

TSPP15010-026-12

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 훌로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016 . 1 . 26

총괄연구책임자 : 윤호일

위탁연구기관명 : 부산대학교

위탁연구책임자 : 김부근

위탁참여연구원 : 이종민

“ : 이종진

“ : 강희정

보고서 초록

위탁연구과제명	남극해 홀로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구				
위탁연구책임자	김부근	해당단계 참여연구원수		해당단계 연구비	2,500,000원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	24

- 로스해 중앙분지 시추퇴적물의 다양한 고해양학 지시자를 분석하기 위하여 로스해 중앙분지에서 시추코아 KI-13-C2 퇴적물 획득
- 획득된 시추코아 KI-13-C2의 X-ray 촬영 및 코아 퇴적물의 고해양 지시자(생물기원오펠, 탄산염함량, 총유기탄소) 분석
- 생물기원 오펠 함량과 총유기탄소 함량의 변화를 통해 퇴적물이 쌓이는 동안 동남극 빙상의 확장-축소의 변화가 나타남
- 동남극 빙상의 확장은 결빙 해역의 증가로 투과되는 빛의 양을 감소시키고, 영양염, 미량 원소의 공급 등을 감소시켜 표층의 생산성을 감소시키는 결과가 나타남
- 탄산염 함량이 증가하는 상부 12 cm ~ 55 cm 구간은 유공충의 잔해로 봤을 높은 탄산염 함량은 생물기원 탄산염으로 해석됨
- 최상부(0 cm ~ 31 cm) 구간에서의 높은 총유기탄소의 함량은 홀로세 온난화를 지시함

색인어 (각 5개 이상)	한 글	로스해, 중앙분지, 고해양, 고기후, 홀로세
	영 어	Ross Sea, Central Basin, paleoceanography, paleoclimate, Holocene

요약문

I. 제목

- 남극해 홀로세-후빙기 퇴적물의 고해상 분석 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 로스해 중앙분지 시추퇴적물의 다양한 고해양학 지시자 분석



III. 연구개발의 내용 및 범위

- 로스해 중앙분지에서 시추코아 KI-13-C2 퇴적물 획득
- 시추코아 KI-13-C2의 X-ray 촬영 및 분석
- 코아 퇴적물의 고해양 지시자(생물기원오펠, 탄산염함량, 총유기탄소) 분석
- 로스해 중앙분지의 홀로세-후빙기 환경 변화 복원

IV. 연구개발결과

- 생물기원 오펠 함량과 총유기탄소 함량의 변화를 통해 퇴적물이 쌓이는 동안 동남극 빙상의 확장-축소의 변화가 나타남
- 동남극 빙상의 확장은 결빙 해역의 증가로 투과되는 빛의 양을 감소시키고, 영양염, 미량 원소의 공급 등을 감소시켜 표층의 생산성을 감소시키는 결과가 나타남
- 탄산염 함량이 증가하는 상부 12 cm ~ 55 cm 구간은 유공총의 잔해로 봤을 높은 탄산염 함량은 생물기원 탄산염으로 해석됨

- 최상부(0 cm ~ 31 cm) 구간에서의 높은 총유기탄소의 함량은 홀로세 온난화를 지시함

V. 연구개발결과의 활용계획

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



S U M M A R Y

(영문 요약문)

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 analyze the diverse paleoceanographic indicators from the core sediments of the Central Basin in the Ross Sea
- To obtain the gravity core KI-13-C2 in the Central Basin of the Ross Sea
- To conduct the soft X-ray radiography of core KI-13-C2
- To analyze the paleoceanographic indicators (biogenic opal, carbonate, organic carbon) of the core KI-13-C2
- To reconstruct the Holocene-deglacial environmental change in the Central Basin of the Ross Sea

IV. R&D Results

- The growth and retreat of the East Antarctic Ice Sheet seems to be recorded by the changes of biogenic opal and total organic carbon contents of the sediments.
- The growth of the East Antarctic Ice Sheet prohibits the sunlight penetration and reduces the nutrients and trace elements, resulting in the decrease of surface water productivity.
- Increase of carbonate content in the upper 12 ~ 55 cm may be due to the biogenic carbonate because of the occurrence of foraminifera.
- High total organic carbon content in the uppermost 0 ~ 31 cm indicates the Holocene warming.

