량을 확보하는 일은 국가 에너지·자원안보 측면에서 중요한 과제로 제기되고 있음
- 자원 잠재력을 보다 정밀하게 평가하기 위해서는 해저지질환경 변동성 진단 기술과 연계된 통합 탐사체계를 구축하고 이를 기반으로 자원 유망구역을 체계적으로 도출할 필요가 있음

[표 5-4] 이슈, 해결방향 및 영향 연계도

| 도출된 핵심 이슈               | 기술적 해결 방향                      | 국가적 성과/영향                              |
|-------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| ① 지질 환경 불확실성 및 인프라 리스크  | 해저 지질 변동성 관측 및 정밀 해석 기술 개발     | 지질 재해(해저 산사태 등) 예방 및 인프라 안전성 확보        |
| ② 전략적 데이터 공백(Black Box) | 해저 지형 및 지질 데이터 조사 및 통합 정보체계 구축 | 북극항로 운항 안전성 제고 및 데이터 주권 확립             |
| ③ 글로벌 자원·주권 경쟁 심화       | 에너지 및 전략 광물 잠재력 평가 및 국제 협력 주도  | 북극 거버넌스 내 과학적 영향력 강화 및 글로벌 북극연구 리더쉽 견인 |

## 2. 사업목표 적절성

### □ 사업목표의 설정

- 본 사업의 최종 목표는 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점을 통한 지질·환경·항로·자원 가치 창출로 설정되어 있음
- 이는 앞서 도출한 지질정보 공백 문제를 해소하기 위해 다음과 같은 4대 중점분야를 중심으로 추진됨
  - 북극 프론티어 해역 해저지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 (데이터 주권 확보)
  - 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 (북극항로 안전과 물류 가치 창출)
  - 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 (환경/리스크 대응)
  - 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가 (자원 안보 실현)

## 3. 수혜자 표적화의 적절성

### □ 국가 정책 결정, 경제 활성화, 과학적 역량 강화 관점에서의 수혜자 구분

#### ○ 정부 및 공공기관 (정책적 수혜)

- 해양수산부: 북극 진출 전략 수립의 과학적 근거를 확보하고 북극권 과학 영토 확장 정책의 실효성 제고
- 외교부: 북극이사회 및 국제 해저 기구와의 협상에서 독자적 탐사 데이터를 활용해 국가의 발언권 및 전략적 위상 제고

#### ○ 산업계(경제적 수혜)

- 에너지·조선·방위산업 기업: 북극해 자원 개발 유망지 정보와 항로 안전을 위한 해저 지반 정보를 활용해 미래 신산업 창출 및 민간 투자 리스크 축소
- 해운·물류 기업: 정밀 해저지형 데이터를 통해 북극항로의 안전 운항을 확보하고 사고 위험에 따른 경제적 손실 예방

#### ○ 연구/학계 및 차세대 과학자 (기술적 수혜)

- 전문 연구 인력: 세계적 수준의 북극 지층 구조 및 저질 분석 데이터를 활용해 국제 공동 연구에서의 리더십 확보
- 차세대 과학자: 북극 프론티어 해역의 현장 탐사 참여 기회를 제공받아 글로벌 네트워크 진입 및 극지 전문 인력으로 성장할 수 있는 지속 가능한 연구 토양 마련

## □ 과학적 타당성

- 북극 해저환경 변화·메탄 방출·해저자원 등 개별 주제 중심 성과를 바탕으로, 프론티어 해역에서의 통합 과학 해석 필요성이 충분함
- 기존 연구는 특정 해역·제한된 공간 범위에 집중되어, 북극 전역(미답해역·중앙북극해 포함)으로의 공간 확장성과 장기 연계성이 부족했음
- 2차원 탄성파 자료 의존도가 높아 복잡한 구조와 환경변화를 3차원적으로 통합 해석하는데 제약이 있었으므로 광역 관측과 정밀진단 체계로의 전환은 과학적으로 타당함
- 새로운 북서항로 개척을 위한 위험지수 산출을 위한 북극해 지구물리 탐사활동은 과학적 정밀성을 높일 수 있음
- 조사·해석·성과물·활용을 연결하는 통합체계는 해저지질도 작성·변동성 진단·자원 잠재력 평가를 동시에 설명 가능한 과학적 프레임을 제공함
- 산출물(구간별 해저지질도, 변동성 진단 지표/시나리오, 유망지·잠재력 평가)은 단일 결론보다 근거 기반 우선순위화·불확실성 관리를 중심으로 설계되어 과학적 신뢰도를 높임

## □ 기술적 타당성

- 본 사업은 프론티어 탐사·통합해석·정보체계 자산화로 이어지는 기술개발 구조를 통해, 성과가 반복 활용 가능한 형태로 축적되도록 설계되어 있다는 점에서 기술적 타당성이 높음
- 기본탐사(다중채널 탄성파, SBP, MBES)와 첨단탐사(ROV, CSEM, 3D 탐사), AI 기반 자료처리와 속성분석, 데이터 관리체계를 결합한 현장 적용형 기술 체계로 구현 가능성이 높음
- 쇄빙연구선, 극한환경 장비, 국제협력 기반 허가 및 자료 활용 등 공공 인프라 의존도가 높은 영역이라는 점에서 정부 R&D로 추진할 당위성이 분명함
- 연구 로드맵도 2027~2029년 기반 내재화와 2030~2031년 확장·고도화로 구분되어 있어 단계적 추진 구조가 합리적임
- 또한 시범 구축·검증·확대 적용이라는 기술 확보 구조와 데이터 누적에 따른 분석 성능 향상, 플랫폼 기반 재정리와 재활용 구조를 갖추고 있어 사업 성공 가능성을 높이는 설계로 평가됨
- 북서항로는 수많은 섬, 복잡한 수심 변화, 해저 장애물 등으로 인해 항로 안전성 검토가 필수적인 해역이며, 이를 위한 위험지수 산출과 지구물리탐사 기반의 해저환경 분석은 충분한 기술적 타당성을 가짐

### 제3절 경제적 타당성(경제적 파급효과)

□ 예산, 인력 계획 및 경제적 파급효과분석

○ 2027년부터 5년간 300억 원의 예산을 투입 계획

- 2031년에는 신규 쇄빙연구선 구축, 운영으로 인하여 예산 확대를 추정

| 예산<br>(단위:<br>백만원) |                                                    | 2027  | 2028  | 2029  | 2030  | 2031   | 합계     |
|--------------------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                    | 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보<br>선점(현장탐사/해저지질 및<br>탐사장비 개발) | 1,900 | 1,500 | 1,800 | 2,300 | 4,000  | 11,500 |
|                    | 북서항로 개척을 위한<br>지구물리탐사(자료선점/국제<br>공동)               | 100   | 500   | 200   | 200   | 1,000  | 2,000  |
|                    | 북극 해저지질환경 변동성<br>관측과 온난화 가속화<br>정밀진단(환경/국제공동)      | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 2,000 | 4,000  | 10,500 |
|                    | 북극 에너지·전략광물자원<br>유망지역 도출 및 잠재력<br>평가(해저자원)         | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,000  | 6,000  |
|                    | 연도별 합계                                             | 4,500 | 4,500 | 4,500 | 5,500 | 11,000 | 30,000 |

| 인력<br>(명수) |                                                    | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 합계  |
|------------|----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-----|
|            | 북극 프론티어 해역<br>해저지질정보<br>선점(현장탐사/해저지질 및<br>탐사장비 개발) | 20   | 20   | 20   | 25   | 45   | 130 |
|            | 북서항로 개척을 위한<br>지구물리탐사(자료선점/국제공<br>동)               | 5    | 5    | 5    | 10   | 10   | 35  |
|            | 북극 해저지질환경 변동성<br>관측과 온난화 가속화<br>정밀진단(환경/국제공동)      | 20   | 20   | 20   | 25   | 25   | 110 |
|            | 북극 에너지·전략광물자원<br>유망지역 도출 및 잠재력<br>평가(해저자원)         | 12   | 12   | 12   | 15   | 15   | 66  |
|            | 연도별 합계                                             | 57   | 57   | 57   | 75   | 95   | 341 |

○ 북극해 자원 개발 등을 고려하여 관련산업을 도출하여 파생효과 분석을 실시

|                    | 소분류<br>코드 | 생산유발계수 | 부가가치<br>유발계수 | 고용유발계수 |
|--------------------|-----------|--------|--------------|--------|
| 선박                 | 410       | 2.252  | 0.649        | 5.138  |
| 수상운송서비스            | 540       | 1.178  | 0.299        | 1.068  |
| 원유 및 천연가스          | 062       | 1.405  | 0.684        | 0.000  |
| 금속광물               | 071       | 1.107  | 0.829        | 8.559  |
| 정보서비스              | 610       | 1.634  | 0.779        | 4.258  |
| 보험서비스              | 660       | 1.901  | 0.874        | 7.242  |
| 연구개발               | 700       | 1.633  | 0.861        | 7.850  |
| 기타 과학기술 및<br>전문서비스 | 729       | 1.530  | 0.900        | 6.610  |
| 평균                 |           | 1.580  | 0.734        | 5.818  |

- 2027년부터 5년간 300억 원이 투입되었을 경우, 생산유발효과 474억 원, 부가가치유발효과 220.3억 원, 고용유발효과 175명으로 추정
- (생산유발효과) 5년간 투입예산 300억 원 기준 158% 수준인 474억 원으로 추정
- (부가가치유발효과) 부가가치유발효과는 약220.3억 원으로 투입대비 73.5% 수준의 부가가치를 창출
- (고용유발효과) 5년간 약 175명의 고용이 유발되는 것으로 나타나 연간 약 35명 수준의 고용창출을 기대함

| 총 투입 예산(억 원) | 생산유발계수 평균       | 생산유발효과    |
|--------------|-----------------|-----------|
| 300          | 1.580           | 474억 원    |
|              | 부가가치유발계수 평균     | 부가가치유발효과  |
|              | 0.734           | 220.3억 원  |
|              | 고용유발계수 평균/10억 원 | 고용유발효과(명) |
|              | 5.818           | 174.5명    |

□ 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질 탐사활동의 경제사회적 파급효과

- 북극해 해빙감소는 새로운 경제활동의 기회를 주고 있으며, 북극 프론티어 해역 해저지질 탐사 활동은 북극해 경제활동의 시발점으로서 역할을 함
- 북극해 해저지질탐사활동은 국가 주권 및 전략, 물류 혁신, 자원 안보, 인프라 안전 및 기후 대응의 관점에서 경제활동의 지원을 수행함
  - 연구활동은 북극 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축, 북서항로 개척 지구물리탐사, 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단, 북극 에너지·전략광물자원 조사로 북극해 경제활동의 주요 기반임
  - 연구활동은 국가차원의 편익으로 국가 전략, 물류, 자원, 인프라 및 기후대응 관점에서 경제사회 효과를 도출할 수 있음

| 구분         | 주요 내용 및 경제적 잠재력                                        |
|------------|--------------------------------------------------------|
| 국가 주권 및 전략 | 해양 영토 주권 확보를 위한 과학적 근거 마련 및 국가 전략 의사 결정 지원             |
| 물류 혁신      | 북서항로 개척 시 부산~로테르담 거리 37% 단축. 연간 수조 원 규모의 물류 부가가치 창출 기대 |
| 자원 안보      | 배터리 및 이차전지 핵심 광물(니켈, 코발트, REE 등) 공급망 안정화 및 신산업 주도권 확보  |
| 인프라 안전     | 해저 케이블, 플랜트 설치를 위한 지반 안전성 평가로 건당 수억 원 규모의 단선 사고 회피     |
| 기후 대응      | 메탄 방출 모니터링 및 CCS(탄소 포집·저장) 장소 확보를 통한 탄소 비용 절감 및 재난 방어  |

