

TSPM19030-034-12

퇴적물 포집장치와 시추코어를 이용한 남극해
고환경 복원

Paleoenvironmental reconstruction of the
Southern Ocean based on sediment trap and
sediment cores



부산대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 퇴적물을 활용한 지난 5백만년간의 남극 고환경 변화 복원” 과제의 위탁연구 “퇴적물 포집장치와 시추코어를 이용한 남극해 고환경 복원” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 이 재 일
위탁연구기관명 : 부 산 대 학 교
위탁연구책임자 : 김 부 근
위탁참여연구원 : 하 상 범
“ : 이 종 민

보고서 초록

위탁연구과제명	퇴적물 포집장치와 시추코아를 이용한 남극해 고환경 복원				
위탁연구책임자	김 부 근	해당단계 참여연구원수	3	해당단계 연구비	30,000,000
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	56
<ul style="list-style-type: none"> - 로스해 퇴적물 침강입자의 총 질량플럭스와 생규소플럭스는 뚜렷한 계절변화를 보여줌 - 생규소플럭스의 계절변화는 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$와 $\delta^{15}\text{N}$값과 더불어 규조플럭스에 의해 확인됨 - 탄산염플럭스와 유기탄소플럭스도 유사한 계절적 변화를 보임 - 모든 플럭스는 격년 변화에 의해 특징됨 - 로스해 코아 KI-13-GC2는 빙운퇴적물을 포함한 실트질 머드에서 모래 크기의 입자로 구성됨 - 점토광물 조성은 일라이트(59.1~76.2%) 함량이 가장 높고, 다음으로 녹니석(12.4~21.4%), 카올리나이트(4.1~11.6%), 그리고 스�멕타이트(1.2%~22.6%)의 순서로 나타남 - 일라이트와 녹니석은 로스해 남쪽에 위치한 남극중단산맥의 기반암(변성암 및 화강암)에서 기원하고, 카올리나이트는 로스 빙상 아래의 남극 대륙에 분포하는 퇴적암에서 기원되는 것으로 추정됨 - 스�멕타이트의 기원지는 로스해 서쪽에 위치한 빅토리아 랜드 연안의 맥머도 화산군으로 판단됨 - 점토광물 조성의 함량은 빙하기와 간빙기에 따라, 일라이트와 카올리나이트는 빙하기와 간빙기 사이에 큰 변화가 없지만, 빙하기에 녹니석 함량은 증가하고 스�멕타이트 함량은 감소함 - 빙하기와 간빙기에 로스해 중앙분지로 공급되는 점토광물의 기원지는 큰 변화가 없지만, 로스 빙상의 성장과 후퇴에 의해 점토광물의 운반 경로와 기작이 빙하기와 간빙기 사이에 다르게 나타남 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극해, 고환경, 시추코아, 퇴적물 포집장치			
	영 어	Southern Ocean, Paleoenvironment, Sediment core, Sediment trap			

요 약 문

I. 제 목

- 퇴적물 포집장치와 시추코어를 이용한 남극해 고환경 복원

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 퇴적물 포집장치를 이용한 수층의 입자 특성을 기초로 시추코어 퇴적물의 특성 변화를 이용하여 남극해 고해양 환경을 복원

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 로스해 퇴적물 포집장치의 입자 특성 파악
- 로스해 시추코어 퇴적물의 특성 변화 파악

IV. 연구개발결과

- 로스해 퇴적물 침강입자의 총 질량플럭스와 생규소플럭스는 뚜렷한 계절변화를 보여줌
- 생규소플럭스의 계절변화는 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값과 더불어 규조플럭스에 의해 확인됨
- 탄산염플럭스와 유기탄소플럭스도 유사한 계절적 변화를 보임
- 모든 플럭스는 격년 변화에 의해 특징됨
- 로스해 코어 KI-13-GC2는 빙운퇴적물을 포함한 실트질 머드에서 모래 크기의 입자로 구성됨
- 점토광물 조성은 일라이트(59.1~76.2%) 함량이 가장 높고, 다음으로 녹니석

(12.4~21.4%), 카올리나이트(4.1~11.6%), 그리고 스펙타이트(1.2%~22.6%)의 순서로 나타남

- 일라이트와 녹니석은 로스해 남쪽에 위치한 남극중단산맥의 기반암(변성암 및 화강암)에서 기원하고, 카올리나이트는 로스 빙상 아래의 남극 대륙에 분포하는 퇴적암에서 기원되는 것으로 추정됨
- 스펙타이트의 기원지는 로스해 서쪽에 위치한 빅토리아 랜드 연안의 맥머도 화산군으로 판단됨
- 점토광물 조성의 함량은 빙하기와 간빙기에 따라, 일라이트와 카올리나이트는 빙하기와 간빙기 사이에 큰 변화가 없지만, 빙하기에 녹니석 함량은 증가하고 스펙타이트 함량은 감소함
- 빙하기와 간빙기에 로스해 중앙분지로 공급되는 점토광물의 기원지는 큰 변화가 없지만, 로스 빙상의 성장과 후퇴에 의해 점토광물의 운반 경로와 기작이 빙하기와 간빙기 사이에 다르게 나타남

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극해 다른 지역의 심부시추 사업을 통해 획득된 자료의 장기 역사의 해석을 위한 기초자료로 활용
- 국제학술지 논문 작성을 위한 자료로 활용

S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

I. Title

- Paleoenvironmental reconstruction of the Southern Ocean based on sediment trap and sediment cores

II. Purpose and Necessity of R&D

- To reconstruct the paleoceanographic environment in the Southern Ocean based on the sediment trap particles sinking through the water column and on the core sediment properties

III. Contents and Extent of R&D

- To reveal the particle properties of sediment traps in the Ross Sea
- To reveal the core sediment properties in the Ross Sea

IV. R&D Results

- Total mass and biogenic opal flux of sediment trap particles show the distinct seasonal change; high during March and April and low during the rest of year.
- The seasonality of biogenic opal flux was supported by the $\delta^{13}\text{C}$ and δ

¹⁵N values of organic particles as well as the diatom flux.

- Variation of CaCO₃ and organic carbon flux follows the similar seasonal pattern.

- All these flux data are characterized by the inter-annual variation

- The sediments of a gravity core KI-13-GC2 mostly consist of silty mud to sand with ice rafted debris.

- Among the fine-grained clay mineral compositions, illite is highest(59.1 ~ 76.2%), followed by chlorite(12.4 ~ 21.4%), kaolinite(4.1 ~ 11.6%), and smectite(1.2% ~ 22.6%).

- Illite and chlorite originated from the Transantarctic mountains (metamorphic rocks and granitic rocks) situated to the south of the Ross Sea, whereas kaolinite might be supplied from the sedimentary rocks of Antarctic continent underneath the ice sheet.

- The provenance of smectite was considered as McMurdo volcanic group around the Victoria Land in the western part of the Ross Sea.

- Chlorite content was higher and smectite content was lower during the glacial periods, although illite and kaolinite contents are almost consistent between the glacial and interglacial periods.

- Although the source areas of the clay minerals in the Central Basin have not changed significantly between the interglacial and glacial periods, the transport pathways and delivery mechanism of the clay minerals were different between the glacial and interglacial periods in response to the growth and retreat of Ross Ice Sheet in the Ross Sea.

V. Application Plans of R&D Results

- Application to the interpretation on the long-term history of ice sheet evolution by the deep-sea drilling data in the other regions of the Southern Ocean

- Utilization to prepare for the international scientific paper

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



제 1 장 서론

남극 대륙의 약 97%는 남극 빙상(Antarctic Ice Sheet)에 의해 덮여 있으며, 해양으로 공급되는 얼음의 주요 저장고 역할을 한다(Anderson et al., 1984). 현재 남극 빙상은 1,360만 km²의 면적과 평균 2 km의 두께를 유지하고 있으며(Barker et al., 1999), 남극종단산맥(Transantarctic Mountains)을 기준으로 서남극 빙상(WAIS)과 동남극 빙상(EAIS)으로 구분된다. 남극 빙상은 에오세-올리고세의 경계에서 형성된 이후 전 지구적으로 기후의 냉각과 함께 발달하였다(Franke and Ehrmann., 2010). 남극 빙상의 소멸은 빙산(iceberg)의 생성으로 인한 빙하 분리(calving)가 주요 원인이고 용빙수에 의한 소멸은 부차적인 원인이며 지역적으로 10~28%의 비율을 차지한다(Rignot et al., 2013). 이러한 남극 빙상의 성장과 소멸은 전 지구적 해수면 변화, 대양 순환 그리고 심층수의 형성과 매우 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 지구 기후를 조절하는 데 있어 가장 중요한 요인으로 작용한다(Abreu and Anderson, 1998; Barker et al., 1999; Mackensen, 2004).

서남극 빙상은 해양성 빙상으로 일반적으로 기복이 심한 기반암 위에 놓여 있으며 빙상의 대부분은 해수면 아래에 잠겨 있다(Drewry, 1983). 빙상의 이동속도는 동남극 빙상보다 상대적으로 빠르며, 빙상의 이동은 대부분 빙하류(ice stream)의 형태로 나타난다(Anderson et al., 2002). 동남극 빙상은 육성 빙상이며, 지역적으로 빙저 분지가 해수면 아래에 위치하지만, 대부분은 해수면 위에 기반이 위치한다. 동남극 빙상은 고도가 최고 3200~4000 m로 서남극 빙상에 비해 높은 것이 특징이다(Drewry, 1983). 로스해(Ross Sea)에는 로스빙붕(Ross ice shelf)이 발달하고 빙붕의 북쪽으로 대륙붕이 넓게 펼쳐져 있다(Fig. 1). 로스해 대륙사면은 이셀린 퇴(Iselin Bank)를 경계로 동쪽과 서쪽으로 지형적 특징이 구분된다. 동쪽 대륙사면은 경사가 급하고 드물게 해저 협곡이 발달하는 반면, 서쪽 대륙사면은 경사는 완만하지만 많은 해저 협곡이 발달하는 복잡한 형태를 하고 있다(Davey, 1981). 로스해의 심해역 경계는 동쪽으로는 로스해 환류를 포함하는 지역까지 그리고 북쪽으로는 적어도 겨울에 형성되는 해빙의 가장자리까지로 정의된다(Budillon et al., 2011). 로스해에는 웨델해 다음으로 기후변화에 중요한 역할을 하는 많은 양의 남극저층수(Antarctic Bottom Water)가 형성된다(Budillon et al., 2011).

기후변화에 따른 로스 빙상의 발달과 후퇴와 관련된 퇴적환경 및 고환경 변화 연구들은 대부분 로스해의 대륙붕 지역에 제한되었고 대륙사면 지역의 연구는 매우 미비하다. 특히 퇴적물의 기원지를 추정하는 점토광물 자료는 로스해 대륙붕

남서쪽의 맥머도 화산군 주변부에만 제한적으로 발표되었고, 대륙붕의 다른 지역 및 대륙사면에서의 점토광물 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 로스해의 동쪽 대륙사면에서 획득한 코어의 점토광물 조성 변화를 통해 로스 빙상의 전진과 후퇴에 의한 대륙사면의 퇴적물 특성과 기원지 변화를 복원하고자 한다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

로스 빙붕은 세계에서 가장 큰 규모이며, 빙붕의 얼음은 동남극 빙상이 로스해의 서쪽 주변부에서 분출빙하의 형태로 공급되지만(Denton and Hughes, 2002), 서남극 빙상에서 직접적인 빙하류의 형태가 가장 많은 얼음을 공급한다(Bindschadler, 1998). 로스 빙상(Ross Ice Sheet)은 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum)동안 74°S까지 성장한 뒤 현재의 위치까지 후퇴하였다(Licht et al., 1996; Shipp et al., 1999; Howat and Domack, 2003). 기후 변화에 따른 빙상의 성장과 후퇴는 로스해 대륙붕의 환경에 큰 영향을 끼쳤으며, 이에 따라 대륙붕에서 발견되는 퇴적층들은 Domack et al. (1999)에 의해 다음과 같이 정리되었다. i) 빙저 환경(subglacial setting)을 지시하는 괴상의 다이어믹타이트(diamictite), ii) 그라운드 라인(grounding line)에서부터 빙상이 후퇴하기 시작할 때, 해저면에서 빙상이 떨어진 빙붕 아래의 환경을 반영하는 덜 다져진 사질-니질의 자갈로 구성된 퇴적층, iii) 그라운드 라인의 해양쪽 퇴적환경을 지시하는 빙하-해양의 적색 이토층, iv) 기저 암석 부스러기(basal debris)의 영향을 받지 않는 빙붕 아래의 환경을 지시하는 실트질 점토층, v) 로스 빙붕의 분리 빙하가 떨어져 나오는 지점(calving front) 근처에서 빙산, 해빙 그리고 바람에 의해 운반된 쇄설물이 풍부하고 조립한 퇴적층, vi) 공해(open marine) 환경을 지시하는 구조 연니 퇴적층.

육상 환경에서 생성되어 해양으로 공급되는 점토광물은 육지 암석의 물리적 또는 화학적인 풍화를 지시하기 때문에 점토광물 각각의 구성과 함량은 모암의 특성에 따른 기원지에 좌우된다(Chamley, 1989). 더불어 점토광물은 육상 환경의 기후 조건을 뚜렷하게 반영하므로 해양 퇴적물의 점토광물은 고기후 연구에 유용한 도구로 사용된다(Robert and Maillot, 1990; Hambrey et al., 1991; Ehrmann and Mackensen 1992; Ehrmann et al., 1992). 현재의 남극 환경에서는 일반적으로 자생 기원의 점토광물의 형성이 부재하고 물리적 풍화가 우세하기 때문에(Petschick et al., 1996; Fagel, 2007), 남극 대륙주변부 퇴적물의 점토광물 조성은 퇴적물의 주요 공급지와 이동경로를 추정하는 데 유용하다(Hillenbrand and Ehrmann, 2001; Hillenbrand et al., 2009; Ehrmann et al., 2011). 남극해 주변 해역의 일반적인 점토광물 분포는 일라이트와 녹니석이 우세하다(Ehrmann et al., 1992). 지역적인 점토광물 연구에 의하면 아문젠해(Amundsen Sea)의 동쪽 대륙붕에서는 특징적으로 카올리나이트의 함량이 현재에 비해 빙하기 동안 높게 나타났다(Hillenbrand et al., 2002, 2003). 이러한 차이는 아문젠해로 공급되는 퇴적물의 기원지가 현재와 빙하기

에 달랐음을 지시한다(Ehrmann et al., 2011). 벨링스하우젠해(Bellingshausen Sea)에서 수행된 점토광물 연구 결과에서도 빙하기 퇴적물과 현생 퇴적물의 점토광물 기원지가 서로 다른 것을 보여준다(Hillenbrand et al., 2003). 로스해의 경우 주로 맥머도만(McMurdo Sound)에서 점토광물에 대한 연구 결과가 발표되었다(e.g. Ehrmann et al., 2005; Giorgetti et al., 2009; Frank and Ehrmann, 2010). 이 지역은 스멕타이트와 일라이트가 우세한데 일라이트는 남극종단산맥의 퇴적암과 기반암이 주요 기원지인 반면에, 스멕타이트는 맥머도 화산군이 주요 기원지로 작용한다(Frank and Ehrmann, 2010).



