

Article

남극 브랜스필드 해협에서 입자 플럭스 계절변화

김동선^{*1}, 김동엽¹, 김영준², 강영철¹

¹한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²한국해양연구원 해양 정보·기기 지원단
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Seasonal Variations of Particle Fluxes in the Bransfield Strait, Antarctica

Dongseon Kim^{*1}, Dong-Yup Kim¹, Young-June Kim², and Young-Chul Kang¹

¹Polar Science Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Marine Information and Instrumentation Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Particle fluxes were measured by using time-series sediment traps in the Bransfield Strait from December 27th, 1999 to December 26th, 2000. Total mass fluxes showed distinct seasonal variations with high fluxes in the austral summer and low fluxes in the austral winter at a 678 m water depth in the eastern Bransfield Strait, while they were high only in January and fairly low in other months at a 960 m water depth in the central Bransfield Strait. The reason that total mass fluxes occurred only in January at a 960 m water depth in the central Bransfield Strait seems to be the strong current in the surface waters, which leads to a substantial amount of terrestrial materials and locally produced organic matter being advected away from the mooring site. Total mass fluxes were very high from January to October at a 1678 m water depth in the eastern Bransfield Strait, while they were high only in January and February at a 1860 m water depth in the central Bransfield Strait. The fact that total mass fluxes were higher at the deep water in the both sites than at the intermediate water depth may reflect that a substantial amount of terrestrial and organic materials are laterally transported by strong tidal current from the shallow environments to the deep basins.

Key words : 입자 플럭스(particle flux), 유기탄소(organic carbon), 생물기원규소(biogenic silica), 탄산칼슘(calcium carbonate), 육상기원 쇄설물 플럭스(lithogenic flux).

1. 서 론

해양에서 생지화학적 원소들의 순환은 해양 표층에서 식물플랑크톤에 의한 유기물 생성과 생성된 유기물이 심해로 침강에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 입자 플럭스는 영양염의 재생, 저서생물에 대한 먹이공급, 기후변화에 대한 퇴적물 기록 보존 등에도 영향을 미친다(Ittekkot *et*

al. 1996). 전지구 탄소순환의 관점에서 보면, 해양에서의 입자 플럭스는 대기 이산화탄소를 심해로 제거하는 가장 중요한 메카니즘 중 하나이다. 따라서 대기 이산화탄소 농도를 저감하는 해양의 역할을 이해하고 해양에서 탄소의 생지화학적 순환을 파악하기 위해 입자 플럭스에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Fisher *et al.* 2000; Honjo *et al.* 2000; Palanques *et al.* 2002).

아열대 수렴대(Subtropical Convergence, *ca* 45°S)의 남쪽에 위치하고 있는 남빙양(Southern Ocean)은 대기 이산

*Corresponding author. E-mail : dkim@kordi.re.kr

화탄소 순환과 전지구 생물기원규소(biogenic silica) 순환에 중요한 역할을 하고 있기 때문에 최근 많은 관심이 집중되는 지역이다(Keir 1988; Robertson and Watson 1995; DeMaster et al. 1996; Bakker et al. 1997; Rabouille et al. 1997). 많은 연구자들이 남빙양에서 시계열 퇴적물 트랩(Time-series sediment trap)을 이용하여 입자 플럭스를 관측한 결과, 입자 플럭스와 그 화학적 조성은 저위도와 중위도 해역에 비해 시·공간적으로 매우 큰 변화양상을 보여준다(Fisher et al. 1988; Wefer et al. 1990; Karl et al. 1991; Dunbar et al. 1998; Collier et al. 2000; Honjo et al. 2000; Palanques et al. 2002). 남빙양에서 입자 플럭스는 주로 일차생산력에 영향을 주는 바람, 해류순환, 해빙, 구름 등과 같은 기후인자에 의해 좌우된다(Dunbar et al. 1998; Collier et al. 2000). 따라서 남빙양에서 장기간 동안 입자 플럭스를 관측하면 장주기 기후변화 양상을 파악할 수 있다.

브랜스필드 해협은 남셰틀랜드 군도와 남극반도에 의해 경계되고 동부분지, 중앙분지, 서부분지 크게 3개의 분지로 나뉘어진다. 이 해협은 남빙양 중에서 상대적으로 강수량이 많고 고온 다습한 기후에 속한다(Reynolds 1981). 이런 기후조건 때문에 이 해협은 일년 동안에 해빙의 성장과 쇠퇴를 경험하는, 기후변화에 민감한 아극대 환경(sub-polar setting)에 속한다. 따라서 브랜스필드 해협은 기후변화에 민감하고 접근이 용이하기 때문에 입자 플럭스를 장기간 관측하기에 적합한 곳이다. Wefer et al.(1990)은 중앙브랜스필드 해협에서 1983년부터 1986년까지 3년 동안 시계열 퇴적물 트랩을 이용하여 입자 플럭스를 관측하였는데, 입자 플럭스의 계절변화와 연간변화가 다른 어느 해역에서 관측된 것보다도 컸다. Palanques et al.(2002)은 서브브랜스필드 해협에서 1995년부터 1996년까지 1년 동안 시계열 퇴적물 트랩을 이용하여 입자 플럭스를 관측하였다. 하지만 지금까지 동브랜스필드 해협에서 시계열 퇴적물 트랩을 이용하여 입자 플럭스를 관측한 적이 없고 또한 장주기 기후변화 양상을 파악하기 위해서는 장기간 입자 플럭스 관측이 필요하다.

따라서 한국해양연구원 극지연구본부에서는 브랜스필드 해협의 중앙부와 동부, 두 곳에 1998년부터 현재까지 시계열 퇴적물 트랩을 계류하여 입자 플럭스를 관측하고 있다. 1999년 1년 동안의 입자 플럭스에 대한 연구결과는 이미 논문으로 제출하였고(Kim et al. 2001), 본 논문에서는 2000년 1년 동안 관측된 자료를 종합하여 기술하였다.

2. 재료 및 방법

시계열 퇴적물 트랩을 1999년 12월 27일부터 2000년

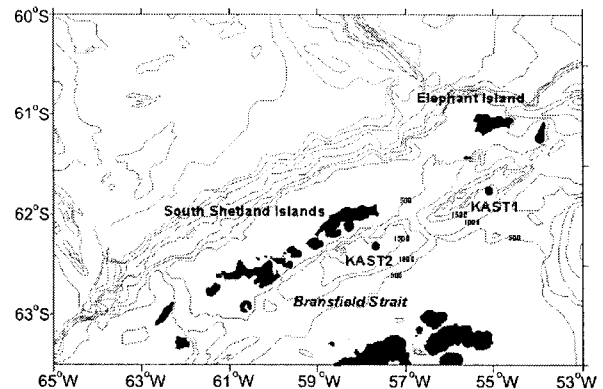


Fig. 1. Location of the sediment trap mooring sites in the Bransfield Strait. The mooring sites are marked by closed circles.

12월 26일까지 중앙과 동브랜스필드 해협 두 곳에 계류하였다(Fig. 1). 동브랜스필드 해협에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 61°46.11', 서경 54°56.52', 수심은 1778 m 이었고, 이 정점을 KAST1이라 하였다. 중앙브랜스필드 해협에 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 62°15.25', 서경 57°38.02', 수심은 1960 m이었고 이 정점을 KAST2라 하였다. 동브랜스필드 해협에서는 두 개의 퇴적물 트랩을 수심 678 m와 1678 m에 계류하였고 중앙브랜스필드 해협에서는 수심 960 m와 1860 m에 계류하였다. 그리고 각각의 퇴적물 트랩 아래 20 m 지점에 유속계를 계류하였다. 본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 트랩은 21개의 시료병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G이었고 유속계는 Aanderaa RCM8이었다. 입자 플럭스가 많은 11월부터 2월까지의 퇴적물 시료를 10일 간격으로 포집하였고 10월에는 15일, 나머지 계절에는 30/31일 간격으로 포집하였다. 퇴적물 트랩을 계류하기 전에 Na-borate로 중화한 5% 포르말린 용액을 시료병에 넣어 퇴적물 시료가 부패하지 않도록 하였다.

