

BSPN23100-053-12

2021R1A6A3A01086717

새로운 연대층서를 이용한 서북극해 제4기 고환경 복원

Quaternary paleoenvironmental reconstruction in the western
Arctic Ocean using novel chronostratigraphy



2024.09

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

교육부

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “새로운 연대층서를 이용한 서북극해 제4기 고환경 복원”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024. 09.

연구책임자 : 박광규



보고서 초록

과제관리번호	PN23100	해당단계 연구기간	2021. 09. 01 - 2024. 08. 31	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사 업 명	학문후속세대양성			
	세부사업명	이공분야학문후속세대양성_박사후국내연수			
연구과제명	중 과 제 명	새로운 연대층서를 이용한 서북극해 제4기 고환경 복원			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	박광규	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 180,000 천원 기업: 천원 계: 180,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 빙하지권연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약					보고서 면수 17
◎약 42만 년 전후의 중기 브룬hes 사건(mid-Brunhes Event; MBE)이 서북극해 멘델레예프 해령 퇴적물 기록에서 나타남을 확인 - MBE 이후 퇴적물의 지화학 및 광물학적인 고환경 지시자들의 높은 빙하기-간빙기 변동성은 북미 대륙빙상의 발달에 따른 대량의 육상기원물질 유입과 함께 서북극해의 빙기 냉각화로 인한 해빙의 발달을 지시 - 이러한 빙권 발달은 제4기 동안 전지구적인 냉각화와 지구기후시스템의 내재적인 양성피드백 효과와 밀접한 연관이 있음을 확인 ◎광물 조성 분석을 통해 마카로프 분지 퇴적물의 기원지를 추적하고 새로운 연대 설정에 기반하여 주요 광물들의 시간적인 변화를 복원 - 북미 로렌타이드 빙상이 기존에 알려진 것보다 약 15만년 앞선 플라이스토 초기에 북극해 인접 지역에 발달하여 북극해로 육상기원 퇴적물을 공급하였으며 이러한 기작의 약 10만년 주기를 확인함으로써 제4기 동안 전지구 빙하기-간빙기 기후 변화에서 북미 대륙빙상 거동의 중요성을 시사 - 동시베리아 대륙주변부로부터 유입되는 광물(clinopyroxene)의 장기간(약 110만년 전-15만년 전) 강한 10만년 주기를 확인하여 서북극해 지역의 빙하기-간빙기에 따른 해수면 변동과 같은 전지구 기후 변화에 대한 높은 민감도를 강조					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	서북극해; 고해양; 층서; 빙하기-간빙기; 기후변화			
	영 어	western Arctic Ocean; paleoceanography; stratigraphy; glacial-interglacial; climate change			

요 약 문

I. 제 목

새로운 연대층서를 이용한 서북극해 제4기 고환경 복원

II. 연구개발의 목적 및 필요성

제4기 북극해 퇴적물에 대한 연대층서학적인 연구는 21세기 이후의 국제적인 협력과 쇄빙 연구선의 도입과 같은 연구 제반 사항의 향상에도 불구하고 여전히 논란의 여지가 있다. 이는 북극해 심해퇴적물은 미화석의 보존이 낮고 퇴적 후 숙성작용으로 다른 대양의 해양퇴적물에서 일반적으로 사용되는 산소동위원소와 고지자기를 이용한 연대모델 수립이 어렵기 때문이다(Polyak et al., 2009). 이러한 이유로 서북극해 심해퇴적물에서 홀로세와 마지막 빙하기에 해당되는 표층 수십 cm 이내의 연대는 부유성 유공충 미화석을 이용하여 방사성 탄소연대 측정을 통해 비교적 정확하게 측정되는 반면에 그보다 오래된 기록에 대한 연대추정은 최근까지도 논란의 여지가 있다(Park et al., 2020). 또한, 제4기 빙하기 동안 북극해의 광범위한 대륙붕 지역, 해저 고원과 해령 등에서 발생한 빙하에 의한 침식이나 교란 등으로 인해 퇴적물 기록에 대한 해석이 쉽지 않다(Adler et al., 2009). 이러한 어려움에도 불구하고 고환경적인 변화를 복원하기 위해서는 퇴적물의 연대 설정이 선행되어야 한다.

연구자는 박사과정 동안 북극해 주요 표층해류 시스템을 구성하는 머포트환류와 북극횡단류의 접경지역인 마카로프 분지의 심해퇴적물의 망간 함량 변화를 전지구 기후 지시자인 산소동위원소비와 대비시킨 지난 약 100만년에 달하는 새로운 연대모델을 제시하였다(Park et al., 2020). 향후 박사후 연수과정에서는 새로운 연대설정 방법이 이루어진 마카로프 분지(Makarov Basin) 심해퇴적물의 고환경적인 지시자들을 이용하여 제4기 서북극해의 고해양학적인 변화와 더불어 북반구 빙하 역사를 복원하고자 한다. 연구자가 제시한 새로운 연대설정 방법은 북극해 퇴적물에서 공통으로 나타나는 망간 변동을 이용하기 때문에 서북극해는 물론 북극해의 다른 지역의 퇴적물에도 적용할 수 있으므로 범용성이 높다. 따라서 인접한 서북극해의 다른 퇴적물에 새로운 연대설정 방법을 적용하여 검증하고 중-동북극해까지 아우르는 연대층서적인 대비를 확립하여 궁극적으로는 제4기 북반구 고위도 고환경 변화의 특성을 이해하고자 한다.