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 서로스해 테라노바만 퇴적물 침강입자의 계절 및 격년 변화 (2014-2016년)

1. 서론

로스해는 남빙양에서의 생물펌프를 통해 일차생산과 탄소 제거가 매우 높은 해역으로 알려졌다(Arrigo et al. 2008a; Hoppe et al. 2017). 로스해에서는 일차생산성 변화 및 해빙 분포, 수층의 물리-화학적 요소, 그리고 철 공급과 같은 영양염 유용성과의 관계를 조사하는데 있어서 중요한 지역으로 간주된다. 이 모든 요소들은 식물플랑크톤 번성, 동물플랑크톤 섭식, 결국엔 수층이나 해저에서의 탄소 보존과 침강(retention and export)에 영향을 미친다(Frignani et al. 2000). 퇴적물 포집장치를 이용한 입자 연구는 환경 요인과 생물학적 요인이 언제 어떻게 표층 해양에서 생산된 유기물질의 침강을 조절하는지에 대한 연구에 중요한 도구로 사용되어 왔다. 침강플럭스는 일정한 해역내에서 그리고 해역 간에서 일차생산과 수온의 함수로서 변하며(Laws et al. 2000), 계절적으로 매년 그리고 격년으로 변한다(Ducklow et al. 2008; Church et al. 2013). 그러나 표층 해양에서 심층 해양으로의 침강을 조절하는 과정과 효율성에 대해서는 여전히 잘 알려지지 않았으며 특히 남빙양에서의 연구는 매우 부족하다(Takahashi et al. 2009). 남극해와 북극해 퇴적물의 포집장치 자료는 봄-여름 식물플랑크톤 번성과 높은 입자플럭스 사이에 일시적인 높은 결합성을 제시한다(Collier et al. 2000; Anadon and Estrada 2002; Fischer et al. 2002; Arrigo et al. 2008b; Ducklow et al. 2008, 2015; Honjo et al. 2010; Forest et al. 2011; Sampei et al. 2012; Weston et al. 2013).

이 연구 목적은 서로스해에 위치한 테라노바만의 드라이갈스키 분지에서 수직적 입자플럭스의 계절과 연간 변동에 대한 현재 지식을 높이고 포집된 물질의 양과 질에 영향을 주는 요인을 이해하는 것이다. 이러한 목적을 위해서, 2014년에서 2016년까지 계류 지점 X1에 깊이 약 250 m에서 퇴적물 포집장치에 의해 획득한 시료를 분석하였다(그림 1).

2. 연구 지역

로스해는 남빙양 태평양쪽, 콜벡곶과 아다레곶 사이(Cape Colbeck at 158°W and Cape Adare at 170°E)에 위치한다. 남쪽에는 78.5°S에서 로스 빙붕과 접해있다. 로스 빙붕은 거의 대륙붕의 반 이상을 덮고 있으며, 최북단쪽에는 약 250 m의 두께에 이른다(Budillon et al. 2002). 로스해는 평균 깊이 500 m의 넓고 깊은 대륙붕이 특징적이다. 대륙붕에서의 순환은 훨씬 복잡하고, 수층의 물리적 특성 변화는 표층에서 바닥까지 수직적인 구조를 결정한다. 계류지역은 수층으로부터의 높은 생물플럭스(Langone et al. 2003)와 테라노바만 폴리냐(Terra Nova Bay polynya)로부터 흘러오는 바닥의 약한 해류(Mangoni et al. 2017)가 특징적이다. 이 지역에서 오래 지속되는 계절적 해빙은 해저에 세립한 퇴적물과 유기물질 축적을 방해한다(그림 2; Langone et al. 1998). 이곳에서 해류는 아주 약하기 때문에 큰 입자들은 생산된 곳과 그 주변(<20 km)에 가라앉게 한다(Jaeger et al. 1996; Frignani et al. 2000). 그 결과 높은 일차생산성이 일반적으로 주변 퇴적물에 생물기원 규소 농도의 높은 축적을 유도한다(Jaeger et al. 1996). 규조류 번성은 로스해에서 풍부하게 일어나며(Smith and Nelson 1985; Leventer and Dunbar 1996), 해빙이 녹으면 조류 번성은 남반구의 여름 대부분 동안 해빙주변(marginal ice zone)에서 일어난다(Ravaioli et al. 1999). 주변 해역에서 수행된 조사는 규조류가 주된 일차생산자이며 그 플럭스는 계절마다 그리고 매년 변동하고(Leventer and Dunbar 1996) 주로 해류 시스템의 변화와 관련이 있다고 보고하였다(Frignani et al. 2000).

3. 실험방법

한국극지연구소 계류시스템은 테라노바만의 드라이갈스키 분지의 바닥에 위치한 정점 X1(74°50.27'S, 166°15.89'E, 1,050 m)에서 2014년 3월부터 2016년 12월까지 운용되었다(그림 3). 바닥에 줄로 연결된 계류시스템은 수심 250 m에 설치하였고, 13개의 컵이 시계열로 운용되는 퇴적물 포집장치와 Seaguard RCM 유속계, SBE Micro CAT conductivity/temperature 기록계로 구성되었다. 본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 포집장치는 13개의 시료병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G이었다. 퇴적물 포집장치를 계류하기 전, 봉산나트륨(sodium borate)으로 중화된 약 5% 포르말린 용액을 시료 병에 넣어 수층침강입자가 부패되지 않도록 하였다.

획득된 침강입자 시료는 지화학 분석을 위하여 WSD-10(Wet Sample Divider-10, McLane)을 이용하여 다섯 등분 하였으며, 이 중 네 개는 증류수로 세

번 이상 세척하여 동결건조를 실시하였다. 건조된 침강입자 시료의 무게를 5번 이상 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다. 총탄소(Total carbon) 함량은 CNS 원소 분석기를 이용하여 분석하였으며, 분석의 정밀도는 시료들 사이에 약 7개의 표준시료(Sulfanilamide, CE Instruments)를 사용하여 약 3% 이하로 유지하였다. 무기탄소(Inorganic carbon) 함량은 Coulometrics 무기탄소 분석기(CM5014 model, UIC)를 이용하여 측정하였으며, 분석의 정밀도는 약 $\pm 0.2\%$ 이하로 유지하였다. 탄산칼슘(CaCO_3) 함량은 무기탄소 농도에 탄산칼슘의 분자량 비(CaCO_3/C)인 8.33을 곱하여 계산하였다. 유기탄소(Organic carbon) 함량은 총탄소 함량에서 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 생물기원 실리카 함량은 DeMaster (1981) 습식 방법을 이용하여 획득하였다.

플럭스 계산은 시료의 포집, 화학적, 물리적, 그리고 생물학적 요소들에 의해서 정확하지 않을 수도 있다(Sanchez-Vidal et al. 2015). 생규소, 총유기탄소, 탄산염 그리고 총플럭스 측정결과는 각각 대략 4%, 2%, 1-5%, 그리고 5%의 오류를 보인다(Collier et al. 2000; Sanchez-Vidal et al. 2015).

해빙의 농도는 NASA팀의 알고리즘을 이용하여 DMSP-F11, F13 그리고 F17 Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS)로 얻어진 National Snow and Ice Data Center의 일일 자료로부터 획득되었다(Cavalieri et al. 1996). 센서의 해상도는 $25 \times 25 \text{ km}^2$ 이며 해빙의 농도는 정점 위치를 포함하는 그리드셀에 평균화된 일일 자료로 나타났다.

4. 결과와 토의

정점 X1에서 관측된 물리자료의 결과는 봄-여름 기간동안 해빙이 최소 면적을 보이고 대부분의 기간동안 정점 지역을 모두 덮고 있었다(그림 4). 해수의 온도는 계절적인 변화가 보이며 해빙의 농도가 낮은 여름에 높은 온도를 보이며 대부분의 기간동안 거의 낮은 온도를 유지한다. 해수의 온도와 다르게 염분의 변화는 매우 뚜렷한 계절 변화를 나타내며 해빙이 농도가 낮은 여름철에 낮은 염분이 특징적으로 발생한다. 해류의 유속과 방향은 시간에 따라 매우 급격하게 변화되며 대체로 해빙의 농도가 높은 계절동안 빠른 유속이 관찰된다.

정점 X1에서 관측된 총질량 플럭스와 생물기원 입자플럭스는 시간에 따라 큰 변화를 보였다. 총질량 플럭스는 $9.3\text{-}2642.8 \text{ mgm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위에서 변화하였으며, 계절별 연별로 큰 변화를 보였다(그림 5). 총질량 플럭스의 최고값은 2016년 3월말에 관측되었으며, 최저값은 2016년 11월에 나타났다. 총질량 플럭스는 계절

적으로 큰 변화를 보였다. 여름철인 1-3월에는 $355.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 부터 $2642.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 까지 매우 높은 값을 보이며 가을철인 4-6월에는 점차 감소하여, 겨울철에는 대부분 매우 낮은 플럭스를 보였다(그림 5). 생규소 플럭스, 총유기탄소 플럭스 그리고 탄산염플럭스이 변화는 총 질량플럭스의 변화와 매우 유사하며 계절적인 변화 및 격년 변화가 뚜렷하게 관찰된다.

2014년과 2016년의 탄산염 플럭스이 최고값은 총 질량플럭스와 생규소 플럭스의 최고값이 나타나는 시기보다 늦게 발생한다(그림 6). 이러한 탄산염 플럭스 값의 변화는 탄산염 함량의 변화와 매우 일치하고 더불어 탄산염 함량의 변화는 총유기탄소의 변화와 일치한다. 그러나, 2014년과 2016년의 탄산염 플럭스와 탄산염 함량의 최고값이 나타나는 두 시기 사이에 탄산염의 산소동위원소와 탄소동위원소 값은 큰 차이를 보인다. 총 질량플럭스의 약 50% 이상을 차지하는 생규소 플럭스의 변화와는 다르게 생규소 플럭스의 최고값이 발생하는 시기보다 늦게 탄산염 플럭스의 최고값이 나타나는 것은 두 가지 서로 다른 생물의 순차적인 번성을 의미한다. 테라노바만에서 생규소 플럭스의 변화와 탄산염 플럭스의 변화는 서로 시차를 두고 나타나며 이러한 순차적인 번성은 이 지역의 탄소 순환에 매우 중요한 역할을 의미한다.

생규소 플럭스의 변화는 대체로 표층 해수에 서식하는 규조의 번성과 매우 밀접한 관련이 나타난다(그림 7). 2016년의 생규소 플럭스의 변화는 규조각의 풍부도 플럭스와 동일하게 변화된다. 따라서 생규소 플럭스는 표층해수의 규조 생산성을 의미한다. 이러한 규조의 번성은 시기에 따라서 서로 다른 종들의 번성으로 발생한다. 12월의 규조 생산성은 대부분 *Chaetoceros* spp. 휴면포자에 의한 것으로 나타나며 향후 해수의 온도 변화에 따라 규조종의 번성도 다르게 나타난다.

Chiarini et al. (2019)의 연구에 의하면, 해빙이 덮은 면적이 높고 안정적인 겨울 동안, 퇴적물 트랩에서 매우 적은 물질을 수집한 반면, 하부의 퇴적물 트랩에서는 상당한 양의 물질이 발견되었다. 이러한 결과가 추운 기간에 재부유되거나 혹은 수평적인 이송이 일어난 것으로 판단된다. 이들의 연구에서는 2005년에 빙산 B-15는 계류 정점의 근처(20 km 미만의 거리)에 위치하였다. 2005년의 위성사진에서 남반구 여름동안 빙산과 해안선 사이에 넓은 줄무늬 형태의 두꺼운 해빙이 존재하는 이례적인 현상이 나타난 반면, 2008년에는 얼음이 없는 더 전형적인 상태가 나타난다. 빙산 주변에서 빠져나오는 물질의 흐름이 증가한다고 보고했던 이전 연구들에 따라서(Shaw et al. 2011; Sherman et al. 2011; Smith et al. 2011), 이 빙산이 상당한 양의 육성기원과 유기 물질을 공급했을 것이라고 가정한다. 게다가, 하부 퇴적물 트랩의 물질의 증가는 아마도 이 지역에서 해양학적 영향의 변경에 의해 유

발된 수평적인 이송 때문인 것일 수 있다. 실제로, 빙산 B-15A는 남극 표층수의 유입을 막아서 해양학적 환경에 영향을 끼쳤다(Robinson and Williams 2012). 그러나 테라노바만의 경우 이러한 주변의 빙산 효과는 없는 것으로 생각된다.

대부분 총 질량플럭스의 최대값은 해빙의 농도가 증가하기 시작하는 1월 - 3월 동안 관찰되었다(그림 5). 같은 양의 물질이 수집되는 겨울은 아마도 수괴 내의 중력에 의한 침강에서 기원한 것이거나 매우 낮은 퇴적 후 과정이 작용한 것으로 추정된다. 또한 2014년과 2016년 두 사이에 해빙 면적의 변동은 크지 않았지만, 총 질량플럭스의 차이가 크게 나타나는 것은 아마도 격년 변화에 따른 환경 변화에 의하여 침강입자의 형성에 차이가 있는 것으로 판단된다. 과거 이전의 연구에 의하면, 2003 - 2008년 동안 눈의 축적에 의한 남극의 물질 증가가 빙산에 의한 유출을 넘어섰다는 것을 최근에 보고한 Zwally et al. (2015)의 빙상의 물질 균형의 관측에 의해서도 설명된다.

로스해의 기존 자료에서 총 질량플럭스의 경우 2005년에는 2월 중순에서 3월 중순에 나타난 반면, 2008년에는 오직 한 번만 나타났다. 하지만, 로스해에서 일차 생산성은 chl-*a* 농도에 의해 증명된 것을 통하면 보통 12월이나 1월 초에 나타나고(Nelson et al. 1996; Smith et al. 2000; Arrigo and van Dijken 2004), 생산성 정점과 가장 많은 질량 흐름 사이에는 2 - 3개월의 시간상의 차이가 제시되어있다. 이러한 관측은 이미 이 지역에서 수행된 연구들(Dunbar et al. 1998; Collier et al. 2000; Langone et al. 2003)로부터 보고되어왔지만, 이에 관한 현재 특별한 설명은 없다. 관측된 시간상의 차이에 관계가 있을 수 있는 지난 연구들의 가설로써 주요한 원동력은 다음과 같다: i) 식물플랑크톤의 성장과 동물플랑크톤 군집 형성의 시간적 차이(Dunbar et al. 1998; Smith and Dunbar 1998; Boyd and Newton 1999); ii) 바람이나 철의 공급에 관련되어 늦게 일어난 구조의 변성 (Collier et al. 2000; Peloquin and Smith 2007); iii) 수괴 내부에서 가라앉는 속도가 느린 작거나 낮은 밀도의 집합체나 입자들 (Smith and Dunbar 1998; Bacquevort and Smith 2001).

chl-*a*의 합성에 필요한 미량원소의 하나인 철은 식물플랑크톤 군집의 발달에 있어서 주요한 역할을 한다는 것은 잘 알려져 있다. 로스해에서 이 원소는 주로 두 가지 방법으로 공급된다(Collier et al. 2000): 서로 다른 기원(해빙의 용해, 근처나 먼 거리의 기원지로부터 바람에 의한 수송)으로 공급되어 바다로 떨어진 먼지와 해류(e.g., Modified Circumpolar Deep Water current, MDCW)에 의한 재부유 과정. 하지만, 최근의 연구인 Winton et al. (2016)은 기원 중 오직 먼지만으로는 남서로스해에서 식물플랑크톤 성장을 조절할 수는 없다고 제시하였다. 또한 최근 보고된 연구(Castagno et al. 2017)에 따르면, CDW의 침투 역시 열과 염분의 공급과 함

깨 저서환경 발달을 유발하는 하나의 요인일 수 있다고 지적되었다. 이번 연구 결과에 의하여 이러한 가설에 대하여 중요한 자료를 제공할 수 있다.