□ 북극해 해저지질탐사 경제성분석 도출의 한계

- 다양한 산업의 경제사회 파급효과에도 불구하고 경제적 가치를 정량화하는 데 한계를 갖고 있음
  - 시차의 불확실성으로 인한 경제성 분석의 어려움
    - 탐사 성과가 실제 상업적 이익으로 연결되기까지는 장기간이 소요될 가능성이 크며, 자원 개발이나 항로 활용의 실현 시점도 불확실성이 큼.
    - 따라서 현재 시점에서 미래 편익과 할인율을 정확히 가정하여 경제성을 산정하는

데에는 구조적인 어려움이 존재함

- 파급효과 관련 산업내에서 복합적 가치사슬 인과관계로 분석 한계
  - 물류비 절감 효과가 해저지질탐사 성과에 의한 것인지, 선박 기술 발전이나 국제 정세 변화에 따른 것인지를 명확히 구분하기 어려움.
  - 탐사 성과와 경제적 결과 간에 분명한 연관성이 존재하더라도, 개별 요인의 기여도를 계량적으로 분리해 산정하는 데에는 한계가 있으며, 이에 대해 이해관계자 간 이견이 발생할 가능성도 있음
- '해양 영토 주권 확보'나 '기후 재난 방어'는 국가 안보 및 공공 안전으로 시장가격이 존재하지 않는 비시장 재화(Non-market goods)로, 조건부 가치측정법(CVM) 등을 사용하더라도 분석 시점 등에 따라 결과의 변동성이 큼
- 지정학적 및 환경적 리스크로 인한 미래 추정 어려움
  - 국가 간 영유권 갈등, 국제 환경규제 강화, 항로 운영 여건 변화 등 예측이 어려운 외부 변수로 인해 경제성 분석의 전제조건이 지속적으로 달라질 수 있음
  - 이로 인해 장기적 경제성 분석의 정확성과 안정성을 확보하는 데 한계가 있음

#### □ 북극해 해저지질탐사 활동의 국가차원 정책적 지원 필요

- 북극해 해저지질 탐사는 현재 제시되는 경제성으로 접근할 수 없는 영역의 연구활동임
  - 국가적 차원의 '전략적 보험'이자 '미래 인프라 구축'으로 접근하여 지원해야 할 영역임
- 또한 단기적인 직접 성과(Outcomes)에 접근하기 보다는 국가 안보 및 미래 북극관련 산업 생태계 조성이라는 거시적 파급효과(Impacts)를 중심으로 타당성을 접근해야 함
- 북극해 해저지질 탐사를 통해 획득한 3D 공간 데이터와 지질 정보 자체를 국가 데이터 자산으로 간주하여 정보의 활용 가능성(Option Value)에 무게를 둔 가치 평가 체계 도입이 필요함

#### □ 북극해 해저지질탐사 활동으로 인한 경제사회적 파급성

- 북극 프론티어 해역 해저지질 정보체계 구축으로 해저지질 정보 선점과 정보의 가치(Vol) 접근
  - 북극 해저지질정보를 확보하고 독자적인 체계를 구축하는 활동은 '정보의 가치'(Vol, Value of Information) 창출 과정임
  - 경제학 관점에서 정보의 가치는 정보가 없을 때의 불확실한 기대이익과 정보 획득 후 확실한 기대이익간의 차이로 볼 수 있음
  - 북극해와 같이 탐사비용이 막대하고 환경 리스크가 높은 지역에서는 사전 정밀 지질학적 정보를 보유하는 것은 국가 차원의 투자결정의 실수를 방지하고 탐사 성공률을 높이

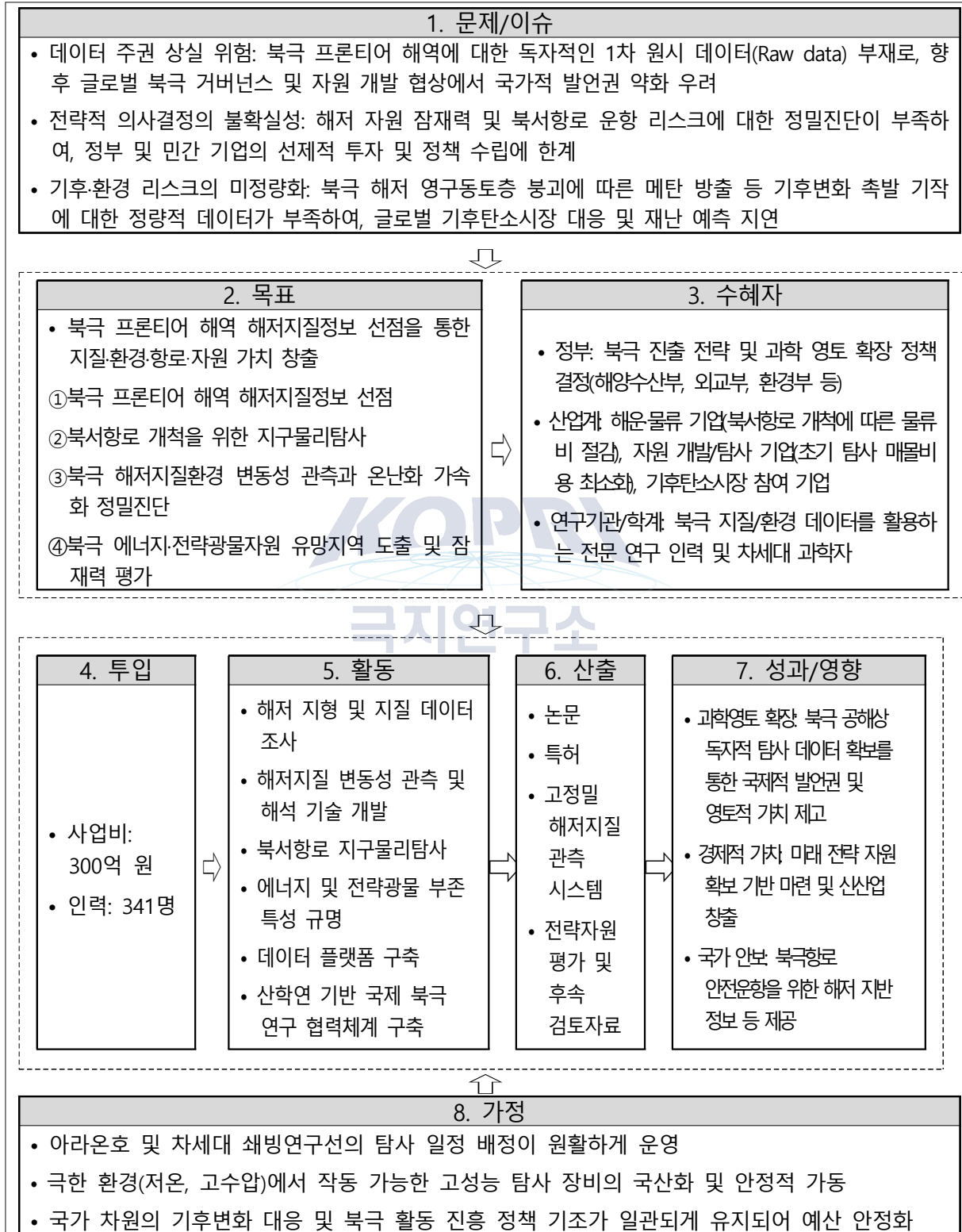
- 면서 매몰비용을 최소화할 수 있음
- 북극 프론티어 해역 해저지질 정보체계 구축은 해양경계 획정의 과학적 근거 확보와 함께 국가에서 북극해에 대한 정책 결정의 중요한 자료로서 역할을 함
- 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사 활동은 북극해 기반 물류산업의 부가가치 창출의 파급성을 제시
- 북서항로는 캐나다 북극 군도를 관통하여 대서양과 태평양을 연결하는 항로로 러시아와 분쟁 등 발생시 대안으로 역할 가능함
  - 러-우 전쟁과 같은 국가 간 분쟁 상황이 발생할 경우, 다양한 해운 항로를 확보하는 것은 국가 차원의 물류 포트폴리오 전략에 중요한 역할을 함
  - 북서항로는 많은 섬과 좁은 수로 등으로 항행위험요소가 많아서 해저지질 탐사자료가 부족하므로, 관련 조사활동은 북서항로 활용 기반 구축에 중요한 역할을 함
  - 중점영역 2의 연구활동은 북서항로 운항시 발생할 수 있는 위험요소를 최소화하는 데 중요한 역할을 할 수 있음
- 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가는 국내 광물자원 수입 공급망을 안정화하고 이차전지 등 신산업 주도권 확보에 기여할 수 있음
- 북극해 해저에는 망간단괴와 해저 열수광상 등이 부존되어 있으며, 천연가스 매장지로서 매우 중요한 해역임
  - 중점영역 4에서 수행하는 연구활동은 고부가가치 전략광물의 존재 유망해역에 대한 정보를 선점할 수 있음
  - 또한 북극해의 극한환경에서 탐사 경험은 관련 기업(엔지니어링, 조선, 에너지)들이 세계 시장으로 진출할 수 있는 트랙레코드(Track Record)가 될 수 있음
  - 대학·연구소 간 협력체계는 기초과학 데이터가 산업적 가치로 전환되는 선순환 구조를 형성함으로써, 북극해 연구활동을 통한 국가 연구생태계 조성의 기반 역할을 함
- 북극해 정밀 해저지형/지반조사활동은 북극해에서 수행하는 해저케이블 건설 등에서 발생하는 사고 위험을 줄이는 효과 발생
- 북극해를 통과하는 해저케이블은 아시아-유럽의 통신 지연시간을 단축시킬 수 있어 미래 해저케이블 건설의 새로운 영역으로 대두될 수 있음
- 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 연구활동은 전 지구적 기후재난 피해 방어에 기여하고 탄소비용 저감에 역할을 함
- 북극 해저 영구동토층과 가스하이드레이트는 거대한 탄소저장소 역할을 하고 있음
  - 기온상승으로 인하여 해빙되면서 온실가스인 메탄이 대기로 방출되면 온난화를 가속화하는 피드백이 유발됨

