

기획연구
보고서

남서태평양 자연재해 예측 기반구축 및 신 해양자원 탐사 기획연구



한국해양과학기술원

해양수산부

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 ‘남서태평양 자연재해 예측 기반구축 및 신 해양자원
탐사 기획연구’의 최종보고서로 제출합니다.

2023년 12월

연구기관 : 한국해양과학기술원

극지연구소

연구책임자 : 형기성 (해양과기원)

박승현 (극지연)

참여연구원 : 한국해양과학기술원

고영탁, 유찬민,

김원년, 김종욱,

서만덕, 최선기,

오지혜

: 극지연구소

박승현, 유규철,

최학겸, 강승구,

최연진, 박지수,

정진영, 최한구,

강승현

목 차

제 출 문	i
목 차	i
표 목 차	v
그림목차	vi

제 1 장 추진 개요	1
-------------------	---

제 1 절 기획의 배경 및 필요성	2
1. 기획연구의 배경	3
2. 사업기획의 필요성	8

제 2 절 기획의 목표 및 범위	12
1. 기획의 목표	12
2. 기획의 범위	12

제 2 장 환경 분석	14
-------------------	----

제 1 절 화산재해, 지구조 및 신 해양자원 관련 국내.외 기술동향	14
1. 화산활동 특성 이해 및 영향평가	14
1) 통가 홍가 화산체 및 인근해역 현장탐사	14
2) 화산 폭발에 의한 생태계 교란/복원 모니터링 연구	14
3) 화산활동 역사 복원 연구	22
2. 화산활동 예측 및 복합지구조 진화 모델 구축	23
1) 화산활동 예측 탄성파/중.자력/지진파 자료해석 및 탐사	23
2) 지구조 해석 탄성파/중.자력/지진파 자료해석 및 탐사	24
3) 섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인연구	26

4) 마그마 특성/해양지각 유용금속 거동 상관성 연구	30
3. 신 해양자원 확보	35
1) 해양 희유금속 탐사 및 연구	35
2) 해양 생명자원 탐사 및 활용연구	38
 제 2 절 논문동향	49
 제 3 절 정책 동향	55
1. 국내 정책 동향	55
2. 국외 정책 동향	56
 제 4 절 대내·외 환경 변화	57
1. 국내 환경 분석	57
2. 대외 환경 분석	58
3. 시사점 및 전략방향	60
 제 3 장 추진 전략	67
 제 1 절 비전 및 목표 수립	67
 제 2 절 주요 추진 내용	68
1. 통가 화산활동 특성 이해 및 영향평가	68
2. 복합지구조 해역 진화모델 구축	68
3. 신 해양자원 확보	69
4. 국내·외 협력네트워크 및 국제공동연구 추진	69
 제 3 절 추진 체계	69
 제 4 절 기술로드맵	71
1. 기술정의	71
2. 주요 이슈	71
3. 기술개발 목표	73

4. 기술로드맵	74
제 4 장 사업추진의 타당성 분석	86
제 1 절 정책적 타당성	86
제 2 절 기술적 타당성	90
제 3 절 경제적 타당성	91
제 5 장 기대효과 및 향후 활용 방안	95
제 1 절 연구개발성과의 중요성	95
제 2 절 연구개발성과의 활용방안	95
제 3 절 연구개발성과의 기대효과	96
제 6 장 과제제안요구서 (RFP)	97
1. 연구의 필요성	97
2. 기술개발 및 시장동향	99
3. 연구개발 목표 및 내용	101
4. 기대효과	103
5. 최종 연구성과물	105
6. 기타사항	106
7. 연차별 투자계획	106

표 목차

표 1-1. 대양연구 연구유형 분류	2
표 1-2. SDGs의 ‘해양과 수산자원 보존 및 지속 가능한 이용’ 세부 목표	5
표 2-1. 남서태평양 해양/지구조 분야 논문 검색방법 및 결과	50
표 2-2. 남서태평양 해양과학 분야 논문게재 주요 국가	53
표 2-3. 기회와 위협요인	63
표 2-4. 강점과 약점	64
표 2-5. 전략대안 도출	65
표 4-1. 제5차 과학기술기본계획(‘23-’27) 3대 추진전략 및 실행전략	87
표 4-2. 경제성 분석결과 요약	92
표 4-3. 민감도 분석 결과	93
표 4-4. 비용-편익의 흐름	94



그림 목차

그림 1-1. 해양지각 유입과 그 효과를 설명하는 섭입대 모식도	3
그림 1-2. 불의 고리(Ring of Fire): 해양지판의 섭입에 의해 형성된 태평양/대륙 경계부 화산/지진대	4
그림 1-3. 국가/기관별 해양생물 특허 보유 현황	5
그림 1-4. 해양 생물종 및 유전자에 대한 특허 동향	6
그림 1-5. 홍가 화산 폭발 전('21 12월)/후('22년 2월) 모습 (폭발전 섬 장축의 길 이 약 7 km)과 폭발 시 화산재 기둥	10
그림 2-1. 화산재 영향과악을 위해 채취된 상자형 시료 채취기 운용 정점 위치	16
그림 2-2. UD2 정점의 해저면 영상 (-43 m)	16
그림 2-3. 환경 유전자 메타바코딩을 이용한 인위적 환경변화에 따른 해역별, 계 절별 어류 군집구조 변화	17
그림 2-4. Moytirra hydrothermal vent 이미지 사진	19
그림 2-5. 메타바코딩을 이용한 기존 서식지와 화산폭발로 새로 형성된 서식지에 서의 생물 군집 구조 유사도 분석	20
그림 2-6. 심해 열수분출공 생태계 내 인위적 교란 전후의 저서생물 OTU수에 대 한 희박화 곡선	21
그림 2-7. 환경유전자 기반 퇴적물 내 생물 군집 및 환경변수 연관 네트워크	22
그림 2-8. 라우-북피지 분지의 지진 발생심도 분석을 통한 맨틀전이대 정체슬랩 모델	25
그림 2-9. 정체슬랩과 맨틀전이대 상호작용에 기인한 맨틀용승으로 후열도 분지 및 해구인근 섭입판의 화산활동 원인 제안	26
그림 2-10. 북피지분지 상부맨틀의 단면 구조와 부화 맨틀 용융체의 용승 구조 모 델	27
그림 2-11. 통가 섭입대의 탄성과 구조 분석을 통한 맨틀 켜기의 수화작용 및 열 도 화산 작용 발생 기작 모식도	28
그림 2-12. 통가 섭입대 북쪽 끝단에서 확인된 섭입판 변형에 의한 신규 화산활동 지역	28

그림 2-13. 마리아나 해구인근 섭입판에서 발견된 소형 화산체들	29
그림 2-14. 뉴질랜드 Taupo 화산지대의 섭입판 특성 다양성에 의한 화산 분화 유형 의 변화 모델	30
그림 2-15. 섭입대 화산암의 불호정성 원소 거동 특성 비교	31
그림 2-16. 통가 열수 분출대 황화광물의 황 동위원소 조성	31
그림 2-17. 통라우분지 MTJ-1 칼데라 위치 및 획득된 용융물	32
그림 2-18. 북피지 분지 기반암 조성에 따른 열수유체 운반 회토류 거동특성	32
그림 2-19. IODP 1256D 지역 해양지각 내 금속거동 특성	33
그림 2-20. 기반암 포획 마그마성 황화물 LA-ICP-MS 분석 결과	34
그림 2-21. 커마텍 Brothers 해저산 유용금속 거동특성	35
그림 2-22. 북서태평양 희유금속 고함유 퇴적체 분포지역과 주상시료 심도별 희유 금속 함량 변화	36
그림 2-23. DB 구축에 활용된 전 대양 시료 위치	36
그림 2-24. 남서태평양 극저생산대 IODP 시추 코아 위치	38
그림 2-25. 주요 연구내용 모식도	39
그림 2-26. 주요 연구내용 모식도	40
그림 2-27. 초고온 고세균을 이용한 바이오수소생산 기술개발	41
그림 2-28. 초고온 고세균을 이용한 바이오수소생산 기술개발	42
그림 2-29. 남태평양 극저생산대 3개 정점 깊이별 미생물 군집구조 비교,	42
그림 2-30. Taxonomic profiling based on amplicon sequencing	43
그림 2-31. NCI의 NPR과 NPDP	44
그림 2-32. RIKEN NPedia 검색 화면	45
그림 2-33. CSIO 심해 방성균 연구 프로젝트로부터 도출된 천연물	45
그림 2-34. GRDD Nature Bank 활용 연구 개념도	46
그림 2-35. 러시아/독일의 심해 생물다양성 프로젝트 조사 해역	47
그림 2-36. 미생물의 생태학적 및 공업적 활용방안	49
그림 2-37. 2010년 이후 남서태평양 복합지구조 관련 연구동향	51
그림 2-38. 남서태평양 대양/지구조 분야 연도별 논문발표 추이	52
그림 2-39. 남서태평양 대양/지구조 분야 국제연구협력 동향	53
그림 2-40. 남서태평양 대양/지구조 분야 선도 연구기관	54
그림 3-1. 목표 달성을 위한 전략맵	67

그림 3-2. 사업의 추진체계 모식도	70
그림 4-1. 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23-'27) 비전 및 전략	88
그림 4-2. 연구선 산·학·연 공동활용 활성화 중장기 발전계획 전략 및 중점 추진 과제	89





제 1 절 기획의 배경 및 필요성

1. 기획연구의 배경

□ 대양연구는 국가 미래세대를 위한 필수·핵심 연구영역

- 대양연구 분야는 원자력, 우주항공 분야와 유사하게 거대과학 (Big Science)으로 정부 차원에서 많은 투자가 필요하며, 지구환경/자원 문제를 해결하기 위해서는 대양에서 일어나는 복잡한 현상에 대한 연구수행이 필요

표 1-1. 대양연구 연구유형 분류

분야	연구 내용
물리해양학	해류, 조석, 파랑 등 해양에서 일어나는 물리적 현상과 기후변화, 대양 대순환 등을 연구
지질해양학	해저 지진, 해저 화산, 해구, 해산, 해저퇴적물 등을 아우르는 해저 분지의 지질학적 현상 규명
생물해양학	다양한 해양 생물의 분포 및 생물종 다양성, 생태학적 특성, 먹이 사슬, 식량 자원 등을 연구
화학해양학	해수분석, 해양 환경오염을 포함하는 해양 또는 해양과 인접한 환경에서 일어나는 물질 생성과 변화 소멸에 이르기까지 순환과정을 연구

- 대양연구는 국가 현안이슈(기후변화, 자연재해, 해양환경오염) 해결, 신(新)자원(해양생명, 광물자원) 개발 및 해양경제영토 확장 등을 목적으로 하는 해양탐사를 통한 연구 수행
 - 연구에 시·공간적인 제약이 많은 한계를 가지고 있으나, 특정 국가에서 독점할 수 없는 무한한 기회영역 및 파급효과 보유
 - 해양은 지구 생명종의 80%가 서식하고 망간·니켈·코발트·희토류 등을 보유한 미개척지(95%)로 미래자원 개발의 새로운 기회영역
 - 국가 관할권이 없어 UN 등 국제사회의 규제하에 자원 선점을 위한 경쟁이 치열한 반면, 공동이익을 위한 다양한 협업 노력도 상존
 - 연구선, 탐사장비 활용 등으로 타 분야에 비해 상대적으로 많은 시간과 예산이 소요되며 경제성에서 불확실한 측면이 존재
 - 해양장비산업 육성 산업적 파급효과와 과학기술 기반의 국제협력 강화 등 공공적 파급효과 등으로 정부 투자의 선행 필요

□ 지구물질의 순환 경로 심해저는 생명/광물자원의 보고

- 지구물질 순환은 지구동역학적 과정으로 형성된 지판 경계부에서 발생하며 섭입대에서 심층수(deep water), 심해퇴적물(심해저저 탄소 등), 혹은 해저산이 지구 내부로 유입되고, 해저화산, 열수분출공 등을 통해 지구 내부 물질이 심해저로 배출됨(그림 1-1)

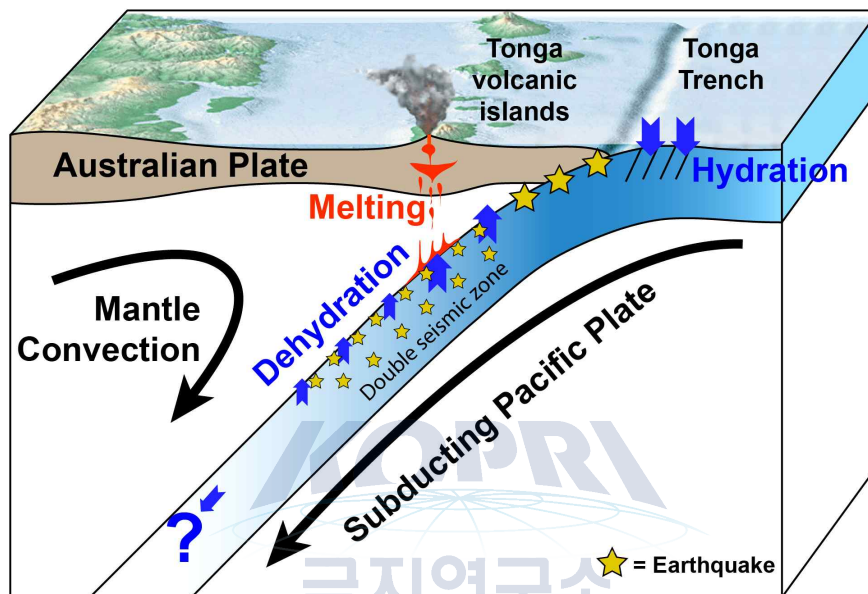


그림 1-1. 해양지각 유입과 그 효과를 설명하는 섭입대 모식도

(출처: 워싱턴대학)

- 유입된 탄소, 심층수 함량 및 유입 깊이에 따라 기반암과의 반응 정도, 분출되는 기체상, 화산 폭발의 강도 및 분출 용암의 화학 조성이 달라짐
- 특히, “불의 고리”로 불리는 환태평양 화산대는 해양지각의 섭입이 발생하는 지역으로 고강도의 지진 및 화산 폭발이 발생하여 큰 인명과 재산 피해를 빈번히 일으키는 지역임(그림 1-2)
- 분출된 용암은 하부지각 및 맨틀을 구성하는 광물과 고유한 화학 성분을 지니고 있기 때문에 지구의 가장 많은 부분을 구성하는 맨틀 진화 정보를 획득할 수 있음
- 특히 열수분출구를 통해 배출되는 금속과 황은 심해 생태계를 유지할 수 있는 영양분으로 활용되며, 열수 순환에 의해 경제적으로 가치있는 광물이 퇴적 농축되기도 함
- 예로써 지구 내부 물질이 활발히 분출되는 해저 화산대에는 지구상 모든 해저열수광상이 밀집되어 있고, 다양한 해양 신물질 혹은 신생명·유전자

원이 발굴되고 있음



그림 1-2. 불의 고리(Ring of Fire): 해양지판의 섭입에 의해 형성된 태평양/대륙 경계부 화산/지진대(출처: National Geographic Society)

□ 해양 생물다양성 보존 및 지속 가능한 이용

- 대양에 대한 권리의무 관계가 모호한 상황에서 해양자원 및 국가 간 해양영토 경쟁에 전략적으로 대응하기 위해서는 대양 연구를 통한 대응 체계 구축이 필요
 - 유엔은 ‘2030 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals(SDGs))’에서 해양생물다양성 보존 및 지속 가능한 이용을 위해 ‘해양과 수산자원 보존 및 지속 가능한 이용’을 채택
 - 기후변화, 해양 환경오염 그리고 수산자원 남획 등에 의해 세계 주요 수산자원이 지속적으로 감소하고 있는 상황에서 해양의 식량자원 보존 및 관리 방안과 해양생태계 보존 방안 등을 목표로 하고 있음
 - 국내에서는 전 지구적으로 이루어지고 있는 지속 가능한 개발과 관련된 연구가 미흡한 실정으로 활성화시킬 필요가 있음
- 국가관할권 이원영역의 생물다양성(BBNJ) 보존 및 지속가능 이용 협정안 타결
 - ※ BBNJ: Bio-diversity Beyond National Jurisdiction
 - 공해 및 심해저에 해양보호구역(MPA: Marine Protected Area) 등 구역기반관리수단을 설정하는 기준과 절차를 마련하고, 공해 및 심해저에 영향

을 미칠 수 있는 활동에 대한 환경영향평가의 실시 요건 및 상세 절차 규정

- 공해 및 심해저에서 채집한 해양유전자원 및 그로부터 획득한 디지털 염기서열정보(DSI: Digital Sequence Information)에 대한 접근과 이용내역을 투명하게 공유하고, 상업적 이용으로부터 발생하는 이익을 공유하기 위한 다자적 메커니즘 수립
- 국제해양법이 UN에서 '82년 합의된 이후 발효까지('94) 장시간 시간이 소요된 점을 고려할 때 정시 채택 및 발효까지 상당한 시일이 소요될 것으로 예상되며, 협정에 예외 적용될 수 있는 생명자원 확보를 위해 발효 전 다양한 시료의 확보 필요

표 1-2. SDGs의 '해양과 수산자원 보존 및 지속 가능한 이용' 세부 목표

SDGs 14번 목표	세부목표
해양과 수산자원 보존 및 지속가능한 이용	1) 2025년까지 해양오염 예방 및 감소 2) 2020년까지 해양생태계 지속 가능한 관리 및 보호 3) 해양 산성화의 영향 최소화 4) 2020년까지 효율적 어획 규제, 남획 및 IUU 어업(Illegal, unreported and unregulated fishing), 파괴적 어업 방지, 과학기반 관리 이행 5) 2020년까지 연안 및 해양의 10%를 보호구역 설정 6) 2020년까지 과잉어획능력 및 남획유발 어업 그리고 IUU어업의 보조금 금지 7) 2030년까지 해양자원의 지속가능 이용을 통한 도서국가 및 최빈국 혜택증대

- 독일의 BASF는 세계 최대 종합화학회사로 해양생물로부터 수집한 약 13,000종의 특허 중 47%를 보유, 특허 선점에 대한 논란 촉발(그림 1-3)

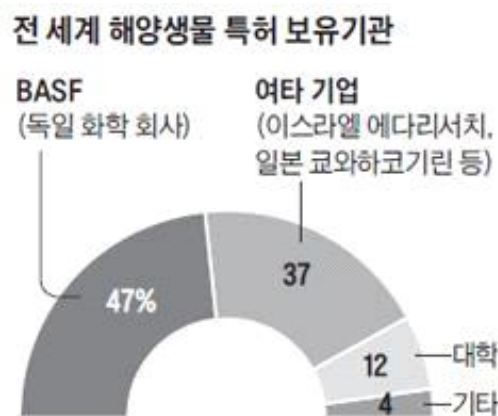


그림 1-3. 국가/기관별 해양생물 특허 보유 현황(출처: 생명자원서비스)

- 최근 심해저에 서식하는 극한 미생물이 각광받고 있으며, 등록된 특허 중 80% 이상이 미생물 특허임(그림 1-4)

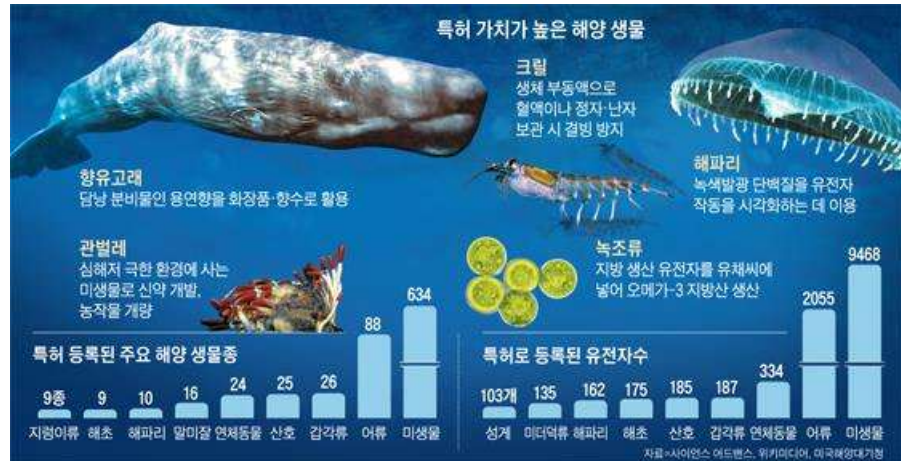


그림 1-4. 해양 생물종 및 유전자에 대한 특허 동향(출처: 생명자원서비스)

- 고부가가치 산업인 해양바이오 분야의 활성화 및 국제적 이슈에 대응하기 위해서는 생명자원에 대한 연구개발을 통해 글로벌 경쟁력 제고 필요
- 전 세계 해양바이오 시장은 빠르게 성장하고 있으며, 2030년 80.5억 달러에 도달할 것으로 전망
- 주요국은 해양바이오 분야에 대한 국가 단위의 계획을 세워 R&D에 투자하고 있으며, 유럽은 각국의 해양혁신클러스터를 조성하여 해양바이오 산업 활성화를 위한 노력을 하고 있음
- 국내 해양바이오산업 시장 규모는 세계의 2%에 불과하며, 지적재산권도 선진국에 뒤쳐져있는 실정
- 해양생명자원 발굴, 대량생산, 사업화 관련 R&D를 추진하고 있지만, 생명자원 확보의 어려움과 국제규범 등으로 생명자원 이용 제한이 강화되고 있어 이에 적극적인 대응이 필요

□ 해양 금속자원 공급원 다원화 필요성

- 육상자원의 한계에 따른 자원 공급원 다원화 및 국가 산업경쟁력 확보를 위해 심해저 광물자원 탐사 및 개발 역량 고도화 필요
- 전 세계는 이미 심각한 자원부족 상황에 이르렀으며, 육상자원 고갈 현상이 커질수록 해양자원에 대한 경쟁은 더욱 치열해질 전망
- 미국, EU, 일본 등 주요 선진국은 미래 산업 전망에 기반해 전략 금속을 선정하고, 이들의 확보 및 관리를 위한 전략을 수립하여 수행하고 있음
- 중국, 일본 등 한반도 주변국은 고함량 희토류 퇴적물 분포지를 확인하고,

ISA 탐사규칙 제정 제안 예정

- 국내의 경우 대부분의 금속자원을 중국으로부터 수입에 의존하고 있어 수입 의존 문제가 매우 심각한 상황
 - 특히 희토류는 국내 LED, 반도체, 하이브리드자동차 등 첨단 사업의 주요 자원으로 중국이 '희토류 무기화'를 나설 경우 관련 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 전망
 - 희토류, 리튬, 코발트, 니켈, 마그네슘 등은 희유금속이며 4차 산업혁명 핵심기술에 필수적인 자원으로 국내 산업의 안정적인 발전을 위해서는 안정적 확보가 중요
 - ※ 국내에서도 코발트, 리튬, 텅스텐, 니켈, 망간을 5대 광물로 선정하여 자원확보를 위한 전략을 수립하고 있음
 - 최근 심해 환경에 대한 과학적 이해 부족 등으로 심해저 광물자원 개발에 대한 국제사회의 우려가 높아지고 있으며 환경단체에서도 반대하고 있는 상황
- 심해저 광업활동으로 인해 발생하는 해양환경오염은 다른 국가에 피해를 줄 수 있기 때문에 해양환경의 손상을 예방하고 보호하기 위한 연구가 필요
- 해양광물자원 탐사·개발을 효율적으로 수행하기 위해서는 심해 저서생물 및 생태계, 그리고 심해저 광업에 따른 환경영향평가 등에 관한 연구가 매우 중요하기 때문에 해양환경에 대한 자료 확보가 필요

□ 희유금속의 자원 무기화 및 바이오소재에 대한 구체적 관심 증대, 신 해양자원 선점을 위한 국가 간 경쟁심화와 대양탐사 활동 증가

- 섭입대 복합지구조 해역(남서태평양 배호분지-화산열도-통가해구-해저산-심해분지)은 열수, 해산, 해구, 심해저 등 다양한 지질 요소가 분포하여 대양자원 생성과 지질/화학/생물/지구동역학적 순환기작 규명에 적합 (그림 1-1)
 - 다양한 지질환경으로 다양한 특이 생물서식지가 분포하여 생명자원연구에 최적의 조건을 갖추고 있으며, 특히 생명의 기원연구에 적합한 열수분출공 및 수소 생태계가 심해분지에 분포
- 희토류는 그린에너지 기술, 신 전자장비, 우주항공산업등에 필수적인 소재로 자원무기화 가능성에 따라 공급원 확보를 위한 경쟁이 심화되고 있으며, 해양탐사를 통한 공급원 선점 필요
 - 남서태평양 극저생산대는 낮은 표층생산성에 따른 낮은 퇴적율로 희유금속을 다량 함유한 퇴적체가 분포할 가능성이 높음
 - IODP가 남서태평양 극저생산대에서 획득한 2개의 시추 코어는 최대 4300ppm의 희유금속을 함유한 퇴적체가 10m 깊이에 3m 두께로 분포

(Dunlea et al., 2015, Paleoceanography)

2. 사업기획의 필요성

□ 국내 대양연구

- 기존의 연구 R&D 과제의 경우, 고립된 지구조와 관련된 물질순환 연구로 지구조 상호 관련 물질순환에 대한 양질의 결과 획득에 있어 한계점 존재
- 접근 가능한 복합지구조를 중심으로 중장기 R&D 과제를 수행함으로써 여러 지구조를 효율적으로 탐사 활용함으로써, 대양탐사 참여를 적극 활성화하여 연구 다변화 및 장기간 지속 가능한 과학적 성과 창출과 해양 과학분야 전문인재 육성이 가능
- 해양수산과학기술 육성 기본계획 중 한국해양과학기술원의 기관별 브랜드 과제인 ‘글로벌 대양탐사 프로젝트’에 부합하는 도전적 사업
- 대양연구는 국가 현안이슈 대응을 위한 핵심 연구영역으로 지구환경/자원 문제를 해결하기 위한 연구 수행 필요
 - 해양 연구 기관 간 연구 중복성 증가에 따라 대양을 대상으로 한 해양과학기술원 만이 주도적으로 수행할 기관 대형과제를 발굴하고 연구역량 집중 필요
 - 본원/극지연의 연구 대상 지역의 갭을 극복하고 상호 협력을 통해 연구 효율성을 제고할 수 있는 연구 수행 필요 (극지연-남극, 본원-북태평양 연구 수행에 따라 남태평양 대상 연구사업 부재)
 - ※ 남서태평양은 아라온호의 기항지인 뉴질랜드 크라이스트 처치 인근에 위치하여 적은 비용과 시간으로 효율적 탐사 가능
 - 제2쇄빙선 건조(‘27년 예정)를 대비한 연구선 활용사업 발굴이 필요하며, 본-분원 간 아리온호를 활용한 공동연구 수행으로 대양연구 영역 확대 및 국제수준의 과학적 성과 창출 필요
 - ※ 어려운 접근성으로 이 지역에 대한 연구가 미진하며, 한국-장보고 기지 이동항로에 근접하여 아라온호를 활용 시 해양과기원/극지연의 국제적으로 인정받는 우수한 연구성과 창출 가능

□ 남서태평양 미개척 복합지구조 해역 탐사 필요

- 복합지구조 해역의 지각 진화를 유발한 다양한 지질/지구조 프로세스에 대한 종합적인 이해와 지구물질순환(지각-심해저-대양)을 규명하여 자연재해예측 신뢰도 제고 필요
- 지구내부 에너지 분출에 의한 자연재해(해저화산, 지진) 영향 파악 및 재

해지역 생태계 자원복원 전주기 모니터링 필요

- 남서태평양 미개척 복합지구조 해역(남위 20°~35°)은 높은 과학적 관심과 자원적 가치를 지니나 접근성 낮아 연구가 미흡하여 는 지역
 - 국제지각시추프로그램(International Ocean Discovery Program; IODP) 329 탐사(2006.12 - 2007.01) 이후 추가적인 탐사가 이루어지지 않은 미탐사 지역으로서의 희소성 있는 과학적 가치
 - ※ 한국해양과학기술원은 남태평양 피지 및 통가 해역 탐사 경험이 있으며, 해당지역 거점을 활용하면 탐사가 용이할 것으로 사료됨
 - 배호분지(Back-Arc)-호상열도(Arc)-해구(Trench)-해산(Sea mounts) 및 심해 분지가 상호작용을 하는 지질학적 특성으로 인해 다양한 지각 활동에 의한 물질 순환 규명과 신자원 발견 및 과거 기후변화 복원 및 해양지각 진화모델 연구에 적합
- 남태평양 복합지구조 해역(남위 20°~ 35°)은 지구동력학적 과정으로 생성되는 후열도 분지, 해령, 해산 섭입대 등의 일련의 지구조 환경이 밀집 공존하기 때문에 물질, 에너지 공급/흡수, 자원 생성/풍화, 지구조 환경에 따른 생물 다양성, 자연재해 등 종합 지구물질순환관련 연구 및 신자원 확보에 최적화된 해역이나, 접근성으로 인해 세계적으로도 연구가 빈약한 지역
- 남서태평양은 화산/지진등의 자연재해가 빈발하는 지역이지만, 도서국의 열악한 경제/연구 인프라 부족으로 자체 연구가 부족하며, 해양 선진국 또한 어려운 접근성으로 연구가 미흡

□ 해저화산 폭발 재해 평가 및 생태계 복원 과정 전주기 모니터링 필요

- '22년 통가 호상열도 내 홍가 화산(HTHH, Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai) 해저화산 폭발은 1883년 이래 최대 규모로 평가받고 있으며(그림 1-5), 대규모의 자연재해에 따른 생태계의 복원과정 모니터링 최적지
 - 해저 화산폭발은 화산재 및 해일에 의한 직접적인 피해뿐만 아니라 암석, 화산재, 퇴적물 비산에 따른 해양생태계에 대규모 충격을 유발함
 - 기록된 최대 규모의 해저 자원 재해로 영향평가 및 생태계 복원 과정 이해는 심해저 광물자원에 따른 피해 및 생태계 복원 과정을 이해할 수 있는 최적의 자연 실험장 역할을 할 수 있음
 - 화산 재해에 따른 생태계 복원 과정의 전주기 모니터링이 필요하며, 이에 과제 개시의 시급성이 요구됨



그림 1-5. 홍가 화산 폭발 전('21 12월)/ 후('22년 2월) 모습 (폭발전 섬 장축의 길이 약 7 km)과 폭발 시 화산재 기동(출처: jtbc)

□ 신규 해양자원 확보와 활용

- 향후 새로운 BBNJ(관할권 이원지역에서의 생물다양성 협약) 국제해양법 이행협정에 따라 국내 연구계 및 산업계의 큰 변동이 예상되므로 해양생물다양성 보존 및 지속적인 이용, 그리고 국익을 위해 적극적인 준비와 대응 필요
- 다양한 해양 지구조와 관련된 해저탐사는 해양생물다양성에 대한 많은 연구 기회 제공
- 유엔이 '지속가능 개발목표(SDG)'를 채택('15)함으로써, 국제사회에서 해양과 해양자원 보존 및 이용을 위한 노력 확대 전망

□ 국제공동연구 체계 구축으로 남서태평양 도서국 영향력 제고 및 지지기반 확보

- 다양한 해양 지구조와 관련된 해저탐사는 해양생물다양성과 신자원 및 생명의 기원에 대한 많은 공동연구 기회 제공
- 뉴질랜드 오클랜드대학과 하와이 대학은 통가 화산 암석/화산재 연구 및 지구조 연구에 관심을 표명하고 있으며, 통가 지질조사소는 현장 조사 협력 표명
- 국제학술기구인 Inter-Ridge, 오클랜드/하와이대학, 남태평양 도서국을 포괄하는 국제공동연구 체계 구축
- 남태평양 14개 도서국은 국제사회 주요 이슈에 공동 대응하고 있으며, 이들 도서국의 영향력 확대 및 지지기반 확대를 위해 도서국 EEZ 및 인근 공해상 연구사업 추진 및 정보 제공 필요

□ 기획대상 연구개발의 중요성

- 미답지로 남겨진 남서태평양 연구를 통한 해양과학 선도국 그룹 진입
 - 남서태평양의 복합적 지질구조는 과거 복잡한 판운동의 진화 과정을 통해 생성된 결과임. 그러나 태평양과 동아시아 그리고 한반도의 지구조 진화를 결정하는 중요한 연결고리가 될 수 있음에도 현대적 해양과학 탐사 활동의 부재로 지금까지도 과학적 미답지로 남겨져 있음
 - 한국 주도의 남서태평양 다학제간 종합 연구를 추진함으로써 연구 지역의 과학적 난제를 해결하고, 재난 상황 대응에 필요한 매뉴얼 생성에 필요한 기초 자료를 도서국에서 제공하며, 관련 국가 간 연구 협력 강화를 통해 국제 공동연구를 주도 함으로써 해양과학 선도국 그룹으로 진입 가능
- 접근이 어려워 연구가 미진한 지역으로 희소성과 독창성 있는 해양탐사를 토대로 생명의 기원/지구조 진화 규명 등 세계 수준의 과학적 성과 창출이 기대됨. 연구대상 지역은 아라온호의 이동 항로에 위치하여 비용 효율적 탐사가 가능하며, 또한 제2 쇄빙선 건조를 대비하여 아라온호 활용성을 제고할 수 있음
- 홍가 화산폭발은 1883년 인도네시아 Krakatoa 해저 화산폭발 이후 최대 규모로 발생한 자연재해임에도 피해 범위와 자연복원 과정 추적 등의 연구가 미진함. 조속하고 광범위한 조사는 정확한 영향범위 산정과 전 주기적 생태계 복원 과정 연구에 필수적임
- 지진이나 화산활동은 관측이 힘든 예측 불가능한 영역에 속하기 때문에 현상학적 발생 보고 수준의 연구에 국한됨. 하지만, 지구조 연구를 통한 단층 및 지하 마그마의 분포 자료 및 화산활동 역사 기록은 화산폭발 위험지역 선별 및 재난 대비에 필수적 정보를 제공함.
- 또한 남서태평양 14개 도서국은 국제기구에 캐스팅 보트로서 중요한 역할을 하고 있으며, 남태평양 도서국 자연재해 관련 정보 제공을 통해 영향력을 제고하고, 국제기구 중요 의제에 대한 지지기반을 확보할 수 있음
- 국제적 환경변화를 고려한 대양 생태계/생명자원 선점 및 실용화 기술 확보
 - 일본, 프랑스, 미국 등 해양 선진국에 비해 뒤쳐진 생태계/생명자원 활용 기술 차이를 극복하고 신생명·유전자원 발굴의 발판 마련
- 공해상 희유금속 자원확보의 중요성
 - 중국은 전세계 희유금속 생산 및 공급의 85%를 차지하며, 희유금속을 자원 무기화하는 반면, 한국은 희유금속을 전량 수입하고 있어, 희유금속 수급이 불안정한 실정임
 - 일부 지역의 대양저 퇴적물은 4차 산업혁명에 필요한 12대 관심 광물의 주요 금속을 함유
 - 4차 산업혁명에 필수적인 희유금속자원을 확보하기 위해 일본, 중국과 같이 대양저 퇴적물의 희유금속 연구가 수행되어야 함

- 우리나라 대양저 퇴적물 희유금속 자원잠재력 연구는 미진한 실정으로, 기초 연구를 통해 대양저 퇴적물 내 희유금속의 자원화 가능성 및 유망 지역 선별을 위한 기본 자료 도출 필요
- 해류, 지구조 특성, 대륙과의 원지성 등에 따른 함희유금속 퇴적물 기원 및 성인 연구를 통해 희유금속 추출을 위한 기초 자료 축적 필요
- 선행 국가연구개발사업 수행 성과의 활용성 제고
- 기존에 한국해양과학기술원이 남서태평양에서 탐사한 해저열수광화대와 복합지구조 기반암의 지구화학적 상관성을 비교하여 지표-지각 물질순환 과정에 대한 기초 자료를 확보함으로써 신 해양금속자원 발굴에 활용

제 2 절 기획의 목표 및 범위

1. 기획의 목표

- 새로운 본·분원 간 협력 연구사업 모델 구축 및 남서태평양 복합지구조 해역 탐사의 주도적 탐사 추진을 연구기획
- “남서태평양 자연재해 예측 기반구축 및 신 해양자원 탐사(차후 확정된 과제명 반영 필요)”사업의 체계적 추진을 위해 필요한 정보를 제공하고 단계별 기술개발 이정표를 제시
- 통가 화산활동 특성 이해, 지구조 안정성 평가, 해저 화산폭발 영향 평가, 화산 재해 지역 생태계 복원 과정 연구, 생명자원 및 광물자원 탐색 등 현 기술 및 동향분석 및 기술수요 예측을 통해 R&D 사업 추진근거 확보

2. 기획의 범위

- 화산활동 특성 이해, 지구조 안정성 평가, 해저 화산폭발 영향 평가, 화산 재해 지역 생태계 복원 과정 연구, 생명자원 및 광물자원 탐색 등 남서태평양 복합지구조 해역의 종합 탐사를 위한 관련 분야 국내외 기술동향 분석
- SWOT 분석을 통한 연구 추진전략 및 추진체계 수립
 - 기관/분야별 최적의 연구진 구성
 - 주요 추진 세부과제 도출
 - 약점 분야 도출 및 해당 분야에 대한 국내·외 연구협력 추진
- 분야별 연구 자문을 통한 세부 연구 내용 구체화
 - 국내·외 전문가 풀 구축

- 전문가 연구 자문을 통한 상세 연구 내용 작성
- 국제공동연구 네트워크 구축 및 관련 기관과 MOU 체결
- “남서태평양 자연재해 예측 기반구축 및 신 해양자원 탐사(차후 확정된 과제명 반영 필요) 관련 전략과제 도출(연구 개발의 목표 및 내용 설정) 및 세부 로드맵 작성



제 1 절. 화산재해, 지구조 및 신 해양자원 관련 국내·외 기술동향

1. 화산활동 특성 이해 및 영향평가

1) 통가 홍가 화산체 및 인근해역 현장탐사

- 2022년 1월 5일 통가 지역에서 홍가 화산에서 발생한 대규모 폭발에 대응하기 위하여 극지연구소 아라온호가 남극 탐사 활동을 마치고 한국으로 돌아오는 4월에 현장 탐사 수행
 - 다학제 간 연구팀의 승선을 통해 지형 변화, 분화구 내외부의 해수층 특성, 화산 폭발에 의한 퇴적물 시료 채취, 해수면 상부 지형 변화, 천해 생태계 영상촬영 등 정밀 현장 탐사를 수행하였음
 - 아라온호 탐사 이후에 뉴질랜드 등에서도 현장 탐사가 수행되었으나, 분화구 내부 등에서 정밀 탐사는 극지연 탐사가 유일함
 - 통가 화산 분출 1년이 지난 시점에서도 아라온호 탐사 시 획득된 지질, 지구물리, 해수 시료 등이 가장 종합적인 것으로 파악됨
- 탐사 결과 홍가 분화구의 경우 평균 200m 내외였던 수심이 폭발 후 800m 이상의 깊이로 변한 것을 확인하였으며, 스파커 탐사를 통해 분화구 내부에 약 100m 정도의 화산쇄설물이 쌓여 있다는 사실과 화도로 추정되는 구조를 발견
- 분화구 내 CTD 탐사 결과 800m에 달하는 홍가 화산체 분화구는 표층수로 가득 차 있음을 확인했으며, 외부 해수와의 유통이 거의 없음을 확인했음. 현재까지 어디에서도 확인되지 않은 매우 독특한 상황이며 장기적인 모니터링이 필요함
- 현재 지형, 스파커, 자력, CTD, 코어 자료를 종합하여 통가 화산의 강력한 폭발 메커니즘과 화산 해일이 발생한 메커니즘을 해명하는 논문을 작성 중임

2) 해저 화산폭발에 의한 생태계 교란/복원 모니터링 연구

- 육상 화산폭발에 의한 생태계 교란과 복원에 관한 연구는 비교적 많은 반면, 대형 해저화산 폭발에 의한 해양생태계 교란과 복원에 관한 연구

사례는 극히 제한적임

- 통가 해저화산 폭발 관련 해양생태계의 교란과 복원에 관한 연구 사례는 없음
- 환경유전자(environmental DNA; eDNA)는 물이나 토양, 공기 등 다양한 환경에 존재하는 유전물질로 해당 환경에 서식하는 유기체의 배설물이나 점액, 탈락한 조직 등으로부터 유래함. 환경 유전자 분석은 직접적인 생물 채집 없이 해수나 퇴적물 등 간접적으로 채취한 시료를 이용하기 때문에 생태계에 가하는 영향이 적을 뿐만 아니라 물리적 접근이 어려운 곳의 생태 정보를 확인하기에 유용함
 - 한 번에 대용량의 염기 서열을 제공하는 차세대 염기서열 분석법(Next Generation Sequencing; NGS)의 발달에 따라 환경 유전자를 이용한 메타바코딩 분석으로 해당 환경에 서식하는 수많은 생물의 서식 유무와 종 다양성을 높은 민감도와 정확성으로 확인 가능
 - 이러한 장점들로 인해 환경 유전자 메타바코딩 기법을 적용한 환경변화에 따른 생물다양성 평가 및 장기 모니터링 연구가 증가하고 있으며 그 유용성 또한 입증함
 - 그러나 현재까지 환경 유전자 또는 메타바코딩을 이용한 해저화산 폭발 관련 해양생태계 교란 및 복원에 관한 연구 사례는 보고된 바 없음
 - 따라서 해저 화산폭발에 따른 해양생태계 복원 과정의 지속적이고 효율적인 모니터링을 위해 환경 유전자 메타바코딩 기법을 적용한 연구 수행 및 객관화된 자료 확보가 필요함