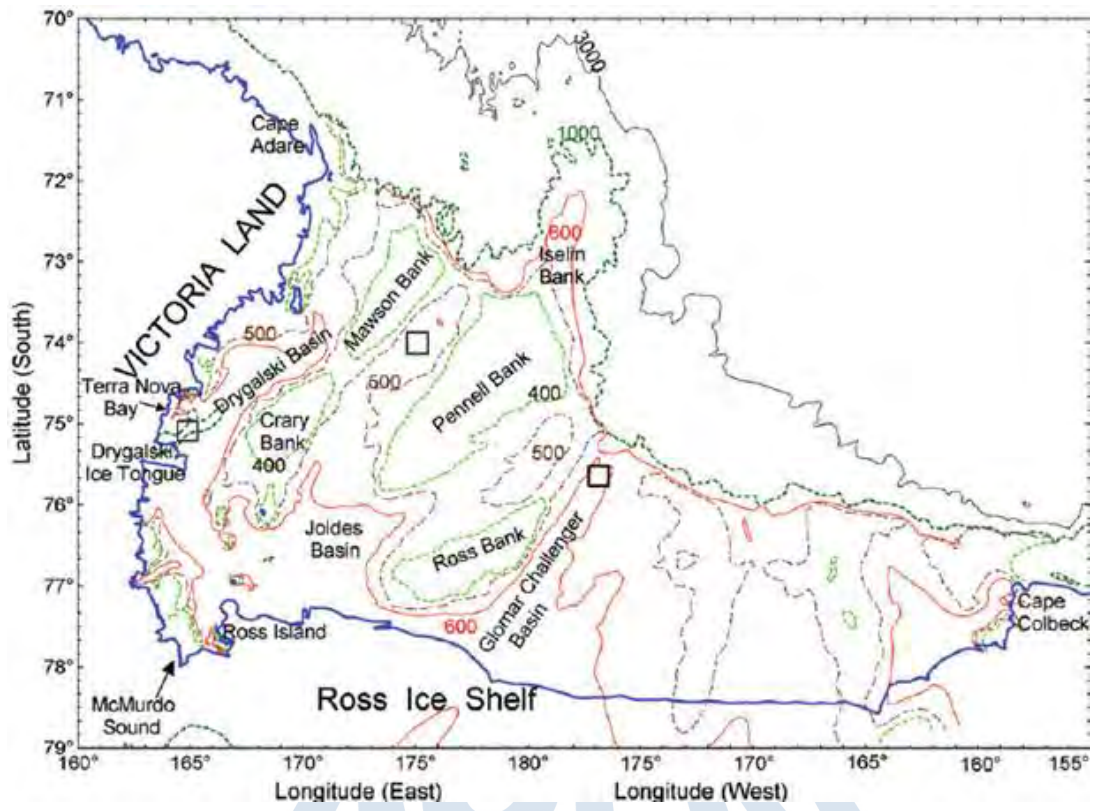


그림 1. 로스해의 해저 지형

극지연구소

2009

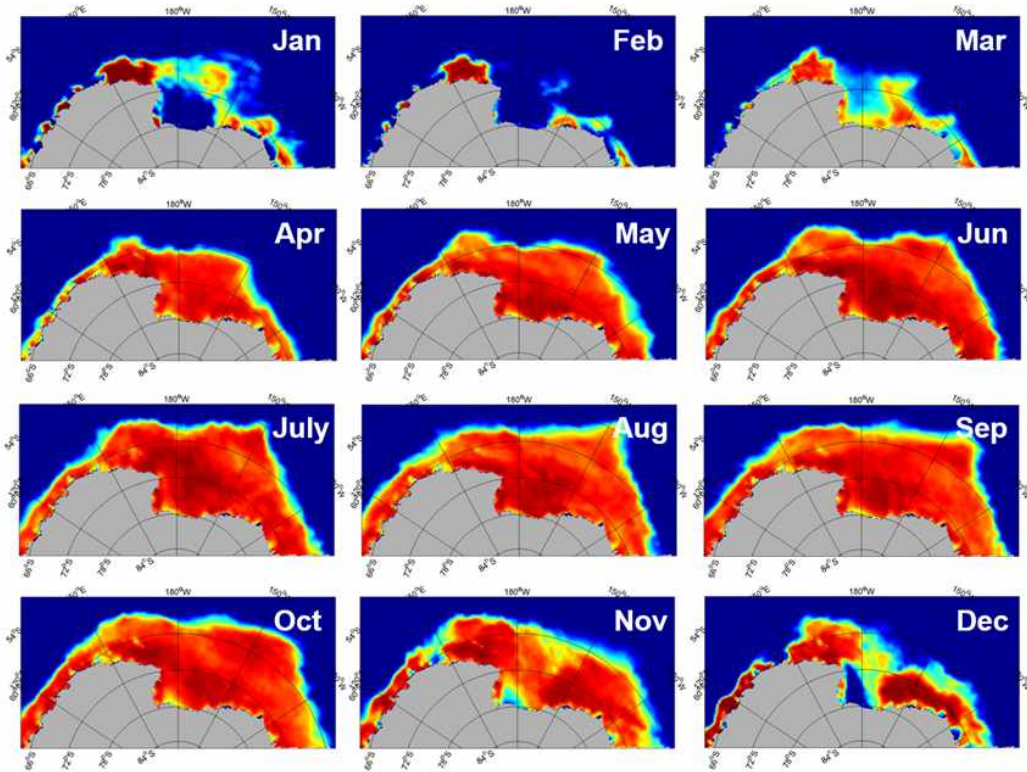


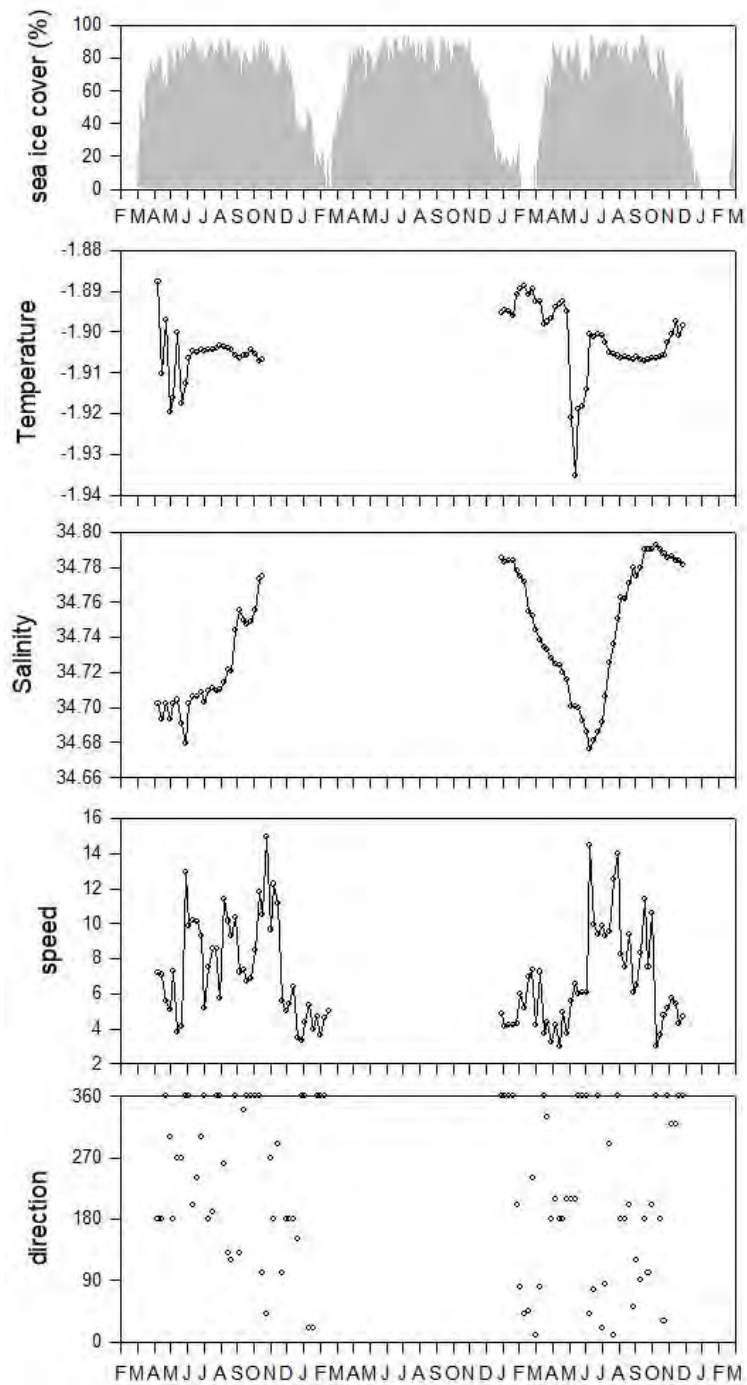
그림 2. 2009년 로스해의 월별 해빙발달

극지연구소



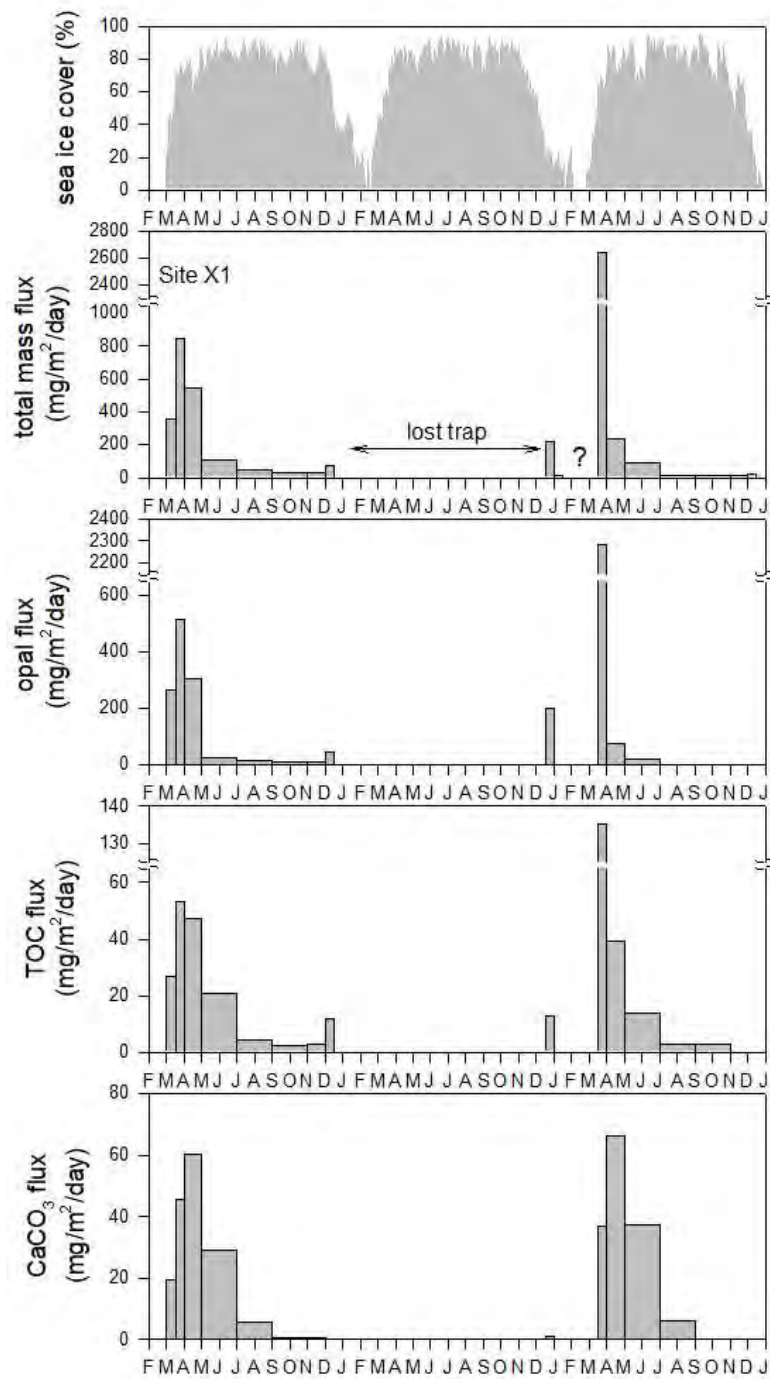
그림 3. 테라노바만 드라이갈스키 분지에 운용된 계류시스템의 정점 X1의 위치





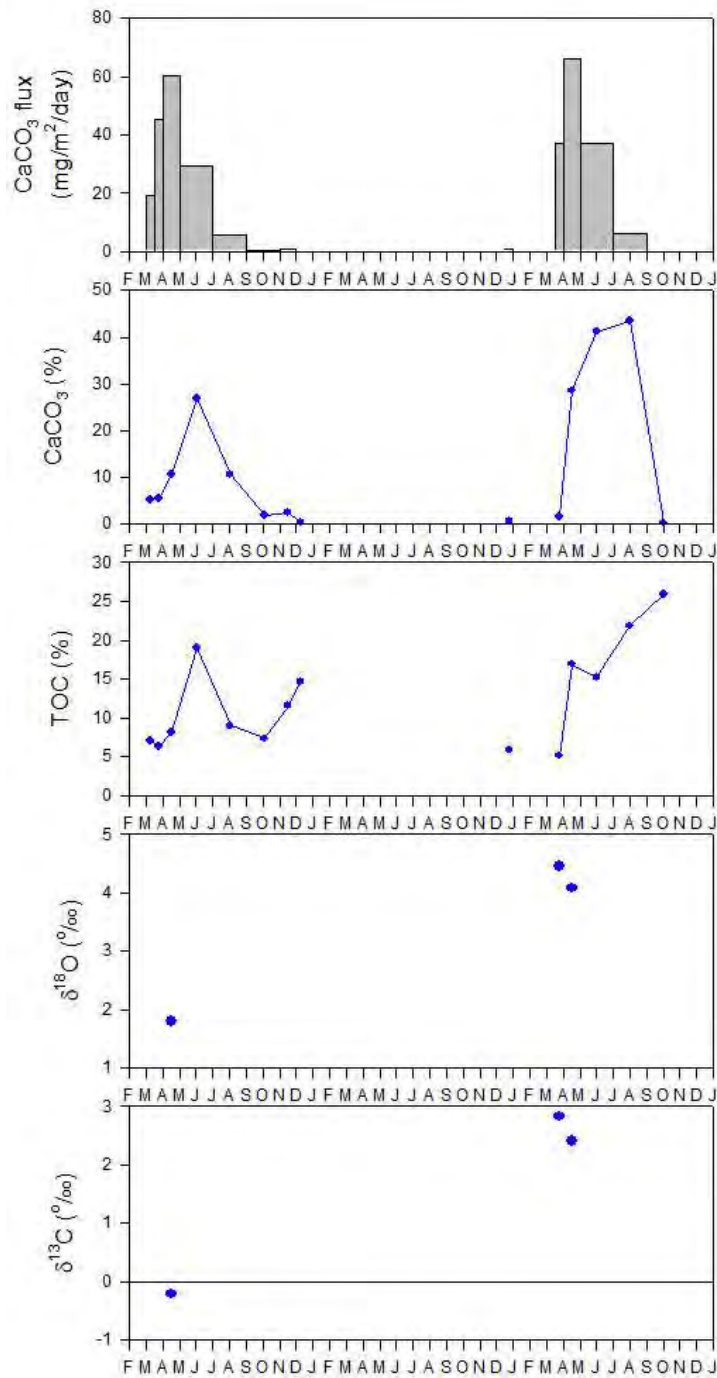
Feb. 1, 2014 to Dec. 31, 2016

그림 4. 시스템 계류기간중 2014년 2월부터 2016년 12월
까지의 해빙분포, 온도, 염분, 해류속도 및 해류 방향



Feb. 1, 2014 to Dec. 31, 2016

그림 5. 정점 X1에서 2014년 2월부터 2016년 12월까지 운용된 계류시스템의 결과; 해빙분포변화, 총플럭스, 생규소플럭스, 유기탄소플럭스, 탄산염플럭스



Feb. 1, 2014 to Dec. 31, 2016

그림 6. 정점 X1에서 2014년 2월부터 2016년 12월까지 운영된 계류시스템의 결과중 탄산염플럭스와 탄산염함량, 유기탄소함량, 탄산염의 산소동위원소, 탄산염의 탄소동위원소와의 비교

