

TSP16010-049-12

남극해 홀로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구

High-resolution analytical study of the Holocene-deglacial
sediments in the Antarctic Ocean



부산대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발” 과제의 위탁연구 “남극해 홀로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016 . 1 . 20

| | | |
|---------------|---|-------|
| (본과제) 총괄연구책임자 | : | 이재일 |
| 위탁연구기관명 | : | 부산대학교 |
| 위탁연구책임자 | : | 김부근 |
| 위탁참여연구원 | : | 박유현 |
| “ | : | 하상범 |
| “ | : | 정다은 |

요 약 문

I. 제 목

- 남극해 홀로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 로스해 중앙분지 및 펜넬퇴 동쪽 대륙사면 시추퇴적물의 다양한 고해양학 지시자 분석

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 로스해 중앙분지에서 시추코아 KI-13-C2 퇴적물 획득
- 로스해 펜넬퇴 동쪽 대륙사면에서 시추코아 RS14-C2 퇴적물 획득
- 코아 퇴적물의 고해양 지시자(생물기원오팔, 탄산염함량, 총유기탄소, 탄소동위원소) 분석
- 로스해 중앙분지의 홀로세-후빙기-빙하기 환경 변화 복원
- 로스해 펜넬퇴 동쪽 대륙사면의 홀로세-후빙기-빙하기 환경 변화 복원
- 동남극빙하의 발달과 고기후 변화 관계 파악

IV. 연구개발결과

- 시추코아 KI-13-C2 코아에서 적어도 두 번의 빙하기-간빙기 변화를 확인
- 시추코아 RS14-C2 코아에서 한 번의 빙하기-간빙기 변화가 확인됨
- 간빙기 동안 생물기원 퇴적물의 형성이 증가함
- 빙하기 동안 퇴적물의 재동 이동현상이 뚜렷함
- 빙하기 또는 후빙기 동안의 퇴적물은 동남극 빙상의 발달과 매우 밀접한 관련이 나타남

V. 연구개발결과의 활용계획

- 국제적 수준의 자료 획득과 국제학술지 게재를 통한 학문적 위상 정립
- 기후변화 대응에 기초한 자료 제공으로 산업 부분의 준비 자료 확보



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

- High-resolution analytical study of the Holocene-deglacial sediments in the Antarctic Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

- To analyze the diverse paleoceanographic indicators from the core sediments of the Central Basin in the Ross Sea

III. Contents and Extent of R&D

- To obtain the gravity core KI-13-C2 in the Central Basin of the Ross Sea
- To obtain the gravity core RS14-C2 in the continental slope to the east of Pennell Bank
- To analyze the diverse paleoceanographic indicators from the core sediments of the Central Basin in the Ross Sea
- To analyze the diverse paleoceanographic indicators (biogenic opal, CaCO_3 , organic carbon, carbon isotope of organic matter) from the core sediments
- To reconstruct the Holocene-deglacial-glacial environmental change in the Central Basin of the Ross Sea
- To reconstruct the Holocene-deglacial-glacial environmental change in the

continental slope to the east of the Pennell Bank

- To reveal the relationship between the growth of East Antarctic Ice Sheet and paleoclimate change

IV. R&D Results

- Core KI-13-C2 shows at least the two glacial-interglacial cycles.
- Core RS14-C2 shows one glacial-interglacial cycle.
- Biogenic component increased during the interglacial period.
- Reworked sediment and transport are distinct during the glacial period.
- Glacial and deglacial sediments are controlled by the growth of East Antarctic Ice Sheet.

V. Application Plans of R&D Results

- To obtain the international-level database and establish the research quality through the international journal
- To prepare for the industrial database by providing the preliminary data for the climate change response

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



제 1 장 서 론

남빙양의 생물학적 생산성은 전세계 해양의 규산염 순환에 강하게 영향을 미친다(Hillenbrand and Futterer, 2000). 규산염은 해양생태계에서 중요한 영양염으로 규조(diatom), 규질편모조류(silicoflagellate), 방산충(radiolarian), 해면동물(sponge)들의 피각과 골편 형성에 사용된다. 남빙양의 차가운 표층 수괴에서는 규조에 의한 일차생산 때문에 남빙양 심해퇴적물의 생물기원 물질들은 주로 규질 식물플랑크톤으로 구성되어 있다(e.g., Goodell, 1973). 규산질로 구성된 생물기원 물질들은 퇴적물 내에서 생물기원 오팔(biogenic opal)의 형태로 존재하며, 표층 해수의 규조 생산성을 지시한다(Hillenbrand et al., 2001).

남극 대륙주변부에서의 퇴적물의 퇴적작용은 전 세계의 규소 농도에 큰 영향을 미친다(DeMaster, 1981; Ledford-Hoffman et al., 1986; DeMaster et al., 1991; Harden et al., 1992). 강과 열수작용에 의해 대양으로 공급되는 규소 중 25%의 용존 규소는 남극 대륙붕에서 퇴적되고 있다(Ledford-Hoffman et al., 1986). 반면 이들 퇴적물들은 대략 5%의 아주 작은 양의 유기탄소를 포함한다(De Master et al., 1991). 이러한 차이는 생규소 물질이 유기탄소물질 보다 상대적으로 보존이 더 잘 되기 때문이다. 최근 몇 년 동안 생물기원 물질의 퇴적률을 측정하고 퇴적물에 기록된 고환경과 고기후에 대한 평가를 위해 남극대륙주변부에서의 정확한 퇴적연대 설정에 대한 관심이 증가 해 왔다. 퇴적물들의 정확한 퇴적률을 설정하기 위해서는 방사성탄소 측정법이 ^{210}Pb 측정법 보다 좀 더 신뢰 할 수 있는 방법이다(DeMaster et al., 1991; Harden et al., 1992; DeMaster et al., 1996). 이것을 근거로, DeMaster 등 (1991, 1996)은 로스해 대륙붕 지역에 퇴적된 총 생규소의 양이 ^{210}Pb 측정법을 이용한 Ledford-Hoffman (1986) 결과 값 보다 거의 10배 이상 작다는 것을 확인하였다. 그 차이는 후퇴적 작용(post-depositional processes)때문이다. 가령 퇴적물 혼합: ^{14}C 의 반감기가 ^{210}Pb 보다 더 길기 때문에 ^{14}C 는 혼합작용에 덜 민감하게 작용한다. 하지만 최근에는 퇴적률에 관련하여 혼합이 미치는 영향의 중요성이 명확하지는 않다.

기존 연구들에 의하면 전세계 생물기원 규산염 축적의 37% 이상이 남빙양에서 일어난다고 보고되었다(Ragueneau et al., 2000). 이것은 대기중의 이산화탄소 농도가 남빙양의 이산화탄소 흡수량 변화와 밀접한 연관이 있다는 것을 시사한다(Kumar et al., 1995; Francois et al., 1997; Elderfield and Rickaby, 2000). Takahashi et al. (2002)은 남위 50도 이남의 지역에서 남빙양에 의해 제거되는 이산화탄소가 전체 해양이 제거하는 이산화탄소의 20% 이상을 차지한다고 보고하였다. 대기 중 이산화탄소의 농도 변화는 지구의 기후 변화와 매우 밀접한 관련이 있으며 빙하기 동안은 대기 중 이산화탄소 농도가 감소하고 간빙기 동안은 증가한다고 알려져 있다(Petit et al., 1999).

빙하기 동안 대기 중 이산화탄소 농도가 감소된 것은 대기 중 이산화탄소 일부가 해양으로 제

거되었기 때문이다. 생물학적 펌프(biological pump)는 표층해수의 일차 생산자에 의해 대기 중 이산화탄소와 해수의 무기탄소가 유기탄소로 전환되어 심층으로 전달하는 과정으로, 남빙양에서 생물학적 펌프의 효율 변화는 빙하기-간빙기에 따른 대기 중 이산화탄소 농도 변화의 잠재적인 원인으로 제기되어 왔다(Knox and McElroy, 1984; Sarmiento and Toggweiler, 1984). 그러므로 남빙양의 고생산성을 재구성하고 전지구적인 환경 변화와 연결하는 것은 지구의 기후 시스템을 이해하기 위해 매우 중요하다.