가) 국내동향

- 아라온 현장 조사(2022.04)를 통해 화산 분화의 영향이 컸던 4개 정점과 영향이 적었던 4개 정점에서 박스 코어(그림 2-1) 및 해수를 확보하여 화산재 영향권과 비영향권에서의 미생물, 무척추동물 군집 구성을 비교 분석 중

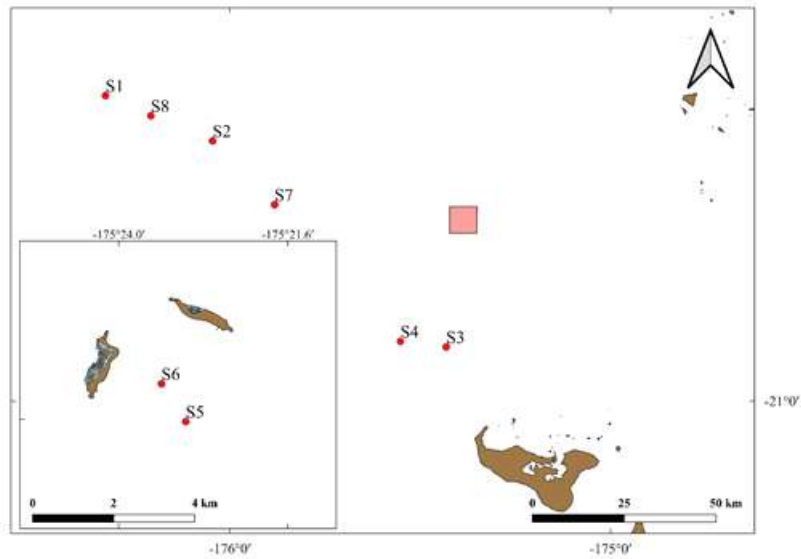


그림 2-1. 화산재 영향파악을 위해 채취된 상자형 시료 채취기 운용 정점 위치

- 화산재에 의한 해양생태계 생물다양성 변화 양상과 코어와 해수에서 화산폭발 유래 유독 성분의 잔존 여부와 해양생물에 미칠 잠재적 영향을 확인 중
- 해저화산 상단부(수심 43 m)의 기질에 고착하여 서식하는 자포동물(말미잘류)의 생존을 확인(그림 2-2)

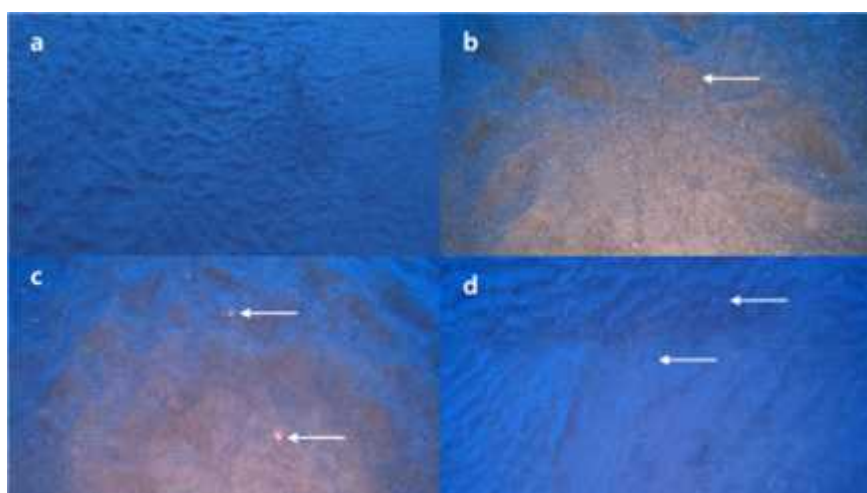


그림 2-2. UD2 정점의 해저면 영상 (-43 m). a: 해저면 영상 (화산재와 화산쇄설물들), b: brittle stars, c: tube anemone (폭발 이후 돌아온 생명체), d: tube anemone과 저서생물이 만들어 낸 홀

- 현재 국내에서도 기존 생물다양성 연구 방법의 단점을 보완한 환경유전자 기반 해양생태계 연구가 증가하고 있는 추세이며 관련 후속 연구 또한 점차 증대될 것으로 기대됨
- 환경 유전자 메타바코딩 분석 기반 해양환경 변화에 따른 생물 군집 구조 차이를 밝힌 연구 사례는 이를 활용한 해저 화산폭발에 따른 생태계 교란 및 복원 모니터링 연구에 적용/수행 가능성을 제시함(그림 2-3)
- 인위적 활동으로 인해 해저지형이 변화된 해역과 주변 해역 사이 어류 및 식물플랑크톤 군집구조의 유의한 차이를 확인하였으며, 계절에 따라 군집 내 유의하게 풍부한 종 또는 분류군이 달라지는 것 또한 환경 유전자를 통해 확인함
- 높은 분류학적 resolution(species-level)으로 해저지형이 변화된 해역에서 유의하게 풍부한 주요 어종을 보고하였으며 환경변화에 따른 지속적인 모니터링의 필요성을 언급함

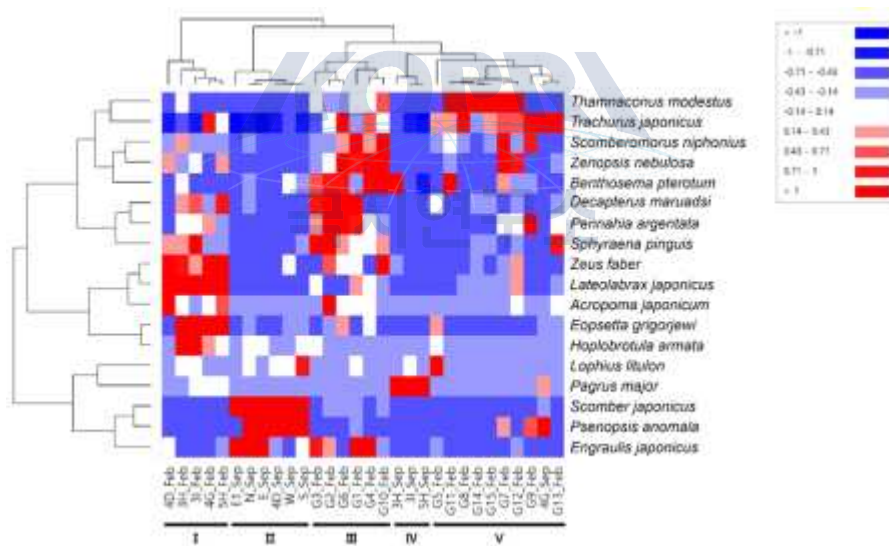


그림 2-3. 환경 유전자 메타바코딩을 이용한 인위적 환경변화에 따른 해역별, 계절별 어류 군집구조 변화(Kim et al., 2022)

나) 국외동향

- 가장 최근의 중요한 연구로 프랑스 연구진이 주도한 서인도양의 Reunion Island에서의 해저 화산활동(1998년부터 2007년까지의 27년간)에 의한 해양생태계 교란과 복원 과정을 산호초 군집의 생물다양성과 구조 그리고 인구통계학 분석으로 해양생물의 천이 과정을 밝힘(Jouval et al., 2022, Scientific Reports)

- 1차 천이(유기물이 전혀 존재하지 않는 불모지에서 시작되어 안정된 군집이 될 때까지의 생물의 천이)와 2차 천이(유기물이 일부 존재하는 환경에서 시작되어 안정된 군집이 될 때까지의 생물의 천이) 과정에서 유리한 생활사 전략을 갖는 돌산호의 일종인 *Pocillopora* 군체의 유생이 해양생태계에서 우점하게 되었다는 것을 밝힘(Jouval et al., 2022, Scientific Reports)
- 일반적으로 새 지형이 생기면 '시아노 박테리아'가 우세하지만, 통가 해저 화산폭발 이후 발견된 박테리아는 화산 주변 온천이나 화산에서 발견되는 박테리아와 유사함(Dragone et al., 2023)
- 하와이대학교는 1983년부터 킬라우에아(Kilauea) 화산활동으로 인한 용암이 해양 환경에 미치는 영향을 연구해 오고 있으며 2018년에는 화산 인근 연안 식물플랑크톤의 급격한 발생이 용암과 화산재에 존재하는 철과 인에 의한 성장 증가로 보고함(Lyte, 2018, <https://www.civilbeat.org>)
- 2011년 필리핀 Mount Bulusan 분출 전후(2010년 8월 ~ 2012년 9월)의 하천 수질을 분석한 결과 분출 후 하천 내 평균 용존 실리카 (SiO_2) 농도가 증가하였으며 이는 규조류 우점 전환의 주요인으로 보고함(Siringan et al., 2018, Estuaries and Coasts)
- 칠레의 PCC (Puyehue-Cordón Caulle Complex) 화산폭발에 영향을 받은 아르헨티나 북파타고니아 호수 내 동물플랑크톤은 화산재 노출 후 생존율과 번식력이 감소하였고 특히 화산재의 농도가 8 mg/L를 초과하면 성체까지 발달이 불가능함을 실험적으로 증명한 바 있으며(Balseiro et al., 2014, Ecol. austral.), 현재까지 화산재가 해양동물플랑크톤에 미치는 영향에 대한 연구는 전무함
- 1980년 St. Helens 화산재의 연어(smolt)와 태평양 청어(자어)에 대한 영향연구에서 화산재 입자가 용출수보다 독성이 강한 것으로 보고됨(Newcomb and Flagg, 1983, Mar. Fish. Rev.; Boehlert and Morgan, 1985, Hydrobiologia)
- 북마리아나 제도 연방 Anatahan 섬 화산폭발 이후, 인근의 화산활동 영향을 받지 않은 섬과 비교해 Anatahan 내 어류, 산호, 홍조류 및 미세조류의 개체가 1.4~3배 감소한 것을 확인함(Vroom and Zgliczynski, 2011, Coral Reefs)
- 남서태평양 해양 열수구에서의 금속은 미생물에게 유용한 영양소로 작용하며, 동북동 라우 분지에서 기원한 열수 열원의 금속은 미생물의 생리학 및 해양 생지화학 순환에 영양을 미침(Cohen., et al, 2021, Biogeosciences)

- 해양지각에 해수가 스며들어 마그마에 접근한 해수가 광물을 용해하여 다양한 광물 구조물을 형성하여 특별한 마이크로바이옴과 생물 지리학적 중요한 연구를 진행(그림 2-4)

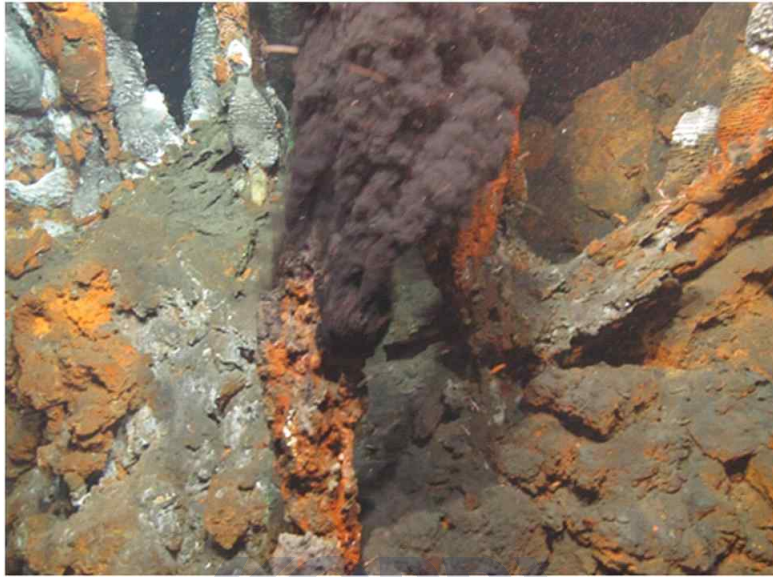


그림 2-4. Moytirra hydrothermal vent 이미지 사진(Sakellariadou F., et al, 2022, Pure and Applied Chemistry)

- 육상 화산폭발에 따른 생태계 영향 및 복원 연구에서는 최근 환경 유전자 기법을 적용한 사례가 보고되고 있음
- 미국 연구진은 2008년 알래스카의 카사토치 섬(Kasatochi Island) 분화 5년 후의 샘플을 이용하여 토양 내 유기물 유입에 따른 미생물 군집구조 및 기능 차이를 확인하였음(Zeglin et al., 2015)
- Epilithon(crust와 mat material)을 이용한 메타바코딩 분석을 통해 2018년 화산폭발 중 새로 형성된 하와이 anchialine 서식지에서의 초기 미생물 군집구조에 관한 연구가 수행된 바 있음(그림 2-5)
 - 새로 형성된 서식지에서의 미생물 군집은 1차 천이 과정에서 기존 서식지의 미생물 군집과는 구분되는 고유한 군집을 형성함
 - 시간이 지남에 따라('20년 ~ '21년) 새로 형성된 서식지의 미생물 군집 내 종 조성은 유의한 변화를 보였으며, 향후 군집구조가 안정적으로 유지될지 또는 계속 변화하여 기존 서식지와 결국 유사하게 될지 모니터링을 통해 확인할 것을 제안하였음

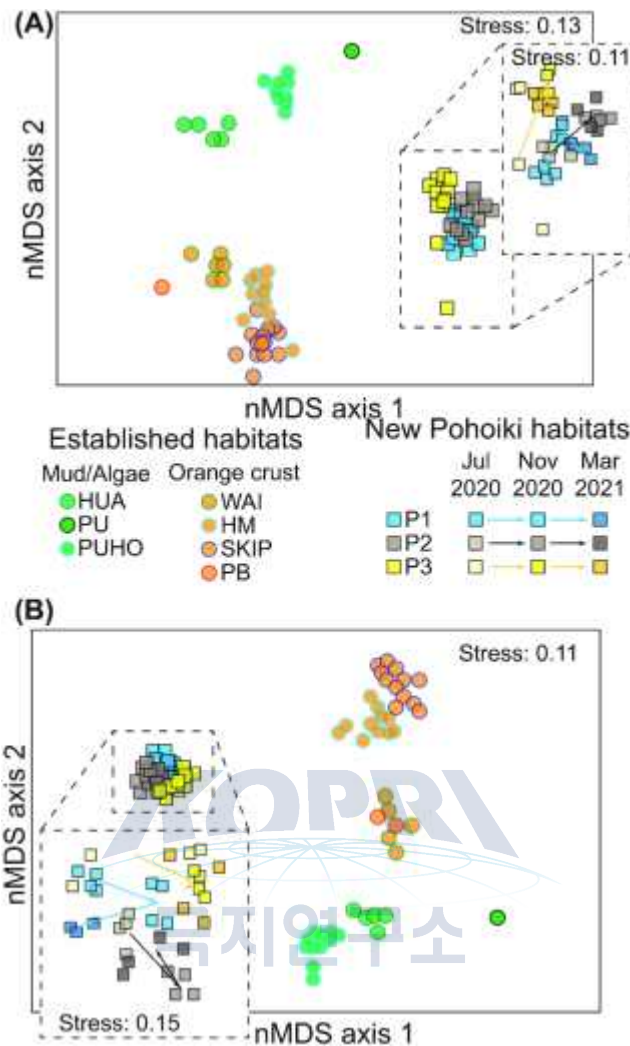


그림 2-5. 메타바코딩을 이용한 기존 서식지와 화산폭발로 새로 형성된 서식지에서의 생물 군집 구조 유사도 분석(A, 미생물; B, 진핵생물)(Sterling et al., 2022)

- 환경 유전자를 이용한 해양생태계 교란 및 복원 모니터링 관련 다양한 연구 사례들이 증가하고 있어 이는 본 기획연구에 해당 기술의 적용 가능성과 기대효과를 보여줌
- 이스라엘 연구진은 3D 프린팅을 이용하여 제작한 인공 산호초에서의 후생동물(metazoa) 군집구조 분석을 통해 생물다양성 평가에 있어 환경 유전자 메타바코딩의 유용성을 입증하였으며, 산호초 복원 프로젝트 및 모니터링 연구에 해당 기법을 포함할 것을 강력히 권하였음 (Levy et al., 2023)
- 화산 및 지각 활동과 광물자원 개발로 인해 교란될 위험성이 높은 심해

열수분출공 생태계 내에서 저서생물 군집의 생물다양성 평가와 인위적 교란(동물상 제거) 후의 군집 재형성 과정을 환경 유전자를 통해 효율적이고 빠르게 확인한 바 있으며, 현재 인위적 교란에 대한 지속적인 모니터링 수행 중임(그림 2-6)

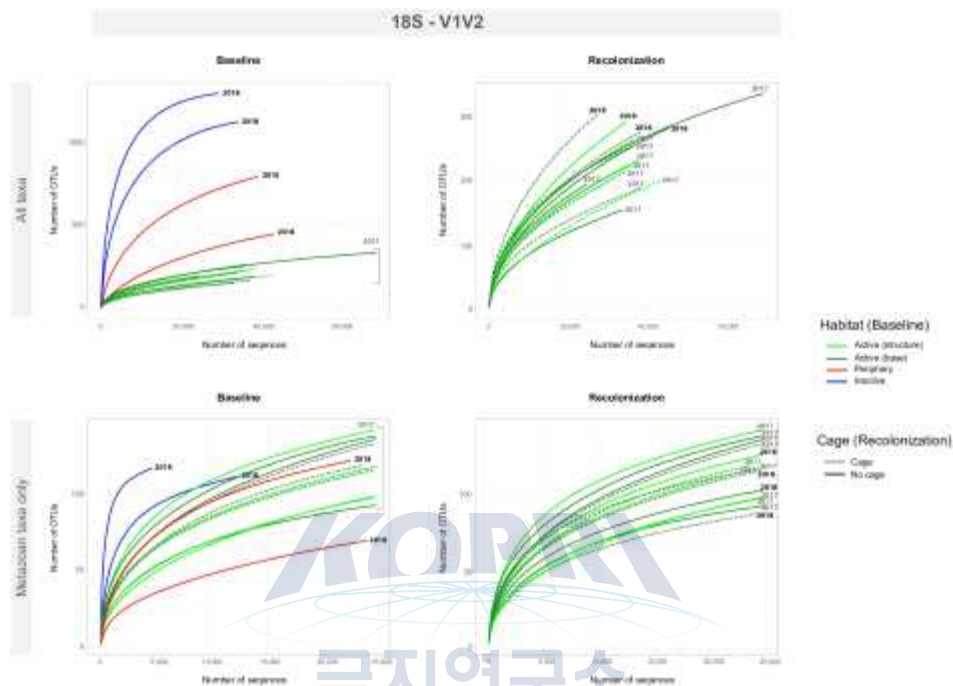


그림 2-6. 심해 열수분출공 생태계 내 인위적 교란 전후의 저서생물 OTU수에 대한 희박화 곡선(Cowart et al., 2020)

- 중국 연구진은 2007년 해양 원유 유출 사고에 따른 퇴적물 내 박테리아 및 저서동물 군집구조 변화를 메타바코딩을 통해 7년간 장기 모니터링 하였으며, 자연적인 시공간적 변화 외에도 생물 군집의 천이는 잔유 오염의 영향을 가장 크게 받는 것을 확인함(그림 2-7)

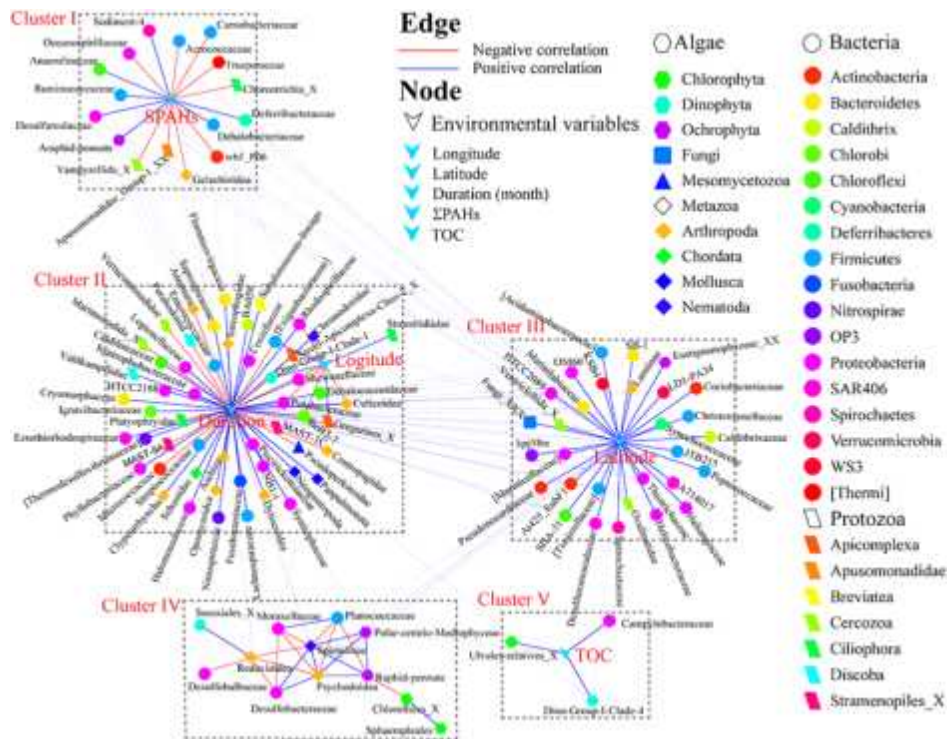


그림 2-7. 환경유전자 기반 퇴적물 내 생물 군집 및 환경변수 연관 네트워크
(Xie et al., 2018)

- Lanzen et al. (2021)은 해양 원유 시추 및 추출이 저서생물 군집에 미치는 영향을 모니터링하고 예측하는 측면에서 환경 유전자 메타바코딩 데이터를 이용한 새로운 생물 지수를 개발함
- 또한 독일 연구진은 원유 유출에 자주 노출되는 페르시아만의 산호초 생태계에서 저서 박테리아 및 진핵생물 군집을 환경 상태에 대한 생물 지표로 활용하는 환경 유전자 기반 생물 모니터링 도구 개발을 제안하였음 (Oladi et al., 2022)
- 이 외에도 저인망 어업과 같은 인위적 활동으로 의해 교란된 저서생물 군집에서 환경 유전자 데이터를 통해 대형동물을 트롤링에 대한 지표종으로 제시하는 등 환경 유전자를 이용한 해양생태계 교란 및 모니터링 연구가 활발히 수행되고 있음(Good et al., 2022)

3) 화산활동 역사 복원 연구

- 해양 퇴적물 내 화산재층은 테프라 낙진 퇴적물, 쇄설성 밀도 퇴적물, 크립토테프라, 재동된 화산암 퇴적물 등 4가지 유형으로 분류하며, 일반적

인 퇴적 연대는 방사성 동위원소 분석을 통해 얻어짐.

- 극지연구소에서는 남극 멜버른 화산 등 남극 화산에 대한 화산활동 복원 연구를 수행해 온 바 있음.
- 22년 4월 통가 화산 해역에서 수행한 탐사 결과 중력 코어와 박스 코어 자료를 얻은 바 있으며 오클랜드대학과 공동으로 통가 화산활동 복원 연구를 수행 중임

2. 화산활동 예측 및 복합지구조 진화 모델 구축

1) 화산활동 예측 탄성파/중·자력/지진파 자료 해석 및 탐사

가) 국내동향

- 화산활동 예측을 위한 지구물리학적 방법은 화산에서의 지진 발생 및 이동 양상과 지표 변위를 지속적으로 모니터링하는 방법이 있으며, 국내 주요 활화산(한라산, 울릉도 등)에 대한 연구가 활발하지 않음.
- 기상청의 지진화산국, 한국지질자원연구원의 화산연구단에서 관련 업무를 수행하나, 화산활동 예측에 대한 직접적인 연구는 미비함.
- 대학교 연구연합(고려대, 서울대, 부경대)는 2021년부터 한라산 백록담 인근 5개소 및 울릉도 전역 8개소에 광대역 지진관측소를 설치하여 화산활동(화산성 지진)의 발생 및 양상에 대한 연구를 수행 중에 있음.
- 지진학적 방법을 이용한 통가 해역 관련 화산활동 예측연구는 국내에서 수행된 바 없음.

나) 국외동향

- 화산활동이 활발한 다양한 국가에서는 지구물리학적 방법을 이용하여 활화산 화산활동 예측연구를 활발히 수행하고 있음.
- 예로, 미국 USGS는 Volcano Hazards Program을 통해 화산활동 모니터링 및 예측을 수행 중
(<https://www.usgs.gov/programs/VHP/comprehensive-monitoring-provides-timely-warnings-volcano-reawakening>).
- 통가 화산의 경우 인공위성 관측을 통한 화산활동 예측 연구가 수행된 바 있음(Garvin et al., 2018, Geophysical Research Letters).
- 통가 화산들의 화산활동과 관련된 지진 활동에 기반한 모니터링 및 예측 연구는 수행되지 않음.

- 이는, 인접한 지진관측소의 부족 때문이며, 전 세계 지진관측망을 통한 통가 화산활동에는 특이점이 발견되지 않았음
(<https://www.preventionweb.net/news/underwater-volcanoes-are-difficult-monitor-tonga-eruption-shows-why>)

2) 지구조 해석 탄성파/중·자력/지진파 자료해석 및 탐사

가) 국내동향

- 통가 화산호 해상지자기 자료의 해석과 이를 이용한 3차원 자화벡터역산 모델링 수행을 통해 3차원 자력 분포 및 해저 지구조 특성 연구 (Choi et al., 2018; 2020, Geophysics and Geophysical Exploration)가 해양과학기술원에서 수행된 바 있음
- 통가 화산호 다중 탄성파 단면자료의 해석을 통해 섭입대 칼데라 구조 및 기하학적 지반 침하 특성 연구 수행(Kim et al., 2013, Earth Planets Space)
- 통가-피지 지역의 섭입대-열도-후열도-판내부 구조와 유사성이 있는 일본-동해-한반도에 이르는 지역의 지구조 영상화 연구가 다수 수행되어 옴 (Kim et al., 2016, GRL; Kim et al., 2021, JGR; Lee & Kim, 2021, Science Advances)
- 한반도 인근 화산 하부의 지구조 및 마그마 성인에 대한 다양한 지구물리학적 연구가 존재함(백두산: Kim et al., 2017, JGR; 제주도: Song et al., 2018, JGR; Lee et al., 2021, GJI 등)

나) 국외동향

- 해저면 지진계를 활용한 통가 화산과 맨틀 용융체 공급구조 연구
 - 통가 섭입대를 따라 발생하는 해저 화산체 생성에 기여하는 마그마 공급 구조는 섭입된 태평양판에서 빠져나오는 물에 영향을 받는 것으로 지진파 연구를 통해 밝혀짐
 - 통가 섭입대 서쪽에 위치한 라우 확장축 (Lau Spreading Center) 하부의 마그마 공급구조는 통가 섭입대와의 거리가 인접해지는 남쪽으로 내려갈수록 확장 축 하부에 발달된 저속도대층은 약화되지만, 섭입된 판에 의해 발달된 맨틀 용융체 공급구조가 보다 활발해지는 경향성을 보임(Wei et al., 2015, Nature)
- 통가 화산 분출 과정에서 발생한 지진 및 연구 지역 주변에서 발생한 지

진의 지진원 메커니즘을 분석하여 화산 분출 과정 및 주변 지구조 응력 특성 분석

- 맨틀전이대 정체 지판에 의한 후열도 분지 지구조 특성 연구
 - 호주 연구진에서 라우-북피지 분지의 지진 심도 분석을 통해 맨틀 전이대 (440-660 km)에 정체된 두 개의 지판을 확인하고, 분지 진화모델을 제시 (그림 2-8)

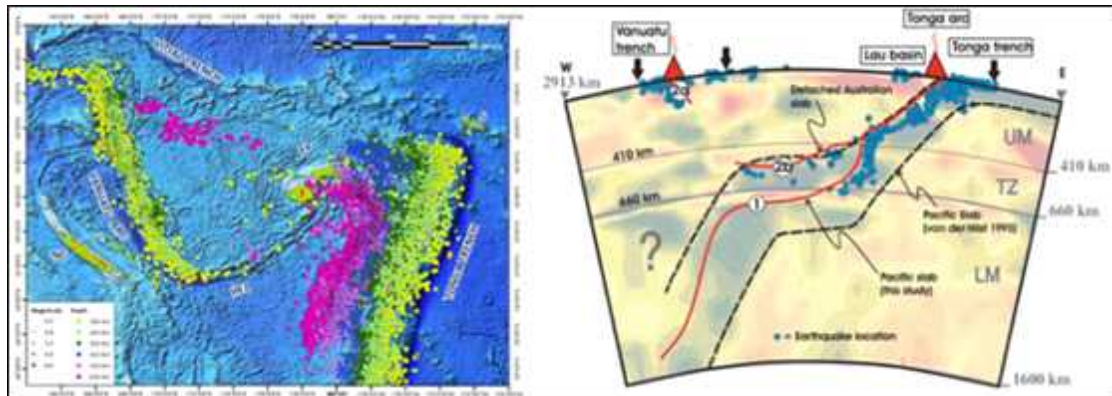


그림 2-8. 라우-북피지 분지의 지진 발생심도 분석을 통한 맨틀전이대 정체슬랩 모델 (Richard et al., 2011)

- 후열도 분지와 해구 인근 섭입지판에서 섭입에 의한 맨틀 전이대 상부물질의 용승이 발생 가능하다는 모델이 최근 제시된 바 있음(그림 2-9)

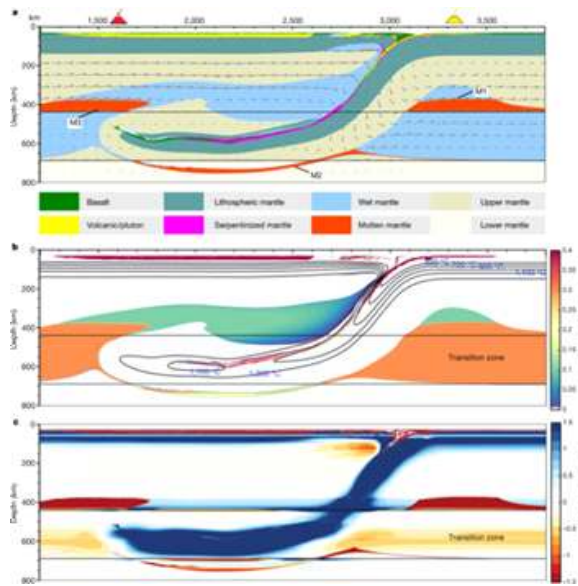


그림 2-9. 정체슬랩과 맨틀전이대 상호작용에 기인한 맨틀용승으로
후열도 분지 및 해구인근 섭입판의 화산활동 원인 제언 (Yang and
Faccenda, 2020, Nature)

3) 섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인연구

가) 국내동향

- 한국해양과학기술원에서 수행해 온 남서태평양 광물자원개발 R&D 사업을 통해 통가열도-라우분지-북피지분지에 걸친 광범위한 섭입 환경에서 해저 기반암을 확보하였으며, 이들의 지화학 조성에 반영된 상부 맨틀의 불균질성과 용융체 공급구조에 대한 기초 연구들을 수행
- 통가열도 화산암의 미량원소 모델링을 통해 열도 화산체의 지역적 분포에 따라 화산체 섭입에 의한 기원 맨틀의 조성 변화가 있음을 확인 (Myeong et al., 2020, Journal of Asian Earth Science)
- 통가와 마리아나 열도 화산암의 칼슘 동위원소 조성을 활용하여 오래된 섭입 환경에서 슬랩 기원 유체의 거동을 규명(Wang et al., 2021, JGR: Solid Earth)
- 북동 라운분지 화산암의 지화학 성분 혼합 모델을 제시하여 상부 맨틀의 불균질성과 과거 섭입판의 이동구조 간의 상관성 확인(Oh et al., 2023, Goldschmidt Conference)
- 북피지분지 기반암을 대상으로 피지 인근에서 발생하는 심발 지진과 연

관된 맨틀 전이대 정체 지판 기원의 부화 조성 맨틀 용승의 존재를 제안 (그림 2-10)

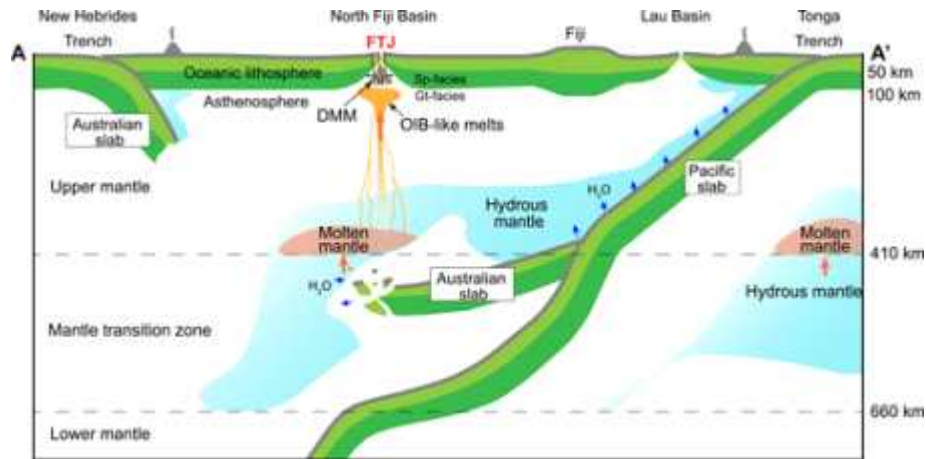


그림 2-10. 북피지분지 상부맨틀의 단면 구조와 부화 맨틀 용융체의 용승 구조 모델 (Oh et al., 2021, JGR: Solid Earth)

- 한국해양과학기술원의 2022년 신진연구자 지원 과제를 통해 북피지분지 중심부에 위치한 삼중합점의 특이 용기 지형의 유발 원인과 맨틀 용융구조 상관성 규명을 위한 후속 연구의 일부 기초 자료를 확보함

나) 국외동향

- 통가 전호에서 분출한 현무암을 대상으로 지화학 분석과 연대측정을 수행하여 통가 해구와 열도 화산체 형성의 진화 구조를 규명(Meffre et al., 2012, Geochemistry, Geophysics, Geosystems)
- 통가 섭입대의 심부 탄성과 구조를 분석하여 맨틀 켜기의 수화작용과 호상열도 화산활동의 발생 기작 해석(그림 2-11)

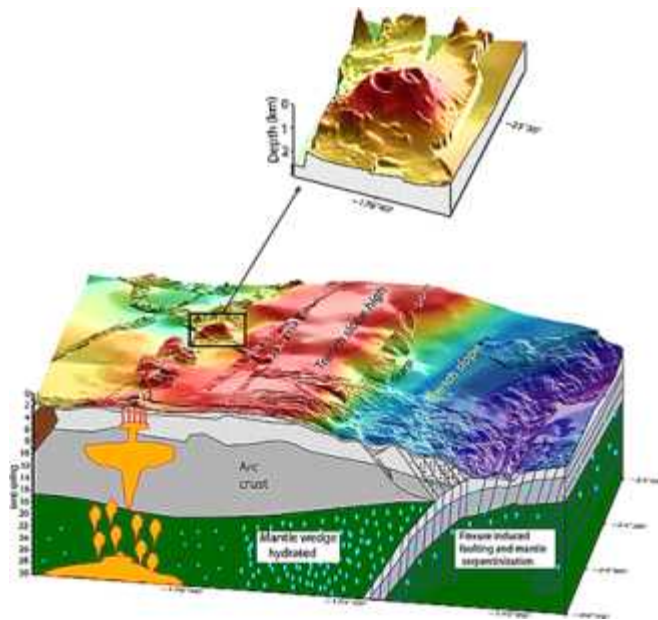


그림 2-11. 통가 섭입대의 탄성과 구조 분석을 통한 맨틀 켜기의 수화작용 및 열도 화산 작용 발생 기작 모식도 (Contreras-Reyes et al., 2011, JGR:

Solid Earth)

- 최근에는 해구 인근 섭입 지판 내 소규모 신생 화산활동의 신규 발견 및 성인 연구가 활발하게 진행 중임
 - 통가 해구 북쪽 끝단의 사모아 섬과 인근의 일부 알려진 해저산의 기반암 조성 변화를 통해 섭입판 변형을 증가가 신규 화산활동의 원인임을 제안 (그림 2-12)

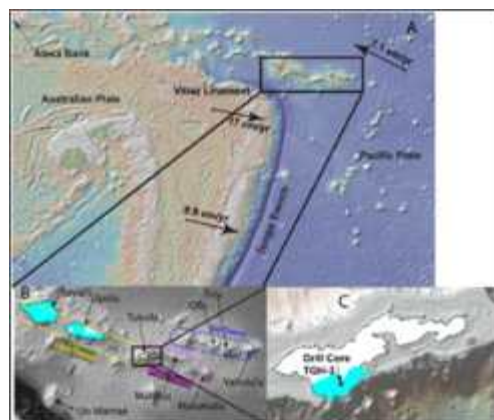


그림 2-12. 통가 섭입대 북쪽 끝단에서 확인된 섭입판 변형에 의한 신규 화산활동지역(Reinhard et al., 2019, Geochemistry, Geophysics, Geosystems)

- 일본 연구진(JAMSTEC, 도쿄대)의 주도로 AUV를 활용하여 일본 해구와 마리아나 해구 인근에 분포하는 신규 소형 화산체 탐색 및 성인연구 수행 (그림 2-13)

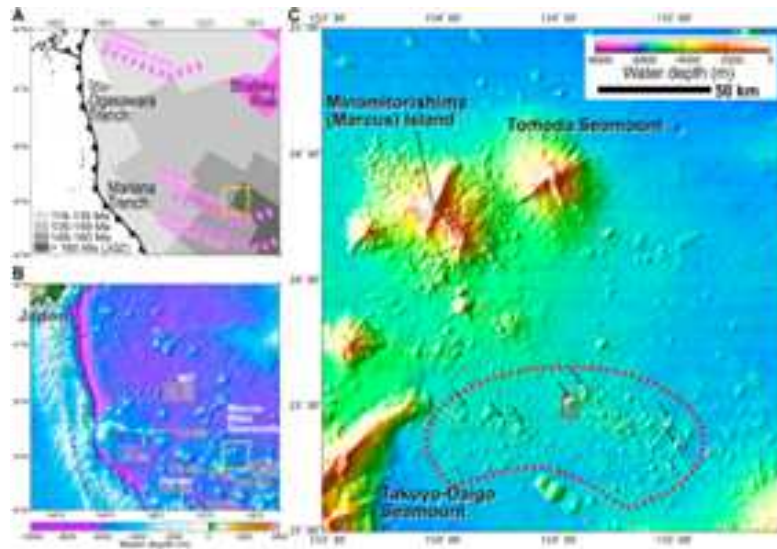


그림 2-13. 마리아나 해구인근 섭입판에서 발견된 소형 화산체들(Hirano et al., 2019, Deep-Sea Research Part I)

- 뉴질랜드 Taupo 화산지대의 맨틀 탄성과 연구를 통해, 섭입판 내에 포함된 해저고원의 영향으로 슬랩 특성이 변화하여 일반 화산의 수천배 규모로 분화하는 초화산(supervolcano)의 발생 가능성을 제안(그림 2-14)

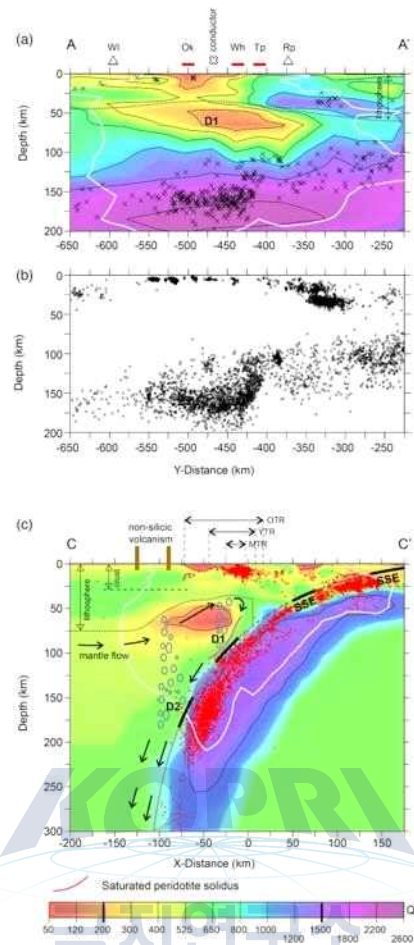


그림 2-14. 뉴질랜드 Taupo 화산지대의 섭입판 특성 다양성에 의한
화산 분화 유형의 변화 모델 (Eberhart-Phillips et al., 2019,
Geophysical Journal International)