- 중점영역 3에서 수행하는 메탄 방출 기작 규명과 단기 방출 시나리오 평가는 거대한 기후위험을 줄일 수 있도록 '조기경보 시스템'의 역할 수행
- 해저영구동토층의 분포와 특성을 정밀하게 파악하여 북극해 지역별 가스 방출 가능성 등을 과학적으로 예측한 정보는 국가 차원의 기후변화 전략 수립에 필요 자료가 됨
- 향후 국제 탄소시장과 기후보험 산업에서 리스크를 정교하게 산정하는 근거 데이터로 활용되어 불필요한 사회적 비용 지출을 막는 편익을 제공함

| 현황                          | 주요 이슈<br>(Issues)                              | R&D<br>(핵심<br>연구과제)                               | 직접 성과<br>(Outcomes)                               | 파급효과<br>(Economic<br>Impacts)                    |
|-----------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 북극 해빙<br>감소 및<br>급격한<br>온난화 | 해양 영토 주권<br>확보 및 지리<br>정보 주권 선점<br>필요          | 중점 1: 북극<br>프론티어 해역<br>해저지질 정보<br>선점              | 독자적 해저지질<br>정보체계 및 3D<br>공간데이터인프라(<br>SDI) 구축     | 해양 경계 획정의<br>과학적 근거 확보<br>및 국가 전략<br>의사결정 지원     |
| 북극 해빙<br>급감                 | 북극항로 상용화<br>가속: 운항 가능<br>기간 확대 및<br>안전성 우려     | 중점 2:<br>북서항로<br>개척을 위한<br>지구물리탐사                 | MBES-SBP 기반<br>고해상도 항로<br>위험지수 도출                 | 부산-로테르담 거리<br>37% 단축, 연간<br>수십조 원 물류<br>부가가치 창출  |
| 해저<br>영구동토<br>층 해빙          | 핵심 광물<br>공급망 안보:<br>배터리용 전략<br>자원 확보 경쟁        | 중점 4: 북극<br>에너지·전략광<br>물자원<br>유망지역 도출<br>및 잠재력 평가 | 니켈·코발트·REE<br>등 고부가가치<br>전략광물 부존<br>유망구역 정보<br>선점 | 자원 수입 공급망<br>안정화 및 이차전지<br>등 신산업 주도권<br>확보       |
| 해양 환경<br>및 지형<br>급변         | 해저 인프라<br>수요 급증:<br>케이블, 플랜트<br>설치 및 지반<br>안전성 | 중점 1: 정밀<br>해저지형/지반<br>조사                         | AI 기반 정밀<br>지질해석 및 해저<br>지반 안전성 평가<br>모델 구축       | 해저 케이블 단선<br>사고 회피(건당<br>수억 원 절감) 및<br>인프라 최적 설계 |
| 이상기후<br>및<br>지질재해<br>증가     | 기후 시한폭탄<br>작동: 메탄 대량<br>방출 및 기후<br>재난 위험       | 중점 3: 북극<br>해저지질환경<br>변동성 관측과<br>온난화 가속화<br>정밀진단  | 4D 탄성파 탐사<br>기반 메탄 방출<br>모니터링 및 CCS<br>저장소 확보     | 전 지구적 기후<br>재난 피해 방어<br>기여 및 탄소비용<br>절감          |

## 제4절 사업계획 적절성

### □ 논리모형 도출



---

## 제6장 기대성과 및 활용 방안

---

### 제1절 기대성과 제2절 활용방안



#### □ 개요

- 본 사업을 통해 창출될 기술적·과학적·정책적 성과와 활용 방향 제시
- 본 사업은 연구성과를 단순 산출물 수준이 아니라 국가 전략자산과 미래 활용 기반으로 연결하는 데 초점을 두고 있음

#### □ 기대성과

- 북극 프론티어 해역에 대한 해저지질 정보 확보와 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 통해 국가 차원의 북극 데이터 자산과 해양과학영토를 확장할 수 있음
- 북서항로 관련 해역의 해저지형·천부지층·위험징후 정보를 체계적으로 확보함으로써, 향후 항로 안전성 검토와 운항 위험요인 진단에 활용할 수 있는 항로 안전성 검토와 향후 활용 기반을 마련할 수 있음
- 해저영구동토층, 메탄 방출, 해저지질환경 변화에 대한 정밀진단을 통해 기후위기 대응과 온난화 가속화 현상 규명을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있음
- 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가를 통해 미래 자원안보 및 공급망 대응 기반을 마련할 수 있음
- 무인 탐사기술, 고해상도 탄성파 장비, AI 기반 분석기술 등을 통해 첨단 빙권해역 해저탐사기술의 자립화를 촉진할 수 있음

#### □ 활용 방향

- 구축된 해저지질 정보체계는 북극항로 안전성 검토, 해양 인프라 구축 검토, 기후안보 정책 수립, 국제협력 협상 등 다양한 정책 분야의 기초자료로 활용될 수 있음
- 전략자원 관련 정보는 향후 북극 전략자원 대응전략, 공급망 다변화 정책, 산·학·연 공동연구 확대에 활용될 수 있음
- 또한 저질·지음향 등 핵심 자료는 국가안보 및 방위산업 측면에서도 전략적 활용 가치가 큼

#### □ 종합적 의미

- 본 사업은 단기적으로는 북극 해저지질정보 확보와 연구역량 강화를 목표로 하나, 중장기적으로는 국가 전략자산 축적과 북극 거버넌스 참여 확대를 지원하는 국가 전략형 기반사업의 성격을 가짐

## 제6장 기대성과 및 활용방안

### 제1절 기대성과

#### 1. 기술적 측면

##### ○ 프론티어 해역 자료 확보-종합해석-정보체계 자산화 기술 체계 확립

- 고위도·미탐사 프론티어 해역에서 지속적인 탐사를 통해 자료를 확보하고 해저지형·천부지층·심부구조·저질·시료를 종합적으로 해석하여 구간별 해저지질도를 구축할 수 있는 기술적 기반을 마련함
- 확보된 자료와 해석 결과를 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계에 집적·갱신함으로써, 단발성 조사 중심의 성과를 장기 누적형 국가 데이터 자산으로 전환할 수 있는 기반을 확보함

##### ○ 다중 자료 결합 해석 역량 강화

- MBES 기반 해저지형과 SBP 기반 천부지층 정보를 결합하여 위험지형/천부 위험징후의 위치·범위를 일관되게 정리할 수 있는 해석 기반을 확보함
- 다중채널 탄성파탐사, 시료(퇴적학/지화학/물성), 무인탐사(ROV·AUV), CSEM, 3차원 탄성파탐사 자료와 연계할 경우 핵심 구간의 구조·물성 해석 신뢰도를 높일 수 있으며, 이를 통해 프론티어 해역의 복잡한 지질구조와 해저환경 변동을 보다 정밀하게 설명할 수 있는 기술 기반을 확보함

##### ○ 북서항로 관련 해역 MBES·SBP 지구물리탐사 수행체계 구축

- 아라온호 MBES를 활용하여 수심과 해저지형 자료를 확보하고 급경사 구간, 지형 급변 구간, 장애물 가능 구간 등 위험요소 후보를 도출할 수 있는 기술적 체계를 구축함
- SBP를 통해 천부층서, 매물 구조, 연약지반 가능 구간, 천부 이상징후를 판독하고 이를 MBES 결과와 연계하여 주의 구간을 도출할 수 있는 기본 해석 기반을 확보함
- 캐나다 GSC와의 협력을 통해 핵심 구간의 접근성과 자료 연계성을 높이고 향후 차세대 쇄빙연구선과 연계한 후속 탐사로 확장할 수 있는 기술적 기틀을 마련함

##### ○ 해저지질환경 변동성 정밀진단 핵심 기술 축적

- 해저영구동토층과 가스하이드레이트에 대한 시계열 관측, 고정밀 이미징, 처리·해석 역량을 바탕으로 분포와 특성, 변화 징후를 진단할 수 있는 기술 기반을 강화함
- 메탄 방출구조의 정밀 관측, 메탄 플럭스 DB 구축, 단기 방출 시나리오 평가, 생지화학·미생물 기능 변동성 분석을 연계함으로써 해저지질환경 변화의 기작 규명과 예측 근거를 체계적으로 축적할 수 있음

- 국제 시추 프로그램과의 연계 기반을 마련함으로써 관측-분석-검증으로 이어지는 과학적 근거 축적 체계를 강화할 수 있음

#### ○ 유망지역 도출 및 잠재력 평가기술 기반 마련

- 다중채널 탄성파 기반 속성분석, 자료 품질 향상, AI 보조 해석, 부존 평가를 통해 에너지자원 후보 구간의 정량적 근거를 확보할 수 있는 기반을 마련함
- 전략광물에 대해서는 드렛지·코어·ROV 기반 현장탐사와 시료 분석(광물학·지화학)을 통해 분포와 형성 특성을 규명할 수 있는 분석체계를 확보함
- 에너지자원(지구물리 기반)과 전략광물(시료 기반) 결과를 종합하여 유망구간의 근거자료와 추가 확인 필요 요소를 함께 제시할 수 있는 잠재력 평가 기반을 확립함

## 2. 경제 산업적 측면

#### ○ 북극항로 관련 안전 정보 수요 대응과 운영 리스크 저감

- 북서항로 관련 해역에서 확보한 MBES-SBP 기반 기초자료는 수심, 지형, 천부 위험징후 정보를 제공함으로써 운항 계획 수립과 위험관리 검토에 필요한 사전 자료로 활용될 수 있음
- 프론티어 해역 탐사 결과와 해저지질도, 기초자료, 변동성 진단 결과는 북극항로 관련 안전성 검토의 근거자료로 활용이 가능함

#### ○ 탐사·평가 의사결정 비용 절감과 투자효율 제고

- 에너지·전략광물 유망지와 잠재력 평가 결과를 근거 중심으로 제시함으로써 공공과 민간의 탐사 우선순위 설정과 후속 조사 설계에 필요한 시간과 비용을 줄일 수 있음
- 국제협력 기반 자료 확보와 결과 검토를 통해 자료 활용성을 높이고 국내 산업계와의 연계를 통해 후속 검토와 활용 가능성을 확대할 수 있음

#### ○ 국제협력 확대로 기술·자료 교류의 활용도 제고

- 캐나다 GSC와의 공동탐사, EEZ 연계 탐사 추진 등 국제 협력 구조를 통해 공동 연구 참여 범위를 확대하고 자료 교류와 공동 성과 도출 기반을 강화할 수 있음
- 이를 통해 국내에서 확보한 자료와 기술의 활용 범위를 넓히고 후속 국제협력 사업으로 연결될 수 있는 기반을 축적할 수 있음

## 3. 사회적 측면

#### ○ 기후·환경 리스크 대응 역량 강화

- 해저영구동토층 붕괴와 메탄 방출 기작을 정밀하게 진단함으로써 북극발 기후위기 리스크에 대한 과학적 불확실성을 줄이고 공공 안전과 환경 보전 측면의 근거를 강화할 수 있음
- 단기 방출 시나리오와 위험구간 정보는 공공 리스크 소통과 대응체계 마련에 활용될 수 있음
- 국가 전략자산형 데이터 축적과 과학영토 확장 기반 강화
  - 중앙북극해를 포함한 프론티어 해역의 자료 공백을 해소하고 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계로 누적·갱신함으로써 국가 차원의 전략정보 축적과 중장기 정책 수립 기반을 강화할 수 있음
  - 데이터 주권 관점에서 독자 탐사와 자산화를 추진함으로써 국제협력 과정에서도 자료 교환 가능성과 주도적 참여 기반을 높일 수 있음
- 국제 과학외교 및 협상 역량 강화
  - 허가, 자료 공유, 공동탐사, 결과 검토 등 국제협력 과정에서 한국의 역할과 존재감을 높이고 공동성과를 통해 국제 네트워크 확장을 촉진할 수 있음
- 전문인력 양성 및 일자리 창출 기반
  - 극지 현장탐사 경험, 자료 해석 역량, 국제협력 운영 경험을 축적하여 실무형 전문인력 기반을 강화하고 산·학·연 협력 생태계를 통해 관련 일자리 창출 기반을 확대할 수 있음