III. 연구개발의 최종 목표 및 내용

전지구 빙하기-간빙기 기후 변화가 심화하는 제4기의 고환경적인 특성을 이해하기 위해 북반구의 극한지인 서북극해 심해퇴적물의 연대층서를 정립하고 북극해의 다른 심해퇴적물에도

같은 연대설정 방법을 적용하여 다양한 고해양학적인 프록시들을 이용하여 북극해의 고해양학적인 변화와 더불어 북반구 고위도 빙하 역사를 복원하고 전지구적인 기후 변화와의 연관성을 비교하고자 한다.

1차년도에는 2차년도에 수행할 예정이던 멘델레예프 해령의 퇴적물 연대층서 재정립 및 서북극해 고해양 변화 복원을 앞서 진행하여 그 결과를 국제학술학회지 Scientific Reports에 투고하여 2차년도에 게재되었다. 2차년도에는 1차년도에 수행 예정이던 서북극해 마카로프 분지 연대층서 정립 및 기원지 지시자를 이용한 빙하 역사 복원과 관련하여 연구 결과 논문을 작성하고 국제학술학회지 Paleooceanography and Paleoclimatology에 투고하여 3차년도에 게재되었다. 3차년도에 수행할 예정이었던 서북극해와 중·동북극해의 연대층서 대비를 통한 북극 고해양 및 빙하 역사 재구성은 퇴적물 분석 자료를 제공할 예정이던 연구자가 자료제공을 번복하여 다른 인근 지역의 발표된 자료를 활용하여 층서대비 및 고환경 복원에 관한 연구를 수행하였고 그중 일부는 3차년도에 게재된 논문에 일부 내용으로 포함되어 있다.

IV. 연구개발결과

2022년 9월 Scientific Reports에 제1저자로 게재한 논문 Increased terrigenous input from North America to the northern Mendeleev Ridge (western Arctic Ocean) since the mid-Brunhes Event는 약 42만 년 전후의 중기 브룬헤스 사건(mid-Brunhes Event; MBE)이 서북극해 심해퇴적물 기록에서 나타남을 확인하였다. 이 사건은 제4기 동안 빙하기-간빙기가 약 41,000년의 주기에서 약 100,000년의 주기가 우세하게 된 이후 가장 뚜렷한 기후 변화 중 하나로, 퇴적물의 지화학 및 광물학적인 고환경 지시자들에서 MBE 이전에 비해 이후에 더욱 뚜렷한 빙하기-간빙기 대비를 확인하였다. MBE 이후 고환경 지시자들의 높은 빙하기-간빙기 변동성은 북미 대륙빙상의 발달에 따른 대량의 육상기원물질 유입과 함께 서북극해의 빙기 냉각화로 인한 해빙의 발달을 지시한다. 이러한 북극지역의 빙권 발달은 제4기 동안 전지구적인 냉각화와 지구기후시스템의 내재적인 양성피드백 효과와 밀접한 연관이 있음을 확인하였다.

2024년 5월 Paleooceanography and Paleoclimatology에 제1저자로 게재한 논문 Cryospheric and oceanographic evolution in the Arctic Makarov Basin since the early Pleistocene revealed by bulk mineral assemblages는 광물 조성 분석을 통해 마카로프 분지 퇴적물의 기원지를 추적하고 새로운 연대 설정에 기반하여 주요 광물들의 시간적인 변화를 복원하였고, 북미 로렌타이드 빙상이 기존에 알려진 것보다 약 15만년 앞선 플라이스토 초기에 북극해 인접 지역에 발달하여 북극해로 육상기원 퇴적물을 공급하였으며 이러한 기작의 약 10만년 주기를 확인함으로써 제4기 동안 전지구 빙하기-간빙기 기후 변화에서 북미 대륙빙상 거동의 중요성을 시사하였다. 또한, 동시베리아 대륙주변부로부터 유입되는 광물(clinopyroxene)의 장기간(약 110만년 전-15만년 전) 강한 10만년 주기를 확인하여 서북극해 지역의 빙하기-간빙기에 따른 해수면 변동과 같은 전지구 기후 변화에 대한 높은 민감도를 강조하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

향후 연구에서는 새로운 연대설정 방법을 기존 방식의 연대설정이 이루어진 북극해의 다른 지역 퇴적물 기록에 적용하여 고환경적인 해석을 통해 북반구 고위도의 제4기 기후 변화를 재구성하고자 한다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Quaternary paleoenvironmental reconstruction in the western Arctic Ocean using novel chronostratigraphy

II. Purpose and Necessity of R&D

Despite advancements in research, such as increased international cooperation and the introduction of icebreakers since the 21st century, chronostratigraphic studies of Quaternary Arctic Ocean sediments remain contentious. This is largely due to the poor preservation of microfossils in deep-sea Arctic Ocean sediments and the difficulty in establishing an age model using oxygen isotopes and paleomagnetism-methods commonly employed in other oceanic sediments-because of post-depositional diagenesis (Polyak et al., 2009). As a result, while radiocarbon dating using planktonic foraminifera microfossils can accurately determine the age of sediments within a few tens of centimeters of the surface, corresponding to the Holocene and the last glacial period in deep-sea sediments of the Western Arctic Ocean, the age estimation of older records has remained controversial until recently (Park et al., 2020). Furthermore, interpreting sediment records is challenging due to glacial erosion and disturbances on the continental shelf, submarine plateaus, and mid-ocean ridge areas of the Arctic Ocean during Quaternary glacial periods (Adler et al., 2009). Despite these difficulties, accurate sediment dating is crucial for reconstructing paleoenvironmental changes.