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 달성을 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서 론

산업화가 시작된 19세기 이후 화석연료 사용을 포함한 인간의 활동에 기인한 이산화탄소와 메탄과 같은 온실기체의 농도 증가로 인하여 지구의 대류권과 해양의 온도가 상승하는 지구온난화는 중요한 기후변화 문제로 고려되고 있다(IPCC, 2013). 지구온난화는 빙하와 해빙의 면적을 감소시키고 그리고 이로 인한 해수면 상승을 일으키기 때문에, 여러 환경 규제에도 불구하고 온실기체의 농도는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(IPCC, 2013). 남극의 빙권(cyrosphere)은 전지구적인 기후변화에 가장 민감하게 반응하는 지역들 중의 한 곳으로 전지구적인 해수면 변화, 해양순환과 열 수송, 해양 생산성, 알베도(albedo)변화와 관련되어 현대의 기후 시스템에서 매우 중요한 역할을 담당한다.

해빙은 봄과 여름 동안 남빙양 알베도의 직접적인 변화를 야기시키며(Ebert et al., 1995), 겨울 동안의 결빙으로 인한 염 방출(brine ejection)과 봄-여름 동안 해빙이 녹으면서 형성되는 담수(freshwater)의 공급을 통해 심층수의 형성에 중요하게 작용하여 전지구적 열염 순환과 기후변화에 큰 영향을 미친다(Foldvik and Gammelsrod, 1998; Keeling and Stephens, 2001; Shin et al., 2003). 해빙은 일차생산(primary production)과 송출생산(export production)에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 남빙양 표층수괴의 생물학적 생산성은 빛의 가용도에 의해 주로 조절되기 때문에 이러한 빛 조건은 해빙의 영향을 받는다. 두꺼운 해빙은 표층해수로 투과하는 태양광을 차단함으로써 플랑크톤의 성장을 방해하기 때문에 해빙이 확장한 시기에는 표층의 생산성이 감소되어 심해로 침강하는 입자 플릭스도 적게 관측된다(Abelmann and Gersonde, 1991; Wefer and Fischer, 1991).

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 오펠(biogenic opal)의 형태로 존재하며, 표층 해수의 규조 생산성을 지시한다(Hillenbran et al., 2001).

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 있으

며 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 제거되었기 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.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

최근까지, 남극해에서 마지막 플라이스토세에서 홀로세까지 고해상도의 고기후학적 데이터는 거의 없었다. Shevenell et al.(1996)의 연구에서 적어도 따뜻한 시기가 Mid-Holocene 동안 2 개가 있음을 밝혔으며, 약 8000 cal yr BP 와 약 3000~5000 cal yr BP로 밝혀졌다. 이러한 해석은 총유기탄소(TOC)값의 증가를 근거로 한 것이며, TOC의 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 ^{14}Cyr (1300yr corrected)전까지의 기록으로 mid-Holocene climate optimum(약 2500 cal yr BP)의 종료시기와 Little Ice Age를 밝혀냈다. Leventer et al.(1996)에서 규조, 유공충, 건조밀도, 자화율의 주기분석을 하였으며, 이를 통해 200-300 년 주기의 기후변화를 밝혀냈다. 이는 태양활동과 같은 전 지구적인 forcing에 의해 야기된 것으로 생각된다(Leventer et al. 1996).

Palmer Deep에서 수행된 ODP Site 1098 은 주로 Levanter et al.(1996)에 의해 수행되었으며, 프록시 기록들은 13180 cal yr BP 까지의 연대기록을 보인다. Ishman & Sperling (2002)는 유공충 데이터를 분석하였으며, 이 논문에서 홀로세동안(9000-3700 cal yr BP) 내대륙붕의 심해 수괴는 염분이 있는 대륙붕 수괴가 주로 분포하였지만 현재는 환류형태의 심층수가 우세한다. Shevchenko & Kennett (2002)에서는 비슷한 심층 수괴의 변화를 관찰하였다, 그러나 그들은 그들의 변화원인을 열염구조의 재배치가 아닌 바람의 강도나 방향의 변화로 생각한다. Taylor & Sjunneskog (2002)에서는 다변량 통계분석방법을 이용하여 Palmer Deep 코아에서 다섯 개의 규조군집을 구분하였으며, 각각의 군집은 특징적인 기후상황에서 나타난다. 이러한 군집의 변화시기는 대자율의 변화와 상당히 일치하지만(Domack et al., 2001), Neoglacial(4400 vs 3000 cal yr BP)의 시작시기가 약간 빠르게 나타난다. 총 규조 풍부도 데이터를 이용하여 SJunneskog & Taylor (2002)에서 추운시기가 6000에서 5000 cal yr BP에 나타났다고 설명하였다. Domack et al.(2003)은 Palmer Deep에서의 퇴적자료와 Shevenell et al.(1996)의 연구결과를 서남극반도와 Andvord Bay의 다른 코아 자료와 비교하여 남극반도 지역에서 Little Ice Age, Neoglacial, Mid-Holocene climate optimum 출현을 입증하였다. 또한 Domack et al.(2003)에서 남극반도 현대의 온도상승과 이와 관련된 퇴적물 프록시는 지난 1200년 동안 자연적인 기후변화보다 더 컸으나, mid-Holocene climate optimum만큼 큰 변화가 아니라고 설명했다. 남극주변에서 Mid-Holocene climate optimum의 다양한 시기의 요약그림은 Taylor & Sjunneskog(2002)에서 찾을 수 있다.