퇴적물 시료는 화학분석과 현미경 관찰을 위하여 Folsom 플랑크톤 분리기를 이용하여 4등분하였다. 시료를 4등분하기 전에 살아있는 상태로 퇴적물 트랩에 포집된 것으로 보이는 생물체는 모두 핀셋을 이용하여 제거하였다. 화학분석을 위하여 4등분한 시료 중 하나를 증류수로 3번 세척하고 원심분리한 후에 냉동 건조하였다. 건조된 퇴적물 시료의 무게를 측정하여 총질량 플럭스를 계산하였다.

총탄소 함량은 CNS 원소분석기(Carlo-Erba EA 1112)를 이용하여 측정하였다. 모든 시료를 두 번 분석한 결과, 분석 정밀도는 3%였다. 무기탄소 함량은 coulometrics 탄소분석기(UIC CM5130)를 이용하여 측정하였는데, 분석 정밀도는 2%였다. 유기탄소 함량은 총탄소 함량에서 무

기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 생물기원규소(biogenic silica) 함량은 85°C에서 0.5N NaOH를 이용하여 시간별로 용해하여 측정하였고(DeMaster 1981), 분석 정밀도는 5%였다. 생물기원규소 함량은 SiO₂의 분자량을 곱하여 계산하였다. 알루미늄 함량은 기초과학지원연구원에 있는 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES, Simazu ICPS-1000III)를 이용하여 측정하였고 분석 정밀도는 5%였다. ICP-AES로 분석하기 전에 퇴적물 시료는 질산, 불산, 과염소산을 이용하여 완전히 용해시켰다. 육상기원 쇄설물 함량은 알루미늄 함량에 12.15를 곱하여 계산하였다(Honjo *et al.* 2000).

3. 결 과

해빙 및 유속

퇴적물 트랩을 계류한 해역의 한달 평균 해빙자료는 DMSP F13 Special Sensor Microwave/Imager(SSM/I)부터 얻었다. 퇴적물 트랩을 계류한 2000년에 정점 KAST1에서 해빙은 6월부터 9월까지만 존재하였고 다른 계절에는 존재하지 않았다(Fig. 2a). 6월과 7월에는 해빙이 해수면 면적의 10% 이하로 비교적 적게 존재하였지만 8월에는 급격히 증가하여 해수면 면적의 반 정도를 차지하였

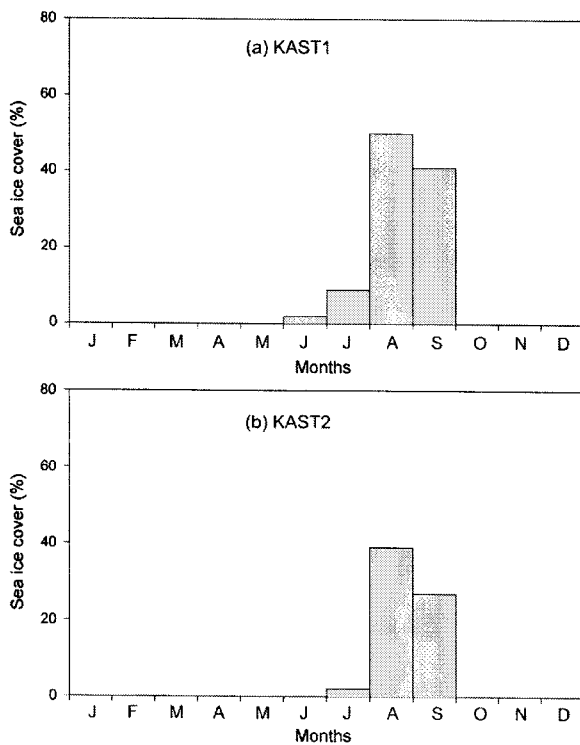


Fig. 2. Monthly averaged sea ice coverage at (a) KAST1 and (b) KAST2.

다. 9월에는 다시 약간 감소하여 해수면 면적의 41%를 차지하였다. 정점 KAST2에서 해빙은 7월부터 9월까지만 존재하였고 8월에 해수면 면적의 39% 차지하여 가장 많은 해빙이 존재하였다(Fig. 2b). 전반적으로 해빙은 정점 KAST2보다 정점 KAST1에서 많이 존재하였다.

퇴적물 트랩을 계류한 해역의 해류흐름을 이해하기 위해서 해류계(Rotary current meter)로부터 하루 평균 유속을 얻었다. 네 곳 모두에서 시간에 따른 진동이 큰 것으로 보아 브랜스필드 해협은 조류의 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 정점 KAST1 중층(수심 678 m)에서 유속은 겨울철인 6-8월에 10 cm s⁻¹ 이상의 높은 값을 보였고 여름철인 12월, 1월, 2월에는 5 cm s⁻¹ 이하의 낮은 값을 보였다(Fig. 3a). 최고 유속은 15.4 cm s⁻¹으로 8월초에 관측되었다. 해류는 일년내내 변하지 않고 북동에서 남서방향으로

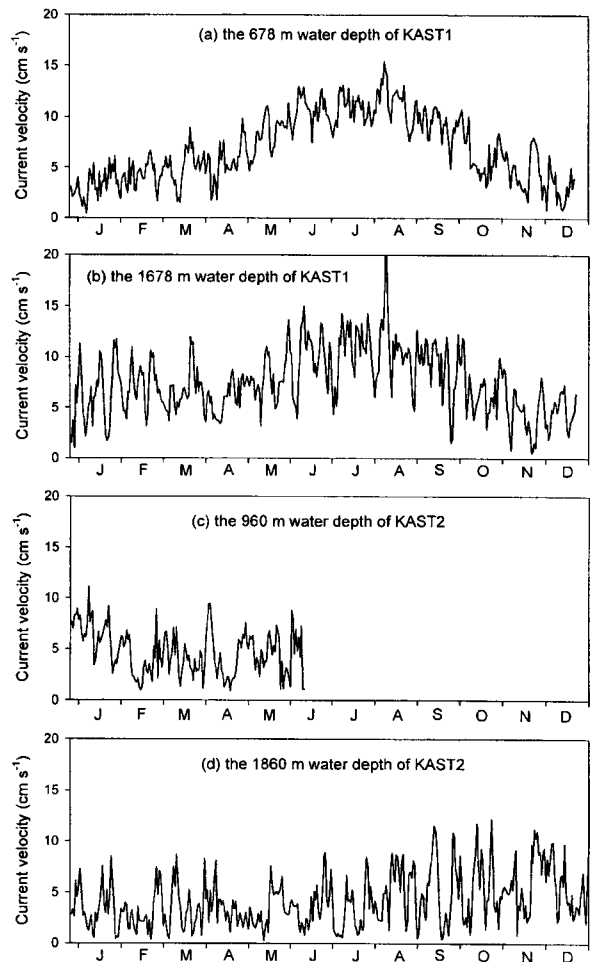


Fig. 3. Current velocity (1 day means) at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2.

홀렸다. 정점 KAST1 저층(수심 1678 m)에서 유속은 중층과는 달리 여름철에도 5 cm s^{-1} 이상의 높은 값을 보였고 겨울철과도 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3b). 저층에서 관측된 유속은 중층에 비해 시간에 따른 진동폭이 큰 것으로 보아 조류에 의한 영향이 중층보다 큰 것으로 보인다. 최고 유속은 23.1 cm s^{-1} 으로 중층과 마찬가지로 8월 초에 관측되었다. 해류는 중층과 마찬가지로 일년 내내 북동에서 남서방향으로 흘렀다. 정점 KAST2 중층(수심 960 m)에서는 유속계의 고장으로 인해 1월부터 6월 초까지의 유속자료를 얻었다(Fig. 3c). 이 곳에서 유속은 10 cm s^{-1} 이하로 계절에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 해

류 방향은 정점 KAST1과 정반대로 남서에서 북동방향이었다. 정점 KAST2 저층(수심 1860 m)에서 유속은 대부분이 10 cm s^{-1} 이하이고 중층과 마찬가지로 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보이지 않았다(Fig. 3d). 해류방향은 시간에 따라 변하여 일정하지 않았고 주로 남서에서 북동방향이거나 북서에서 남동방향이였다.