## 제2절 활용방안

### □ 북극 프론티어 해역 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축

- 프론티어 해역과 중앙북극해를 포함한 광역 탐사자료(지형, 천부지층, 구조, 저질·시료)를 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계에 집적하여 장기 누적형 자료로 활용함
- 구간별 해저지질도와 해석 근거자료를 지속적으로 축적·갱신하여 정책, 연구, 산업에서 반복 활용 가능한 국가 데이터 자산으로 제공함
- 차세대 쇄빙연구선 투입 시점에는 기존 누적 자료를 바탕으로 우선 탐사구간 설정, 탐사 설계 고도화, 국제공동탐사 확대에 활용함

### □ 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사

- 아라온호 MBES 기반 수심·지형 자료와 SBP 기반 천부지층 판독 결과를 연차적으로 축적하여 대상 해역의 기본 자료를 선점·확대함

- MBES에서 도출된 급경사, 지형 급변, 장애물 가능 구간과 SBP에서 판독된 천부 이상징후를 함께 정리하여 주의 구간과 추가 확인 구간을 도출하고 차년도 탐사 설계와 후속 공동탐사 추진에 반영함
- 캐나다 GSC와의 협력 결과를 바탕으로 후속 공동탐사 실행 계획을 구체화하고 해역 여건과 협의 결과가 충족될 경우 조사 범위를 단계적으로 확대함

#### □ 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단

- 해저영구동토층·가스하이드레이트 시계열 관측 결과와 메탄 방출 플럭스 DB, 단기 시나리오 평가 결과를 위험요소 정보로 활용하여 공공 리스크 관리의 근거자료로 제공함
- 해빙 소멸지역 변화 관측 성과를 장기 모니터링 자료로 활용하고 국제 시추 프로그램 연계의 기초자료로 제공함.
- CASCADE 등 국제 데이터 연계를 통해 국제 비교와 성과 확산의 기반을 강화함

#### □ 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가

- 탄성과 속성분석 기반 부존 근거와 시료 기반 광물학·지화학 분석 결과를 종합하여 유망 구간을 도출하고 후속 탐사 설계와 타당성 검토의 기초자료로 활용함
- 유망지와 잠재력 평가 결과를 지도, 보고서, 데이터셋 형태로 제공하여 공공·민간의 후속 탐사와 의사결정에 활용함
- 산·학·연 협력체계를 바탕으로 자료 활용과 결과 검토를 지속하고 해저자원 정보체계를 통해 성과가 누적·확산되도록 운영함

#### □ 국가 정책 및 국제협력 자문 자료 활용

- 해저지질도, 북서항로 관련 기초자료, 변동성 진단 결과, 자원 유망지 평가 결과를 종합하여 북극 진출 전략(지질·환경·항로·자원) 수립을 위한 정책 자문자료로 활용함
- EEZ 연계 탐사, 자료 상호교환, 결과 검토 체계를 통해 국제협력 협상에서 요구되는 근거자료로 활용함
- 차세대 쇄빙연구선 투입과 장기 모니터링 체계 전환 시점에 맞추어 협력국가 및 기관과의 공동과제 기획, 역할 분담, 공동성과 도출을 위한 협력 로드맵과 운영 모델 자문에 활용함

## 첨부 1. 국제공동연구 참여 의향서 및 관련 MOU

### □ 캐나다 지질조사소(GSC)-극지연구소(KOPRI) MOU

- 본 MOU는 극지 지구과학, 해양 지구물리탐사, 지도제작 및 원격탐사, 가스하이드레이트 관련 과학기술, 지질정보, 환경지질, 지질재해 및 위험 등 폭넓은 분야에서의 협력 범위와 연구사업 추진, 인력 교류, 정보 교환, 기술이전 등 다양한 협력 형태를 제시하고 있음
- 이는 캐나다 측 핵심 기관과의 협력이 일회성 교류가 아니라 공식 협력체계에 기반하고 있음을 보여주는 제도적 기반 문서로서 의미가 있음
- 이러한 협력 기반은 기획보고서에서 제시한 국제협력 및 과학외교 수행 기반 강화, 캐나다 GSC 공동연구 기반 지구물리탐사, 기존 국제공동탐사 성과의 후속 확장 및 직접 연결됨

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING BETWEEN  
THE GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA AND THE KOREA POLAR  
RESEARCH INSTITUTE CONCERNING COOPERATION IN EARTH SCIENCES

THE GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA (GSC) AND THE KOREA POLAR  
RESEARCH INSTITUTE (KOPRI), hereinafter referred to as the "Participants",

CONSIDERING their mutual interest in developing and reinforcing their  
cooperation in research related to the field of earth sciences;

WISHING to establish a framework for this cooperation in cooperative  
investigations and scientific exchanges concerning the earth sciences, and on subjects of  
mutual interest;

HAVE COME to the following understanding:

1. **PURPOSE**

The purpose of this Memorandum of Understanding (MOU) is to establish a working relationship between the Participants in the field of earth sciences, on the basis of equality, reciprocity and mutual benefit.

2. **SCOPE OF COOPERATIVE PROJECTS**

(a) When the Participants intend to enter into a form of cooperation as described in this MOU, they will conclude an Implementing Instrument that will set forth the timing, scope of the specific form of cooperation, deliverables and any other matters on which consent might be desirable, including intellectual property considerations.

(b) The Participants will annex those Implementing Instruments to this MOU for informational purposes only as they will not form an integral part of this MOU.

3. **AREAS OF COOPERATION**

The Participants understand that their cooperation under this MOU may include the following areas:

(i) geosciences related to polar regions;

(ii) marine geophysical surveys;

(iii) mapping and remote sensing applications;

- (iv) science and technology related to gas hydrates;
- (v) geoscience information and related informatics;
- (vi) environmental geology;
- (vii) geological hazards and risks; and,
- (viii) other areas of cooperation they may mutually decide upon.

**4. FORMS OF COOPERATION**

The Participants understand that their cooperation under this MOU may include the following forms:

- (i) cooperation on individual research projects in areas of interest identified under this MOU;
- (ii) exchange of personnel to work on cooperative projects;
- (iii) exchange of scientific and technical information relating to the development of work on cooperative projects;
- (iv) liaison and coordination with industrial, academic, professional and other organizations, where appropriate;
- (v) encourage research and development, demonstration research projects and technology transfer; and
- (vi) other forms of cooperation they may mutually decide upon.

**5. CONFIDENTIALITY OF INFORMATION**

The Participants will share, publish, or hold in confidence the scientific and technical results of cooperative projects conducted under this MOU in accordance with the specific terms of the associated Implementing Instrument.

**6. DESIGNATED REPRESENTATIVES**

The Participants will designate appropriate representatives to identify cooperative projects, and details of their implementation.

**7. FINANCIAL CONSIDERATIONS**

- (a) The Participants will bear their own costs unless they decide otherwise in writing under an Implementing Instrument. The Participants will detail all costs or estimated costs in those Implementing Instruments.

- (b) The Participants understand that cooperation under this MOU is subject to the availability of their respective resources.

**8. PROPERTY & EQUIPMENT**

The Participants understand that any property or equipment of whatever nature or kind they provide under this MOU will remain the property of the Participant furnishing such property or equipment unless otherwise decided in an Implementing Instrument.

**9. INTELLECTUAL PROPERTY**

The Participants understand that Intellectual Property will be owned and managed in accordance with the specific terms identified in the associated Implementing Instrument.

**10. APPLICABLE LEGISLATION**

The Participants understand that all cooperative projects under this MOU conducted in Canada will be carried out in accordance with the Canadian national law, and all cooperative projects under this MOU conducted in Korea will be carried out in accordance with Korean national law.

**11. PARTICIPATION OF OTHER ORGANIZATIONS**

When the Participants request the cooperation of other organizations for the development of projects that extend outside of their special expertise, they may, upon their mutual written consent, conclude appropriate instruments with such organizations.

**12. DIFFERENCES IN INTERPRETATION AND APPLICATION**

The Participants will resolve any differences in the interpretation and application of this MOU amicably through consultation.

**13. STATUS**

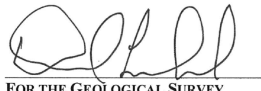
This MOU is not legally binding.

**14. FINAL DISPOSITIONS**

- (a) This MOU will become effective on the date of its last signature by the Participants and will remain in effect for a period of 5 years.
- (b) The Participants may amend or extend this MOU upon their mutual written consent.

- (c) Each Participant may at any time terminate this MOU by giving a ninety (90) days written notice to the other Participant.
- (d) The Participants understand that:
  - (i) termination of this MOU will not affect the conclusion of any existing Implementing Instrument between them.
  - (ii) termination or amendment of the Implementing Instruments will be done in accordance with the relevant dispositions of such Implementing Instruments.

SIGNED in duplicate at Incheon, on the 24<sup>th</sup> day of March 2022,  
and at Ottawa, on the 6 day of April 2022, in the English, French  
and Korean languages, each version being equally valid.

  
FOR THE GEOLOGICAL SURVEY  
OF CANADA

  
FOR THE KOREA POLAR  
RESEARCH INSTITUTE



□ 캐나다 지질조사소(GSC) 참여 의향서(Letter of Intent)

- 캐나다 지질조사소는 극지연구소의 해양수산물 연구개발사업 신청에 대한 지지 의사를 공식 표명하였으며, 캐나다 보퍼트해 공동연구 성과를 높이 평가하고 향후 캐나다 북극해 및 북서항로를 포함한 공동조사, 데이터·전문성·인프라 공유 필요성을 제시하고 있음
- 이는 본 차기 과제가 국내 제안에 그치지 않고, 캐나다 측 핵심 기관이 필요성과 협력 가능성을 공식적으로 인정하고 있음을 보여줌
- 특히 본 의향서는 기획보고서의 중점분야 2인 '북서항로 개척을 위한 국제공동 지구물리 탐사'와 직접 연계되며, 연안국 협력 기반 확보의 실질적 근거가 됨



Natural Resources  
Canada      Ressources naturelles  
Canada

Ottawa, March 13, 2026

Dr. Hyoung Chul Shin  
President  
Korea Polar Research Institute  
26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu,  
Incheon, 21990  
Republic of Korea

**Letter of Support of Dr. Seung-Goo Kang application to the Research and Development Funding Program of the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) of the Republic of Korea.**

Dear President Shin,

I am writing to express the strong support of the Geological Survey of Canada (GSC) for the funding request submitted by Dr. Seung-Goo Kang, Principal Research Scientist at the Korea Polar Research Institute (KOPRI) for the project tentatively entitled "Integrated Seabed Geological Survey and Geo-environmental Assessment of the Arctic Frontier Region" to the Research and Development Funding Program of the Ministry of Oceans and Fisheries of the Republic of Korea.

Over the previous funding cycle, this collaboration has enabled important geoscientific surveys in the Canadian Beaufort Sea. These efforts have significantly contributed to improve our understanding of the geological characteristics of Canada's Arctic offshore regions. Such work is essential for advancing the geoscientific knowledge base required to inform responsible natural resource development and to better understand environmental change in the context of a rapidly warming Arctic.