4) 마그마 특성/해양지각 유용금속 거동 상관성 연구

가) 국내동향

- 한국해양과학기술원 주도로 북피지 분지-통가 화산호-라우 분지를 대상으로 해양광물자원 개발을 위한 R&D 사업을 수행하였으며, 각 지역에서 획득한 지질시료 및 지구물리 데이터를 활용하여 지구조 진화에 따른 유용금속 거동 기초 연구를 수행함
- 통가열도 해저화산 표층 퇴적물의 미량원소 및 희토류 원소 분석을 통해 열수활동에 따른 유용 금속의 광역적 분포 특성을 확인함(Um et al., 2013, Journal of the Mineralogical Society of Korea)

- 통가 해저산을 대상으로 화산암 성인 연구를 수행하여 섭입대 마그마 특성에 따른 금속거동 변화의 실마리를 제공함(그림 2-15)

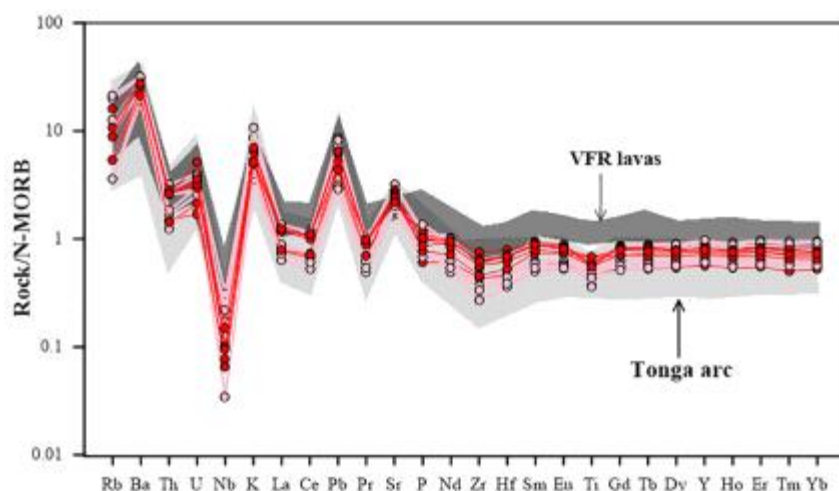


그림 2-15. 섭입대 화산암의 불호정성 원소 거동 특성 비교
(Myeong et al., 2020, Journal of Asian Earth Science)

- 통가 화산호 열수 분출대 황화광물 연구를 통해 마그마 특성에 따른 해양지각-해저면 간 유용금속 운반 메커니즘 기초 자료를 확보함(그림 2-16)
- 통가열도 해저산에서 열수분출 물질의 지구화학적 상관성을 비교하여 해양지각으로부터 배출되는 열수분출 금속량 평가자료를 확보함(Kim et al., 2016, Deep Sea Research I)

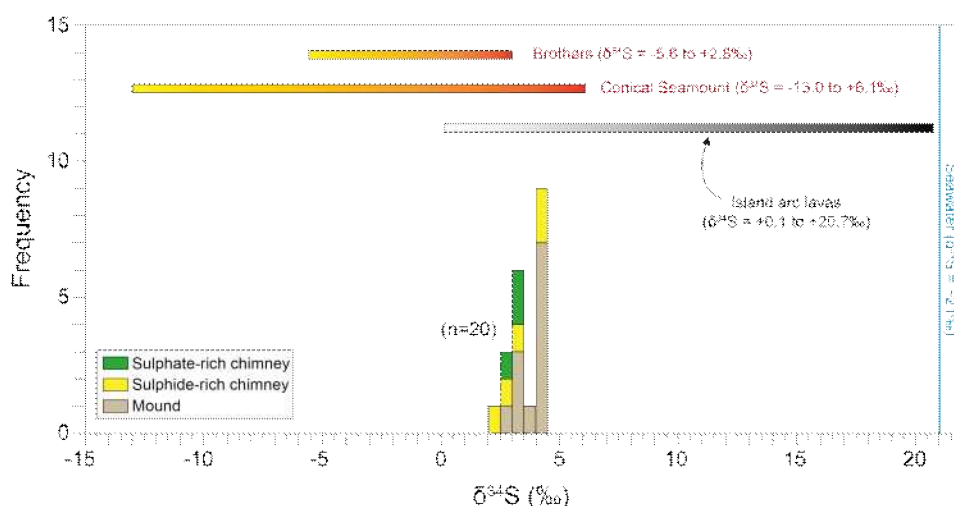


그림 2-16. 통가 열수 분출대 황화광물의 황 동위원소 조성
(Choi et al., 2023, Mineralium Deposita)

- 라우분지 칼데라(MTJ-1)에서 획득한 용융황(molten sulfur)의 광물·지구화학적 연구를 수행하여 해양지각 내 유용금속 거동에 있어 마그마성 휘발물질 공급의 중요성을 파악함(그림 2-17)

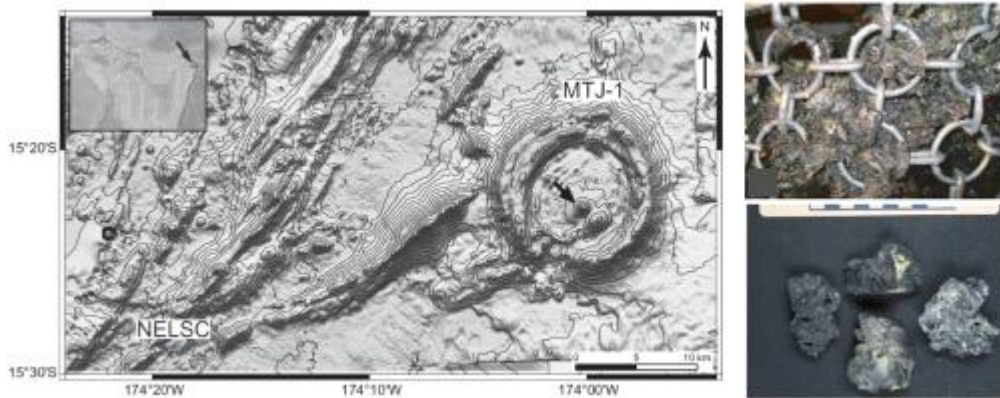


그림 2-17. 라우분지 MTJ-1 칼데라 위치 및 획득된 용융황
(Kim et al., 2011, Geology)

- 라우분지 확장대(FRSC)에서 채취한 퇴적물 주상 시료의 분석을 통해 열수 플룸에 의한 금속의 확산성 이동 가능성을 제시함(Kim et al., 2020, Ocean and Polar Research)
- 북피지분지 해저열수광체의 황·납 동위원소를 분석하여 배호분지 지구조에서 금속의 주요 공급원을 추적함(Kim et al., 2006, Chemical Geology)
- 북피지분지 및 통가 화산호 해양지각 기반암-유체 상호작용에 의한 희토류 원소 운반 과정 규명을 위한 연구를 수행함(그림 2-18)

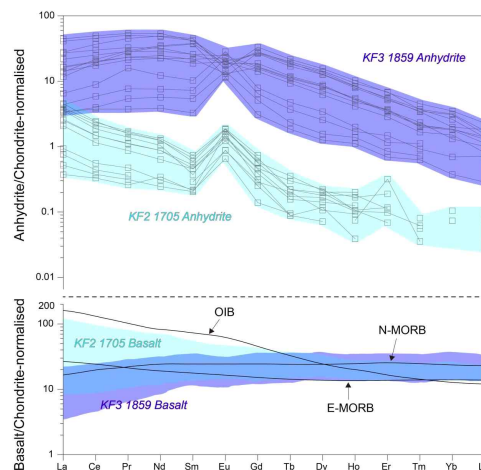


그림 2-18. 북피지분지 기반암 조성에 따른 열수유체 운반 희토류 거동특성

- 복합지구조(섬입대-배호-화산호-해구) 대상 기반암 포획 마그마성 황화물의 부존 여부 확인 및 미량원소 분석을 위한 LA-ICP-MS 시스템 활용 가능성을 검증하기 위해 한국해양과학기술원에서는 테스트 분석을 수행함

나) 국외동향

- 국제시추프로그램(IODP)에서 획득한 시추 시료를 대상으로 해양지각 기반암 변질에 따른 포획 황화물 침출이 구성 금속원소의 거동에 미치는 직·간접적 영향을 제시함(그림 2-19)
- 국제시추프로그램(IODP)을 통해 남서태평양 커마텍 화산호 지역에서 획득한 5개 시추코아를 분석하여 섬입대 칼데라 구조 하부에서 유용금속 거동에 대한 주요 조절 인자를 파악함(de Ronde et al., 2019, Geology)

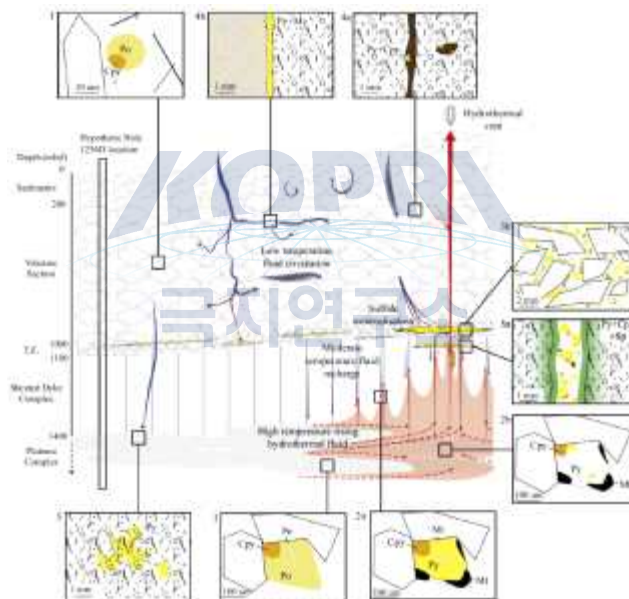


그림 2-19. IODP 1256D 지역 해양지각 내 금속거동 특성
(Patten et al., 2016, Geochemica et Cosmochimica Acta)

- 복합지구조 기반암 포획 황화물의 지구화학 특성을 비교하여 마그마 특성에 따른 유용 금속의 거동 특성을 확인함(Keith et al., 2017, Chemical Geology)
- 해저열수시스템 금속 거동에 있어 Au, Cu, Te 및 Se의 마그마 기원을 제시함(Martin et al., 2021, Chemical Geology)
- 독일 FAU 대학 연구팀은 지구조 환경에 따른 마그마성 황화물의 미량원소 거동 특성을 파악하기 위해 효과적인 LA-ICP-MS 분석법을 개발 중임

- 친동원소의 분배계수 계산을 위한 미소 사이즈(수 um) 기반암 포획 마그마성 황화물의 새로운 LA-ICP-MS 분석 방법을 제시함(그림 2-20)

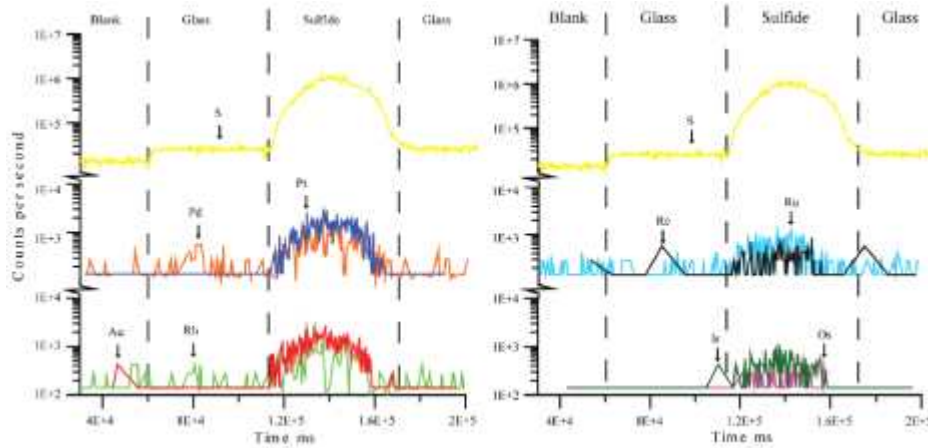


그림 2-20. 기반암 포획 마그마성 황화물 LA-ICP-MS 분석 결과
(Patten et al., 2013, Chemical Geology)

- 통가-커마텍 Brothers 해저산의 기반암과 열수광체의 지구화학적 상관성 비교를 통해 섭입대 해양지각 금속 동에 있어 물-암석 상호작용과 마그마 유체의 복합적 기여를 제시함(그림 2-21)
- 섭입대 해양지각 기반암 비옥도 평가를 통해 마그마 특성에 따른 유용금속 거동특성을 해석함(Patten et al., 2020, Mineralium Deposita)
- 복합지구조 열수 유체에 의한 금과 은의 거동 특성 규명을 위한 열역학 모델링을 수행함(Fuchs et al., 2019, Mineralium Deposita)
- 다양한 지구조환경에서 유용금속 거동에 있어 마그마 특성에 따른 황화물 포화(sulfide saturation) 상관성 연구를 수행함(Edmond and Mather, 2017, Elements)

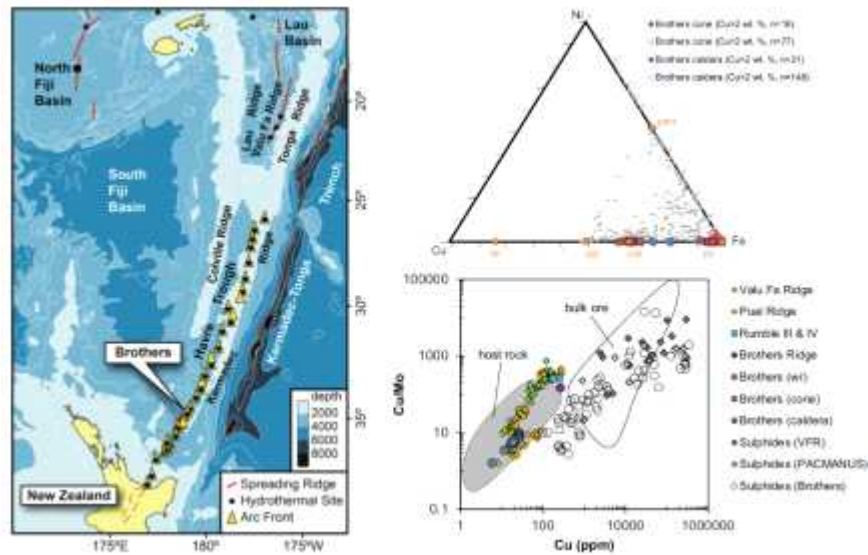


그림 2-21. 커마덥 Brothers 해저산 유용금속 거동특성
(Keith et al., 2018, Contribution to Mineralogy and Petrology)

3. 신 해양자원 확보

1) 해양 희유금속 탐사 및 연구

가) 국내동향

- 해양과기원이 해양수산부 R&D로 수행중인 태평양 심해저 광물자원개발 사업, 남서태평양 및 인도양 해양광물자원 개발사업에서 일부 퇴적물 시료에 대한 희유금속 함량 기초연구 수행(그림 2-22)
- 공해상 고품위 희유금속 함유 퇴적체 탐사를 위해 '19~'22년 해양과기원 주요사업으로 “서태평양 공해/심해저 신 생명자원 및 퇴적물 희유금속 자원탐사”를 수행하였으며, 북서태평양 미나미도리섬 남부와 마젤란해저 산군 심해분지에서 최대 4100 ppm의 희유금속을 함유한 퇴적체 발견

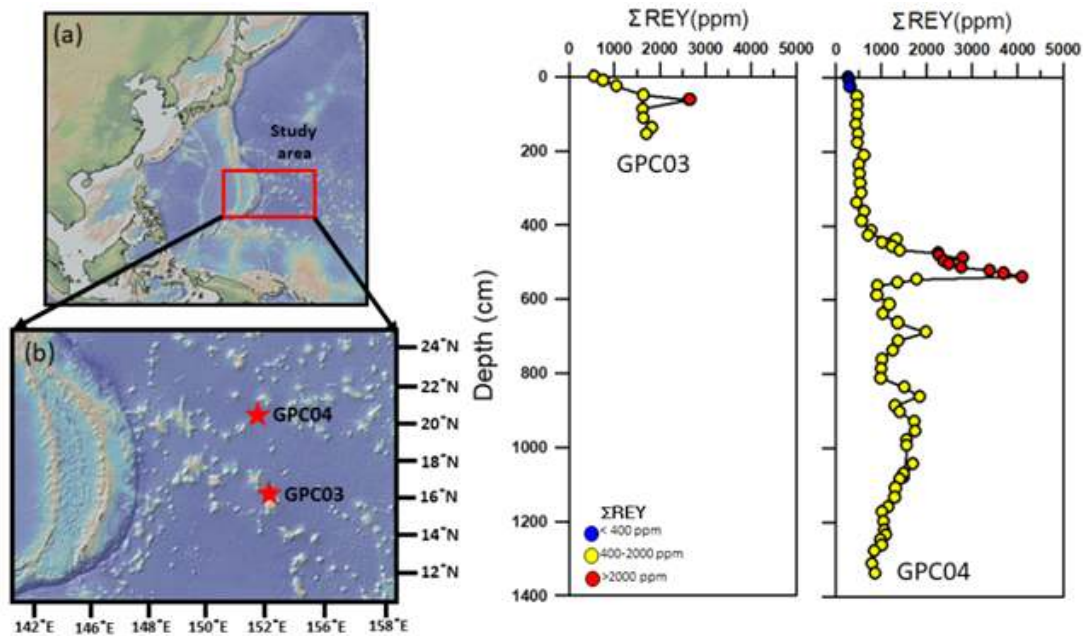


그림 2-22. 북서태평양 희유금속 고함유 퇴적체 분포지역과 주상시료

심도별 희유금속 함량 변화

- 또한 동 사업은 기존 KIOST 사업을 통해 기 확보된 시료의 지화학 분석 및 논문 분석을 통해 총 351점점의 희토류(Σ REY) 자료 확보(태평양 240 점점, 인도양 83점점, 대서양 28점점, 신규 분석자료 태평양 74점, 인도양 18점 등 총 92점 포함)

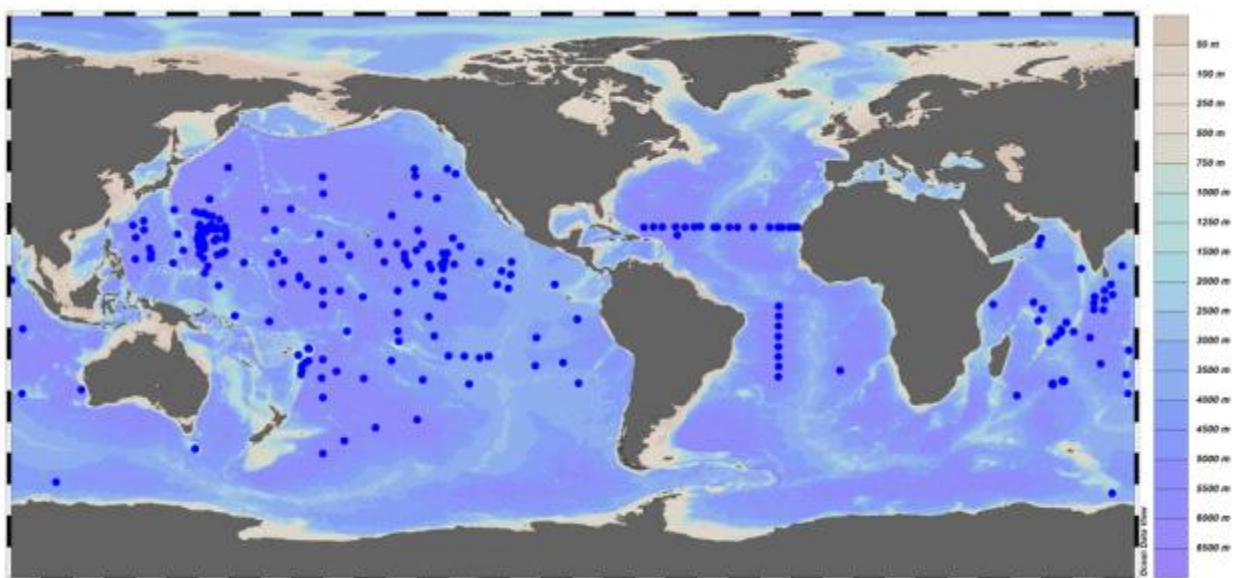


그림 2-23. DB 구축에 활용된 전 대양 시료 위치

- 남서태평양의 경우 보유 퇴적물 시료가 거의 없고 소수 문헌자료에 의존하고 있는 상황이므로 정확한 평가를 내기는 어려움. 그럼에도 2000 ppm의 ΣREY 함량이 보고된 만큼 적극적인 탐사와 연구가 필요할 것으로 보임
- DB자료를 활용한 전 대양의 희유금속 분석 결과를 바탕으로 판단할 때 태평양 지역이 다른 지역들에 비해 상대적으로 매장된 희토류를 자원으로서의 활용할 수 있는 잠재 가능성이 높은 지역으로 평가되며, 희유금속은 대부분 인산염 그리고 일부는 미소 망간단괴에 포함된 것으로 확인됨 (그림 2-23; Kim et al., 2022, Geochemistry, Geophysics, Geosystems)

나) 국외동향

- 일본은 중국의 자원무기화에 대응하여 희유금속을 확보하는 방안으로, 동태평양 공해 및 EEZ에서 퇴적물의 희유금속 탐사 연구를 통해 고품위/고함량의 희유금속 지역을 발견하고 자원량 평가를 수행 중
 - 동태평양 지역의 심해저 퇴적물의 희유금속 함량 연구를 통해 이 지역 퇴적물에 고함량의 희유금속이 함유되어 있는 것으로 파악 (Kato et al., 2011, Nature Geoscience)
 - 태평양 지역의 퇴적토에서 이트륨, 코발트, 니켈 등의 산업적으로 중요한 금속을 조사하고 활용하기 위한 연구를 진행(Junichiro Ohta et al., 2021, Ore Geology Reviews)
 - 2013년 부터 자국 EEZ내 탐사를 통해 미나미 토리시마에서 고품위 희유금속을 함유하고 있는 퇴적물을 발견하고 자원량 평가를 수행 중 (희토류 퇴적물 자원 잠재력 평가 보고서, 2016, 경제 산업성 자원에너지청 JOGMEC)(Kato et al., 2011, Nature Geoscience, 희토류 퇴적물 자원 잠재력 평가 보고서, 2016, 경제 산업성 자원에너지청 JOGMEC)
 - 최근 미나미도리섬 동부 공해지역에서 2800 ppm에 달하는 희유금속을 함유하는 퇴적체 보고
 - '27년까지 발견 희유금속 퇴적체의 시험채굴 진행 예정(매일경제 22.10.31)
- 중국은 최근 남동태평양 심해 분지에서 면적이 150만 km²에 달하는 희토류 함유 퇴적물 분포지역을 발견하였고, 중인도양, 서태평양, 북동태평양 및 남동태평양 등에서 4개의 희유금속 함유 퇴적물 분포지를 확인하고 탐사 연구를 수행 중임
- 국제시추프로그램(IODP)에서 남서태평양 극저생산대에 2개의 시추 코아를 획득 (그림 24)
 - 최대 4300ppm의 희유금속을 함유한 퇴적체가 10m 깊이에 3m 두께로 분

- 포 (Dunlea et al., 2015, Paleoceanography)
- 어려운 접근성으로 타 연구 결과가 전무함

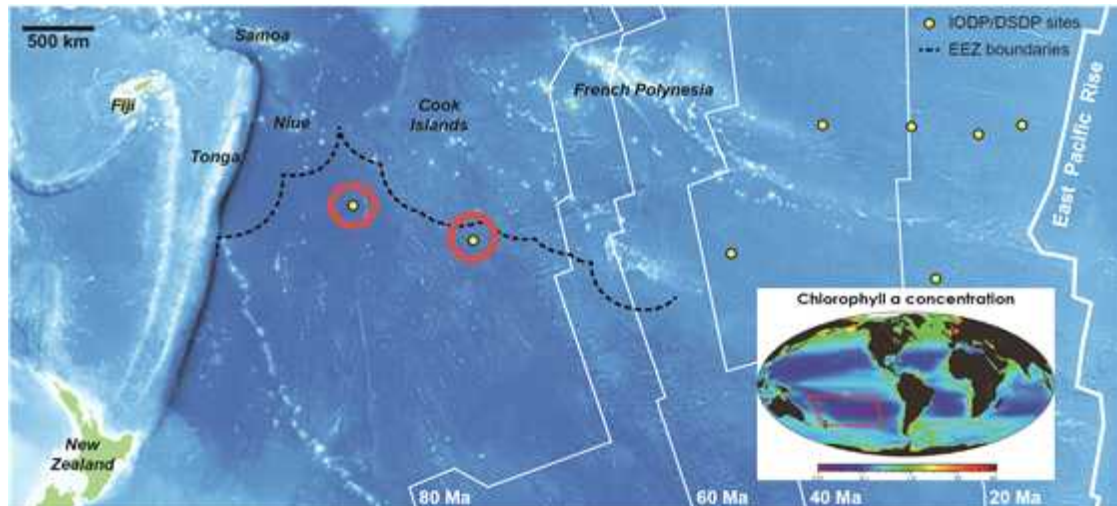


그림 2-24. 남서태평양 극저생산대 IODP 시추 코아 위치

- 남서태평양 극저생산대에 위치한 쿡제도 배타적경제수역에 분포하는 망간단괴의 평균 희유금속 함량은 1678 ppm, 최대 3200ppm으로 보고되었으며(Hein et al., 2015, Ore Geology Reviews), 유사한 수심과 해양환경을 가지는 인근 공해지역도 유사한 희유금속 함량을 보일 것으로 예상됨. 희유금속을 다량 함유하는 표층에 분포하는 높은 매장량의 망간단괴(Hein et al., 2015, Ore Geology Reviews)와 하부 퇴적토의 동시 개발 시 이 지역의 주요 전략금속(구리, 코발트, 니켈 등) 및 희유금속 자원잠재성은 매우 높을 것으로 기대됨

2) 해양 생명자원 탐사 및 활용연구

가) 국내동향

- 해양 생명자원 탐사는 한국해양과학기술원(KIOST)을 중심으로 추진
 - 해양 생명자원을 주요 목적으로 하는 탐사는 태평양(해저산)과 인도양(열수구) 지역을 대상으로 중점적으로 진행됨
 - 이밖에도, 인도양 및 태평양을 중심으로 해양 탐사가 진행되었으나, 광물 자원 개발을 주된 목적으로 하고 있으며, 세부 연구 내용으로 환경영향평가를 위하여 일부 생물다양성 연구를 포함
 - 기존의 대양연구사업(POSEIDON, 심해저광물자원 개발사업 등)에서 환경 기초연구의 일환으로 대양생물의 확보 및 다양성 연구가 일부 추진

- 2021년부터는 “인도양 중양해령 해저열수광상 개발유망광구 선정 (2021-2024년, 4년)” 추진을 통하여 열수환경에서의 생물다양성 연구를 일부 포함
- 태평양 해양 생명자원 탐사
 - KIOST 주요사업으로 “서태평양 공해/심해저 신 생명자원 및 퇴적물 희유 금속 자원탐사(2019-2022년, 4년)” 추진
 - 서태평양 공해/심해저 탐사를 통하여 저서생물 다양성 이해와 신 유전자원 확보 및 심해저 희유금속 함유 퇴적물의 광역적 자원 잠재성 파악을 목표로 추진(그림 2-25)
- *2021년부터 신 생명자원 확보에 관한 연구 내용은 해양수산부에서 추진하는 “공해상 자원확보 및 기초효능(기초효능) 탐색” 과제로 이관하여 추진



그림 2-25. 주요 연구내용 모식도

- 해양수산부에서는 국가R&D사업으로 “공해상 자원확보 및 기초효능(기초소재) 탐색(2021-2025년, 5년)” 과제를 추진
- 서태평양 해저산 지역에서의 1,000종의 신규 생물자원을 확보하고 이로부터 천연물 라이브러리를 구축 및 생물학적 활성을 검증하여 DB화하는 연구를 진행(그림 2-26)



그림 2-26. 주요 연구내용 모식도

- 인도양 해양 생명자원 탐사
 - 해양수산부에서는 국가R&D사업으로 “인도양 중앙해령대 심해열수공 생명시스템 이해(2017-2021년, 5년)” 과제를 추진
 - 인도양 열수 환경을 탐사하고 중앙해령에서 새로운 온누리, 온바다, 온나래 열수분출공을 발견하고 그로부터 생태계 이해 및 생명자원 확보 연구를 수행
 - *코로나 사태로 탐사가 원활히 진행되지 못하여 2개년도 연장(~2023까지) 하여 진행
- 공해상 연구는 대양 탐사를 위한 인프라가 구축된 KIOST를 중심으로 서태평양과 한반도 근해로부터 해양-대기 상호작용, 해수면 온도 변동 등의 물리 및 기후변화 특성 규명을 위한 연구가 주로 수행되었고, BBNJ 조약 이슈와 함께 비교적 최근에 공해상 생물자원의 선점/확보를 위한 탐사가 수행됨
- KIOST는 2019~2022년까지 공해상 생물다양성 이해와 신 생명자원 확보를 위해 주요 사업으로 “서태평양 공해/심해저 신 생명자원 및 퇴적물 희유금속 자원탐사”를 수행하였으며, 서태평양 공해상 일대 4개 해저산으로부터 총 750점의 생물 시료를 확보한 바 있음
- 해양수산부 주관하에 KIOST는 “공해상 생명자원 확보 및 활용 기반 구축” 과제로 북서태평양 공해상을 중심으로 연구를 수행 중에 있으나 남서태평양 공해상 생물자원에 대한 확보와 연구는 수행된 바 없음
- 해양 생명자원 활용은 극히 미진

- 현재까지 확보된 해양 식물자원은 1,500여점으로 인프라 DB 구축 단계라 할 수 있음
 - 최근 들어, 해양 생물자원의 활용을 위한 추출물 자원의 DB 구축 연구가 진행되고 있는 실정임
 - 주로 배양 가능한 미생물을 대상으로 항암, 항균, 항염증, 항산화, 항바이러스에 대한 활성을 검증하고 이에 대한 정보를 DB화 함으로써 산업계가 활용할 수 있도록 추진
- 심해 열수환경 유래 확보한 생명자원 활용 예
 - 산업균주 활용) 초고온 고세균 *Thermococcus onnurineus* NA1을 이용하여 부생가스(CO를 포함)로부터 바이오수소를 생산하는 기술은 실용화 단계로 실증연구를 진행 중에 있음
 - 남태평양 심해 열수 환경으로부터 분리되어 2009년부터 해양수산부 지원을 통하여 10여년에 걸쳐 기초-응용-실용화 연구까지 수행하며, 성공적인 스토리를 만듦



그림 2-27. 초고온 고세균을 이용한 바이오수소생산 기술개발

- 효소개발) 초고온 고세균 *Thermococcus onnurineus* NA1 유래 내열성 DNA 중합효소 개발 및 실용화(그림 2-27)
- 돌연변이화 방법을 이용하여 다양한 맞춤형 DNA 중합효소를 개발하고 (주)바이오니아, (주)씨젠, (주)셀세이프 등의 기업에 기술이전 및 실용화에 성공 (그림 2-28)

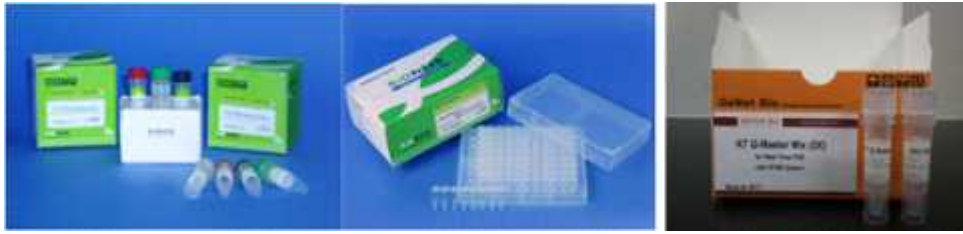


그림 2-28. 초고온 고세균을 이용한 바이오수소생산 기술개발

- IODP Expedition 329로부터 확보한 sub-seafloor 퇴적토 3점을 대상으로 apicon sequencing 방법을 이용하여 미생물의 군집구조를 비교 분석하는 연구를 수행 (그림 2-29)

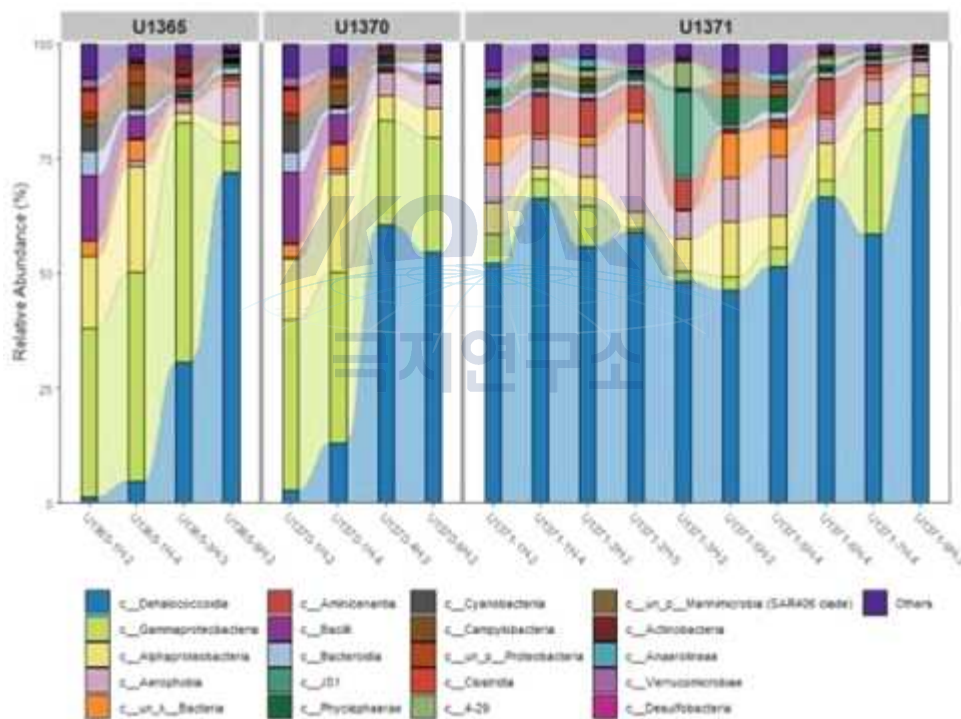


그림 2-29. 남태평양 극저생산대 3개 정점 깊이별 미생물 군집구조

비교, Unpublished data by Dr. Mi-Jeong Park

- 2018년 Edmond, Solitaire, 그리고 Onnuri 3개의 정점 퇴적토 시료를 대상으로 NGS를 이용한 메타유전체에 대하여 심도 있는 분석을 수행함
- Edmond, Solitaire, 그리고 Onnuri 3개의 정점 퇴적토 시료를 대상으로 apicon sequencing 방법을 이용하여 미생물의 군집구조를 비교 분석하는 연구를 수행

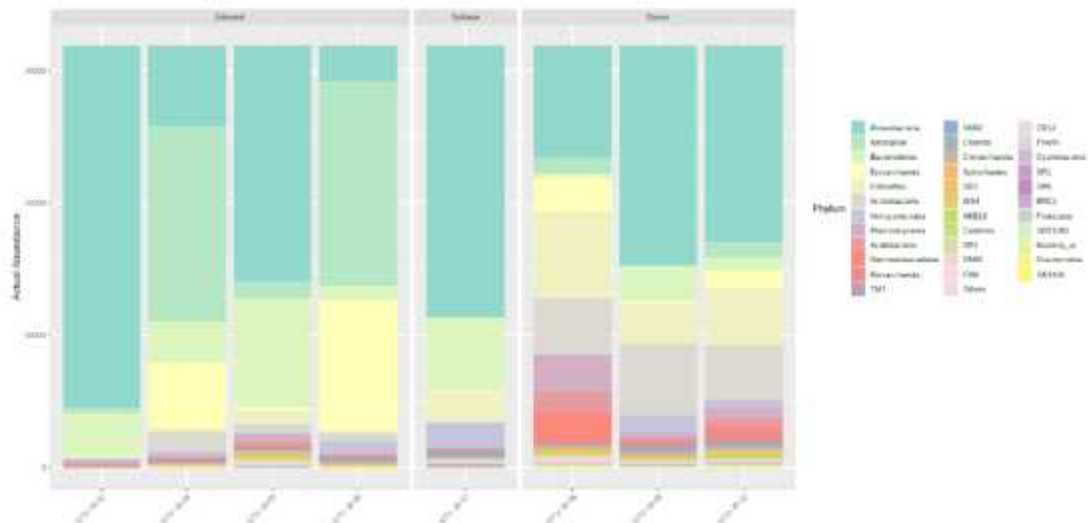


그림 2-30. Taxonomic profiling based on amplicon sequencing

- 2021년 ARGO 지역의 거리별 퇴적토와 박테리아 매트 시료를 대상으로 amplicon sequencing 방법을 이용하여 미생물의 군집구조를 비교분석하는 연구를 수행(그림 2-30)

나) 국외동향

- 남태평양 환류의 극저생산대에서 질소 순환 기작을 이해하기 위한 연구는 독립영양 디아조영양 시아노박테리아 *Trichodesmium*이 나타나는 다른 환류와 달리 감마프로테오박테리아와 단세포성 종속영양 디아조영양생물 군집으로 구성됨을 확인함(Halm et al. 2012, ISMEJ)
- 남태평양 환류의 극저생산대에서 단세포 디아조영양 시아노박테리아 *Crocospaera*가 수심 50 m에서 $5.3 \pm 0.2 \times 10^5$ *nifH* l⁻¹의 특이적으로 높은 풍부도로 출현함을 확인하고 극저생산대에서 질소고정에 큰 기여와 함께 확장되는 극저생산대를 따라 이 종의 풍부도와 분포에 대한 추가적 연구의 필요성을 제안함(Benavides et al. 2022, FEMS)
- 미국) National Cancer Institute (NCI)
 - 효소개발) 초1986년부터 Developmental Therapeutic Program(DTP)를 통해 25개 열대, 아열대 지역 생물자원을 확보하고 대규모 생물자원 라이브러리 구축(80,000여개 식물 자원, 20,000여개 해양 동식물 자원, 16,000여개 미생물자원)(dtp.cancer.gov/organization/npb/introduction.htm)
 - Natural Products Extraction Laboratory를 설치하여 상기 자원으로부터 추출물 라이브러리 구축(230,000종 추출물), NCI screening program에 활용하여 항암제 개발 연구 진행 중(Frederic National Laboratory for

Cancer Research)

- Natural Products Repository(NPR); 일정 조건의 계약하에 국내 연구그룹에 추출물 분양 진행 중(NCI Natural Products Open Repository Program)(그림 2-31)
- Natural Product Discovery Prefractionated Library (NPNPD); 분획물 라이브러리 150,000종 구축(2019년 기준)하였으며, 향후 라이브러리 확장을 지속하여 1,000,000종 규모 구축을 목표로 진행(그림 2-31)

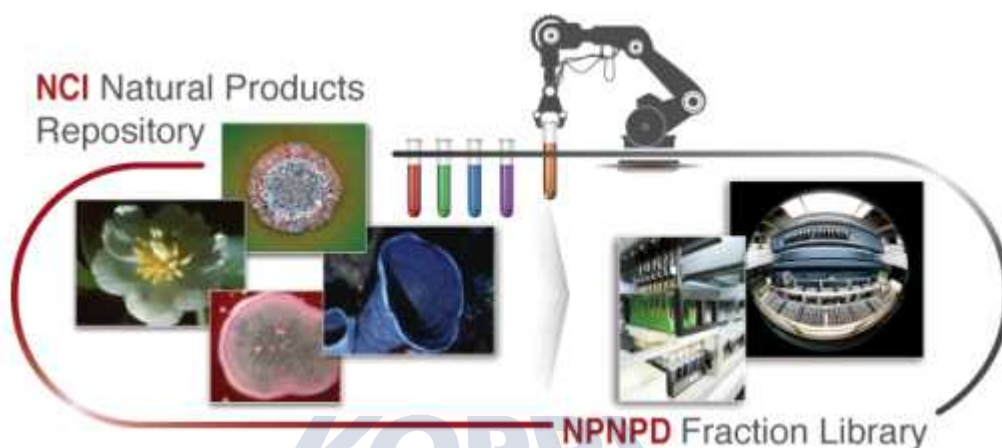


그림 2-31. NCI의 NPR과 NPNPD(출처; <https://dtp.cancer.gov>)

- 일본) RIKEN
 - Center for Sustainable Resources Sciences에 Drug Discovery Chemical Bank Unit을 설치. 세균, 진균, 식물 등으로부터 유래한 천연물 라이브러리 구축(자체 확보와 국내 기탁)(그림 2-32)
 - 천연물 라이브러리(NPDepo)와 함께 천연물 관련 정보(구조, 근원 생물, 활성 등) DB(NPEdia)를 함께 구축하여 신약개발 연구 지원. 현재, NPDepo에 분양 가능한 화합물이 8,000종, NPEdia(<http://npd.riken.jp/npedia/keywords.php>)에 정보 등재된 화합물이 24,000종으로 향후 규모를 각 20,000종, 60,000종으로 확장하는 것을 목표로 삼고 있음