이 연구의 목적은 로스해 중앙분지와 펜넬퇴 동쪽 대륙사면에서 채취된 시추코아 퇴적물에서 빙하기-후빙기-홀로세 동안의 고기후 변화를 다양한 고해양 지시자를 통해 규명하고 동남극빙상의 발달을 파악하는 것이다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

최근까지 남극해에서 마지막 플라이스토세에서 홀로세까지 고해상도의 고기후학적 자료는 거의 없었다. Shevenell et al. (1996)의 연구에서 적어도 따뜻한 시기가 홀로세 중기 동안 2번에 걸쳐 약 8000 cal yr BP와 약 3000~5000 cal yr BP에 발생했음이 밝혀졌다. 이러한 해석은 총유기탄소(TOC)값의 증가를 근거로 한 것이며, 총유기탄소의 증가는 생물학적 활동의 증가를 의미하며, 이는 아마도 따뜻한 수괴와 해빙의 감소의 영향으로 인한 것일 것이다. Leventer et al. (1996)는 Palmer Deep의 퇴적 코아에서 다양한 프록시를 사용하였으며 3700 ¹⁴Cyr(1300yr corrected)전까지의 기록으로 홀로세 중기 기후 온난(약 2500 cal yr BP)의 종료 시기와 소빙기를 밝혀냈다. Leventer et al. (1996)에서 구조, 유공충, 건조밀도, 대자율의 주기 분석을 하였으며, 이를 통해 200-300 년 주기의 기후변화를 밝혀냈다. 이는 태양활동과 같은 전 지구적인 forcing에 의해 야기된 것으로 생각된다.

웨델해 대륙 주변부에서의 해빙양성 퇴적작용(생물 생산성, 유빙, 해류와 중력에 의한 사면 수송에 조절되는)과 고환경 변화들의 일반적인 모델은 Grobe와 Mackensen (1992)이 제안하였다. 그 모델에서, 퇴적률은 대륙에서 거리가 증가할수록 감소했다. 가장 높은 퇴적률은 매우 강화된 생산성에 의해 간빙기가 시작되는 시점에서 나타나는 반면에, 빙하기 동안은 일반적으로 낮은 퇴적률을 보여준다. 게다가, 남극 전 지역의 많은 지점의 저층수에서 퇴적물과 생물 기원 부유 입자의 수평적인 수송이 관찰되었고(e.g., Pudsey, 1992), 이러한 수평적인 수송은 퇴적물의 흐름과 퇴적률을 조절하는 것과 물질 중요한 요소로서 고려된다(Frank et al., 1995).

남극의 대륙주변부는 전 대양에서 심층수괴를 형성하는데 그 의미가 깊다. 이 지역에서는 순환 심층수가 표층까지 올라가며, 다양한 표층, 사면, 대륙붕의 수괴를 만든다(Jacobs, 1991). 대륙붕에서 물의 혼합은 표층생산성을 크게 좌우하며 이에 따라 생물기원 퇴적물의 퇴적량에 영향을 끼친다(Anderson et al., 1979). 남극사면전선은 표층하부에 강한 수온과 화학적인 변화도가 특징적이며, 강한 해류(15 cm/s)가 동쪽에서 서쪽을 따라 흐른다(Jacobs, 1991).

최근, 남극 지역의 고기후 복원에 관한 조사들은 홀로세 동안 짧은 기간의 기후 변화에 대해 초점이 맞춰져 왔다. 이 기간은 현재의 기후 시스템을 이해하고 미래의 세계적인 변화들을 예측하는 데에 중요하다. 빙하 코어 자료의 조사는 홀로세 동안, 먼저 11.5와 9 ka BP 사이, 그리고 두 번째로 동남극 지역의 6과 3 ka BP 사이와 로스해 지역의 7과 5 ka BP 사이의 두 번의 최적기후가 있었음을 확인해준다(Masson et al., 2000). Cias et al. (1992)에 따르면, 동남극 빙하 코어에서 홀로세의 가장 따뜻했던 기간은 10에서 7.5 ka BP 사이이다; Siegert (2001)는 남반구가 9.4 ka BP에 가장 따뜻했다고 보여준다. 초기의 최적기후의 시기는 남대서양 퇴적물에서 유공충이 풍부한 정점과 일치한다(Hodell et al., 2001). Baroni와 Orombelli (1994)는 빅토리아랜드 연안을 따라 펄크 무리가 가득했었던 것을 근거로 하여 홀로세 중기의 따뜻했던 시

기를 보고했다.

퇴적물에 기반한 로스해의 홀로세 기후 변화 기록은 그 양이 적다. 연안에서 멀어지는 로스해의 대륙붕은 낮은 퇴적률을 보인다: 가장 높은 퇴적률 (20-24 cm/ka)을 보이는 Joides Basin의 중심부는 생물기원 머드로 이루어진다 (Frignani et al., 1998; Finocchiaro et al., 2000). 규조 연니로 이루어진 Granite Harbor이 유일하게 10 m이상의 두께를 가지며(Domack et al., 1999), 퇴적률이 아주 높다(250 cm/ka; DeMaster et al., 1996). 이러한 결과는 만과 피요르드들이 고해상도의 퇴적기록을 보존하는데 높은 가능성이 있다는 주장을 뒷받침한다.

많은 연구자들이 로스해의 빙상후퇴가 14-13 ka BP에 시작되었다고 동의한다(Stuiver et al., 1981; Denton et al., 1989; Licht et al., 1996; Brambati et al., 1997). 전반적인 빙하의 후퇴는 기후의 영향을 조금 받았다(Steig et al., 1998; Brambati et al., 1997; Orsini et al., 2003). 최근에는 규조류의 군집에 대한 연구들에 의해 6과 3 ka때 따뜻한 시기가 있었음을 알아냈다(Cunningham et al., 1999), 동시에 홀로세 후기에 대한 고해상도의 연구가 Granite Harbor의 퇴적물들을 통해 이루어지고 있다 (Leventer et al., 1993).



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 연구지역

로스해는 빙하의 침식에 의해 생성된 복잡한 지형의 대륙붕을 가지고 있다.(그림 1) 깊이는 연안으로 오면서 주로 깊어지며, 대륙붕은 주로 500 m로 깊다. 현재의 퇴적작용은 생규소가 뚜렷하게 퇴적되는 형상을 띄지만, 과거에는 지속적으로 기후의 변화에 영향을 받은 빙붕의 변화, 해빙의 변화, 그리고 빙하의 이동에 따라 육성기원의 퇴적물과 해양의 생산성 차이가 생기며 퇴적이 바뀌어왔다(Anderson et al., 1991). 이러한 변화는 퇴적물에서 수직적인 퇴적물의 차이, 지화학적 물성 그리고 생물학적인 요소들이 변화하는 결과를 야기한다.

로스해의 서쪽은 이미 많은 퇴적학적인 연구가 이루어졌다(Kellogg et al., 1979; Anderson et al., 1980, 1984 and 1991; Dunbar et al., 1985). Drygalski Basin의 층서에 대한 가장 핵심적인 내용은 Anderson et al. (1991)에서 언급된 바 있다. 이에 따르면, 남쪽은 규조류 연니가 basal till을 바로 덮고, 북쪽은 규조류 연니 하부에 빙하성 해양퇴적물이 나타난다 점진적으로 변화하는 빙하성의 해양퇴적물을 시추한 코어는 없다.

로스해의 대륙붕 지형은 깊은 골과 제방 그리고 남극횡단산맥과 마리버드랜드로부터 흘러들어 온 빙류의 진퇴로 인해 생겨난 형태들로 특징적이다. 이들 골에 퇴적된 퇴적물들은 빙하기/간빙기 동안의 유빙과 grounded ice의 진퇴를 기록하고 있고 이들에 대한 연구는 로스해에서의 고환경과 고기후에 대한 지식을 제공해 준다. 분지, grounding line에서의 거리, 지형, 수심 등은 각각 구분이된 퇴적기록을 가지고 있지만 Drygalsk 와 JOIDES 분지지역에서는 광범위한 자료들이 있으며(Licht et al., 1996, 1999; Domack et al., 1999; Brambati et al., 1997,2002), Pennell Trough는 좀 더 제한된 자료만이 존재한다(Hilfinger et al., 1995; Domack et al., 1999).

로스해 중앙에 위치한 Pennell Trough는 대략 길이 160 km, 너비 60 km 그리고 때때로 수심 600 m 이상 인 곳이 있다. Pennell Trough의 북동쪽에 완경사의 Pennell Bank 가 남서쪽에는 가파른 Ross Bank가 위치 해 있으며, 두 Bank의 수심은 대략 ~250 m 이다.

2 절. 재료 및 연구방법

3.1 시추코아

총 길이 2.41 m의 중력 코아 KI-13-C2는 2013년 2월 해양탐사 ANA03B가 아라온(IBRV KOPRI-Korea)에 의해 남극 로스해에서 위경도 71°52.4758'S, 177°48.0854'W, 수심 1797 m에서 시추되었다(그림 2). 총 길이 4.41 m의 중력 코아 RS14-C2는 2014년 XXIX 남극탐사(Rosslope II)동안 펜넬티 동쪽 대륙사면 위경도 75°00.038'S, 173°55.1645'W, 수심 1757 m에서 시추되었다(그림 3).