다른 연구들은 Holocene 부빙(floating ice shelves)의 안정도에 초점을 맞추었다. Pudsey & Evans(2001)과 최근 Pudsey et al.(2006)의 논문에서 빙운퇴적물(IRD)의 기원지 변화에 대해 설명하였고, 기원지의 변화를 통해 Prince Gustav Ice Shelf 와 Larsen A Ice Shelf 북면이 약 5000-2000 $^{14}\text{C yrBP}$ 동안 사라졌으며 이는 mid-holocene climate optimum 영향에 의한 반응을

지연시켰을 것이다. Bartely et al.(2005)은 대륙붕근처 호수(epishelf lake)에서 획득한 두 개의 코아를 분석하여 George Vi Ice Shelf 가 초기 홀로세인 9595에서 7945 cal yr BP 동안 붕괴되었음을 밝혔다. 반면 Domack et al.(2005)에 의하면 Larsen B Ice Shelf 는 홀로세동안 안정적이었으며, 이러한 안정도는 좀더 남쪽에(더 추운지역) 빙붕이 위치하고 있어서라고 밝혔다 (Larsen A 와 Prince Gustav Ice Shelf 보다 상대적으로). 따라서, 2002년 3월에 발생한 Larsen B Ice Shelf의 붕괴는 홀로세동안 전례없던 지구온난화에 의한 것으로 생각된다 (Domack et al. 2005).



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 연구목적

극지역 빙하의 쇠퇴와 성장은 전 지구 규모의 열 평형에 관계되는 해수 순환이나 지구의 알베도 값 등에 영향을 주고 받는다. 따라서 극지역 빙하는 과거로부터 현재에 이르기까지 기후시스템에 가장 큰 역할을 미치는 부분이다(Reinardya et al., 2015). 남극(Antarctica)의 빙하는 남극횡단산맥(Transantarctic Mountains)을 기준으로 동남극 빙상(East Antarctic Ice Sheet: EAIS)과 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet: WAIS)으로 구분된다.

서남극 빙상의 경우 기저부가 해수면보다 아래에 위치하는 반면에 동남극 빙상의 경우 해수면보다 높은 곳에 위치하고 있다. 또한 동남극 빙상은 서남극 빙상에 비해 훨씬 더 크기 때문에 서남극 빙상보다 대기나 해양 상태의 변화에 덜 민감하다고 알려져 있다(Gohl, 2013). 최근 전 지구적 온난화의 영향에 의해 서남극 빙상의 경우 부피가 줄어들고 이에 따라 약 5 m의 해수면 상승을 가져왔다(Oppenheimer, 1998). 하지만, 동남극 빙상의 경우 표면에서의 빙하 축적이 빙하의 유출로 인한 부피 감소보다 많아 그 양이 증가하여 전 세계적 해수면 상승에 기여하지 않고 있다고 알려져 있다(Reinardya et al., 2015).

로스해(Ross Sea)는 남극 연안 해역들 중에서 해양학적으로 가장 많이 연구된 지역이며 오늘날 생산성이 가장 높은 해역들 중 하나이다(Orsi, 2009; Arrigo et al., 1998). 동남극 빙상 일부와 서남극 빙상 일부가 함께 로스해에 존재하고 있으며, 중앙 분지(Central Basin)는 로스해의 동쪽 부분에 위치하여 동남극 빙상의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 중앙 분지 지역은 제 4기 후기 기간 동안 동남극 빙상에 의해 덮여 있었다.

