

태평양 북극해의 해빙 감소에 따른 대형 요각류
*Calanus glacialis*의 분포 확장 가능성 연구

Possibility of the expanding distribution in large copepod
Calanus glacialis associated with sea-ice reduction in the
pacific sector of Arctic Ocean



2025. 05.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

한국연구재단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “태평양 북극해의 해빙 감소에 따른 대형 요각류 *Calanus glacialis*의 분포 확장 가능성 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 05.



연구책임자 : 양 은 진

참여연구원 : 김 지 훈

“ : 문 종 국

“ : 김 정 현

“ : 유 혜 주

보고서 초록

과제관리번호	PN24040	해당단계 연구기간	2023.04.01. - 2025.03.31.		단계 구분	2단계 / 2단계	
연구사업명	중 사 업 명	한국연구재단 국제협력사업					
	세부사업명	한일협력연구사업					
연구과제명	중 과 제 명						
	세부(단위)과제명	태평양 북극해의 해빙 감소에 따른 대형 요각류 Calanus glacialis의 분포 확장 가능성 연구					
연구책임자	양 은 진	해당단계 참여연구원수	총 : 5명 내부 : 5명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 15,000 천원 기업: 천원 계: 15,000 천원		
연구기관명 및 소속부서명	해양대기연구본부		참여기업명				
국제공동연구	상대국명 : 일본		상대국연구기관명 : 홋카이도 대학				
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	18 page	
○ 연구내용 - 기존 북극해 현장 탐사 자료를 비교 분석하여, 태평양 북극해에서의 동물플랑크톤 군집 구조 및 Calanus glacialis의 분포 특성을 규명 2023년 북극해에서 확보된 동물플랑크톤 데이터를 기반으로 한-일 간 자료 교류 및 공동 분석 수행 - 북극해 동물플랑크톤 군집 구조 비교 분석 및 환경과 동물플랑크톤 상관성 연구 - 동물플랑크톤 샘플링 및 분석 기법에 대한 한-일 연구자 간의 기술 및 노하우 교류 - 한-일 방문연구 프로그램을 통해 젊은 과학자의 국제 연구 네트워크 구축 및 역량 강화 - 공동연구 성과를 바탕으로 한일 국제협력 논문 공동 투고 (25.4) ○ 연구결과 - 북극해 현장탐사 비교 연구를 통한 태평양 북극해 동물플랑크톤 군집과 Calanus glacialis의 분포 파악 연구 수행 2008년부터 2021년까지 한국 쇄빙연구선 아라온(IBRV Araon)과 일본 연구선 미라이(RV Mirai)가 각각 8월과 9월에 독립적으로 수집한 장기 동물플랑크톤 자료를 최초로 종합 분석했음. - 이 통합 분석을 통해 서북극해 Calanus glacialis를 포함한 동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동성을 보다 폭넓게 이해할 수 있게 되었음. 관련 내용을 정리해 Progress in Oceanography (I.F. 3.8, mrnIF 90%) 저널에 2025년 4월 7일 투고하였음. - 한-일 방문 연구를 통한 연구 노하우 공유 및 젊은 과학자를 위한 국제네트워크 개발 2023-2024년 한국과 일본 양국이 매년 각각의 기관을 방문 연구하고 상호 노하우를 교환함. - 석박사 학생들이 주도적으로 워크숍 등을 진행함. ○ 연구결과와 활용 계획 - 극지연구소 해양 연구팀은 매년 8월, 홋카이도 대학교 플랑크톤 연구실은 매년 9월에 서북극해 연구를 지속적으로 진행해 왔으며, 이러한 연속적인 연구 활동 기간은 해빙으로 인해 접근이 어려운 극지 해양에서의 자료 부족 문제를 극복하는 데 도움을 줄 수 있음. 이번 협력 연구를 계기로 동물플랑크톤 연구뿐만 아니라 다학제적인 해양 환경 모니터링을 위한 후속 공동연구로 확장할 수 있을 것으로 기대함. - 상호간에 멀티넷, UVP 등 최신 연구 장비를 극지 동물플랑크톤 생태 연구에 적용하는 데에 다양한 통찰력을 지속적으로 제공하여, 다양한 방식으로 후속 공동연구로 지속 발전될 것으로 기대됨.							
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 척치해, 동물플랑크톤, Calanus glacialis, 군집구조, 한일협력연구, 해양생태계, 기후변화					
	영 어	Arctic Ocean, Chukchi Sea, Zooplankton, Calanus glacialis, Community structure, Korea - Japan collaborative research, Marine ecosystem, Climate change					

한국연구재단 국제협력사업 최종보고서

① 부처사업명(대)	국제기관간 MOU지원사업			보안등급(보안, 일반)	일반			
② 사 업 명(중)	NRF특별협력사업			공개가능여부(공개, 비공개)	공개			
③ 세부사업명(소)	한일협력연구사업							
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초	④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)			비실용화			
⑤ 과 제 명	국 문	태평양 북극해의 해빙 감소에 따른 대형 요각류 <i>Calanus glacialis</i> 의 분포 확장 가능성 연구						
	영 문	Possibility of the expanding distribution in large copepod <i>Calanus glacialis</i> associated with sea-ice reduction in the pacific sector of Arctic Ocean						
⑥ 주관연구기관	한국해양과학기술원 부설 극지연구소							
⑦ 협동연구기관	Hokkaido University							
⑧ 주관연구책임자	성 명	양 은 진		직급(직위)	책임연구원			
	소속부서	해양대기연구본부		전 공	해양생태학			
⑨ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, 명)								
년 도	재단지원금 (A)	기업체부담금			기타 출연금 (B)	상대국 부담금 (F)	합계 G=(A+B+E)	참여 연구원수
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)				
1차년도	15,000							4
2차년도	15,000							5
3차년도								
4차년도								
⑩ 총연구기간		2023.04.01-2025.03.31 (24개월)						
⑪ 다년도협약연구기간		2023.04.01-2024.03.31 (12개월)						
⑫ 당해연도연구기간		2024.04.01-2025.03.31 (12개월)						
⑬ 참여기업	중소기업수	대기업수		기타	계			
⑭ 국제공동연구	상대국	상대 연구기관		상대국 연구비(천원)	상대국 연구책임자			
	일본	Hokkaido University		15,000	Kohei Matsuno			
관계 규정과 제반 지시사항을 준수하면서 수행한 연구과제의 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 2025년 05월 20일 주관연구책임자 : 양 은 진 (인) 주관연구기관장 : 신 형 철 한국연구재단 이사장 귀하								