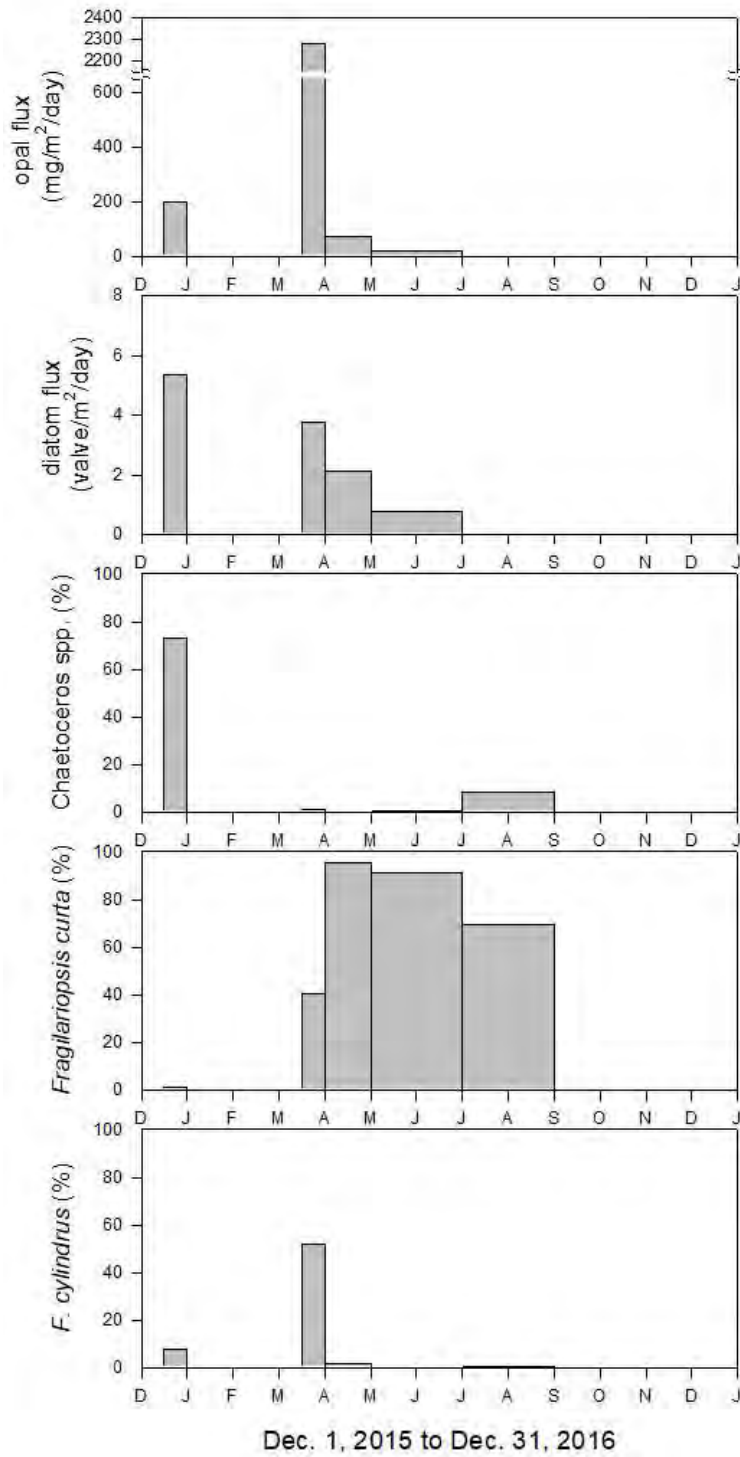


그림 7. 2015년 12월부터 2016년 12월까지 생규소플럭스, 규조플럭스, 휴먼포자 함량, *F. curta* 함량, *F. cylindrus* 함량 변화

2 절. 남극 로스해 대륙주변부 중앙분지의 점토광물 조성을 통한 기원 추적

1. 서론

코어캐처를 포함한 길이 241 cm의 중력코어 KI-13-GC2를 로스해의 이젤린 퇴 서쪽에 위치한 중앙분지의 정점 KI-13-C2(71°52.5' S, 177°48.1' W, 수심 1,800 m)에서 2013년 아라온호를 이용한 남극탐사(ANA03B)동안 채취하였다. 로스해 서쪽 대륙주변부에 위치한 중앙분지에서 획득된 중력코어 KI-13-GC2에서 대자율, 입도분석, 그리고 점토광물 조성을 분석하였다. 획득한 자료를 통해 로스해 중앙분지에서 빙하기와 간빙기의 세립 퇴적물 기원지 변화를 확인하고, 로스해 동쪽 대륙주변부와 점토광물 조성의 차이를 통해 동쪽과 서쪽의 기원지를 파악할 수 있는 단서를 획득할 수 있었다. 이 장에서는 로스해 대륙주변부의 점토광물 조성 자료를 중심으로 논의하도록 할 것이다. 그림 1에서 로스해 대륙주변부의 지형과 중력코어를 획득한 정점을 보여주고 있다.

남극해 대륙주변부의 점토광물 공급은 에오세 이후에 형성된 남극 빙상으로 인한 화학적 풍화보다 물리적 풍화에 의한 것으로 여겨진다(Grobe et al. 1990; Robert and Mailot 1990; Ehrmann et al. 1992). 남극해 대륙주변부에는 일라이트와 녹니석이 광역적으로 분포하는데, 이 두 점토광물들은 주로 빙하세굴(glacial scour)에 의해 특히 동남극 대륙에 넓게 분포하는 결정질암의 물리적 풍화에 의해 생성된다(Ehrmann et al. 1992, 2005; Fagel 2007). 한편 카올리나이트는 빙하 환경에서는 생성되지 않기 때문에, 카올리나이트가 높게 분포하는 남극해 대륙주변부는 카올리나이트를 포함한 오래된 퇴적물의 물리적 풍화나 고토양의 침식에 의해 생성되어 운반된 것으로 보고되었다(Hambrey et al. 1991; Ehrmann et al., 1992). 남극해 대륙주변부의 스�멕타이트는 남극대륙에서 정확한 기원지에 대한 연구가 부족하지만, 일반적으로 화산기원 물질의 풍화에 의해 형성되는 것으로 알려졌다(Robert and Mailot, 1990; Ehrmann et al., 1992).

로스해에서 수행된 대부분의 점토광물 연구는 대륙붕 지역에 제한되어 있다. 기존연구의 결과에 의하면 로스해 맥머도만에 분포하는 높은 함량의 일라이트와 녹니석은 로스해 남쪽의 대륙으로부터 빙상의 물리적 풍화에 의해 공급되었으며, 높은 함량의 스�멕타이트는 로스해 남서쪽의 맥머도 화산군(McMurdo volcanic group)의 화산체에서 공급된 것으로 보고되었다(예, Ehrmann et al. 1992). 또한 기

존에 수행된 점토광물에 관한 연구들은 대부분 로스해 대륙붕의 남서쪽에 위치한 맥머도만 지역에서 국한되어 있다(Ehrmann et al. 1992, 2005; Ehrmann 1998; Setti et al. 2000; Giorgetti et al. 2009; Franke et al. 2010). 특히 로스해의 대륙사면과 대륙대를 포함한 대륙주변부에서 수행된 점토광물 연구는 매우 부족하다. 최근에 하 등 (2018)은 로스해 동쪽 대륙사면의 점토광물의 기원지 연구를 통하여 빙하기 동안 전진한 빙상에 의해 남극종단산맥에서부터 용빙수에 의하여 높은 함량의 일라이트가 공급되었고, 간빙기에 증가한 스멕타이트와 카올리나이트는 빙상이 후퇴하여 남극종단산맥의 영향이 줄어들고 남극사면류(Antarctic Slope Current)가 남하하여 로스해 동쪽의 에드워드 7세 반도로부터 공급되었을 것이라고 해석하였다. 이번 연구의 목적은 로스해 대륙주변부의 서쪽 대륙사면에 위치한 중앙분지에서 획득한 코어의 점토광물 조성 변화를 통해 세립질 퇴적물의 기원지를 확인하는 것이다. 더불어 빙하기-간빙기 사이 로스 빙상(Ross Ice Sheet)의 발달과 소멸에 따른 로스해 대륙주변부의 서쪽과 동쪽 지역의 점토광물 기원지를 비교하고 토의할 것이다.

2. 중력코어 분석 결과

KI-13-GC2의 퇴적물은 빙운퇴적물(ice-rafted debris: IRD)을 포함하며 점토에서 모래 크기의 입자로 구성되어 있다(그림 2). 코어 상부에서 밝은 갈색의 퇴적물이 나타나며, 아래로 회색의 퇴적물과 밝은 갈색 퇴적물이 교호하며 나타난다. 모래 입자의 함량은 일반적으로 회색 퇴적물에서 높게 나타나며, 갈색 퇴적물 구간의 상부인 10 cm와 90 cm에서 급격하게 증가한다. 대자율은 모래 입자를 포함한 조립질 퇴적물의 함량 변화와 비슷하게 변동하지만 최상부와 190 cm 부근에서 모래 입자의 함량은 증가하지만 대자율은 증가하지 않는다. 대자율의 큰 이상값이 나타나는 90 cm 부근에서 수 cm 크기의 빙운퇴적물들이 확인되었다. 전체적으로 간빙기 퇴적물에서 빙하기보다 모래 입자와 빙운퇴적물의 함량과 대자율이 높게 나타난다. 회색의 빙하기 퇴적물에는 희미한 층리도 관찰된다.

KI-13-GC2의 점토광물 함량은 일라이트(59.1~76.2%)가 가장 우세하며, 녹니석(12.4~21.4%), 카올리나이트(4.1~11.6%), 스멕타이트(1.2~22.6%)의 순서로 나타났다(그림 2). 일라이트는 15% 이상의 큰 변화를 보이지만, 코어 전체적으로 빙하기-간빙기에 따른 변화는 뚜렷하지 않다. 녹니석의 경우 170~140 cm 및 70 cm에서 최상부까지 평균에 비해 상대적으로 높은 값(19.2%)이 나타나고 이외에는 상대적으로 낮은 값(14.6%)을 보인다(Table 1). 스멕타이트는 210~190 cm에서 상대적으로 높은 함량(9.9%)이 나타나고 이후 140 cm에서 급격하게 증가하여 80 cm까

지 높은 함량(14.9%)을 보이지만, 대부분의 구간에서는 낮은 함량(3.6%)이 나타난다. 카올리나이트는 일라이트와 마찬가지로 다른 점토광물에 비해 코어 전체적으로 일정한 값(7.5%)을 유지한다.

KI-13-GC2의 빙하기 퇴적물의 점토광물 평균 함량은 스�멕타이트(5.4%), 일라이트(68.7%), 카올리나이트(7.0%), 그리고 녹니석(18.8%)으로 나타나는 반면, 간빙기 퇴적물의 평균 함량은 스�멕타이트(9.2%), 일라이트(67.5%), 카올리나이트(7.9%), 그리고 녹니석(15.4%)으로 나타났다. 따라서 간빙기 퇴적물은 빙하기 퇴적물에 비하여 스�멕타이트 함량이 약 6% 증가하고 녹니석의 함량이 약 4% 감소하는 특징을 보인다. 그러나 이러한 차이는 점토광물의 반정량 분석의 오차범위에 가깝기 때문에 실제로 함량의 변화가 나타나는지는 주의 깊게 해석해야 한다.

3. 토의 및 결론

중력코어 KI-13-GC2의 상부는 박스코어와 지화학 자료의 비교에 의해 코어의 최상부가 손실된 것을 확인하였다(Khim et al., 2017). 탄산염이 부족하여 퇴적물의 유기물을 이용하여 측정된 KI-13-GC2의 코어 최상부의 AMS 14C 연대는 7,109 yr BP으로 코어 상부는 홀로세 퇴적물을 보존한다(Khim et al. 2017). 일반적으로 로스해 표층퇴적물의 유기탄소로 측정된 AMS 14C 연대는 2,000에서 3,000 yr BP 사이로 측정되며, 퇴적물이 낮은 대륙사면의 퇴적물에서는 5,000에서 10,000 yr BP까지도 측정된다(Domack et al. 1989; Licht et al. 1996). 남극해에서 해양탄산염 각질의 저장고 효과에 대한 보정은 1,200에서 1,300년이지만, 이 연구에서 측정된 산불용성 유기탄소의 AMS 14C 연대는 지역적인 불확실성과 높은 변동성(1,900~3,000년) 때문에 연대보정을 하지 않았다(Andrews et al. 1999). Khim et al. (2017)은 AMS 14C 연대와 코어퇴적물의 지화학 분석자료를 이용하여 총유기탄소와 생규소 함량이 뚜렷한 증감의 반복을 확인하고 KI-13-GC2의 층서를 빙하기-간빙기로 구분하였다.

로스해 대륙붕에서 일반적으로 암설류나 저탁류에 의해 운반된 쇄설성 퇴적물의 대자율은 비교적 높은 값을 보이며, 후빙기 또는 간빙기에 빙운퇴적물을 포함하고 모래 입자의 함량이 50% 이상인 퇴적물에서도 대자율이 높게 측정된다(Licht et al. 1999). 로스해 대륙붕의 현생 퇴적물은 전체적으로 실트 입자가 주를 이루며 빙운퇴적물의 함량이 낮고 대자율이 낮다(Licht et al. 1999; Salvi et al. 2006). 후빙기와 간빙기에 온난한 기온과 해수면의 상승으로 인한 활발한 빙하 분리(calving)는 많은 빙산을 생성하여 조립한 빙운퇴적물이 남극의 대륙주변부에 많이

운반하고 퇴적된다(Grobe and Mackensen 1992). 코어 KI-13-GC2에서 상대적으로 모래입자와 대자율이 간빙기 퇴적물에서 증가하며(그림 2), 간빙기에 활발해진 빙하 분리에 의하여 많은 빙운퇴적물이 중앙분지 지역으로 공급된 것으로 해석된다.

해양퇴적물에 포함된 스멕타이트는 자생 및 쇄설기원으로 구분되며, 일반적으로 해저에서 발생하는 화산유리나 화산암의 화학적 변질작용(halmyrolysis)을 통하여 자생적 스멕타이트가 생성되는 것으로 알려져 있다(Chamley 1989; Robert and Chamley 1991). 반면, 쇄설성 스멕타이트는 온난 습윤한 환경에서 화성암의 화학적 풍화에 의해 생성되고 해양으로 유입된다(Chamley 1989). 남극 대륙에서는 남극 빙상의 형성 이후 화학적 풍화보다 물리적 풍화가 우세하게 나타나기 때문에, 남극중단산맥에서 화학적 풍화를 통한 스멕타이트의 공급은 거의 없으며 주로 화산암의 풍화 및 침식에 의한 것으로 알려져 있다(Ehrmann et al. 1992; Ehrmann 1998). 일라이트는 남극중단산맥에 분포하는 비콘 누층군(Beacon Supergroup)에서 화성암과 운모군(mica group)을 포함한 암석 또는 남극중단산맥의 노출된 결정질암의 물리적 풍화작용에 의해서 주로 공급된다(Chamley 1989; Ehrmann et al. 2005, 2011; Fagel 2007). 카올리나이트의 경우, 온대나 열대에서 습한 기후에 의한 화학적 풍화작용에 의하여 생성되는 것으로 알려져 있기 때문에 극지 환경에서는 거의 생성되지 않는다. 남극해의 대륙주변부로 공급되는 카올리나이트는 남극빙하가 출현하기 이전에 화학적 풍화가 활발했던 올리고세 초기에 형성되어 현재 빙하에 의한 물리적 풍화를 통해 공급된다(Ehrmann et al. 1992; Dingle and Lavelle 1998; Forsberg et al. 2008; Welke et al. 2016). 녹니석은 일반적으로 남극 대륙의 녹니석을 포함하고 있는 변성암과 염기성암에서 저에너지의 물리적 풍화에 의해 공급된다(Chamley 1989; Ehrmann et al. 2011).