A new age model spanning the past 1 million years has been proposed by comparing manganese content variations in deep-sea sediments from the Makarov Basin-a border area between the Beaufort Gyre and the Transpolar Drift, which form the main surface current systems of the Arctic Ocean-with oxygen isotope ratios, a key indicator of global climate (Park et al., 2020). This new dating method, developed in the Makarov Basin, will be used to analyze paleoenvironmental indicators in deep-sea sediments to reconstruct paleoceanographic changes in the western Arctic Ocean during the Quaternary, as well as the history of Northern Hemisphere glaciation. The new dating method is highly versatile, as it relies on manganese fluctuations commonly found in Arctic Ocean sediments, making it applicable not only to the western Arctic Ocean but to other regions of the Arctic as well. Therefore, this method will be applied to

adjacent sediments in the western Arctic Ocean for further verification and to establish a chronostratigraphic comparison that spans the central and eastern Arctic Oceans, ultimately providing a clearer understanding of Quaternary high-latitude paleoenvironmental changes in the Northern Hemisphere.

III. Objectives and contents of R&D

To understand the paleoenvironmental characteristics of the Quaternary, when global glacial-interglacial climate changes intensified, a chronostratigraphy of deep-sea sediments in the Western Arctic Ocean, an extreme region in the Northern Hemisphere, will be established. The same dating method will then be applied to other deep-sea sediments in the Arctic Ocean to reconstruct paleoceanographic changes and the history of high-latitude glaciers in the Northern Hemisphere, using various paleoceanographic proxies and comparing these with global climate changes.

In the first year, the chronostratigraphic reconstruction of the Mendeleev Ridge and the reconstruction of paleoceanographic changes in the Western Arctic Ocean-initially planned for the second year-were completed ahead of schedule, and the results were submitted to the international journal *Scientific Reports*, with publication in the second year. During the second year, a research paper on the chronostratigraphic reconstruction of the Makarov Basin in the Western Arctic Ocean and the reconstruction of glacial history using a source indicator-originally scheduled for the first year-was completed and submitted to *Paleoceanography and Paleoclimatology*, with publication in the third year. In the third year, the planned reconstruction of Arctic paleoceanography and glacial history through a chronostratigraphic comparison of the western, central, and eastern Arctic Oceans was altered. A researcher who was expected to provide sediment analysis data opted instead to use published data from nearby regions. This data was then utilized for stratigraphic comparison and paleoenvironmental reconstruction, some of which was included in the paper published in the third year.

IV. R&D Results

The paper titled "Increased Terrigenous Input from North America to the Northern Mendeleev Ridge (Western Arctic Ocean) Since the Mid-Brunhes Event," published as first author in *Scientific Reports* in September 2022, confirms that the Mid-Brunhes Event (MBE), around 420,000 years ago, is evident in the deep-sea sediment records of the western Arctic Ocean. This event marks one of the most significant climate shifts during the Quaternary, when the glacial-interglacial cycles became prominent in the 41,000-year cycle. Geochemical and mineralogical paleoenvironmental indicators of the sediments show a stronger glacial-interglacial contrast after the MBE compared to before. The high variability

in these indicators post-MBE reflects the expansion of sea ice due to glacial cooling in the Western Arctic Ocean, alongside an increased influx of terrestrial material caused by the growth of the North American continental ice sheet. This study confirms that the development of the Arctic ice sheet is closely linked to global cooling and the positive feedback mechanisms of Earth's climate system during the Quaternary.

The paper "Cryospheric and Oceanographic Evolution in the Arctic Makarov Basin Since the Early Pleistocene Revealed by Bulk Mineral Assemblages," published as first author in *Paleoceanography and Paleoclimatology* in May 2024, traces the origins of Makarov Basin sediments through mineral composition analysis. It reconstructs the chronological changes of major minerals based on a new age model and reveals that the Laurentide Ice Sheet began to develop in the region adjacent to the Arctic Ocean approximately 150,000 years earlier than previously thought, supplying terrestrial sediments to the Arctic Ocean. This study also confirms a roughly 100,000-year cycle in this process, highlighting the critical role of the North American continental ice sheet in driving global glacial-interglacial climate changes during the Quaternary.

V. Application Plans of R&D Results

In future studies, we plan to apply the new dating method to sediment records from other regions of the Arctic Ocean where conventional dating methods have been used to reconstruct Quaternary climate changes in high-latitude Northern Hemisphere through paleoenvironmental interpretation.