〈 목 차 〉

I. 연구결과 요약문

1. 국문 요약문	3
2. SUMMARY(영문 요약문)	4

II. 연구내용 및 결과

1. 과제 개요	5
2. 수행 내용 및 결과	6
3. 자체평가	11
4. 연구결과의 활용 계획	12
5. 연구과정에서 수집한 해외 정보	13
6. 참고문헌	13
7. 연구성과	14
8. 기타사항	15
[붙임] 대표성과	16

〈 연구결과 요약문 (국문) 〉

연구목적	태평양 북극해의 해빙 감소에 따른 동물플랑크톤 군집 변화와 대형 요각류인 <i>Calanus glacialis</i> 의 분포 확장 가능성에 따른 분포변동 연구		
연구내용	• 기존 북극해 현장 탐사 자료를 비교 분석하여, 태평양 북극해에서의 동물플랑크톤 군집 구조 및 <i>Calanus glacialis</i>의 분포 특성을 규명 • 2023년 북극해에서 확보된 동물플랑크톤 데이터를 기반으로 한-일 간 자료 교류 및 공동 분석 수행 • 북극해 동물플랑크톤 군집 구조 비교 분석 및 환경과 동물플랑크톤 상관성 연구 • 동물플랑크톤 샘플링 및 분석 기법에 대한 한-일 연구자 간의 기술 및 노하우 교류 • 한-일 방문연구 프로그램을 통해 젊은 과학자의 국제 연구 네트워크 구축 및 역량 강화 • 공동연구 성과를 바탕으로 한일 국제협력 논문 공동 투고 (25.4)		
연구결과	• 북극해 현장탐사 비교 연구를 통한 태평양 북극해 동물플랑크톤 군집과 <i>Calanus glacialis</i>의 분포 파악 연구 수행 • 2008년부터 2021년까지 한국 채빙연구선 아라온(IBRV Araon)과 일본 연구선 미라이(RV Mirai)가 각각 8월과 9월에 독립적으로 수집한 장기 동물플랑크톤 자료를 최초로 종합 분석했음. • 이 통합 분석을 통해 서북극해 <i>Calanus glacialis</i>를 포함한 동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동성을 보다 폭넓게 이해할 수 있게 되었음. 관련 내용을 정리해 <i>Progress in Oceanography</i> (I.F. 3.8, mrnIF 90%) 저널에 2025년 4월 7일 투고하였음. • 한-일 방문 연구를 통한 연구 노하우 공유 및 젊은 과학자를 위한 국제네트워크 개발 • 2023-2024년 한국과 일본 양국이 매년 각각의 기관을 방문 연구하고 상호 노하우 교환. • 특히 석박사 학생들이 주도적으로 국제학생 워크숍등을 진행함.		
연구결과 의 활용계획	• 극지연구소 해양 연구팀은 매년 8월, 홋카이도 대학교 플랑크톤 연구실은 매년 9월에 서북극해 연구를 지속적으로 진행해 왔으며, 이러한 연속적인 연구 활동 기간은 해빙으로 인해 접근이 어려운 극지 해양에서의 자료 부족 문제를 극복하는데 도움을 줄 수 있음. 이번 협력 연구를 계기로 동물플랑크톤 연구뿐만 아니라 다학제적인 해양 환경 모니터링을 위한 후속 공동연구로 확장할 수 있을 것으로 기대함. • 상호간에 멀티넷, UVP 등 최신 연구 장비를 극지 동물플랑크톤 생태 연구에 적용하는 데에 다양한 통찰력을 지속적으로 제공하여, 다양한 방식으로 후속 공동연구로 지속 발전될 것으로 기대됨.		
중심어	북극해	서북극해	척치해
	동물플랑크톤	<i>Calanus glacialis</i>	군집구조
	한일협력연구	해양생태계	기후변화

◁ SUMMARY ▷

Purpose	This study aims to investigate the distributional changes of zooplankton communities and the potential northward expansion of the large copepod <i>Calanus glacialis</i> in the Pacific sector of the Arctic Ocean, where sea ice reduction is accelerating.		
Contents	• Conducted a comparative study using existing Arctic field survey data to investigate zooplankton community structure and the distribution of <i>Calanus glacialis</i> in the Pacific Arctic region • Exchanged and jointly analyzed zooplankton data collected from the Arctic Ocean in 2023 between Korean and Japanese researchers • Comparative Analysis of Arctic Ocean Zooplankton Community Structure and the Relationship Between Environmental Factors and Zooplankton • Developed international research networks for early-career scientists through Korea-Japan exchange visits • Promoted technical exchange on zooplankton sampling and analytical methodologies between Korean and Japanese scientists • Submission of a Korea-Japan joint research paper based on collaborative research outcomes (Apr. 2025)		
Results	• A comparative study of field surveys was conducted to investigate the distribution patterns of zooplankton communities and <i>Calanus glacialis</i> in the Pacific Arctic. A first-ever comprehensive synthesis of long-term zooplankton datasets, independently collected by Korea's IBRV <i>Araon</i> and Japan's RV <i>Mirai</i> during August and September from 2008 to 2021, was carried out. This integrated analysis provided a broader understanding of the spatiotemporal variability of zooplankton communities, including <i>Calanus glacialis</i>, in the western Arctic Ocean. The findings were organized into a manuscript and submitted to <i>Progress in Oceanography</i> (Impact Factor: 3.8, Journal Ranking: top 10%) on April 7, 2025. • Research visits between Korea and Japan were conducted to exchange research expertise and to foster an international network for early-career scientists. From 2023 onward, annual mutual research visits have been organized between the two countries to facilitate knowledge transfer.		
Expected Contribution	The Ocean Science Research Team at the Korea Polar Research Institute (KOPRI) conducts research in the western Arctic Ocean every August, while the Plankton Laboratory at Hokkaido University carries out research in the region every September. This continuous research effort helps to overcome the persistent problem of limited data collection in the polar marine environment, where sea ice often restricts access. Based on the outcomes of this collaborative research, further multidisciplinary oceanographic monitoring is expected to be expanded through follow-up joint research projects.		
Keywords	Arctic Ocean	Western Arctic Ocean	Chukchi Sea
	Zooplankton	<i>Calanus glacialis</i>	Community structure
	Korea-Japan collaborative research	Marine ecosystem	Climate change