남극 대륙에서 점토광물의 기원지 모암에 대한 연구는 두꺼운 대륙빙상으로 인하여 수행이 거의 불가능하며 제한적으로 수행되었다. 또한, 남극의 두꺼운 빙상은 화학적 풍화를 방해하는 요인으로 주로 물리적 풍화가 점토광물의 기원지 변화를 일으키는 주요한 역할을 한다(Salvi et al. 2006; Hillenbrand et al. 2009; Ehrmann et al. 2011). Ehrmann et al. (2011)은 남극반도의 아문젠해 대륙주변부에 분포하는 퇴적물의 점토광물 조성의 차이에 관한 연구에서 카올리나이트는 주로 남극빙상에 덮인 버드빙저분지(Byrd Subglacial Basin)와 마리버드랜드(Marie Byrd Land)에 분포하는 카올리나이트를 포함한 퇴적암으로부터 아문젠해의 서쪽과 중앙 지역으로 공급되고, 일라이트는 벤틀리 빙저골(Bentley Subglacial Trench)에서 그리고 스멕타이트는 동쪽의 엘스워스랜드(Ellsworth Land)의 아봇빙붕(Abbot Ice Shelf)과 코스그로브빙붕(Cosgrove Ice Shelf)에서 용빙수에 의해 각각 아문젠해의

동쪽 지역으로 공급되며, 녹니석은 아문젠해의 대륙주변부에서 전체적으로 비슷한 함량이 분포하며, 남극 대륙의 기반암에서 빙하에 의해 대륙주변부로 공급되는 것으로 보고하였다.

로스해 중앙분지에서 채취한 코어 KI-13-GC2의 점토광물은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 그리고 스펙타이트로 구성된다(그림 2). 기존 연구 결과에 따르면 로스해 대륙붕으로 공급되는 스펙타이트는 빅토리아 연안에 올리고세에 형성된 맥머도 화산군에서 공급되는 것으로 보고되었다(Kyle 1990; Ehrmann et al. 1992; Setti et al. 1998, 2000). 일라이트와 녹니석은 주로 남극빙상 아래의 남극중단산맥의 기반암이나 퇴적암에서 용빙수를 통해 로스해 대륙붕으로 공급되는 것으로 추정된다(Smellie 1998; Ehrmann et al. 2005). 카올리나이트의 경우, 로스해에서의 기원지에 대한 연구는 부족한 실정이지만, 카올리나이트를 함유하고 있는 남극빙상 아래의 고토양 또는 퇴적암에서 공급되는 것으로 생각된다. 따라서 로스해 대륙주변부에 위치한 중앙분지의 점토광물들도 대부분 남극빙상 아래의 남극중단산맥의 기반암이나 퇴적암 그리고 맥머도 화산군이 세립퇴적물의 기원으로 해석된다.

KI-13-GC2의 점토광물 조성 중에서 일라이트와 카올리나이트는 간빙기와 빙하기 사이에 큰 변화가 나타나지 않지만, 그러나 스펙타이트 함량은 빙하기에 감소하며, 녹니석의 함량은 증가한다(그림 3, Table 1). 그러나 코어 상부의 홀로세(MIS 1) 구간은 코어 최상부의 손실로 인하여 이러한 특성이 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 스펙타이트는 간빙기에 빙상의 후퇴로 인해 로스해 대륙붕 서쪽의 빅토리아 연안에 위치한 맥머도 화산군에서 기원한다(그림 4a). 로스해의 대륙붕에서 대륙사면을 지나 외해로 빠져나가는 해류에 의해 스펙타이트가 중앙분지로 공급된다(Orsi et al. 1999). 한편 빙하기동안 빙상의 전진으로 인해 로스해의 대륙붕에서 대륙사면을 지나 외해로 흐르는 해류가 약화되어 중앙분지로 운반되는 스펙타이트 함량이 감소되었을 것이다(그림 4b). 중앙분지에서 빙하기동안 증가된 함량을 보이는 녹니석의 경우, 페넬 골(Pennell trough)에서 발표된 Salvi et al. (2006)의 결과와 유사하다. 이들의 연구결과를 고려하면 빙하기에 대륙붕으로 진출한 로스 빙상에 의하여 남극중단산맥으로부터 녹니석의 공급이 로스해 대륙붕으로 더 많이 공급되었으며, 중앙분지 역시 그 영향이 증가된 것으로 추정된다. 전체적으로 가장 높은 함량을 보이는 일라이트는 남극 대륙의 남극중단산맥의 기반암이 빙하의 침식과 용빙수에 의하여 로스해의 중앙분지로 꾸준히 공급되기 때문인 것으로 해석된다. 카올리나이트 역시 로스해 남쪽에 위치한 것으로 추정되는 카올리나이트를 포함한 퇴적암에서 지속적으로 공급된 것으로 추정된다. 따라서 로스해 중앙분지로 공급되는 점토광물의 기원지는 전체적으로 빙하기와 간빙기에 큰 변화가 없으며 남극중단

산맥으로부터 로스해 외해로 점토광물이 운반되는 기작에 의하여 점토광물의 조성이 변화하는 것으로 제안된다(그림 4).

하 등 (2018)은 로스해 대륙주변부의 동쪽 대륙사면 퇴적물의 점토광물 조성연구에서 로스해 서쪽 대륙주변부의 중앙분지와 마찬가지로 동쪽 대륙주변부에서도 일라이트(61.8~76.7%)가 가장 우세하고, 녹니석(15.7~21.3%), 카올리나이트(3.6~15.4%), 스멕타이트(0.9~5.1%)로 보고하였다. 간빙기에 점토광물 함량은 대륙주변부 동쪽과 서쪽에서 공통적으로 스멕타이트가 증가한다(그림 3). 로스해 동쪽 대륙주변부에서 스멕타이트 함량의 증가는 로스해 동쪽의 마리버드랜드에서 공급되어 남극사면류를 따라 운반되었으며(하 등, 2018), 서쪽 대륙주변부에서 스멕타이트 함량의 증가는 로스해 서쪽의 맥머도 화산군에서 공급되어 내대륙붕에서 외해로 흘러나가는 해류에 의해 운반된 것으로 추정된다(그림 4a). 따라서 스멕타이트의 기원지는 지역적으로 다르게 나타난다. 반면, 빙하기에는 동쪽과 서쪽 대륙주변부 모두 녹니석의 함량이 증가한다(그림 3). 이는 빙하기에 대륙붕까지 진출한 로스 빙상의 영향에 의하여 남극중단산맥으로부터 대륙주변부로 녹니석의 운반이 증가한 것으로 추정된다(그림 4b). 더불어 간빙기에 대륙붕에 퇴적된 녹니석이 풍부한 퇴적물들이 빙상의 발달에 의해 침식과 재동되어 중앙분지로 운반되어 재퇴적되었을 것이다.



극지연구소

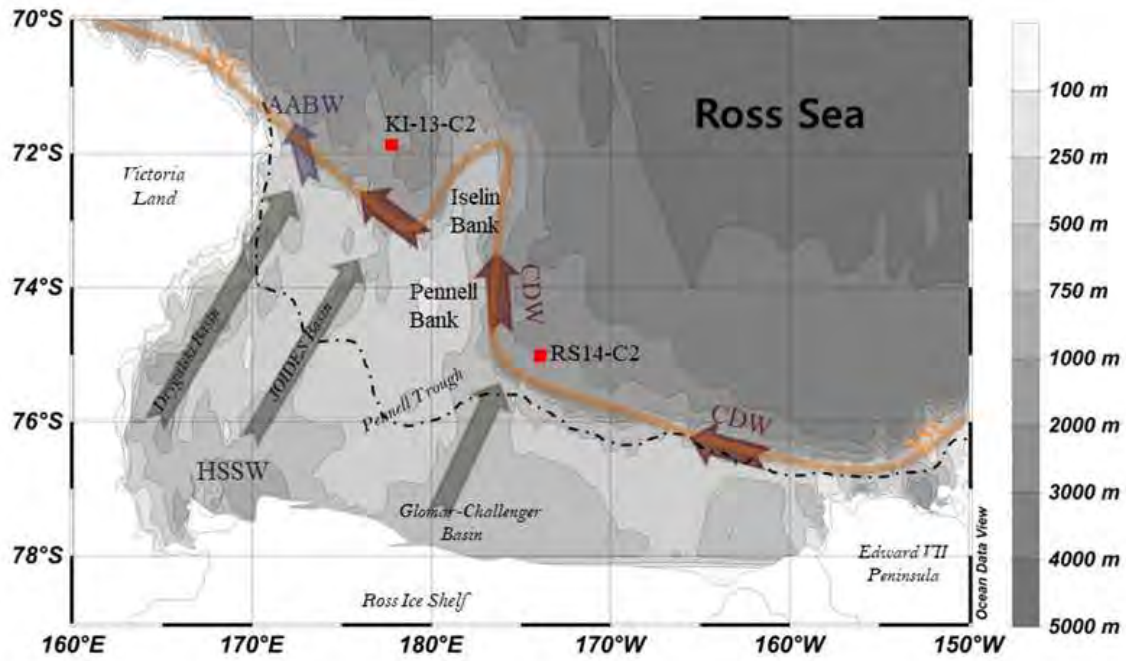


그림 1. 로스 해 대륙붕의 지형도. 중력코어 KI-13-GC2 (71°52' S, 177°48' E, depth 1800 m)는 로스 해 서쪽 대륙주변부의 중앙분지의 정점 KI-13-C2에서 획득되었다. 지도의 점선은 LGM 시기 빙상이 진출한 한계선을 나타낸다 (Shipp et al., 1999). 하 등 (2018)의 연구에서 사용한 중력코어 RS14-C2는 로스 해 동쪽 대륙주변부의 대륙사면에서 획득되었다. (AABW: Antarctic Bottom Water, CDW: Circumpolar Deep Water, HSSW: High Salinity Shelf Water)

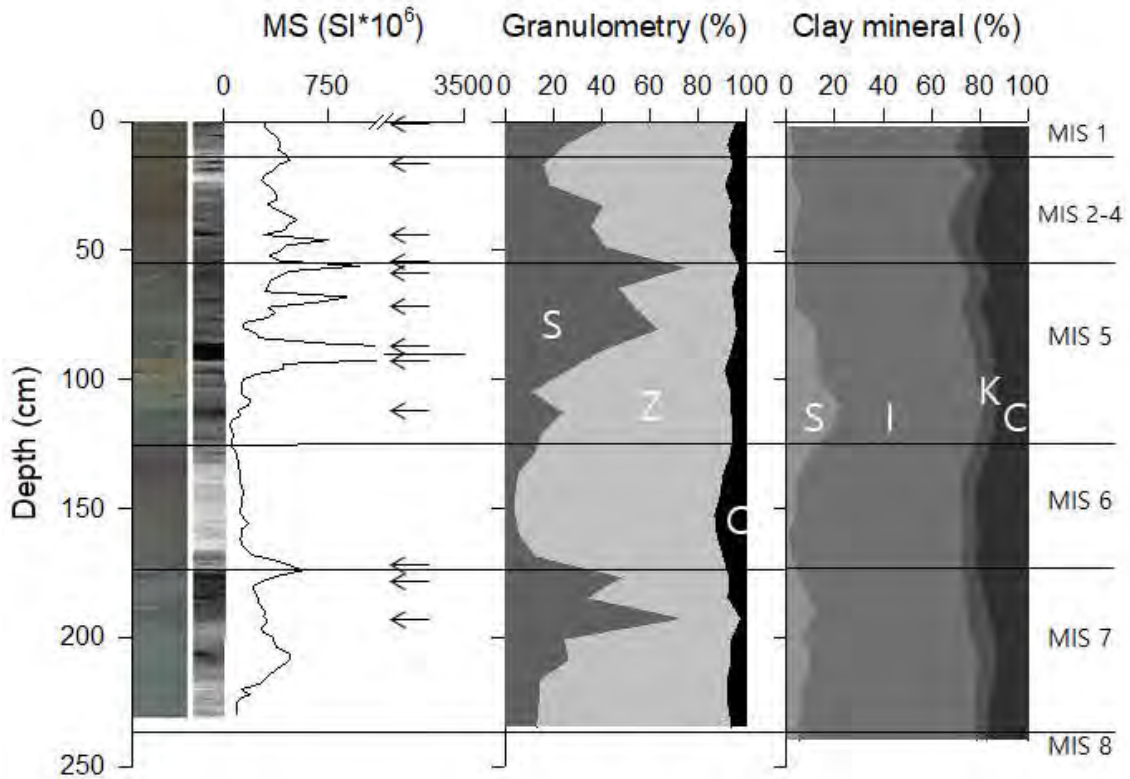


그림 2. 중력코어 KI-13-GC2의 사진, X-ray 사진, 대자율, 입도, 점토광물 함량. 그림의 화살표는 IRD (ice-rafted debris)를 나타낸 것이다. (MS: magnetic susceptibility, S: sand, Z: silt, C: clay, S: smectite, I: illite, K: kaolinite, C: chlorite)

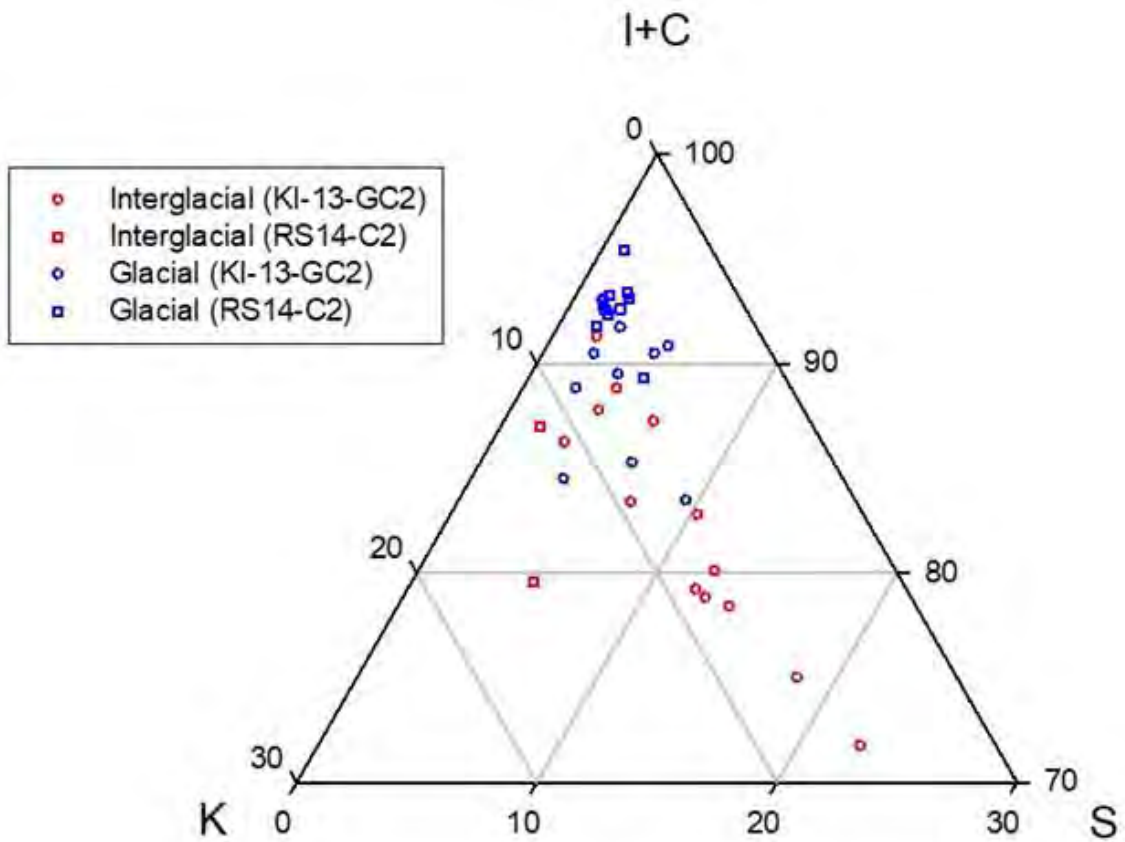


그림 3. 중력코어 KI-13-GC2와 RS14-C2의 점토광물 함량을 나타낸 삼각 다이어그램. 서쪽 대륙주변부의 KI-13-GC2 코어와 동쪽 대륙주변부의 RS14-C2 코어에서 빙하기와 간빙기 사이에 점토 광물 함량의 차이가 나타난다.