C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction.....	11
Chapter 2 Process and content of the R&D project	12
Chapter 3 Results of the R&D project and degree of goal achievement.....	13
Chapter 4 R&D results and degree of contribution to related fields.....	15
Chapter 5 Application Plans of R&D Results.....	16
Chapter 6 References.....	17



목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요.....	11
제 2 장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용.....	12
제 3 장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도.....	13
제 4장 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도.....	15
제 5 장 연구개발성과 및 활용 계획.....	16
제 6 장 참고문헌.....	17



제 1 장 연구개발과제의 개요

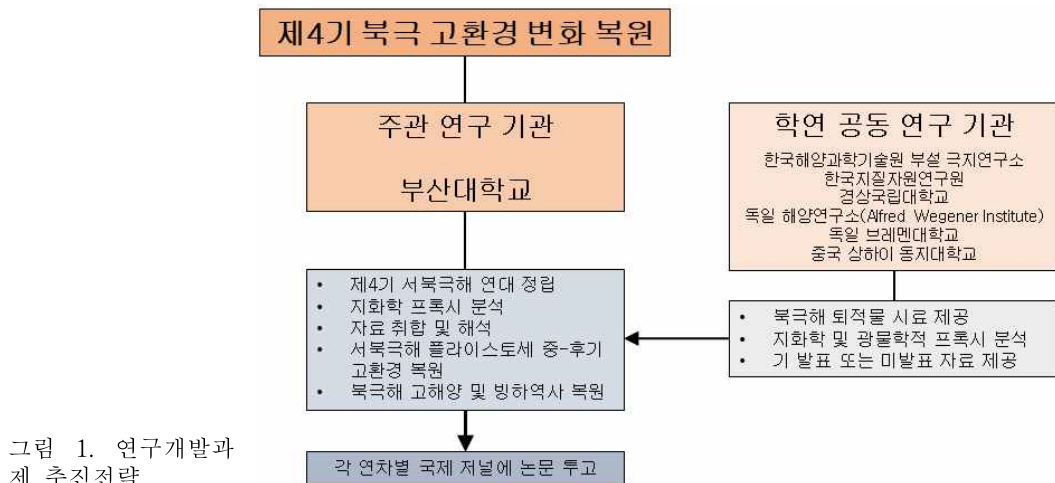
고기후-고환경 기록은 과거와 현재의 지구 기후 시스템에 대한 이해와 더불어 미래의 기후 변화를 예측하는 데 있어 중요한 역할을 한다. 최근에 북극해에서는 해빙 및 빙하의 후퇴나 연안 침식, 영구동토층 붕괴 등과 같은 대규모로 진행 중인 환경변화가 관측되었으며 전지구 규모의 기후 변화에 대한 영향을 증폭시키는 중요한 기후 피드백 메커니즘이 확인되었다(Serreze and Barry, 2011). 북극해의 해빙과 주변 육상의 빙하는 이러한 북극 증폭(Arctic amplification) 프로세스에서 해양, 대기, 육지와 더불어 중요한 요소이다(Fyke et al., 2018). 고기후 자료와 모델링 결과에 따르면 육상 빙하와 해빙은 온도의 상승과 하강에 따라 감소와 성장으로 기온 변화를 증폭시키는 동시에 해수면 변화를 유발한다(Bintanja et al., 2005; Vermeer and Rahmstorf, 2009). 특히 전지구적인 냉각이 가속화되었던 제4기 동안은 북반구의 빙하가 전체 빙하의 거동에서 핵심적인 역할을 하였다(Ehler and Gibbard, 2007; Bintanja and Van de Wal, 2008). 따라서 북반구 빙하작용의 중심지인 북미와 유라시아 대륙으로 둘러싸인 북극해의 심해저 퇴적물은 아북극 지역인 북태평양이나 북대서양에서의 퇴적물 기록보다 더욱 정확하고 직접적인 과거 빙하 역사를 보존하고 있어 고환경적인 연구의 필요성이 대두된다.

제4기 북극해 퇴적물에 대한 연대측서학적인 연구는 21세기 이후의 국제적인 협력과 쇄빙 연구선의 도입과 같은 연구 제반 사항의 향상에도 불구하고 여전히 논란의 여지가 있다. 이는 북극해 심해퇴적물은 미화석의 보존이 낮고 퇴적 후 속성작용으로 다른 대양의 해양퇴적물에서 일반적으로 사용되는 산소동위원소와 고지자기를 이용한 연대모델 수립이 어렵기 때문이다(Polyak et al., 2009). 이러한 이유로 서북극해 심해퇴적물에서 홀로세와 마지막 빙하기에 해당되는 표층 수십 cm 이내의 연대는 부유성 유공충 미화석을 이용하여 방사성 탄소연대 측정을 통해 비교적 정확하게 측정되는 반면에 그보다 오래된 기록에 대한 연대추정은 최근까지도 논란의 여지가 있다(Park et al., 2020). 또한, 제4기 빙하기 동안 북극해의 광범위한 대륙붕 지역, 해저 고원과 해령 등에서 발생한 빙하에 의한 침식이나 교란 등으로 인해 퇴적물 기록에 대한 해석이 쉽지 않다(Adler et al., 2009). 이러한 어려움에도 불구하고 고환경적인 변화를 복원하기 위해서는 퇴적물의 연대 설정이 선행되어야 한다. 본 연구자는 박사과정 동안 북극해 주요 표층해류 시스템을 구성하는 버포트환류와 북극횡단류의 접경지역인 마카로프 분지의 심해퇴적물의 망간 함량 변화를 전지구 기후 지시자인 산소동위원소비와 대비시킨 지난 약 100만년에 달하는 새로운 연대모델을 제시하였다(Park et al., 2020). 박사후 연수과정에서는 새로운 연대설정 방법이 이루어진 마카로프 분지(Makarov Basin) 심해퇴적물의 고환경적인 지시자들을 이용하여 제4기 서북극해의 고해양학적인 변화와 더불어 북반구 빙하 역사를 복원하고자 한다. 연구자가 제시한 새로운 연대설정 방법은 북극해 퇴적물에서 공통으로 나타나는 망간 변동을 이용하기 때문에 서북극해는 물론 북극해의 다른 지역의 퇴적물에도 적용할 수 있으므로 범용성이 높다. 따라서 인접한 서북극해의 다른 퇴적물에 새로운 연대설정 방법을 적용하여 검증하고 중-동북극해까지 아우르는 연대측서적인 대비를 확립하여 궁극적으로는 제4기 북반구 고위도 고환경 변화의 특성을 이해하고자 한다.