〈 연구내용 및 결과 〉

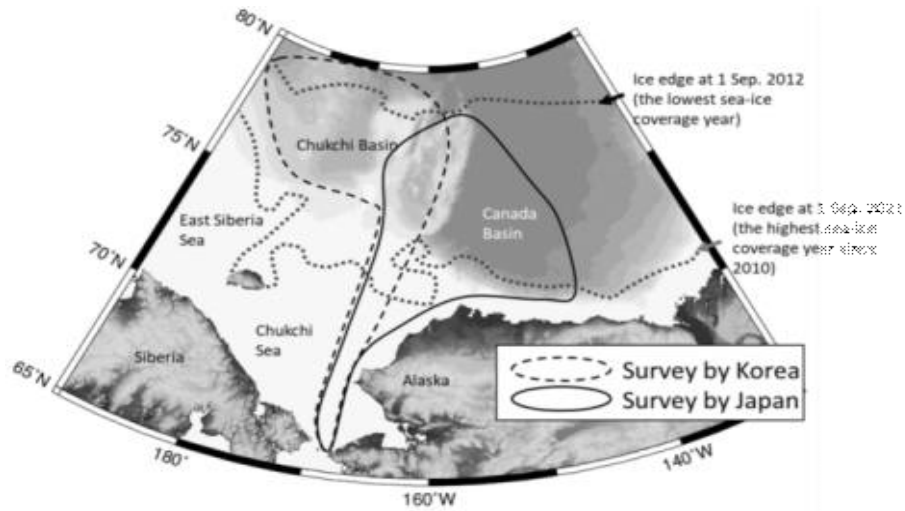
1. 과제 개요

북극해는 온난화로 인하여 수온상승, 해빙후퇴 등 전 지구상에서 가장 급격한 환경변화를 겪고 있는 해역이다. 북극해의 주요한 환경변화의 요인은 수온상승, 담수유입, 대기흐름 등 다양한 원인이 존재하지만 여름철 해양생태계에 큰 영향을 미치는 요소는 태평양과 대서양에서의 따뜻한 여름수의 유입과 해빙의 감소이다. 태평양과 북극해를 잇는 베링해협, 남척치해에서는 여름철 유입되는 여름수의 수온이 상승함에 따라 수괴(water mass)가 변화하고, 이에 따라 수괴의 주요 지시자인 동물플랑크톤 군집도 빠르게 반응하고 있다. 대표적으로 태평양에서 주로 서식해오던 태평양 기원 종들이 점점 더 북상하고 그 개체수도 증가하는 추세이다(Ershova et al., 2015). 남척치해의 변화와 함께 북척치해에서는 해빙 감소에 따라 대표 극지종인 *Calanus glacialis*와 *Calanus hyperboreus*의 분포 변화가 예상된다. 친 해빙성 종인 *Calanus hyperboreus*가 해빙 감소로 인해 개체수가 줄고 그 자리를 *Calanus glacialis*가 대체할 것으로 예상되기 때문이다. 최근 유전자 분석에 따르면 북극해의 여름철 *Calanus glacialis* 개체군은 베링해에서 옮겨온 것으로 나타났으며 이들은 태평양으로부터 유입된 것으로 확인되었다(Ashjian et al. 2021). 또한 *Calanus glacialis* 분포가 해빙 분포와 연관이 있다는 연구 결과도 있다(Ershova et al., 2021). 이와 같은 환경변화로 인한 군집의 주요종 변화는 먹이망, DVM, 탄소순환 등에 영향을 미치기 때문에 북극 해빙/해양 생태계에 큰 변화를 초래할 것으로 예상된다.

하지만, 한국의 여름철의 해양조사는 쇄빙선 아라온의 북극항차 관측만으로는 태평양으로부터 유입되는 생물들의 정보를 파악하기 매우 어렵다. 상대국 일본은 매년 연구선 Mirai와 Oshoro-Maruru를 통해 본 해역에서 연구조사를 실시하고 있으며, 쇄빙선인 아라온은 결빙해역인 척치해 북부와 동시베리아해에서 주로 연구를 수행하는 반면, 일본 연구선들은 Ice-edge를 따라 해빙이 열린 해역인 케나다 Basin과 류포트해에서 주로 연구를 수행한다. 따라서 남척치해를 공동으로 조사하면서 양국이 시기적으로 다른 데이터를 획득할 수 있기 때문에 서북극해 전반에 걸쳐 데이터를 통합/비교할 수 있다는 큰 장점이 있다.