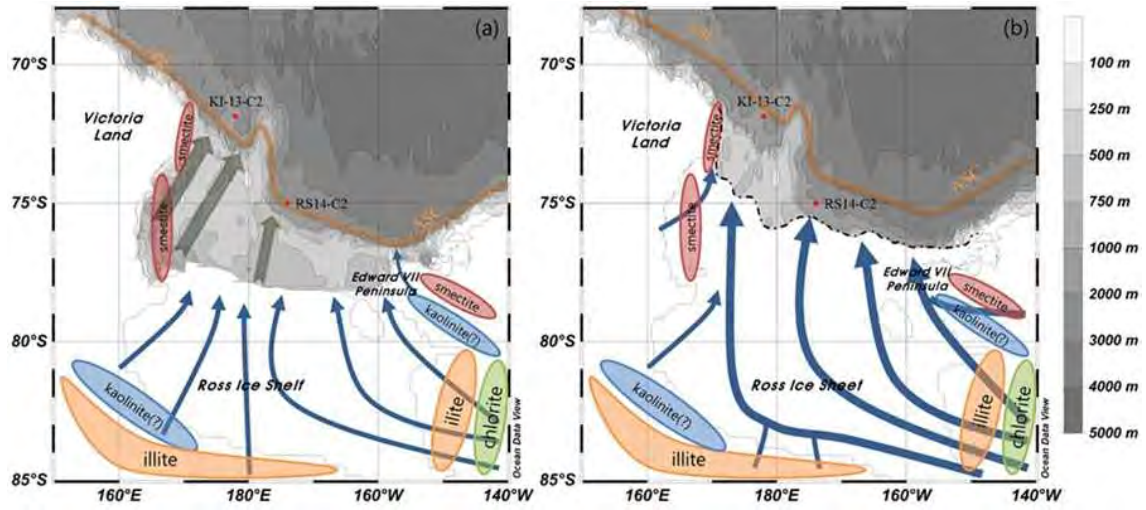


그림 4. 로스 해에서 점토광물의 운반 경로를 보여주는 도식적인 모델. (a)는 간빙기 (b)는 빙하기의 경로를 나타낸다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

지난 3년 간의 과제 수행동안 국제학술지 2편, 국내학술지 1편 그리고 국내외 학술대회에 아래와 같이 많은 발표 성과를 내어 연구 목표의 달성도는 100%를 넘는 성공적인 결과를 거두었다.

[국제학술지 논문]

- Lee, J., Kim, S., Lee, J.I., Cho, H.G., Phillips, S.C., Khim, B.K.* (2020) Monsoon-influenced variation of clay mineral compositions and detrital Nd-Sr isotopes in the western Andaman Sea (IODP Site U1447) since the late Miocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, vol. 538, Article 109339, (*corresponding author)
- Kim, S., Yoo, K.C., Lee, J.I., Khim, B.K., Bak, Y.S., Lee, M.K., Lee, J., Domack, E.W., Christ, A.J., Yoon, H.I. (2018) Holocene paleoceanography of Bigo Bay, west Antarctic Peninsula: Connections between surface water productivity and nutrient utilization and its implication for surface-deep water mass exchange. *Quaternary Science Reviews*, vol. 192, p.59-70.

[국내학술지 논문]

- 하상범, 김부근*, Colizza, E., Giglio, F., 구효진, 조현구 (2019) 남극 로스해 대륙주변부 중앙분지의 점토광물 조성을 통한 기원지 추적. *Ocean and Polar Research*, vol. 41, no. 4, p.265-274. (*교신저자).

[국제학술회의 발표]

- Khim, B.K., Colizza, E., Lee, J.I., Giglio, F., Cho, H.G., Ha, S. (2019) High biogenic components of the glacial sediments in the Central Basin of the Ross Sea: New perspective and interpretation. *AGU Fall Meeting 2019*, San Francisco, D.C., USA (Dec., 10-14), PP53C-1452.
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2019) Glacio-marine sedimentation influenced by the Ross Ice Sheet in the continental slope and rise to the east of Pennell-Iselin Banks in the Ross Sea. *XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences (ISAES2019)*, Incheon, Korea (July 22-26), p.A292.
- Khim, B.K., Kim, H.J., Yoo, K.C., Kim, H.C., Katsuki, K., Kim, S., Ha, S. (2019)

- Particulate matter in the polynya of Terra Nova Bay in the western Ross Sea: record of 2014 to 2016. *XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences (ISAES2019)*, Incheon, Korea (July 22–26), p.A054.
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2019) Glacio–marine sedimentations in the continental slope and rise to the east of Pennell–Iselin Banks in the Ross Sea. *The 25th International Symposium on Polar Sciences (ISPS)*, Incheon, Korea (May 13–15), p.62.
- Khim, B.K., Kim, H.J., Yoo, K.C., Kim, H.C., Katsuki, K., Kim, S., Ha, S. (2019) Seasonal and inter–annual change of sediment trap particles (2014–2016) in the Terra Nova Bay of the western Ross Sea. *The 25th International Symposium on Polar Sciences (ISPS)*, Incheon, Korea (May 13–15), p.143
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G., Jung, C. (2018) Glacio–marine sedimentation related to the glacier activity in the continental slope and rise to the east of Pennell–Iselin Banks in the Ross Sea, Antarctic. *AGU Fall Meeting 2018*, Washington, D.C., USA (Dec., 10–14), PP23E–1535.
- Khim, B.K., Kim, H.J., Yoo, K.C., Kim, H.C., Kim, S., Ha, S., Yoon, H.I. (2018) Sediment trap particles (2014–2016) in the Terra Nova Bay of the Ross Sea. *POLAR2018*, Davos, Switzerland (June 19–23), p.Thu_334_OS–3_78.
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2018) Glacio–marine sedimentation in the continental slope and rise to the east of Pennell–Iselin Banks in the Ross Sea. *The 24th International Symposium on Polar Sciences (ISPS)*, Incheon, Korea (May 29–30), p.65.
- Khim, B.K., Colizza, E., Hong, J.K. (2017) Paleooceanographic changes in the continental slope in the Central Basin of the Ross Sea since the last glacial. *Past Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS) Conference*, Trieste, Italy (Sept. 10–15).
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2017) Sediment deposition in response to the glacial–interglacial changes on the continental slope of eastern Pennell–Iselin Bank in the Ross Sea, Antarctica. *Past Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS) Conference*, Trieste, Italy (Sept. 10–15).
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2017) Sediment property changes in response to the glacial activity on the continental slope to the eastern side of Pennell–Iselin

Bank in the Ross Sea, Antarctica. *EGU General Assembly 2017*, Vienna, Austria (April 24-28), EGU2017-1145-2.

[국내학술회의 발표]

- 하상범., 김부근, Colizza, E., Giglio, F., 구효진, 조현구 (2019) 남극 로스해 대륙주변부 중앙분지의 점토광물 기원지. *한국해양학회 2019 추계학술발표대회 요약집*, 강릉, p.GO-06.
- 하상범., 김부근, Colizza, E., 조현구, 구효진 (2019) 로스해 대륙주변부 동쪽과 서쪽의 점토광물 조성과 퇴적물 기원지 비교. *제2회 KGU 연례학술대회 초록집*, 평창, p.303.
- Ha, S., Khim, B.K., Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2018) Glaciomarine depositional processes in the continental margin to the east of Pennell-Iselin Banks in the Ross Sea, Antarctica. *2018년도 제1회 KGU 연합학술대회 초록집*, 홍천, p.37.
- 하상범, 김부근, Colizza, E., Marci, P., Sagnotti, L., Caricchi, C., Langone, L., Giglio, F., Kuhn, G. (2017) 남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴 동쪽 대륙사면에서 빙하기-간빙기에 따른 고환경 변화 역사. *한국해양학회 2017 추계학술발표대회 요약집*, 경주, p.158.

극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

지난 수 년간 남극해에서는 오랜 역사의 남극빙상 발달에 대한 정보를 획득하기 위하여 다양한 지역에서 아래와 같은 IODP 시추가 수행되었다. 지난 3년 간의 자료는 긴 역사의 빙상 발달에 대한 복원해석에 매우 중요한 역할을 할 것이고 활용될 것이다.

IODP 383: Dynamics of Pacific Antarctic Circumpolar Current (DYNAPACC)

The Antarctic Circumpolar Current (ACC) is the world's strongest zonal current system that connects all three major ocean basins of the global ocean and therefore integrates and responds to global climate variability. Its flow is largely driven by strong westerly winds and constricted to its narrowest extent in the Drake Passage. Transport of fresh and cold surface and intermediate water masses through the Drake Passage (cold-water route) strongly affects the Atlantic Meridional Overturning Circulation together with the inflow of Indian Ocean water masses (warm-water route). Both oceanographic corridors are critical for the South Atlantic contribution to Meridional Overturning Circulation changes. In contrast to the Atlantic and Indian sectors of the ACC, and with the exception of drill cores from the Antarctic continental margin and off New Zealand, the Pacific sector of the ACC lacks information on its Cenozoic paleoceanography from deep-sea drilling records. To advance our knowledge and understanding of Miocene to Holocene atmosphere-ocean-cryosphere dynamics in the Pacific and their implications for regional and global climate and atmospheric CO₂, International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 383 recovered sedimentary sequences at (1) three sites located in the central South Pacific (U1539, U1540, and U1541), (2) two sites at the Chile margin (U1542 and U1544), and (3) one site from the pelagic eastern South Pacific (U1543) close to the entrance to the Drake Passage. Because of persistently stormy conditions and the resulting bad weather avoidance, we were not successful in recovering the originally planned Proposed Site CSP-3A in the central South Pacific in the Polar Frontal Zone. The drilled sediments at Sites U1541 and U1543 reach back to the late Miocene, and those at Site U1540 reach back to the early Pliocene. High sedimentary rate Pleistocene sedimentary sequences were drilled both in the central South Pacific (Site U1539) and along the Chile margin. Taken together, the sites represent a depth transect from ~1100 m at the Chile margin site (U1542) to ~4070 m in the central South Pacific (Site U1539) and allow investigation of changes in the vertical structure of the ACC, a key issue for understanding the role of the Southern Ocean in the global carbon cycle. The sites are located at latitudes and water depths where sediments will allow the application of a wide range of siliciclastic-, carbonate-, and opal-based proxies to address our objectives of reconstructing with unprecedented stratigraphic detail surface

to deep-ocean variations and their relation to atmosphere and cryosphere changes through stadial to interstadial, glacial to interglacial, and warmer than present time intervals.

IODP 382: Iceberg Alley and Subantarctic Ice and Ocean Dynamics

International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 382, Iceberg Alley and Subantarctic Ice and Ocean Dynamics, investigated the long-term climate history of Antarctica, seeking to understand how polar ice sheets responded to changes in insolation and atmospheric CO₂ in the past and how ice sheet evolution influenced global sea level and vice versa. Five sites (U1534 - U1538) were drilled east of the Drake Passage: two sites at 53.2°S at the northern edge of the Scotia Sea and three sites at 57.4° - 59.4°S in the southern Scotia Sea. We recovered continuously deposited late Neogene sediment to reconstruct the past history and variability in Antarctic Ice Sheet (AIS) mass loss and associated changes in oceanic and atmospheric circulation.

The sites from the southern Scotia Sea (Sites U1536 - U1538) will be used to study the Neogene flux of icebergs through “Iceberg Alley,” the main pathway along which icebergs calved from the margin of the AIS travel as they move equatorward into the warmer waters of the Antarctic Circumpolar Current (ACC). In particular, sediments from this area will allow us to assess the magnitude of iceberg flux during key times of AIS evolution, including the following:

- The middle Miocene glacial intensification of the East Antarctic Ice Sheet,
- The mid-Pliocene warm period,
- The late Pliocene glacial expansion of the West Antarctic Ice Sheet,
- The mid-Pleistocene transition (MPT), and
- The “warm interglacials” and glacial terminations of the last 800 ky.

We will use the geochemical provenance of iceberg-rafted detritus and other glacially eroded material to determine regional sources of AIS mass loss. We will also address interhemispheric phasing of ice sheet growth and decay, study the distribution and history of land-based versus marine-based ice sheets around the continent over time, and explore the links between AIS variability and global sea level.

By comparing north - south variations across the Scotia Sea between the Pirie Basin (Site U1538) and the Dove Basin (Sites U1536 and U1537), Expedition 382 will also deliver critical information on how climate changes in the Southern Ocean affect ocean circulation through the Drake Passage, meridional overturning in the region, water mass production, ocean - atmosphere CO₂ transfer by wind-induced upwelling, sea ice variability, bottom water outflow from the Weddell Sea, Antarctic weathering inputs, and changes in oceanic and atmospheric fronts in the vicinity of the ACC.

Comparing changes in dust proxy records between the Scotia Sea and Antarctic ice cores will also provide a detailed reconstruction of changes in the Southern Hemisphere westerlies on millennial and orbital timescales for the last 800 ky. Extending the ocean dust record beyond the last 800 ky will help to evaluate dust-climate couplings since the Pliocene, the potential role of dust in iron fertilization and atmospheric CO₂ drawdown during glacials, and whether dust input to Antarctica played a role in the MPT.

The principal scientific objective of Subantarctic Front Sites U1534 and U1535 at the northern limit of the Scotia Sea is to reconstruct and understand how ocean circulation and intermediate water formation responds to changes in climate with a special focus on the connectivity between the Atlantic and Pacific basins, the “cold water route.” The Subantarctic Front contourite drift, deposited between 400 and 2000 m water depth on the northern flank of an east - west trending trough off the Chilean continental shelf, is ideally situated to monitor millennial- to orbital-scale variability in the export of Antarctic Intermediate Water beneath the Subantarctic Front. During Expedition 382, we recovered continuously deposited sediments from this drift spanning the late Pleistocene (from ~0.78 Ma to recent) and from the late Pliocene (~3.1 - 2.6 Ma). These sites are expected to yield a wide array of paleoceanographic records that can be used to interpret past changes in the density structure of the Atlantic sector of the Southern Ocean, track migrations of the Subantarctic Front, and give insights into the role and evolution of the cold water route over significant climate episodes, including the following:

- The most recent warm interglacials of the late Pleistocene and
- The intensification of Northern Hemisphere glaciation.

IODP 379: Amundsen Sea West Antarctic Ice Sheet History

The Amundsen Sea sector of Antarctica has long been considered the most vulnerable part of the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) because of the great water depth at the grounding line and the absence of substantial ice shelves. Glaciers in this configuration are thought to be susceptible to rapid or runaway retreat. Ice flowing into the Amundsen Sea Embayment is undergoing the most rapid changes of any sector of the Antarctic Ice Sheet outside the Antarctic Peninsula, including changes caused by substantial grounding-line retreat over recent decades, as observed from satellite data. Recent models suggest that a threshold leading to the collapse of WAIS in this sector may have been already crossed and that much of the ice sheet could be lost even under relatively moderate greenhouse gas emission scenarios.

Drill cores from the Amundsen Sea provide tests of several key questions about controls on ice sheet stability. The cores offer a direct record of glacial history offshore from a drainage basin that receives ice exclusively from the WAIS, which allows clear

comparisons between the WAIS history and low-latitude climate records. Today, warm Circumpolar Deep Water (CDW) is impinging onto the Amundsen Sea shelf and causing melting of the underside of the WAIS in most places. Reconstructions of past CDW intrusions can assess the ties between warm water upwelling and large-scale changes in past grounding-line positions. Carrying out these reconstructions offshore from the drainage basin that currently has the most substantial negative mass balance of ice anywhere in Antarctica is thus of prime interest to future predictions.

The scientific objectives for this expedition are built on hypotheses about WAIS dynamics and related paleoenvironmental and paleoclimatic conditions. The main objectives are

1. To test the hypothesis that WAIS collapses occurred during the Neogene and Quaternary and, if so, when and under which environmental conditions;
2. To obtain ice-proximal records of ice sheet dynamics in the Amundsen Sea that correlate with global records of ice-volume changes and proxy records for atmospheric and ocean temperatures;
3. To study the stability of a marine-based WAIS margin and how warm deep-water incursions control its position on the shelf;
4. To find evidence for earliest major grounded WAIS advances onto the middle and outer shelf;
5. To test the hypothesis that the first major WAIS growth was related to the uplift of the Marie Byrd Land dome.