3.2 생물기원 오팔 함량 분석

생물기원 오팔 함량 분석은 약 2 cm 간격으로 총 121개의 구간에서 Mortlock and Froelich (1989)와 Müller and Schneider (1993)의 방법을 개선한 습식-알칼라인 연속 추출법(wet-alkaline sequential extraction)을 이용하여 실시하였다. 15 ~ 20 mg의 분말시료를 50 ml 원심분리형 튜브에 담고 1 N NaOH 용액 30 ml를 첨가 후, 85°C로 설정된 항온 수조(shaking bath)에 넣는다. 2, 3, 4, 5 시간 경과 후 각 시료가 든 원심분리형 튜브에서 100 µl 용액을 피펫(pipette)으로 추출하여 0.1 N HCl 2 ml가 들어있는 10 ml 바이알에 주입한다. 이 과정을 마친 후, 각 바이알에 피펫(pipette)을 이용하여 암모늄 폴리브데이트(ammonium molybdate)를 2 ml 첨가 후 정확히 15분 경과 후 각 바이알에 아황산메몰(metol sulfite), 옥살산(oxalic acid), 황산(sulfuric acid), 증류수를 각각 5:3:3:4의 비율로 혼합한 시약을 첨가하여 각 시료를 발색시킨다. 발색이 완료되는 혼합 후 4시간 이후에서 혼합후 24시간 전에 발색이 완료된 각 시료를 분광분석기(spectrophotometer: Model biocrom Libra S22)를 이용하여 812 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 각 시료 별로 측정된 흡광도를 이용하여 생규소(Sibio)의 함량을 측정하였고 이에 규소와 오팔(opal)의 비인 2.4를 곱하여 생물기원 오팔(opal) 함량을 구하였다.

$$\text{Biogenic Opal (\%)} = \text{Si (\%)} \times 2.4$$

3.3 총탄소, 총질소 함량 분석

총탄소(Total Carbon: TC)와 총질소(Total Nitrogen: TN) 함량은 약 2 cm 간격으로 총 121개의 구간에서 CHN 원소분석기(Flash 2000 Elemental Analyzer)를 이용하여 측정하였다. 분석에 이용된 분말시료의 양은 5-10 mg이다. 이 측정에서 오차범위는 ± 0.1%이다.

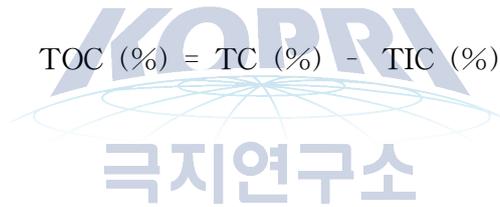
3.4 총무기탄소 및 CaCO₃ 함량 분석

총무기탄소(Total Inorganic Carbon: TIC) 함량은 무기탄소 분석기(UIC CO₂

Coulometer:ModelCM5014)를 이용하여 약 2 cm 간격으로 총 121개의 구간에서 측정하였다. 각 시료는 무기탄소 분석기의 산처리 모듈에서 인산과 반응하여 시료에 포함된 탄산염의 용해로 이산화탄소를 발생시킨다. 이때 발생한 이산화탄소는 전량분석 셀로 이동하여 지시용액이 함유된 모노에탄올라민(monoethanolamine)에 정량적으로 흡수되어 색채 지시자를 퇴색시킴에 따라 적정이 가능한 강산(hydroxyethylcarbamic)을 형성한다. 이로 인한 수소이온농도(pH) 변화는 지시용액의 색상변화로 나타나게 되며 이는 광검출기에 의해 투과율(%T)로 검출된다. 투과율이 증가됨에 따라 자동으로 전류가 발생하여 염기를 발생시켜 생성된 강산을 중화시킴으로 용액의 색은 원래의 푸른색으로 돌아가고 적정이 끝나고 발생한 전류량으로 시료의 무기탄소 함량을 나타낸다. 이 분석에서 총무기탄소(Total Inorganic Carbon)의 오차범위는 $\pm 0.1\%$ 이다. CaCO_3 함량은 얻어진 총무기탄소(Total Inorganic Carbon:TIC) 함량을 바탕으로 탄소와 CaCO_3 의 원소비 8.333을 곱하여 구했다.

3.5 총유기탄소 함량 분석

총유기탄소(Total Organic Carbon: TOC) 함량은 총탄소 함량에서 총무기탄소 함량을 뺀 값으로 나타냈다.



$$\text{TOC} (\%) = \text{TC} (\%) - \text{TIC} (\%)$$

3.6 C/N 값 분석

CHN 원소 분석기로 구한 총유기탄소 값과 총질소 값을 나눈 값으로 나타냈다.

$$\text{C/N} = \text{TOC/TN}$$

3.7 유기물 탄소동위원소 분석

유기물의 탄소동위원소 분석은 영국의 연구기관인 ISO Analytical Ltd에서 수행되었다.

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left(\left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}}{\text{sample}} / \frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}}{\text{standard}} \right) - 1 \right) \times 1000 (\text{‰})$$

3 절. 연구결과

코아 KI-13-C2의 퇴적물은 생교란된 점토와 밝은 색의 층리가 나타나는 구조퇴적물로 구성되어 있다(그림 4). 간헐적으로 어두운 색의 퇴적물이 층을 이루거나 아니면 조각 형태로 나타난다. 밝은 색의 구조퇴적물은 10 cm 이상의 두께를 보이며 뚜렷하게 관찰된다. 코아 RS14-C2 퇴적물은 상부에 황색의 퇴적물이 보존되어 있고 유사한 색을 보이는 퇴적물이 코아 하부에 수 cm의 두께로 다시 나타난다(그림 5). 전체적인 퇴적물은 대부분 암회색의 점토퇴적물이지만 퇴적물내에 조립한 입자들이 포함되어 있다. 황색 퇴적물과 암회색 퇴적물의 경계는 뚜렷하지 않다.

코아 KI-13-C2의 지화학적 분석 결과는 그림 6에 정리되어 있다. 생규소 함량은 전체적으로 5%에서 17%의 범위에서 변하며 변동이 매우 뚜렷하다. 이러한 생규소 함량의 변동은 밝은 색의 구조퇴적물에서 상대적으로 높은 값을 보인다. 생규소 함량이 높은 구간에 총유기탄소 함량도 함께 높은 값을 보인다. 유기탄소 함량은 뚜렷한 두 번의 증감을 매우 잘 보이고 있다. 상부의 총유기탄소 증가 구간은 매우 뚜렷하지만 상대적으로 생규소 함량의 변화는 잘 구별되지 않고 마찬가지로 C/N 값의 변화도 상부에서는 뚜렷한 증감을 찾기 어렵다. 그러나 중간 구간에서는 생규소 함량, 총유기탄소 그리고 C/N값이 모두 동시에 높게 나타난다.

유기물의 기원을 지시하는 탄소동위원소값도 전체적으로 두 번의 증감을 보인다(그림 6). 유기물 탄소동위원소 값은 -27‰에서 -24‰의 범위에서 변화한다. 그러나, 생규소 함량, 총유기탄소 함량 및 C/N 값이 높은 구간에서는 상대적으로 낮은 탄소동위원소 값을 보인다. 탄소동위원소 값이 높은 구간은 유기탄소 함량이 낮은 값에서 높은 값으로 증가되는 구간 또는 유기탄소 함량이 낮은 구간에서 동위원소값이 증가한다. 코아 KI-13-C2의 탄산염 함량은 매우 낮은 값을 전체적으로 보이지만 상부에 뚜렷하게 증가되는 구간이 관찰된다(그림 6). 이 구간은 생규소 함량 및 유기탄소 함량이 증가되는 상부 구간과 거의 일치한다.

방사성 탄소동위원소 연대 측정 결과에 의하여 코아 KI-13-C2의 상부 50 cm정도 깊이에 16.4 ka로 측정되어 탄산염 함량이 증가되는 구간은 아마도 빙하기가 끝나고 홀로세로 전환되는 구간으로 생각된다. 상부의 유기탄소 및 생규소 함량이 증가되는 구간의 연대는 8 ka 이전으로 결정되었다.