로스해의 일차 생산성은 남반구 봄부터 증가하여 시작하여 늦은 봄에서 초여름(11월 ~ 1월) 사이에 최대치에 이르며 가을철에 최소가 된다. 또한 로스해 지역의 일차 생산성의 변동에 영향을 미치는 요인들로는 표층에서 투과되는 빛의 양(irradiance), 영양염 조건, 미량 금속(trace metals) 등이 있다고 보고된 바 있다(Smith, 2000).

퇴적물 내의 총유기탄소(Total Organic Carbon: TOC) 함량은 표층의 일차 생산성을 나타내는 지표로서 사용된다(Müller et al., 1979). 퇴적물 내의 생물기원 오펠(Biogenic Opal) 함량 역시 표층의 규조(diatom) 생산성을 반영한다. 규조 생산성은 남극 일차 생산성의 대부분을 차지하고, 남빙양은 탄산염 보상수심(Carbonate Compensation Depth: CCD)이 얕아 탄산염이 잘 보존되지 않기 때문에 남빙양의 생산성을 연구하는데 유용하게 사용될 수 있다(DeMaster et al., 1992). 규조 생산성은 표층 해양의 환경변화를 반영하기 때문에, 로스해 중앙 분지 지역 대륙

사면의 특성 변화 연구를 통해, 제 4기 후기의 동남극 빙상 확장에 관한 정보를 제공 할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 로스해 지역의 중앙 분지에서 얻어진 코아 퇴적물에서 생물기원 오펠, 탄산염, 총유기탄소 함량을 복원하여 표층 생산성 변화를 복원하였다.

2 절. 연구지역

로스해는 동쪽의 빅토리아 랜드(Vitoria Land)와 서쪽의 마리 베드 랜드(Marie Byrd Land) 사이에 위치한다. 로스해에는 서남극 빙상의 일부와 동남극 빙상의 일부가 존재한다. 북쪽에서 로스해 환류(Ross Sea Gyre)가 시계방향으로 흐르고, 빙붕수(Ice Shelf Water: ISW), 고염도 대륙붕수(High Salinity Shelf Water) 등이 특징적이다. 계절에 따라 빙호(Polyna)가 형성되기도 하며, 빙호는 남빙양에서 생산성이 가장 높은 지역들 중 하나이다. 또한 로스해에서 생성되는 저층수(Bottom Water: BW)는 전 지구적으로 공급되는 남극저층수(Antarctic Bottom Water: AABW)의 큰 부분을 차지한다(Orsia, 1999).

연구 지역이 포함된 로스해의 중앙 분지는 조이데스 분지(Joides Basin)의 입구 부분에 위치한 반폐쇄(semi-closed)형이고, 마지막 최대 빙하기에 확장된 동남극 빙상이 해양으로 유입되면서 기저면이 침식되어 만들어졌다(그림 1). 연구지역은 Pennell-Iselin 퇴(Bank)의 동쪽 부분의 외대륙붕(outer shelf)과 대륙사면(continental slope)에 위치하여 빙붕수(ISW)의 주요 통로이다. 또한 이 지역의 생산성은 간빙기 때 증가하고 빙하기 때 감소하는 경향을 보인다고 알려져 있다(Ceccaroni et al., 1998).

3 절. 재료 및 연구방법

3.1 코아 KI-13-C2

총 길이 2.41 m의 중력 코아 KI-13-C2는 2013년 2월 해양탐사 ANA03B가 아라온(IBRV KOPRI-Korea)에 의해 남극 로스해에서 위경도 $71^{\circ}52.4758' S$, $177^{\circ}48.0854' W$, 수심 1797 m에서 시추되었다. 또한 코아 KI-13-C2는 매우 조밀하고 단단한 회색 머드(gray mud)인 것이 특징이다. 절개된 코아는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소(KOPRI)에 보관하고, 이탈리아 트리에스테 대학교(University of Trieste-Italy)에서 2 cm 간격으로 부시료를 획득하였다. 채취된 부시료는 동결건조 후 분말화하였다.