따라서 본해역에서 해양 환경변화의 주요 지시자인 동물플랑크톤의 군집과 조성에도 큰 변화가 예상되고, 북극해 생태계의 태평양 영향 증가는 북극해 동물플랑크톤 연구의 주요한 이슈이다. 본 해역의 동물플랑크톤 군집에서 *Calanus glacialis*는 생물량 측면에서 태평양 북극해에서 대표 우점종으로 개체군 구조의 변화는 먹이망에 큰 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 빠른 해빙 후퇴가 일어난 해에는 식물 플랑크톤이 늦게 번성하여 먹이감소로 번식이 지연되고(Kimura et al. 2022), 그 결과 여름까지 충분히 성장하지 못하여 상위 영양단계 개체군들의 감소를 유발하였다(Duffy-Anderson et al. 2019). 또한, *C. glacialis*는 북극해의 해빙 감소에 따라 그 분포가 북상할 것으로 모델 연구 등에서 제안되었다(Wassmann et al. 2015). 하지만 아직까지 분포지역의 확대에 대한 명확한 증거가 발견되지는 않았고, 북극해에서 동물플랑크톤에 대한 계절적 변화와 생애주기 변동에 관한 연구는 매우 미흡한 실정임. 주된 이유로는 각국이 북극해에서 수행하는 동물플랑크톤의 조사 방법이 다르고, 하계시즌에만 단기 조사가 수행되기 때문이다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 현장관측을 기반으로 서로 다른 시기에 다른 해역에서 조사가 이루어져야 하기에 북극해 연구를 수행하는 국가들과의 공동연구는 필

수적이다.



[그림 1] 태평양 북극해의 한국과 일본의 연구해역. 점선은 2010년 이후 가장 낮은 해빙과 가장 높은 해빙이 있었던 여름철 얼음 가장자리(Ice-edge)를 나타냄.

2. 수행내용 및 결과

연 도	목 표	주요내용	결과 및 달성도
2023	북극해 현장탐사 비교 연구를 통한 태평양 북극해 동물플랑크톤 군집과 <i>Calanus glacialis</i> 의 분포 파악	일본의 7월 Oshoro-maru 및 9월 Mirai 북극 연구항차, 그리고 한국의 8월 ARAON(아라온) 북극 연구항차간 동물플랑크톤 비교·통합 분석	한일 북극 연구항차간 동물플랑크톤 비교·통합 연구 수행 달성도 : 100%
	한-일 방문 연구를 통한 연구 노하우 공유 및 젊은 과학자를 위한 국제 네트워크 개발	·5월 경 일본측 한국 KOPRI 방문연구 ·11월 경 한국 측 일본 Hokkaido Univ. 방문연구 수행	양국간 일정 조율 후 방문 연구 수행 달성도 : 100%
2024	북극해 동물플랑크톤 데이터 교류 및 분석, 양측 북극해 연구항차 수행	·한국 Araon 8월, 일본 Mirai 9월 북극 연구항차 수행 ·양측 데이터 교류 및 분석 수행 ·북극해 동물플랑크톤 군집 구조 분석 및 통계기법 적용 결과 산출	한일 북극 연구항차간 동물플랑크톤 비교·통합 연구 수행 달성도 : 100%
	한일 연구자 교류를 통한 동물플랑크톤 샘플링 및 분석기법 노하우 교환	·5월 한국 측 일본 Hokkaido Univ. 방문연구 ·11월 일본측 한국 KOPRI 방문연구 수행	양국간 일정 조율 후 방문 연구 수행 달성도 : 100%
2025	협력연구 논문 투고	한일 데이터 활용 공동연구 논문 작성	논문 작성후 투고 달성도 : 100%

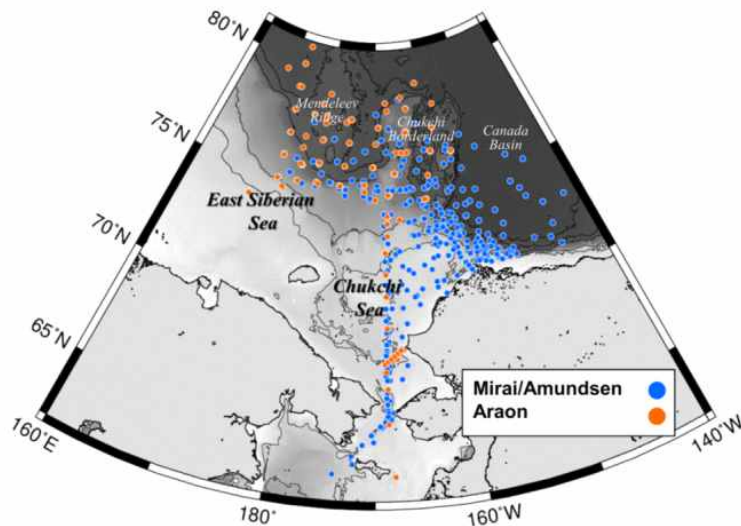
□ 세부 내용

○ 북극해 현장탐사 비교 연구를 통한 태평양 북극해 동물플랑크톤 군집 분석과 *Calanus glacialis*의 분포 특성 파악

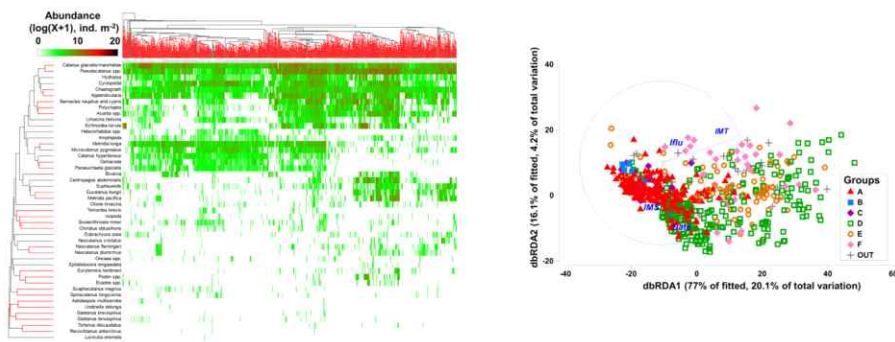
- 2008년부터 2021년까지 한국 쇄빙연구선 아라온(IBRV Araon)과 일본 연구선 미라이(RV Mirai)가 각각 8월과 9월에 독립적으로 수집한 장기 동물플랑크톤 자료를 최초로 종합 분석했음(그림 2). 이 통합 분석을 통해 서북극해 *Calanus glacialis*를 포함한 동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동성을 보다 폭넓게 이해할 수 있게 되었음.