코아 RS14-C2 퇴적물의 지화학 분석 결과는 그림 7에 정리되어 있다. 생규소 함량은 5%에서 15% 사이에서 변화되지만 상부에서 낮은 값을 그리고 대부분의 퇴적물에서 10% 내외의 값을 유지하고 하부에서 감소되는 경향이 나타난다. 이러한 변화 경향은 총유기탄소 함량과 총탄소 함량에서도 동일하게 관찰된다. 총유기탄소 함량은 0.1%에서 0.4% 사이에서 변화되지만 코아 상부와 하부에서 낮은 값을 보이는 반면에 대부분의 코아 구간에서 0.3-0.4%의 범위에서 변화

되면 이러한 변화 특징은 총질소 함량에서도 관찰된다. 이와 같이 상부와 하부 그리고 코아의 중간 구간으로 구분되는 특징은 탄산염 함량에서 가장 뚜렷하게 관찰된다. 코아 상부와 하부의 탄산염 함량은 0.1% 정도로 매우 낮지만 중간 구간에서는 증가하여 약 2-3%를 유지한다. 마찬가지로 C/N값의 변화도 다른 지화학적 자료들의 변화와 매우 유사하게 나타난다. 상부와 하부에 낮은 값을 그리고 중간 구간에 값이 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 유기물의 탄소동위원소 값은 이러한 변화를 보이지 않는다. 코아 RS14-C2 퇴적물의 지화학적 자료 변화는 상부와 하부의 황색퇴적물에서 대부분의 자료가 낮은 값을 보이는 반면에 값이 증가되어 높은 값을 유지하는 구간의 퇴적물은 대부분 암회색 퇴적물로 특징된다.

로스해 중앙분지에서 시추된 코아 KI-13-C2의 지화학 자료들은 적어도 두 번의 증감 변화를 보인다(그림 6). 남극해 환경에서 생물기원의 지화학 자료들은 표층해수의 일차생산성이 증가할 때 그 값이 증가하여 퇴적물에 기록된다. 이러한 관점에서 코아 KI-13-C2의 지화학 자료 증감은 적어도 두 번의 일차생산성 변화를 나타내고 남극해 환경에서 일차생산성의 조절은 주로 해빙의 형성과 관련된다. 따라서 지화학 자료의 증감만으로 중앙분지에 빙하기-간빙기의 변화가 두 번은 기록된 것으로 해석된다. 그러나, 생규소 함량과 총유기탄소 함량의 증가 구간이 C/N값의 증가 구간과 일치하는 상황에서 다른 해석이 필요하다. 이러한 특징은 코아 RS14-C2에서 잘 관찰된다.

그림 7에서 나타나듯이 코아 RS14-C2 퇴적물은 생규소 함량, 총유기탄소 함량, 탄산염 함량 그리고 C/N값이 상부와 하부에는 낮은 값을 보이고 중간 구간에는 모든 요인들이 높은 값을 나타낸다. 생물기원 물질들의 형성 조건과 비교할 때, 상부와 하부 구간에 생산성이 낮고 중간 구간에 생산성이 증가되는 것으로 해석된다. 그러나, 상부 퇴적물이 홀로세를 지시할 경우 홀로세 보다 더 높은 생산성을 보이는 시기가 홀로세 이전에 나타나는 것은 불가능하다. 따라서 코아 중간부분의 함량이 높은 것은 생산성이 증가된 것이 아니라 다른 요인에 의해서 조절된 것으로 생각된다. 이러한 증가를 조절하는 요인을 파악하기 위해서는 좀 더 연구가 필요하다.