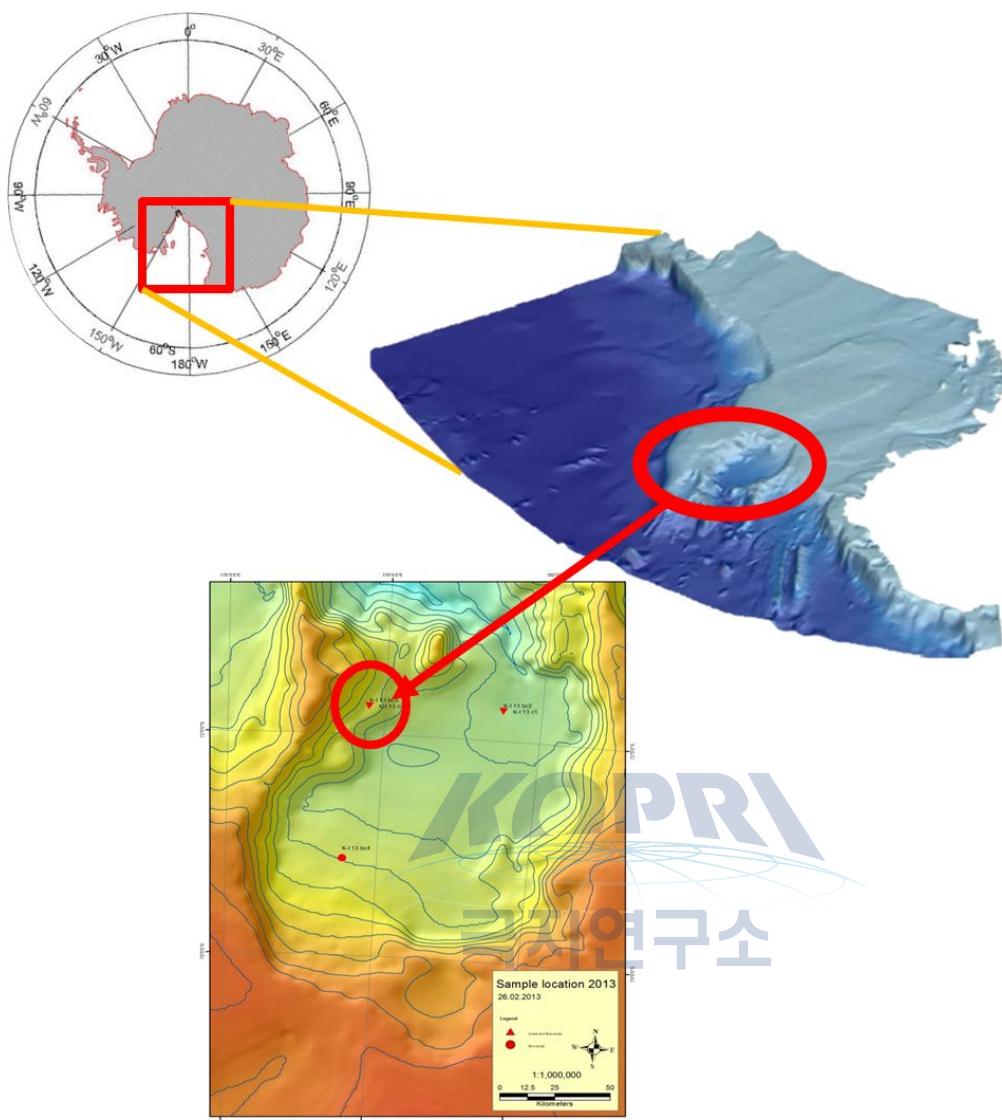


그림 1. 로스해 중앙 분지(Central Basin)의 위치 및 코아 KI-13-C2 정점

3.2 생물기원 오펠 함량 분석

생물기원 오펠 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 몰리브테이트(ammonium molybdate)를 2

ml 첨가 후 정확히 15분 경과 후 각 바이알에 아황산메몰(metol sulfite), 옥살산(oxalic acid), 황산(sulfuric acid), 중류수를 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 $\pm 0.1\%$ 이다.

3.4 총무기탄소 및 CaCO_3 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 총무기 탄소(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 값으

로 나타냈다.

$$TOC (\%) = TC (\%) - TIC (\%)$$

3.6 C/N 값 분석

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

$$C/N = TOC/TN$$

4 절. 연구결과

코아 KI-13-C2의 생물기원 오플 함량은 10.1%의 평균값을 보이며, 3.6%에서 17.6% 사이에서 변동하는 것으로 나타났다. 코아의 하부인 174 cm ~ 241 cm 구간은 평균이 9.2%로 낮았으며, 90 cm ~ 174 cm 구간의 경우는 평균 12.9%로 하부구간에 비해 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 코아의 상부인 0 cm ~ 90 cm 구간의 경우 평균 8.1%로 상대적으로 낮은 값을 나타내었다(그림 2a).