총질량 플럭스(Total mass flux)

총질량 플럭스는 지역과 수심에 따라 큰 차이를 보였다(Fig. 4). 전반적으로 총질량 플럭스는 중앙브랜스필드 해협에 위치한 정점 KAST2보다는 동브랜스필드 해협에 위치한 정점 KAST1에서 크게 관측되었다. 그리고 두 정점 모두에서 중층보다 저층에서 높은 총질량 플럭스를 보였다. 정점 KAST1 중층에서 총질량 플럭스는 계절적으로 큰 변화를 보였다(Fig. 4a). 여름철인 1-3월에는 $500 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 내외의 높은 플럭스를 보였지만 겨울철인 6월과 7월에는 $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하의 낮은 플럭스를 보였다. 다른 계절에서는 총질량 플럭스가 $16\text{-}129 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 비교적 낮게 관측되었다. 총질량 플럭스의 최고값은 $902 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 2월(2/5-2/15)에 관측되었고 최저값은 $6.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 6월(6/7-7/7)에 관측되었다. 정점 KAST1 저층에서 관측된 총질량 플럭스는 중층과는 달리 뚜렷한 계절변화를 보이지 않았고 여름철인 1월과 2월, 겨울철인 7월과 8월에 $1500 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이상의 높은 플럭스를 보였다(Fig. 4b). 하지만 10-12월에는 $0.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 플럭스를 보였다. 1-3월에 저층에서 관측된 총질량 플럭스는 중층의 것에 비해 2-3배 가량 큰 반면, 6-8월에는 100배 이상 컸다. 하지만 10-12월에는 저층에서도 중층에서의 총질량 플럭스가 오히려 크게 관측되었다. 저층에서 총질량 플럭스의 최고값은 $2041 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 7월(7/7-8/7)에 관측되었고 최저값은 $0.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하로 11월과 12월에 관측되었다.

정점 KAST2에 관측된 총질량 플럭스는 정점 KAST1과는 상당히 다른 계절적 변화양상을 보였다. 정점 KAST2 중층에서는 총질량 플럭스가 1월에만 관측되었고 다른 계절에서는 거의 관측되지 않았다(Fig. 4c). 1월에 관측된 총질량 플럭스는 $500\text{-}1129 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 정점 KAST1 중층에서 1월에 관측된 값($373\text{-}539 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다 2배 가량 컸다. 정점 KAST2 저층에서는 총질량 플럭스가 1월 뿐만 아니라 2월에도 관측되었다(Fig. 4d). 1월에 관측된 총질량 플럭스($843\text{-}1538 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)는 2월에 관측된 것($975\text{-}1071 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)에 비해 약간 높게 나타났다. 하지만 1월과 2월에 정점 KAST2 저층에서 관측된 총질량 플럭스는 같은 기간동안 정점 KAST1 저층에서 관

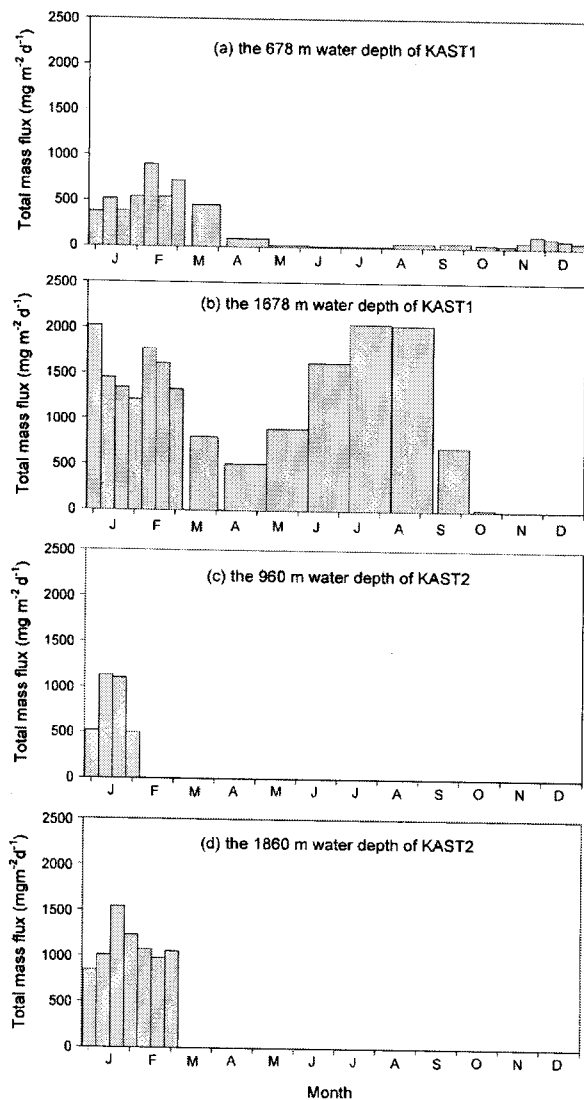


Fig. 4. Total mass fluxes at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2.

측된 것보다 낮게 나타났다.

유기탄소 함량 및 플럭스

정점 KAST1 중층에서 포집된 퇴적물의 유기탄소 함량은 5.5-19.7%(질량 퍼센트)이었고 10월에 최고값, 8월에 최저값을 보였다(Fig. 5a). 유기탄소 함량은 1월부터 6월까지 10% 내외로 큰 변화를 보이지 않다가 7월부터 점차 감소하여 8월에 최저값을 보였고 9월부터 다시 증가하여 10월에 최고값을 보였다. 따라서 유기탄소 함량은 10월과 12월에 비교적 높았고 7월과 8월에 낮아 계절에 따라 특징적인 변화양상은 보이지 않았다. 정점 KAST1

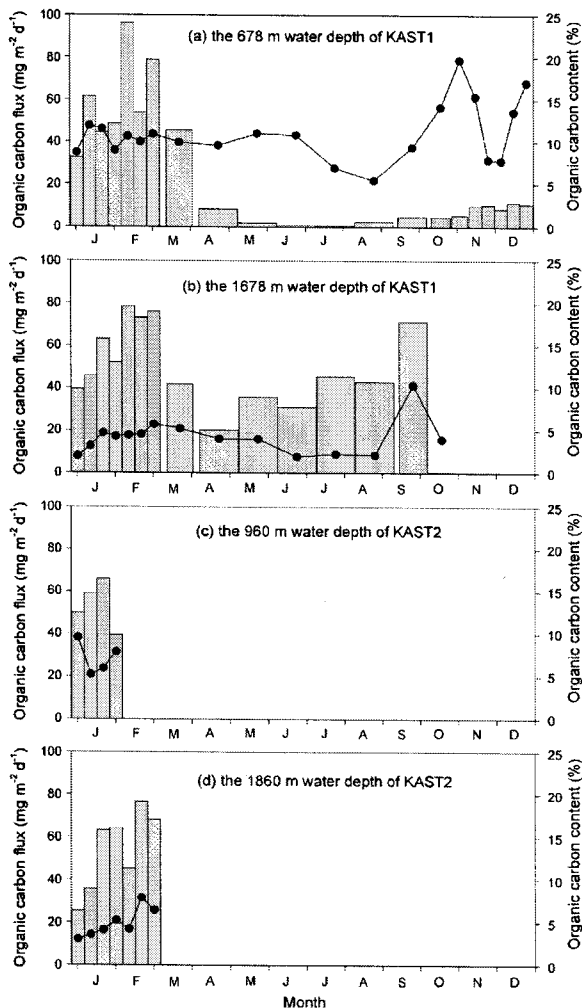


Fig. 5. Organic carbon fluxes and contents at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2. Vertical bars indicate fluxes, and closed circles indicate contents.