This program will provide valuable opportunities to expand these efforts through additional geoscientific surveys conducted aboard icebreaker research vessels operated by KOPRI. Access to these platforms represents a unique and strategic capability that will enable the acquisition of high-quality datasets in remote and ice-covered regions that remain poorly understood.

This funding will also strengthen collaboration between KOPRI and the GSC. Continued engagement will support the exploration of future joint survey activities in the Canadian Arctic and including the Northwest Passage, fostering international scientific cooperation and the sharing of expertise, data, and infrastructure.

Our collaboration with KOPRI aligns strongly with the core mandate of the GSC, particularly in supporting initiatives that unlock the potential of Canada's North, strengthen international geoscience collaboration, enable climate adaptation and resilience across Canada, and improve our understanding of offshore natural hazards. Furthermore, advancing geoscientific knowledge of the Arctic contributes directly to Canada's capacity to reinforce its sovereignty and stewardship in this strategically important region.

Canada



Natural Resources Canada  
Ressources naturelles Canada

For these reasons, the Geological Survey of Canada fully supports the funding application submitted by Dr. Kang to secure surveys conducted in the Canadian Arctic and look forward to the continued scientific and strategic benefits that this partnership will bring.

Sincerely,

Sonia Talwar, Ph.D.  
Director General  
Geological Survey of Canada  
Geoscience and Earth Monitoring Sector  
Natural Resources Canada / Government of Canada



Canada

□ 미국 MBARI 참여 의향서(Letter of Intent)

- MBARI는 2025년 보퍼트해 공동탐사 성과를 바탕으로 향후 5년간 북극 연구 협력 확대 의향을 제시하였으며, 공동 현장연구, 연구인력 교류, 기술 논의, 기술이전, 고해상도 해저 지형 조사, 장거리 수중 플랫폼 협력 등을 포함하고 있음
- 이는 국제공동탐사뿐 아니라 첨단 탐사기술 협력과 기술 내재화 가능성까지 함께 보여주는 기술협력 기반 문서라는 점에서 의미가 있음
- 본 의향서는 기획보고서에서 제시한 ROV/AUV 기반 정밀관측, 첨단 해저탐사기술 확보, 고해상도 해저지질정보체계 구축, 특이구조 반복관측, 차세대 쇄빙연구선 연계 운용기술 내재화 방향과 부합함
- 따라서 본 문서는 본 사업이 첨단 장비 도입에 그치는 것이 아니라, 국제공동탐사와 기술 내재화를 통해 독자적 정밀탐사 역량을 강화하려는 계획임을 보여줌



**Monterey Bay Aquarium  
Research Institute**

7700 Sandholdt Road | Moss Landing CA | 95039  
tel 831-775-1700 | fax 831-775-1620

Seung-Goo Kang (姜昇求)  
Principal Research Scientist  
Korea Polar Research Institute (KOPRI)  
26, Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990  
Republic of Korea  
ksg9322@kopri.re.kr

Antje Boetius, Prof. Dr.  
President and CEO  
aboetius@mbari.org  
+1 (831) 775-1704  
Office: president@mbari.org  
Coordinator: Krystle Anderson  
<http://www.mbari.org>

19 Feb 2026

Subject: Letter of Intent from MBARI

Dear Seung-Goo Kang,

With great pleasure we have received from you an update on your plans for Arctic research in the next five years. The past collaboration with your team and the MBARI team lead by Charlie Paull has been immensely successful. Just the last expedition in summer 2025 to the Beaufort Sea margin on your fine ship, the icebreaker ARAON, brought a whole new set of insight into dynamic seafloor processes. Your excellence in polar science and infrastructure combined with our expertise in ocean robotics is a highly attractive package with the ability to create significant impact in understanding polar change. We are thus extremely enthusiastic about building on this success for the future, i.e., in the coming five years towards the International Polar Year. Beyond the research interests we share in the Arctic, leading to exciting collaborative field work, we would be happy to support visits of your staff and discuss the potential of technology transfer in the fields of ocean and seafloor surveys. You have seen a range of our mobile technologies which can be used on different ships, and we are planning to innovate further high-resolution mapping and long range underwater platforms.

Thus we are looking forward to discussing with you the possibilities of supporting your polar research strategy and engaging in this highly fruitful collaboration.

Best regards,

  
Antje Boetius, Prof. Dr.  
President and CEO

  
David Caress  
Principle Engineer

  
Aaron Micallef  
Senior Scientist

  
Charlie Paull  
Senior Scientist

  
Giancarlo Troni  
Principle Engineer

□ 미국 해군연구소(NRL) 참여 의향서(Letter of Intent)

- 본 문서는 알래스카 보퍼트해 해저연구동토층 연구를 중심으로 극지연구소와의 공동연구 가능성에 대한 과학적 관심을 확인하고, 향후 공동 프로젝트 범위 구체화를 위한 논의 필요성을 제시하고 있
- 본 의향서는 기획보고서에서 제시한 알래스카 대륙붕 일부 지역까지의 연구해역 확장과 중점분야 3의 해저연구동토층·메탄 방출·지반 안정성 비교진단 방향과 직접 연결됨
- 신규사업 연구해역을 기존 캐나다 보퍼트해에서 미국 알래스카 대륙붕 일부 지역까지 확장하는 방향을 제시하고 있고, 2027년 이후 알래스카 해역 국제공동탐사를 포함한 북미 보퍼트권 비교연구의 협의 기반으로 활용할 수 있음

3/13/2026

Dr. Seung-Goo Kang and Dr. Jong Kuk Hong  
Korea Polar Research Institute (KOPRI)

**Subject: Letter of Intent for Alaskan Beaufort Sea Collaboration on Arctic Subsea Permafrost Research**

Dear Drs. Kang and Hong,

Thank you for the invitation to continue our productive Arctic research collaboration focused on subsea permafrost. This letter confirms the interest of U.S. Naval Research Laboratory (NRL) principal investigators in exploring joint research efforts with the Korea Polar Research Institute (KOPRI) in the Alaskan Beaufort Sea. We are intrigued by the scientific opportunities presented by work along the North Slope and see a strong potential for mutually beneficial scientific outcomes.

This letter serves as a confirmation of our scientific interest in participating in this research and does not represent a binding commitment or financial obligation on the part of NRL at this time.

We are enthusiastic about the prospect of this collaboration and look forward to future discussions to define the scope of a potential joint project.

Sincerely,

WALTON, MAUREEN Digitally signed by  
ANNE WALTON, MAUREEN ANNE  
LEVOIR, 1607948635 Date: 2026.03.13 11:30:29 -0500

Dr. Maureen Walton  
Principal Investigator  
Ocean Science Division  
U.S. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center

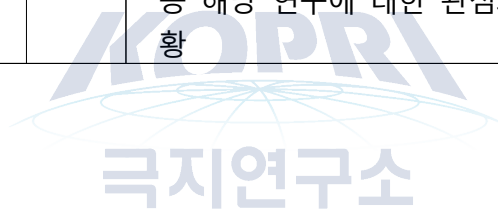
OBELCZ, JEFFREY Digitally signed by  
OBELCZ, JEFFREY BLAKE 1542  
BLAKE, 1542096663 Date: 2026.03.13 11:07:04 -0400

Dr. Jeffrey Obelcz  
Principal Investigator  
Remote Sensing Division  
U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C.

## 첨부 2. 신규사업 체크리스트

| 항목 | 질 문                              | 답 | 답변근거 및 자료                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----|----------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 사업목적이 명확하며 추진근거가 있는가?            | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>해양수산과학기술 육성법 제8조(연구개발사업등의 추진), 극지활동 진흥법 제6조(극지활동 진흥 기본계획 수립·시행), 제8조(연구개발 등의 지원), 제11조(극지활동 기반시설의 설치·운영), 해양수산발전 기본법 제17조, 제20조, 제21조 등</li> <li>북극항로 개척과 차세대 쇄빙선 건조, 해양과학영토 확대, 기후위기 대응 등 해양수산부 R&amp;D 중점 투자방향에 부합</li> </ul> |
| 2  | 중앙정부가 해야 하는 일인가?                 | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>북극 해빙의 감소로 북극 프론티어 해역의 전략적 가치 부상과 연안국 및 주요국가 간 북극항로·해저자원 개발 경쟁 가속화됨에 따라 독자적 해저지질 자료와 정보체계 구축 필요</li> <li>해저지질정보는 항로·자원·안보·기후변화 대응 등 실리적 북극정책 수립을 위한 핵심 자료로 활용</li> </ul>                                                        |
| 3  | 다른 사업과 중복 또는 유사하게 사업이 설계되지 않았는가? | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>해당없음</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                 |
| 4  | 사업의 타당성을 객관적으로 검증하는 절차를 거쳤는가?    | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>총사업비 300억 원으로 예비타당성조사는 해당 사항 없음</li> <li>기획연구를 통한 연구사업 도출로 사전계획 평가 수행 및 정책적 타당성, 사회적 형평성 등을 종합 검토하는 절차를 거침</li> </ul>                                                                                                           |
| 5  | 현재의 사업방식이 가장 효율적인가?              | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>쇄빙연구선을 활용하는 북극 현장탐사와 국제공동 네트워크 주도·참여 등 사업의 핵심 내용이 극지연구소의 인프라 활용에 크게 의존, 사업 구조상 직접 사업 수행이 효율적임</li> </ul>                                                                                                                        |

| 항목 | 질 문                 | 답 | 답변근거 및 자료                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|---------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | 현재 추진해야 할 시급성이 있는가? | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 우리나라는 북극 거버넌스 참여 확대와 신산업 창출에 관한 북극 정책을 추진, 북극을 '대한민국 경제의 새로운 활로'로 규정, 적극적인 북극 진출을 추진 중</li> <li>• 북극항로 상용화 및 북극 에너지·전략광물자원 확보를 위해 정밀 해저지질자료 수요 예상</li> <li>• IODP 등 국제거대과학프로그램 참여와 중국, 일본 등 주변국의 적극적 북극해 탐사활동 대응</li> </ul>                                         |
| 7  | 사업여건은 성숙되어 있는가?     | 예 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 제1차 극지활동 진흥 기본계획('23~'27)의 차세대 쇄빙 연구선·북극 고위도 진출 전략, 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23~'27)의 극지·대양 등 미지의 영역 도전 및 해양자원 확보 등 해양수산부 주도 적극적인 북극해 전략적 활용에 관한 대응이 가시화</li> <li>• 북극해 해저지질조사를 통한 해양과학영토 확장과 온난화에 따른 해저환경변화 대응, 에너지·전략광물 탐사 등 해당 연구에 대한 관심과 투자가 필수 불가결한 상황</li> </ul> |