코아 KI-13-C2의 탄산염 함량은 0.42 %에서 10.46 % 사이에서 변동하며, 평균은 0.68 %로 낮은 값을 보였다. 구간별로 봤을 경우 0 cm에서 11 cm 구간에서는 평균값 0.68 %으로 낮으며 12 cm에서 55 cm의 경우 5.85 %로 다른 구간에 비해 매우 높은 값을 보였다. 56 cm에서 241 cm에서는 0.68 %의 다시 낮은 값이 유지되는 특징을 보였다(그림 2b).

코아 KI-13-C2의 총유기탄소 함량은 0%에서 2.43% 사이에서 변동하며, 평균 0.33%으로 전반적으로 매우 낮지만, 상부 0 cm ~ 31 cm 구간에서 최대값 2.44%, 평균 1.39%의 높은 값이 특징적으로 나타났다. 또한 이 상부 구간을 제외한 하부 구간의 평균은 약 0.16%의 낮은 값을 나타내지만 약 90 cm ~ 174 cm 사이 구간에서 평균 약 0.27%의 값을 가져 구간 31 cm ~ 90 cm, 174 cm ~ 241 cm의 평균 각각 약 0.08%, 0.10% 보다 높은 것을 보여주고 있었다(그림 2c).

코아 KI-13-C2의 C/N 값은 평균이 10.58으로 나타나고 있으며, 상부 0 cm ~ 55 cm 구간에서 평균 14.67, 최대값 28.21로 비교적 높은 값을 보이는 것이 특징적으로 나타나고 있었다(그림 2d).

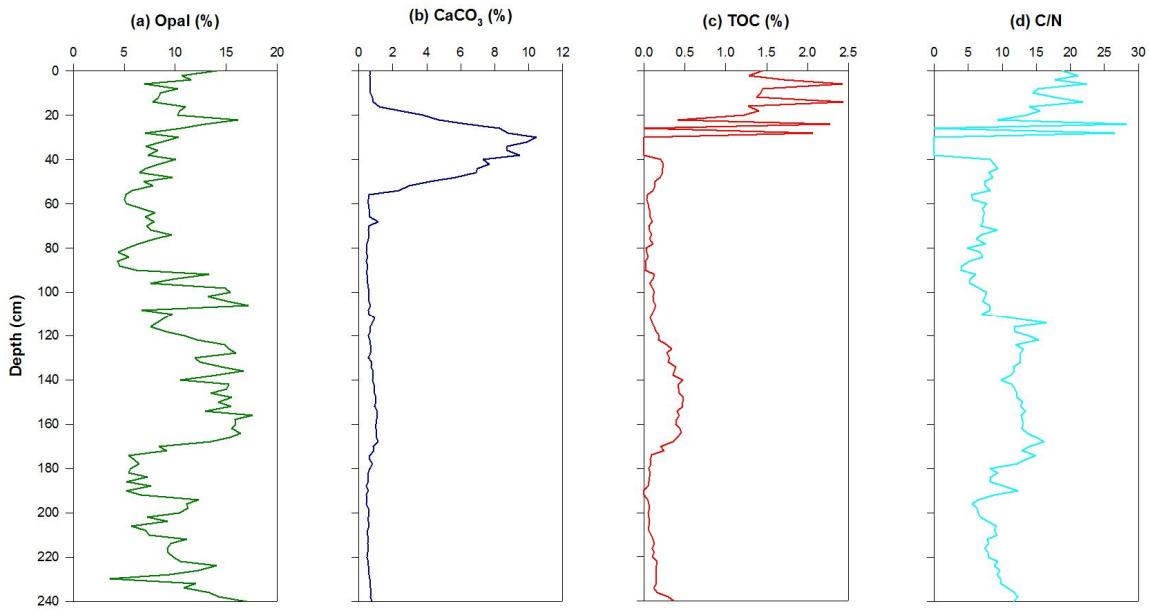


그림 2. KI-13-C2의 지화학분석 (a) 생물기원 오팔 함량, (b) 탄산염 함량, (c) 총유기탄소 함량 변화, (d) C/N 값



5 절. 토의

남빙양에서 생물기원 오팔은 대부분 표층의 일차생산자 중 하나인 규조에 의한 일차 생산에 의한 것이다(DeMaster et al., 1992). 따라서 코아 KI-13-C2의 퇴적물에서 측정된 생물기원 오팔 함량은 로스해 중앙분지 지역의 규조에 의한 일차생산량을 나타낸다고 추정할 수 있다. 또한 이러한 일차생산의 증가와 감소는 빙하의 팽창과 축소에 의해 영향을 받아 빙하가 팽창했을 때 일차생산이 감소하고 축소했을 때 일차생산이 증가하는 경향을 나타낸다고 알려져 있다.