- 본 연구 결과, 서북극해 연구해역에서 동물플랑크톤은 뚜렷한 6개의 군집으로 나뉘었으며, 수온, 염분 등 해양환경 요소들과의 상관관계를 파악함(그림 3, 4). 특히 여름철에는 해양환경 변화로 인한 태평양 해수 유입에 따라 온도와 염분이 상승하면서 태평양 기원의 군집이 출현했음. 그러나 태평양 영향의 증가는 여름에서 가을로 이어지는 동물플랑크톤 전체 풍도 증가와는 연결되지 않았음. 연구기간 동안 소형 요각류가 우점하는 군집이 지속적으로 유지되었음. 또한, 태평양 영향 군집은 변동성이 매우 크고 환경 의존성이 높아, 해양학적 특성 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났음.

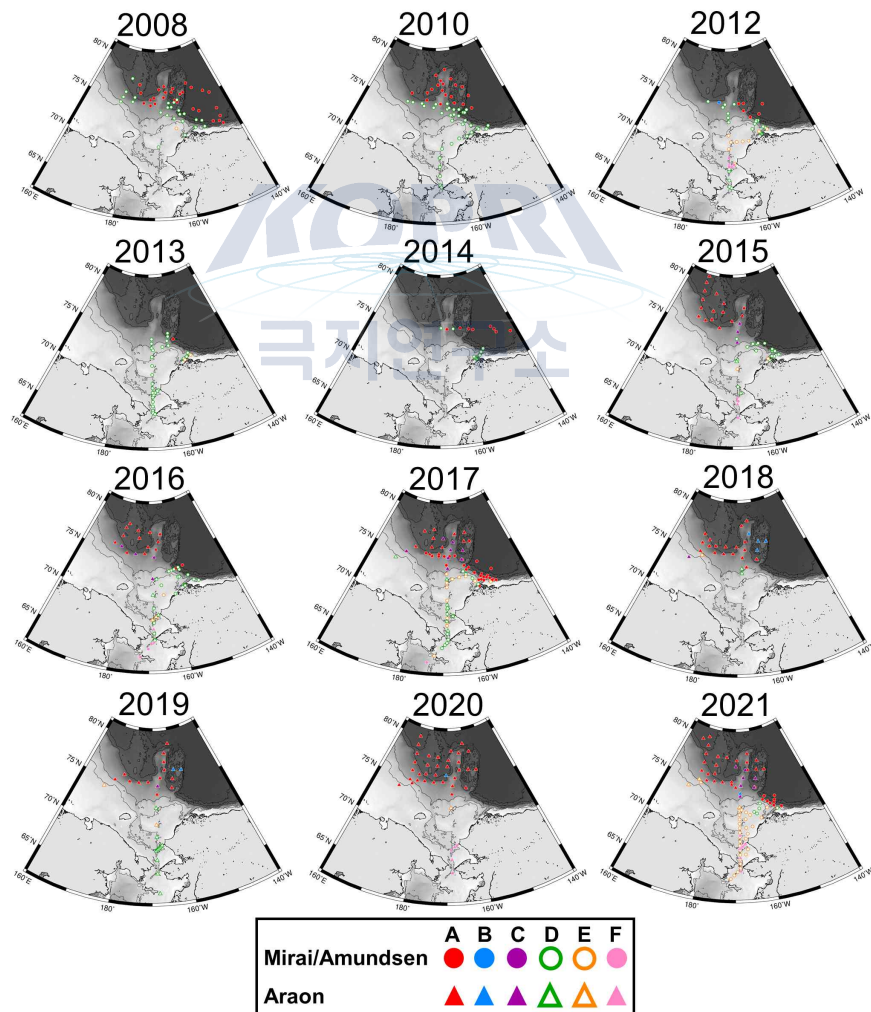
- 동물플랑크톤은 북극 먹이망에서 핵심적인 역할을 수행하므로, 이러한 변화는 상위 영양 단계 및 해양 생태계 기능 전반에 연쇄적인 영향을 미칠 가능성이 있음. 본 연구 결과는 기후 변화에 의해 야기된 해양환경 변화가 북극 해양 생태계에 어떤 변화를 초래하는지를 이해하는 데 필수적인 정보를 제공하며, 해양환경에 대한 인위적 및 자연적 영향 연구를 다루는 *Progress in Oceanography* (I.F. 3.8, mrnIF 90%) 저널의 취지에 부합하여 내용을 정리해 2025년 4월 7일 투고하였음.



[그림 2] 북극해에서 한국 쇄빙연구선 아라온과 일본 연구선 Mirai의 동물플랑크톤 자료를 통합한 정점도



[그림 3] 북극해 한·일 합성 데이터 분석 수행. (좌) 군집분석, (우) 환경 인자와의 상관관계 분석



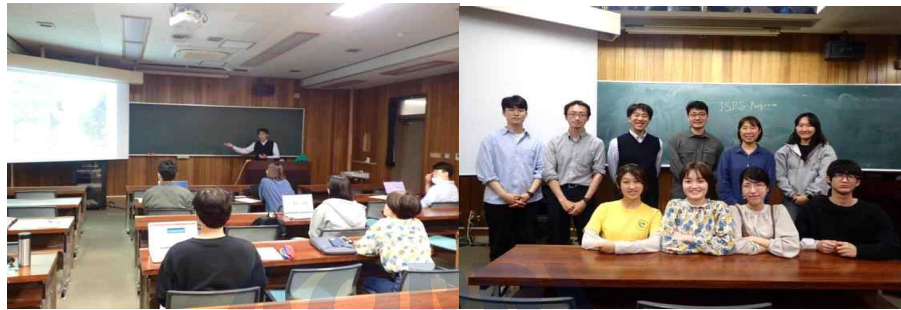
[그림 4] 북극해 동물플랑크톤 연도별 군집 분포도

○ 한-일 방문 연구를 통한 연구 노하우 공유 및 젊은 과학자를 위한 국제네트워크 개발

가) 한국 측 일본 Hokkaido Univ. 방문연구

(1) 1차년도 (2023년 5월28일 - 6월3일)

- 2023년 북극해 동물플랑크톤 국제공동 협력을 위한 홋카이도 대학 방문 연구를 수행하였음. 본 연구에서는 북극해 현장탐사 비교 연구를 통해 태평양 북극해 지역의 동물플랑크톤 군집 및 *Calanus glacialis*의 분포를 파악하였고, 한일 간 방문 연구를 통해 연구 노하우를 공유하고 젊은 과학자를 위한 국제 네트워크를 개발하였음. 또한 태평양 북극해 지역에서 확보된 동물플랑크톤 시료 및 자료의 공동 활용 방안을 협의하고, 공동 논문 생산에 대해 논의하였음. 이와 함께, 다양한 장비를 보유하고 있는 홋카이도 대학의 동물플랑크톤 연구시설을 방문하여 관련 연구 장비 및 데이터 처리 방법에 대한 교육을 수행하였음.