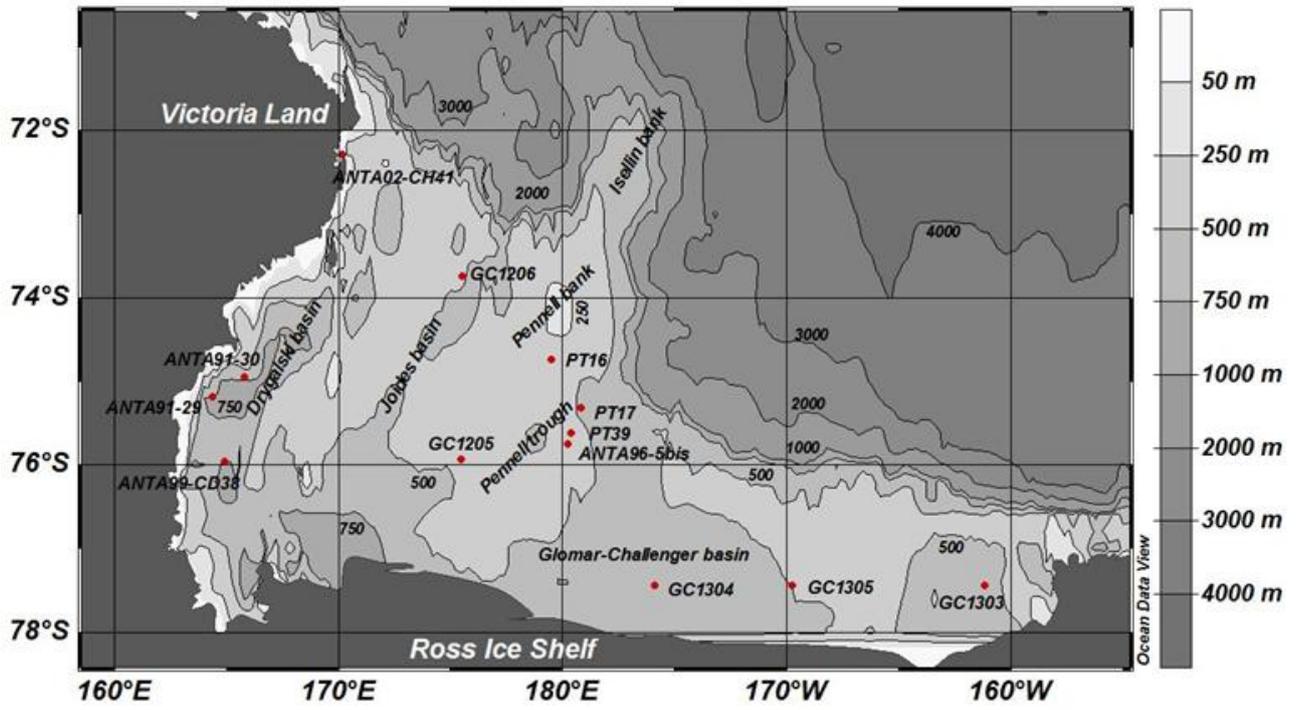


그림 1. 로스해의 다양한 지형 및 기존 연구 코아들



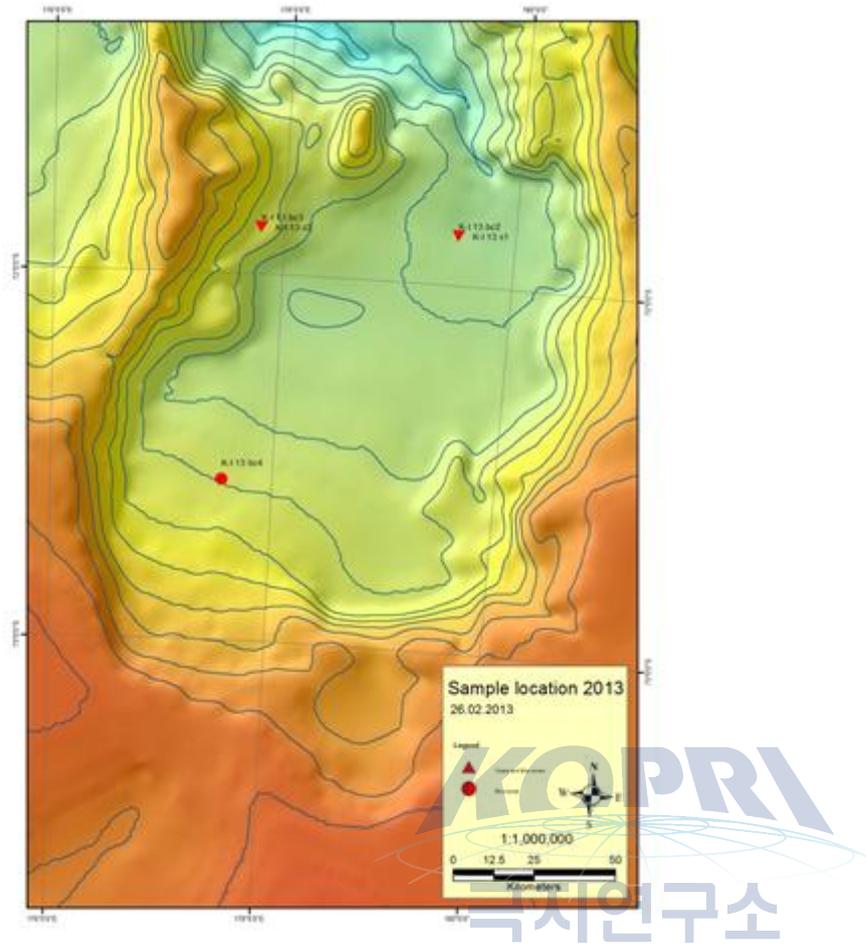


그림 2. 코아 KI-13-C2가 시추된 로스해 중앙분지

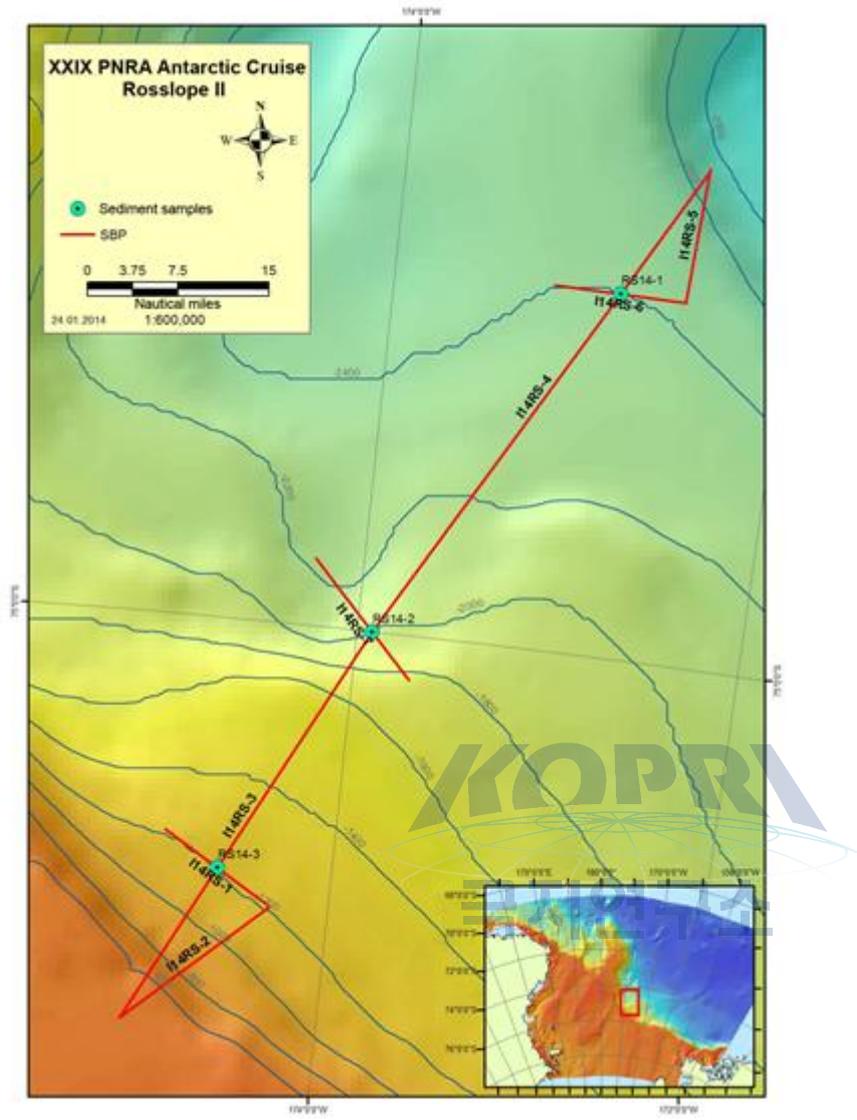


그림 3. 코아 RS14-C2가 시추된 펜넬퇴 동쪽 대륙사면의 위치

K-I 13 c2

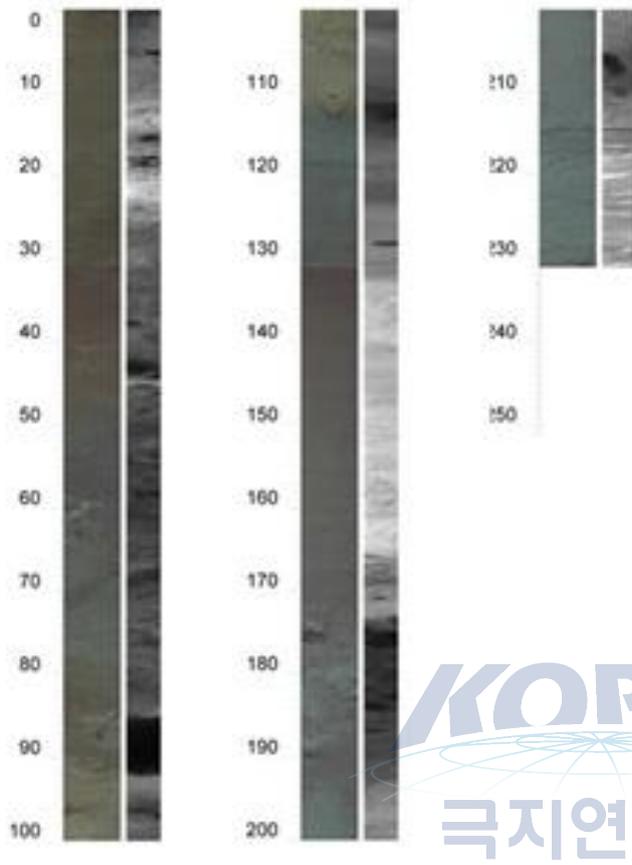


그림 4. 코아 KI-13-C2의 절개 사진 및 연엑스선 사진

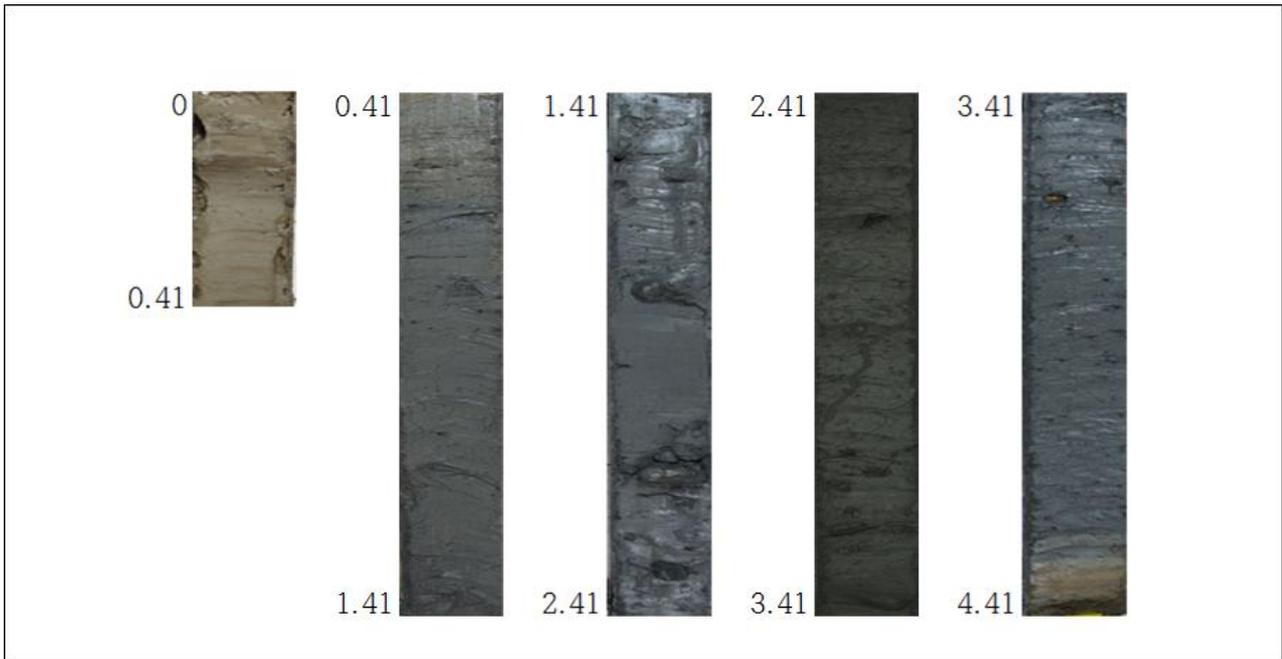


그림 5. 코아 RS14-C2의 절개 사진



KI-13-C2

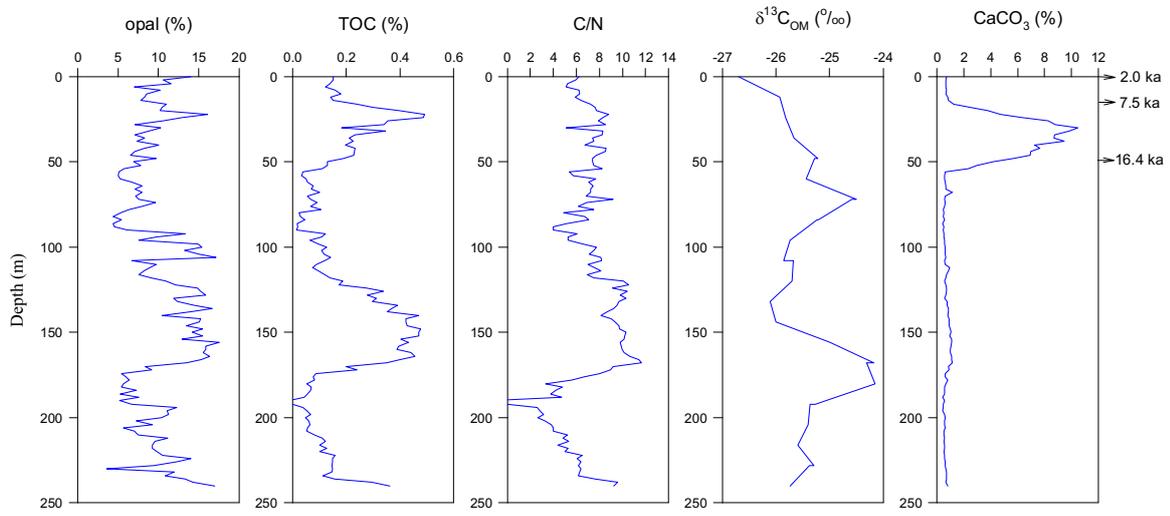


그림 6. 코아 KI-13-C2의 고해양 지시자들의 변화



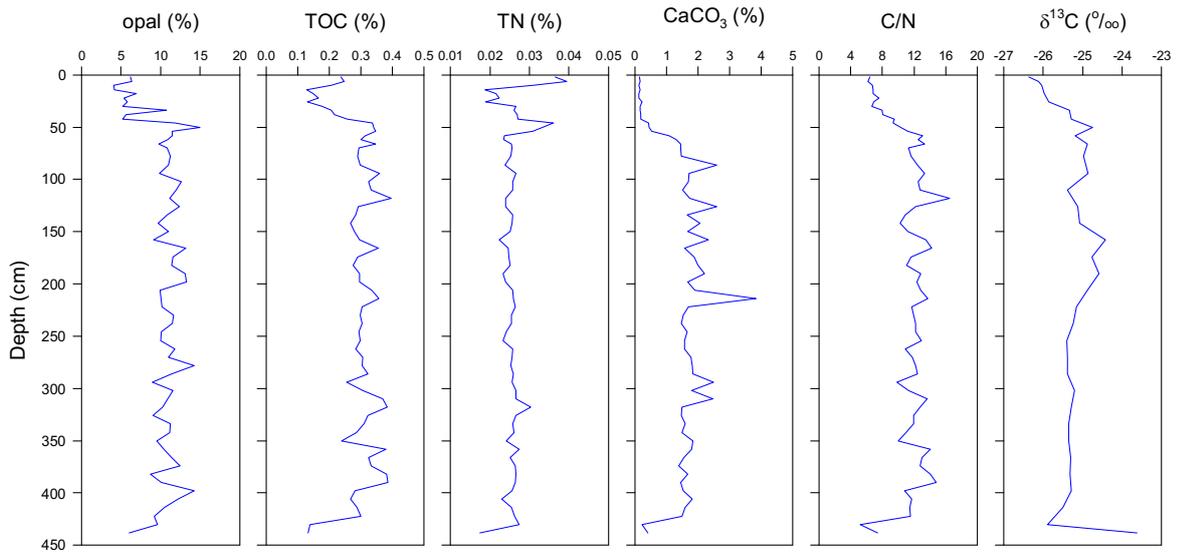


그림 7. 코아 RS14-C2의 고해양 지시자들의 변화



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

2016년 연구를 통해 다음과 같이 연구성과를 달성하였다.

[국제학술지 1편 게재 예정]

Khim, B.K.*, Song, B., Cho, H.G., William, T., Escutia, C. (accepted with moderate revision) Late Neogene sediment properties in the Wilkes Land continental rise (IODP Exp. 318 Hole U1359A), East Antarctica. Submitted to *Geosciences Journal*, (*corresponding author) (GEOJ-D-15-00219)

[국제학술회의 발표 1편]

Khim, B.K., Song, B., Cho, H.G., William, T., Escutia, C. (2016) Late Neogene sediment properties in the Wilkes Land continental rise (IODP Exp. 318 Hole U1359A), East Antarctica. *XXXIV SCAR*, Kuala Lumpur, Malaysia (Aug. 20-30), .

[국내학술회의 발표 2편]

하상범, 김부근, E. Colizza, 김여훈 (2016) 로스해 Pennell=Iselin Banks 동쪽 대륙사면에서 채취한 코아 퇴적물의 특성 변화. *한국해양학회 2016 추계학술발표대회 요약집*, 여수, p.178.

하상범, 김부근, 김여훈, Colizza, E. (2016) 남극 로스해 대륙사면에서 획득한 코아 퇴적물의 탄산염과 유기탄소 함량 변화 연구. *2016년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집*, 부산, p.279.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이번 연구결과는 2016년 SCAR Open Science Conference에 발표되었다.

XXXIV SCAR Meetings and Open Science Conference

20 - 30 August 2016, Kuala Lumpur, Malaysia



| S05. Past Antarctic climate and ice sheet dynamics: integrating models and observations from the deep ice to the deep sea | |
|--|----|
| Abrupt Antarctic ice-sheet collapse – Past reconstruction and future implications | 11 |
| Anvers-Hugo Trough paleo-ice stream, Antarctic Peninsula: Geomorphological evidence for the importance of water availability in facilitating ice stream flow | 12 |
| Dating the un-datable: Pushing radiocarbon dating in marginal marine Antarctic sediments to new limits | 13 |
| Depositional processes on the eastern Ross Sea slope and rise: Slides, mounds, presence of fluids. | 14 |
| Evolution of a fjord depositional environment: Insights into climate change at the Subantarctic Auckland Islands, New Zealand | 15 |
| Foraminiferal radiocarbon dates from the Ross-Bank death assemblage: insights into WAIS decoupling and ice-shelf retreat in Glomar-Challenger-Basin and Pennell-Basin paleo-ice-streams. | 16 |
| Holocene climate change recorded in laminated sediment cores from Moubay Bay, Northern Victoria Land, Antarctica | 17 |
| Ice core records from the Amundsen / Bellingshausen Sea Coastal Domes – Scientific Priorities and logistical challenges | 18 |