## 첨부 3. 과제제안요청서(RFP)

### 해양수산연구개발사업 과제제안요청서(RFP)

|                     |                                                                                                                          |                       |                                        |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| 중앙행정기관명             | 해양수산부                                                                                                                    | 사업명                   | 북극해 현안 대응 해빙-해양-해저환경변화 통합연구사업          |
| 전문기관명               | 해양수산과학기술진흥원                                                                                                              | 내역사업명                 | 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발 |
| 공모방식                | 지정공모                                                                                                                     | 보안등급                  | 일반과제                                   |
| 연구개발과제명             | 북극 프론티어 해역 정밀 해저지질환경 조사 및 전략자원 확보기술 개발                                                                                   |                       |                                        |
| 전체 연구개발기간<br>(당해연도) | '27.4 ~ '31.12<br>( '27.4 ~ '27.12)                                                                                      | 총 정부지원연구개발비<br>(당해연도) | 300억 원 이내<br>( '27년 45억 원 이내)          |
| 단계 연구개발기간           | (1단계) '27.4 ~ '31.12                                                                                                     |                       |                                        |
| 주관연구개발기관<br>유형      | 출연(연)                                                                                                                    | 필수 참여기관 유형            | 제한 없음<br>(산·학·연 협력 권장)                 |
| 연구개발단계              | 기초연구                                                                                                                     | 정부납부기술료<br>징수 여부      | 비징수                                    |
| 해양수산과학기술<br>분류      | · 극지과학-극지기초연구-극지지질/지구물리(POS0103)<br>· 극지과학-극지자원연구-극지 광물자원 탐사 및 활용기술(POS0202)<br>· 극지과학-극지기초연구-달리 분류되지 않는 극지기초연구(POS0106) |                       |                                        |

#### 1. 사업 추진배경 및 필요성

- ☐ 북극 해빙 감소로 인한 고위도 프론티어 해역 접근성 확대됨에 따라 연안국 및 주요국의 북극 진출·활용 경쟁 심화, 이에 대한 국가 차원의 독자적 해저지질·지구물리 자료 확보 및 전략자산화 시급
  - 북극 해빙 감소로 고위도 프론티어 해역에 대한 접근이 가능해지면서 항로, 자원, 해저 인프라, 거버넌스 경쟁이 확대되고 있음
  - 북극 연안국 및 주요국은 북극 해저지형·지질·자원 자료를 국가 차원에서 축적·관리하고 있기 때문에 독자적인 탐사와 자료의 부재는 우리나라의 북극 진출과 활용에 구조적 제약을 발생시킬 수 있음
  - 특히 북서항로 관련 해역은 섬과 해협이 복잡하고 수심이 급변하며 빙상 기원의 해저지형 등 천부 위험요소가 존재할 가능성이 높아 항로 활용 기반 확보를 위한 선제적인 조사와 연구가 필요
- ☐ 북극 해저지질환경 변화는 우리나라의 기후위기 대응과 국가 기후안보 전략 수립에 필요한 핵심 진단 대상으로 해저영구동토층·가스하이드레이트·메탄 방출 등 북극발 온난화 가속화 요인에 대한 정밀 규명 필요
  - 북극 온난화로 인해 북극 해저에서는 해저영구동토층 붕괴, 가스하이드레이트 해리, 메탄 방출, 해저특이구조의 생성과 진화 등 지질환경 변화가 복합적으

로 진행

- 이는 온난화를 증폭시키고 기후변동성 확대에 영향을 미칠 수 있기 때문에 북극 해저환경 변화 구조와 온실가스 방출 기작을 정밀하게 관측·해석할 수 있는 국가 차원의 연구가 필요함
- 고위도 프론티어 해역 해빙 소멸지역에 대한 해저지질환경 변화 관측과 온실가스 거동에 대한 정밀진단을 수행하고 심부 퇴적물 기록 및 연대층서 정립, 국제시추 연계 기반을 마련할 필요가 있음
- 미래 북극 자원개발 진출의 과학적 교두보 확보 및 에너지·전략광물 자원의 잠재력 선점을 위한 광역 물리탐사와 정량적 평가 체계 구축 필요
  - 북극 공해상 및 프론티어 해역은 에너지·전략광물 자원과 관련된 자료 공백으로 잠재력 평가를 위한 기초자료 확보가 제한적임
  - 에너지·전략광물의 정량적인 분포 및 특성 규명과 자원 유망지 정보 선점을 위한 광역 지구물리탐사, 탄성과 속성분석, 전략광물 특성 분석, 산·학·연 공동평가 연계의 연구기반 구축이 필요
  - 국가 전략자원 포트폴리오 확장과 후속 산업연계 및 북극정책 수립을 뒷받침하는 핵심 공공기초자료로 활용하기 위한 북극 에너지 및 전략광물 자료확보가 필수적임
- 2030년 차세대 쇄빙연구선 투입 효과를 극대화하기 위해 기준선 자료와 핵심 탐사기술의 선제 확보 필요
  - 차세대 쇄빙연구선 투입 이후 고위도 프론티어 해역 탐사를 본격화하려면 투입 이전에 핵심 해역의 기준선 자료와 우선 탐사 대상에 대한 사전 정보 확보가 필요함
  - 핵심 탐사기술과 해저지질·지구물리 정보가 충분히 축적되지 않을 경우, 취역 초기 탐사 설계, 자료 품질, 효율성 등이 저하되어 국가 인프라의 활용성과 투자효과가 반감될 우려가 있음
  - 따라서 현 단계에서 탐사기술 고도화 및 실증, 핵심 해역 자료 축적, 국제공동탐사 기반을 선제적으로 구축함으로써 차세대 쇄빙연구선과 연계한 후속 탐사와 연구성과 창출 기반을 마련할 필요가 있음
- 정부 주도의 중장기 북극해 전략에 부합하는 공공 사업 추진
  - 본 과제는 국정과제 56(K-북극항로), 「해양수산물발전기본법」, 「극지활동 진흥법」, 「기후변화 감시·예측법」, 「해양수산물과학기술육성법」에 부합하는 법정·전략 과제임
  - 또한 「2050 북극활동전략」, 「제1차 극지활동 진흥 기본계획(‘23~’27)」, 「제2차 해양수산물과학기술 육성 기본계획(‘23~’27)」, 「제3차 해양수산물발전 기본계획(‘21~’30)」
  - 따라서 본 과제는 조사-기술-정책을 결합한 국가 전략형 패키지 사업으로서 공공 부문이 선도적으로 추진할 필요가 있음

## 2. 제안요구내용

### 1) 최종목표

- ☐ 북극 프론티어 해역의 해저지질·환경·항로·자원 정보를 선제 확보·자산화하고 북서항로 관련 해역에 대한 한국-캐나다 국제공동 지구물리탐사 착수, 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 수행, 에너지·전략광물 유망지역 도출 및 잠재력 평가와 빙권해역 특화 해저탐사기술 확보 및 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축을 통해 국가 북극 전략의 과학적 기반 확립

### 2) 최종 연구개발성과물

- ☐ 북극 프론티어 해역 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 1식
  - 구간별 해저지질도, 지구물리자료, 지질시료·해석결과를 포함한 통합 DB 구축
  - 전략적 활용을 위한 해저지질 정보체계 플랫폼 및 인공지능 기반 자료 체계 구축
- ☐ 북서항로 개척 관련 지구물리탐사 산출물 1식
  - MBES 기반 수심·해저지형 자료 및 지형 급변, 급경사, 장애물 가능 구간 등 위험요소 후보 목록 도출
  - SBP 기반 천부층서, 매물구조, 연약지반 가능 구간, 천부 이상징후 해석 및 주의·위험구간 정리
  - 후속 공동탐사와 차세대 쇄빙연구선 연계 조사를 위한 우선 조사 후보지 및 계획 도출
- ☐ 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단 성과물 1식
  - 해저영구동토층·가스하이드레이트 분포, 특성 및 환경변화 진단 결과
  - 북극 메탄 방출 기작 규명, 단기 방출 시나리오, 심부 퇴적물 기록 및 연대층서 정립 결과
  - 국제시추(IODP 등) 연계를 위한 기초자료와 고해양·고환경 복원 자료
- ☐ 북극 에너지·전략광물 잠재력 평가 및 활용기반 성과물
  - 북극해 전략자원(에너지·희토류 등) 잠재력 평가 및 유망지 도출 보고서 2건 이상
  - 산·학·연 공동활용형 북극 해저자원 정보체계 및 실무형 전문인력 양성 기반 구축

### 3) 주요 성과지표

| 성과목표                              | 성과지표                        | 목표치          | 평가기준                           |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------|
| 북극 프론티어 해역 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축 | 통합 정보체계 구축                  | 1식           | 전문가 검토 및 시스템 시범운영, DB 적재·운용 확인 |
| 전략자원 잠재력 평가                       | 잠재력 평가 및 유망지 도출 보고서         | 2건 이상        | 전문가 검토를 거친 공식 보고서 발간 및 제출      |
| 전략적 국제공동탐사                        | 북극 연안국 EEZ 및 북서항로 관련 국제공동탐사 | 2건 이상        | MOU·LOI, 항차보고서, 공동연구 실적 등으로 확인 |
| 빙권해역 특화 해저탐사 기술 확보                | 원천기술 확보                     | 3건 이상        | 기술성 검증자료, 시험·실증 결과, 전문가 평가     |
| 지식재산 성과                           | 관련 특허 등록                    | 10건 이상       | 특허 등록 기준                       |
| 정책기여 및 데이터 제공                     | DB 제공 및 정책기여                | 24건          | 공문, 자문내역, 답변서, 국제보고서 반영 실적     |
| 국제협력 네트워크 강화                      | 국제협력 추진 건수                  | 4건           | MOU, LOI, 국제회의·공동연구 추진 실적      |
| 성과확산 및 인력양성                       | 성과확산 / 극지 실무형 전문인력 양성       | 30건 / 10명 이상 | 홍보·교육·현장지원 프로그램 운영 및 결과보고서     |

### 4) 주요 연구개발내용 및 범위

- ☐ 북극 프론티어 해역 해저지질정보 선점 및 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계 구축
  - 쇄빙연구선을 활용한 정기(연 1회) 해저지질·지구물리탐사를 수행하고 척치고원, 동시베리아해 북단, 중앙북극해, 캐나다 보퍼트해 및 미국 알래스카 대륙붕 등 고위도 프론티어 해역으로 조사범위 확대
  - 해저지질시료 및 지구물리자료를 종합 분석하여 구간별 해저지질도와 종합 해저지질 해석 결과 생산
  - 원시자료와 해석 결과를 연계한 지질·환경·항로·자원 통합 정보체계를 구축하고 인공지능 기반 자료 체계 확보
  - ROV, CSEM, 고해상 3차원 탄성파, 인공지능 기반 자료분석 등 빙권해역 특화 첨단 해저탐사·분석 기술의 확보 및 적용 추진
- ☐ 북서항로 개척을 위한 지구물리탐사
  - 북서항로 관련 해역의 조사구간 후보를 선정하고 MBES·SBP 기반 조사 설계 및 자료 취득 방안을 수립
  - 캐나다 지질조사소(GSC)와의 협력체계를 기반으로 단계적 국제공동 지구물리탐사 추진
  - 해저지형, 천부지층, 매물구조, 연약지반 가능 구간, 위험요소 후보를 도출하여 항로 안전성 평가의 기초자료 확보
  - 1차 조사 결과를 바탕으로 후속 정밀탐사 및 차세대 쇄빙연구선 연계 2차 공동탐사 계획 수립