생물기원 오팔 함량이 코아의 하부인 174 cm ~ 241 cm에서 상대적으로 낮은 값을 나타내고 이는 이 기간 동안 생산성이 낮았고 동남극 빙상이 상대적으로 팽창했던 시기였다는 것을 추정할 수 있다. 90 cm ~ 174 cm 구간에서는 하부 구간에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지는 것으로 보아 생산성이 상대적으로 높고 동남극 빙상이 축소된 시기로 추정된다. 코아의 상부인 0 cm ~ 90 cm 구간에서는 오팔 함량이 다시 감소한 것으로 볼 때 생산성이 낮아지고 동남극 빙상이 상대적으로 팽창 했다는 것을 의미한다고 추정할 수 있다.

퇴적물 내의 총유기탄소의 함량 또한 퇴적물의 퇴적 당시의 표층의 일차생산량을 나타내는 것으로 알려져 있다. 코아 KI-13-C2의 총유기탄소 함량의 변화의 경우 생물기원 오팔 함량의

변화와 비슷한 양상을 보이지만 상부 0 cm ~ 31 cm 사이에서 다른 구간에 비해 현저하게 높은 값을 갖는 특징을 보이고 있었다. 코아의 하부 174 cm ~ 241 cm의 낮은 총유기탄소 값을 통해 이 시기 동안 표층 생산성이 낮았음을 추정할 수 있다. 반면, 90 cm ~ 174 cm의 총유기탄소 함량의 경우 상대적으로 높은 값을 가지는 것으로 보아 상대적으로 표층 생산이 높았음을 추정할 수 있다. 코아의 상부 31 cm ~ 90 cm에서 다시 상대적으로 낮아진 총유기탄소 함량의 나타내는 것으로 보아 상부구간에서 표층 생산성이 낮아졌다고 추정가능하다.

코아 KI-13-C2에서 생물기원 오펠 함량의 경우 0 cm ~ 31 cm에서 높은 값을 보이지 않는 반면, 총유기탄소의 경우 전체의 평균이 0.30% 인 것에 비해 0 cm ~ 31 cm에서 최대 2.44%, 평균 1.39%의 현저하게 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이 구간의 높은 총유기탄소는 규조의 생산성에 의한 것이 아니라고 추정할 수 있다. 또한 일반적으로 유기물이 해양 조류에 의해서 생성되었을 경우 낮은 C/N 값을 보이고, 육상의 식물에서 기원했을 경우 높은 C/N 값을 보인다고 알려져 있다. 따라서 평균 18.33의 상대적으로 높은 C/N 값을 통해 이구간의 높은 총유기탄소의 함량이 육상에서 기원한 것이라고 생각할 수 있다. 수층 내 유기탄소의 분해는 저층 수괴 내의 산소에 의해 발생하므로 저층 수괴 내의 산소 농도가 낮을 때 총유기탄소가 잘 보존 되는 것으로 알려져 있다. 0 cm ~ 31 cm의 퇴적물이 퇴적됐던 시기에 오펠 생산성이 낮고 동남극빙상이 상대적으로 팽창했던 시기라고 추정한 것을 바탕으로 했을 때 빙하의 확장에 의해 저층 수괴로의 산소 공급이 줄어 탄산염 보상수심이 깊어진 결과 유기탄소가 보존이 잘되어 퇴적물의 총유기탄소 함량이 증가된 것으로 추정된다(Coxall et al., 2005).

남빙양에서 CaCO_3 가 잘 보존이 되지 않는다고 알려져 있다(Anderson et al., 2014). 그러나 12 cm ~ 55 cm 구간에서는 높은 값을 보이고 있다. 또한 이 구간의 C/N 값의 경우도 평균 14.10, 최대 28.21로 비교적 높은 값을 보이고 있으며, 이 부분의 퇴적물에서 유공충의 잔해가 발견되고 있다. 따라서 높은 CaCO_3 함량은 유공충에 의한 결과라고 생각된다.