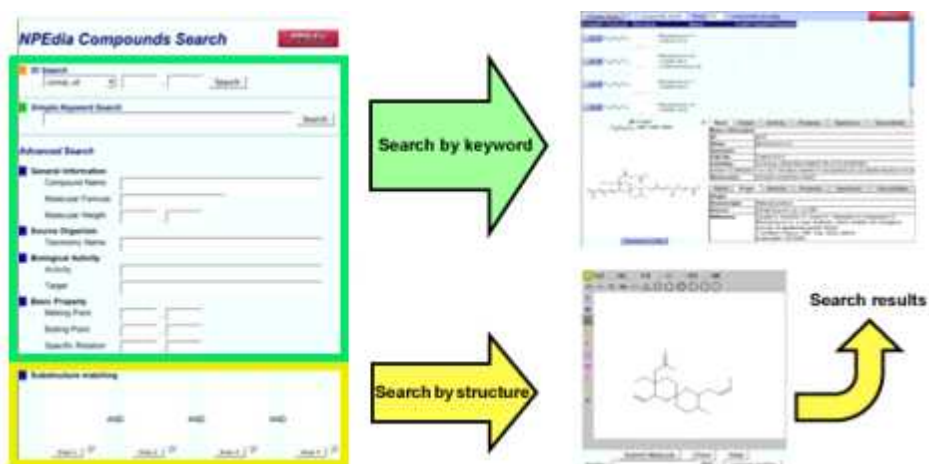


그림 2-32. RIKEN NPedia 검색 화면, 출처(<http://www2.riken.jp>)

- 중국) Chinese Academy of Science
 - Chinese Academy of Science(South China Sea Institute of Oceanology, SCSIO)와 Ocean University of China 등을 중심으로 심해 박테리아 생산 천연물에 대한 연구를 지속적으로 진행(그림 2-33)
 - Augucycline 등 다수의 항암, 항균 물질을 발굴하여 신의약품 개발 연구 수행 중. 심해 세균, 진균 유래 천연물 연구에 있어서 정부의 전폭적인 지원 하에서 비약적으로 발전하고 있는 추세

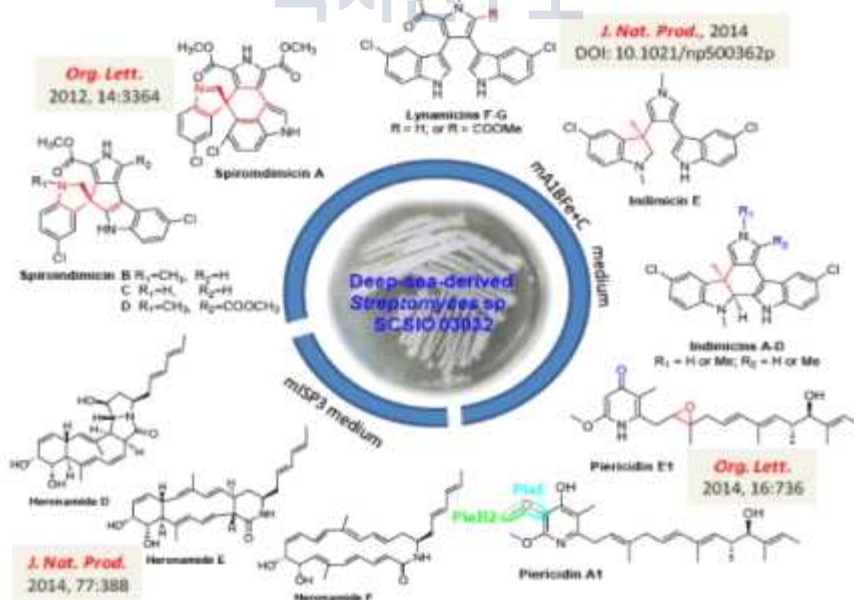


그림 2-33. SCSIO 심해 방성균 연구 프로젝트로부터 도출된 천연물(<http://english.scsio.cas.cn>)

- 호주) Nature Bank(griffith.edu.au/naturebank)
 - Griffith Institute of Drug Discovery(GRDD)에서 구축한 신약개발 플랫폼 nature bank는 20,000여개의 추출물과 112,000여개의 분획물로 구성된 라이브러리를 운영. 추출물은 식물, 세/진균, 해양무척추동물 유래로 구성됨
 - Nature bank 추출물은 ‘후속 연구를 GRDD와 함께 수행한다’는 조건 하에 다른 연구그룹이나 기업에 분양되고 있으며, GRDD 자체적으로 암, 신경질환, 감염성 질환, 항생제 내성 등과 관련한 연구에 활용하고 있음 (그림 2-34)
 - 정제 천연물의 경우 Compounds Australia 프로젝트에서 합성 유도체들과 함께 별도 관리 및 연구되고 있음

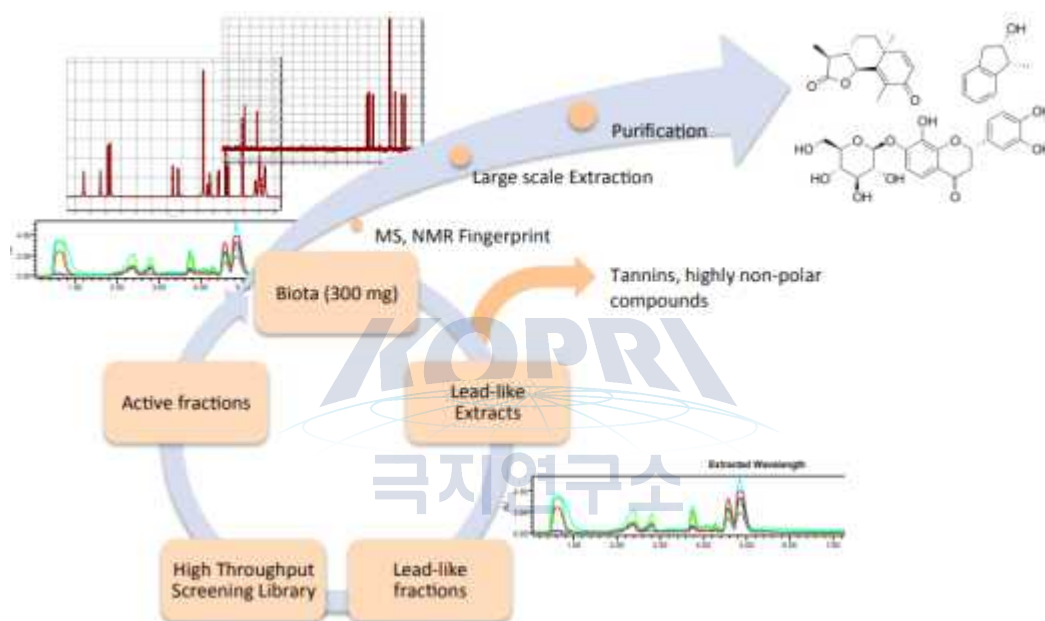


그림 2-34. GRDD Nature Bank 활용 연구

개념도(<https://www.griffith.edu.au>)

- 러시아-독일) SoJaBio(Sea of Japan Biodiversity Studies), KuramBio(Kurile Kamchatka Biodiversity Study), SokhoBio(Sea of Okhotsk Biodiversity Studies) Expedition(그림 2-35)
 - 2010년부터 러시아는 러시아/독일의 연구자들이 공동 참여하여 환경과 기후변화에 대한 해양 생물군의 대응으로써 동해(Sea of Japan) 공해상의 심해를 대상으로 생물다양성 연구(SoJaBio)를 위한 공동 탐사를 수행함
 - 대표적으로 심해생물 620종 이상을 채집, 203종이 신종으로 분석됨. 2012년 오호츠크해 쿠릴열도를 따라 러시아/독일의 공동 탐사(KuramBio)에서 심해 생물 1780여 종 이상을 채집하여 60%가 신종으로 분석됨. 이듬해인

2016년 KuramBio II 연구가 진행됨

- 2015년 오호츠크해 쿠릴 분지와 오호츠크해와 태평양을 연결하는 부술 협, 그리고 쿠릴 열도 서쪽 경사면의 태평양 지역에서 러시아/독일 공동 탐사(SokhoBio)를 수행. 심해생물 1000여 종 이상을 채집, 50%가 신종으로 분석

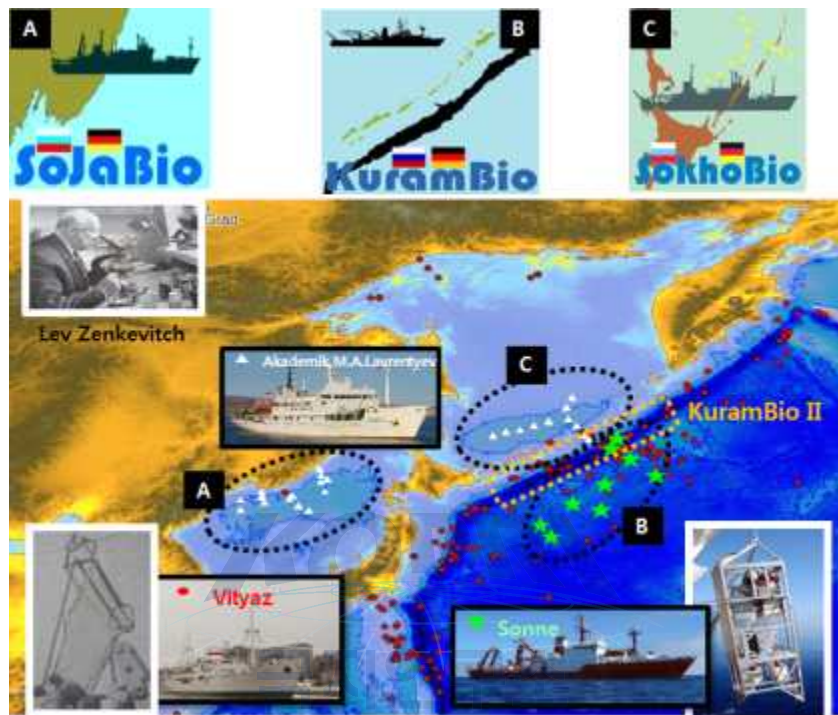


그림 2-35. 러시아/독일의 심해 생물다양성 프로젝트 조사 해역

- 해저 열수 퇴적물에서 발견되어 석유 알칸을 산화시키는 고세균, Candidatus Alkanophaga를 분리하고 해저 바닥 퇴적물에서의 유기 물질 변환 및 유기 화합물 산화에 관한 심층적인 연구 결과를 다루고 있으며, 특히 열화된 오일 저장지에서의 생태학적 중요성과 활동을 다룸
- 해저 미생물 연료전지 (BMFCs)는 친환경 에너지로 활용. 이 기술은 해양 퇴적물로부터 전기를 생성하며 동시에 환경오염 없이 유기물을 산화하여 전기 에너지로 변환하는 연구 진행
- 남태평양 극저생산대의 진핵생물관련 연구로 요각류의 다양성 연구 (Medellín-Mora et al., 2021, FMS)와 식물플랑크톤의 군집구조 및 종분포 모델연구 (DiTullio et al., 2003, MEPS; Duerschlag et al., 2022, ISMEJ) 등, 일부 보고된 바 있으나 해당지역의 저서진핵생물관련 연구보고는 전무함
- 남태평양 동부의 부영양 해역으로부터 중앙의 극저생산대 해역까지 생산력 구배에 따른 동물플랑크톤 군집 반응 연구는 C와 N 공급에 따라 동

물플랑크톤 군집의 생화학적 구조 변화를 확인함(González et al. 2019, FMS)

- 남태평양 환류의 생물학적 연구는 대륙으로부터 먼 거리, 환류의 거대한 규모, 연구비 등의 이유로 드물게 제한적으로 수행됨. 이러한 한계를 극복하여 심층적인 미생물 군집 분석을 위해 형광을 접목한 선상 분석 파이프 라인을 개발하여 채집후 35시간 내 현장에서 미생물 데이터를 확보함(Reintjes et al. 2019, ASM)
- 심해 열수공 생물자원 활용 연구관련 논문의 빈도는 접근성 문제로 인해 다소 제한적이었으며 중국, 유럽 등의 순으로 나타남
- 활용 생물자원으로는 미생물, 진균류, 동물플랑크톤 등이 있으며, 활용 가능성을 제안한 부분으로는 약리학적, 산업적, 생태적 활용이 있음
- 약리학적 활용 제안으로는 열수공에서 발견된 미생물 및 진균에 의한 항균/항생 효과^{4,8,9,11,12,15}, 항염¹⁰, 항암¹⁵, 심혈관 치료제¹³ 등의 효과 가능성을 제안함(그림 2-36)
- 미생물의 비소와 납과 같은 독성 물질의 흡착 및 독성 감소 능력^{1,6}, 해양 산성화 지표 미생물², 이산화탄소 고정 미생물³, 동물플랑크톤 활용 해양 환경 변화/예측 연구 적용¹⁴ 등의 생태학적 활용에 대한 적용이 제안되었음(그림 2-36)
- 호열성 미생물을 활용한 폴리에스터 공정⁵, 미생물 활용 카로티노이드계 생리활성 물질 합성⁷ 등의 공업적 활용방안도 제안되었음(그림 2-36)
- 국제시추프로그램(IODP)에서 남서태평양 극저생산대에 2개의 시추코아에서 방사성붕괴에 의해 물 분해로 형성된 수소를 에너지원으로 사용하는 특이 미생물 생태계 보고 (H'Hondt et al., 2009, PNAS)
- 남태평양 극저생산대의 원핵생물관련 연구는 국제시추프로그램(IODP)을 통해 확보된 시료를 대상으로 방사성동위원소를 포함하는 기질을 이용한 농후배양 및 군집구조 분석을 통해 극저생산대 퇴적토 환경의 호기성 미생물 생태계의 중요성을 보고(Morono et al., 2020, Nature Communications)

Location	Bioresource	Application	Description	Country
Porto di Levante	Microbiome ¹	Ecological	Arsenic adsorption and toxicity reduction by exopolysaccharide from <i>Bacillus licheniformis</i> B3-15	Italy: 2023
Southwest Indian Ridge	Microbiome ³	Ecological	CO ₂ assimilation carbon fixation of microorganisms, industrial and ecological implications.	China: 2023
Multiple location	Zooplanktons ¹⁴	Ecological	Estimating ecological effects of global changes	Taiwan: 2023
Levante Bay	Microbiome ²	Ecological	Microbial communities as sentinels of ocean acidification	Italy: 2023
South Atlantic Ocean	Microbiome ⁶	Ecological	Thermophilic adsorption of Pb ²⁺ onto bacterium from deep-sea hydrothermal vent, applicable for industrial wastewater	China: 2022
Ischia	Microbiome ⁵	Industrial	Thermophilic Carboxylesterases from microbial species, important biocatalysts for many industrial applications	UK: 2023
Suruga bay	microbiome ⁷	Industrial	Nostoxanthin (Carotenoid) production of <i>Sphingomonas</i> sp. SG73	Japan: 2021
Porto di Levante	Microbiome ⁴	Pharmaceutical	Antibiofilm effects of exopolymers from <i>Bacillus licheniformis</i> B3-15 and medical application potential	Italy: 2023
Kueishantao	Fungus ¹⁰	Pharmaceutical	Anti-inflammatory effects of cyclopentapeptides from <i>Aspergillus pseudoviridinutans</i> TW58-5	China: 2023
Mid-Atlantic Ridge	Other Invertebrate (mussel) ¹⁵	Pharmaceutical	anti-cancer activity of bathymodiolamides	Madagascar: 2023
Kueishantao	Fungus ¹¹	Pharmaceutical	Antimicrobial effects of polyketides from <i>Trichoderma</i> sp. JWM29-10-1	China: 2022
South china sea	Microbiome ⁸	Pharmaceutical	Cytotoxic and antimicrobial activity of <i>Actinobolus cyanogriseus</i> 12A22	China: 2021
Indian Ocean	Fungus ¹²	Pharmaceutical	antibacterial activities, inhibitory activities against the tested pathogenic bacteria	China: 2020
South China Sea	Microbiome ⁹	Pharmaceutical	Antimicrobial (bacteria) Tunicamycins from <i>Streptomyces xinghaiensis</i> SCSIO S15077	China: 2020
South China Sea	Fungus ¹³	Pharmaceutical	Inhibitory activity against angiotensin-converting enzyme of <i>Geosmithia pallida</i> FS140	China: 2018

그림 2-36. 미생물의 생태학적 및 공업적 활용방안

제 2 절. 논문 동향

1. 유효 논문 선별

- 논문 검색은 Clarivate社 Web of Science 논문 데이터베이스를 이용하여 SCI-Expanded에 지난 2010년 이후 발표 및 게재된 논문을 대상으로 하였음
- 검색은 학술논문의 제목, 초록, 저자키워드를 대상으로 함
- 검색키워드는 남서태평양의 주요 도서(통가, 쿡제도, 피지) 및 지구조 환경영향을 대상으로 사용하여 남서태평양 지역의 주요 연구대상 주제를 파악

하였으며(표 2-1), 검색된 논문 중 저수지, 만, 연안 연구 등 대양 연구 범
위에서 벗어나는 주제 및 정책 등 해양과학 분야와 관련없는 주제의 연
구 제외

- 확보된 유효데이터를 바탕으로 정량분석과 정성분석을 실시하여 기술개
발 동향을 파악
- 남서태평양 지역의 대양/지구조 분야 논문은 1574건의 논문이 검색되었
으며, 해양 및 대양분야 유효 데이터셋은 974건으로 나타남(표 2-1)

표 2-1. 남서태평양 해양/지구조 분야 논문 검색방법 및 결과

검색 대상	SCI-Expanded에 발표된 논문	
검색 DB	Thomson Scientific사의 Web of Science	
검색 기간	2010년 1월 ~ 2022년 12월 (총 13년)	
검색 범위	Title, Abstracts, Author Keyword	
남서태평양 해양 연구 전분야	(TI=("Lau basin" OR "Lau ridge" OR "Lau-Colville ridge" OR "Colville ridge" OR "Fiji basin" OR "Fiji ridge" OR "Tonga-Kermadec" OR "Valu Fa ridge" OR "Louisville ridge" OR "Louisville seamount" OR "Kermadec arc" OR "Kermadec ridge" OR "Kermadec trench" OR "Havre trough" OR "Havre basin" OR "South* Pacific gyre" OR Tonga OR "Cook Islands" OR "New Hebrides arc" OR "New Hebrides island arc") OR AB=("Lau basin" OR "Lau ridge" OR "Lau-Colville ridge" OR "Colville ridge" OR "Fiji basin" OR "Fiji ridge" OR "Tonga-Kermadec" OR "Valu Fa ridge" OR "Louisville ridge" OR "Louisville seamount" OR "Kermadec arc" OR "Kermadec ridge" OR "Kermadec trench" OR "Havre trough" OR "Havre basin" OR "South* Pacific gyre" OR Tonga OR "Cook Islands" OR "New Hebrides arc" OR "New Hebrides island arc") OR AK=("Lau basin" OR "Lau ridge" OR "Lau-Colville ridge" OR "Colville ridge" OR "Fiji basin" OR "Fiji ridge" OR "Tonga-Kermadec" OR "Valu Fa ridge" OR "Louisville ridge" OR "Louisville seamount" OR "Kermadec arc" OR "Kermadec ridge" OR "Kermadec trench" OR "Havre trough" OR "Havre basin" OR "South* Pacific gyre" OR Tonga OR "Cook Islands" OR "New Hebrides arc" OR "New Hebrides island arc"))	1574건 (검색건수)
		976건 (유효건수)

2. 논문 동향

- 남서태평양 대양연구 주제는 크게 화산 및 화산재해, 지구조, 생물/광물 자원 등 3가지 분야에 집중됨(그림 2-37)

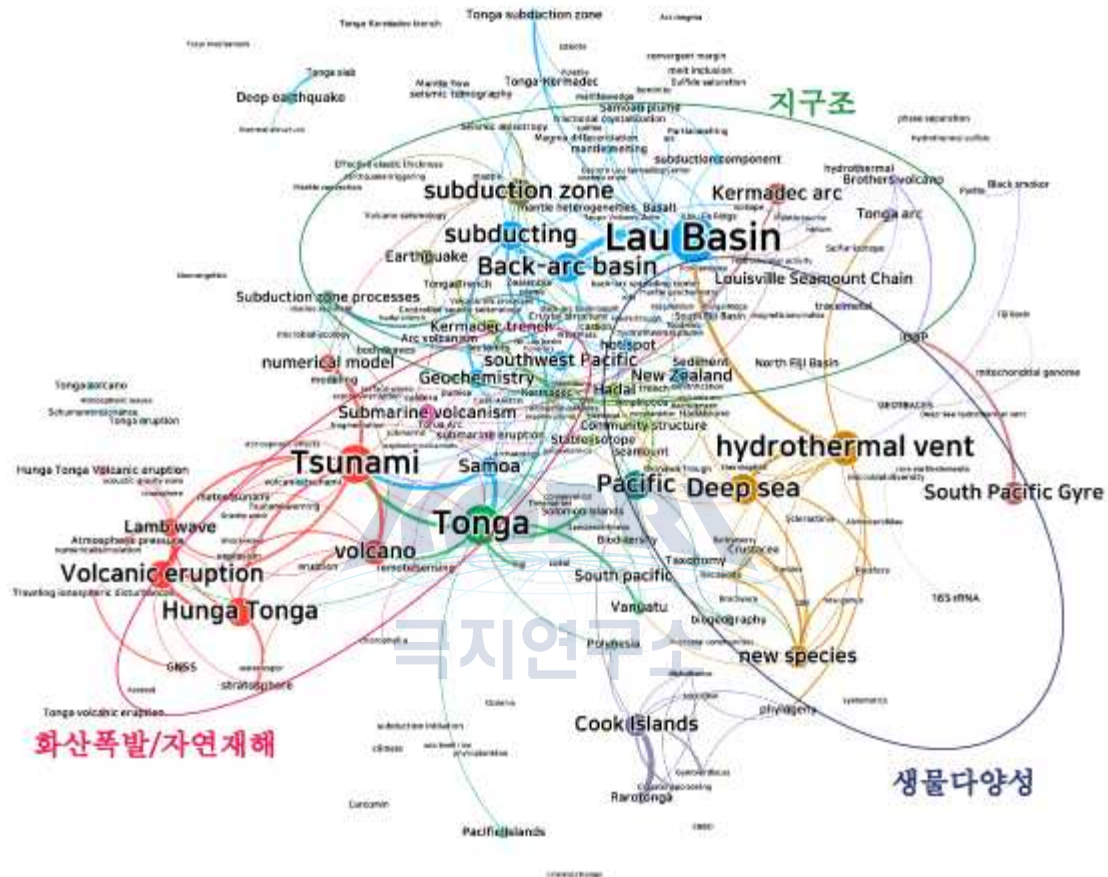


그림 2-37. 2010년 이후 남서태평양 복합지구조 관련 연구동향

- 남서태평양 연구는 지구조 분야, 특히 지화학 분석을 통한 지구조 진화 연구(32%)에 집중되고 있으며, 이는 배호분지, 화산열도, 해저산, 해구 등 다양한 지구조가 분포하고 있기 때문으로 판단됨
- 화산폭발/자연재해 분야의 연구는 2번째 높은 논문 수를 보임. 특히 홍가통가 해저화산 폭발 직후인 '22년도에 급격한 증가(총 129편)를 보이며, 해저화산폭발에 대한 현상 파악 및 영향을 평가하는 논문의 수가 급격히 증가함(그림 2-38)
- 생물자원분야의 연구는 열수생태계, 해산, 남태평양 극저생산대 등 다양한 지질요소에 분포하는 신종 보고와 종 다양성 연구가 주를 이루며, 생명자원연구에 필수적인 유전체 연구는 미미한 수준임

- 금속자원분야의 경우 열수분출대 인근 부존 황화광물에 집중되며, 마그마-기반암-열수분출대 간 상관성 연구의 부족으로 지구조 진화에 따른 해양 지각 내 금속 순환을 이해하기 위한 추가 연구가 필요함
- 대양저 희토류 자원에 대한 연구는 미미한 수준(총 3편)으로 남서태평양 희유금속 분포 경향을 파악하기 위해 다양한 형태의 퇴적물 시료 획득과 함께 고분해능 미소분석 기술의 적용이 요구됨

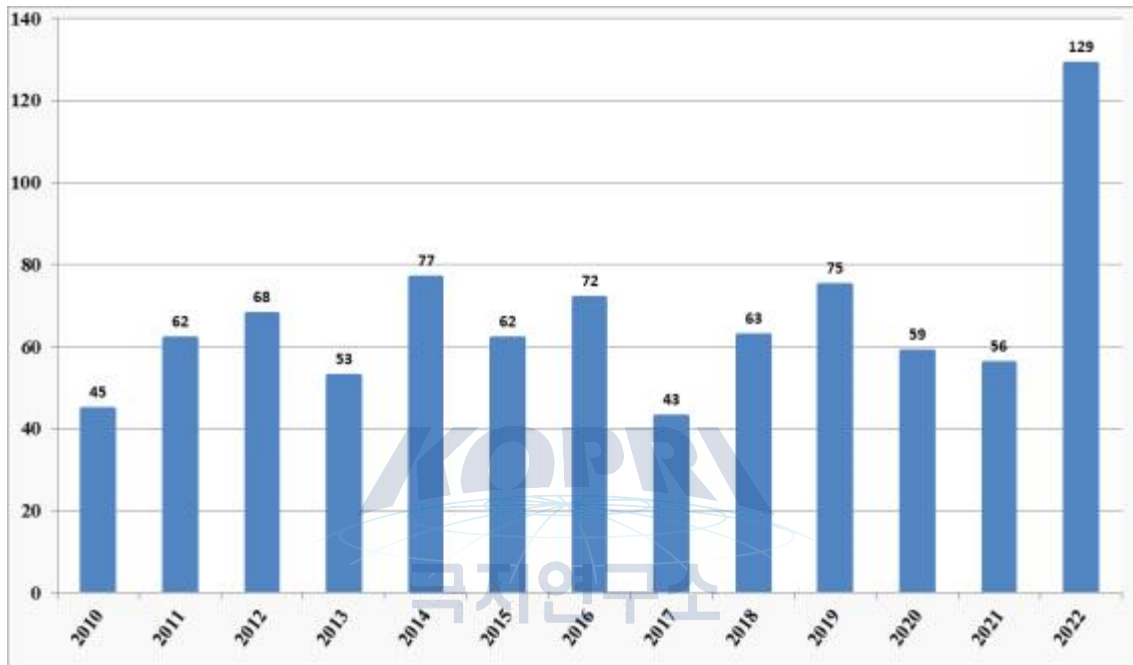


그림 2-38. 남서태평양 대양/지구조 분야 연도별 논문발표 추이('10~'22)

- 남서태평양에서 해양분야 10위권 국가의 논문게재 순위는 미국이 254건으로 전체논문(974건)의 26.1%를 차지하여 1위를 기록하였고, 다음으로 중국(11.0%), 뉴질랜드(10.6%), 호주(8.5%), 일본(7.5%) 순으로 나타났으며, 대한민국은 통가 및 피지 열수광상 사업과 관련하여 총 35편의 논문을 발간하여 전체에서 3.6%를 점유하여 9위에 랭크됨(표 2-2)
- 특히, 논문발표 수 1위인 미국의 경우 뉴질랜드, 호주, 영국, 독일, 프랑스, 일본 등 총 51개국과의 연구 협력을 통해 477개의 공동연구를 수행함. 이는 일본, 호주 등 9개국과 단 38개의 공동연구를 수행한 대한민국과 확연한 차이를 보여 국제협력 연구의 필요성을 강조함(그림 2-39)

표 2-2. 남서태평양 해양과학 분야 논문게재 주요 국가('10~'22)

순위	국가	논문수	점유율
1	미국	254	26.1%
2	중국	107	11.0%
3	뉴질랜드	103	10.6%
4	호주	83	8.5%
5	일본	73	7.5%
6	독일	63	6.5%
7	영국	42	4.3%
8	프랑스	39	4.0%
9	대한민국	35	3.6%
10	캐나다	21	2.2%

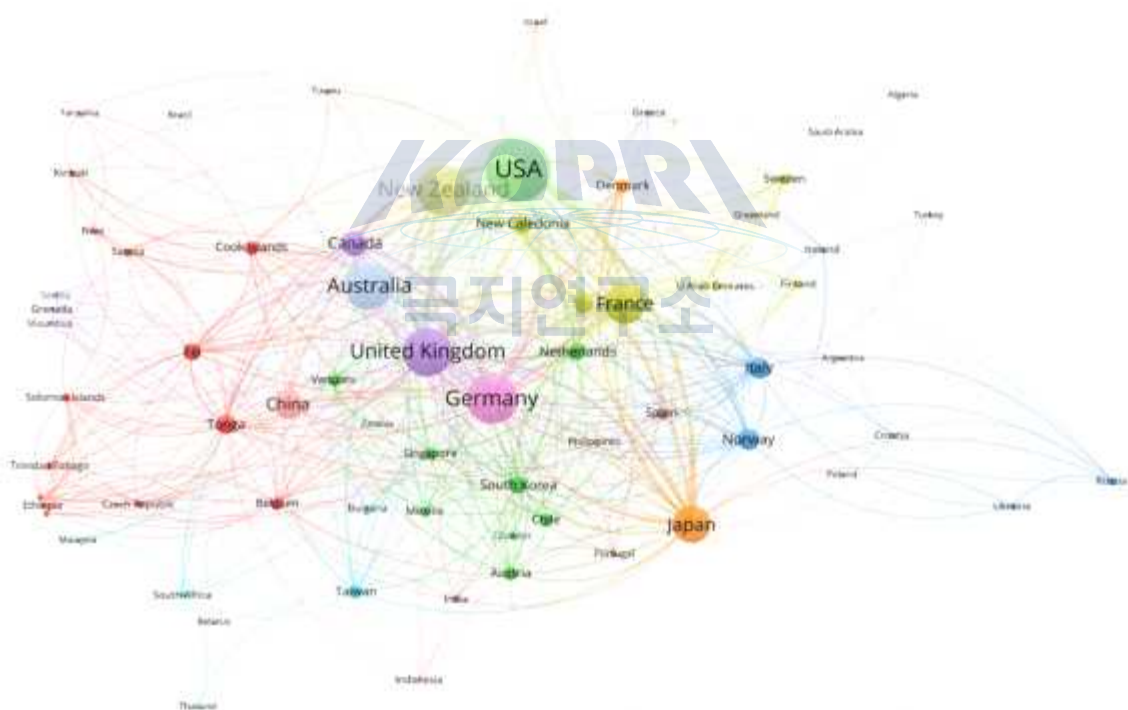


그림 2-39. 남서태평양 대양/지구조 분야 국제연구협력 동향

- 캘리포니아 주립대학, 프랑스 CNRS, 뉴질랜드 GNS 등이 남서태평양 해양연구 분야 논문을 최다 발표한 기관으로 나타남(그림 2-40)
- 대한민국의 한국해양과학기술원은 총 27편의 논문을 발표하여 38편을 발표한 일본의 도쿄대학과 함께 아시아 지역에서 남서태평양 연구를 선도하고 있는 연구기관으로 나타남

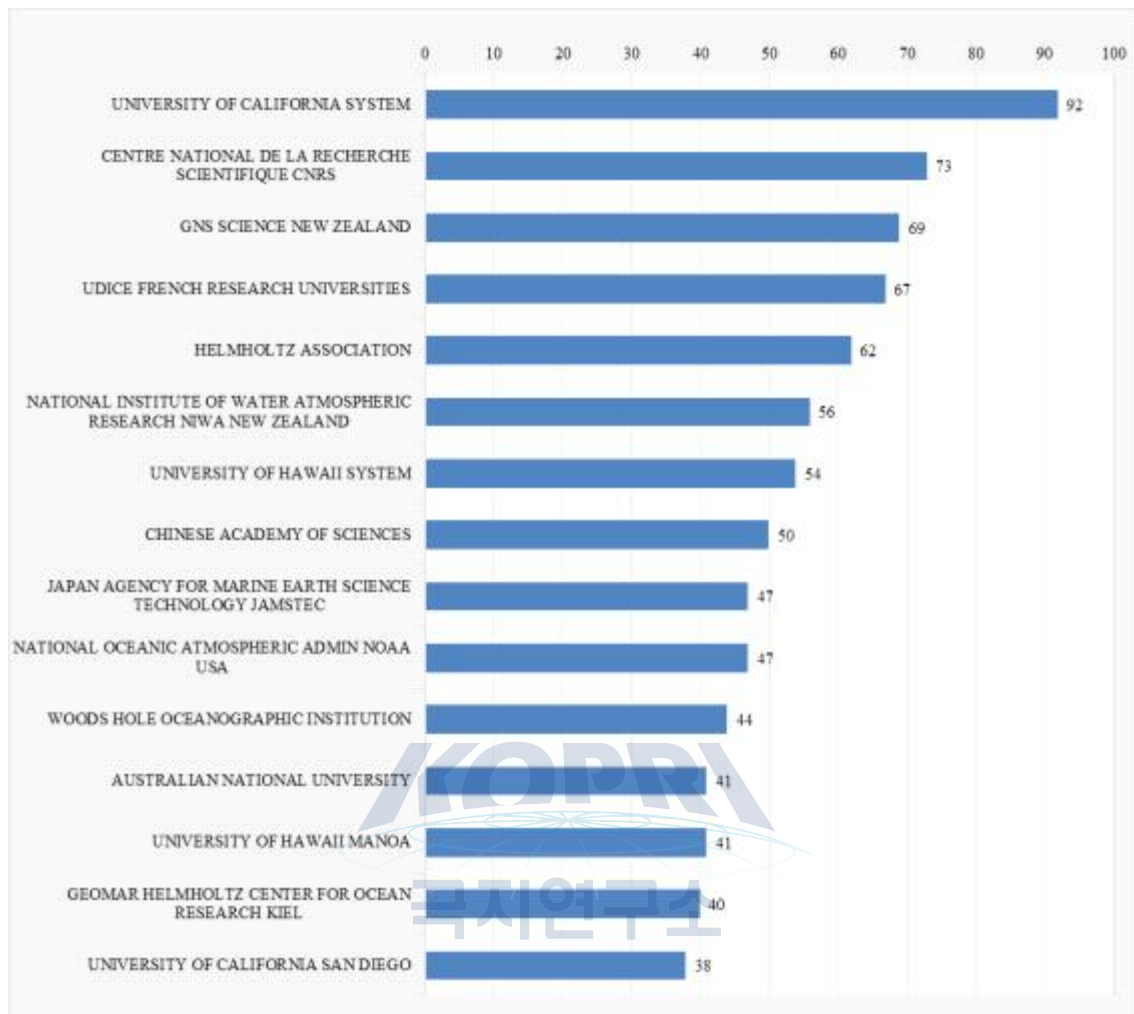


그림 2-40. 남서태평양 대양/지구조 분야 선도 연구기관('10~'22)

• 시사점:

- 1) 과거 13년간 남서태평양 해역의 연구는 지구조, 화산폭발/자연재해, 생물 다양성 연구에 집중되었으며, 열악한 접근성으로 남태평양 순환류 해역의 생물 및 금속자원의 연구는 미미한 수준으로 본 사업에서 추진하는 미답지 탐사/연구를 통해 국제적 연구 성과의 창출 기대
- 2) 홍가통가 해저화산폭발 이후 전 세계적으로 화산폭발 영향 평가를 위한 연구가 급증하고 있으며, 이 분야의 국제적 관심 증대로 해외 우수기관과 공동연구 기회 증가
- 3) 남서태평양에 대해 많은 연구 노하우와 유리한 지리적 접근성을 지닌 미국, 호주, 뉴질랜드 등의 대학 및 연구기관들과 국제협력 기반 확보 필요

제 3 절. 정책 동향

1. 국내 정책 동향

- 정부의 제5차 과학기술기본계획('23-'27)에서 과학기술혁신 전략 2의 혁신 주체의 역량 제고 및 개방형 생태계 조성 분야 “과학기술 외교·협력 리더쉽 확보” 및 문제해결 전략 3의 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응 분야 “우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대”의 추진 방향과 연계성이 높음
- 미래적 복합지구조 해양탐사를 통한 세계 수준의 연구성과 창출 및 국제적 이슈의 주도적 해결로 과학기술 국제 의제를 선도하고 전략적 국제 공동연구를 확대하는 등 과학기술 외교·협력의 고도화 가능
- 더욱이 해양수산부 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23-'27)의 전략 2의 파도를 넘는 위기대응 미래 R&D 분야 “해양·극지 개척으로 해양 과학영토 확대” 및 전략 4의 해양강국 R&D 생태계 조성 분야 “국제협력형 연구개발 체계 구축”에 밀접하게 부합
- 신규 자원(해양생명·희유금속)을 확보하여 국가 간 해양영토 경쟁에 전략적으로 대응하고, 국제기구별, 국가별, 분야별 기술 수준에 따라 우리나라 주도의 개방형 연구체계를 구축하여 해양과학 리더로서의 국가 위상 제고 및 국제사회 지지기반 확대 가능
- 2023년 5월 한-태평양도서국 정상회의를 개최하여 대한민국은 태평양도서국의 실질적 수요와 의사에 호응하여 한·태평양도서포럼(PIF) 협력기금 규모를 획기적으로 증액하고 공공보건, 해양자원 보호, 해저자원 개발, 해양환경 보존 등을 지원하기 위해 공적개발원조(ODA) 규모를 대략 2배로 늘리는 등 상생의 협력을 확대해 나갈 것을 협의
- 한국국제협력단(KOICA)는 2023년 8월 개최된 PIF 경제장관회의에서 통가의 자연재해와 재난, 경제사회 인프라, 경제발전 등의 현안문제를 해결할 수 있는 양국의 개발협력방안을 모색하기로 결정
- 국립생물자원관(MABIK)을 통해 해양 생명 실물자원 및 유전자원 일원화를 통한 DB GIS 시스템을 구축하여 운영
- 지진·화산재해대책법 제2장은 기상청, 한국지질자원연구원, 해양수산부 소속 기관 등이 화산활동 관측과 관련된 연구 및 업무를 수행하도록 규정하고 있음. 이에 따라, 기상청 지진화산국, 한국지질자원연구원 화산연구단이 주요 기관의 화산활동 관측 전담 부서에 해당함
- 국내 화산활동이 관측되는 화산이 부재하여, 실제로 화산활동 관측을 수

행하는 기관은 없는 실정임

2. 국외 정책 동향

- 2023년 9월 미국 주도로 개최된 PBP(푸른 태평양 동반자) 외교장관 회의를 통해 기후변화, 자연재해 등 태평양 도서국이 가장 시급하다고 여기는 현안문제를 해결하기 위한 공동성명 발표
- 태평양 도서국의 기후예측·분석 역량 강화를 위해 한국의 APCC 기후센터를 포함하여 미국기상청 등 8개 기관이 참여하여 유엔환경계획사무국(UNEP)이 제안한 기후정보·지식 서비스 강화 사업을 2026년 9월까지 수행할 예정
- 호주는 올 8월 남태평양도서국에 대한 국제사회 지지기반 확보를 위해 기후변화 대응 등 해당 국가의 최우선 과제에 초점을 맞추어 2025년까지 200만 달러 규모의 새로운 국제 개발 원조 정책 발표
- 희유금속자원 최대 수입국인 일본은 희유금속 광물 및 소재의 가격 급등과 자원 부족의 국부화 문제 등에 적극 대응하기 위해 산·학 연계 프로젝트로 '원소 전략 프로젝트' 및 '희유금속 대체재료 개발 프로젝트'를 각각 2007년부터 가동 중
- 중국은 2023년 8월부터 차세대 반도체에 쓰이는 희유 광물로, 자국이 전 세계 생산의 대부분을 차지하는 갈륨과 게르마늄에 대한 수출통제 실시
- 미국은 중국의 희유 광물 무기화 위협에 대응할 협의체 구성을 위해 카자흐스탄, 키르기스스탄, 타지키스탄, 투르크메니스탄, 우즈베키스탄 등 5개국 정상과 'C(Central Asia의 이니셜) 5+1' 정상회의 개최
- EU는 핵심 광물의 중국 의존도를 낮추기 위해 2030년까지 제3국이 생산하는 전략적 원자재 의존도를 역내 전체 소비량의 65% 미만으로 낮추는 핵심원자재법 제정 추진 중
- 2023년 5월 미국 주도의 대중국 포위 다자 경제협력체인 '인도·태평양 경제 프레임워크(IPEF)'는 반도체와 핵심 광물 공급망에서 중국 의존도를 낮추기 위한 협정 체결
- 미국) 국가 차원에서는 IMBeR, GEOHAB 등의 거대 프로그램을 통해 해저지형과 서식지 상관성, 각 대양의 다양한 생태계 비교 분석, 기후변화와 인간 활동이 물질순환과 생태계 구조에 미치는 영향 이해 등 다양성 보존 연구를 중심으로 하고 있으며 대양생명자원 확보와 활용 관련 연구는 민간 주도
- 국제 프로그램인 IMBeR(Integrated Marine Biosphere Research)는 2025년