| Large-Ensemble modeling of Antarctic Ice Sheet variations with a coupled ice-Earth-sea level model | 19 |
| Last Glacial - Holocene Climate Variability in the Southern Ocean Atlantic sector: Implications of West Antarctic Ice Sheet dynamics | 20 |
| Late Neogene sediment properties in the Wilkes Land continental rise (IODP Exp. 318 Hole U1359A), East Antarctica | 21 |
| Late Quaternary sedimentation patterns in Ona Basin, southern Scotia Sea, Antarctica: Preliminary results | 22 |
| Limited glaciation of the New Zealand subantarctic islands during the Last Glacial Maximum | 23 |
| Mid to Late Holocene ice discharge in the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula region and its tele-connection with ENSO | 24 |
| Optical dust logging for million-year ice | 25 |
| Paleobathymetry of Southern Ocean and its role in paleoclimate and paleo-ice sheet variations: call for a sequence of paleobathymetric grids | 26 |
| Paleoclimate implications during LGM from cores collected off Coulman High, western Ross Sea, Antarctica | 27 |
| Postglacial records of southern hemisphere westerly wind variability from the New Zealand Sub-Antarctic Auckland Islands | 28 |
| Post-LGM calving-front and grounding-line migration within the Whales Deep paleo-ice-stream trough, eastern Ross Sea | 29 |
| Pre-glacial to full glacial sedimentation along the Pacific margin of West Antarctica: Record of shifting pattern of supply and transport | 30 |
| Radar isochronic dating for the deep ice core site of Kunlun Station, Antarctica | 31 |
| Record of Holocene paleoclimate change in outer Bigo Bay, West Antarctic Peninsula | 32 |
| Record of late neogene and quaternary paleoenvironmental and paleoclimatic conditions in southwest pacific sector of the southern ocean: Preliminary results | 33 |

제 6 장 연구개발과정에서 수입한 해외과학기술정보

Recent advances in understanding Antarctic climate evolution

MARTIN J. SEIGERT¹, P. BARRETT², R. DeConto³, R. DUNBAR⁴, C. Ó COFHAIGH⁵, S. PASSCHER⁶ AND T. NAISH^{2,7}

¹School of GeoSciences, University of Edinburgh, UK; m.j.seigert@ed.ac.uk; ²Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, New Zealand; ³Department of Geosciences, University of Massachusetts, USA; ⁴Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University, USA; ⁵Department of Geography, Durham University, UK; ⁶Department of Earth and Environmental Studies, Montclair State University, USA; ⁷Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, New Zealand

Geological evidence shows that the ice sheet and climate in Antarctica has changed considerably since the onset of glaciation around 34 million years ago. By analyzing this evidence, important information concerning processes responsible for ice-sheet growth and decay can be determined, which is vital to appreciating future changes in Antarctica. Here, we document five distinct case studies as examples of recent insights into Antarctic climate evolution.