저층에서 유기탄소 함량은 1.9-10.3%로 중층에 비해 2-3 배 가량 낮게 나타났다(Fig. 5b). 9월에 포집된 퇴적물에서 물고기 비늘이 많이 발견되었는데, 이것은 죽은 물고기 일부가 퇴적물 트랩 안으로 유입된 것을 지시해 준다. 따라서 9월에 물고기의 유입으로 인해 유기탄소 함량이 증가하여 다른 계절에 비해 유기탄소 함량이 특히 높은 것으로 보인다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 유기탄소 함량은 5.3-9.6%로 같은 시기에 정점 KAST1 중층에서 측정된 값(8.7-11.9%)보다 낮았다(Fig. 5c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 유기탄소 함량은 3.0-7.9%로 중층에서 측정된 값보다 낮았지만 같은 기간 동안 정점 KAST1 저층에서 측정된 값(2.0-5.7%)보다는 높았다(Fig. 5d).

정점 KAST1 중층에서 최고 유기탄소 플럭스는 $96 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 2월(2/5-2/15)에 관측되었고 최저 플럭스는 $0.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 7월(7/7-8/7)에 관측되었다(Fig. 5a). 총질량 플럭스와 마찬가지로 유기탄소 플럭스는 여름철인 1-3월에 높은 값을 보였고 겨울철인 6-8월에 낮은 값을 보였다. 정점 KAST1 저층에서 유기탄소 플럭스는 자료가 없는 10-12월을 제외하고는 $20-78 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 큰 계절적 변화를 보이지 않았다(Fig. 5b). 총질량 플럭스의 경우, 1-3월에 저층이 중층에 비해 2-3배의 높은 값을 보였는데, 유기탄소 플럭스는 오히려 중층에서 약간 높은 값을 보였다. 이것은 이 기간동안 유기탄소 함량이 저층보다 중층에서 3배 가량 높았기 때문이다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 유기탄소 플럭스는 $40-66 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 같은 기간동안 정점 KAST1 중층의 플럭스($33-62 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다 약간 높았다(Fig. 5c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 유기탄소 플럭스는 $25-76 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 같은 기간동안 정점 KAST1 저층의 유기탄소 플럭스($39-78 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)와 유사하였다(Fig. 5d).

생물기원규소 함량 및 플럭스

정점 KAST1 중층에서 포집된 퇴적물의 생물기원규소 함량은 12-56%이었고 11월말(11/26-12/6)에 최고값을 보였고 8월(8/7-9/7)에 최저값을 보였다(Fig. 6a). 생물기원규소 함량은 1월부터 3월까지 35% 내외로 뚜렷한 변화를 보이지 않았다가 4월부터 점차적으로 감소하여 8월에 최저값을 보였고 9월부터 다시 증가하여 11월말에 최고값을 보였다. 생물기원규소 함량은 유기탄소 함량과 달리 계절에 따라 뚜렷한 변화양상을 보였다; 여름 동안 비교적 높은 값을 보였다가 가을에 점차적으로 감소하여 겨울에 최저값을 보였고 봄으로 갈수록 점차 증가하여 11월 말에 최고값을 보였다. 정점 KAST1 저층에서 생물기원규소 함량은 13-30%로 중층에서 생물기원규소 함량의 절반 정도였다(Fig. 6b). 중층과 마찬가지로 저층에서도 생물기원규

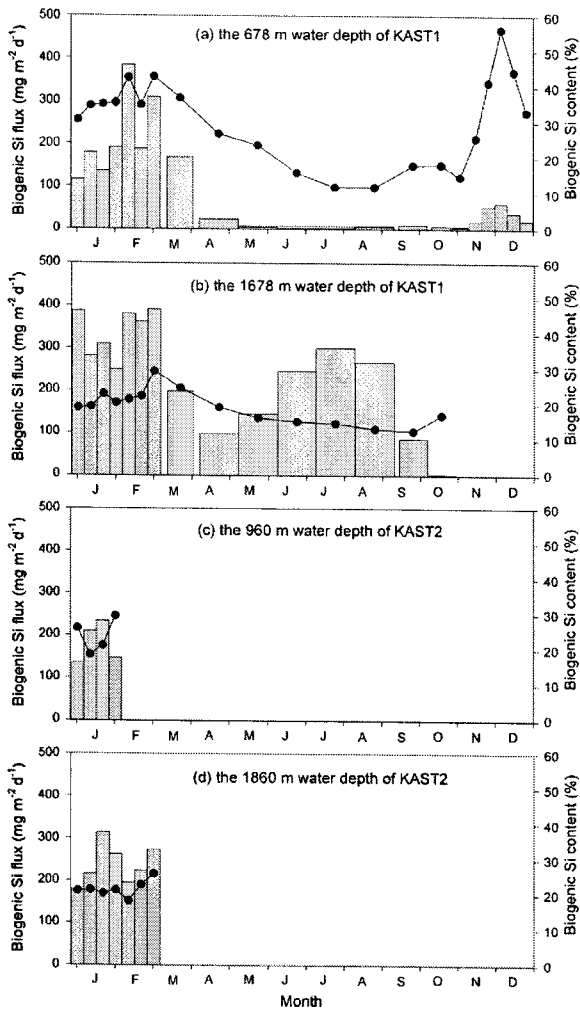


Fig. 6. Biogenic silica fluxes and contents at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2. Vertical bars indicate fluxes, and closed circles indicate contents.

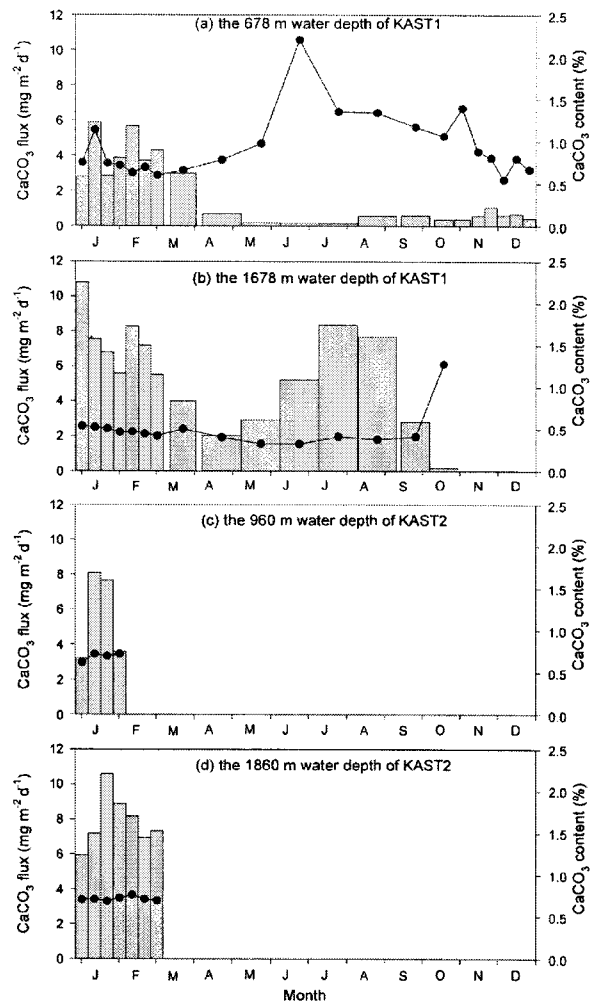


Fig. 7. Calcium carbonate fluxes and contents at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2. Vertical bars indicate fluxes, and closed circles indicate contents.

소 함량은 여름에 비교적 높았고 겨울에 낮았다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 생물기원규소 함량은 19-30%로 같은 시기에 정점 KAST1 중층에서 측정된 값(31-36%)보다 낮았다(Fig. 6c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 생물기원규소 함량은 18-26%로 중층에서 측정된 값과 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 6d).

정점 KAST1 중층에서 생물기원규소 플럭스는 2월(2/5-2/15)에 최고값, 384 mg m⁻²d⁻¹을 보였고 8월(8/7-9/7)에 최저값, 12 mg m⁻²d⁻¹을 보였다(Fig. 6a). 정점 KAST1 저층에서 생물기원규소 플럭스는 자료가 없는 10-12월을 제외하고는 87-391 mg m⁻²d⁻¹의 범위를 보였고 1월과 2

월에 특히 높은 값을 보였다(Fig. 6b). 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 생물기원규소 플럭스는 136-234 mg m⁻²d⁻¹으로 같은 기간동안 정점 KAST1 중층에서의 생물기원규소 플럭스(115-191 mg m⁻²d⁻¹)보다 약간 높았다(Fig. 6c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 생물기원규소 플럭스는 178-314 mg m⁻²d⁻¹으로 같은 기간동안 중층에서의 생물기원규소 플럭스보다 높았고 정점 KAST1 저층(249-391 mg m⁻²d⁻¹)보다는 낮았다(Fig. 6d).