제 2 장 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

제 1 절 당초 연구개발과제 추진전략 및 추진체계

연구자가 박사과정 동안 진행하였던 서북극해 마카로프 분지 퇴적물의 연대층서 연구는 궁극적으로 서북극 고해양환경 변화 및 빙하 역사 복원을 위한 것으로 박사과정 동안 분석·획득한 자료를 활용하는 연장 적이며 더욱 심도 있는 연구를 박사후 연수과정 동안 수행하고자 한다. 본 연구과제는 퇴적물의 새로운 연대층서를 이용하여 고환경적인 역사를 복원하는 것이기 때문에 연구대상인 해양퇴적물의 추가적인 획득 없이도 기발표된 자료를 활용하여 재해석이 가능한 장점이 있다. 추가로 연구자가 박사과정 연수생 신분으로 근무하였던 극지연구소 및 공동 연구기관으로부터 서북극해와 동북극해의 해양퇴적물 및 분석 자료를 제공받아 활용할 예정이다.



제 2 절 수행 과정 및 수행 내용

1차년도에는 2차년도에 수행할 예정이던 멘텔레예프 해령의 퇴적물 연대층서 재정립 및 서북극해 고해양 변화 복원을 앞서 진행하여 그 결과를 국제학술학회지 Scientific Reports에 투고하여 2차년도에 게재되었다. 2차년도에는 1차년도에 수행 예정이던 서북극해 마카로프 분지 연대층서 정립 및 기원지 지시자를 이용한 빙하 역사 복원과 관련하여 연구 결과 논문을 작성하고 국제학술학회지 Paleoceanography and Paleoclimatology에 투고하여 3차년도에 게재되었다. 3차년도에 수행할 예정이었던 서북극해와 중·동북극해의 연대층서 대비를 통한 북극 고해양 및 빙하 역사 재구성은 퇴적물 분석 자료를 제공할 예정이던 연구자가 자료제공을 반복하여 다른 인근 지역의 발표된 자료를 활용하여 층서대비 및 고환경 복원에 관한 연구를 수행하였고 그중 일부는 3차년도에 게재된 논문에 일부 내용으로 포함되어 있다. 3차년도 초기인 2023년 10월에 부산대학교에서 한국해양과학기술원 부설 극지연구소로 이직 후 연구개발과제를 이관하여 계속 수행하였다.

제 3 장 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

제 1 절 연구수행 결과

2022년 9월 Scientific Reports에 제1저자로 게재한 논문 Increased terrigenous input from North America to the northern Mendeleev Ridge (western Arctic Ocean) since the mid-Brunhes Event는 약 42만 년 전후의 중기 브룬헤스 사건(mid-Brunhes Event; MBE)이 서북극해 심해퇴적물 기록에서 나타남을 확인하였다. 이 사건은 제4기 동안 빙하기-간빙기가 약 41,000년의 주기에서 약 100,000년의 주기가 우세하게 된 이후 가장 뚜렷한 기후 변화 중 하나로, 퇴적물의 지화학 및 광물학적인 고환경 지시자들에서 MBE 이전에 비해 이후에 더욱 뚜렷한 빙하기-간빙기 대비를 확인하였다(그림 2). MBE 이후 고환경 지시자들의 높은 빙하기-간빙기 변동성은 북미 대륙빙상의 발달에 따른 대량의 육상기원물질 유입과 함께 서북극해의 빙기 냉각화로 인한 해빙의 발달을 지시한다(그림 3). 이러한 북극지역의 빙권 발달은 제4기 동안 전지구적인 냉각화와 지구기후시스템의 내재적인 양성피드백 효과와 밀접한 연관이 있음을 확인하였다.