The extent of the Antarctic ice sheet (AIS) has fluctuated considerably during its ~34 million year existence, and has been a major driver of changes in global sea level and climate throughout the Cenozoic Era. The spatial scale and temporal pattern of these fluctuations has been the subject of considerable debate. Determination of the scale and rapidity of the response of large ice masses and associated sea-ice to climatic forcing is of vital importance. Ice-volume variations lead to both changes in global sea levels—on a scale of tens of meters or more—and in alteration in the capacity of ice sheets and sea-ice as major heat sinks, insulators and reflectors. It is thus important to assess the stability of the cryosphere under a warming climate (IPCC, 2001). Here we assess five areas of activity, which, when combined, provide

a means of gauging the variety of activities needed to gain a fuller appreciation of Antarctic glacial history.

CO₂ and ice-sheet inception at the Eocene-Oligocene boundary

While the onset of continental-scale glaciation in the earliest Oligocene (OI-1 event; ~34 Myr) has long been attributed to the opening of Southern Ocean gateways (Kennett, 1977), recent numerical modeling studies suggest declining atmospheric CO₂ was the most important factor in Antarctic glaciation. As the passages between South America and the Antarctic Peninsula (Drake Passage), and Australia and East Antarctica (Tasmanian Passage) widened and deepened during the late Paleogene and early Neogene, the southern oceans experienced cooling sea surface temperatures by several degrees. Estimates for the opening of Drake Passage range between 40 and 20 Myr, blurring the direct 'cause and effect' relationship between the gateways and earliest glaciation.

To help solve this issue, coupled climate-ice sheet models have simulated the Eocene-Oligocene boundary accounting for decreasing CO₂ concentrations and orbital variability (DeConto and Pollard, 2003). Results from the modeling show that tectonically-forced changes in ocean

circulation and heat transport have only a small effect on temperature and glacial mass balance in the Antarctic interior. Considering the sensitivity of polar climate to the range of CO₂ concentrations predicted to have existed over the Paleogene-Neogene, CO₂ likely played a fundamental role in controlling Antarctica's climate. Modeling also revealed that the timing of glaciation in East Antarctica is sensitive to orbital forcing, mountain uplift, and continental vegetation, but only within a very narrow range of atmospheric CO₂ concentrations—around 2.8 times modern levels. Once a CO₂ threshold is approached, astronomical forcing triggers the growth of a continental-scale ice sheet within 100 kyr (Fig. 1).

Orbital control on ice-sheet dynamics at the Oligocene-Miocene boundary

Drilling off the Antarctic margin at Cape Roberts has revealed 55 sedimentary cycles recording advance and retreat of the ice margin sea-level changes. Two of the cycles contain volcanic ash whose ages link them with particular Milankovitch cycles 24 and 24.2 Myr in the deep-sea isotope record (Naish et al., 2001). Analysis of deep-sea isotope records indicate sea level variations of 30-60 m from changes in ice sheet volume at this time. The sediments also show that the Antarctic coastal temperature declined progressively through Oligocene and early Miocene time, which is at odds with a major shift of the δ¹⁸O values at ~25 Myr, interpreted previously as a warming of the oceans.

Coring of the Antarctic margin will continue over the next two years in nearby McMurdo Sound, where two 1000-m-deep holes will be cored by ANDRILL, to cover the time interval from the present back to 10 Myr and from 10-20 Myr. Together with the Cape Roberts core, this will provide an unprecedented paleoenvironmental record for this part of the Antarctic margin for the last 34 Myr.

Neogene major expansions and retreats of the EAIS

The Lambert Glacier is the largest fast-flowing outlet glacier in the world, drain-

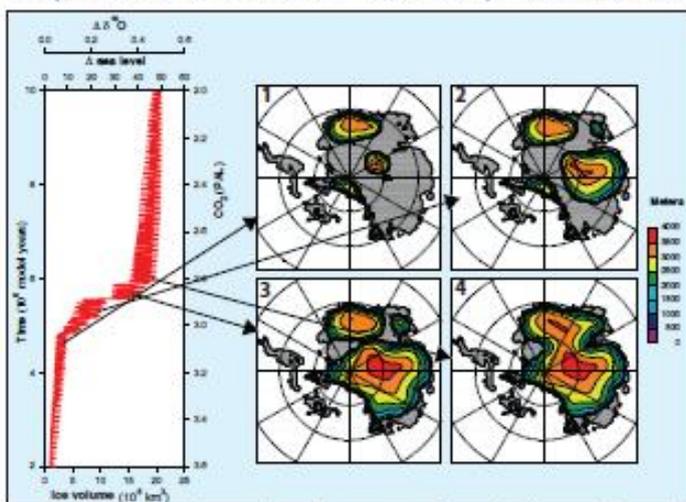


Figure 1: ice volume (left) and corresponding ice sheet geometries (right) simulated by a coupled atmospheric general circulation - ice sheet model, in response to a slow decline in atmospheric CO₂ (modified from DeConto and Pollard, 2003).

ing ~12% of the East Antarctic Ice Sheet (EAIS) into Prydz Bay. During advances of the Lambert Glacier to the shelf break, glaciogenic material is deposited on nearby mountains. Formations in the Prince Charles Mountains were laid by fast-flowing polythermal tidewater glaciers analogous to those of the modern fjords of East Greenland, with ages ranging from early Miocene (or possibly Oligocene) to Pliocene-Pleistocene. Numerical modeling studies of erosion and sediment supply suggest that, besides climate, continued excavation and overdeepening of the glacial trough during ice advance phases is an important factor controlling the dynamics of the Lambert Glacier (Taylor et al., 2004).

Synchronicity of late deglacial ice retreat in Antarctica

The retreat of Antarctica's Ice sheet following the Last Glacial Maximum (LGM) has been studied for more than 30 years, through marine geology and continental glacial geomorphology, yet many questions remain regarding the timing, speed, and style of ice retreat. New coring capabilities, as well as refinements in age-dating methods, are yielding surprising results regarding the timing of last deglacial ice retreat off Antarctica's continental shelf. Long sediment cores have been collected from both sides of the Antarctic Peninsula, the Ross Sea and distant regions of the East Antarctic continental shelf. By dating the biogenic sediments immediately overlying LGM diamict (poorly sorted sediment), it is possible to estimate the timing of ice retreat from outer and mid-shelf regions. The developing view is of rapid and synchronous retreat of ice from widely separated regions of Antarctica's continental shelf beginning at ~11.5 cal kyr BP and lasting for up to 800 years. This apparent synchronicity is unexpected, given previous inferences of large geographic asynchronicity in the timing of maximum glacial advance and subsequent early deglacial history (Anderson et al., 2002).