탄산칼슘 함량 및 플럭스

정점 KAST1 중층에서 포집된 퇴적물의 탄산칼슘 함량

은 0.6-2.2%으로 생물기원 원소 중에서 가장 낮은 값을 보였다. 최고 탄산칼슘 함량은 6월(6/7-7/7)에 관측되었고 최저 탄산칼슘 함량은 11월말(11/26-12/6)에 보였다(Fig. 7a). 탄산칼슘 함량은 겨울철인 6-8월에 높았고 여름철인 12-2월에 낮아 유기탄소와 생물기원규소 함량과는 정반대적인 현상을 보였다. 정점 KAST1 저층에서 탄산칼슘 함량은 0.3-1.3%로 중층에서 탄산칼슘 함량의 절반 정도였다(Fig. 7b). 저층에서 탄산칼슘 함량은 중층과는 달리 계절에 따라 큰 차이를 보이지 않았고 다른 계절에 비해 10월에 특히 높은 값을 보였다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 탄산칼슘 함량은 0.6-0.7%로 같은 시기에 정점 KAST1 중층에서 측정된 값(0.7-1.1%)보다 낮았다(Fig. 7c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 유기탄소 함량은 0.7-0.8%로 중층에서 측정된 값과 큰 차이를 보이지 않았지만 같은 시기에 정점 KAST1 저층의 탄산칼슘 함량(0.4-0.5%)보다는 높았다(Fig. 7d).

정점 KAST1 중층에서 최고 탄산칼슘 플럭스는 $5.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 1월(1/6-1/16)에 관측되었고 최저 플럭스는 $0.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 7월(7/7-8/7)에 관측되었다(Fig. 7a). 탄산칼슘 플럭스는 총질량 플럭스와 마찬가지로 여름철인 1-3월에 높은 값을 보였고 겨울철인 6-8월에 낮은 값을 보였다. 정점 KAST1 저층에서 탄산칼슘 플럭스는 $>0.01-10 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 1월, 2월, 7월, 8월에 높았고 11월과 12월에 낮았다(Fig. 7b). 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 탄산칼슘 플럭스는 $3.2-8.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 같은 기간 동안 정점 KAST1 중층의 탄산칼슘 플럭스($2.8-5.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다 높았다(Fig. 7c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 탄산칼슘 플럭스는 $6.0-11 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 중층보다 높았고 같은 기간 동안 정점 KAST1 저층의 탄산칼슘 플럭스($5.6-11 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)와 유사하였다(Fig. 7d).

육상기원 쇄설물 함량 및 플럭스

퇴적물 트랩에 포집된 퇴적물은 유기탄소, 생물기원규소, 탄산칼슘과 같은 생물기원 원소 이외 나머지 대부분이 육상기원 쇄설물로 이루어졌다. 정점 KAST1 중층에서 5월, 6월, 7월, 10월, 12월에는 시료부족으로 인하여 육상기원 쇄설물 함량 자료를 얻지 못했다(Fig. 8a). 이 곳에서 쇄설물 함량은 계절에 따라 큰 변화를 보여 여름철인 1-3월에 27-42%로 비교적 낮았고 겨울철인 8월과 9월에 66-76%로 높았다. 4월과 11월에는 각각 51%와 47%로 중간 값 정도를 보였다. 정점 KAST1 저층에서 쇄설물 함량은 58-87%로 대체로 중층보다 높은 값을 보였다(Fig. 8b). 이곳에서도 중층과 마찬가지로 여름철인 1-3월에 쇄설물 함량이 낮았고 겨울철인 6-8월에 높았다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 쇄설물 함량은 51-69%로 같은 기간 정점 KAST1 중층에서의 쇄설물 함량(31-42%)보다 높았다

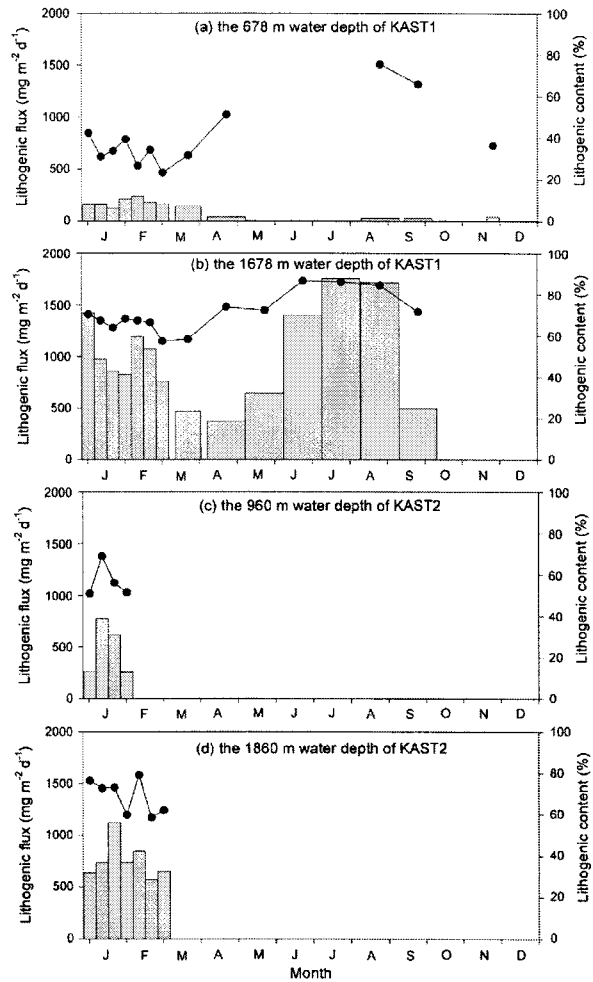


Fig. 8. Lithogenic fluxes and contents at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2. Vertical bars indicate fluxes, and closed circles indicate contents.

(Fig. 8c). 이처럼 정점 KAST1보다 KAST2에서 쇄설물 함량이 높은 것은 정점 KAST의 위치가 Fig. 1에서 보는 바와 같이 인근 섬에 보다 인접하고 있어 섬으로부터 보다 많은 육상기원 쇄설물 유입되기 때문이다. 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월에 쇄설물 함량은 59-79%로 중층보다는 높았고 정점 KAST1 저층과는 비슷한 값을 보였다(Fig. 8d).

정점 KAST1 중층에서 1월, 2월, 3월, 4월, 8월, 9월, 11월에 쇄설물 플럭스는 $31-240 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 여름철에 높았고 겨울철에 낮았다(Fig. 8a). 정점 KAST1 저층에서 쇄설물 플럭스는 자료가 없는 10-12월을 제외하고는 $374-1758 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 보였고 7월과 8월에 특히 높은

값을 보였다(Fig. 8b). 1-3월 동안 유기탄소와 생물기원규소 플럭스는 중층과 저층이 큰 차이를 보이지 않았지만 쇄설물 플럭스는 중층에 비해 저층에서 4.9배 가량 높았다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 쇄설물 플럭스는 $258-778 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 같은 기간동안 정점 KAST1 중층의 쇄설물 플럭스($130-212 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다 2-5배 가량 높았다(Fig. 8c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 쇄설물 플럭스는 $571-1125 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 같은 기간동안 중층에서의 쇄설물 플럭스보다 높았고 정점 KAST1

저층($761-1423 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다는 낮았다(Fig. 8d).