까지 연구 의제를 ‘사회의 이익을 위한 글로벌 변화에 따른 해양 지속 가능성의 비전’으로 정하고, 혁신 도전 과제의 하나로 해양 생지화학적 순환 및 생태계 과정에서 대사 다양성과 진화의 역할에 대한 이해의 고도화로 설정하여, 해양 생물 다양성에 대한 중요성을 시사함

- 국제 프로젝트인 GEOTRACES의 하위 프로그램인 BioGEOTRACES 및 The Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program(GO-SHIP)의 Bio-GO-SHIP 프로그램 등을 통해 전 세계 해역을 대상으로 메타지놈에 기반한 생물 다양성 분석 수행(Berube et al., 2018; Biller et al., 2018)
- 일본) JAMSTEC을 중심으로 한 “Ziphangu in the Ocean” 프로그램 등을 통해 신규 물질 발굴, 공생관계 및 면역체계, 생명 기능 모사 등의 연구 수행
- 연구분야는 해저자원개발, 해양지구환경변동연구, 해저지진발생연구, 해양생명공학연구 등이 있으며, 이 가운데 열대 기후변동에 따른 지구환경변동 연구와 극한지역(심해저)의 생물다양성과 기능-진화연구를 수행하고 있음. 주요 탐사 해역은 남서태평양, 중동태평양, 인도양, 남인도양, 지중해임
- 중국) 제1 해양연구소를 중심으로 한 북인도양 해저열수구 탐사를 통한 생명자원 확보 및 활용, 제3 해양연구소를 중심으로 한 태평양 해저산 생명자원 확보 연구 수행, 과학기술부에서 지원하는 973 program에서는 “남중국해 대륙사면 생물자원과 생태계” 연구를 통해 영양염 단계에서부터 수산자원까지의 종합 연구 수행

제 4 절 대내·외 환경변화

1. 국내 환경 분석

- 한국해양과학기술원은 해양수산부 R&D로 수행한 심해저 광물자원개발사업을 통해 북피지분지-라우분지-통가 화산호 지역에서 수차례 대양탐사를 수행한 경험을 보유하고 있으며, 이에 따른 미개척 복합지구조에 대한 탐사 노하우, 인프라 및 기초기술을 확보
- 과학기술정보통신부는 국가전략기술 우주항공·해양 임무중심 전략로드맵(’23.12)에서 희토류를 포함한 전략광물자원의 확보와 해양자원 탐사기술

고도화를 전략과제로 선정

- 2021년 국립해양생물자원관은 자원조사의 효율성 제고를 위해 ‘환경 DNA 메타바코딩 분석 지침서’를 발간하여 이를 해양생물자원의 서식 현황 파악뿐만 아니라 모니터링 연구에 적극 활용할 수 있도록 함
- 유엔 해양법 협약 (UNCLOS)을 비롯한 국제 법률과 규정을 준수하며, ABNJ(Areas Beyond National Jurisdiction)에서의 생물 다양성 보존과 관리를 위해 적극적으로 참여
- 공해 및 심해저에서 채집·형성한 해양유전자원 및 디지털정보의 상업적 이용으로 발생한 이익공유 의무화 하고, 공해 및 심해저 해양유전자원 수집·활용에 대한 공평하고 공정한 이익공유를 위해 정보 공유체계 수립 및 통보 의무화, 금전적 이익공유 체계 마련
- ABNJ에서의 해양생태계와 생물다양성을 연구하고 모니터링하기 위한 프로그램 개발과 환경 변화에 따른 생물다양성 이해를 위해 연구 진행

2. 대외 환경 분석

- 환경유전자

- 최근 환경유전자 활용도가 높아지고 국외에서는 관련 연구가 급속도로 진행됨에 따라 ‘Environmental DNA’ 저널이 2019년 5월에 창간됨
- 일본에서는 환경유전자 데이터 기반 자동/표준화된 방식으로 어류를 분석하고 식별하는 ‘MiFish Pipeline’을 개발하여 웹사이트를 구축 및 운영 중임
- Genomic Standards Consortium은 메타데이터의 국제적 표준화를 위한 커뮤니티 기반 조직으로 관련 연구를 효율적으로 수행하고 상호 연결성을 확보하여 국제적인 데이터 공유와 협력을 촉진함
- 또한 Earth Microbiome Project는 전 세계 다양한 환경에서의 미생물 군집을 연구하기 위한 표준화된 메타데이터 수집과 시퀀싱 프로토콜을 제공

- 국제사회 지지기반 확보를 위한 열강들의 새로운 각축장 남태평양

- 태평양 지역의 풍부한 해양·수산·광물 자원 때문에 강대국들(미국, 중국, 일본, 프랑스, 호주, Eu 등)의 주도권 경쟁이 심화되면서 과학기술·사회·경제·인력지원·안보 등에 대한 대외원조 정책이 꾸준히 증가
- 미국은 통가, 팔라우, 투발루, 미크로네시아, 피지, 솔로몬 제도, 파푸아뉴

기니, 마셜제도, 사모아, 폴리네시아, 쿡 제도 등 태평양 도서국 정상회의를 개최하여 8억1천만달러(약 1조 800억원) 상당의 경제적 지원을 약속하는 '태평양 전략'을 발표

- 중국은 2018년 중-태도국 정상회의를 개최하여 '중-태도국 협력기금'을 만들어 막대한 재정 지원을 바탕으로 해양·보건·교육 등 다양한 분야에서 협력을 확대하여 태평양 지역 영향력 확대에 집중하고 있음
- 또한 중국-남태평양 10개 도서국 안전보장 협력 확대에 합의('22.5)하고 협력센터 설치('22.7)
- 미·영·일 등 5개국 중국 대응 차원으로 태평양도서국 지원논의('22.9) 및 정상회의 개최 ('23.5)
- 호주·캐나다·일본·독일·뉴질랜드·영국 등은 태평양 도서국과 '푸른 태평양 동반자(PBP)' 외교장관 회의를 개최하여 기후변화, 어업, 경제발전, 자연 재난 대응, 인적 교류, 교육 등 다양한 분야에서 협력 추진 발표

- 해양바이오산업 성장에 필요한 해양생명자원의 국가적 확보 경쟁 가시화

- 해양바이오는 식품, 화학, 의약품, 에너지 등 다양한 분야에서 미래 먹거리를 책임질 새로운 미래 신성장산업으로 주목받고 있어 심해, 공해 등의 해양생명자원에서부터 기초소재의 확보 및 이와 연계된 첨단기술 융합을 통해 최종적으로 고부가가치 제품 개발 실현이 필수적
- 유럽연합(EU)은 해양바이오산업이 청색경제(Blue Economy)의 핵심이 될 것이며, 경제협력개발기구(OECD)는 글로벌 문제해결과 경제성장의 원동력이 될 것으로 전망(Marine biotechnology, '17)
- EU는 해양바이오기술협의회를 통해 “해양바이오기술의 전략적 연구 및 혁신 로드맵”을 2016년 발표. 블루 바이오 경제를 위해 해양환경 탐사, 바이오매스 생산 및 공정 등 다섯 가지 주제 영역을 나누어 도전과제와 해결책을 제시하여 추진 중
- 미국은 글로벌시장 선점을 위해 국가적 전략계획을 수립하고, 연구개발(R&D) 및 관련 인프라 구축을 위한 투자를 확대하고 있음. 특히, 바이든 정부의 주요 정책인 바이오헬스케어 분야의 지원으로 성장이 가속화될 전망
- 중국은 해양바이오시장에서 가장 빠르게 성장하는 국가. 2026년부터 미국 성장률의 2배 수준으로 미국과의 격차는 점차 좁혀질 것으로 예상. 제14차 5개년 계획을 통해 해양경제 발전분야를 적극적으로 확대하여 해양대국에서 해양강국으로의 전환을 추진 중

- 이에 비해 우리나라의 해양바이오산업은 중소기업 위주로 기술 수준은 미국의 약 75% 수준에 불과하며, 주요국과 비교 시 고부가가치를 창출하지 못하고 있음. 대규모 투자에 의한 산업 생태계 형성을 위해 대기업 참여의 필요성이 강조됨
- BBNJ 협정문 채택(2023.06.) 이후, 국가별 환경영향평가, 해양유전자원 이슈 등에 대한 대응 방안 마련을 수립
- 국제적으로 EIA 프로세스와 국가 간 협력을 강조하여 해양 생물다양성과 환경 보호를 강화하려는 노력 지속됨

3. 시사점 및 전략방향

(1) 환경변화의 시사점 및 전략적 방향성

- 대양연구는 국가 현안이슈 대응을 위한 핵심 연구영역으로 지구환경/자원 문제를 해결하기 위한 연구 수행 필요
- 해양 연구기관 간 연구 중복성 증가에 따라 대양을 대상으로 한 해양과학기술원만이 주도적으로 수행할 기관 대형과제를 발굴하고 연구역량 집중 필요
- 본원/극지연의 연구 대상 지역의 겹을 극복하고 상호 협력을 통해 연구 효율성을 제고할 수 있는 연구 수행 필요 (극지연-남극, 본원-북태평양 연구 수행에 따라 남태평양 대상 연구사업 부재)
- 남서태평양 복합지구조 해역(남위 15°~35°)은 높은 과학적 관심과 자원적 가치를 지니나 접근성이 낮아 연구가 미흡한 지역으로 국제지각시추프로그램(International Ocean Discovery Program; IODP) 329 탐사(2006.12-2007.01) 이후 추가적인 탐사가 이루어지지 않은 미개척지로 희소성 있는 높은 과학적 가치를 지님
- 복합지구조 해역의 지각 진화를 유발한 다양한 지질/지구조 프로세스에 대한 종합적인 이해와 지구물질순환(지각-심해저-대양)을 규명하여 지구조 안정성 평가, 화산활동 성인 해석 등 자연재해 대비 예측 시스템 구축의 기반 마련 필요
- 관측 이래 최대 규모 홍가통가 해저화산폭발의 자연재해 규모 평가 및 생태계 복원과정 전주기 모니터링을 통해 자연재해 관련 과학적 정보 축적 필요

- 그에 따라 환경 비파괴적이고 효율적인 환경유전자를 이용한 분자생태학적 접근 방식으로 향후 신뢰할 수 있는 표준화된 해양생태계 모니터링 방법론 구축 필요
- 형태학적 및 분자생태학적 분석 결과의 비교/통합을 통해 생물다양성 및 군집 복원 평가의 정확도 제고
- 남태평양 극저생산대는 어려운 접근성으로 전 세계적으로 연구가 미비함. 국제해양시추 프로그램(International Ocean Discovery Program; IODP)을 통해 특히 미생물 생태계 등 주요 현안문제 해결을 위한 연구가 일부 수행되었지만, 후속연구가 미미함.
- 남서태평양은 아라온호의 기항지인 뉴질랜드 크라이스트 처치 인근에 위치하여 적은 비용과 시간으로 효율적 탐사 가능. 제2쇄빙선 건조("28년 예정)를 대비한 연구선 활용사업 발굴이 필요되며, 본-분원 간 아라온호를 활용한 공동연구 수행으로 대양연구 영역 확대 및 국제수준의 과학적 성과 창출 필요
- R&D 국제협력을 통해 세계적 수준의 공동연구를 대폭 확대하기 위해 많은 해양 선도국들은 글로벌 연구협력 거점 설치에 집중
- 국제네트워크 구축 및 리더십 강화를 위해서는 기존 국제협력의 확대 및 체계화, 새로운 국제협력 모색 방안 마련이 시급함
- 국가 간 신뢰도 향상 등 개방형연구체계 구축을 위한 연구 현장의 특수성 문제를 해결하기 위해 국제 협력네트워크 구축이 불가피
- 남서태평양은 국가간 신뢰도 향상 등 개방형연구체계 구축을 위한 연구 현장의 특수성 문제를 해결하기 위해 국제 협력네트워크 구축이 불가피
- 남태평양 14개 도서국의 캐스팅보트로서 주요 현안에 공동대응하고 있으며, 남태평양 도서국 국가 영향력 제고 및 지지기반 확대를 위해 한-태평양국제협력센터 설립 등 협력네트워크 구축 필요
- IT산업과 첨단산업 발달에 있어 필수적인 희유금속의 급격한 수요 증가로 국가 간 신 해양광물자원의 확보 경쟁이 치열하게 전개되고 있어 국제자원분쟁에 적극적으로 대응할 수 있는 대안 마련이 조속히 요구됨
- 희유금속은 자원보유국의 자원 무기화 정책 등 공급 불안정성이 점차 증가하고 있음. 이를 타개할 수 있는 한 방안으로 미개척지 대양탐사를 통해 자원잠재성 높은 자원공급 유망지 선점 필요
- 복합지구조 환경에 따른 유용금속 거동 특성 비교/이해는 가까운 미래에 실현 가능성 높은 해양광물자원의 개발 적합지 선정에 필수적 기초자료 제공

- 국내의 경우, 해양 탐사는 광물자원 중심으로 진행되어 왔으며, 최근 들어 생명자원이 중심이 되는 탐사(2019년부터)가 이루어짐
- 현재까지의 공해상 생명자원과 관련된 연구는 생물다양성, 생물자원 확보, 그리고 생태계 이해 등을 목적으로 하는 기반(기초) 연구단계라 할 수 있음

(2) SWOT 분석

가. 기회와 위협요인

- 통가 호상열도 내 홍가 화산(HTHH, Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai) 해저 화산 폭발은 1883년 이래 최대 규모로 평가받고 있어 대규모 자연재해 피해 범위 산정·예측 및 자연복원 과정 이해에 결정적 자료제공의 기회요인으로 작용
- 제2쇄빙선 건조는 남극전용선으로 활용 예정인 아라온호의 활용 기회가 증대할 것으로 예상되며, 남극 이동 항해 구간의 과학적 탐사에 활용할 기회를 제공
- 한-피지 태평양국제협력센터 설립은 관련 사업 개발을 통한 남태평양 도서국 국가 영향력 제고의 기회요인으로 작용할 수 있음
- 자연재해와 같은 글로벌 현안문제에 공동대응 함으로써 국가 간 상호이해에 따른 국제적 협력 모델 구축 가능성 증대
- 희유금속 확보를 둘러싼 국제자원분쟁에 적극적으로 대응하기 위한 안정적인 공급지 조기 확보 기회
- 미개척지 대양탐사를 통한 희유금속 공급망 확보는 자원의외교력 강화의 발판으로 가속화되는 국제자원분쟁 시대의 리더로서 국가적 위상 제고의 기회
- 심해 생명자원 확보에 있어 ROV를 활용한 심해생물채집은 고가의 비용이 투입되며 심해라는 극한환경지역의 특성상 생물의 서식밀도가 매우 낮아 활용연구를 위한 다량의 생물 채집을 담보할 수 없는 점이 위협요인으로 작용
- 해저화산폭발로 인한 지구조 불안정성은 탐사지역 접근 및 정밀탐사 수행에 있어 위협요인으로 작용할 수 있음
- 체계적인 자연재해 예측 시스템의 부재는 인류의 생활 터전 확보, 인명

피해 예방, 경제발전 등에 큰 위협요인

- 희유금속 확보를 위한 중국, 일본 등 해양선진국들의 선제적·적극적 탐사 활동과 비교해 대한민국의 미비한 탐사 수행은 국제자원분쟁 대비 측면에서 위협요인으로 작용
- 천연자원 빈국인 대한민국의 현재 희유금속 확보·개발에 대한 미미한 투자는 경제/자원외교에 있어 국가 경쟁력을 약화시키는 위협요인

<표 2-3> 기회와 위협요인

기회요인(Opportunity)	위협요인(Threat)
O1. 홍가-통가 수증화산 폭발은 자연 재해 피해범위 산정/복원과정 추적 을 위한 최적의 자연 실험장 제공 O2. 관측 이래 최대 수증화산 폭발로 남서태평양 해역의 국제적 관심 증 대 O3. 제 2쇄빙선 건조 예정으로 남극 전용 아라온호의 활용사업 개발 필 요성 O4. 한-피지 태평양국제협력센터 설 립은 관련 사업 개발을 통한 남태평 양 도서국 국가 영향력 제고의 기회 요인 O5. 태평양 도서국의 국제기구 입지 강화에 따라 이들 도서국의 지지기 반 확대 필요성 대두 O6. BBNJ 협정 타결로 해양 생명자 원에 대한 관심 증대 O7. 희토류 자원무기화에 따라 안정 적 희유금속 공급망 확보 필요성 대 두	T1. 화산폭발에 의한 지구조 불안정 성 T2. 자연재해 예측 시스템의 부재 T3. 생명자원 이익 공유에 대한 불 확실성 및 선점을 위한 경쟁 심화 T4. 희유금속 자원 무기화에 따른 국가 간 경쟁 심화 T5. 태평양 도서국 지지기반 확대를 위한 강대국의 선제적 지원 강화

나. 강점과 약점

- 남서태평양은 아라온호 기항지(뉴질랜드 크라이스트 처치) 인근에 위치하여 비용·시간적으로 효율적 탐사의 강점이 있음
- 대한민국의 국제해저기구, 런던의정서 당사국 회의, 국제해사기구에서 펼쳐온 주도적이고 능동적인 활동은 당사국 의무준수 및 국제신뢰도 증대로 이어지며, 대양탐사 선진국과의 우호적 관계로 발전하는 강점으로 작용
- 남태평양 피지 및 통가 해역에서 다년간의 탐사 경험과 축적된 자료들은 본 사업과 시너지 효과 창출이라는 강점으로 작용
- 해저 화산폭발 등 자연재해에 대한 탐사 경험 부족은 약점으로 작용
- 남태평양 지역에서 미국, 호주, 중국, EU 등이 추진 중인 경제·사회·과학기술·교육·안보 등 다양한 분야에 대한 자국의 영향력 강화 정책들은 대한민국의 남서태평양 도서국 국제사회 지지기반 확대에 있어 약점으로 작용할 수 있음

<표 2-4> 강점과 약점

강점(Strength)	약점(Weakness)
S1. 남서태평양 연구 거점기지 확보 - 구축 인프라 활용 비용·시간 측면에서 효율적인 탐사 수행 가능	W1. 아라온호의 높은 활용도에 따른 탐사시간 확보 어려움
S2. 아라온호 남극항해 근접지역으로 접근성 용이	W2. 본분원간 협업부족에 따른 연구 해역 겹 발생
S3. 공해상 자원관리 국제기구(ISA, BBNJ) 지속적이고 주도적 활동	W3. 자연재해 관련 해양탐사 경험 부족
S4. 기존 해양탐사 수행으로 도서국과의 협력 체제 기 구축	W4 남태평양 지역 자국의 영향력 강화 정책에 주도적인 열강들과 비교해 미비한 대한민국 지지기반 확대 정책
S5. 해양탐사 노하우(knowhow) 축적으로 미탐사 해역 선제적 탐사 수행 가능	

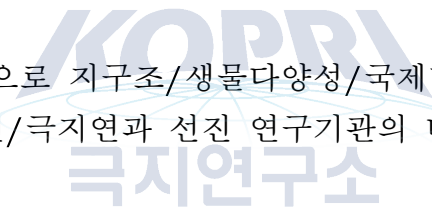
다. 전략대안 도출 (SWOT Matrix)

- 대내외 환경변화 분석을 통한 기회요인과 위협요인을 분석하고, 내부 역량분석으로부터 강점과 약점을 분석하여 SWOT Matrix를 작성함

	강점	약점
기 회 요 인	SO전략 (기회와 강점의 시너지 전략)	WO전략 (기회를 통한 약점 극복 전략)
	SO 1. 기존 구축 인프라 및 심해탐사 경험을 활용한 대양사업 확대 (S1, S2, S5, O1, O3) SO 2. 기존 수행 탐사와의 시너지 창출로 체계적인 자연재해 예측 기반 구축(S2, S5, O1, O2) SO 3. 미개척지 선제적 탐사를 통한 희유금속 공급망 조기 확보(S4, S5, O7) SO 4. 다양한 서식지가 분포하는 복합 지구조해역에서 신 생명자원 확보 (S5, O6)	WO 1. 제2쇄빙선 건조 이후 남극전용 아라온호의 본격 활용을 통한 본분원 협력 남서태평양 종합과학탐사 수행 (W1, W2, O1~O7) WO 2. 미개척 복합지구조 해양탐사를 통해 세계 수준의 과학적 성과 창출 기대(W1, W2, O4) WO 3. 홍가-통가 화산 접근성 확보를 통해 국외 연구기관과의 국제공동연구 주도 (W3, O2, O3) WO 4. 자연재해 등 글로벌 현안문제 해결을 통한 태평양 도서국 지지기반 확대(W4, O5)
위 협 요 인	ST전략 (강점을 통한 위협 극복 전략)	WT전략 (약점 최소화를 통한 위협 극복)
	ST 1. 미 조사지역 선제적 탐사 추진을 통해 자연재해 피해 범위 산정 및 자연재해 대비·예측 기술 확보(S1, S5, T1, T2) ST 2. 해저화산폭발, 지진, 쓰나미 등 자연재해 예측 시스템 우선 구축 전략(S1, T2) ST 3. 희유금속 자국물량 확보를 통한 국제자원분쟁 대응방안 마련 및 국가 경쟁력 강화(S1, S3, S4, T4) ST 4. 미 개척지 선제적 탐사 추진을 통한 생명자원 선점(S1, S5, T3)	WT 1. 해저 자연재해 탐사 기술 개발을 통해 예측 시스템 구축에 필요한 과학적 근거 제공에 있어 선도적 역할(W1, W2, T1, T2) WT 2. 남서태평양 도서국 EEZ 및 인근 공해상 연구사업을 추진하여 자연재해 정보 제공 및 예측 시스템 구축을 통한 국가 영향력 제고(W3, T2, T5)

<표 2-5> 전략대안 도출

- 분석된 강점, 약점, 기회요인, 위협요인을 바탕으로 수립한 “미개척 복합 지구조 해역(BATS) 물질순환 연구, 자연재해예측 시스템 및 국제 협력연구 기반구축”연구의 추진 전략은 다음과 같음
- 연구선 활용의 극대화 및 탐사의 수월성을 위해 장보고 기지 이동 시 연구 지역을 항해하는 아라온호를 활용한 본/분원 간 협력을 통해 사업을 추진
- 남서태평양은 연구현장의 특수성(접근성, 열악한 연구인프라)을 고려할 때 국제 협력네트워크 구축을 통한 개방형연구체계 구축이 필수적이며, 한-태평양국제협력센터 및 제2쇄빙선 건조 이후 아라온호를 활용하여 당사국, 인접국, 해외연구 기관, 국내 대학 등을 포함하는 협력네트워크 구축 필요
- “화산폭발의 피해규모 산정 및 생태계 복원과정 전주기 모니터링”은 연구 성격상 조속한 사업 개시가 필요하며, 이를 위해 아라온호를 이용한 소규모의 선제적 탐사 필요
- 추가적인 화산폭발 등에 대비한 안전조치로서 해저지진계의 조속한 설치가 요구되며, 순차적인 지진 모니터링 체제 구축으로 화산폭발 예측 시스템 구축
- 연구가 취약한 지역으로 지구조/생물다양성/국제협력 등 다학제적 접근이 필요하며, 해양과기원/극지연과 선진 연구기관의 다양한 전문가 참여 필요



제 3 장

추진 전략

제 1 절 비전 및 목표 수립

□ 비전 및 목표 수립



주요 성과물

- ◆ 대규모 자연재해 전주기 생태계 복원과정 이해 및 회복 영향 인자 파악
- ◆ 화산/지진 활동에 대한 자연재해 평가 및 예측 기술
- ◆ 대양 유래 생명자원 확보 및 상용화 기반 기술개발
- ◆ 희토류 등 신규 금속자원 분포지 확인 및 희유금속 분포 DB 확보
- ◆ 복합해양지각 진화 및 특이 생물 생태계 관련 우수 학술 논문

그림 3-1. 목표 달성을 위한 전략맵

제 2 절 주요 추진내용

1. 통가 화산활동 특성 이해 및 영향평가

- 남서태평양 도서국 지구조 안정성 평가
 - 탄성파, 지진파, 중/자력 탐사
 - 정밀 해저지형/지층 탐사를 통한 폭발 전후 해저지형 변동성 확인
 - 맨틀-지각 3차원 구조 및 마그마 구조/기원 파악
 - 발생 지진 위치 분석을 통한 지구조 응력 분석
 - 화산암 분석을 통한 마그마 활동 특성 파악
 - 해저 및 지상 모니터링 구축을 통한 재해 대비 강화
- 해저 화산 폭발의 지질학적/생물학적 재해범위 파악
 - 해저화산 지진 메커니즘 분석 통한 화산폭발 과정 해석
 - 신규 화산폭발(Hunga Tonga)에 의한 물질 확산범위 산정
 - 해저 화산 물질별 확산범위 파악
 - 화산물질 퇴적에 따른 해양환경 영향 파악
 - 해양 생물에 대한 화산 물질의 영향평가
- 화산 재해 지역 생태계 복원 과정 연구
 - 재해 이후 자연적 환경 치유/완화 추적자 선정을 통한 환경모니터링
 - 재해 지역 자연복원 과정 확인 및 복원 가속화 기술
 - 해양 일차생산자 (식물플랑크톤)의 시공간 분포 특성과 변화 파악
- 화산활동 과거 기록 복원

2. 복합지구조 해역 진화모델 구축

- 미탐사 해역의 해저지형 및 지진파/중자력/해저면지진계 자료 확보
 - 탄성파 자료 분석을 통한 맨틀 용융 집중지 파악
 - 무인탐사장비를 활용한 섭입판 내 신생 화산체 발견 및 분출 유형 파악
- 지진계 설치 운용
 - 진원지 심도 분석을 통한 섭입판 분포 파악 및 섭입 유형 분류
 - 대규모 화산 분화 가능성 지속 모니터링
- 섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인 연구
 - 섭입 화산체의 분포/성인과 열도 화산 분화 규모 변화의 상관성 파악
 - 섭입대 진화에 따른 맨틀 조성의 다양성과 화산활동 변동 파악
 - 화산암 및 퇴적층의 연대측정을 통한 지구조 세부 진화모델 구축
- 복합지구조 해양지각 유용금속 거동특성 규명

- 복합지구조 기반암 광물/지구화학 특성 파악
- 기반암 포획 황화물 핵심금속 특성 분류
- 열수광체/기반암 지구화학 상관성 파악

3. 신 해양자원 확보

- 극저생산대(남태평양 아열대순환역) 해저 퇴적물을 활용한 특이자원(희유 금속) 탐색
- 극저생산대 우점 수소산화미생물 등 핵심 자가영양미생물의 배양기법 조사, 기능 이해 및 적용기법 도출
- 지구조/서식 환경별 생물다양성 연구
- 다양한 지구조 환경 분포 생명자원 확보

4. 국내·외 협력네트워크 및 국제공동연구 추진

- 통가 지질조사소/뉴질랜드 오클랜드 대학
 - 공동 현장조사 기획 및 참여
 - 통가 화산활동 특성 연구(화산암/화산재/퇴적물 등)
- 미국 하와이 주립대학/뉴질랜드 지질핵과학연구소(GNS)
 - 지구물리탐사(탄성과, 지진파, 중·자력 등)를 통한 지각 변동성 연구
 - 복합지구조 진화모델 연구
- 미국 하바드대학/뉴질랜드 국립수자원대기연구소(NIWA)
 - 열수시스템 분야 생물다양성 연구
 - 서식지 보호/복원 연구

제 3 절 추진 체계 및 로드맵

- 해양과기원-극지연 간 확보 전문인력 및 연구 인프라를 고려한 최적의 협력체계 구축
- 국내 대학 지구조 전문가 협력연구 추진
- 통가/피지 당사국 및 통가해역 연구를 수행중인 뉴질랜드 연구진(GNS, NIWA, 오클랜드대학 등), 하와이대학, 하바드대학 및 InterRidge 등과 협력연구 추진

- 아라온호 이동항해 구간 활용 및 타 사업 공동탐사를 통해 비용절감 및 시너지 효과 창출
- 제2쇄빙선의 건조 이전과 이후 연구선 활용 여건이 상이함에 따라 제2쇄빙선이 진수되는 '28년을 기점으로 단계별 추진
- ※ 제2쇄빙선 건조 이후, 아라온호는 남극연구에 집중 활용 예정

- 1단계('25~'27: 제2쇄빙선 건조 전)
 - 아라온호의 활용시간 제약(외국연구선 임차, 뉴질랜드 및 현지 소형선박 등 연구항해 시간 확보 방안 모색)
 - 자연재해 영향평가, 생태계 복원 모니터링 연구 등 시급성이 요구되는 연구 우선 추진
 - 지구조 안정성 평가를 위한 지구물리/지질 자료 확보
- 2단계('28~'31: 제2쇄빙선 건조 후)
 - 아라온호(남극전용선 전환)를 활용한 본격 탐사 개시
 - 자연재해 예측, 지구조 진화모델, 신 해양자원 확보 등 연구주제 확대 및 본격탐사 수행

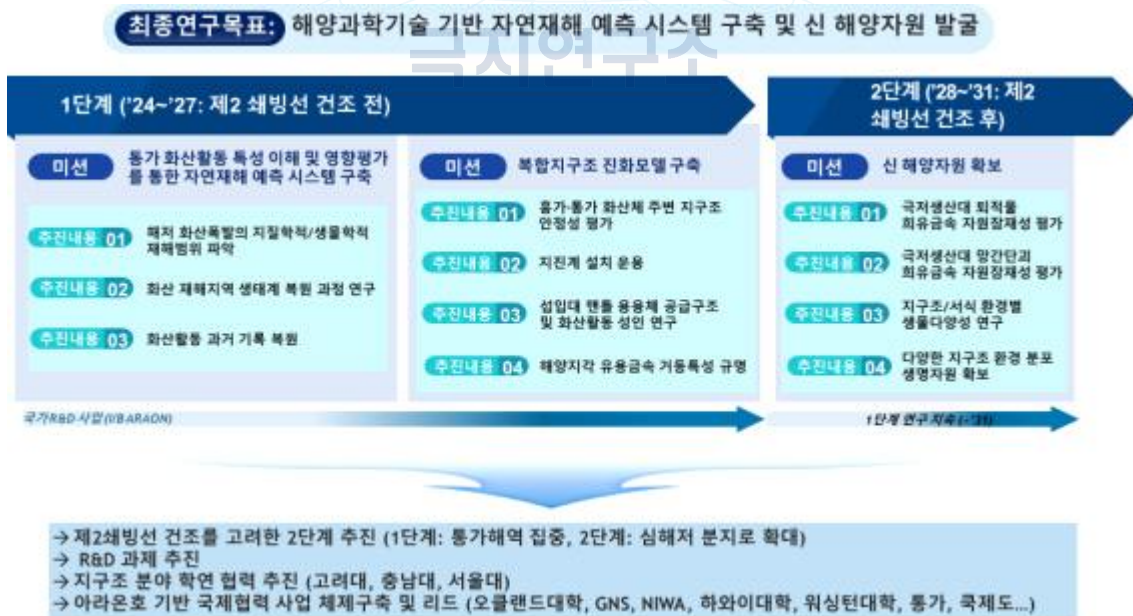


그림 3-2. 사업의 추진체계 모식도

제 4 절 기술로드맵

1. 기술정의

- 남서태평양 복합지구조 해역 및 극저생산대 해역의 자연재해 평가/예측시스템 구축, 지구조 진화, 신 해양자원 발굴을 위한 탐사 및 해석기술
- 해저화산 폭발이 유발한 지질학적/생물학적 재해범위를 평가하는 기술
- 해양생물에 대한 화산물질의 생태독성평가 기술
- 해저 화산폭발 기인 생태계 교란 및 복원 과정 모니터링 기술
- 화산 활동 역사 복원 기술
- 탄성파, 지진파, 중·자력 자료를 활용한 지구조 해석 기술
- 섭입대 맨틀 용융체 공급 구조 및 화산활동 성인 해석 기술
- 복합지구조 해양지각 유용금속 거동특성 규명 기술
- 해저 퇴적물 희유금속 탐사 기술
- 생물다양성 평가 기술
- 생물다양성 해석 및 생명자원 확보 기술

2. 주요이슈

○ 정책이슈

- 대양연구는 국가 현안이슈 대응을 위한 핵심 연구 영역으로 지구환경/자원 문제를 해결하기 위한 연구 수행 필요
※해양 연구 기관 간 연구 중복성 증가에 따라 대양을 대상으로 한 해양과학기술 원만이 주도적으로 수행할 기관 대형과제를 발굴하고 연구역량 집중 필요
- 제2쇄빙선 건조(‘28년 예정)를 대비한 연구선 활용사업 발굴이 필요되며, 본-분원 간 아리온호를 활용한 공동연구 수행으로 대양연구 영역 확대 및 국제 수준의 과학적 성과 창출 필요. 남서태평양은 아리온호의 기항지인 뉴질랜드 크라이스트 처치 인근에 위치하여 적은 비용과 시간으로 효율적 탐사 가능
- 미개척 복합지구조 형성지 남서태평양의 자연재해 예측 기반 구축은 전 지구적 이상기후 대응, 도서국 해양 공간관리 기술개발에 대한 과학적 정보를 제공하여 글로벌 리더로서의 대한민국 국가 영향력 제고
- 태평양 14개 도서국은 캐스팅보트로서 국제사회 주요 현안에 공동대응하고 있으며, 남태평양 도서국 국가 영향력 제고 및 지지기반 확대를 위해

과학적 정보제공 및 공동연구 등 협력네트워크 구축 필요

- 유엔 BBNJ협정 등 공해상 생명자원 활용에 대한 국제규범 강화에 대응하여 대양의 유용 해양생명자원 선점 필요
- 희유금속은 그린에너지 기술, 신 전자장비, 우주항공산업 등 국가전략산업 및 신동력산업의 필수소재로 자원보유국의 자원 무기화 위협에 대비하여 안정적으로 국가 경제를 발전시키기 위해서는 선제적 대양탐사를 수행하여 자원잠재성 높은 부존지 선점 및 공급원 확보 필요
- 해양 연구와 탐사 분야에서의 전문가와 인력을 양성하기 위한 국가 전략을 개발하고, 교육 및 연구 시설을 지원 필요

○ 기술이슈

- 홍가통가 해저화산 폭발은 기록된 최대 규모로 자연재해 영향 평가 및 해양생태계 복원 과정을 이해할 수 있는 최적의 자연 실험장으로 도서국 해양 공간관리 기술개발에 대한 과학적 정보를 제공할 수 있음
- 섭입대 복합지구조 해역(남서태평양 배호분지-화산열도-통가해구-해저산-심해분지)은 열수, 해산, 해구, 심해저 등 다양한 지질 요소가 분포하여 대양 자원 생성과 지질/화학/생물/지구동역학적 순환기작 규명에 적합
- 바이오 핫스팟 및 특이 생태계 탐사를 통한 생태계/생명자원 다양성 분석 및 BBNJ 대응을 위한 생명자원 확보
- 기탁 등록보존기관과의 연계를 통해 미 탐사 대양에서의 광물/생명자원 라이브러리 확대 및 활용기술 개발 기반 확보
- 해양지각의 생성 및 진화를 유발한 다양한 지질/지구조 프로세스를 이해함으로써 신 해양자원 발굴 토대 구축 필요
- 남서태평양 해양자원 우선적 활용 및 선점으로 다양한 데이터의 수집과 분석 가능
- 난배양성 미생물 배양을 통해 해양 바이오 다양성 연구 및 새로운 생물자원 발굴

○ 사회/경제적 이슈

- 화산폭발 자연재해(지구 온난화, 쓰나미, 화산재 피해, 지진 등)에 의한 인류의 생활 터전 파괴 및 인명 피해 최소화를 위해 과학적 근거에 기반한 자연재해 예측 기반 시스템 구축 필요

- 해양 선진국들은 부족한 육상자원을 대체할 수 있는 해저광물, 해양생물 등 해양자원을 선점하기 위해 해양탐사 선박, 유무인 심해잠수정, 해저로봇 등을 개발하고, 다양한 해저 지구조 지역에서 신자원 탐사에 주력
- 생물은 신약, 생촉매, 신물질, 산업소재 생산 연구에 필요한 생명자원을 제공하며, 특히 생태계 탐사를 통해 신 생명자원 선점 필요
- 미답지 해양탐사를 통한 글로벌 해양과학 및 탐사 리더로서의 국가 이미지 제고 필요
- 해양탐사 분야에서의 인력 양성 및 미래 연구 개발의 지원으로 경제력 확보

3. 기술개발 목표

- 해저 화산의 지질학적/생물학적 재해범위 파악
- 화산 재해 지역 생태계 복원 과정 연구
- 해양환경(열수, 해저산, 극저생산대) 생물다양성 분석 및 생명자원 확보
- 화산활동 과거 기록 복원
- 섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인 규명
- 복합지구조 해양지각 유용금속 거동특성 규명
- 남서태평양 도서국 및 해양선진국 협력 네트워크 구축

4. 기술로드맵

1) 총괄 기술로드맵



2) 요소기술 로드맵

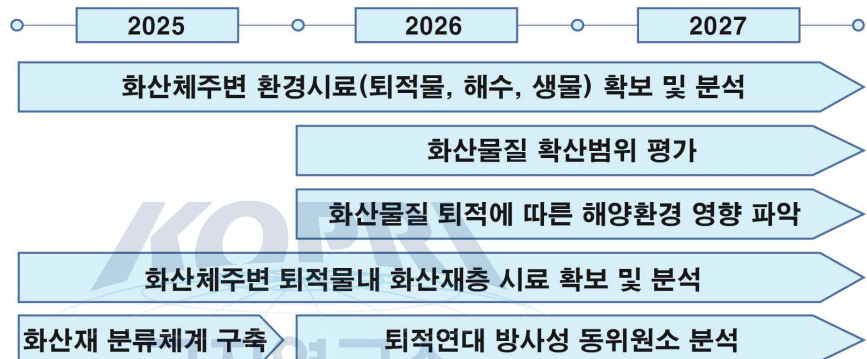
<해저 화산폭발 지질학적/화학적 재해범위 평가 및 화산활동 기록 기술>

해저 화산폭발에 의한 화산물질의 확산범위 및 수층 영향을 평가하고 과거 화산폭발의 역사복원

- 정의 :

- 화산물질 확산 범위 산정 및 영향평가 기술
- 과거 화산 분출 역사 복원 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 흥가-통가 화산 물질 확산도 작성
- 생통가 해역 화산활동 역사 복원

- 최종제품

- 화산물질 확산도
- 통가해역 화산 분출 역사

- 활용방안

- 화산물질 영향 범위 및 피해범위 산정을 통한 재해 대비책 마련
- 과거 화산 분출 빈도 파악을 통해 예측시스템 구축에 활용

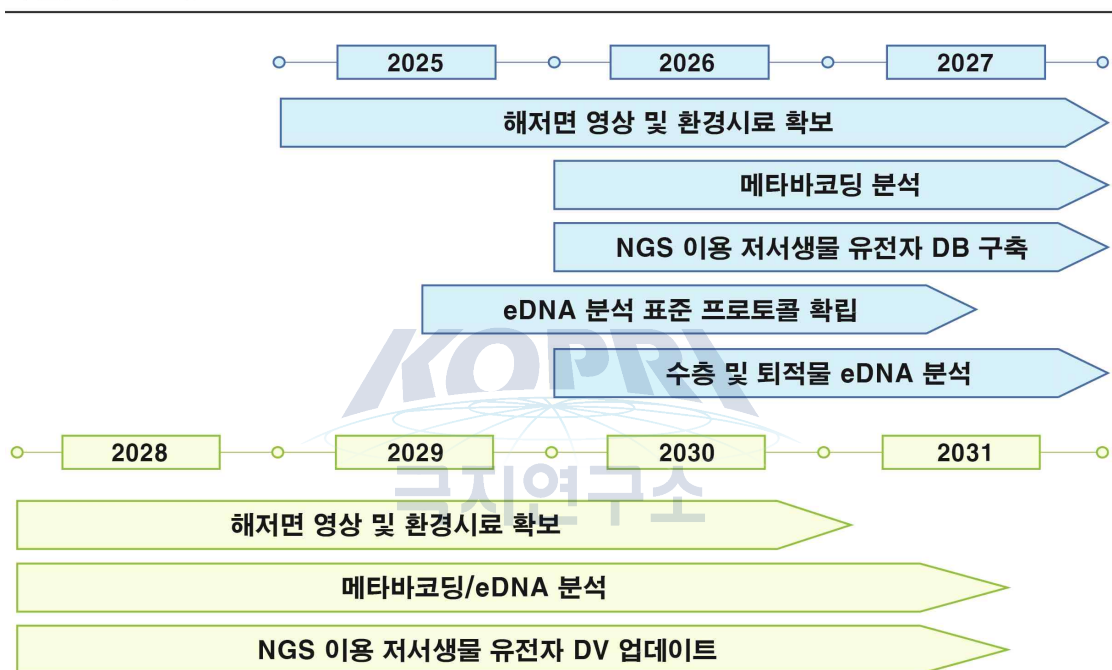
<해저 화산폭발 기인 생태계 교란 및 복원 과정 모니터링 기술>

해저 화산폭발에 의한 생태계 영향평가 및 복원과정을 이해하여 해양생태계 관리 방안 제시

- 정의 :