International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 379 completed two very successful drill sites on the continental rise of the Amundsen Sea. Site U1532 is located on a large sediment drift, now called Resolution Drift, and penetrated to 794 m with 90% recovery. We collected almost-continuous cores from the Pleistocene through the Pliocene and into the late Miocene. At Site U1533, we drilled 383 m (70% recovery) into the more condensed sequence at the lower flank of the same sediment drift. The cores of both sites contain unique records that will enable study of the cyclicity of ice sheet advance and retreat processes as well as bottom-water circulation and water mass changes. In particular, Site U1532 revealed a sequence of Pliocene sediments with an excellent paleomagnetic record for high-resolution climate change studies of the previously sparsely sampled Pacific sector of the West Antarctic margin.

Despite the drilling success at these sites, the overall expedition experienced three unexpected difficulties that affected many of the scientific objectives:

1. The extensive sea ice on the continental shelf prevented us from drilling any of the proposed shelf sites.
2. The drill sites on the continental rise were in the path of numerous icebergs of

various sizes that frequently forced us to pause drilling or leave the hole entirely as they approached the ship. The overall downtime caused by approaching icebergs was 50% of our time spent on site.

3. An unfortunate injury to a member of the ship's crew cut the expedition short by one week.

Recovery of core on the continental rise at Sites U1532 and U1533 cannot be used to precisely indicate the position of ice or retreat of the ice sheet on the shelf. However, these sediments contained in the cores offer a range of clues about past WAIS extent and retreat. At Sites U1532 and U1533, coarse-grained sediments interpreted to be ice-rafted debris (IRD) were identified throughout all recovered time periods. A dominant feature of the cores is recorded by lithofacies cyclicity, which is interpreted to represent relatively warmer periods variably characterized by higher microfossil abundance, greater bioturbation, and higher counts of IRD alternating with colder periods characterized by dominantly gray laminated terrigenous muds. Initial comparison of these cycles to published records from the region suggests that the units interpreted as records of warmer time intervals in the core tie to interglacial periods and the units interpreted as deposits of colder periods tie to glacial periods.

The cores from the two drill sites recovered sediments of purely terrigenous origin intercalated or mixed with pelagic or hemipelagic deposits. In particular, Site U1533, which is located near a deep-sea channel originating from the continental slope, contains graded sands and gravel transported downslope from the shelf to the abyssal plain. The channel is likely the path of such sediments transported downslope by turbidity currents or other sediment-gravity flows. The association of lithologic facies at both sites predominantly reflects the interplay of downslope and contouritic sediment supply with occasional input of more pelagic sediment. Despite the lack of cores from the shelf, our records from the continental rise reveal the timing of glacial advances across the shelf and thus the existence of a continent-wide ice sheet in West Antarctica at least during longer time periods since the late Miocene.

Cores from both sites contain abundant coarse-grained sediments and clasts of plutonic origin transported either by downslope processes or by ice rafting. If detailed provenance studies confirm our preliminary assessment that the origin of these samples is from the plutonic bedrock of Marie Byrd Land, their thermochronological record will potentially reveal timing and rates of denudation and erosion linked to crustal uplift. The chronostratigraphy of both sites enables the generation of a seismic sequence stratigraphy not only for the Amundsen Sea rise but also for the western Amundsen Sea along the Marie Byrd Land margin through a connecting network of seismic lines.

IODP 374: Ross Sea West Antarctic Ice Sheet History

The marine-based West Antarctic Ice Sheet (WAIS) is currently retreating due to shifting wind-driven oceanic currents that transport warm waters toward the ice margin, resulting in ice shelf thinning and accelerated mass loss of the WAIS. Previous results from geologic drilling on Antarctica's continental margins show significant variability in marine-based ice sheet extent during the late Neogene and Quaternary. Numerical models indicate a fundamental role for oceanic heat in controlling this variability over at least the past 20 My. Although evidence for past ice sheet variability has been collected in marginal settings, sedimentologic sequences from the outer continental shelf are required to evaluate the extent of past ice sheet variability and the associated oceanic forcings and feedbacks. International Ocean Discovery Program Expedition 374 drilled a latitudinal and depth transect of five drill sites from the outer continental shelf to rise in the eastern Ross Sea to resolve the relationship between climatic and oceanic change and WAIS evolution through the Neogene and Quaternary. This location was selected because numerical ice sheet models indicate that this sector of Antarctica is highly sensitive to changes in ocean heat flux. The expedition was designed for optimal data-model integration and will enable an improved understanding of the sensitivity of Antarctic Ice Sheet (AIS) mass balance during warmer-than-present climates (e.g., the Pleistocene "super interglacials," the mid-Pliocene, and the late early to middle Miocene). The principal goals of Expedition 374 were to

- Evaluate the contribution of West Antarctica to far-field ice volume and sea level estimates;
- Reconstruct ice-proximal atmospheric and oceanic temperatures to identify past polar amplification and assess its forcings and feedbacks;
- Assess the role of oceanic forcing (e.g., sea level and temperature) on AIS stability/instability;
- Identify the sensitivity of the AIS to Earth's orbital configuration under a variety of climate boundary conditions; and
- Reconstruct eastern Ross Sea paleobathymetry to examine relationships between seafloor geometry, ice sheet stability/instability, and global climate.

To achieve these objectives, we will

- Use data and models to reconcile intervals of maximum Neogene and Quaternary Antarctic ice advance with far-field records of eustatic sea level change;
- Reconstruct past changes in oceanic and atmospheric temperatures using a multiproxy approach;
- Reconstruct Neogene and Quaternary sea ice margin fluctuations in datable marine continental slope and rise records and correlate these records to existing inner

continental shelf records:

- Examine relationships among WAIS stability/instability, Earth's orbital configuration, oceanic temperature and circulation, and atmospheric pCO₂; and
- Constrain the timing of Ross Sea continental shelf overdeepening and assess its impact on Neogene and Quaternary ice dynamics.

Expedition 374 was carried out from January to March 2018, departing from Lyttelton, New Zealand. We recovered 1292.70 m of high-quality cores from five sites spanning the early Miocene to late Quaternary. Three sites were cored on the continental shelf (Sites U1521, U1522, and U1523). At Site U1521, we cored a 650 m thick sequence of interbedded diamictite, mudstone, and diatomite, penetrating the Ross Sea seismic Unconformity RSU4. The depositional reconstructions of past glacial and open-marine conditions at this site will provide unprecedented insight into environmental change on the Antarctic continental shelf during the early and middle Miocene. At Site U1522, we cored a discontinuous upper Miocene to Pleistocene sequence of glacial and glaciomarine strata from the outer shelf, with the primary objective to penetrate and date seismic Unconformity RSU3, which is interpreted to represent the first major continental shelf-wide expansion and coalescing of marine-based ice streams from both East and West Antarctica. At Site U1523, we cored a sediment drift located beneath the westerly flowing Antarctic Slope Current (ASC). Cores from this site will provide a record of the changing vigor of the ASC through time. Such a reconstruction will enable testing of the hypothesis that changes in the vigor of the ASC represent a key control on regulating heat flux onto the continental shelf, resulting in the ASC playing a fundamental role in ice sheet mass balance.

We also cored two sites on the continental slope and rise. At Site U1524, we cored a Plio-Pleistocene sedimentary sequence on the continental rise on the levee of the Hillary Canyon, which is one of the largest conduits of Antarctic Bottom Water delivery from the Antarctic continental shelf into the abyssal ocean. Drilling at Site U1524 was intended to penetrate into middle Miocene and older strata but was initially interrupted by drifting sea ice that forced us to abandon coring in Hole U1524A at 399.5 m drilling depth below seafloor (DSF). We moved to a nearby alternate site on the continental slope (U1525) to core a single hole with a record complementary to the upper part of the section recovered at Site U1524. We returned to Site U1524 3 days later, after the sea ice cleared. We then cored Hole U1524C with the rotary core barrel with the intention of reaching the target depth of 1000 m DSF. However, we were forced to terminate Hole U1524C at 441.9 m DSF due to a mechanical failure with the vessel that resulted in termination of all drilling operations and a return to Lyttelton 16 days earlier than scheduled. The loss of 39% of our operational days significantly impacted our ability to achieve all Expedition 374 objectives as originally planned. In particular, we were not able to obtain the deeper time record of the middle Miocene on the continental

rise or abyssal sequences that would have provided a continuous and contemporaneous archive to the high-quality (but discontinuous) record from Site U1521 on the continental shelf. The mechanical failure also meant we could not recover sediment cores from proposed Site RSCR-19A, which was targeted to obtain a high-fidelity, continuous record of upper Neogene and Quaternary pelagic/hemipelagic sedimentation. Despite our failure to recover a shelf-to-rise transect for the Miocene, a continental shelf-to-rise transect for the Pliocene to Pleistocene interval is possible through comparison of the high-quality records from Site U1522 with those from Site U1525 and legacy cores from the Antarctic Geological Drilling Project (ANDRILL).



제 6 장 참고문헌

1 절. 서로스해 테라노바만 퇴적물 침강입자의 계절 및 격년 변화 (2014-2016년)

- Anadon R, Estrada M (2002) The FRUELA cruises. A carbon flux study in productive areas of the Antarctic Peninsula (December 1995 - February 1996). *Deep-sea Research. Part II*, 49: 567 - 583.
- Arndt JE, Schenke HW, Jakobsson M, Nitsche FO, Buys G, Goleby B, Rebesco M, Bohoyo F, Hong J, Black J, Greku R, Udintsev G, Barrios F, Reynoso-Peralta W, Taisei M, Wigley R (2013) The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0- A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters. *Geophysical Research Letters* 40(12): 3111 - 3117.
- Arrigo KR, van Dijken GL (2004) Annual changes in sea-ice, chlorophyll a, and primary production in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-sea Research. Part II*, 51(1 - 3): 117 - 138.
- Arrigo KR, van Dijken GL, Ainley DG, Fahnestock MA, Markus T (2002) Ecological impact of a large Antarctic iceberg. *Geophysical Research Letters* 29(7): 4. <https://doi.org/10.1029/2001GL014160>
- Arrigo KR, van Dijken G, Long M (2008a) Coastal Southern Ocean: A strong anthropogenic CO₂ sink. *Geophysical Research Letters* 35. L21602. <https://doi.org/10.1029/2008gl035624>
- Arrigo KR, van Dijken GL, Bushinsky S (2008b) Primary production in the Southern Ocean, 1997 - 2006. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 113. C08004. <https://doi.org/10.1029/2007jc004551>
- Becquevort S, Smith Jr WO (2001) Aggregation, sedimentation and biodegradability of phytoplankton-derived material during spring in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-sea Research. Part II*, 48(19 - 20): 4155 - 4178.
- Boyd PW, Newton PP (1999) Does planktonic community structure determine downward particulate organic carbon flux in different oceanic provinces? *Deep-sea Research. Part I*, 46(1): 63 - 91.

- Budillon G, Gremes-Cordero S, Salusti E (2002) On the dense water spreading off the Ross Sea shelf (Southern Ocean). *Journal of Marine Systems* 35(3 - 4): 207 - 227.
- Castagno P, Falco P, Dinniman MS, Spezie G, Budillon G (2017) Temporal variability of the Circumpolar Deep Water inflow onto the Ross Sea continental shelf. *Journal of Marine Systems* 166: 37 - 49.
- Cavalieri DJ, Parkinson CL, Gloersen P, Zwally H (1996) Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data. NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado.
- Chiarini F, Capotondi L, Dunbar RB, Giglio F, Mammì I, Mucciarone DA, Ravaioli M, Tesi T, Langone L (2013) A revised sediment trap splitting procedure for samples collected in the Antarctic sea. *Methods in Oceanography* 8: 13 - 22.
- Church MJ, Lomas MW, Muller-Karger F (2013) Sea change: Charting the course for biogeochemical ocean time-series research in a new millennium. *Deep-sea Research. Part II*, 93: 2 - 15.
- Collier R, Dymond J, Honjo S, Manganini S, Francois R, Dunbar R (2000) The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: Moored sediment trap observations 1996 - 1998. *Deep-sea Research. Part II*, 47(15 - 16): 3491 - 3520.
- DeMaster DJ (1981) The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45(10): 1715 - 1732.
- DeMaster DJ, Dunbar RB, Gordon LI, Leventer AR, Morrison JM, Nelson DM, Nittrouer CA, Smith WOJ (1992) Cycling and accumulation of biogenic silica and organic matter in high-latitude environments: The Ross Sea. *Oceanography (Washington, D.C.)* 5(3): 146 - 153.
- DeMaster DJ, Ragueneau O, Nittrouer CA (1996) Preservation efficiencies and accumulation rates for biogenic silica and organic C, N, and P in high-latitude sediments: The Ross Sea. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 101(C8): 18501 - 18518.
- Ducklow HW, Erickson M, Kelly J, Montes-Hugo M, Ribic CA, Smith RC, Stammerjohn SE, Karl DM (2008) Particle export from the upper ocean over the continental shelf of the west Antarctic Peninsula: A long-term

- record, 1992 - 2007. *Deep-sea Research. Part II*, 55(18 - 19): 2118 - 2131.
- Ducklow HW, Wilson SE, Post AF, Stammerjohn SE, Erickson M, Lee S, Lowry KE, Sherrell RM, Yager PL (2015) Particle flux on the continental shelf in the Amundsen Sea Polynya and Western Antarctic Peninsula. *Elementa: Science of the Anthropocene* 3. 000046. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000046>
- Dunbar RB, Leventer AR, Mucciarone DA (1998) Water column sediment fluxes in the Ross Sea, Antarctica: Atmospheric and sea ice forcing. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 103(C13): 30741 - 30759.
- Fischer G, Gersonde R, Wefer G (2002) Organic carbon, biogenic silica and diatom fluxes in the marginal winter sea-ice zone and in the Polar Front Region: Interannual variations and differences in composition. *Deep-sea Research. Part II*, 49(9 - 10): 1721 - 1745.
- Forest A, Tremblay JE, Gratton Y, Martin J, Gagnon J, Darnis G, Sampei M, Fortier L, Ardyna M, Gosselin M, Hattori H, Nguyen D, Maranger R, Vaque D, Marrase C, Pedros-Alio C, Sallon A, Michel C, Kellogg C, Deming J, Shadwick E, Thomas H, Link H, Archambault P, Piepenburg D (2011) Biogenic carbon flows through the planktonic food web of the Amundsen Gulf (Arctic Ocean): A synthesis of field measurements and inverse modeling analyses. *Progress in Oceanography* 91(4): 410 - 436.
- Frignani M, Langone L, Labbrozzi L, Ravaioli M (2000) Biogeochemical processes in the Ross Sea (Antarctica): present knowledge and perspectives. *Ross Sea Ecology*: 39 - 50.
- Greenwood JE, Truesdale VW, Rendell AR (2001) Biogenic silica dissolution in seawater - in vitro chemical kinetics. *Progress in Oceanography* 48(1): 1 - 23.
- Heussner S, Ratti C, Carbonne J (1990) The Pps-3 Time-Series Sediment Trap and the Trap Sample Processing Techniques Used during the Ecomarge Experiment. *Continental Shelf Research* 10(9 - 11): 943 - 958.
- Honjo S, Krishfield RA, Eglinton TI, Manganini SJ, Kemp JN, Doherty K, Hwang J, McKee TK, Takizawa T (2010) Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise. *Progress in Oceanography* 85(3 - 4): 137 - 170.