유기탄소/질소 비율

정점 KAST1 중층에서 포집된 퇴적물의 유기탄소/질소 비율은 5.8-8.2의 범위를 보였고 최고값은 1월말(1/26-2/5)에, 최저값은 11월말(11/16-11/26)에 관측되었다(Fig. 9a). 유기탄소/질소 비율은 1월, 2월, 9월에 비교적 높은 값을 보였고 10-12월에 낮은 값을 보였다. 정점 KAST1 저층에서 유기탄소/질소 비율은 계절에 따라 큰 변화를 보였다(Fig. 9b). 유기탄소/질소 비율이 1월부터 4월까지 6.7-7.8의 범위에서 뚜렷한 변화를 보이지 않았다가 5월부터 점차 증가하여 9월에 12.0으로 최고값을 보이고 다시 감소하였다. 9월에 최고 비율을 보이는 것은 상대적으로 높은 유기탄소/질소 비율을 갖는 물고기 사체 일부가 퇴적물 트랩 속으로 유입되었기 때문인 것으로 보인다. 유기탄소/질소 비율이 여름철인 1-3월에는 저층보다 중층에서 약간 높았지만 겨울철인 6-8월에는 중층보다 저층에서 높았다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 유기탄소/질소 비율은 6.9-7.6으로, 같은 기간동안 정점 KAST1 중층에서의 비율(7.8-8.2)보다 낮았다(Fig. 9c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 유기탄소/질소 비율은 6.2-7.9로 같은 기간동안 중층에서의 비율과 유사하였고 정점 KAST1 저층에서의 비율(6.7-7.8)과도 유사하였다(Fig. 9d).

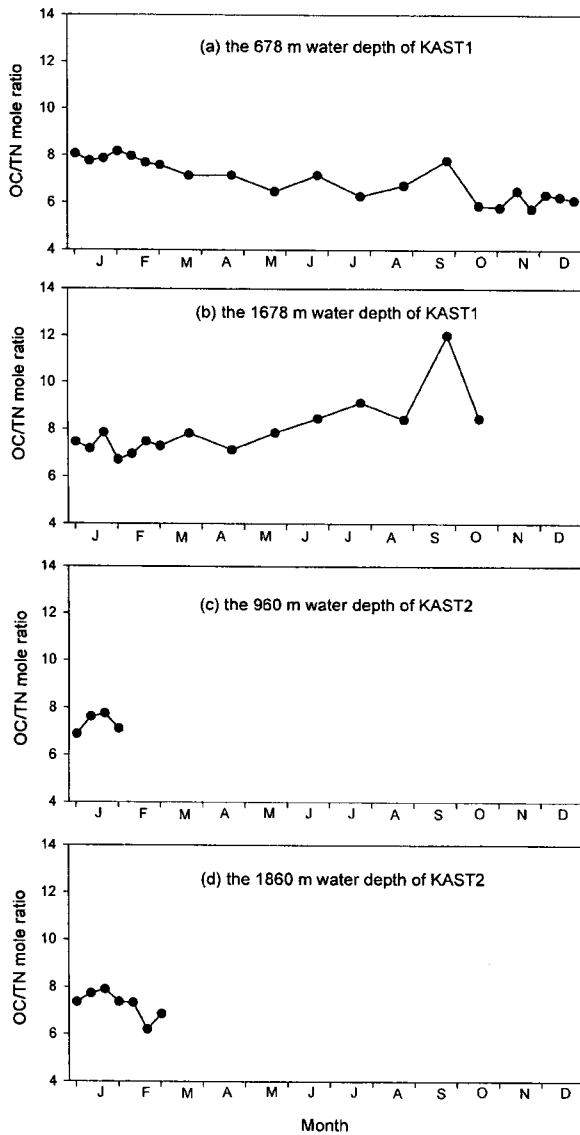


Fig. 9. Organic carbon/total nitrogen mole ratios of the settling particulate matter at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2.

생물기원규소/유기탄소 비율

정점 KAST1 중층에서 포집된 퇴적물의 생물기원규소/유기탄소 비율은 0.15-1.4의 범위를 보였고 최고값은 11월말(11/26-12/6)에, 최저값은 10월말(10/22-11/6)에 관측되었다(Fig. 10a). 생물기원규소/유기탄소 비율은 1월부터 3월까지 0.7 내외로 큰 변화를 보이지 않다가 4월부터 점차 감소하여 10월말에 최소 값을 보인 후에 다시 급격히 증가하여 11월말에 최고값을 보였다. 생물기원규소/유기탄소 비율이 11월에 급격히 증가한 것은 이 시기에 규조류의 번성(bloom)이 일어났기 때문인 것으로 생각된다. 정점 KAST1 저층에서 생물기원규소/유기탄소 비율은 1월초에 최고값(2.0)을 보인 후 급격히 감소하여 2월부터 5월까지 1.0 내외로 큰 변화가 없었다가 6월에 1.6으로 급격히 증가하였고 다시 감소하여 9월에 최저값(0.24)을 보였다(Fig. 10b). 생물기원규소/유기탄소 비율이 9월에 급격히 감소하여 최저값을 보인 것은 물고기에 의해 오염되었기 때문인 것으로 보인다. 정점 KAST2 중층에서 1월 동안 생물기원규소/유기탄소 비율은 0.54-0.75의 범위를 보였고 같은 기간 정점 KAST1 중층에서의 비율(0.58-0.79)과 유사하였다(Fig. 10c). 정점 KAST2 저층에서 1월과 2월 동안 생물기원규소/유기탄소 비율은 0.58-1.4의 범위를 보였고, 정점 KAST1 저층과 마찬가지로 1월 동안에

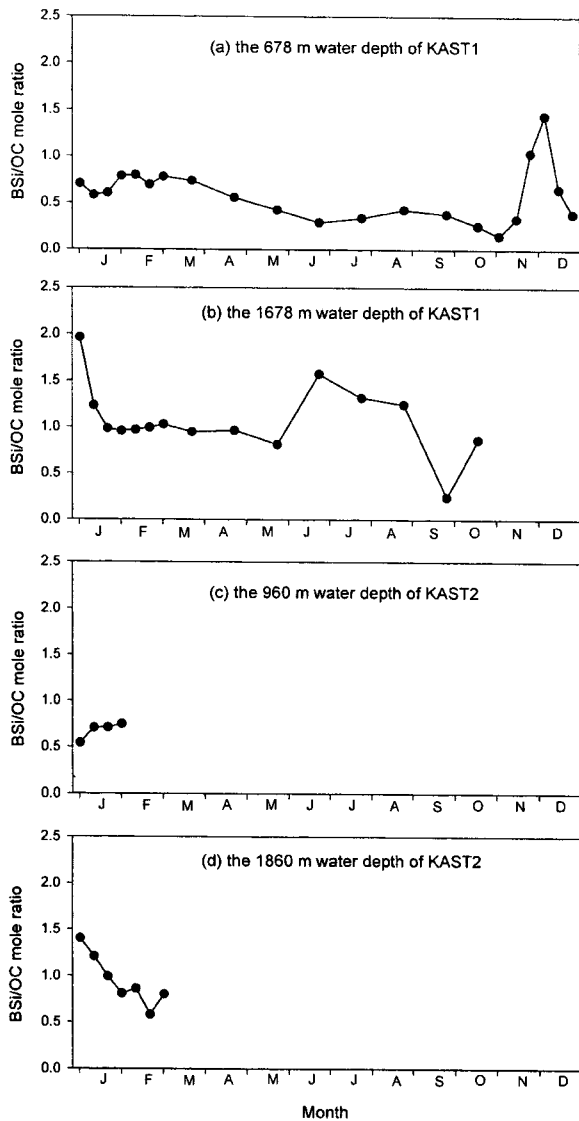


Fig. 10. Biogenic silica/organic carbon mole ratios of the settling particulate matter at (a) the 678 m water depth of KAST1, (b) the 1678 m water depth of the KAST1, (c) the 960 m water depth of KAST2, and (d) the 1860 m water depth of the KAST2.

급격히 감소하였다(Fig. 10d).