[그림 5] 홋카이도 대학 방문 및 워크숍



[그림 6] Dr. Atsushi Yamaguchi의 동물플랑크톤 채집 방법 시연 및 배양 장비 소개

(2) 2차년도 (2024년 5월 27일 - 5월 31일)

- 2024년 5월 홋카이도 대학을 방문하여 북극해 한일 협력 해양연구 워크숍에 발표 및 참석하였으며, 해양 플랑크톤 이미지 분석 장비인 ZooScan과 FlowCam에 대한 연수를 수행하였음. 또한 해양 관측 장비인 CPICS 장비 운용 및 선상 운용 기술에 대한 연수를 받았고, 현미경 연수를 통해 홋카이도 대학의 플랑크톤 종분류 및 분석 노하우를 전수받았음. 이와 함께 북극해 공동연구에 대해 논의(양은진 외 6인)하였으며, 북극해 시료 공동 활용 방안 및 해양 생지화학 공동연구 아젠다를 발굴함. 향후 연구 협의 일정도 조율하여, 2024년 11월에 홋카이도 대학팀이 극지연구소를 방문할 계획을 수립하고, 방문 시 진행할 연구 교류 내용에

대해 협의하였음.



[그림 7] Arctic Oceanography International Workshop 참석 사진



[그림 8] ① 이미지 분석기 ZooScan, FlowCam 연수, ② CPICS 운용기술 연수, ③ 플랑크톤시료 현미경 연수 수행 사진

나) 홋카이도 대학 연구팀 한국 KOPRI 방문연구

(1) 1차년도 (2023년 11월20일 - 11월26일)

– 홋카이도 대학 연구팀은 2023년 11월 1차 KOPRI 방문연구를 수행함. 극지연구소에서 보유하고 있는 플랑크톤 관련 연구실 및 실험실을 견학하고, 연구장비 교류에 대해 논의하였음. 또한 극지연구소에서 활용 중인 UVP 관련 자료 분석을 위한 협의를 진행하였으며, 양측 학생들을 대상으로 북극해 플랑크톤 연구 결과를 발표하는 한·일 세미나를 개최하였음. 북극해 2020년 대상 동물플랑크톤 군집 데이터 통합 연구를 위한 회의를 진행하였고, 향후 시료 채집을 위한 샘플링 방법에 관해서도 논의하였음.



[그림 9] 2023 홋카이도 대학 연구팀, KOPRI 방문연구

(2) 2차년도 (2024년 11월 18일 - 11월 22일)

- 2024년 11월 홋카이도 대학 연구팀은 2차년도 KOPRI 방문연구를 수행함. 양측 학생들을 포함하여 북극해 해양생태계 연구 결과를 발표하는 한·일 젊은 과학자 세미나를 진행하였음. 또한 북극해 해역의 중장기 동물플랑크톤 군집 데이터(2008년-2021년) 통합 및 논문화에 관한 회의를 개최하였으며, 논문 테마별 세부 일정에 대해 논의하고 수립하였음. 향후 동일한 데이터 생성을 위한 샘플링 표준화 방안을 협의하였고, 차기 과제 창출을 위한 연구 아젠다를 발굴하였음.



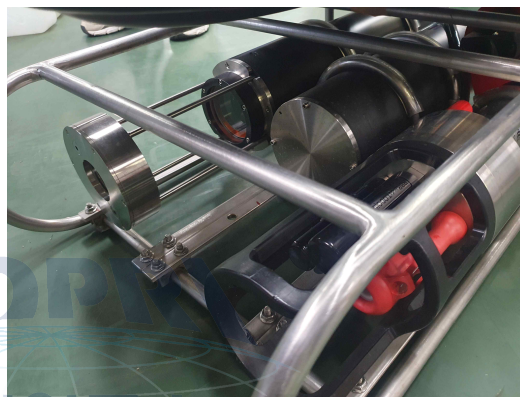
[그림 10] 2024 홋카이도대학 연구팀 KOPRI 방문연구, 한·일 젊은과학자 세미나 참석자

3. 자체평가

목표했던 상호 방문연구를 일정에 맞춰 모두 수행하여 연구 노하우를 공유하고, 관련 협력연구를 수행하여 논문을 투고함. 당초 목표했던 주요종인 *Calanus glacialis*를 포함하여 중형 동물플랑크톤의 장기데이터를 합성하여 보다 심도있는 연구를 수행하였으며, 한일 방문연구 이후에도 긴밀한 협력관계를 유지하고 있어 미래 서북극해 플랑크톤 연구의 지속적인 파트너십을 확보하게 되었음.