- 자연재해로 인한 해양환경 영향평가 기술
- eDNA/영상자료 기반 생물군집 구조 변화 파악 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 저서생물 유전자 DB 구축
- eDNA 및 영상자료 기반 저서생물군집 시공간 분포도 작성

- 최종제품

- 심해 저서생물 유전자 데이터베이스
- eDNA/영상자료 기반 저서생물 군집 시공간 분포도

- 활용방안

- 생태계 복원과정 이해를 통한 해양생태계 관리기술 개발에 활용
- eDNA 기반 표준화된 빅데이터 구축으로 효율적인 해양생태계 관리 및

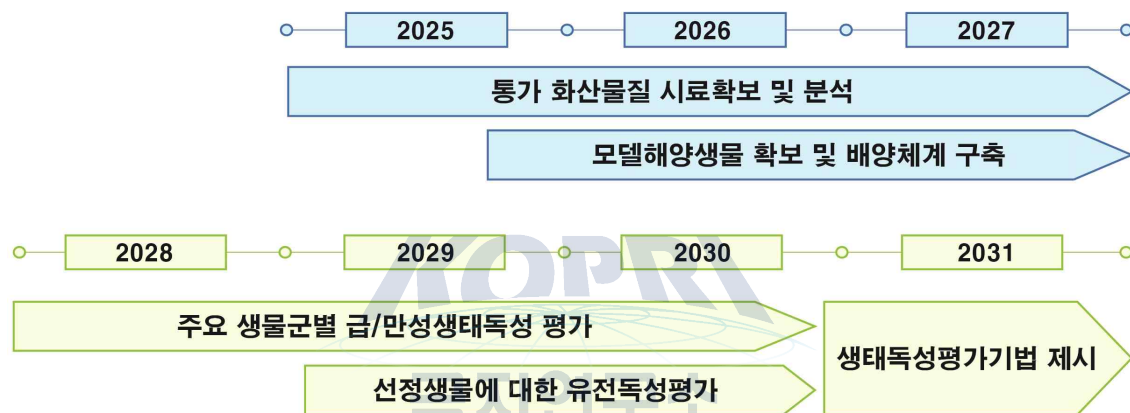
복원 기초자료로 활용
<해양생물에 대한 화산물질의 생태독성평가 기술>

주요 해양생물에 대한 홍가-통가 화산물질의 영향평가를 통해 화산물질의 생태독성평가기법 제시

－ 정의：

- 화산물질 독성평가용 모델해양생물확보 및 배양체계구축
- 주요 분류군에 해당하는 해양생물에 대한 화산물질의 생태독성평가

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 주요 분류군별 해양생물에 대한 급/만성독성평가
- 선정 생물에 대한 유전독성평가
- 통가 화산물질의 생태독성평가기법 제시

－ 최종제품

- 화산물질 독성평가용 모델해양생물 배양기법
- 통가 화산물질의 생태독성평가기법

－ 활용방안

- 기타독성물질의 독성평가를 위한 모델해양생물 활용
- 화산물질의 생물영향범위 예측

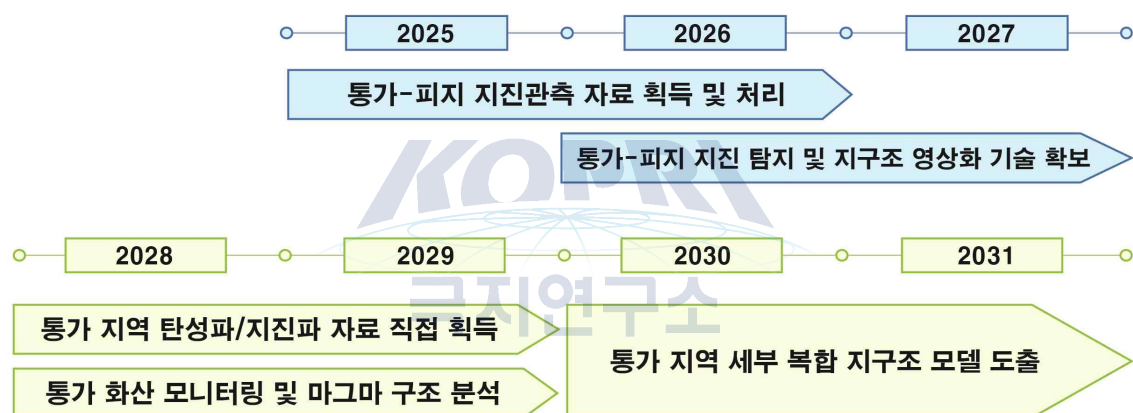
<탄성파/지진파/중자력 자료 활용 지구조 해석기술>

통가-피지 하부 맨틀·지각·화산체 지진파 탐지, 탄성파 자료 및 중자력 자료 시각화를 통한 화산활동 모니터링 및 복합지구조 마그마 성인·진화 모델 제시

- 정의 :

- 홍가통가 및 주변 화산 지진 탐지 및 화산활동 모니터링
- 홍가통가 및 주변 화산 하부 마그마 구조 영상화 및 마그마 진화 연구
- 통가 지역의 심부 지구조(지각 및 맨틀) 영상화를 통한 복합지구조 모델 도출 및 마그마 기원 연구

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 해양 화산 지진 탐지 기반 화산활동 모니터링 기술 개발
- 해양 화산 마그마 구조 영상화 기술 개발
- 통가 지역 심부 지구조 영상화 및 복합지구조 모델 도출

- 최종제품

- 홍가통가 및 주변 화산 발생 지진 및 화산활동 카탈로그
- 홍가통가 및 주변 화산 하부 마그마 구조 영상 및 진화사
- 통가 전 지역 심부(지각 및 맨틀) 구조 및 복합지구조 모델
- 통가 지역 마그마 성인 및 진화에 대한 해석

– 활용방안

- 해양 화산섬 지진 및 화산활동 모니터링 기술 제공
- 해양 및 배호분지 화산 생성 과정 및 원인 규명
- 해양 및 배호분지 화산 생성과 관련된 복합지구조 이해
- 마그마 작용과 관련된 해양 자원 생성 과정에 대한 근본적 이해를 바탕으로 자원 탐사 후보지역을 효과적으로 선별



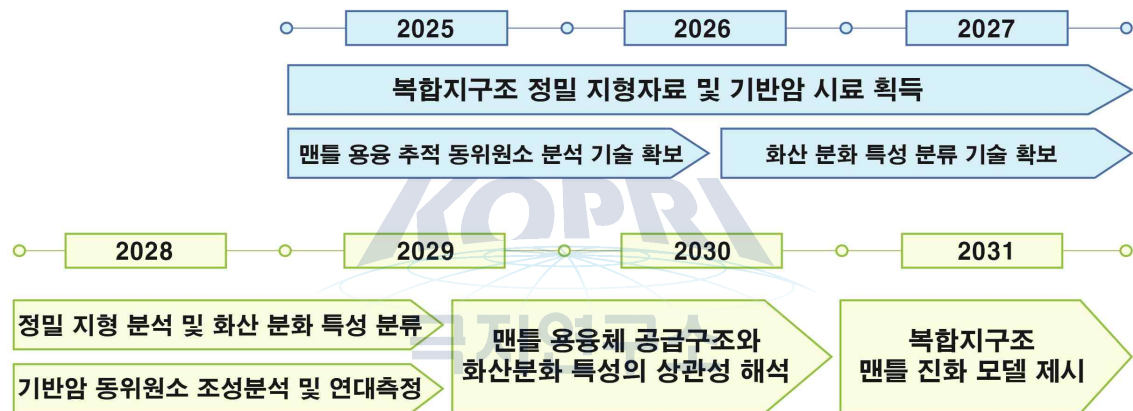
<섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인 해석 기술>

마그마 형성 기원인 맨틀 용융체의 공급구조와 화산 분화 특성의 상관성을 이해하여 섭입대 화산활동의 성인 및 지구조 진화모델 제시

- 정의 :

- 화산암의 기원 맨틀 추적 기술 및 화산분화 성인별 지화학/지형 지표 분류 기술 개발
- 섭입대 지구조별 맨틀 용융체 형성기작 및 공급구조 연구
- 지구조별 화산활동의 성인 및 지구조 진화 모델 제시

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 섭입대 화산체 정밀 분포 형태 및 분화 특성 분류
- 화산 형성 기원 맨틀 조성 및 용융/공급구조 파악
- 맨틀 용융체 공급구조와 화산 분화 특성의 상관성 이해
- 남서태평양 복합지구조 맨틀의 진화 모델 제시

- 최종제품

- 화산체 분화 특성별 분류 분포도
- 섭입대 기원맨틀 조성 및 구조 모델도
- 섭입대 화산활동 성인별 분류도
- 남서태평양 복합 지구조 세부 진화모델도
- 활용방안

- 섭입대 화산활동의 지역 변동성 예측
- 신규 판내부 화산활동 성인 규명
- 섭입대 화산활동의 성인별 분화 규모 및 지속성 판별
- 지구조 진화 단계별 화산 활동 특성 예측



<복합지구조 해양지각 유용금속 거동 특성 규명 기술>

마그마 특성에 따른 광물/지구화학적 상관성을 이해하여 해양지각 내 유용금속 순환 모델 제시

- 정의 :

- 지구조별 기반암/광체 시료의 광물 및 지화학 조성 분석기법 개발
- 복합지구조 마그마 특성에 따른 유용금속 거동 및 부존 특성 연구
- 해양지각 내 유용금속 순환 이해

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 주요광물/핵심금속 미세분석 기법 개발
- 주요금속 부존형태 확인 및 침전/치환 메커니즘 이해
- 기반암/광체 상관성 규명을 통한 유용금속 거동 특성 파악
- 복합지구조 마그마 특성에 따른 유용금속 농집 과정 해석 및 해양지각 순환 모델 제시

- 최종제품

- 기반암 주요 구성광물별 금속원소 분포도
- 황화물 미세분석 표준화 메뉴얼
- 지구조별 황화물의 핵심금속 특성 분류도
- 마그마 특성에 따른 해양지각 내 유용금속 순환 모델도

- 활용방안

- 마그마 분화에 따른 금속원소 거동 해석
- 황화물 내 핵심금속 부존형태 판별
- 해양지각 유용금속 순환 해석
- 자원형성 잠재력 높은 지구조 선별



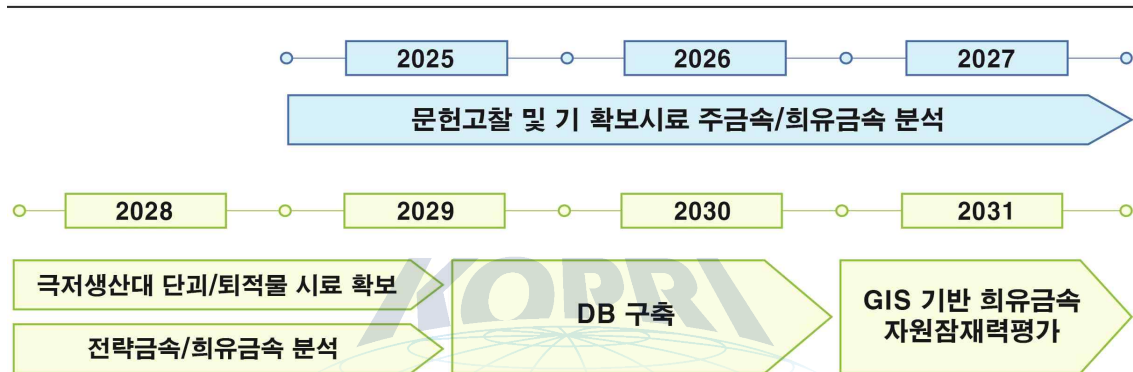
<해저 퇴적물 희유금속 탐사 및 자원잠재력 평가기술>

남서태평양 극저생산대 심해 퇴적물 주상시료 및 표층 망간단괴 시료 확보와 지화학 분석을 통한 희유금속의 자원잠재력 평가

- 정의 :

- 극저생산대 표층퇴적물/망간단괴 및 해저퇴적물 확보 기술
- 지질시료의 주원소 및 미량원소 분석기술
- 희유금속 및 전략금속 함량 DB구축 및 GIS 기반 자원잠재력 평가

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 극저생산대 분포 단괴/퇴적물 전략금속/희유금속 함량 DB 구축
- GIS 기반 희유금속 자원잠재력 평가

- 최종제품

- 극저생산대 전략금속/희유금속 DB
- 극저생산대 GIS 기반 전략금속/희유금속 자원분포도

- 활용방안

- 전략금속/희유금속 고품위 분포지역 선별을 통한 공급원 확보
- 탐사 및 개발권 확보를 위한 기초 자료로 활용

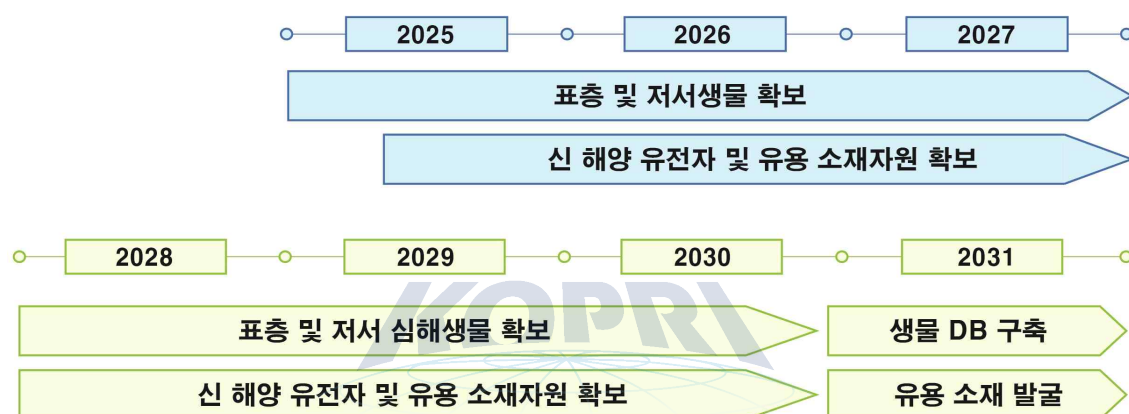
<생물다양성 해석 및 생명자원 확보 기술>

복합지구조 생물의 다양성 조사와 생명자원 확보를 통한 DB 구축 및 유용 생물소재의 발굴

- 정의 :

- 복합지구조 생물확보를 통한 DB구축 및 생물다양성 이해
- 신 해양 유전자 자원 및 유용 신물질/미생물 발굴

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 복합지구조 표층 및 저서생물 다양성 DB 구축
- 저서 진핵생물 환경 특이적 유전자 분석 및 특허등록
- 저서 미생물 메타게놈 분석 및 유용 미생물 발굴
- 유용 신물질 후보 소재 탐색

- 최종제품

- 복합지구조 생물다양성 DB
- 저서 진핵생물 환경 특이적 유전자 정보 및 유용 신물질 후보 소재
- 저서 미생물 메타게놈 정보 및 유용 미생물

- 활용방안

- 복합지구조 심해 중 다양성 정보확보로 BBNJ 대응 및 국가 경쟁력 강화
- 저서 진핵생물 환경 특이적 유전자 분석 및 신물질 후보소재 발굴을 통해 해양바이오산업에 활용

제 4 장

사업추진의 타당성 분석

제 1 절 정책적 타당성

□ 정책성 평가

○ 국가 상위 계획과 부합성

- 신정부 과기 공약사항 중 “바이오 헬스, 탄소중립, AI·로봇 등 5대 메가테크 육성으로 과학기술 5대 강국 돌입”에 해당
 - 심해 극한환경 적응 생명자원 확보를 통한 바이오 헬스 토대 구축
- 윤석열정부 12대 국가전략기술에 부합
 - 50개 세부중점기술중 “해양자원탐사”에 부합
- 2023년 5월 한-태평양도서국 정상회의 - 대한민국은 태평양도서국의 실질적 수요와 의사에 호응하여 한·태평양도서포럼(PIF) 협력기금 규모를 획기적으로 증액하고 공공보건, 해양자원 보호, 해저자원 개발, 해양환경 보존 등을 지원하기 위해 공적개발원조(ODA) 규모를 대략 2배로 늘리는 등 상생의 협력을 확대해 나갈 것을 합의
- 한국국제협력단(KOICA)는 2023년 8월 개최된 PIF 경제장관회의에서 통가의 자연재해와 재난, 경제사회 인프라, 경제발전 등의 현안문제를 해결할 수 있는 양국의 개발협력방안을 모색하기로 결정
- 과학기술정보통신부는 국가전략기술 우주항공·해양 임무중심 전략로드맵(‘23.12)에서 회토류를 포함한 전략광물자원의 확보와 해양자원 탐사기술 고도화를 전략과제로 선정
- 2022년 해양수산과학기술 육성 시행계획의 [과제2-1] 국민체감형 사회문제 해결 기술 개발 중 “미래해양 자원 발굴 및 개발추진”에 해당
- 유전자원 접근에 대한 국제규제 강화에 체계적으로 대응하고 생명자원 주권 강화를 위해 수립된 ‘제1차 해양수산생명자원 관리기본계획(2019-2023)’은 해양수산생명자원의 확보·관리 및 이용 등에 관한 범위를 포함하고 있으며 본 과제의 공해상 저서생물 다양성 연구는 전략별 추진 과제 중, ‘전략적 자원 확보 체계 마련’, ‘활용과 연계한 자원관리역량 제고’, ‘자원 이용가치 제고 및 업계 지원기반 마련’ 등에 해당
- 정부의 제5차 과학기술기본계획(‘23-’27)에서 과학기술혁신 전략 2의 혁신

주체의 역량 제고 및 개방형 생태계 조성 분야 “과학기술 외교·협력 리더쉽 확보” 및 문제해결 전략 3의 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응 분야 “우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대”의 추진 방향과 연계성이 높음

표 4-1. 제5차 과학기술기본계획(‘23-’27) 3대 추진전략 및 실행전략

3대 추진전략	실행전략
1. 질적 성장을 위한 과학기술체계 고도화	• 임무중심 문제해결을 위한 R&D 전략성 강화 • 자율과 창의력을 높이는 연구환경 개선 • R&D 성과창출·확산 및 활용·보호 기반 강화 • 미래 핵심인재 양성·확보 • 국민과 함께하는 과학문화 활성화
2. 혁신 주체의 역량 제고 및 개방형 생태계 조성	• 민간 주도 혁신을 통한 성장동력 확보 • 대학·공공연구기관의 혁신거점 역할 강화 • 신기술·신산업 중심의 창업 및 성장 지원 • 균형발전과 혁신성장을 이끄는 지역 혁신체계 구축 • 과학기술 외교·협력 리더쉽 확보
3. 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응	• 탄소중립 선도 및 지속가능한 환경으로 전환 • 디지털 전환기 선도적 대응을 통한 경제 재도약 • 100세 시대 과학기술 기반 국민건강 증진 • 미래위험 대응 및 안전사회 구현 • 글로벌 공급망 재편 대응 및 선점 • 과학기술 강군 육성 및 사이버 주권 수호 • 우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대

- 해양수산부 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획(‘23-’27)
- 전략 2: 파도를 넘는 위기대응 미래 R&D 분야 ‘선재기술로 재난을 극복하는 K-Ocean’에 부합
- 전략 2: 파도를 넘는 위기대응 미래 R&D 분야 “해양·극지 개척으로 해양 과학영토 확대” 중 1) “탐사기술로 앞당기는 극한지 개척” 및 2) “극한지역 자원 공개활용 촉진”에 부합
- 전략 4:해양강국 R&D 생태계 조성 분야 “국제협력형 연구개발 체계 구축”에 밀접하게 부합
- 10대 국가 해양수산 전략기술 플래그십 연계, “첨단해양바이오” 및 “K-OceanWatch”와 부합

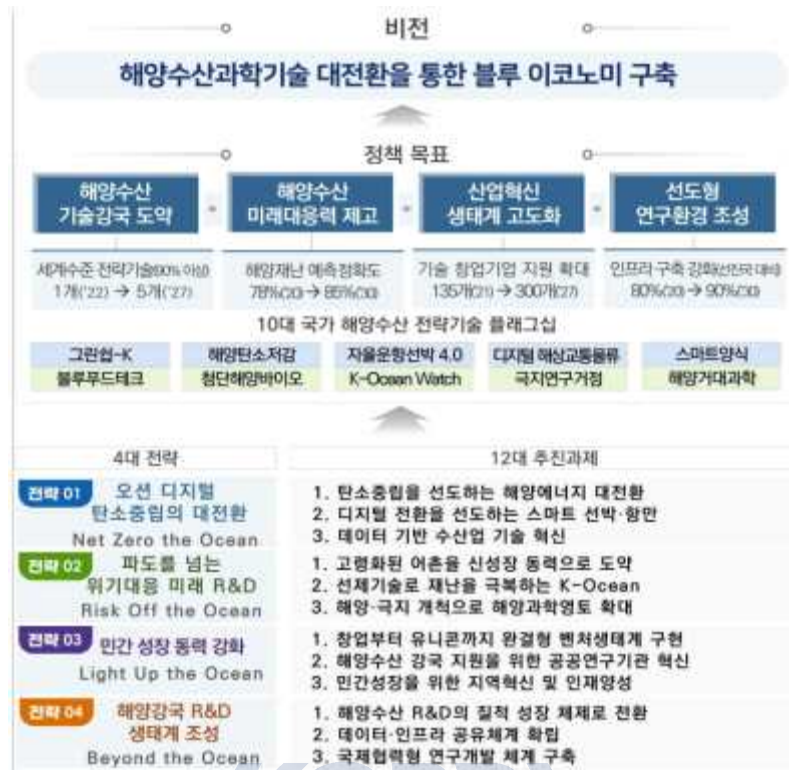


그림 4-1. 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획('23-'27) 비전 및 전략

- 연구선 산·학·연 공동활용 활성화 중장기 발전계획('17)
 - 한국해양과학기술원이 보유하고 있는 연구조사선(이사부호, 온누리호, 이어도호, 아라온호)를 활용한 대양연구 활성화 및 선진국 수준의 연구성과 도출을 위한 중장기 발전계획 수립(17.04)
 - 주요 전략으로 해양기후변화 예측 및 대응역량 강화 기반 마련, 미래 해양자원 확보 및 신산업 창출, 국제협력 및 산·학·연 공동활용 제시
 - 동 계획은 전지구 해양 탐사·개발을 통한 해양강국을 실현을 위해 탐사·개발 역량 확보, 해양경제영토확대와 해양신산업 창출 기반 확보 등을 목표로 4대 전략과 9개 세부 추진과제로 구성
 - 기후변화 분야에서는 태평양 및 인도양에 대한 탐사·관측으로 기상현상, 기변화에 대한 대응능력 강화를 목적으로 한 적도 태평양 탐사, 인도양-태평양 변동성 상호작용과 한반도 주변 기후변화 예측을 위한 서태평양 탐사 등 세부과제를 제시
 - 해양자원분야에서는 산업적으로 가치가 있는 해양생명자원 및 해저광물자

원발굴 등을 통한 전략 금속자원 확보 및 활용과 글로벌 생물유전자원 확보 경쟁과 BBNJ 발효 대비를 목적으로 한 세부과제를 제시

- 지원리구명분야는 지구-해양시스템 거동원리에 대한 이해를 높이고, 국가해양력 제고를 목적으로 태평양 지각형성과 변화과정탐사, 지각과 해양의 물질교환 및 지구 진화과정 연구 등 세부과제를 제시

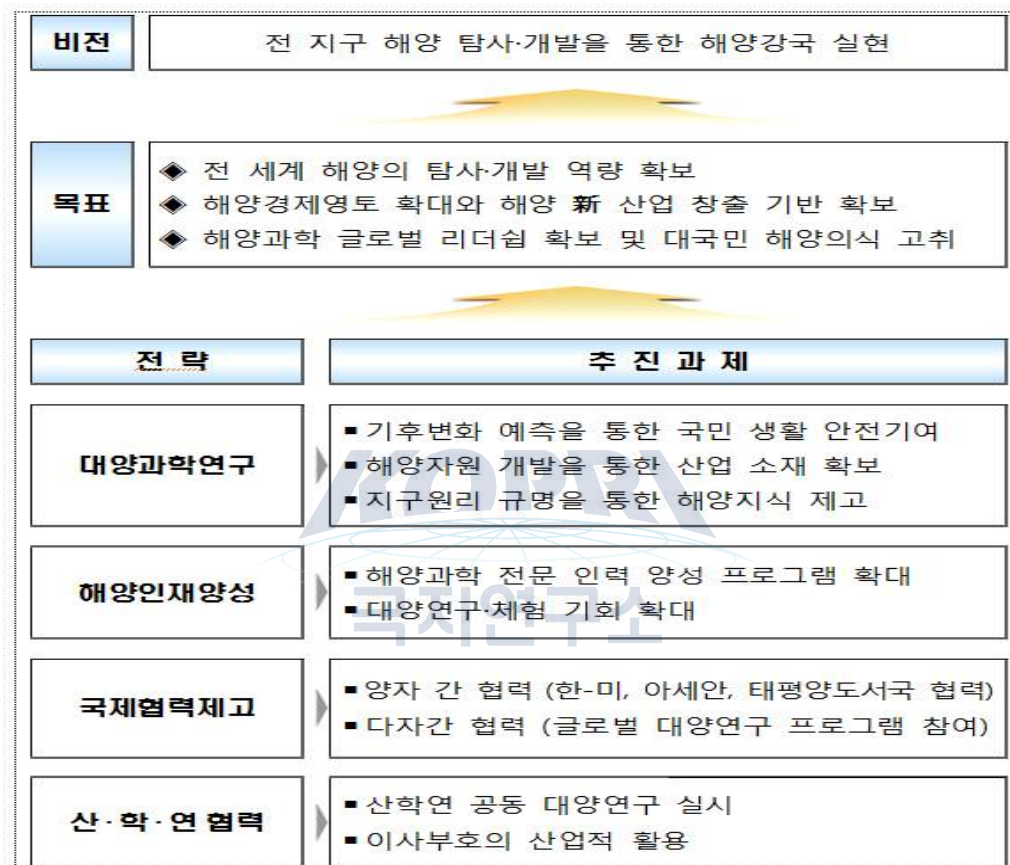


그림 4-2. 연구선 산·학·연 공동활용 활성화 중장기 발전계획 전략 및 중점 추진과제

- 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성
 - “해양과학기술의 창의적 원천기초연구, 응용 및 실용화 연구”라는 해양과기원 임무에 부합
 - 경영목표 중 “해양 신산업 발굴, 육성 및 산업화 기반기술 개발”과 부합
 - 해양과기원 ‘23~’28 연구사업계획서 전략목표 2 “해양전략자원개발” 중 성과목표 2-3 “대양·극한지 탐사 및 물질/생물 신자원 발굴”에 해당

□ 국가차원의 연구개발 필요성

- 미개척 복합지구조 해역 탐사는 자연재해 예측 시스템 구축 및 신 해양 자원 발굴이라는 국제 현안 해결형 연구사업으로서 해양과학기술의 사회·경제·국가적 책임, 수요 대응 등을 위해 국가차원의 연구개발 필요

제 2 절 기술적 타당성

□ 비전 및 목표설정의 우수성

- 본 기획연구에서 “해양과학기술 기반 자연재해 예측 시스템 구축 및 신 해양자원 발굴”을 목표로 도출된 주요 사업 범위는 현재 국가 역량이 집중되는 국제 현안들에 대해 해결책 제시 및 대응 방안 마련을 위한 필수 자료를 제공할 수 있음
- 심해탐사장비의 발달로 현재까지(1760~2023년) 발견된 심해생물은 393목, 2,377과, 9,255속 (WoRDSS, www.marinespecies.org)으로 계속 증가추세에 있으며 400,000종이 넘을 것으로 예상되고 있음. 또한 BBNJ 국제해양법 이행협정 대응을 위한 심해생물의 확보와 관리가 요구되며 이에 따라 심해생물 DB구축은 필수적임. 최근에는 특정 심해생물로부터 신기능 유전자 및 유용소재를 발굴/활용하기 위한 연구가 선진국에서 시도되고 일부 연구결과가 보고되고 있어 이 분야 연구를 선도할 수 있는 기회임
- 화산 활동 이후 생태계의 회복은 화산 지역의 미생물 활동을 조사하고 해석함으로써 환경영향을 평가하고 생태계 복원에 기여
- 빈영양/난배양성 미생물 연구는 도전적 과제로 새로운 과학적 지식 창출에 크게 기여

□ 연구개발 성공 가능성

- 해양과학기술원 주도의 기존 해저광물자원 개발사업과의 연계를 통한 시료 확보, 자료/노하우 공유 및 아라온호 활용에 따른 비용 효율적 탐사로 연구 성공 가능성을 높일 수 있음
- 해양과학기술원은 탐사 기술과 연구 노하우를 보유하고 있으며, 이를 통해 남서태평양 다양한 해양환경에서의 성공적인 탐사가 가능할 것으로

판단됨

- 홍가-통가 화산폭발은 현대적 관측이래 최대 규모로 국제적으로 학술적 관심이 높으며, 아라온호 활용을 기반으로 대한민국이 주도하는 국제연구 체계 구축이 가능함
- 해저화산폭발 자연재해 연구는 지금까지 체계적으로 수행된 바 없는 도전적 과제인 동시에 시급성이 요구되는 연구 주제로 선제적 탐사활동 수행과 국제공동협력체계 구축의 시너지 효과 창출이 연구 목표 달성을 위해 중요함

제 3 절 경제적 타당성

□ 경제성 분석 목적 및 내용

○ 분석 목적

- 사업 환경 분석을 통한 연구기획사업의 정책적 타당성 분석과 예비타당성조사 가이드라인에 근거한 객관적 타당성 평가 분석을 통해 기획과제 기초자료 활용

○ 분석 기관

- (주)해랑기술정책연구소 용역 분석 ('21년 자료 사용)

○ 분석 내용

- 기획연구의 목적 및 연구방향 관련 기초 정량자료 확보
- 관련 연구동향을 반영한 기초 정량자료 확보
- 기획연구의 기술적 타당성 검토 및 경제성 분석
- 예비타당성조사 적용 일반지침 및 가이드라인 분석을 통한 경제적 타당성 검토
- 사업 타당성 확보를 위한 합리적 경제성 분석 수행

□ 부가가치 창출 편익 개요

- 편익항목은 연구개발사업의 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 식별 가능한 편익 도출
- 기획보고서에는 기대효과로 신자원 추적기술개발, 신유전자원 선점, 생명

자원 확보, 자연재해 예측기반 확보 등을 제시

- 이들 기대효과 중 신자원 추적기술개발, 신유전자원 선점, 생명자원 확보의 경우 대상이 불분명하여 편익으로 식별하기에는 어려움이 존재
 - 기초 연구개발사업으로서 계량적 가능성을 고려하기 어려운 것이 현실, 다만 추후 민감도 분석 등에서 추가적 경제적 가치에 대해 후술할 예정
- 반면, 자연재해 예측기반 확보의 경우, 이와 관련된 여러 가지 피해금액이 집계되어 있어 이를 활용하여 자연재해 예측기반 기술 확보를 통해 해양자연재해에 대한 피해비용을 일정정도 절감할 수 있을 것으로 기대
- 따라서 본 연구에서는 정량화 가능성, 보수적 관점등을 적용하여, 편익항목으로 해양기후재난피해 저감 편익을 산정할 수 있음

□ 경제성 및 민감도 분석 결과

가. 경제성 분석 결과

- 비용편익분석 결과, 편익-비용 비율은 1.02으로서 본 연구개발 사업은 경제적으로 타당한 것으로 분석
- 본 연구개발사업의 내부수익율은 6.1%로서 통상적인 은행이자율을 상회하는 수치이며, 적용할인율보다 높은 값을 시현하고 있으며, 순현재가치는 410백만원으로 분석

표 4-2. 경제성 분석결과 요약

구 분	분석 결과
총편익의 현재가치 (백만원)	18,500
총비용의 현재가치 (백만원)	18,090
순현재가치 (백만원)	410
편익-비용 비율	1.02
내부수익률(IRR)	6.1%

- 편익-비용의 흐름을 연도별로 살펴보면, 편익의 현재가치는 18,500백만원, 비용의 현재가치는 18,090백만원인 것으로 분석

나. 민감도 분석 결과

- 민감도 분석결과, 편익 및 비용의 변화에 따라 경제적 타당성 확보 정도는 변화하는 것으로 분석되나, 편익이 감소 또는 비용이 증가할 경우를 제외하고 경제적 타당성을 확보하는 것으로 평가

표 4-3 민감도 분석 결과

구 분	변화율	비용의 현재가치 (백만원)	편익의 현재가치 (백만원)	순현재가치 (백만원)	B/C
비용의 변화	-20.0%	14,472	18,500	4,028	1.28
	-10.0%	16,281	18,500	2,219	1.14
	0.0%	18,090	18,500	410	1.02
	10.0%	19,899	18,500	-1,399	0.93
	20.0%	21,708	18,500	-3,208	0.85
편익의 변화	-20.0%	18,090	14,800	-3,290	0.82
	-10.0%	18,090	16,650	-1,440	0.92
	0.0%	18,090	18,500	410	1.02
	10.0%	18,090	20,350	2,260	1.12
	20.0%	18,090	22,200	4,110	1.23

표 4-4 비용-편익의 흐름

(단위 : 백만원)

구분	비용		편익		현재가치	
	값	현재가치	값	현재가치	값	현재가치
2023	4,500	3,943	-	-	-4,500	-3,943
2024	4,500	3,774	-	-	-4,500	-3,774
2025	4,500	3,611	-	-	-4,500	-3,611
2026	4,500	3,456	-	-	-4,500	-3,456
2027	4,500	3,307	-	-	-4,500	-3,307
2028	-	-	-	-	-	-
2029	-	-	-	-	-	-
2030	-	-	3,474	2,237	3,474	2,237
2031	-	-	3,474	2,141	3,474	2,141
2032	-	-	3,474	2,049	3,474	2,049
2033	-	-	3,474	1,961	3,474	1,961
2034	-	-	3,474	1,876	3,474	1,876
2035	-	-	3,474	1,795	3,474	1,795
2036	-	-	3,474	1,718	3,474	1,718
2037	-	-	3,474	1,644	3,474	1,644
2038	-	-	3,474	1,573	3,474	1,573
2039	-	-	3,474	1,505	3,474	1,505
합계	22,500	18,090	34,745	18,500	12,245	410

제 1 절 연구개발성과의 중요성

- 홍가(Hunga) 화산폭발은 1883년 인도네시아 Krakatoa 해저 화산폭발 이후 최대 규모로 자연재해에 피해 범위와 자연복원 과정 이해에 결정적인 자료 제공
- 접근이 어려워 연구가 미진한 지역으로 희소성과 독창성 있는 해양탐사를 토대로 명의 기원/지구조 진화 규명 등 세계수준의 과학적 성과 창출 기대
- 생명자원의 확보 및 금속자원의 분포 확인을 통해 BBNJ를 대비한 자원 선점 및 경제영토 확보 기반 마련
- 남태평양 도서국 자연재해 관련 정보 제공을 통한 영향력 제고 및 국제 사회 지지기반 확대에 기여

제 2 절 연구개발성과의 활용방안

- 화산 재해의 자연복원은 해저 자원개발에 따른 자연복원 과정 이해 및 생물다양성 보존 계획 수립에 활용
- 지구조 연구를 통한 단층 및 지하 마그마의 분포 자료 및 화산활동 역사 기록은 화산폭발 위험지역 선별 및 재난대비에 활용
- 공해상의 해양생물자원의 보호와 재산적 권리를 지정하려는 '생물다양성 협약' 및 'BBNJ 정부간 회의'등 국제협력활동 대응 및 국가 경쟁력 강화
- 공해상의 해양생물자원의 보호와 재산적 권리를 지정하려는 'BBNJ 정부간 회의'등 국제협력활동 대응 및 국가 경쟁력 강화
- 4차산업 혁명에 필수적인 희유금속 퇴적체 공급원 확보
 - 공해상 고품위 희유금속 퇴적물 자원의 유망지역 선별과 배타적 권리 확보를 위한 자료로 활용
- 빈영양/난배양성 미생물 자원확보 및 특성분석 자료
 - 해양 미생물 중 다수가 빈영양 미생물이며 공해상에서 빈영양/난배양성 미생물 배양 시도가 거의 이루어지지 않았음을 감안할 때 본 연구에서 확보되는 미생물 자원은 향후 주요한 연구자원으로 활용 가능
 - 공해상 빈영양/난배양성 미생물의 유전체 해독 자료는 해양미생물의 생태 연구, 해양의 생지화학 연구 등 다양한 관련 분야에 활용 가능
- 복합지구조 해양지각 유용금속 거동특성 규명은 마그마 분화에 따른 금속원소 거동 해석, 황화물 내 핵심금속 부존형태 판별, 해양지각 유용금속 순환 해석 및 자원형성 잠재력 높은 지구조 선별에 활용

제 3 절 연구개발성과의 기대효과

□ 기술적 측면

- 희소성과 독창성 있는 해양탐사를 토대로 생명의 기원/지구조 진화 규명 등 세계수준의 과학적 성과 창출
- 지구 규모 자연재해 예측을 위한 기초자료 제공
- 복합지구조 해석 지구조 진화 과정 이해 및 해양환경 영향 파악
- 물질/에너지 전달 시스템 규명을 통한 신자원 추적기술 개발
- 미 탐사 대양의 기초탐사 및 생명자원, 신금속자원 확보 및 지속가능한 발전을 위한 자원 활용 체계 구축
- 해양환경(열수, 해저산, 극저생산대) 생명자원 탐사기술 확보와 원천 생명자원의 발굴

□ 경제·산업적 측면

- BBNJ 대응 신유전자원 선점
 - 신약, 생촉매, 신물질, 산업소재 생산 연구에 필요한 생명자원 확보 및 제공
- 물질/에너지 전달 시스템 규명을 통한 신 금속자원 추적
- 해양과학기술 분야 연구 예산의 투자 효율성 제고
- 미 탐사 대양의 기초탐사 및 생명자원, 신금속자원 확보
- 대용량 염기서열 분석을 통한 광범위한 해양생태계 모니터링 및 관리 비용 감소
- 공해상 신생물/유전자원 발굴과 확보의 우위 선점을 통한 해양바이오 산업의 부가가치 창출에 기여

□ 사회적 측면

- 해저화산, 지진, 해양환경 급변 등 자연재해 예측기반 확보를 통한 국가 위상 및 남태평양 도서국에 국가 영향력 제고
- 남태평양 도서국 지속가능한 상생 성장모델 개발에 기여
- 해산 섭입과 지진 관련성 기반 자연재해 예측기반 확보
- 해저화산, 지진, 해양환경 급변 등 자연재해 예측기반 확보 및 남태평양 도서국 지속 가능한 상생 성장모델 개발에 기여
- 자연적/인위적 특성 변화에 따라 해양생태계를 효과적으로 관리할 수 있는 과학적 역량확보와 연구 전략 마련
- 미답지 해양탐사를 통한 글로벌 환경 리더로서의 국가 이미지 및 해양과 기원/극지연 위상 제고
- 국제적 해양생물자원 탐사 및 확보를 통한 해외 경제영토 확대, 생물자원 주권 선점, 범국민 자긍심 고취 및 대국민 홍보 교육 제고

제 6 장

과제제안요구서 (RFP)

제 1절 총괄 (전략과제 1)

사 업 명	대양극지		
과 제 명 (세부과제 1)	남서태평양 자연재해 예측 기반구축 및 신 해양자원탐사		
연구기간 (총)	7년	예산정부지원액 (총)	225억원

1. 연구의 필요성

☐ 추진의 시급성

- 홍가-통가 해저화산폭발은 관측이래 최대 규모로 세계적으로 화산폭발 영향평가를 위한 연구가 급증하고 있으며, 이 분야의 국제적 관심 증대로 해외 우수기관과 공동연구 기회 증가
- 자연재해에 따른 생태계 복원과정 이해는 전주기 모니터링이 필수적이며, 시급한 사업개시를 통해 피해규모 평가 및 초기 복원과정 모니터링 필요
- 최근 중국은 남서태평양 高緯도류 함유 퇴적체* 분포지역 선점을 목적으로 망간단괴 탐사권을 신청 예정임. 자원무기화 대상인 희토류 자원의 선점을 위해 조속한 탐사 개시 필요
- 유엔 BBNJ 협약 타결('23.06)로 생명자원 확보에 대한 국가 간 경쟁 심화와 도서국 배타적 경제수역 내 생명자원에 대한 탐사 증가가 예상됨에 따라 전략적 대응을 통한 공해상 생명·유전자원 선점 필요

☐ 국가차원의 연구개발 필요성

- 대양연구는 국가 현안이슈 대응을 위한 핵심 연구영역으로 지구환경/자원 문제를 해결하기 위한 연구 수행 필요
- 대양탐사는 해양자원, 해양과학, 해양산업 및 해양외교 등 해양개발 잠