☐ 북극 해저지질환경 변동성 관측과 온난화 가속화 정밀진단

- 해저영구동토층·가스하이드레이트 분포와 특성, 이와 관련된 지질구조·해저지형 변화 정밀 관측·해석
- 메탄 방출구조, 방출 기작, 단기 방출 시나리오를 규명하고 프론티어 해역의 해빙 소멸지역 해저환경 변화 진단
- 심부 퇴적물 기록 확보, 연대층서 정립, 고환경·고해양 복원을 통해 온난화 가속화 기작과 장기 변화 배경 규명
- 국제시추 제안(IODP 등) 및 후속 국제거대과학프로그램 연계를 위한 기초자료 마련

☐ 북극 에너지·전략광물자원 유망지역 도출 및 잠재력 평가

- 공해상 및 프론티어 해역을 대상으로 광역 지구물리탐사와 탄성과 속성분석을 수행하여 에너지자원 분포·특성 정량 평가
- 전략광물 시료 분석과 지질·지구물리자료 해석을 통해 유망지역을 도출하고 잠재력 평가 수행
- 산·학·연 협동연구 체계를 기반으로 북극 해저자원 정보체계를 구축하고 전문인력 양성
- 자원평가 결과를 북극 정책, 전략자원 포트폴리오 확장, 국제협력 및 후속 산업연계에 활용할 수 있도록 정리·제공

5) 기타 조건

- ☐ 연구개발기관은 해저지질·지구물리탐사, 해저환경 진단, 해저자원 평가, 데이터/AI, 국제협력 분야를 포괄하는 융합형 연구수행체계를 제시하여야 함
- ☐ 북서항로 관련 연구내용에는 캐나다 등 연안국 연구기관과의 국제공동탐사 및 자료공유를 고려한 협력 추진전략을 포함하여야 함
- ☐ 본 과제를 통해 생산되는 원시자료, 해석자료, 보고서, 지도, 데이터베이스, 알고리즘·소스코드 등 연구개발 결과물 일체는 국가적 활용을 위해 해양수산부에 제공하여야 하며, 제공 범위와 공개 여부는 해양수산부와 협의하여 결정함
- ☐ 본 연구에서 구축·확보되는 연구 인프라와 데이터는 국가 차원의 공동 활용을 기본으로 하며, 공개등급·품질관리·메타데이터 기준을 연구계획서에 포함하여야 함
- ☐ 연구개발기관은 「국가연구개발사업 표준 성과지표(5차) 성과목표·지표 설정 안내서」를 고려하여 질적지표 60% 이상이 되도록 성과지표를 추가·구체화할 수 있음

□ 사업예산(안)

| 정부지원 연구개발비<br>(단위: 백만원) | 1단계   |       |       | 2단계   |        |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                         | 1년차   | 2년차   | 3년차   | 4년차   | 5년차    |
| 30,000                  | 4,500 | 4,500 | 4,500 | 5,500 | 11,000 |



## 첨부 4. 참고문헌

---

1. Amberg, S., Littke, R., Lutz, R., Klitzke, P., Sachse, V., 2024. Influence of Pleistocene glaciation on petroleum systems and gas hydrate stability in the Olga Basin region, Barents Sea. *Journal of Petroleum Geology*, 47(2), 191-214.
2. Alatarvas, R., Immonen, N., & Strand, K. (2023). Clay mineral and Nd, Pb, and Sr isotope provenance of a MIS 4–3 sediment record from the Lomonosov Ridge, central Arctic Ocean. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 95(1), 35-46.
3. Backman, J., Moran, K., McInroy, D., and the IODP Expedition 302 Scientists. (2005). IODP Expedition 302, Arctic Coring Expedition (ACEX): A First Look at the Cenozoic Paleooceanography of the Central Arctic Ocean. *Scientific Drilling*, 1.
4. Batchelor, C. L., & Dowdeswell, J. A. (2015). Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins. *Marine Geology*, 363, 65-92.
5. BOEM, 2026. 2026 National Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of the U.S. Outer Continental Shelf. OCS Report BOEM.
6. Boetius, A., & Wenzhöfer, F. (2013). Seafloor oxygen consumption fuelled by methane from cold seeps. *Nature Geoscience*, 6, 725-734.
7. Bünz, S., Polyanov, S., Vadakkepuliambatta, S., Consolaro, C., & Mienert, J. (2012). Active gas venting through hydrate-bearing sediments on the Vestnesa Ridge, offshore W-Svalbard. *Marine Geology*, 332–334, 189-197.
8. Chernykh, D., Yusupov, V., Salomatin, A., Kosmach, D., Shakhova, N., Gershelis, E., Konstantinov, A., Grinko, A., Chuvilin, E., Dudarev, O., Koshurnikov, A., & Semiletov, I. (2020). Sonar Estimation of Methane Bubble Flux from Thawing Subsea Permafrost: A Case Study from the Laptev Sea Shelf. *Geosciences*, 10(10), 1-14.
9. Choi, W., Lee, J., Kim, Y.-G., Kim, H., Rhee, T. S., Jin, Y. K., Kim, J.-H., & Seo, Y. (2021). The impact of the abnormal salinity enrichment in pore water on the thermodynamic stability of marine natural gas hydrates in the Arctic region. *Science of the Total Environment*, 799, 1-9.
10. Choi, Y., Kang, S.-G., Jin, Y. K., Hong, J. K., Shin, S.-R., Kim, S., & Choi, Y. (2022). Estimation of the gas hydrate saturation from multichannel seismic data on the western continental margin of the Chukchi Rise in the Arctic Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 10,

1-18.

11. Chong, S. S., Schildhauer, M., O'Brien, M., Mecum, B., & Jones, M. B.. (2024). Enhancing the FAIRness of Arctic research data through semantic annotation. *Data Science Journal*, 23, 1-14.
12. Christiansen, F.G., 2021. Greenland petroleum exploration history: Rise and fall, learnings, and future perspectives. *Resources Policy* 74.
13. Cooke, F., Plaza-Faverola, A., Bünz, S., Sultan, N., Ramachandran, H., Bedle, H., Patton, H., Singhroha, S., & Knies, J. (2023). Sedimentary deformation relating to episodic seepage in the last 1.2 million years: a multi-scale seismic study from the Vestnesa Ridge, eastern Fram Strait. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1-17.
14. Cooke, F. A., Plaza-Faverola, A. A., Bünz, S., De Groot, P., & Peacock, D. C. P. (2025). Semiautomated analysis of faults with meter-scale displacements and networks of planar features using high-resolution 3D seismic data to investigate gas leakage at the Vestnesa Ridge, Eastern Fram Strait. *Interpretation*, 13(1), B1–B23.
15. Congressional Research Service (CRS) (2018). Changes in the Arctic: Background and Issues for Congress (R41153).
16. Cui, Y., Liu, X., Liu, C., Gao, J., Fang, X., Liu, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Mineralogy and geochemistry of ferromanganese oxide deposits from the Chukchi Sea in the Arctic Ocean. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 52, 120-129.
17. D'Angelo, A., Garcia, C., Kerrigan, Z., Strock, J., Crable, F., VanKeersbilck, N., Raziuddin, H., Ewa, T., Umar, S., King, A. L., Gonzalez-Meler, M., & Loose, B. (2024). The marine methane cycle in the Canadian Arctic Archipelago during summer. *Polar Science*, 42, 1-14.
18. Darby, D. A., Ortiz, J., Polyak, L., Lund, S., Jakobsson, M., & Woodgate, R. A. (2009). The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi–Alaskan margin sediments. *Global and Planetary Change*, 68(1–2), 58–72.
19. Department of Defense (DoD) (2024). 2024 Department of Defense Arctic Strategy.
20. Deschamps, C.-E., Montero-Serrano, J.-C., & St-Onge, G. (2018). Sediment Provenance Changes in the Western Arctic Ocean in Response to Ice Rafting, Sea Level, and Oceanic Circulation Variations Since the Last Deglaciation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7), 2147-2165.

21. Ding, W., Niu, X., Zhang, T., Chen, S., Liu, S., Tan, P., Kong, F., Jin, Z., Huang, S., Wei, C., Fang, Y., Sun, Q., Li, J., 2022. Submarine wide-angle seismic experiments in the High Arctic: The JASMINe Expedition in the slowest spreading Gakkel Ridge. *Geosystems and Geoenvironment* 1(3).
22. Dowdeswell, J. A., Evans, J., Mugford, R., Griffiths, G., McPhail, S., Millard, N., Stevenson, P., Brandon, M. A., Banks, C., Heywood, K. J., Price, M. R., Dodd, P. A., Jenkins, A., Nicholls, K. W., Hayes, D., Abrahamsen, E. P., Tyler, P. A., Bett, B. J., Jones, D. O. B., Wadhams, P., Wilkinson, J. P., Stansfield, K., & Ackley, S. (2008). Autonomous underwater vehicles (AUVs) and investigations of the ice–ocean interface in Antarctic and Arctic waters. *Journal of Glaciology*, 54(187), 661-672.
23. Eidam, E. F., Stark, N., Nienhuis, J. H., Keogh, M., & Obelcz, J. (2025). Arctic continental-shelf sediment dynamics. *Annual Review of Marine Science*, 17, 435-460.
24. European Environment Agency. (2017, June 21). Arctic resources (Oil, gas and mineral resources). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/arctic-resources>
25. Fagel, N., Not, C., Gueibe, J., Mattielli, N., & Bazhenova, E. (2014). Late Quaternary evolution of sediment provenances in the Central Arctic Ocean: mineral assemblage, trace element composition and Nd and Pb isotope fingerprints of detrital fraction from the Northern Mendeleev Ridge. *Quaternary Science Reviews*, 92, 140-154.
26. Federal Government of Germany (2019). Germany's Arctic Policy Guidelines: Assuming Responsibility, Creating Trust, Shaping the Future.
27. Gautier, D.L., Bird, K.J., Charpentier, R.R., Grantz, A., Houseknecht, D.W., Klett, T.R., Moore, T.E., Pitman, J.K., Schenk, C.J., Schuenemeyer, J.H., Sørensen, K., Tennyson, M.E., Valin, Z.C., Wandrey, C.J., 2009. Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic. *Science* 324(5931), 1175-1179.
28. German, C. R., Reeves, E. P., Türke, A., Diehl, A., Albers, E., Bach, W., Purser, A., Ramalho, S. P., Suman, S., Mertens, C., Walter, M., Ramirez-Llodra, E., Schlindwein, V., Bünz, S., & Boetius, A. (2022). Volcanically hosted venting with indications of ultramafic influence at Aurora hydrothermal field on Gakkel Ridge. *Nature Communications*, 13, 1-11.
29. Grob, H., Riedel, M., Duchesne, M. J., Krastel, S., Bustamante, J., Fabien-Ouellet, G., Jin, Y. K., & Hong, J. K. (2023). Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(5), 1-22.