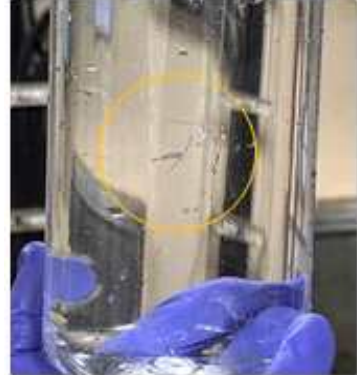
4. 연구결과의 활용 계획

- 극지연구소 해양 연구팀은 매년 8월경, 홋카이도 대학교 플랑크톤 연구실은 매년 9월경 서북극해 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 이러한 연속적인 연구 활동 기간은 해빙으로 인해 접근이 어려운 극지 해양에서의 자료 부족 문제를 극복하는 데 도움을 줄 수 있음. 이번 협력 연구를 계기로 동물플랑크톤 연구뿐만 아니라 다학제적인 해양 환경 모니터링을 위한 후속 공동연구로 확장할 수 있을 것으로 기대됨.
- 플랑크톤 연구실에서는 최근 동물플랑크톤 연구에서 주목받고 있는 In situ 이미징 장비 중 하나인 CPICS (Continuous Particle Imaging and Classification System)를 활용하고 있으며, 극지연구소 해양 연구팀 또한 유사한 장비인 UVP (Underwater Vision Profiler)를 활용하여 연구를 수행하고 있음. 플랑크톤 연구실은 이러한 최신 연구 장비를 극지 동물플랑크톤 생태 연구에 적용하는 데에 다양한 통찰력을 제공할 것이며, 서로의 아이디어를 팔로우업 (Follow-Up)함으로써 후속 공동연구로도 발전할 수 있을 것으로 기대됨.



[그림 11] CPICS (Continuous Particle Imaging and Classification System)의 수직 및 수평 인양을 위해 제작된 프레임

- 해양에서 동물플랑크톤은 그들의 먹이활동을 통해 하위 영양단계 군집을 변화시키고 또한 어류와 같은 상위 소비자에게 섭식됨으로써 생태계 내 탄소 순환과 에너지 흐름에 영향을 미침. *Calanus glacialis*와 같은 북극해 핵심 동물플랑크톤 종은 북극 생태계에서 먹이망의 기초를 이루는 중요한 위치를 차지하고 있어, 연구 결과를 확장하여 섭식연구를 수행할 수 있었음. 이에따라, 태평양 북극해에서 수행한 동물플랑크톤 섭식률 실험을 통해서 *Calanus glacialis*의 생체주기 단계(Life stage)에 따라 하위영양단계의 개체를 선택적으로 섭식하는 결과를 확인하였음.



[그림 12] 태평양 북극해에서 동물플랑크톤의 섭식 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 수행한 배양 실험. 왼쪽 사진은 실험을 위해 아라온 호 데크에 설치한 해수 순환 배양기. 오른쪽 사진은 현장에서 실험에 사용된 *Calanus glacialis*의 배양 사진.

- 다양한 동물플랑크톤 종의 섭식 효과를 비교하면, 각 종이 생태계에 미치는 영향을 보다 포괄적으로 이해할 수 있음. 종별로 상이한 섭식 특성과 기후 변화에 따른 생리적 반응을 고려함으로써 동물플랑크톤 군집 변동이 먹이망 내 에너지 흐름과 영양단계 간 상호작용에 미치는 영향을 보다 명확하게 평가할 수 있음. 따라서 단기 연구를 넘어, 지속적이고 체계적인 데이터 수집과 분석을 통해 장기적인 생태계 변화 패턴을 파악하고, 국제적인 북극해 연구 네트워크를 구축하는 것이 필요함. 이를 위해서는 동물플랑크톤의 섭식 특성과 기후 변화에 따른 생리적 반응을 장기적으로 모니터링하고, 다양한 해양 환경 조건에서의 변동성을 평가하는 후속 연구가 필요함.
- 결론적으로, 한일 공동연구를 통해 서로 다른 연구 해역의 데이터를 융합함으로써 보다 넓은 시각에서 북극해 동물플랑크톤 생태계를 분석할 수 있으며, 이는 향후 북극해 생태계 보전 및 기후변화 대응 연구에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있음. 특히, 이번 협력을 통해 구축된 연구 네트워크는 지속적인 공동연구 추진뿐만 아니라, 향후 국제 연구 과제의 공동 신청 및 장기적인 연구 데이터 공유 체계를 마련하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대됨.

5. 연구과정에서 수집한 해외 정보

- 일본은 쇄빙연구선을 새롭게 건조하여 2027년부터 북극해에 연구 해역을 확장하여 연구를 수행할 예정이기에 일본의 쇄빙선을 활용한 북극해 동물플랑크톤 관련 정보 수집
- 일본에서 지난 10년간 수행해온 동물플랑크톤 자료 수집

6. 참고문헌 (※ 보고서 작성 시 인용된 모든 참고 문헌을 열거)

- Ashjian, C. J., Okkonen, S. R., Campbell, R. G., & Alatalo, P. (2021). Lingering Chukchi Sea sea ice and Chukchi Sea mean winds influence population age structure of euphausiids (krill) found in the bowhead whale feeding hotspot near Pt. Barrow, Alaska. *PLOS ONE*, 16(7), e0254418.
- Duffy-Anderson, J. T., Stabeno, P., Andrews III, A. G., Cieciel, K., Deary, A., Farley, E., ... & Yasumiishi, E. (2019). Responses of the northern Bering Sea and southeastern Bering Sea pelagic ecosystems following record-breaking low winter sea ice. *Geophysical Research Letters*, 46(16), 9833-9842.
- Ershova, E. A., Hopcroft, R. R., Kosobokova, K. N., Matsuno, K., Nelson, R. J., Yamaguchi, A., & Eisner, L. B. (2015). Long-term changes in summer zooplankton communities of the western Chukchi Sea, 1945-2012. *Oceanography*, 28(3), 100-115.
- Ershova, E. A., Kosobokova, K. N., Banas, N. S., Ellingsen, I., Niehoff, B., Hildebrandt, N., & Hirche, H. J. (2021). Sea ice decline drives biogeographical shifts of key *Calanus* species in the central Arctic Ocean. *Global Change Biology*, 27(10), 2128-2143.
- Kimura, F., Matsuno, K., Abe, Y., & Yamaguchi, A. (2022). Effects of early sea-ice reduction on zooplankton and copepod population structure in the northern Bering Sea during the summers of 2017 and 2018. *Frontiers in Marine Science*, 9, 808910.
- Wassmann, P., Kosobokova, K. N., Slagstad, D., Drinkwater, K. F., Hopcroft, R. R., Moore, S. E., ... & Berge, J. (2015). The contiguous domains of Arctic Ocean advection: Trails of life and death. *Progress in Oceanography*, 139, 42-65.