재력을 증대시키기 위한 국가차원의 해양개발 정책과 연계, 국가 주도의 기술개발 추진 필요

- 남서태평양 복합지구조(배호분지-화산열도-해구-해산-심해분지 인접 분포) 해역은 다양한 지질요소와 환경이 분포하여 대양자원 생성과 지질/화학/생물/지구동역학적 순환기작 규명 등 과학적 가치가 높은 연구 주제를 제공하지만, 어려운 접근성, 열악한 연구 인프라 등으로 연구가 미진함.
- 남서태평양 해역은 한국-세종과학기지 이동 항로에 근접하여 아라온호 활용 시 비용·시간적 측면에서 연구과제 수행의 효율성을 제고할 수 있으며, 국제협력을 리드할 수 있는 연구 인프라 제공
- 본원/극지연의 연구 대상 지역의 갭을 극복하고 인프라 공유 및 상호 협력을 통해 연구효율성을 제고할 수 있는 연구 수행 필요
- 미개척지 해양탐사를 통한 세계 수준의 연구성과 창출 및 국제적 이슈의 주도적 해결로 글로벌 해양 과학 리더로서의 국가 위상 및 이미지 제고 필요
- 제2쇄빙선 건조 후 아라온호의 남극 연구 전용선 전환에 따라 아라온호 활용사업 도출 필요
- 화산폭발 자연재해(지구 온난화, 쓰나미, 화산재 피해, 지진 등)에 의한 인류의 생활 터전 파괴 및 인명 피해 최소화를 위해 다학제적 접근에 기반한 자연재해 예측 기반 시스템 구축이 필요하며, 이를 통한 도서국 영향력 제고 및 지지기반 확대 필요
- 안정적 국가경제 발전을 위한 해양 신 광물자원 공급원 확보 필요. 연구지역은 高희토류 함유 퇴적체 분포가 예상되는 지역으로, 희토류 자원의 무기화에 대비하여 선제적 탐사를 통한 선점 필요
 - ※ 일본은 미나미토리시마 배타적경제수역 내에서 최대 7,000ppm, 1600만톤의 희유금속 매장지 발견('27년 시험생산 예정)
 - ※ 중국은 망간단괴 탐사권 확보를 통해 북서태평양과 남서태평양의 희토류 고함유 퇴적체 선점
- 유엔 BBNJ 협약 타결('23.06)로 생명자원 확보에 대한 국가 간 경쟁이 심화되고 있으며, 공해와 도서국 배타적경제수역 내 특히 생명자원의 선점 및 활용 기술 개발을 통한 해양생명공학 산업 활성화 필요

□ 국가 상위 계획과 부합

- 윤석열정부 12대 국가전략기술에 부합
 - 50개 세부중점기술중 “해양자원탐사”에 부합
- 신정부 과기 공약사항 중 “바이오 헬스, 탄소중립, AI·로봇 등 5대 메가테크 육성으로 과학기술 5대 강국 돌입”에 해당
 - 심해 극한환경 적응 생명자원 확보를 통한 바이오 헬스 토대 구축
- 2022년 해양수산과학기술 육성 시행계획의 [과제2-1] 국민체감형 사회문제 해결 기술 개발 중 “미래해양 자원 발굴 및 개발추진”에 해당
- 정부의 제5차 과학기술기본계획(‘23-’27)에서 과학기술혁신 전략 2의 혁신 주체의 역량 제고 및 개방형 생태계 조성 분야 “과학기술 외교·협력 리더쉽 확보” 및 문제해결 전략 3의 과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응 분야 “우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대”의 추진 방향과 연계성이 높음
- 해양수산부 제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획(‘23-’27)의 전략 2의 과도를 넘는 위기대응 미래 R&D 분야 “해양·극지 개척으로 해양과학영토 확대” 및 전략 4의 해양강국 R&D 생태계 조성 분야 “국제협력형 연구개발 체계 구축”에 밀접하게 부합

2. 기술개발 및 시장동향

- 통가 해저 화산 분출 지역 현장 탐사
 - 2022년 1월 5일 통가 지역에서 홍가 화산에서 발생한 대규모 폭발에 대응하기 위하여 아라온호가 남극 탐사 활동을 마치고 한국으로 돌아오는 4월에 지질, 지구물리, 해수 특성 파악 등 현장 탐사 수행
- 화산 폭발에 의한 생태계 교란과 복원에 관한 연구 현황
 - 육상 화산 폭발에 의한 생태계 교란과 복원에 관한 연구는 비교적 많은 반면, 대형 해저 화산 폭발에 의한 해양 생태계 교란과 복원에 관한 연구 사례는 극히 제한적임
 - 가장 최근의 중요한 연구로 프랑스 연구진이 주도한 서인도양의 Reunion Island에서의 해저 화산활동(1998년부터 2007년까지의 27년간)에 의한 해양생태계 교란과 복원 과정을 산호초 군집의 생물다양성

과 구조 그리고 인구통계학 분석으로 해양생물의 천이 과정을 밝힘 (Jouval et al., 2022, Scientific Reports)

- 해저면 지진계를 활용한 통가 화산과 맨틀 용융체 공급 구조 연구
 - 지진파, 해상지자기, 탄성과 단면자료, 암석지화학 자료를 이용하여 통가 섭입대 칼데라 구조, 맨틀 용융체 및 마그마 공급구조, 후열도 분지 진화 등 해저 지구조 특성 연구가 수행됨
 - 기반암 및 퇴적물의 미량원소 및 희토류 원소 및 황동위원소 분석을 통해 유용금속 거동, 유용 금속의 광역적 분포 특성, 기반암-유체 상호작용 등의 연구가 수행됨
- 해양 생명자원 연구
 - 국가관할권 이원지역 관리에 대한 국제적 논의가 활발한 가운데 미국의 스크립스 해양연구소, 일본의 해양과학기술연구센터 등 각국의 주요 해양생물자원 중심 기관으로 연구수행
 - ※ 전세계 해양유전자원 특허 98%를 선진 10개국 이 독점 (우리나라 극히 소수 보유)
 - 미국은 국가 차원에서 IMBeR, GEOHAB 등의 거대 프로그램을 통해 해저지형과 서식지 상관성, 각 대양의 다양한 생태계 비교 분석, 기후 변화와 인간 활동이 물질순환과 생태계 구조에 미치는 영향 이해 등의 연구를 수행하고 있으며, 대양생명자원 확보와 활용 관련 연구는 민간이 주도
 - 프랑스를 중심으로 한 유럽-북미 36개국 공동연구팀은 TARA Ocean Expedition (2009-2013) 프로그램을 통해 전 지구적 해양에서 약 27,000개의 대양생물시료를 채집하여 대양성 플랑크톤의 생물 및 유전자 다양성 연구를 수행
 - 중국은 제1 해양연구소를 중심으로 한 북인도양 해저열수구 탐사를 통한 생명자원 확보 및 활용, 제3 해양연구소를 중심으로 한 태평양 해저산 생명자원 확보 연구 수행
 - 일본은 JAMSTEC을 중심으로 한 “Ziphangu in the Ocean “ 프로그램 등을 통해 신규 물질 발굴, 공생관계 및 면역체계, 생명 기능 모사 등의 연구 수행
- 해양 광물자원 연구
 - 해양 선진국들은 부족한 육상자원을 대체할 수 있는 해양광물자원 선점을 해양탐사선박, 유무인 심해잠수정, 해저로봇 등을 개발하고, 다양한 해저 지구조 지역에서 신자원 탐사에 주력
 - KIOST는 확보 퇴적물 시료의 지화학 분석 및 논문 분석을 통해 총

351점점의 희토류(ΣREY) 자료 확보(태평양 240점점, 인도양 83점점, 대서양 28점점, 신규 분석자료 태평양 74점, 인도양 18점 등 총 92점 포함)하고, 희유금속 고함유 분포 유망지역을 북서태평양과 남서태평양으로 선정

- 일본은 미나미토리시마 배타적경제수역 내에서 최대 7,000ppm, 1600만 톤의 희유금속 매장지를 발견하고, 27년 시험생산을 목표로 연구 수행
- 중국은 망간단괴 탐사권 확보를 통해 북서태평양과 남서태평양의 희토류 고함유 퇴적층 선정
- 미국 NSF내에 RIDGE 프로그램 및 SCICEX 프로그램 등으로 중양해령 및 북극해 등의 탐사와 연구를 장기적으로 수행해왔으며, 다양한 중양해령에 대한 연구프로그램 지속 수행중
- EU는 미탐사지역이 많은 남대서양 중양해령(독일), 남북극 중양해령(영국), 남서인도양 중양해령(프랑스) 연구에 장기적으로 집중

3. 연구개발 목표 및 내용

가. 최종 목표

- 남서태평양 자연재해 예측시스템 개발, 지구조 진화연구 및 신 금속자원 분포 확인 및 생명자원 확보

나. 연구내용 및 범위

☐ 통가 화산 활동 특성 이해 및 영향 평가

- 남서태평양 도서국 지구조 안정성 평가
 - 탄성파, 지진파, 중/자력 탐사
 - 정밀 해저지형/지층 탐사를 통한 폭발 전후 해저지형 변동성 확인
 - 맨틀-지각 3차원 구조 및 마그마 구조/기원 파악
 - 발생 지진 위치 분석을 통한 지구조 응력 분석
 - 화산암 분석을 통한 마그마 활동 특성 파악
 - 해저 및 지상 모니터링 구축을 통한 재해 대비 강화
- 해저 화산 폭발의 지질학적/생물학적 재해범위 파악
 - 해저화산 지진 메커니즘 분석 통한 화산폭발 과정 해석

- 신규 화산폭발(Hunga Tonga)에 의한 물질 확산범위 산정
- 해저 화산 물질별 확산범위 파악
- 화산물질 퇴적에 따른 해양환경 영향 파악
- 해양 생물에 대한 화산 물질의 영향평가
- 화산 재해 지역 생태계 복원 과정 연구
 - 재해 이후 자연적 환경 치유/완화 추적자 선정을 통한 환경모니터링
 - 재해 지역 자연복원 과정 확인 및 복원 가속화 기술
 - 해양 일차생산자 (식물플랑크톤)의 시공간 분포 특성과 변화 파악
- 화산활동 과거 기록 복원

□ 지구조 진화모델 구축

- 미탐사 해역의 해저지형 및 지진파/중자력/해저면지진계 자료 확보
 - 탄성과 자료 분석을 통한 맨틀 용융 집중지 파악
 - 무인탐사장비를 활용한 섭입판 내 신생 화산체 발견 및 분출 유형 파악
- 지진계 설치 운용
 - 진원지 심도 분석을 통한 섭입판 분포 파악 및 섭입 유형 분류
 - 대규모 화산 분화 가능성 지속 모니터링
- 섭입대 맨틀 용융체 공급구조 및 화산활동 성인 연구
 - 섭입 화산체의 분포/성인과 열도 화산 분화 규모 변화의 상관성 파악
 - 섭입대 진화에 따른 맨틀 조성의 다양성과 화산활동 변동 파악
 - 화산암 및 퇴적층의 연대측정을 통한 지구조 세부 진화모델 구축
- 복합지구조 해양지각 유용금속 거동특성 규명
 - 복합지구조 기반암 광물/지구화학 특성 파악
 - 기반암 포획 황화물 핵심금속 특성 분류
 - 열수광체/기반암 지구화학 상관성 파악

□ 복합 지구조 해역 신 해양자원 확보

- 극저생산대(남태평양 아열대순환역) 해저 퇴적물을 활용한 특이자원(희유금속) 탐색
- 극저생산대 우점 수소산화미생물 등 핵심 자가영양미생물의 배양기법 조사, 기능 이해 및 적용기법 도출

- 지구조/서식 환경별 생물다양성 연구
- 다양한 지구조 환경 분포 생명자원 확보

☐ 국내·외 협력 네트워크 및 국제 공동연구 추진

- 공동 현장조사 기획 및 참여
- 지구물리탐사(탄성파, 지진파, 중·자력 등)를 통한 지각 변동성 연구
- 복합지구조 진화모델 연구
- 열수시스템 분야 생물다양성 연구
- 서식지 보호/복원 연구

다. 연구개발 성과물 및 성과지표

핵심 기술/제품 성능지표			단 위	달성 목표	국내 최고수준	세계최고 수준 (보유국, 기업/기관명)
1	화산폭발 영향 평가 및 생태계 복원 모니터링	표층 화산물질 분포도	건	1	KIOST	미국
		통가해역 화산분출 역사복원	건	1	KOPRI	미국
		화산재 심도/유형별 분포도	건	1	KOPRI	미국
		퇴적체 연대측정	건	5	KOPRI	일본
		저서생물 군집 시공간 분포도	건	1	KIOST	미국
		생태계 복원 영향 인자 제시	건	1	KIOST	미국
2	자연재해 예측 시스템 및 지구조 진화모델 구축	지진계 설치 운용	건	3	KIOST	미국
		분화 특성별 화산체 분포도	건	1	KIOST	일본
		화산활동 성인별 분류도	건	1	KIOST	미국
		섭입-화산활동 상관성 분석	건	1	KIOST	미국
		지진 및 화산활동 카탈로그	건	1	고려대	미국
		세부 복합지구조 모델링	건	1	고려대	미국
3	신 해양자원 확보	극저생산대 희유금속 DB	건	1	KIOST	미국
		GIS 기반 자원분포도	건	1	KIOST	미국
		복합지구조 생물다양성 DB	건	1	KIOST	미국
		생물 유래 유용소재 후보물질 발굴	건	3	KIOST	독일

4. 기대효과

☐ 기술적 측면

- 희소성과 독창성 있는 해양탐사를 토대로 생명의 기원/지구조 진화 규

명 등 세계수준의 과학적 성과 창출

- 복합지구조 해역 지구조 진화 과정 이해 및 대양환경 영향 파악
- 환경유전자 기반 환경 친화형 생태계 관리 및 노동집약적 연구 방식 극복
- 희유금속 자원잠재력 평가를 통한 자원 선점 기초자료 확보
- 해양환경(열수, 해저산, 극저생산대) 생명자원 탐사기술 확보와 원천 생명자원의 발굴
- 새로운 형태의 기관 간 협력 연구체계구축으로 장기적이고 지속가능한 연구 패러다임을 제시
- 기탁등록보존기관과의 연계를 통해 미 탐사 대양에서의 생명자원 라이브리 확대 및 활용기술 개발 기반확보
- 희소성과 독창성 있는 해양탐사를 토대로 High-impact 저널 투고

□ 경제·산업적 측면

- 해양과학기술 분야 연구 예산의 투자 효율성 제고
- 지구규모 자연재해 예측을 위한 기초자료 확보
- 물질/에너지 전달 시스템 규명을 통한 신 금속자원 추적
- 복합지구조 해역 지구동역학적 연쇄반응 규명을 통한 지구진화 과정 이해 및 대양환경 영향 파악
- 미 탐사 대양의 기초탐사 및 신 금속자원 확보
- 대용량 염기서열 분석을 통한 광범위한 해양생태계 모니터링 및 관리 비용 감소
- BBNJ 대응 신유전자원 선점
 - 신약, 생촉매, 신물질, 산업소재 생산 연구에 필요한 생명자원 확보 및 제공
- 공해상 신생물/유전자원 발굴과 확보의 우위 선점을 통한 해양바이오 산업의 부가가치 창출에 기여

□ 정치적/사회적 측면

- 미답지 해양탐사를 통한 글로벌 환경 리더로서의 국가 이미지 및 해양 과기원/극지연 위상 제고
- 도서국 해양 공간관리에 필수 자료제공을 통한 국가위상 및 남태평양 도서국에 국가 영향력 제고
- 국제 규모 해양탐사 활성화를 통한 국민적 관심과 인재 유입 토대 마련
※ 중·고등학생, 교사 대상으로 대양 체험기회 제공 등으로 대양연구에 대한 국민적 관심 유발 및 홍보
- 자원무기화를 대비한 공해상 희토류 자원 공급지 확보
- 해산 섭입과 지진 관련성 기반 자연재해 예측기반 확보
- 해저화산, 지진, 해양환경 급변 등 자연재해 예측기반 확보 및 남태평양 도서국 지속 가능한 상생 성장모델 개발에 기여
- 자연적/인위적 특성 변화에 따라 해양생태계를 효과적으로 관리할 수 있는 과학적 역량확보와 연구 전략 마련
- 국제적 해양생물자원 탐사 및 확보를 통한 해외 경제영토 확대, 생물자원 주권 선점, 범국민 자긍심 고취 및 대국민 홍보 교육 제고

5. 최종 연구성과물

- 유형별 화산물질 분포도 1건
- 화산물질 독성평가용 모델해양생물 배양기법 개발 1건
- eDNA 및 영상기반 저서생물 군집 시공간 분포도 1건
- 생태계 복원 영향 인자 제시
- 화산체 분화 특성별 분류 분포도 1건
- 화산 발생 지진 및 화산활동 카탈로그 1건
- 세부 복합지구조 모델링 1건

- 화산활동 성인별 분류도 1건
- 극저생산대 희유금속 DB 1건
- GIS 기반 자원분포도 1건
- 복합지구조 생물다양성 DB 1건
- 해양생명자원 유래 유용소재 후보물질 3건
- 논문성과 - 상위 10% 5건

6. 기타사항

- 현재 한국해양과학기술원이 수행하고 있는 피지/통가 열수광상 개발사업 및 관련 국제기구 활동과의 탐사 연계 및 협력으로 비용 절감 및 시너지 효과 창출 필요
- 본-분원(극지연구소) 연구선(아라온호) 공동활용 및 공동연구 수행

7. 연차별 투자계획

- 총 연구기간 7년 ('25~'31년)

(단위 : 300억원)

'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	총예산
40	40	40	45	45	45	45	300

Reference

- Kim, M. G., Hyeong, K., & Yoo, C.M. (2022) Distribution of rare earth elements and yttrium in sediments from the Clarion-Clipperton Fracture Zone, northeastern Pacific Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2022GC010454. <https://doi.org/10.1029/2022GC010454>
- Dragone N, Whittaker K, Lord O, Burke E., et al. (2023) The Early Microbial Colonizers of a Short-Lived Volcanic Island in the Kingdom of Tonga. *American Society for Microbiology*, 14.
- Hein R. J. et al. (2015) Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions. *Ore Geology Reviews*, 68, 97-116.
- Ohta J, Yasukawa K. Nakamura K., et al. (2021) Geological features and resource potential of deep-sea mud highly enriched in rare-earth elements in the Central Pacific Basin and the Penrhyn Basin, *Ore Geology Reviews*, 139.
- Xu H, Du Y, Chen Y, Wen Q, Lin C, Zheng J, Qiu Z (2022) Electricity generation in simulated benthic microbial fuel cell with conductive polyaniline-polypyrrole composite hydrogel anode. *Renewable Energy*, 183, 242-250.
- Cohen N, Noble A, Moran D., et al. (2021) Hydrothermal trace metal release and microbial metabolism in the northeastern Lau Basin of the South Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 18, 5397-5422
- Sakellariadou F, Gonzalez F, Hein J., et al, (2022) Seabed mining and blue growth: exploring the potential of marine mineral deposits as a sustainable source of rare earth elements (MaREEs) (IUPAC Technical Report)) *Pure and Applied Chemistry*. *Pure and Applied Chemistry*, 94(3): 329-351
- Sun ki Choi, (2022) A Review on Mineralogical and Geochemical Characteristics of Seafloor Massive Sulfide Deposits in Mid-Ocean Ridge and Volcanic Arc Settings: Water-Rock Interaction and Magmatic Contribution, *Economic and Environmental Geology*, 5, 465-475,

부록

미개척 복합지구조 해역(BATS) 물질순환 및 신자원 탐사사업 경제성 분석



2021. 10.



제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

다음과 같이 “미개척 복합지구조 해역(BATS) 물질순환 및 신자원 탐사사업 경제성 분석 ” 위탁연구보고서를 제출합니다.



2021년 10월

위탁연구책임자 : 어승섭

연구위탁기관 : 해양기술정책연구소

1 정책적 타당성

(1) 국내 정책 동향

■ 100대 국정과제 (' 17)

- 문재인정부는 ‘국민의 나라 정의로운 대한민국’ 국가비전 달성을 위한 5대 국정목표, 20대 국정전략 100대 국정과제를 제시하고 정책 실효성 확보를 위한 투자 집중
- 동 사업에서 미개척 대양·심해에서의 국가 해양과학기술 역량 제고, 다양한 연구·개발을 통해 미래 국가경쟁력이 될 광물·생명 자원확보 등을 목적으로 수행
- 따라서 (국정과제 34) 고부가가치 창출 미래형 신산업 발굴·육성, (국정과제 35) 자율과 책임의 과학기술 혁신 생태계 조성, (국정과제 84) 깨끗한 바다, 풍요로운 어장 등과 연계

■ 제3차 해양수산발전 기본계획 (' 18~' 22)

- 해양수산발전 기본계획은 해양 및 해양수산자원의 합리적인 관리·보전, 개발·이용 및 해양수산업의 육성을 위한 중·장기 정책목표 및 방향 설정을 목표로 매 10년마다 수립되는 해양수산분야 최상위 기본계획
- 제 2차 해양수산발전 기본계획은 국내 해양수산업의 세계 경쟁력 유지 및 강화에 이바지하였으나, 연근해 수산자원 고갈, 선진국 대비 뒤쳐진 해양수산업 혁신동력, 해양 신산업의 부진 등 해결해야 할 문제가 존재
- ‘21년 수립된 제3차 해양수산발전 기본계획은 급변하고 불확실한 시대를 맞아 새로운 해양수산정책의 비전과 목표를 제시하고, 21세기 정책 환경변화와 새로운 경향에 능동적 대응을 위한 해양수산분야의 통합적·거시적인 정책방향 제안

- 동 계획은 안전하고 행복한 포용의 바다. 디지털과 혁신이 이끄는 성장의 바다, 세대와 세계를 아우르는 상생의 바다 등의 3대 목표, 6대 추진전략 및 18대 정책목표 제시
- 전략4 해양수산업의 질적 도약
 - 심해, 극한지 등에서 사용 가능한 첨단 해양 장비 개발, 해양자원 개발 통합체계 구축 등 해양에너지·자원개발 선진화와 첨단 해양 장비 산업 조기 상용화를 목적으로 한 세부 정책과제 수립
- 전략 6 국제협력을 선도하는 해양강국
 - 지속적인 기후변화로 인한 국제협력의 필요성 증대에 따라 국제규범 등 해양수산의제 주도, 적극적 상생협력으로 국가 위상 강화 등 “K-해양수산”으로 국제 사회 상생 견인을 주요 정책목표로 제안





[그림 1-1] 제3차 해양수산업발전기본계획 추진방향

■ 제1차 해양수산업과학기술 육성 기본계획('18~'22)

- 동 계획은 해양수산업과학기술 육성법 제5조에 따른 법정기본계획이며 해양수산물 분야 과학기술 정책의 최상위 계획으로, '제4차 과학기술기본계획'과 연계
- 과학기술을 통한 삶의 질 향상, 일자리 창출 등 공익적 가치 실현은 물론 4차 산업혁명 시대를 선도하기 위한 산업·기술간 융합을 고려하여 중점기술 개발 2개 전략과 2개 R&D 지원 전략을 제시
 - 전략 1 신산업 육성 및 좋은 일자리를 위한 해양수산업과학기술 집중 육성

- 전략산업 육성을 위한 상용화 기술 확보를 목표로 해양에너지, 해양바이오, 해양장비·로봇, 친환경 해사산업, 고부가 수산양식 등 5대 분야의 기술개발에 전략적 지원 강화를 언급
- 전략 2 사회문제 해결을 위한 해양수산기술 기반 확보
 - 해양빅데이터를 활용한 해양 예·경보시스템 정확도 제고, 기후변화 대응 및 해양생태계 보호, 해양수산과학기술의 국제협력 강화 등 국민생활 문제 해결을 위한 해양수산과학기술 혁신과 국제사회에 기여하는 해양수산과학기술 육성 과제를 제시
- 미개척 복합지구조 해역 물질순환 및 신자원 탐사로 해양자원 일자리 지원, 생명자원 연구로 혁신적 해양수산기술 기반에 기여할 것으로 기대



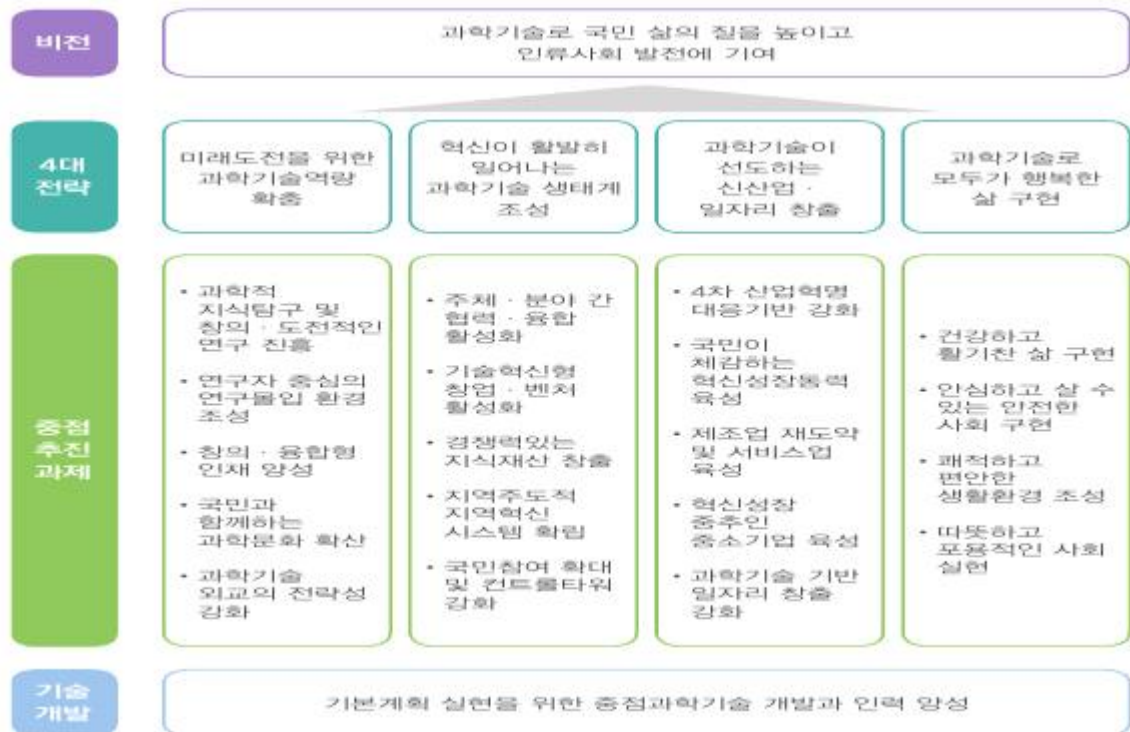
[표 1-1] 해양수산과학기술 육성 기본계획 4대전략 및 12대 추진과제

추진전략	추진과제	세부내용
신산업 육성 및 좋은 일자리를 위한 해양수산과학기술 집중 육성	4차 산업혁명 기술 융합분야 집중 육성	■ 4차 산업혁명 기술 융합 분야에 집중 육성 ■ 스마트 해양생명 핵심기술 개발 및 표준화
	전략산업 육성을 위한 상용화 기술 확보	■ 해양바이오 전략소재 개발 및 상용화 ■ 고부가가치 수산양식의 대량산업화 지원
사회문제 해결을 위한	국민생활 문제 해결을 위한 과학기술 혁신	■ 국민 관심이 높은 해양수산과학기술 집중육성 ■ 빅데이터를 활용한 예·경보시스템 정확도 제고

해양수산과학기술 기반 확보	국제 사회에 기여하는 과학기술 선도	■ 과학기술 기반의 국제협력 강화 ■ 전 인류적, 전 세계적 공유가치에 기여
정부의 연구개발 지원체계 혁신	해양수산과학기술 연구개발의 전략성 제고	■ 과학기술 육성 정책의 컨트롤타워 강화 ■ 해양수산과학기술 연구개발의 전략성 제고
	연구개발 지원 및 수행·관리 체계 개편	■ 연구자 중심의 연구몰입 환경조성 등 ■ 연구개발 지원 및 수행·관리체계 개편
해양수산과학기술 의 지속 발전을 위한 생태계 조성	민간의 연구개발 역량 강화 지원	■ 민간-정부간 역할 체계 정립 및 인프라 공유 ■ 인재양성을 통한 과학기술 역량 강화
	해양수산 기업혁신 및 창업 지원 확대	■ 기업 지원제도 내실화 및 기술기반 창업 확대 ■ 기업의 혁신성장 및 창업 환경 조성

■ 제4차 과학기술기본계획('18~'22)

- 과학기술기본계획은 과학기술기본법 제7조 및 시행령 제3조~제5조에 따른 법정기본계획이며, 우리나라의 과학기술혁신정책의 비전, 목표 방향등을 제시하는 중장기 발전전략으로 각 부처 과학기술 정책의 방향을 제시하는 최상위 계획
- 중장기적 관점에서 우리가 주목해야 할 전 세계적인 미래사회 변화 트렌드를 과학기술의 관점에서 분석하고, 2040년까지의 장기적 비전을 설정하고 과학기술이 지향해야 할 바람직한 미래사회의 모습을 구체적인 목표로 제시
 - (과제 5) ‘과학기술 외교의 전략성 강화’에서는 22년까지 전략분야 국제 과학기술 공동연구 협력강화, 과학기술을 통한 국가외교 지원 및 글로벌 시장 진출 과제를 통해 국가 위상에 부합하는 국제 리더십 확보를 추진방향으로 수립
 - (과제 18) ‘쾌적하고 편안한 생활환경 조성’은 신재생 에너지 및 에너지 저장기술의 고도화 및 경제성 확보와 기후변화 예측 및 국가적 대응역량 제고, 온실가스 감축관리 및 탄소저감·자원화 기술 개발 및 상용화를 통해 기후변화 및 신기후체제 대응으로 지속가능성 확보를 언급



[그림 1-2] 제 4차 과학기술기본계획, 전략 및 중점 추진과제

■ 제1차 해양수산생명자원 관리기본계획('19~'23)

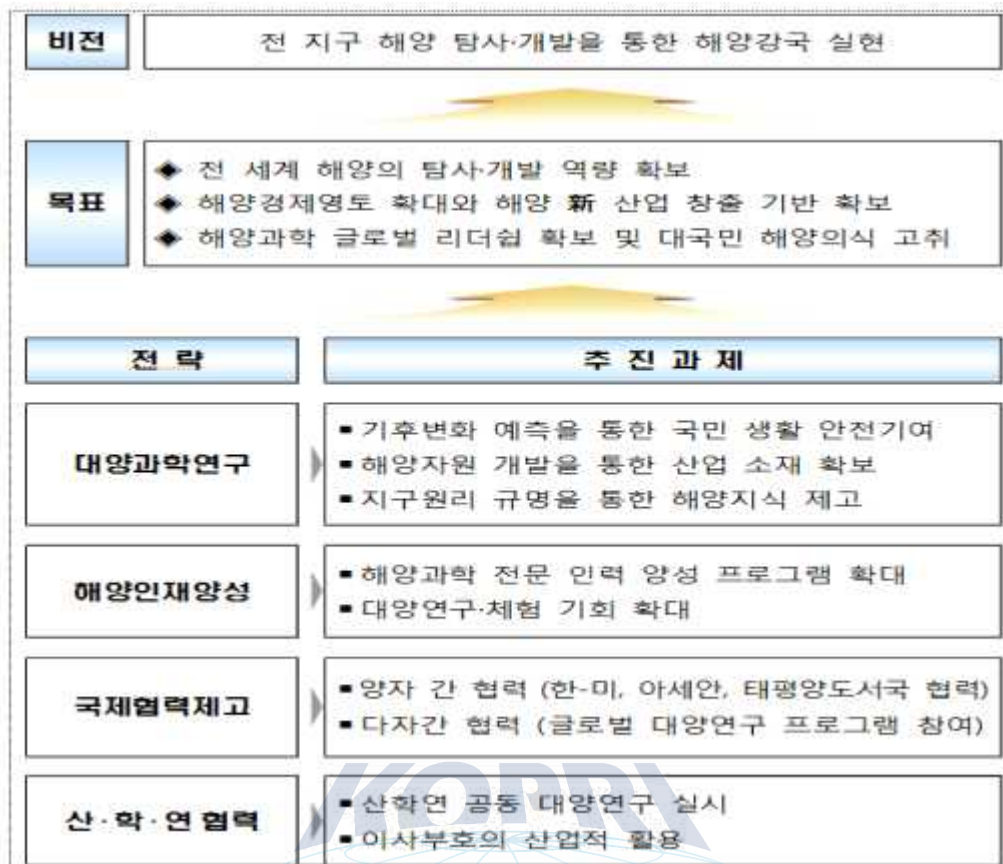
- 동 계획은 해양수산생명자원의 확보·관리 및 이용 등에 관한 법률 제8조에 따른 법정기본계획으로 해양수산생명자원의 확보·관리에 관한 시책, 연구 개발, 인프라 구축, 인력양성, 대외 홍보 등에 관한 5년 단위 추진계획을 수록
- ‘2030 해양수산생명자원 주권 강국 실현’을 비전으로 서식지 확인율, 유전 자원 정보 확대, 글로벌 시장 점유율 확대 목표 달성을 위한 4대 추진전략 12개 추진과제 제시
 - (과제 1) 전략적 자원확보 체계 마련 분야에서는 공해자원 접근에 대한 신 국 제규범 수립 전 해양수산생명자원 확보를 통해 효율적 자원확보전략 수립을 제안하고, 지속적 자원 확보를 위한 국내외 협력 네트워크 구축을 제안

[표 1-2] 해양수산생명자원 관리기본계획 4대전략 및 12대 추진과제

추진전략	추진과제	세부내용
전략적 자원 확보 체계 마련	체계적 자원조사방안 마련	■ 5개 해역별 해양수산생명자원조사 강화 ■ 과학적 분석방식 도입으로 조사 효율성 향상
	효율적 자원 확보전략 수립	■ 유용 해외자원 국내 대체자원 개발 ■ 활용성 높은 유용자원 확보에 선택과 집중
	자원 확보를 위한 국내외 협력네트워크 구축	■ 글로벌 해양생물자원 협력거점 확대 ■ 연구기관 간 협력체계 구축
	자원복원 및 유해생물 자원화	■ 유해생물 및 교란종을 자원으로 활용 ■ 국가해양생태계 종합조사와 연계방안 마련
활용과 연계한 자원관리역량 제고	활용과 연계한 등급제 마련	■ 해양생명자원등급 기준으로 효율적 자원관리 ■ 해양생명자원에 대한 국민 관심 제고
	사용자 친화형 정보제공 서비스	■ 생명자원 정보(DB) 통합적 관리체계 마련 ■ 상업적 활용을 위한 바이오 업계 지원 강화
	책임기관 자원 관리능력 제고	■ 책임기관의 자원 보존 인프라 강화 ■ 지속이용을 위한 관리강화 및 기술개발
자원 이용가치 제고 및 업계 지원기반 마련	해양바이오업계 지원을 위한 바이오뱅크 구축	■ 책임기관 및 보존기관의 기능 및 역할 재정립 ■ 소재 및 생명자원 연계 산업플랫폼 구축
	산업현장 수요에 맞는 인력 양성	■ 현장 맞춤형 연구개발(R&D) 전문인력 양성 ■ 기술변화 대응을 위한 재직자 대상 교육
	산업 기반기술 개발 및 산업생태계 조성	■ 해양바이오 원천소재의 대량배양기술 개발 ■ 상용화 중심 R&D 추진하여 산업 생태계 조성
자원 가치 및 보존 필요성 대국민 인식 제고	청소년 대상 자원 중요성 인식 프로그램	■ 교육과정과 연계한 인식 프로그램 개발 ■ 해양과학교실 및 해양자원 전시회 개최
	대국민 소통 및 참여	■ 국민들이 해양수산생명자원과 접할 기회 확대 ■ 쌍방향 해양수산생명자원 중요성 홍보

■ 연구선 산·학·연 공동활용 활성화 중장기 발전계획(' 17)

- 한국해양과학기술원이 보유하고 있는 연구조사선(이사부호, 온누리호, 이어도호, 아라온호)를 활용한 대양연구 활성화 및 선진국 수준의 연구성과 도출을 위한 중장기 발전계획 수립(17.04)
- 주요 전략으로 해양기후변화 예측 및 대응역량 강화 기반 마련, 미래 해양자원 확보 및 신산업 창출, 국제협력 및 산·학·연 공동활용 제시
- 동 계획은 전지구 해양 탐사·개발을 통한 해양강국을 실현을 위해 탐사·개발 역량 확보, 해양경제영토확대와 해양신산업 창출 기반 확보 등을 목표로 4대 전략과 9개 세부 추진과제로 구성
- 기후변화 분야에서는 태평양 및 인도양에 대한 탐사·관측으로 기상현상, 기변화에 대한 대응능력 강화를 목적으로 한 적도 태평양 탐사, 인도양-태평양 변동성 상호작용과 한반도 주변 기후변화 예측을 위한 서태평양 탐사 등 세부과제를 제시
- 해양자원분야에서는 산업적으로 가치가 있는 해양생명자원 및 해저광물자원발굴 등을 통한 전략 금속자원 확보 및 활용과 글로벌 생물유전자원 확보 경쟁과 BBNJ 발효 대비를 목적으로 한 세부과제를 제시
- 지원리규명분야는 지구-해양시스템 거동원리에 대한 이해를 높이고, 국가해양력 제고를 목적으로 태평양 지각형성과 변화과정탐사, 지각과 해양의 물질교환 및 지구 진화과정 연구 등 세부과제를 제시



[그림 1-3] 연구선 산·학·연 공동활용 활성화 중장기 발전계획 전략 및 중점 추진과제

2 경제적 타당성

(1) 사업 개요

■ 필요성

- 지구조 활동과 내부 물질의 순환은 다양한 대양자원(생물, 무생물)의 생성/진화와 자연재해를 유발함
- 복합지구조 해역의 지각 진화를 유발한 다양한 지질/지구조 프로세스에 대한 종합적인 이해와 지구물질순환(지각-심해저-대양)을 규명하여 신광물자원 및 특이 생명자원 발굴 토대 구축 필요

■ 사업 내용

- 복합지구조 환경에서 물질순환 과정 및 효과에 대한 지질/화학/생물/지구동역학적 고찰
 - 복합지구조 형성/진화 프로세스 규명
 - 복합지구조 해역 지구내부 물질 및 에너지 전달 규명 및 지구조환경 별 자원형성 모델 개발
 - 지진 연구를 통한 지구조 해석 및 자연재해 발생기작 해석
- 생태계/생명자원의 다양성 분석 및 BBNJ 대응을 위한 생명자원 확보
 - 바이오 핫스팟 탐사를 통한 지구조환경 별 생태계/생명자원 다양성 분석 및 생명자원 확보
- 복합지구조 자원 형성 모델에 의한 신자원 분포 탐사
 - 미탐사 해역의 해저지각, 지구조-광체 분포 탐사 기법 조사/분석
 - 신광물자원 및 분포 가능지 조사/분석 및 최적 탐사지역 선정(개발 유망 지역 집중조사 및 자원 분포도 작성)
 - 자원무기화를 대비한 공해상 희토류 자원 공급지 확보

■ 기대효과

- 미 탐사 대양의 기초탐사 및 생명자원, 신금속자원 확보
지속가능한 발전을 위한 자원 활용 체계 구축
- 복합지구조 해역 지구동역학적 연쇄반응 규명을 통한 지구진화 과정 이해 및 해양환경 영향 파악
- 물질/에너지 전달 시스템 규명을 통한 신자원 추적기술 개발
- 해저화산, 지진, 해양환경 급변 등 자연재해 예측기반 확보 및 남태평양 도서국 지속가능한 상생 성장모델 개발에 기여
- 지구 규모 자연재해 예측을 위한 기초자료 제공
- BBNJ 대응 신유전자원 선점
- 신약, 생촉매, 신물질, 산업소재 생산 연구에 필요한 생명자원 확보 및 제공



(2) 편익 추정 방법론

가. 경제적 가치 추정의 일반 이론

■ 경제적 가치의 정의

- 경제적 가치란 화폐단위로 계산된다는 것을 의미하며, 경제학적 개념에 근거
- 경제적 의미의 가치는 후생경제학 개념에 근거하는데, 그 기본적인 전제는 개인의 경제활동은 개인들이 자신의 후생을 증가시키고자 하는 것에 있음. 즉, 어떤 주어진 상황에 대한 각 개인의 후생 수준은 자신이 가장 잘 판단

■ 경제학적 접근 방법론의 특징

- 경제적 가치를 추정하기 위한 방법론은 크게 경제학적 접근법과 비경제학적 접근법으로 구분
- 경제학적 관점에서 본다면 분석 대상 재화나 사업의 경제적 가치를 추정하기 위해서는 경제적 경제학적 접근법을 적용하는 것이 적절하며, 경제학적 접근법의 적용이 어려운 경우에 한하여 제한적으로 편익이전 기법, 대체비용 접근법 등의 비경제학적 기법을 적용하는 것이 타당