4. 토 의

동브랜스필드 해협(KAST1) 중층에서 입자 플럭스

동브랜스필드 해협 중층에서 유기탄소 플럭스는 뚜렷한 계절변화를 보이며 남극에서 식물플랑크톤 생산력의 계절 변화와 유사하다. 남극에서 식물플랑크톤 생산력은 일반적으로 일조량이 많고 유빙수의 유입으로 인해 표층혼합

깊이(mixed layer depth)가 얕아지는 여름철에 높고 일조량이 적고 표층혼합깊이가 깊어지는 겨울철에 낮다(Smith *et al.* 1996). 본 연구지역에서 유기탄소 플럭스는 여름철인 1월과 2월에 상대적으로 높았고 겨울철인 6-8월에 낮았다. 따라서 이곳에서 유기탄소 플럭스는 식물플랑크톤 생산력의 일반적인 계절변화 양상을 반영하는 것으로 보인다. 유기탄소 함량이 10월과 12월에 매우 높게 나타났으며(Fig. 5a) 생물기원규소 함량도 11월과 12월에 급격히 증가하였는데(Fig. 6a), 이것은 이 시기에 식물플랑크톤 번성이 일어났었다는 것을 시사해준다. 서브랜스필드 해협과 로스해에서도 11월과 12월에 식물플랑크톤 번성이 일어났다고 보고하였다(Holm-Hansen and Mitchell 1991; Smith *et al.* 2000). 하지만 10월부터 12월에 관측된 유기탄소 플럭스는 겨울철에 비해 증가하였지만 1월과 2월에 비해서는 상당히 낮은 값을 보였다. 만약 봄철에 식물플랑크톤 번성이 일어났다면 이 시기에 유기탄소 플럭스가 급격히 증가하여 오히려 1월과 2월보다 높거나 비슷한 값을 보여야 할 것이다.

이렇게 10-12월 사이에 식물플랑크톤 번성이 일어난 것으로 보이는 데도 유기탄소 플럭스가 1-3월보다 매우 낮은 것은 다음 두 가지 가능성으로 설명될 수 있다. 첫 번째 가능성은 봄철에는 식물플랑크톤 번성에 양호한 환경 조건이 지속적으로 유지되기 때문에 대부분의 식물플랑크톤이 오랫동안 수층에 머물고 있어 식물플랑크톤 생산력이 바로 유기탄소 플럭스로 이어지지 않는다는 것이다. 남극 로스해에서 식물플랑크톤의 평균 사망율(0.14 d^{-1})이 봄철에 관측된 단기간의 식물플랑크톤 성장율(0.6 d^{-1})에 비해서 작았고 따라서 봄철 식물플랑크톤 생산력이 유기탄소 플럭스로 이어지지 않고 생태계 내에 축적된다고 보고하였다(Caron *et al.* 2000; Smith *et al.* 2000). 또 다른 가능성은 동물플랑크톤이 연구해역에 10-12월 동안은 많이 출현하지 않았기 때문에 식물플랑크톤 번성이 일어났음에도 불구하고 유기탄소 플럭스에 중요한 역할을 하는 동물플랑크톤 분립(fecal pellet)이 충분히 만들어지지 않아 10월부터 12월 사이에 유기탄소 플럭스가 낮게 관측되었다는 것이다. Bodungen *et al.*(1987)은 브랜스필드 해협에서 대부분의 유기탄소 플럭스가 동물플랑크톤 분립을 통해 이루어진다고 보고하였다. 브랜스필드 해협에서 1986년 11월과 12월에는 크릴 생물량이 많지 않았지만 1987년 2월과 3월에는 상당히 많은 크릴 생물량이 보고되었다(Brinton 1991). 현 단계에서 위의 두 가능성 중에서 어느 것이 옳은지를 밝힐 수 없지만 두 가능성 모두 비슷하게 작용했을 것이라 생각된다.

동브랜스필드 해협 수심 678 m에서 2000년 1년 동안 총질량 플럭스는 $65.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이다(Table 1). 연간 유기탄소 플럭스는 $6.77 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 총질량 플럭스의

Table 1. Annual fluxes of total mass and major constituents of the settling particulate matter in the Bransfield Strait. Figures in the bracket indicate percentage contribution of each flux to the total mass flux.

Location	Total mass flux (g m ⁻² yr ⁻¹)	Organic carbon flux (g m ⁻² yr ⁻¹)	Biogenic silica flux (g m ⁻² yr ⁻¹)	CaCO ₃ flux (g m ⁻² yr ⁻¹)	Lithogenic flux (g m ⁻² yr ⁻¹)
KAST 1 678 m	65.6	6.77 (10.3)	23.5 (35.8)	0.49 (0.7)	20.7 (31.6)
KAST 1 1678 m	370	13.1 (3.5)	64.8 (17.5)	1.54 (0.4)	281 (75.9)
KAST 2 960 m	32.7	2.15 (6.6)	7.30 (22.3)	0.23 (0.7)	19.2 (58.7)
KAST 2 1860 m	77.3	3.79 (4.9)	16.6 (21.5)	0.55 (0.7)	53.1 (68.7)

10.3%를 차지한다(Table 1). 정점 KAST1 수심 1034 m에서 1999년 1년 동안 유기탄소 플럭스는 5.2 g m⁻² yr⁻¹이었으므로(Kim et al. 2001) 1999년에 비해 2000년에 유기탄소 플럭스가 약간 증가하였다. 하지만 일반적으로 유기탄소 플럭스는 수심이 증가함에 따라 감소하기 때문에 1999년에 계류한 퇴적물 트랩의 수심이 2000년에 계류한 트랩에 비해 350 m 가량 깊은 것을 고려하면 이 두 해 유기탄소 플럭스 차이는 크지 않다. Palanques et al.(2002)이 1995년부터 1년동안 서브랜스필드해협 수심 500 m에서 측정된 연간 유기탄소 플럭스는 0.35 g m⁻² yr⁻¹으로 본 연구에서 측정된 값에 비해 매우 작았다. 생물기원규소 플럭스는 23.5 g m⁻² yr⁻¹으로, 총질량 플럭스의 35.8%를 차지하고 연간 유기탄소 플럭스에 비해 3배 이상 크다(Table 1). 따라서 이 해역에서 유기탄소의 주요 공급원은 규조류와 같은 규조질 플랑크톤(silicious plankton)인 것으로 보인다. 이와 반대로 연간 탄산칼슘 플럭스는 0.49 g m⁻² yr⁻¹으로, 단지 총질량 플럭스의 0.7%를 차지한다(Table 1). 따라서 coccolithophore와 유공충과 같은 탄산질 플랑크톤(calcareous plankton)에 의한 유기탄소 공급은 매우 적다. 연간 육상기원 쇄설물 플럭스는 20.7 g m⁻² yr⁻¹으로, 총질량 플럭스의 31.6%를 차지한다(Table 1).

동브랜스필드 해협(KAST1) 저층에서 입자 플럭스

동브랜스필드 해협 저층에서 총질량 플럭스는 중층과는 상당히 다른 양상을 보인다(Fig. 4). 저층에서 총질량 플럭스는 10-12월을 제외하고 중층보다 상당히 높게 관측되었다. 특히 겨울철인 6-8월에는 저층에서의 플럭스가 중층보다 100배 이상 높았다. 유기탄소, 규소, 탄산칼슘과 같은 생물기원 원소들은 해수 중에서 침강하는 과정에서 많은 부분이 분해되거나 용해되기 때문에 일반적으로 총질량 플럭스는 수심이 증가함에 따라 감소하는 양상을 보인다(Ittekkot et al. 1996). 따라서 중층보다 저층에서 총질량 플럭스가 높다는 것은 수평적으로 퇴적물유입이 있음을 지시해 준다(Langone et al. 2000; Palanques et al. 2002). 동브랜스필드 해협에 계류한 퇴적물 트랩은 분지의 가파른 남쪽사면에 위치하고 있어 분지사면 위 얇은 곳으로부터 퇴적물이 유입될 가능성이 높다. 특히 이곳은