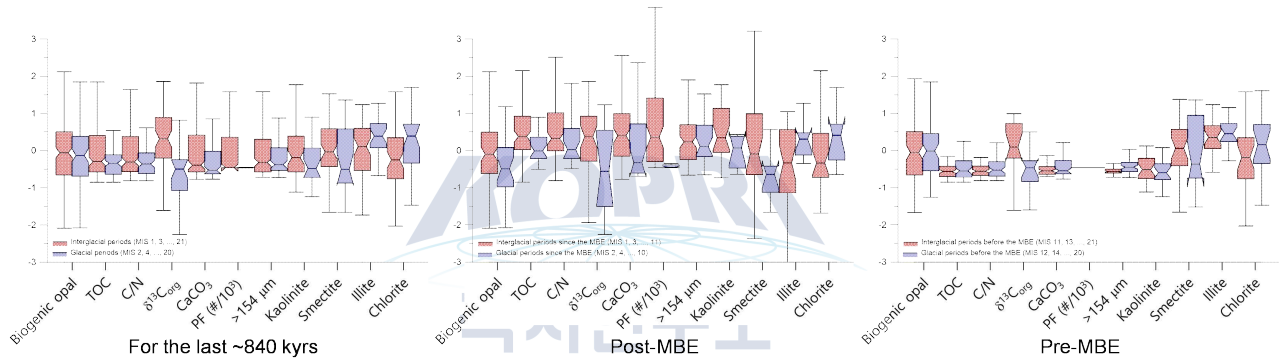


그림 2. Box-Whisker plots showing the normalized intensity values of geochemical (biogenic opal, TOC, C/N, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, and CaCO_3), micropaleontological (planktonic foraminifera: P.F.), and mineralogical (kaolinite, smectite, illite, and chlorite) data of core ARC5-MA01 for (a) the last ~ 840 kyrs, (b) the post-MBE, and (c) the pre-MBE, respectively. Interquartile ranges multiplied by a factor of 1.5 are indicated as error bars. Red and blue boxes represent the interglacial and glacial periods, respectively.

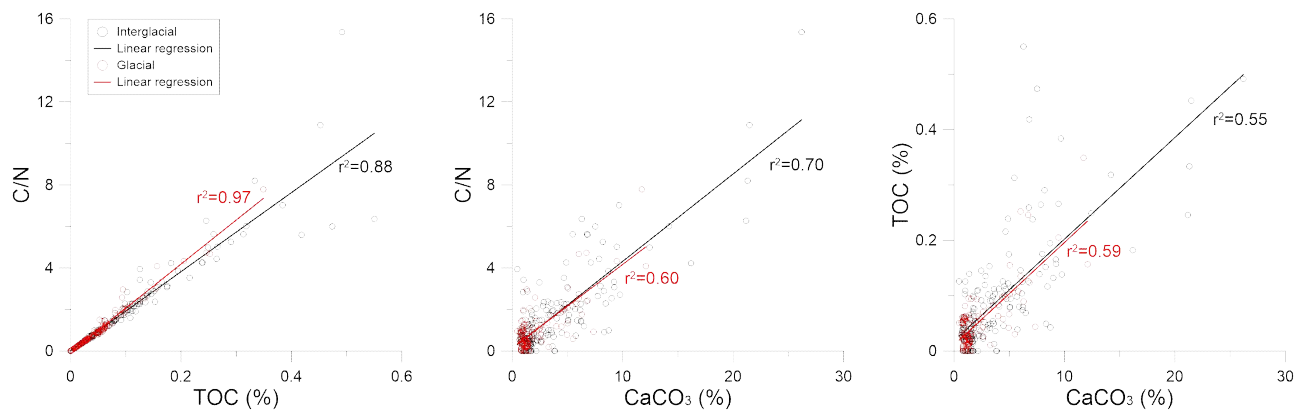


그림 3. Cross-plots between the geochemical results of core ARC5-MA01. (a) C/N vs. TOC, (b) C/N vs. CaCO_3 , and (c) TOC vs. CaCO_3 with their correlation coefficient (r^2) during the glacial (red) and interglacial (black) periods, respectively.

2024년 5월 Paleoclimatology and Paleogeography에 제1저자로 게재한 논문 Cryospheric and oceanographic evolution in the Arctic Makarov Basin since the early Pleistocene

revealed by bulk mineral assemblages는 광물 조성 분석을 통해 마카로프 분지 퇴적물의 기원지를 추적하고 새로운 연대 설정에 기반하여 주요 광물들의 시간적인 변화를 복원하였고, 북미 로렌타이드 빙상이 기존에 알려진 것보다 약 15만년 앞선 플라이스토 초기에 북극해 인접 지역에 발달하여 북극해로 육상기원 퇴적물을 공급하였으며(그림 4) 이러한 기작의 약 10만년 주기를 확인함으로써 제4기 동안 전지구 빙하기-간빙기 기후 변화에서 북미 대륙빙상 거동의 중요성을 시사하였다(그림 5). 또한, 동시베리아 대륙주변부로부터 유입되는 광물 (clinopyroxene)의 장기간(약 110만년 전-15만년 전) 강한 10만년 주기를 확인하여 서북극해 지역의 빙하기-간빙기에 따른 해수면 변동과 같은 전지구 기후 변화에 대한 높은 민감도를 강조하였다(그림 5).