■ 경제학적 기법 적용의 특징 및 장점

- 경제학적 접근법은 크게 현시선호 접근법과 진술선호 접근법으로 구분
- 현시선호 접근법은 경제주체의 행동으로 나타난 자료를 이용하여 관심대상 비시장재화의 가치를 간접적으로 추정하는 기법
- 진술선호 접근법은 비시장재화에 대한 선호에 대해 경제주체에게 직접 물어 보고 응답을 이끌어내어 분석함으로써 가치를 추정하는 기법
- 현시선호 접근법은 적용대상에 있어서 제약성이 크며, 이론적인 관점에서 과대추정 혹은 과소추정의 문제점을 안고 있는 상황
- 하지만 실증적인 관점에서 살펴보면 진술선호 접근법으로 구한 값이 현시선호 접근법의 적용을 통해 구한 값보다 작은 경우가 흔히 관측

- 따라서 사전적으로 어느 방법이 더 우월하다고 판단하기에는 어려움이 크나 판단해야하는 재화는 사업의 속성에 따라 적용해야 함
- 특히 경제학적 기법은 시장에서의 소비자 잉여 또는 생산자 잉여 등 거래행위 속에서 나타나는 가치를 정확히 추정하는 방법론으로서 분석 대상 재화 또는 사업의 객관적 타당성을 제시할 수 있는 장점이 존재

<표 2-1> 경제학적 접근법 구분

구 분	현시선호 평가법	진술선호 평가법
직접적 추정법	경쟁시장에서의 가격	조건부 가치측정법
간접적 추정법	헤도닉 가격기법 여행비용 평가법 회피행동 모형	선택실험법
특징	시장에서의 거래행위 관찰 사후적 평가법	가상적 시장 이용 사전적 평가법

■ 편익이전 기법 활용

- 비경제학적 기법은 적용결과를 받아들이는 데 있어서 제약성이 존재하며, 결과의 활용이란 관점에서도 제약적
- 예를 들어 연구개발사업의 경제적 가치를 추정하기 위해서는 원칙적으로 수요곡선 접근법이나 부가가치 접근법과 같은 경제학적 방법론에 근거해야 하나 경우에 따라서는 이것이 용이하지 않거나 불가능할 수 있음
- 이런 경우에는 국내외 분석사례를 참고하여 해당 상황에 맞게 조정하는 편익이전(benefit transfer) 작업을 해야 하는 상황
- 예를 들어 외국에서 측정한 편익을 구매력지수와 분석시점 등을 종합적으로 고려하여 국내 상황에 맞게 조정한 값을 이용할 수 있으나, 이러한 방법은 왜곡된 결과를 초래할 수 있으므로 적용과 해석상의 주의가 요구
- 한편 편익이전 기법 적용도 용이하지 않다면 대체비용 접근법을 이용하여 구한 값을 편익의 대용 값으로 삼는 것을 고려할 수 있음

나. 연구개발사업의 편익 추정 방법론

■ 연구개발 활동의 파급효과 분류

- 편익 추정의 단위는 개별 사업이고 평가 대상의 장단점을 합리적으로 분석하여 평가결과를 도출
 - 편익 추정은 사업 전후(before and after)가 아닌 시행 유무(with or without) 비교를 통하여 사회 후생의 차이를 분석해야 함
- 사전적으로 편익(benefit)이란 (+)의 사업효과를 의미하며 연구개발사업의 편익이란 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 것으로 기대되는 (+)의 결과물을 의미
- 미시경제학적으로 연구개발사업의 편익은 추가적으로 발생하는 소비자 잉여의 증가분 또는 생산자 잉여 증가분 등으로 정의 가능
- 연구개발활동은 과학기술 지식, 민간의 수익, 파급효과 등의 관점에서 정의할 수 있는데, 이를 파급의 관점에서 다시 정의하면, 지식파급, 시장파급, 네트워크 파급 등으로 구분 가능
- 지식파급은 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생, 시장파급은 시장기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것을 의미
- 네트워크 파급은 관련 기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 하는 것을 의미하는데, 타당성조사에서 반영하는 효과는 지식파급과 시장파급에 한정
- 지식파급과 시장파급은 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영

<표 2-2> 연구개발 활동의 파급별 에타 반영 여부

구분	정의 및 특성	예비타당성조사 반영 여부
지식 파급 (knowledge spillovers)	○ 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생 ○ 역설계, 발간, 특허공개, 연구자 이동 등을 통해 발생 ○ 일부 계측 가능 ○ 화폐환산 불가	○ 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영
시장 파급 (Market spillovers)	○ 시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것 ○ 추가기능의 구비, 가격의 인하, 저렴한 제품 및 서비스 제공 등으로 발생 ○ 계측 가능 ○ 화폐환산 가능	○ 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 편익 분석에 반영
네트워크 파급 (Network spillovers)	○ 관련기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 함 ○ 각각 기술들의 개발 주체가 분산되어 있어서 개별 주체별로 투자를 망설임 ○ 계측 불가 ○ 화폐환산 불가	○ 경제적 타당성에서 미반영 ○ 정책적 타당성의 특수평가항목에서 반영 가능

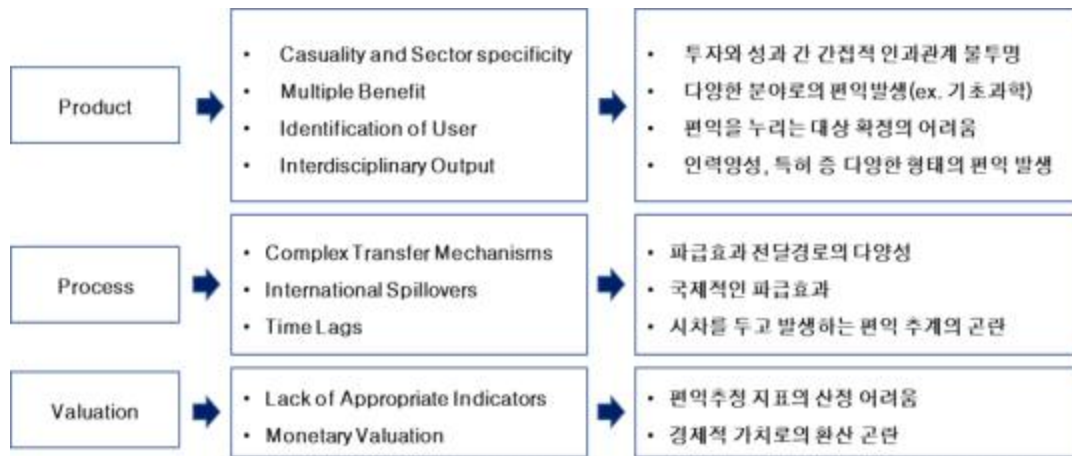
자료 : KISTEP(2018), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 수행 세부지침』

■ 연구개발 활동의 편익 추정의 장애요소

- 연구개발사업은 대표적인 비투자 재정사업이자 비정형 사업에 해당
- 이에 연구개발사업의 경제적 가치 평가는, 기술적 불확실성이 높고 가시적 효과를 정량적으로 추정하기 어려우므로, KISTEP(2018)과 OECD(2007)¹⁾은 다음과 같이 편익 추정의 어려움을 진단
 - 투자 및 성과간의 직접적 인과관계가 불투명하고 편익을 누리는 대상을 명확히 구분하고 식별하는 것이 어려움
 - 파급효과의 전달경로가 다양하고 시차를 두고 실현하는 과정도 발생

1) OECD(2007), 『Assessing the Socio-Economic Impact of Framework Programme』, OECD DSTI Report

- 편익의 화폐환산화가 어려움



[그림 2-1] 연구개발사업의 편익추정 장애요소

■ 연구개발사업의 일반적 편익 항목

- KISTEP(2018)은 연구개발부문 예비타당성조사의 일반적 편익항목을 가치창출 편익과 비용저감편익으로 대별
- 가치창출 편익은 연구개발사업의 결과로 소비자의 후생을 향상시키거나 사업의 산출물이 시장을 통해 거래됨으로서 새롭게 부가가치를 창출하는 것을 사업의 목적으로 할 때 반영 할 수 있는 편익항목
 - 가치창출 편익은 성과의 수혜 대상에 따라 소비자 중심 편익과 생산자 중심 편익으로 구분
 - (소비자 중심 편익) 소비자 중심 편익은 연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우로서 후생경제학에 근거를 둠
 - 연구개발사업의 결과로서 신규 시장 재를 창출하는 것은 아니지만 사업의 성과물이 국민에게 기존에 없는 새로운 긍정적인 효과를 주면서 그 효과를 화폐가치로 계량화할 수 있는 경우에 소비자 중심 편익을 반영할 수 있음
 - 시장가치로 계량화할 수 없는 경우에는 진술선택접근법 등을 사용할 수 있음
 - (생산자 중심 편익) 생산자 중심 편익은 연구개발사업의 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우에 반영되는 편익항목

- 사업을 통해 새롭게 개발된 산출물이 상용화되어 시장에서 거래됨으로써 발생하는 부가가치의 증가분을 바탕으로 편익을 추정하는 시장수요접근법이 대표적
- 비용저감 편익은 연구개발사업을 통해 개발된 기술을 적용함으로써 특정 분야에서 기존에 소요되던 비용이 감소하는 것과 관련
 - 예를 들어 공정기술의 개선/개량, 또는 새로운 공정기술의 개발을 통해 기존의 생산과정에 존재하는 비효율적인 부분이 제거되거나 또는 투입 요소 대체 등을 통해 생산의 효율성이 증가하여 동일한 양의 산출에 드는 비용이 기존에 비해 낮아짐으로 발생하는 생산비용저감 편익이 대표적
 - 또한 피해비용 저감 편익은 연구개발사업을 통해 개발된 기술을 적용하여 기존에 재난·재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하던 피해비용을 낮출 수 있을 경우에 반영할 수 있음
- 한편, 각 과학기술 지식의 증대 및 관련 파급효과는 가치창출 요소로 분석될 수 있으나 실제 타당성조사시에는 반영하지 않는 것으로 진단하고 있음

<표 2-3> 예비타당성조사 편익 반영 항목

구분	예비타당성조사시 편익 반영	예비타당성조사시 편익 미반영	
가치 창출 편익	○ 소비자 중심 편익 - 연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우 (후생경제학에 근거) ○ 생산자 중심 편익 - 연구개발사업의 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우 (i.e. 시장수요 접근법)	○ 과학기술 지식 (논문, 특허 등) ○ 과학기술자의 교육훈련 ○ 지역개발효과 ○ 지역산업구조 개편 ○ 생산 유발효과	○ 부가가치 유발효과 ○ 고용 유발효과 ○ 수입 유발효과 ○ 수출 유발효과 ○ 소득 분배효과 ○ 취업 유발효과

비용 저감 편익	○ 생산비용저감 - 자원비용, 공정비용, 연구장비 사용 비용, 출장비용 등 각종 생산비용의 저감 ○ 피해비용저감 편익 - 재난·재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감	
----------------	---	--

■ 연구개발사업의 편익 분석을 위한 기준선 분석 원칙

- 연구개발사업의 사업 시행 효과를 분석하기 위해서는 사업유무에 따라 각각에 대한 분석을 하여 그 차이를 비교하는데, 이를 위해 합리적인 기준선 분석이 시급
- 첫째, 사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시해야 함
- 둘째, 분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시해야 함
- 셋째, 기준선 구체화를 위한 노력 수준을 적절히 결정해야 함
- 넷째, 기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 필요가 있음
- 예를 들어, 기준선 분석은 현재 상태 및 미래에 대한 예측분석이므로 확보가 어려운 사항과 관계에 대한 가정이 필수적으로 수반되며, 타당성조사 주체는 분석에 적용된 가정의 목록을 제시하고 값들을 명시함으로써 기준선 분석결과의 재현성을 확보해야 하고 적용된 가정과 더불어 경쟁기술의 발전 추이, 해당 기술의 요소 중 불확실한 부분 등과 같이 논의를 통해 제외되는 가정도 있게 되는데 제외의 이유를 구체적으로 보고서에 명시할 필요가 있음
- 다섯째, 시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료 시점을 구체적으로 제시 할 필요가 있음
- 여섯째, 기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술해야 함

- 마지막으로, 분석 대상 사업의 경제적 타당성 분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 준용해야 함

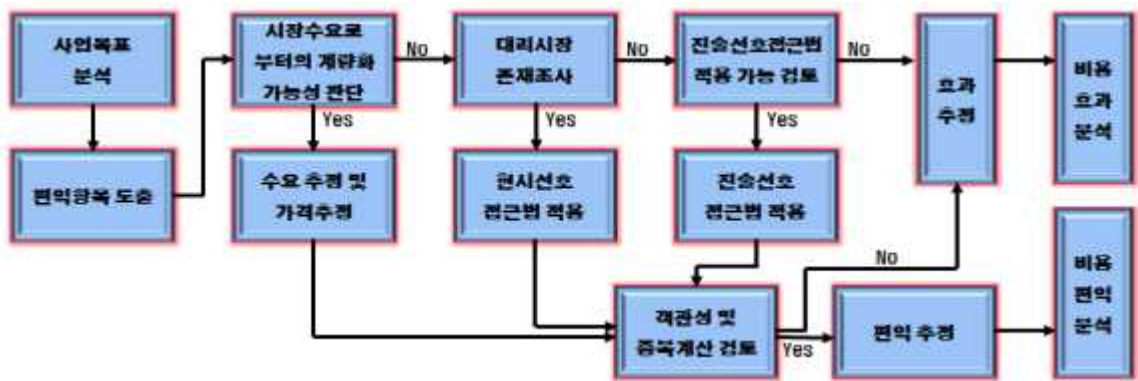
<표 2-4> 예비타당성조사 기준선 분석 준수 원칙

준수 사항	설 명
사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시할 것	사업 추진을 통해 해결되는 문제에 대한 구체화와 해결되는 정도의 정량적인 제시, 현재의 상태, 문제가 해결되는 과정에 대한 사항, 사업 추진 과정과 결과물에 의해 영향을 받는 주체들에 대한 사항을 중심으로 기술
분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시할 것	예비타당성조사 주체는 사업 시행과 미시행 경우의 비교분석을 수행해야 하므로 이 과정에서 필요한 변수들의 식별은 결과의 엄밀성 확보를 위해 필요
기준선 구체화를 위한 노력의 수준을 적절히 결정할 것	기준선에 대한 분석은 확보된 자료를 토대로 자료를 연결시키는 모형을 적용하고 이 과정에서 자료가 확보되지 않은 부분에 대한 적절한 가정 도입으로 진행됨. 즉, 자료의 수준, 모형의 수준, 가정의 수준 등이 기준선 분석 결과의 수준을 결정하게 되므로 구체화를 위한 노력의 수준을 예비타당성조사 기간과 재원의 범위 내에서 설정해야 함
기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 것	기준선 분석은 현재 상태 및 미래에 대한 예측분석이므로 확보가 어려운 사항과 관계에 대한 가정이 필수적으로 수반됨. 예비타당성조사 주체는 분석에 적용된 가정의 목록을 제시하고 값들을 명시함으로써 기준선 분석결과의 재현성을 확보해야 함. 적용된 가정과 더불어 경쟁기술의 발전 추이, 해당 기술의 요소 중 불확실한 부분 등과 같이 논의를 통해 제외되는 가정도 있게 되는데 제외의 이유를 구체적으로 보고서에 명시
시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료시점을 구체적으로 제시할 것	예비타당성조사 기준선 분석의 시점은 사업 착수 시점이며 종료시점은 경제적 타당성 분석의 기간과 동일함. 종료시점의 설정은 사업 추진을 통한 효과 발생의 지연 및 지속과 관련된 사항임
기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술할 것	불확실한 요인을 명확히 제시하고 가정에 따른 민감도 분석 결과를 제시함
분석 대상사업의 경제적 타당성분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 적용할 것	경제적 타당성 분석에서 다수의 시나리오를 비교하는 경우, 비용효과 분석에서 다수의 대안을 비교하는 경우에 있어서 기준선은 동일하게 적용해야 함

자료 : KISTEP(2018), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 수행 세부지침』

■ 연구개발사업의 경제성 분석 프로세스

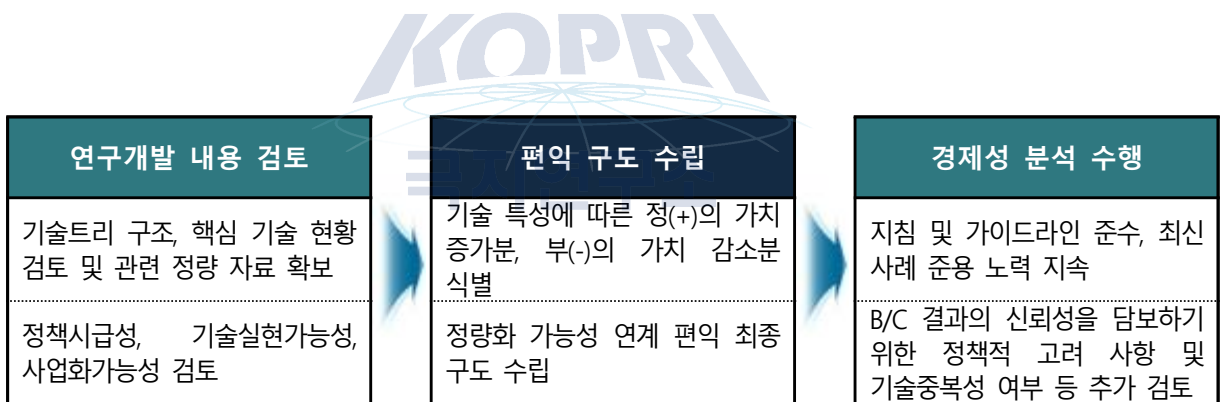
- 연구개발사업의 예비타당성조사의 편익 추정은 ‘사업 분석 → 편익항목 도출 → 자료의 가용성(可用性, availability) 확인 → 편익 추정방법의 선택 → 항목별 수요(시장) 또는 비용 도출 → 가치 계산’의 과정을 거침
- KISTEP(2018)은 경제성 분석시, 사업을 면히 분석하여 사업목표와 수혜자를 명확히 식별하고, 사업의 핵심목표 및 수혜자와 일관성을 가지면서 사업으로부터 직접적으로 얻어지는 효과를 편익항목으로 선정해야 한다고 제안
 - 연구진은 해당 편익의 추정에 사용될 자료를 최대한 확보하기 위해 노력하며, 자료의 가용성에 따라 편익 추정방법을 선택해야 함
 - 사업의 성과와 직접 관련되는 수요/시장 자료 또는 비용 자료의 확보가 어려운 경우에는, 유사(대리)시장의 존재를 확인하고 이에 대한 자료를 확보하여 편익을 추정한다고 가정, 즉, 비용 대체 접근법, 편익이전 기법 등을 추가로 제안
 - 이러한 편익 추정에 사용되는 수치들은 신뢰성이 있으며 객관적인 자료에 근거할 필요
- 연구개발사업의 경제성 분석은 시장 수요 진단 가능성, 대리시장 존재 가능성 등을 종합적으로 판단하여 비용효과분석 또는 비용편익분석으로 나누어 분석
 - 본 분석은 종합적 판단 결과, 해양바이오 관련 시장이 식별 가능하므로, 시장수요접근법이 가능하며 이를 토대로 비용편익분석을 통해 접근



[그림 2-2] 연구개발사업 경제성 분석 절차

■ 연구개발사업의 경제성 분석 절차

- 최종적으로 연구개발사업의 경제성 분석은 연구개발 내용 검토, 편익구도 수립, 경제성 분석 순으로 이루어지며 무엇보다도 사업내용의 특성 분석과 최종적인 기대효과를 명확히 식별하는 것이 중요



[그림 2-3] 경제성 분석 절차

(3) 편익 추정

■ 편익 추정의 구도

- 편익항목은 연구개발사업의 기대효과 및 활용방안을 바탕으로 식별 가능한 편익 도출
- 기획보고서에는 기대효과로 신자원 추적기술개발, 신유전자원 선점, 생명자원 확보, 자연재해 예측기반 확보 등을 제시

- 이들 기대효과 중 신자원 추적기술개발, 신유전자원 선점, 생명자원 확보의 경우 대상이 불분명하여 편익으로 식별하기에는 어려움이 존재
- 기초 연구개발사업으로서 계량적 가능성을 고려하기 어려운 것이 현실, 다만 추후 민감도 분석 등에서 추가적 경제적 가치에 대해 후술할 예정
- 반면, 자연재해 예측기반 확보의 경우, 이와 관련된 여러 가지 피해금액이 집계되어 있어 이를 활용하여 자연재해 예측기반 기술 확보를 통해 해양자연재해에 대한 피해비용을 일정정도 절감할 수 있을 것으로 기대
- 따라서 본 연구에서는 정량화 가능성, 보수적 관점등을 적용하여, 편익항목으로 해양기후재난피해 저감 편익을 산정할 수 있음

■ 해양기후재난피해 저감 편익 구도

- 해양재난피해 저감 편익은 해양재난 연평균 피해액에 피해저감 기여율, R&D 기여율 및 R&D 사업화 성공률, 사업기여율 등을 활용하여 산정

해양기후재난피해 저감 편익

= 국내 해양재난피해 연평균 피해액 × 피해저감 목표 × R&D 기여율 × R&D 사업화 성공률 × 사업기여율

■ 해양기후변화에 의한 피해규모 산정

- 행정안전부에서 발표하는 재해연보에 따르면 원인별 기상재해에는 호우, 대설, 강풍, 풍랑, 지진, 태풍, 태풍·호우, 기타 등이 있음
- 재해연보(행정안전부)에 제시된 최근 5년간 원인별 기상재해 피해액을 살펴보면 다음과 같음

<표 2-5> 최근 5년 원인별 기상재해 피해액

(단위 : 백만원)

구분	호우	대설	풍랑	강풍	태풍	강풍/ 풍랑	태풍/ 호우	지진	낙뢰	기타	합계
2015년	1,213	13,021	333	3,891	13,404	-	-	-	-	-	31,862
2016년	35,887	18,689	8,302	-	214,464	-	-	11,020	-	-	288,362
2017년	101,592	83	605	-	-	-	-	85,022	-	-	187,302
2018년	53,800	14,032	2,823	7	64,200	-	6,416	-	-	7	141,284
2019년	1,651	671	-	7	212,778	474	-	-	26	618	216,226
합계	194,143	46,496	12,063	3,905	504,846	474	6,416	96,042	26	625	865,036

- 본 분석은 재난 재해에 대한 해양과학기술적 기초 정보를 제공하고, 관련 연구에 기여한다는 점을 감안, 전체 재해 피해액을 해양기후재난에 의한 피해 규모로 산정함
- 태풍과 호우, 태풍·호우 등의 지난 5년간 연평균 피해 금액은 약 173,007백만원으로 추정

■ R&D 기여율

- 국가연구개발사업의 직접적 경제적 편익을 산정하기 위해서는 본 연구개발 사업으로 발생하는 편익 중 연구개발이 기여한 정도를 고려할 필요가 있음
- R&D 기여율은 연구개발성과의 상업화를 통해 성과가 창출되었을 때, 전체 성과 가운데 연구개발에 의한 기여분이 어느 정도인지를 나타내는 지표이며, 해당 사업의 가치를 정확히 추정하기 위해 활용
- 본 분석에서는 해양관측산업 부가가치 창출편익 추정 자료와 동일하게 2013년에 확정된 『제3차 과학기술기본계획』에 근거한 35.4%를 적용
- 참고로 본 R&D 기여율은 KISTEP이 주관하는 최근 예비타당성조사에서 동일하게 적용되고 있는 수치

■ R&D 사업화 성공률

- 연구개발사업을 통한 기술개발 성과가 시장에서의 편익 창출로 이어지기 위해서는 실증 및 상용화 과정을 거치게 되는데, 이러한 과정에서 존재하는 불확실성을 반영하기 위하여 R&D 사업화 성공률 고려
- R&D 사업화 성공률은 통상적으로 연구관리 전문기관들에서 발간하는 최신 성과보고서 또는 연구보고서의 수치를 활용하여 적용
- 그러나 본 연구개발사업은 해양기후재난 예방능력 증대 및 피해 방지라는 공공적 목적을 염두해 두고 기획된 사업임을 감안할 필요가 있음
- 이에 본 연구개발사업과 유사한 『빅데이터 기반의 해양변동 예측기술개발사업 예비타당성조사』 KISTEP(2019)의 연구결과를 준용, R&D 사업화 성공률은 44.6%로 적용

■ 사업기여율

- 사업기여율은 연구개발사업의 성과가 시장을 통해 발생하는 편익추정 시 적용하는 주요 인자
- 사업기여율 추정 시 활용되는 정부출연 연구개발비는 기존 유사·중복사업 및 과제의 연구개발비이므로 편익대상의 범위(과제/기술/제품 등)와 대응하는 범위로 유사·중복성의 분석이 이루어지는 것이 적절
- 통상적으로 사업기여율 산식은 (본 사업 투자규모/본사업 관련 분야 국가전체 투자규모+본 사업 투자규모)에 대입하여 추정
- 본 연구개발사업이 해양기후재난 피해 예방 및 방지라는 공공적 목적의 대단위 해양분야 연구개발사업임을 고려할 때 대응투자액을 정확하게 선정하기 어려움
- 참고로 『정지궤도위성개발사업 해양탐체제 분야 R&D 사업 예비타당성조사』 (KISTEP, 2011)의 경우에도 해당 편익 추정 시 사업기여율을 100%로 적용하여 추정
- 하지만, 본 분석은 유사기술개발사업인 『빅데이터 기반의 해양변동 예측기술 개발사업 예비타당성 조사』 (KISTEP, 2019)의 연구결과를 준용, 사업기여율을 42.4%로 적용

■ 피해저감율

- 『제1차 해양수산과학기술 육성기본계획』(해양수산부, 2018)은 공공분야 목표로서 해양사고 30% 저감 목표를 제시
- 이러한 목표를 준용하여 본 연구개발사업의 피해저감 목표를 30%로 가정

■ 기술수명주기(편익발생 기간) 및 편익 회임기간

- 기술수명주기는 편익발생 기간과 연동되는 항목으로 연구개발사업이 추진되는 기술들의 특허분석을 통해 산정 가능
- R&D 사업이 종료된 이후 기술 진부화와 타 정책수단의 지속적 수행으로 인해 해당 사업의 시간적 영향력 감소 효과를 고려하지 않은 문제가 있어 연구개발사업의 예비타당성조사 표준지침에 따라 본 사업의 편익 기간은 기술수명주기(TCT)를 사용하는 것이 적절
- 국제특허분류(IPC)별 분류체계를 활용하여 국제특허분류(IPC) 클래스별 기술수명주기 중위수를 산정하는 것이 원칙이나 연구 여건상 유사사업의 연구 결과를 활용할 수 있음
- 본 분석에서는 본 연구개발사업의 유사사업인 『빅데이터 기반의 해양변동 예측기술 개발사업 예비타당성 조사』(KISTEP, 2019)에서 도출한 특허분석 결과를 준용, 기술수명주기(편익발생 기간)를 10년으로 가정
- 다만, 본 연구개발사업은 순수 연구개발사업이고 탐색적 연구라는 점을 감안, 보수적인 관점에서 편익회임기간을 2년으로 가정
- 즉, 편익 발생시기는 연구개발사업 이후 3년째부터 발생한다고 가정

■ 해양기후재난 피해 저감편익 추정

- 해양기후재난 피해액과 R&D 기여율, R&D 사업성공률, 사업기여율 및 피해저감 목표를 고려하여 산정할 경우, 연간 3,474.5백만원의 해양기후재난 피해비용 저감 편익이 발생

<표 2-6> 연간 해양재해 피해비용 절감 편익

해양기후 재난 피해액 (백만원)	R&D 기여율 (%)	R&D 사업화 성공률 (%)	사업기여율 (%)	피해저감율 (%)	피해 저감 편익 (백만원)
173,007	35.4	44.6	42.4	30.0	3,474.5

(4) 경제성 분석

■ 경제성 분석 방법

- 경제적 타당성에 관한 분석은 일단 그 사업이 어느 정도의 경제적 가치가 있는 사업인지를 파악할 수 있도록 함으로써 사업에 대한 이해를 돕는 기능
- 경제적 타당성을 평가하는 분석기법으로는 편익-비용비율(B/C Ratio), 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR) 등이 있는데, 일반적으로 이해가 용이하고 사업규모의 고려가 가능한 B/C 분석 기법을 많이 사용
- 편익-비용 비율
 - 사업 운영 후 연도별 발생하는 편익과 투입되는 비용을 적정 할인율로 할인하여 기준년도 가격으로 환산한 금액의 비율을 의미하며, 일반적으로 편익-비용 비율이 1 이상이면 경제성이 있다고 판단

$$\text{편익.비용비율}(B/C) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

- 여기서, B_t : 편익의 당해 연도 값
- C_t : 비용의 당해 연도 값
- r : 할인율(이자율)
- n : 내구년도(분석년도)

□ 내부수익률

- 내부수익률이란 현재가치로 환산한 편익과 비용의 값이 같아지는 할인율 r 을 구하는 방법으로 일반적으로 내부수익률이 사회적 할인율보다 크면 경제성이 있다고 판단

$$\text{내부수익률}(IRR) : \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

□ 순현재가치

- 순현재가치란 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준년도의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총비용을 제한 값을 의미하며, 순현재가치가 0보다 크면 경제성이 있다고 판단

$$\text{순현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

<표 2-7> 경제성 분석 기법 비교

분석기법	판단	장 점	단 점
편익/비용 비율	$BC \geq 1$	- 이해 용이 - 사업규모 고려 가능 - 비용편익 발생기간의 고려	- 편익과 비용의 명확한 구분 곤란 - 상호배타적 대안선택의 오류발생 가능 - 사회적 할인율의 파악
내부 수익률	$NPV \geq 0$	- 사업의 수익성 측정 가능 - 타 대안과 비교가 용이 - 평가과정과 결과 이해가 용이	- 사업의 절대적 규모 고려치 않음 - 몇 개의 내부수익률이 동시에 도출될 가능성 내재
순현재 가치	$IRR \geq r$	- 대안 선택 시 명확한 기준 제시 - 장래발생편익의 현재가치 제시 - 한계 순현재가치 고려 - 타 분석에 이용가능	- 할인율의 분명한 파악 - 이해의 어려움 - 대안 우선순위 결정시 오류발생 가능

■ 경제성 분석의 단계적 절차

- 경제성 분석을 위해서는 다음과 같은 절차를 거침
- 우선 경제성 분석 대상 사업을 명확히 정의하고, 본 사업에 따른 영향을 정확히 식별할 필요가 있음
- 이어 사업 속성에 따라 고려해야 할 영향의 범위를 확정하고 영향의 수요 또는 계획 등에 따른 물량적 범위를 명확히 파악해야 함
- 사업 속성이 명확히 확정된 후 경제적 방법론을 통해 화폐적 평가를 진행하고 이에 대한 현재가치를 추정하고 비용편익분석을 진행함
- 비용편익분석과 함께 정성적인 평가 및 정책적인 평가를 통해 경제성 분석을 보완하고 필요에 따라 민감도 분석을 수행

■ 경제성 분석시 고려사항

- 경제성 분석에 있어 비용과 편익은 모두 사회적 비용 및 편익으로 간주할 수 있는데 일반적으로 공공투자사업의 경우 비용은 실질적으로 투자되어 사용된 비용을 계상하는 반면 편익은 회수방법을 통한 실제수익이 아닌 사회적 편익을 기준으로 함
- 본 사업이 추진되면 5년의 연구기간이 소요될 것으로 예상됨에 따라 단계별 연구기간 완료 후 편익 회임기간을 거쳐 기술수명주기 등에 따라 2030년부터 편익이 순차적으로 발생하는 것으로 가정
- 연구개발사업은 그 성격상 비용이 초기에 집중 발생하는 반면, 편익은 연구개발사업 후 장기간 동안 발생하기 때문에 분석 기간 동안 예상되는 비용과 편익에 사회적 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하여 평가

■ 경제성 분석 시 고려사항

- 분석 시점 : 본 분석 직전연도 2020년 기준으로 현재가치화
- 비용 : 본 연구개발사업 단계별 예산안
- 편익기간 : 평균 기술순환주기(TCT) 분석 결과에 따라 연구개발 사업 종료 후 2030년부터 10년간, 편익발생시기는 회임기간 고려, 연구개발사업 종료후 3년째부터 발생
- 할인율 : 예비타당성조사 수행 총괄지침(2017년 8월)에 근거하여 4.5% 적용

■ 비용의 추정

- 비용은 연구진에서 제시한 5년간 총 연구비 22,500백만원이 2023년부터 5년간 4,500백만원이 동일하게 지출된다고 가정

■ 경제성 분석결과

- 비용편익분석 결과, 편익-비용 비율은 1.02으로서 본 연구개발 사업은

경제적으로 타당한 것으로 분석

- 본 연구개발사업의 내부수익율은 6.1%로서 통상적인 은행이자율을 상회하는 수치이며, 적용할인율보다 높은 값을 시현하고 있으며, 순현재가치는 410백만원으로 분석

<표 2-8> 경제성 분석결과 요약

구 분	분석 결과
총편익의 현재가치 (백만원)	18,500
총비용의 현재가치 (백만원)	18,090
순현재가치 (백만원)	410
편익-비용 비율	1.02
내부수익률(IRR)	6.1%

- 편익-비용의 흐름을 연도별로 살펴보면, 편익의 현재가치는 18,500백만원, 비용의 현재가치는 18,090백만원인 것으로 분석



<표 2-9> 비용-편익의 흐름

(단위 : 백만원)

구분	비용		편익		현재가치	
	값	현재가치	값	현재가치	값	현재가치
2023	4,500	3,943	-	-	-4,500	-3,943
2024	4,500	3,774	-	-	-4,500	-3,774
2025	4,500	3,611	-	-	-4,500	-3,611
2026	4,500	3,456	-	-	-4,500	-3,456
2027	4,500	3,307	-	-	-4,500	-3,307
2028	-	-	-	-	-	-
2029	-	-	-	-	-	-
2030	-	-	3,474	2,237	3,474	2,237
2031	-	-	3,474	2,141	3,474	2,141
2032	-	-	3,474	2,049	3,474	2,049
2033	-	-	3,474	1,961	3,474	1,961
2034	-	-	3,474	1,876	3,474	1,876
2035	-	-	3,474	1,795	3,474	1,795
2036	-	-	3,474	1,718	3,474	1,718
2037	-	-	3,474	1,644	3,474	1,644
2038	-	-	3,474	1,573	3,474	1,573
2039	-	-	3,474	1,505	3,474	1,505
합계	22,500	18,090	34,745	18,500	12,245	410

(5) 민감도 분석

■ 민감도 분석의 개요

- 사업 추진에 있어 사업비가 변경되거나 편익 추정치가 변화할 수 있는 점을 감안하여 (예비)타당성조사는 경제성 분석 수행 후 민감도 분석 시행을 제안
- 편익 및 비용 변화에 대한 민감도 분석을 위해서 편익과 비용을 $\pm 20\%$ 까지 10%p씩 변화시킴

■ 민감도 분석 결과

- 민감도 분석결과, 편익 및 비용의 변화에 따라 경제적 타당성 확보 정도는 변화하는 것으로 분석되나, 편익이 감소 또는 비용이 증가할 경우를 제외하고 경제적 타당성을 확보하는 것으로 평가

<표 2-10> 민감도 분석 결과

구 분	변화율	비용의 현재가치 (백만원)	편익의 현재가치 (백만원)	순현재가치 (백만원)	B/C
비용의 변화	-20.0%	14,472	18,500	4,028	1.28
	-10.0%	16,281	18,500	2,219	1.14
	0.0%	18,090	18,500	410	1.02
	10.0%	19,899	18,500	-1,399	0.93
	20.0%	21,708	18,500	-3,208	0.85
편익의 변화	-20.0%	18,090	14,800	-3,290	0.82
	-10.0%	18,090	16,650	-1,440	0.92
	0.0%	18,090	18,500	410	1.02
	10.0%	18,090	20,350	2,260	1.12
	20.0%	18,090	22,200	4,110	1.23

■ 희토류 자원 공급지 확보에 대한 경제적 효과

- 본 연구개발사업은 복합지구조 물질순환 과정 추적 및 지구조 고찰 등을 통해 자연재해 특성과 발생 경향을 분석하고 해양환경의 영향을 규명하는 사업 외에 복합지구조 자원 형성 모델에 의한 신자원 분포를 탐사함으로써 공해상 희토류 자원공급지 확보도 기대할 수 있음
- 즉, 본 사업이 정상궤도에 오르고 희토류 추출 및 제/정련 기반 기술을 갖추면서 차후에 희토류 자원을 확보하게 되면 단순히 자원 확보를 넘어 산업적 활동과 국가 안보에 필수불가결한 희귀금속 자원을 보유할 수 있는 가능성이 높아짐
- 다시 말하면, 신자원 확보 가능성 증대에 따라 산업적 효과 외에 국민들 입장에서 자원 안보 효과가 발생하는 것으로 기대할 수 있음
- KIOST(2019)²⁾에서는 이의 경제적 효과를 검증하기 위해 CVM 방법론을 적용,

연간 4,609백만원의 경제적 편익을 추정한 바 있음

- 정리하면, 본 연구개발사업의 핵심 목표 중 하나인 희토류 자원 공급지 확보 등을 통해 신자원 확보 가능성이 증대하게 되면, 산업적 효과만이 아니라 국민들이 자원 안보에 대한 만족감까지 고취되는 비시장재적 관점의 경제적 효과가 추가로 발생하는 것으로 볼 수 있음



2) KIOST(2019), 고함량 희토류 퇴적물 개발사업 경제성 분석

3 일자리창출효과 분석

(1) 개요

■ 재정지출 고용효과

- 예산지출을 통한 직·간접적인 일자리 창출 효과로, 인건비 고용효과와 사업 고용효과로 구성
 - (인건비 고용효과) 인건비 지출을 통해 직접적으로 발생하는 일자리 효과
 - (사업비 고용효과) 사업비 지출(정부구매·조달 등)로 인해 제품·서비스 수요가 증가하면서 간접적으로 창출되는 일자리 효과

■ 추가고용효과

- 인건비·사업비 고용효과 외에 재정투입의 성과(결과물)가 일자리 창출에 기여하는 효과

(2) 일자리 창출효과 측정 방법

- 사업유형별 산출식을 적용하여 사업비 10억당 재정지출 고용효과 및 추가 고용효과를 각각 산출
 - (인건비 고용효과) 인건비를 산업별로 구분하고, 다음 산식을 적용한 후 합산
 - * $\text{인건비 지출액} \div \text{해당 산업 연평균 임금}$
 - (사업비 고용효과) 각 사업비를 비목별 또는 지출내역별로 구분하고, 다음 산식을 적용한 후 합산
 - * $\text{인건비 외 각 사업비 지출액} \times \text{예산비목별(또는 지출내역별) 고용유발계수}$
 - (추가고용효과) 해당 사업의 성과지표, 제출자료 상 효과지표 및 사업규모 데이터에 세부 유형별 산출식 적용

- 고용효과는 1년 단위로 산출하며, 취업 지속기간이 1년 미만인 경우 1년 단위로 환산하여 산출
- 계속사업은 '21년 예산 및 '22년 예산안의 고용효과를 모두 산출하고 '21년 고용효과와 '22년 고용효과 차이 제시

(3) 일자리 창출효과 분석결과

- 일자리 창출효과 분석은 고용노동부가 제안하고 있는 「2021년 재정사업 고용영향평가 가이드라인」을 준용하여 본 R&D 사업에 따른 일자리 창출효과 추정
- 인건비 고용효과
 - 인건비는 순수 연구개발비 연간 연구개발비 45억원 중 30%로 가정
 - 인건비 고용효과는 가이드라인 산정원칙과 관련 산업 연평균 임금 중 연구개발업의 평균임금 적용
 - 분석 결과, 인건비 고용효과는 연구개발기간 동안 총 98.3명

<표 3-1> 인건비 고용효과

구분	2023	2024	2025	2026	2027	합계
인건비 (억원)	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	67.5
산업연평균 임금 (억원)	0.687					
인건비 고용효과 (명)	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	98.3

- 사업비 고용효과
 - 본 연구개발사업에서 인건비를 제외한 나머지 예산은 연구개발활동비로 가정
 - 연구개발활동비의 사업비 고용효과는 가이드라인 산정원칙과 관련 산업별 고용유발계수 중 연구개발업 적용

- 분석 결과, 인건비 고용효과는 연구개발기간 동안 총 148.1명

<표 3-2> 사업비 고용효과

구분	2023	2024	2025	2026	2027	합계
인건비 외 각 사업비 지출액 (억원)	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	157.5
산업연평균 임금 (억원)	0.94					
인건비 고용효과 (명)	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	148.1

□ 총고용창출 효과

- 본 연구개발사업에 따른 재정지출 고용효과는 인건비 및 사업비 고용효과를 포함하여 연구개발기간 동안 총 246.3명

<표 3-3> 본 연구개발사업에 따른 고용효과 분석 결과

구분		2023	2024	2025	2026	2027	합계
총 고용	인건비 고용효과	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	98.3
	사업비 고용효과	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	148.1
총 합계		49.3	49.3	49.3	49.3	49.3	246.3
예산 10억원당 고용(명)		4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	24.6