따라서 코아 KI-13-C2의 174 cm ~ 241 cm의 퇴적물이 낮은 생물기원 오펠 함량과 총유기탄소 함량이 나타나는 것으로 보아 이 시기는 동남극빙상이 상대적으로 확장되어 빙하의 영향 받고 있는 추운 시기로 생각된다. 반면, 90 cm ~ 174 cm 구간의 퇴적물은 생물기원 오펠 함량과 총유기탄소 함량이 상대적으로 높게 나타나는 것이 특징이다. 따라서, 이 시기의 퇴적물은 상대적으로 따뜻한 환경에서 동남극빙상이 상대적으로 축소 되고 빙하의 영향을 적게 받는 상황에서 퇴적되었다고 해석된다. 0 cm ~ 90 cm의 경우 낮은 생물기원 오펠 함량과 상대적으로 매우 높은 총유기탄소 함량을 가지는 것이 특징적으로 나타난다. 이 시기 또한 추운 환경에서 동남극빙상이 확장됨에 따라 빙하의 영향을 많이 받는 환경이었음을 추정할 수 있다. 또한 동남극빙상의 확장은 이 지역의 비결빙 해역을 감소시킴에 따라 표층 생산성에 영향을 주는 요소인 투과되는 빛의 양, 영양염, 미량 원소의 공급을 감소 시켰으며 이에 따라 표층 생산성이 감소되었을 것이라고 추정할 수 있다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

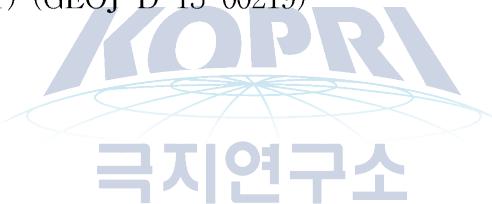
2015년 연구를 통해 다음과 같이 연구성과를 달성하였다.

[국제학술회의 1편]

Mezgec, K., Colizza, E., Capotondi, L., Giglio, F., Khim, B.K., Langone, L., Prelz, V., and Hong, J.K. (2015) Climatic and environmental changes during the last glacial-interglacial transition in the Ross Sea, East Antarctica. *The 21st International Symposium on Polar Sciences (ISPS)*, Incheon, Korea (May 19–21), p.84.

[국제학술지 1편 수정후채택]

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)



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이번 연구결과는 향후 2016년 SCAR Open Science Conference에 발표할 예정이다.

XXXIV SCAR Meetings and Open Science Conference

20 – 30 August 2016, Kuala Lumpur, Malaysia



제 6 장 연구개발과정에서 수입한 해외과학기술정보



<http://www.scar.org/science-themes/climate>

Antarctica and Climate



Antarctica and the Southern Ocean are critically important parts of the Earth system. The climate and physical and biological properties of the continent and the surrounding ocean are closely coupled to other parts of the global environment by the ocean and the atmosphere. For example, the Antarctic ozone hole was one of the most significant scientific discoveries of the last century. For the last 30 years the ozone hole has shielded the bulk of Antarctica from some of the effects of global warming. Nevertheless, the Southern Ocean is warming and the ecosystems are responding. There has been a rapid expansion of plant communities across the Antarctic Peninsula. Parts of Antarctica are losing ice at a rapid rate and palaeoclimate studies in Antarctica show the current changes in global climate are unusual. If greenhouse gas concentrations were to double over the next century, Antarctica is expected to warm by as much as 3°C. Although new data are being collected and analyzed on an almost daily basis, major gaps in knowledge remain and additional instrumental data gathering is needed to improve models. Antarctic and global climate will remain areas of interest for the foreseeable future and continue to be a major component of SCAR science. Understanding of the dynamics of polar climate systems is rudimentary at best and a lack of fundamental knowledge limits predictions of future change with confidence.

Much remains to be done to produce a truly integrated view of the planet's climate system and the role of Antarctica in it. SCAR programmes will continue to address these issues for the foreseeable future.

A detailed understanding of past climate is essential for a more complete understanding of climate variability and the forces that control future change and responses to change. As the continent most remote from direct human influence, Antarctica is an ideal location to study local-to-global scale climate change. There is no other approach or experiment that can provide perspectives across a range of time scales other than deciphering past climate change through proxies archived in ice and sedimentary records. Records on timescales of thousands, hundreds of thousands, or millions of years stored in Antarctica have yet to be retrieved and analyzed. To fill gaps in records of past climate, retrieval of ice and sedimentary records continues to be a high priority. Major objectives for the geosciences community are to obtain geological records of past Antarctic ice sheet dynamics and integration of this knowledge into coupled ice sheet-climate models. Improved models are critical to constrain and improve the accuracy and precision of predictions of future changes in global and regional temperatures, ocean acidification and sea level. Much remains to be accomplished in deciphering palaeoclimate records and improving integrated Earth system models. These topics are a high priority for Antarctic geoscientists.

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.



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