Subglacial processes and flow dynamics of former Antarctic ice streams

Recent marine geophysical and geological research from the Antarctic continental shelf has significantly advanced our understanding of the extent and dynamics of the Antarctic Ice Sheet (AIS). During the LGM, the AIS was positioned at, or close to, the shelf edge around the Peninsula, the Bellingshausen Sea and Pine Island Bay. In these areas, large glacial troughs extend

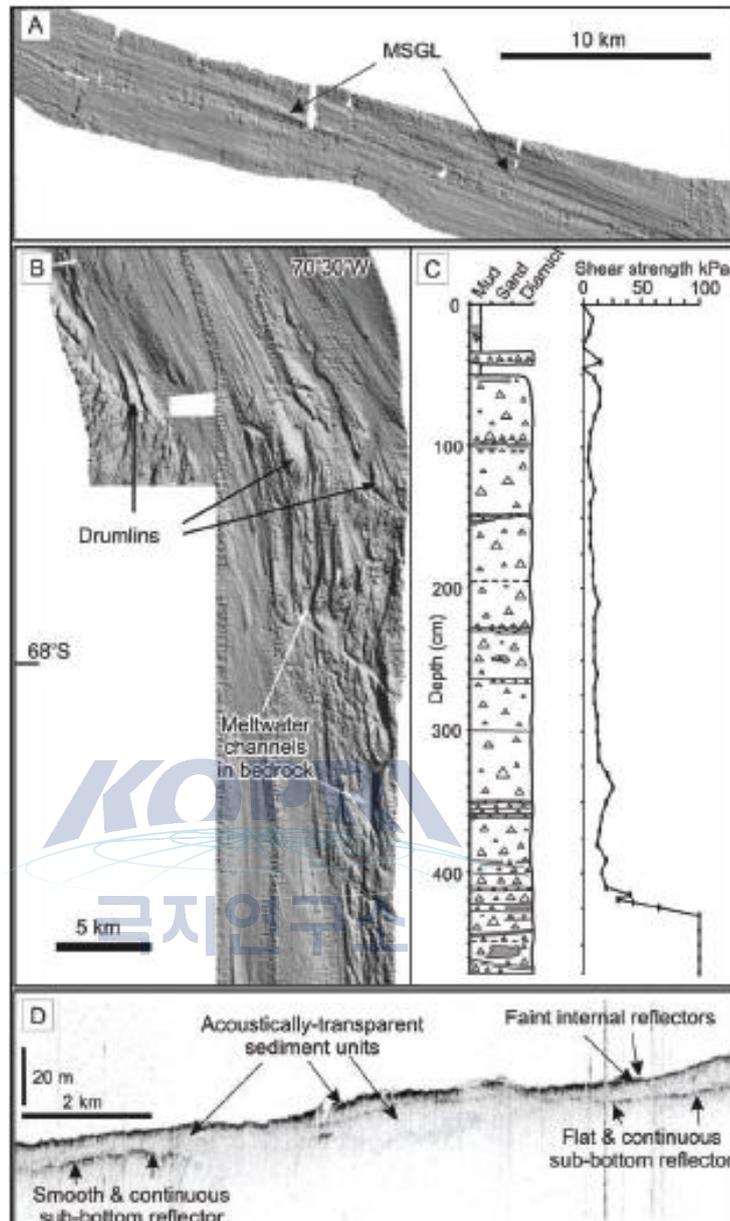


Figure 2. Geophysical and geological records of paleo ice-stream flow in bathymetric troughs on the Antarctic continental shelf. A) Swath bathymetry shaded relief image of mega-scale glacial lineations (MSGL) at the mouth of the Ronne Entrance, Bellingshausen Sea; B) Swath bathymetry showing sea-floor morphology as a shaded relief image in middle-outer Marguerite Trough, Antarctic Peninsula; C) Core log and shear strength plot of sub-ice stream sediments, Marguerite Trough; D) TOPOS sub-bottom profiler record from the Ronne Entrance showing acoustically transparent sediment unit (soft till) sitting above a prominent basal reflector (arrowed).

across the continental shelf, and sedimentary and geomorphic evidence from these troughs (Fig. 2a,b) indicate that they were occupied by grounded paleo ice streams during, or immediately following, the LGM (Ó Cofaigh et al., 2002). Mega-scale glacial lineations (subglacially produced ridges) can attain lengths of greater than 20 km within the troughs and are characteristically formed in a weak porous and deformable till layer (Fig. 2c,d). Such weak tills have been identified and mapped in

all the paleo ice-stream troughs investigated to date. They tend to be confined to the troughs and are not widely observed in the inter-trough areas. The association of this weak porous till layer with highly elongate subglacial bedforms implies that the rapid motion of these ice streams was facilitated, at least in part, by subglacial deformation of the soft bed. Geophysical data also indicate significant transport of subglacial till towards the former ice-stream terminus. The implication that pa-

leo Antarctic ice streams were underlain by weak sediments is indicative of a dynamic, fast-flowing ice sheet at the LGM, much like it is today in West Antarctica, allowing rapid ice-sheet responses to sea level and ocean temperature changes.

Future activities

Although our appreciation of Antarctic history has improved dramatically over the past decade, there is still much to learn. Significant questions exist about the evolution of Antarctic landscape, both above and below the ice cover; its connection with ice-sheet development; past and present large-scale ice-sheet dynamics and stability; the role of sub-glacial water in the ice-sheet system; and the influence of ice-sheet evolution on Antarctic biology. In 2004, the Scientific Committee on Ant-

arctic Research (SCAR) recognised the importance of understanding past changes in Antarctica with the establishment of its Antarctic Climate Evolution (ACE) scientific research program. This program, in conjunction with other SCAR programs (SALE – Subglacial Antarctic Lake Environments; AGCS – Antarctica in the Global Climate System; and EBA – Evolution and Biodiversity in Antarctica), aims to further integrate numerical models with geological data, in order to understand the processes responsible for the growth and decay of large ice sheets and to comprehend the global significance of such changes.

Acknowledgements

We thank the committee and members of the ACE program (www.ace.scar.org) for helpful input and advice.

References

- Anderson, J.B., Shipp, S.S., Lowe, A.L., Whillans, J.S. and Mesola, A.B., 2002. The Antarctic ice sheet during the last glacial maximum and its subsequent retreat history: a review. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 65–70.
- DeConto, R.M. and Pollard, D., 2003. Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, **421**, 245–249.
- Neish, T.R., Woolfe, K.J., Barrett, P.J., Wilson, G.S. and 29 others, 2001. Orbitally induced oscillations in the East Antarctic ice sheet at the Oligocene-Miocene boundary. *Nature*, **413**, 719–723.
- Ó Cofaigh, C., Purbey, C.J., Dowdeswell, J.A. and Morris, P., 2002. Evolution of subglacial bedforms along a paleo-ice stream, Antarctic Peninsula continental shelf. *Geophysical Research Letters*, **29**, 10.1029/2001GL014488.
- Taylor, J., Siegert, M.J., Payne, A.J., Hambrey, M.J., O'Brien, P.E., Cooper, A.K. and Lefitzhenko, G., 2004. Topographic controls on post-Oligocene changes in ice-sheet dynamics, Prydz Bay region, East Antarctica. *Geology*, **32**, 197–200.

For full references please consult:
www.pages-igpp.org/products/newsletter/e02007_2.html



제 6 장 참고문헌

- Anderson, J. B., Conway, H., Bart, P. J., Witus, A. E., Greenwood, S. L., McKay, R. M., Hall, B. L., Ackert, R. P., Licht, K., Jakobsson, M., & Stone, J. O. (2014). Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM. *Quaternary Science Reviews*, 100, 31–54.
- Arrigo, K. R., Worthen, D., Schnell, A., & Lizotte, M. P. (1998). Primary production in Southern Ocean waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 - 2012), 103(C8), 15587–15600.
- Ceccaroni, L., Frank, M., Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., & Mangini, A. (1998). Late Quaternary fluctuations of biogenic component fluxes on the continental slope of the Ross Sea, Antarctica. *Journal of marine systems*, 17(1), 515–525.
- Coxall, H. K., Wilson, P. A., Pälike, H., Lear, C. H., & Backman, J. (2005). Rapid stepwise onset of Antarctic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, 433(7021), 53–57.
- DeMaster, D. J., Dunbar, R. B., Gordon, L. I., Leventer, A. R., Morrison, J. M., Nelson, D. M., Nittrouer, C.A., & Smith Jr, W. O. (1992). Cycling and accumulation of biogenic silica and organic matter in high-latitude environments: the Ross Sea. *Oceanography*, 5(3), 146–153.
- Gohl, K., Uenzelmann-Neben, G., Larter, R. D., Hillenbrand, C. D., Hochmuth, K., Kalberg, T., Weigelt, E., Davy, B., Kuhn, G., & Nitsche, F. O. (2013). Seismic stratigraphic record of the Amundsen Sea Embayment shelf from pre-glacial to recent times: evidence for a dynamic West Antarctic ice sheet. *Marine Geology*, 344, 115–131.
- Müller, P. J., & Suess, E. (1979). Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans—I. Organic carbon preservation. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 26(12), 1347–1362.
- Oppenheimer, M. (1998). Global warming and the stability of the West Antarctic Ice Sheet. *Nature*, 393(6683), 325–332.
- Orsi, A. H., & Wiederwohl, C. L. (2009). A recount of Ross Sea waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(13), 778–795.
- Reinardy, B. T. I., Escutia, C., Iwai, M., Jimenez-Espejo, F. J., Cook, C., van de Flierdt, T., & Brinkhuis, H. (2015). Repeated advance and retreat of the East Antarctic Ice Sheet on the continental shelf during the early Pliocene warm period. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 422, 65–84.
- Smith, W. O., Marra, J., Hiscock, M. R., & Barber, R. T. (2000). The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica. *Deep*

Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 47(15), 3119-3140.





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.