- Hoppe CJM, Klaas C, Ossebaar S, Soppa MA, Cheah W, Laglera LM, Santos-Echeandia J, Rost B, Wolf-Gladrow DA, Bracher A, Hoppema M, Strass V, Trimborn S (2017) Controls of primary production in two phytoplankton blooms in the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-sea Research. Part II*, 138: 63 - 73.
- Jaeger JM, Nittrouer CA, DeMaster DJ, Kelchner C, Dunbar RB (1996) Lateral transport of settling particles in the Ross Sea and implications for the fate of biogenic material. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 101(C8): 18479 - 18488.
- Langone L, Frignani M, Labbrozzi L, Ravaioli M (1998) Present-day biosiliceous sedimentation in the northwestern Ross Sea, Antarctica. *Journal of Marine Systems* 17(1 - 4): 459 - 470.
- Langone L, Frignani M, Ravaioli M, Bianchi C (2000) Particle fluxes and biogeochemical processes in an area influenced by seasonal retreat of the ice margin (northwestern Ross Sea, Antarctica). *Journal of Marine Systems* 27(1 - 3): 221 - 234.
- Langone L, Dunbar RB, Mucciarone DA, Ravaioli M, Meloni R, Nittrouer CA (2003) Rapid sinking of biogenic material during the late austral summer in the Ross Sea, Antarctica. In: DiTullio GR, Dunbar RB (Eds) *Biogeochemistry of the Ross Sea*. American Geophysical Union, 221 - 234.
- Laws EA, Falkowski PG, Smith Jr WO, Ducklow H, McCarthy JJ (2000) Temperature effects on export production in the open ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 14(4): 1231 - 1246.
- Leventer A, Dunbar RB (1996) Factors influencing the distribution of diatoms and other algae in the Ross Sea. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 101(C8): 18489 - 18500.
- Mangoni O, Saggiomo V, Bolinesi F, Margiotta F, Budillon G, Cotroneo Y, Mistic C, Rivaro P, Saggiomo M (2017) Phytoplankton blooms during austral summer in the Ross Sea, Antarctica: Driving factors and trophic implications. *PLoS One* 12(4): 23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176033>
- Manzoni M (2006) *La natura dell'Antartide*. Springer Verlag, 348.
- Nelson DM, DeMaster DJ, Dunbar RB, Smith Jr WO (1996) Cycling of organic carbon and biogenic silica in the Southern Ocean: Estimates of

- water-column and sedimentary fluxes on the Ross Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 101(C8): 18519 - 18532.
- Peloquin JA, Smith WO (2007) Phytoplankton blooms in the Ross Sea, Antarctica: Interannual variability in magnitude, temporal patterns, and composition. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 112. C08013. <https://doi.org/10.1029/2006jc003816>
- Ravaoli M, Frignani M, Gambi MC, Labbrozzi L, Langone L (1999) Particle fluxes and sediment characteristics at three selected sites in the Ross Sea (Antarctica). In: Spezie G, Manzella G (Eds) *Oceanography of the Ross Sea, Antarctica*. Springer-Verlag, Berlin, 209 - 222.
- Robinson NJ, Williams MJM (2012) Iceberg-induced changes to polynya operation and regional oceanography in the southern Ross Sea, Antarctica, from in situ observations. *Antarctic Science* 24(05): 514 - 526.
- Sampei M, Sasaki H, Forest A, Fortier L (2012) A substantial export flux of particulate organic carbon linked to sinking dead copepods during winter 2007 - 2008 in the Amundsen Gulf (southeastern Beaufort Sea, Arctic Ocean). *Limnology and Oceanography* 57(1): 90 - 96.
- Sanchez-Vidal A, Veres O, Langone L, Ferre B, Calafat A, Canals M, de Madron XD, Heussner S, Mienert J, Grimalt JO, Pusceddu A, Danovaro R (2015) Particle sources and downward fluxes in the eastern Fram strait under the influence of the west Spitsbergen current. *Deep-sea Research. Part I*, 103: 49 - 63.
- Seibel BA, Dierssen HM (2003) Cascading trophic impacts of reduced biomass in the Ross Sea, Antarctica: Just the tip of the iceberg? *The Biological Bulletin* 205(2): 93 - 97.
- Shaw TJ, Smith Jr KL, Hexel CR, Dudgeon R, Sherman AD, Vernet M, Kaufmann RS (2011) Th-234-Based Carbon Export around Free-Drifting Icebergs in the Southern Ocean. *Deep-sea Research. Part II*, 58(11 - 12): 1384 - 1391.
- Sherman AD, Hobson BW, McGill PR, Davis RE, McClune MC, Smith Jr KL (2011) Lagrangian sediment traps for sampling at discrete depths beneath free-drifting icebergs. *Deep-sea Research. Part II*, 58(11 - 12): 1327 - 1335.
- Siegenthaler U, Stocker TF, Monnin E, Luthi D, Schwander J, Stauffer B,

- Raynaud D, Barnola JM, Fischer H, Masson-Delmotte V, Jouzel J (2005) Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science* 310(5752): 1313 - 1317.
- Smith Jr WO, Dunbar RB (1998) The relationship between new production and vertical flux on the Ross Sea continental shelf. *Journal of Marine Systems* 17(1 - 4): 445 - 457.
- Smith WO, Nelson DM (1985) Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. *Science* 227(4683): 163 - 166.
- Smith Jr WO, Marra J, Hiscock MR, Barber RT (2000) The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-sea Research. Part II*, 47(15 - 16): 3119 - 3140.
- Smith Jr WO, Dennett MR, Mathot S, Caron DA (2003) The temporal dynamics of the flagellated and colonial stages of *Phaeocystis antarctica* in the Ross Sea. *Deep-sea Research. Part II*, 50(3 - 4): 605 - 617.
- Smith Jr KL, Sherman AD, Shaw TJ, Murray AE, Vernet M, Cefarelli AO (2011) Carbon export associated with free-drifting icebergs in the Southern Ocean. *Deep-sea Research. Part II*, 58(11 - 12): 1485 - 1496.
- Takahashi T, Sutherland SC, Wanninkhof R, Sweeney C, Feely RA, Chipman DW, Hales B, Friederich G, Chavez F, Sabine C, Watson A, Bakker DCE, Schuster U, Metzl N, Yoshikawa-Inoue H, Ishii M, Midorikawa T, Nojiri Y, Kortzinger A, Steinhoff T, Hoppema M, Olafsson J, Arnarson TS, Tilbrook B, Johannessen T, Olsen A, Bellerby R, Wong CS, Delille B, Bates NR, de Baar HJW (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-sea Research. Part II*, 56(8 - 10): 554 - 577.
- Weston K, Jickells TD, Carson DS, Clarke A, Meredith MP, Brandon MA, Wallace MI, Ussher SJ, Hendry KR (2013) Primary production export flux in Marguerite Bay (Antarctic Peninsula): Linking upper water-column production to sediment trap flux. *Deep-sea Research. Part I*, 75: 52 - 66.
- Winton VHL, Dunbar GB, Atkins CB, Bertler NAN, Delmonte B, Andersson PS, Bowie A, Edwards R (2016) The origin of lithogenic sediment in the south-western Ross Sea and implications for iron fertilization. *Antarctic*

Science 28(04): 250 - 260.

Zwally HJ, Li J, Robbins JW, Saba JL, Yi DH, Brenner AC (2015) Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses. *Journal of Glaciology* 61(230): 1019 - 1036.

2 절. 남극 로스해 대륙주변부 중앙분지의 점토광물 조성을 통한 기원 추적

김성한, 조현구, 김부근 (2011) 마지막 빙하기 동안 베링해 알류산 분지 북부 지역의 점토광물 조성 변화. *한국광물학회지* 24:19-29

하상범, 김부근, 조현구, 에스터 콜리자 (2018) 남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴 동쪽 대륙사면의 코어 RS14-GC2 의 점토광물의 기원지 연구. *한국광물학회지* 31:1-12

Anderson JB, Brake CF, Myers NC (1984) Sedimentation on the Ross Sea continental shelf, Antarctica. *Mar Geol* 57:295-333

Andrews JT, Cunningham WL, Domack EW, Jennings AE, Jull AT, Leventer A, Licht KJ (1999) Problems and possible solutions concerning radiocarbon dating of surface marine sediments, Ross Sea, Antarctica. *Quat Res* 52:206-216

Arrigo KR van Dijken GL (2004) Annual changes in sea-ice, chlorophyll a, and primary production in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res II* 51:117-138

Arrigo KR, Weiss AM, Smith Jr WO (1998) Physical forcing of phytoplankton dynamics in the southwestern Ross Sea. *J Geophys Res: Oceans* 103:1007-1021

Bindschadler R (1998) Monitoring ice sheet behavior from space. *Rev Geophys* 36:79-104

Biscaye PE (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol Soc Am Bull* 76:803-832

Bonaccorsi R, Brambati A, Busetti M, Fanzutti GP (2000) Relationship Among X-Ray Lithofacies, Magnetic Susceptibility, P-Wave Velocity and Bulk Density in Core ANTA95-89C (Ross Sea, Antarctica): First Results. *Terra Ant Rept* 4:185-198

Budillon G, Castagno P, Aliani S, Spezie G, Padman L (2011) Thermohaline

- variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break. *Deep-Sea Res I* **58**:1002-1018
- Chamley H (1989) *Clay Sedimentology*. Springer. Berlin, 623 p
- Davey FJ (1981) Geophysical studies in the Ross Sea region. *J Royal Soc New Zealand* **11**:465-479
- Denton GH, Hughes TJ (2002) Reconstructing the Antarctic ice sheet at the Last Glacial Maximum. *Quat Sci Rev* **21**:193-202
- Dingle RV, Lavelle M (1998) Antarctic Peninsular cryosphere: Early Oligocene (c. 30 Ma) initiation and a revised glacial chronology. *J Geol Soc* **155**:433-437
- Domack EW, Jacobson EA, Shipp S, Anderson JB (1999) Late Pleistocene - Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2 - sedimentologic and stratigraphic signature. *Geol Soc Am Bull* **111**:1517-1536
- Ehrmann WU (1998) Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol* **139**:213-231
- Ehrmann WU, Mackensen A (1992) Sedimentological evidence for the formation of an East Antarctic ice sheet in Eocene/Oligocene time. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol* **93**:85-112
- Ehrmann WU, Graham AG, Hillenbrand CD, Kuhn G, Larter RD, Smith JA (2011) Provenance changes between recent and glacial-time sediments in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica: clay mineral assemblage evidence. *Ant Sci* **23**:471-486
- Ehrmann WU, Melles M, Kuhn G, Grobe H (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. *Mar Geol* **107**:249-273
- Ehrmann WU, Setti M, Marinono L (2005) Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts (McMurdo Sound, Antarctica) reveal palaeoclimatic history. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol* **229**:187-211
- Fagel N (2007) Chapter four clay minerals, deep circulation and climate. *Develop Mar Geol* **1**:139-184
- Forsberg CF, Florindo F, Gruetzner J, Venuti A, Solheim A (2008) Sedimentation and aspects of glacial dynamics from physical properties, mineralogy and

- magnetic properties at ODP Sites 1166 and 1167, Prydz Bay, Antarctica. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* **260**:184–201
- Franke D, Ehrmann WU (2010) Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* **286**:55–65
- Friedman GM, Sanders JE (1978) *Principles of sedimentology*. Wiley, New York, 792 p
- Giorgetti G, Talarico F, Sandroni S, Zeoli A (2009) Provenance of Pleistocene sediments in the ANDRILL AND-1B drillcore: Clay and heavy mineral data. *Global Planet Change* **69**:94–102
- Griffin JJ, Windom H, Goldberg ED (1968) The distribution of clay minerals in the world ocean. *Deep-Sea Res* **15**:433–459
- Grobe H, Mackensen A (1992) Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin. In: Kennett JP, Warnke DA (eds) *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change: Part One*. *Ant Res Ser* **56**:349–376
- Hambrey MJ, Ehrmann WU, Larsen B (1991) Cenozoic glacial record of the Prydz Bay continental shelf, East Antarctica. In: Barron J, Larsen B et al. (eds) *Proceedings of Ocean Drilling Program, Sci Res* **119**:77–132
- Hillenbrand CD, Ehrmann W, Larter RD, Benetti S, Dowdeswell JA, Cofaigh CÓ, Graham AGC, Grobe H (2009) Clay mineral provenance of sediments in the southern Bellingshausen Sea reveals drainage changes of the West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. *Mar Geol* **265**:1–18
- Hillenbrand C.D, Ehrmann WU (2001) Distribution of clay minerals in drift sediments on the continental rise west of the Antarctic Peninsula, ODP Leg 178, Sites 1095 and 1096. In: Barker PF, Camerlenghi A, Acton GD, Ramsay ATS (eds.), *Proceedings of Ocean Drilling Program, Sci Res* **178**:1–29
- Howat IM, and Domack EW (2003) Reconstructions of western Ross Sea palaeo ice stream grounding zones from high resolution acoustic stratigraphy. *Boreas* **32**:56–75
- Jacobs SS (1991) On the nature and significance of the Antarctic Slope Front. *Mar Chem* **35**:9–24

- Jacobs SS (2004) Bottom water production and its links with the thermohaline circulation. *Ant Sci* **16**:427–437
- Khim BK, Colizza E, Hong JK (2017) Paleoceanographic changes in the continental slope in the Central Basin of the Ross Sea since the last glacial. Abstract of Past Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS) Conference, Trieste, Italy, 10–15 Sept 2017
- Kyle PR (1990) A McMurdo volcanic group western Ross embayment. In: LeMasurier WE, Thompson JW, Baker PE, Kyle PR, Rowley PD, Smellie JL, Verwoerd WJ (eds.), *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. *Ant Res Ser* **48**:18–145
- Langone L, Frignani M, Labbrozzi L, Ravaioli M (1998) Present-day biosiliceous sedimentation in the northwestern Ross Sea, Antarctica. *J Mar Syst* **17**:459–470
- Licht KJ, Andrews JT, Jennings AE, Williams KM (1996) Chronology of late Wisconsin ice retreat from the western Ross Sea, Antarctica. *Geology* **24**:223–226
- Lucchi RG, Rebesco M, Camerlenghi A, Busetti M, Tomadin L, Villa G, Persico D, Morigi C., Bonci MC, Giorgetti G (2002). Mid-late Pleistocene glacimarine sedimentary processes of a high-latitude, deep-sea sediment drift (Antarctic Peninsula Pacific margin). *Mar Geol* **189**:343–370
- Orsi, AH, Bullister, JL, Johnson GC (1999) Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Prog Oceanogr* **43**:55–109
- Orsi AH, Wiederwohl CL (2009) A recount of Ross Sea waters. *Deep-Sea Res II* **56**:778–795
- Petschick R, Kuhn G, Gingele F (1996) Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Mar Geol* **130**:203–229
- Robert C, Chamley H (1991) Development of early Eocene warm climates, as inferred from clay mineral variations in oceanic sediments. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol* **89**:315–331
- Robert C, Maillot H (1990) Paleoenvironments in the Weddell Sea area and Antarctic climates, as deduced from clay mineral associations and geochemical data, ODP Leg 113. *Proceedings of Ocean Drilling Program, Sci*

Res **113**:51-66

- Salvi C, Busetti M, Marinoni L, Brambati A (2006) Late Quaternary glacial marine to marine sedimentation in the Pennell Trough (Ross Sea, Antarctica). *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol* **231**:199-214
- Setti M, Marinoni L, López-Galindo A, Aboud, AB (1998). TEM observations and trace element analysis on the clay minerals of the CRP-1 Core (Ross Sea, Antarctica). *Terra Ant* **5**:621-626
- Setti M, Marinoni L, López-Galindo A, Delgado-Hubertas A (2000). Compositional and morphological features of the smectites of the sediments of CRP-2/2A, Victoria Land Basin, Antarctica. *Terra Ant* **7**:581-587
- Shipp S, Anderson JB, Domack EW (1999) Seismic signature of the Late Pleistocene fluctuation of the West Antarctic Ice Sheet system in Ross Sea: a new perspective, Part I. *Geol Soc Am Bull* **111**:1486-1516
- Smith WO, Nelson DM (1985). Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: spatial coherence with the density field. *Science* **227**:163-166
- Smellie JL (1998) Sand grain detrital modes in CRP-1: provenance variations and influence of Miocene eruptions on the marine record in the McMurdo Sound region. *Terra Ant* **5**:579-587
- Stokke PR, Carson B (1973) Variation in clay mineral X-ray diffraction results with the quantity of sample mounted. *J Sed Petrol* **43**:957-964
- Welke B, Licht K, Hennessy A, Hemming S, Pierce Davis E, Kassab C (2016). Applications of detrital geochronology and thermochronology from glacial deposits to the Paleozoic and Mesozoic thermal history of the Ross Embayment, Antarctica. *Geochem Geophys Geosyst* **17**:2762-2780

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.