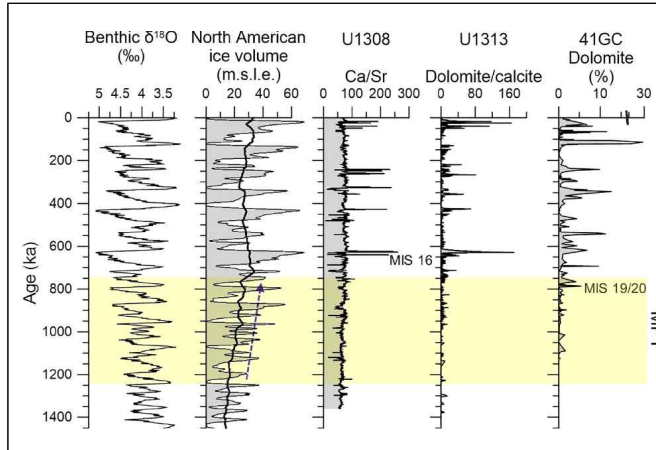


그림 4. Ca/Sr of U1308 (Hodell et al., 2008) and dolomite/calcite of U1313 (Naafs et al., 2013) in the North Atlantic and dolomite content of core 41GC in the Arctic Makarov Basin (see Figure 1 for locations) along with global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stack (Lisiecki & Raymo, 2005) and reconstructed contributions to sea level of North American ice volume with its 200.Kyr running average (m.s.l.e., m sea level equivalent; Bintanja & Van de Wal, 2008). The first occurrence of dolomite or dolomite indicators is represented by corresponding marine isotope stages (MIS).

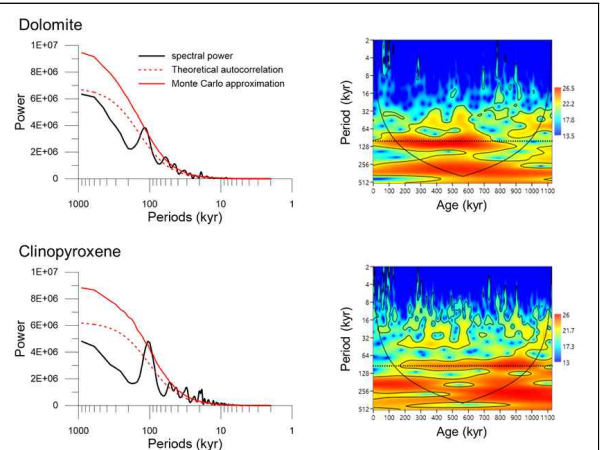


그림 5. The results of REDFIT spectral analyses (left) and continuous wavelet transform (right) for dolomite (upper) and clinopyroxene (lower) of core 41GC. The significance level ($p = 0.05$) and the cone of influence are represented by solid lines in the right panel. The dotted lines represent the eccentric period ($\sim 100\text{-Kyr}$).

제 2 절 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 서북극해 마카로프 분지 연대 층서 정립 및 기원지 지시자를 이용한 빙하 역사 복원	○ 마카로프 분지 인근 지역의 층서 자료 정리, 새 연대 층서를 적용한 퇴적물의 광물 정량 분석 결과 해석, 논문 작성 및 투고	○ 논문 작성 및 투고 3
○ 멘델레예프 해령의 퇴적물 연대 층서 재정립 및 서북극해 고해양 변화 복원	○ 멘델레예프 해령의 층서 자료 해석, 지화학 및 광물학적 자료 획득 및 해석, 새 연대 층서 적용, 논문 작성 및 투고	○ 논문 작성 및 투고 3
○ 서북극해와 중동북극해의 연대 층서 대비를 통한 북극 고해양 및 빙하 역사 재구성	○ 해양 퇴적물 자료 획득, 서북극해와 중·동북극해의 층서 대비, 지역별 고환경적 지시자들의 변화 특성 비교, 논문 작성 및 투고	○ 이 중 2
		○ 편 개 재 완료

제 4 장 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

기존의 서북극해 퇴적물은 석회질 미화석의 방사성 탄소 연대측정을 통해 비교적 정확하게 알려진 약 45,000년 전보다 오래된 시기에 대하여 연대가 불분명하다. 따라서 이보다 이전 시기의 제4기 서북극해 퇴적물의 연대 층서는 주로 퇴적물의 색이나 입도와 같은 암층서적인 특징을 기반으로 잠정적으로 이루어져 왔다. 연구자가 새롭게 제시한 연대설정 방법은 서북극해에서 보편적으로 사용되었던 암층서 대비와 함께 빙하기-간빙기 주기에 따라 변동하는 퇴적물의 망간을 전지구 기후 변화 지시자인 산소동위원소비에 대비시켜 새로운 연대모델을 제시하여 기존 연구들과의 차이점을 보인다. 이 과정에서 서북극해 화학적 프록시로서는 최초로 매트랩 기반의 Match 소프트웨어를 활용하였고 새로운 연대모델 제시는 물론 과거 서북극해 인근 대륙빙상의 거동에 대한 새로운 해석을 제안하였다. 또한, 연대모델 설정 방법을 수립함에 따라 서북극해 제4기 후속연구들에 대하여 더욱 손쉬운 접근을 가능케 하였다. 또한, 마카로프 분지 퇴적물의 새로운 연대층서는 연구자가 제시한 방법에 고지자기 복각의 변화를 해석하여 도출된 지자기연대를 추가하여 보완한 연대모델을 사용하여 기존에 통용되던 가설에 기반을 둔 연대모델들이 설명하지 못한 북극해의 퇴적학적인 의문을 해결함과 동시에 과거 환경변화에 대한 보다 정확한 정보를 제공할 수 있는 잠재성을 가지고 있다.