7. 연구성과

1) 정량적 성과

☐ 학술대회 4회 개최

개최시작일자(YYYY-MM-DD)	개최종료일자(YYYY-MM-DD)	학술회의명	참가국수(국)	총 참가의원 수(명)	내국인 발표자 수(명)	외국인 발표자 수(명)
2023-05-29	2023-05-29	International Workshop on Arctic Zooplankton	2 (한국, 일본)	15	4	6
2023-11-22	2023-11-22	International Young Scientists' Day	5 (한국, 일본, 중국, 캐나다, 칠레)	12	6	3
2024-05-29	2024-05-29	International Workshop on Arctic Zooplankton	2 (한국, 일본)	14	6	6
2024-11-19	2024-11-19	International Young Scientists' Day	5 (한국, 일본, 중국, 캐나다, 벨기에)	15	6	4

☐ 한일 데이터 합성 논문 작성 및 투고

- 서북극해 한일 동물플랑크톤 데이터를 합성하여 해양학 분야 상위저널인 *Progress in Oceanography* (IF. 3.8, mrnIF 90%) 에 내용을 정리해 2025년 4월 7일 투고.

2) 정성적 성과

- 홋카이도 대학교 플랑크톤 연구실은 장기적인 자료 축적을 통해 체계적인 실험실 환경을 구축하고, 채집 및 분석 방법을 정립하였으며, 원 기재 논문과 같이 유통이 적은 소규모 논문을 보유하고 있어, 귀중한 연구 자료와 노하우를 획득할 수 있었음(그림 13). 또한, CPICS (Continuous Particle Imaging and Classification System), ZooScan 및 FlowCam과 같은 최신 연구 장비를 적극적으로 활용하고 있으며, 본 연구 사업을 통해 이러한 장비의 운용 방식과 사례를 확인할 수 있었음. 이를 바탕으로 오랜 전통을 가진 플랑크톤 연구실의 연구 방식과 경향을 파악할 수 있었음.

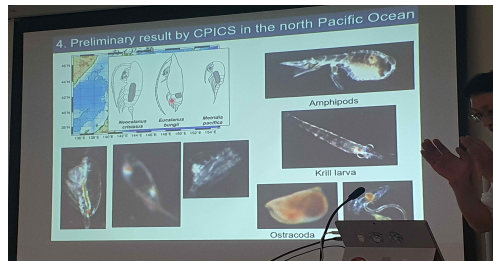


그림 13. 동물플랑크톤 현미경 동정을 위한 실험 도구 (좌)와 CPICS로 얻어진 동물플랑크톤 이미지 (우)

- 홋카이도 대학 Matsuno 교수와의 면담을 통해 연구에 대한 구체적인 피드백을 받고, 실질적으로 도움이 될 만한 자료를 확보할 수 있었음. 특히, 현장에서 수행한 배양 실험의 경우, 출판된 논문만으로는 실험 과정의 세부적인 부분을 파악하기 어렵기 때문에 해당 논문의 저자이자 전문가에게 조언을 구하며 연구의 보완점을 파악하고, 보다 정밀한 연구를 설계하는 데 큰 도움을 얻을 수 있었음.

8. 기타사항

없음.

[붙임]

〈 대 표 성 과 〉

대표업적 요약문			
업적 제목	한일 방문연구를 통한 서북극해 동물플랑크톤 군집의 종합 분석 연구 수행		
업적 유형	학술대회 논문 발표(√), 국내외 과학자 교류(√), 학술회의 개최(√), 전문학술지 SCI(E) 논문 투고.		
주관연구책임자 또는 공동연구원 성명	양은진	참여자 수	14

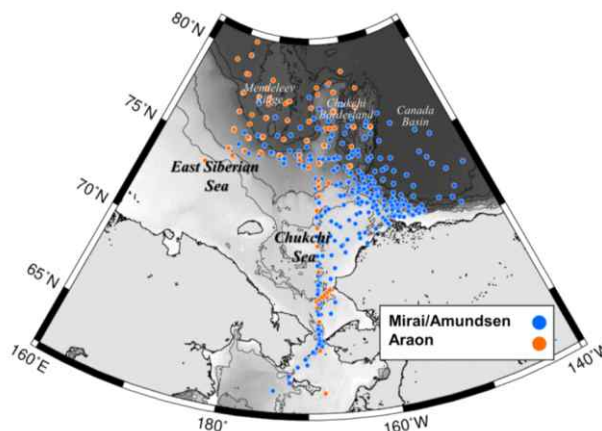
- 한-일 방문 연구를 통한 연구 노하우 공유 및 젊은 과학자를 위한 국제네트워크 개발
- 2023년부터 2년 간 한·일 양국이 매년 각각의 기관을 방문 연구하고 상호 노하우를 전수 받음.



Arctic Oceanography International Workshop 참석 사진

- 북극해 현장탐사 비교 연구를 통한 태평양 북극해 동물플랑크톤 군집과 *Calanus glacialis*의 분포 파악 연구 수행

- 2008년부터 2021년까지 한국 쇄빙연구선 아라온(IBRV Araon)과 일본 연구선 미라이(RV Mirai)가 각각 8월과 9월에 독립적으로 수집한 장기 동물플랑크톤 자료를 최초로 종합 분석했음(그림 2). 이 통합 분석을 통해 서북극해 *Calanus glacialis*를 포함한 동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동성을 보다 폭넓게 이해할 수 있게 되었음. 관련 내용을 정리해 *Progress in Oceanography* (I.F. 3.8, mrnIF 90%) 저널에 2025년 4월 7일 투고하였음.



북극해에서 한국 쇄빙연구선 아라온과 일본 연구선 Mirai의 동물플랑크톤 자료를 통합한 정점도



1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 국가연구사업의 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 국가연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.