30. Government of Canada (2009). Canada's Northern Strategy: Our North, Our Heritage, Our Future.
31. Government of Canada (2019). Arctic and Northern Policy Framework (ANPF).
32. Gregersen, U., 2008. The north-east Baffin Bay region, offshore Greenland - a new frontier petroleum exploration region. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 15, 65-68.
33. Hein, J. R., Konstantinova, N., Mikesell, M., Mizell, K., Fitzsimmons, J. N., Lam, P. J., Jensen, L. T., Xiang, Y., Gartman, A., Cherkashov, G., Hutchinson, D. R., & Till, C. P. (2017). Arctic deep-water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the Arctic Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11), 3771-3800.
34. Isler, T., Jakuba, M., Kwasnitschka, T., Purser, A., Klesh, A., Schlindwein, V., & German, C. R. (2024). High-resolution bathymetry coupled with 3D models of hydrothermal vents from opportunistically-acquired imagery: Aurora vent field, Arctic Ocean. *Journal of Maps*, 20(1), 1-11.
35. Jakobsson, M., et al. (2020). The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. *Scientific Data*, 7, 1-14.
36. Jakobsson, M., et al. (2024). The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 5.0. *Scientific Data*, 11, 1-22.
37. Joe, Y. J., Polyak, L., Jang, K., Vogt, C., Kim, S., Kim, J.-H., Jin, Y. K., Hong, J. K., Niessen, F., & Nam, S.-I. (2025). Late Quaternary Glaciations on the Chukchi Margin, Arctic Ocean: Insights From Echo Sounding and Sediment Records. *JGR: Earth Surface*, 130(1), 1-18.
38. Kang, S.-G., Jin, Y. K., Jang, U., Duchesne, M. J., Shin, C., Kim, S., Riedel, M., Dallimore, S. R., Paull, C. K., Choi, Y., & Hong, J. K. (2021). Imaging the P-Wave Velocity Structure of Arctic Subsea Permafrost Using Laplace-Domain Full-Waveform Inversion. *JGR: Earth Surface*, 126(3), 1-15.
39. KISTEP (2023). 2022 Technology Level Evaluation.
40. Kim, H.-I., Cho, H. G., Lee, S., Koo, H. J., Hong, J. K., & Jin, Y. K. (2023). Spatial distribution of manganese oxide minerals in the natural ferromanganese nodule of the Arctic Sea: A view from Raman spectroscopy. *Chemical Geology*, 623, 1-10.
41. Kim, S., et al. (2021). Seismostratigraphic and Geomorphic Evidence for the Glacial History

- of the Northwestern Chukchi Margin, Arctic Ocean. *JGR: Earth Surface*, 126(4), 1-29.
42. Klasek, S. A., Hong, W.-L., Torres, M. E., Ross, S., Hostetler, K., Portnov, A., Gründger, F., & Colwell, F. S. (2021). Distinct methane-dependent biogeochemical states in Arctic seafloor gas hydrate mounds. *Nature Communications*, 12, 1-13.
  43. Knittel, K., & Boetius, A. (2009). Anaerobic oxidation of methane: Progress with an unknown process. *Annual Review of Microbiology*, 63, 311–334.
  44. Kwon, Y. S., & Rhee, T. S. (2025). Subsurface methane accumulation in the Beaufort Sea driven by pelagic processes: A mechanistic modeling approach. *Geophysical Research Letters*, 52(18), 1-11.
  45. Lapointe, C., et al. (2025). The ice-covered Aurora hydrothermal vent field, Gakkel Ridge, Arctic Ocean: ultramafic-influenced venting at a mafic axial volcano on Earth's slowest spreading center. *Earth and Planetary Science Letters*, 672(15), 1-15.
  46. Lee, D.-H., Kim, J.-H., Lee, Y. M., Kim, J.-H., Jin, Y. K., Paull, C., Ryu, J.-S., & Shin, K.-H. (2021). Geochemical and Microbial Signatures of Siboglinid Tubeworm Habitats at an Active Mud Volcano in the Canadian Beaufort Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-16.
  47. Lee, D.-H., Kim, J.-H., Lee, Y. M., Bayon, G., Kim, D., Joe, Y. J., Wang, X., Shin, K.-H., & Jin, Y. K. (2022). Metalloenzyme signatures in authigenic carbonates from the Chukchi Borderlands in the western Arctic Ocean. *Scientific Reports*, 12, 1-15.
  48. Lehmann, C., Jokat, W., & Coakley, B. (2025). Seismic evidence for fluid migration on the outer Chukchi Shelf, Arctic Ocean. *Geo-Marine Letters*, 45, 1-12.
  49. Liu, T., et al. (2024). Estimation of Seismic Attenuation and Gas Hydrate Concentration From Surface Seismic Data at Hydrate Ridge, Cascadia Margin. *JGR: Solid Earth*, 129(2), 1-19.
  50. Lutz, R., Klitzke, P., Weniger, P., Blumenberg, M., Franke, D., Reinhardt, L., Ehrhardt, A., Berglar, K., 2021. Basin and petroleum systems modelling in the northern Norwegian Barents Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 130.
  51. Lv, Y., et al. (2022). Stimulated organic carbon cycling and microbial community shift driven by a simulated cold-seep eruption. *mBio*, 13(2), 1-14.
  52. Marine Insight (2024). Arctic Shipping Market Report 2024.

53. MarketsandMarkets (2024). Subsea Survey Market Report 2024.
54. Mau, S., et al. (2017). Widespread methane seepage along the continental margin off Svalbard - from Bjørnøya to Kongsfjorden. *Scientific Reports*, 7, 1-13.
55. Mayer, L. A., et al. (2018). The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030. *Geosciences*, 8(2), 1-18.
56. Meng, D., et al. (2025). Estimation of gas hydrate and free gas saturation using the rock physics model based on constrained least squares and trust region method in the Shenhu Area, South China Sea. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1-18.
57. National Security Presidential Directive 66 / Homeland Security Presidential Directive 25 (2009). Arctic Region Policy (NSPD-66/HSPD-25).
58. NOAA Climate.gov (2024). Arctic sea ice minimum in 2024 seventh lowest on record.
59. NOAA & CIRES/University of Colorado Boulder. (2025). Arctic warming has outpaced global warming. Arctic Report Card 2025.
60. Nordregio (2019). Resources in the Arctic 2019.
61. Norwegian Petroleum Directorate, 2017. Geological Assessment of Petroleum Resources in Eastern Parts of Barents Sea North.
62. Overduin, P. P., et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). *JGR: Oceans*, 124(6), 1-18.
63. Paull, C. K., Dallimore, S. R., Jin, Y. K., Caress, D. W., Lundsten, E., Gwiazda, R., Anderson, K., Hughes Clarke, J., Youngblut, S., & Melling, H. (2022). Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(12), 1-8.
64. Plaza-Faverola, A., Bünz, S., Johnson, J. E., Chand, S., Knies, J., Mienert, J., & Franek, P. (2015). Role of tectonic stress in seepage evolution along the gas hydrate-charged Vestnesa Ridge, Fram Strait. *Geophysical Research Letters*, 42(3), 733-742.
65. Plaza-Faverola, A., Sultan, N., Lucchi, R. G., El bani Altuna, N., Ramachandran, H., Singhroha, S., Cooke, F., Vadakkepuliyaambatta, S., Ezat, M. M., & Rasmussen, T. L. (2023). Spatial changes in gas transport and sediment stiffness influenced by regional stress: Observations from piezometer data along Vestnesa Ridge, Eastern Fram Strait. *JGR: Solid*

Earth, 128(5), 1-21.

66. President of the Russian Federation (2008). Basics of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic for the period till 2020 and for a further perspective.
67. President of the Russian Federation (2020). Foundations of the Russian Federation State Policy in the Arctic for the Period up to 2035.
68. Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168.
69. Skarke, A., Ruppel, C., Kodis, M., Brothers, D. & Lobecker, E. (2014). Widespread methane leakage from the sea floor on the northern US Atlantic margin. *Nature geoscience*, 7, 657-661.
70. Sherman, D., & Constable, S. (2018). Permafrost extent on the Alaskan Beaufort shelf from surface-towed CSEM surveys. *JGR: Solid Earth*, 123(9), 1-13.
71. Singhroha, S., Bünz, S., Plaza-Faverola, A., & Chand, S. (2016). Gas hydrate and free gas detection using seismic quality factor estimates. *Interpretation*, 4(1), SA39–SA53.
72. Singhroha, S., Chand, S., & Bünz, S. (2019). Constraints on gas hydrate distribution and morphology in Vestnesa Ridge using multicomponent OBS. *JGR: Solid Earth*, 124(5), 1-22.
73. Sparrow, K. J., Kessler, J. D., Southon, J. R., Garcia-Tigreros, F., Schreiner, K. M., Ruppel, C. D., Miller, J. B., Lehman, S. J., & Xu, X. (2018). Limited contribution of ancient methane to surface waters of the U.S. Beaufort Sea shelf. *Science Advances*, 4(6), 1-7.
74. Stein, R., Fahl, K., Schreck, M., Knorr, G., Niessen, F., Forwick, M., Gebhardt, C., Jensen, L., Kaminski, M., Kopf, A., Matthiessen, J., Jokat, W., & Lohmann, G. (2016). Evidence for ice-free summers in the late Miocene central Arctic Ocean. *Nature Communications*, 7, 1-13.
75. Thornton, B. F., Prytherch, J., Andersson, K., Brooks, I. M., Salisbury, D., Tjernström, M., & Crill, P. M. (2020). Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic sea emissions. *Science Advances*, 6(5), 1-10.
76. Tohjima, Y., Zeng, J., Shirai, T., Niwa, Y., Ishidoya, S., Taketani, F., Sasano, D., Kosugi, N., Kameyama, S., Takashima, H., Nara, H., & Morimoto, S. (2021). Estimation of CH<sub>4</sub> emissions from the East Siberian Arctic Shelf based on atmospheric observations aboard the R/V Mirai during fall cruises from 2012 to 2017. *Polar Science*, 27, 1-10.

77. Uhlig, C., Kirkpatrick, J. B., D'Hondt, S., & Loose, B. Methane-oxidizing seawater microbial communities from an Arctic shelf. *Biogeosciences*, 15, 3311-3329.
78. U.S. Geological Survey (USGS) (2008). Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle (Fact Sheet 2008-3049).
79. Vermassen, F., O'Regan, M., de Boer, A., Schenk, F., Razmjooei, M., West, G., Cronin, T. M., Jakobsson, M., & Coxall, H. K. (2023). A seasonally ice-free Arctic Ocean during the Last Interglacial. *Nature Geoscience*, 16(8), 723-729.
80. Weber, T., Wiseman, N. A., & Kock, A. (2019). Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nature Communications*, 10, 1-10.
81. Westbrook, G. K., Thatcher, K. E., Rohling, E. J., Piotrowski, A. M., Pälike, H., Osborne, A. H., Nisbet, E. G., Minshull, T. A., Lanoisellé, M., James, R. H., Hühnerbach, V., Green, D., Fisher, R. E., Crocker, A. J., Chabert, A., Bolton, C., Beszczynska-Möller, A., Berndt, C., & Aquilina, A. (2009). Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin. *Geophysical Research Letters*, 36, 1-13.
82. Workman, E., Fisher, R. E., France, J. L., Linse, K., Yang, M., Bell, T. G., Dong, Y., & Jones, A. E. (2024). Methane emissions from seabed to atmosphere in polar oceans revealed by direct methane flux measurements. *JGR: Atmospheres*, 129(4), 1-21.
83. World Oil (2026). Regional report: Focus on Arctic oil and gas sharpened during 2025.
84. Wynn, R. B., Huvenne, V. A. I., Le Bas, T. P., Murton, B. J., Connelly, D. P., Bett, B. J., Ruhl, H. A., Morris, K. J., Peakall, J., Parsons, D. R., Sumner, E. J., Darby, S. E., Dorrell, R. M., & Hunt, J. E. (2014). Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*, 352, 451-468.

## 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 정책·지원과제사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