제 5 장 연구개발성과 및 활용 계획

제 1 절 연구성과

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A6A3A01086717	202209	Increased terrigenous input from North America to the northern Mendelev Ridge (western Arctic Ocean) since the mid-Brunhes Event	Park, Kwangkyu; Wang, Rujian; Xiao, Wenshen; Polyak, Leonid; Cho, Hyen Goo; Khim, Boo-Keun;	SCI	SCIENTIFIC REPORTS	12(1)	국외	SCI등재	4.997	예	25
2021R1A6A3A01086717	202405	Cryospheric and Oceanographic Evolution in the Arctic Makarov Basin Since the Early Pleistocene Revealed by Bulk Mineral Assemblages	Park, Kwangkyu; Nam, Seung-Il; Vogt, Christoph; Frederichs, Thomas; Kim, Jung-Hyun; Khim, Boo-Keun;	SCI	PALEOCEANOGRAPHY AND PALEOCLIMATOLOGY	39(5)	국외	SCI등재	3.5	예	80

제 2 절 연구성과 활용계획

새로운 연대설정 방법을 기존 방식의 연대설정이 이루어진 북극해의 다른 지역 퇴적물 기록에 적용하여 고환경적인 해석을 통해 북반구 고위도의 제4기 기후 변화를 재구성하고자 한다. 연구자는 부산대학교 해양연구소에서 본 연구과제를 수행하였고 3년 차 초반 2023년 10월부터 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 연수연구원으로 북극 해저 조사와 관련된 해양수산부 연구과제에 참여하여 후속 연구를 진행할 수 있는 북극해 퇴적물 확보가 가능한 상황에 있다. 하지만 참여하고 있는 과제는 북극해 물리탐사에 집중되어 있고 해저퇴적물 채취에 국한되어 있으므로 고환경적인 연구를 위해 추가적인 후속 연구과제가 필요하다.

제 6 장 참고문헌

- Serreze, M. C., & Barry, R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change*, 77, 85–96.
- Fyke, J., Sergienko, O., Löfverström, M., Price, S., & Lenaerts, J. T. (2018). An overview of interactions and feedbacks between ice sheets and the Earth system. *Reviews of Geophysics*, 56, 361–408.
- Bintanja, R., Van De Wal, R. S., & Oerlemans, J. (2005). Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. *Nature*, 437(7055), 125–128.
- Vermeer, M., & Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the national academy of sciences*, 106, 21527–21532.
- Ehlers, J., & Gibbard, P. L. (2007). The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quaternary International*, 164, 6–20.
- Bintanja, R., & Van de Wal, R. S. W. (2008). North American ice-sheet dynamics and the onset of 100,000-year glacial cycles. *Nature*, 454(7206), 869–872.
- Polyak, L., Bischof, J., Ortiz, J.D., Darby, D.A., Channell, J.E.T., Xuan, C., Kaufman, D.S., Lovlie, R., Schneider, D.A., Eberl, D.D., Adler, R.E., & Council, E.A., (2009). Late Quaternary stratigraphy and sedimentation patterns in the western Arctic Ocean. *Global and Planetary Change*, 68, 5–17.
- Park, K., Kim, J. H., Asahi, H., Polyak, L., Khim, B. K., Schreck, M., Niessen, F., Kong, G. S., & Nam, S. I. (2020). Cyclostratigraphic age constraining for Quaternary sediments in the Makarov Basin of the western Arctic Ocean using manganese variability. *Quaternary Geochronology*, 55, 101021.
- Adler, R.E., Polyak, L., Ortiz, J.D., Kaufman, D.S., Channell, J.E., Xuan, C., Grotoli, A.G., Sell.en, E., Crawford, K.A. (2009). Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved late quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503–8JPC, Mendeleev Ridge. *Glob. Planet. Chang.* 68, 18.29.
- Hodell, D. A., Channell, J. E., Curtis, J. H., Romero, O. E., & R?hl, U., 2008, Onset of "Hudson Strait" Heinrich events in the eastern North Atlantic at the end of the middle Pleistocene transition (~640 ka)? *Paleoceanography*, 23, PA4218, <https://doi.org/10.1029/2008PA001591>.
- Naafs, B. D. A., Hefter, J., Ferretti, P., Stein, R., & Haug, G. H., 2011. Sea surface temperatures did not control the first occurrence of Hudson Strait Heinrich Events during MIS 16. *Paleoceanography*, 26(4), PA4201, doi:10.1029/2011PA002135.
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene?Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Park, K., Wang, R., Xiao, W., Polyak, L., Cho, H. G., & Khim, B. K. (2022). Increased terrigenous input from North America to the northern Mendeleev Ridge (western Arctic Ocean) since the mid-Brunhes Event. *Scientific reports*, 12, 15189.
- Park, K., Nam, S. I., Vogt, C., Frederichs, T., Kim, J. H., & Khim, B. K. (2024). Cryospheric and oceanographic evolution in the Arctic Makarov Basin since the early Pleistocene revealed by bulk mineral assemblages. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 39, e2023PA004747.