유속자료에서 본 바와 같이 조류의 영향을 많이 받기 때문에 주변 육지로부터 유입된 쇄설물이나 해수 표층에서 생성된 생기원 원소들이 강한 조류에 의해 얇은 곳에 퇴적되지 않고 분지 속으로 유입되어 퇴적될 가능성이 매우 높다. Palanques et al.(2002)도 서브랜스필드 해협에서 많은 양의 퇴적물이 조류에 의해 얇은 곳에 퇴적되지 않고 분지 속으로 유입되어 퇴적된다고 보고하였다. 특히 겨울철인 6-8월에 중층에 비해 저층에서 총질량 플럭스가 100배 이상 큰 것은 이 시기에 저층과 중층에서 유속이 강해서 얇은 곳에 퇴적된 퇴적물이 재부유되어 분지 속으로 유입되어 퇴적되었기 때문인 것으로 보인다. 이 시기에 트랩에 포집된 퇴적물의 유기탄소/질소 비율이 다른 시기에 비해 높은 것은 퇴적된 유기물이 새롭게 표층에서 생성된 것이 아니고 생성된 지 오래되어 이미 상당히 분해된 것임을 지시해준다. 따라서 이 시기에는 대부분의 유기물이 해수 표층에서 생성되어 분지로 침강하여 퇴적된 것이 아니고 분지 주위 얇은 곳에 퇴적되어 이미 상당부분 분해되어 퇴화된 유기물이 강한 조류에 의해 재부유되어 분지 속으로 유입된 것이다. 그리고 이 시기에 유기탄소와 생물기원규소 함량이 다른 시기에 비해 낮은 것도 분지주위 얇은 곳에 퇴적된 퇴적물이 재부유되어 분지 속으로 유입되어 퇴적된 것을 지시해준다. 이 퇴적물 트랩에서 가장 특이한 사실은 10-12월에 총질량 플럭스가 0.1 mg m⁻² d⁻¹ 이하로 다른 시기에 비해 퇴적물 유입이 거의 일어나지 않았다는 것이다. 이 시기에 유속은 다른 시기에 비해 느리긴 하지만 큰 차이를 보이지 않았고 해류방향도 다른 시기와 다르지 않았다(Fig. 3). 퇴적물 트랩 입구가 막혔는지와 기계적 문제가 있는지를 확인해 보았는데 아무런 이상을 발견할 수 없었다. 따라서 현재로는 이 시기에 퇴적물 퇴적이 거의 일어나지 않는 이유를 밝힐 수가 없다.

동브랜스필드 해협 수심 1678 m에서 2000년 1년 동안 총질량 플럭스는 370 g m⁻² yr⁻¹으로 수심 678 m에서의 총질량 플럭스보다 5배 이상 높다(Table 1). 따라서 이곳으로 유입된 퇴적물의 82%가 주위 얇은 곳으로부터 수평적으로 유입된 것이고 단지 18%만이 표층 해수로부터 수직적으로 유입된 것이다. 서브랜스필드 해협에서 해저

면으로부터 30 m 위(수심 970 m)에 계류한 퇴적물 트랩에서 관측된 연간 총질량 플럭스는 $1326 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 (Palanques *et al.* 2002), 우리가 관측한 값에 비해 4배 가량 높다. 연간 유기탄소 플럭스는 $13.1 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 총질량 플럭스의 3.5%를 차지하며 수심 678 m에서 관측된 값보다 2배 가량 높다(Table 1). 연간 생물기원규소 플럭스는 $64.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 총질량 플럭스의 17.5%를 차지하고 연간 유기탄소 플럭스에 비해 5배 가량 크다. 이처럼 저층에서 유기탄소 플럭스에 비해 생물기원규소 플럭스가 매우 큰 것은 유기탄소 분해속도가 생물기원규소 용해속도보다 빠르기 때문이다. 연간 탄산칼슘 플럭스는 $1.54 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 단지 총질량 플럭스의 0.4%를 차지한다. 연간 육상기원 쇄설물 플럭스는 $281 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 총질량 플럭스의 75.9%를 차지한다. 따라서 이 곳에서는 육상기원 쇄설물이 총질량 플럭스의 3/4 이상을 차지하여 대부분의 퇴적물이 강한 조류에 의해 분지주위 얕은 곳으로부터 수평으로 유입되고 있음을 지시해 준다.

중앙브랜스필드 해협(KAST2) 중층에서의 입자 플럭스

중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스는 동브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스와는 전혀 다른 계절적 변화를 보인다(Fig. 4). 동브랜스필드 해협 중층에서는 1월부터 4월까지 비교적 높은 총질량 플럭스를 보였지만 이곳에서는 1월에만 높은 총질량 플럭스를 보였고 다른 계절에는 총질량 플럭스가 거의 관측이 되지 않았다. 이렇게 총질량 플럭스가 1달 정도의 짧은 기간에 집중되어 일어나는 현상은 중앙브랜스필드 해협에서 다른 연구자들에게 의해서도 관측되었다. Wefer *et al.*(1990)은 1984년부터 1986년까지 3년 동안 중앙브랜스필드 해협에서 퇴적물 트랩을 계류하였는데, 그들의 결과에 따르면 중층에서 총질량 플럭스는 12월에만 높은 값을 보였고 다른 계절에는 매우 낮은 값을 보였다. 따라서 중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스는 주로 1달 정도의 짧은 기간동안에 집중되어 일어나는 것으로 보인다.

그렇다면 왜 중앙브랜스필드 해협 중층에서는 총질량 플럭스가 1달 정도의 짧은 기간에만 집중적으로 일어나는가? 일반적으로 총질량 플럭스는 주로 표층해수에서의 일차생산력, 지형(morphology), 해수의 수리적 특성(hydrology) 등에 의해 영향을 받는다(Ittekkot *et al.* 1996; Palanques *et al.* 2002). 중앙브랜스필드 해협에서 측정된 일차생산력은 여름철인 12월, 1월, 2월에 약간의 차이는 있으나 총질량 플럭스에 커다란 영향을 줄 정도로 큰 차이는 없었다(Helbling *et al.* 1995; Basterretxea and Aristegui 1999; Kim *et al.* 2001). 그리고 중앙브랜스필드 해협에서 일차생산력은 동브랜스필드 해협에서의 일차생산력과도 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 중앙브랜스필드

드 해협 중층에서 총질량 플럭스의 계절 변화는 일차생산력의 계절적 차이에 의한 것으로는 보이지 않는다. 중앙브랜스필드에 계류한 퇴적물 트랩은 분지 내에 위치해 있고 수심은 1960 m이다. 동브랜스필드 해협에 계류한 퇴적물 트랩도 역시 분지 내에 위치해 있고 수심은 1778 m이다. 따라서 이 두 개의 퇴적물 트랩이 계류된 장소는 지형적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러므로 중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스가 1월에 집중적으로 일어나는 것은 지형에 의한 영향으로는 보이지 않는다. 브랜스필드 해협의 수리적 특성은 저온, 고염의 웨텔해 수괴와 고온, 저염의 베링사우전해(Bellingshausen Sea) 수괴의 상호작용에 의해 매우 복잡하다(Holm-Hansen *et al.* 1997; Lopez *et al.* 1999). 그리고 브랜스필드 해류속도는 지역에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 중앙브랜스필드 해협에 퇴적물 트랩을 계류한 곳에서 표층 해류속도는 15 cm s^{-1} 이상으로 빠른 반면, 동브랜스필드 해협에 퇴적물 트랩을 계류한 곳에서 표층 해류속도는 5 cm s^{-1} 이하로 매우 느리다(Lopez *et al.* 1999). 따라서 중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스가 1월에만 집중적으로 일어나는 것은 1월 이외의 다른 계절에는 빠른 표층 해류에 의해 표층에 있는 육상 쇄설물이나 유기물들이 수직으로 침강하지 못하고 수평으로 이동되어 계류된 퇴적물 트랩에 포집되지 않기 때문인 것으로 생각된다. 결과적으로 중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스의 계절변화는 브랜스필드 해협의 수리적 특성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보인다.

중앙브랜스필드 해협 수심 960 m에서 2000년 1년 동안 총질량 플럭스는 $32.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 동브랜스필드 중층에서 총질량 플럭스의 절반 정도이다(Table 1). 이렇게 중앙브랜스필드 해협 중층에서 총질량 플럭스가 낮은 것은 앞에서 설명한 바와 같이 중앙브랜스필드 해협의 표층 해류속도가 상대적으로 빨라 표층에 있는 상당한 양의 육상 쇄설물과 유기물이 수직으로 침강하지 못하고 수평으로 이동하여 다른 곳에 퇴적되었기 때문인 것으로 보인다. 연간 유기탄소 플럭스는 $2.15 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 6.6%를 차지하고, 연간 생물기원규소 플럭스는 $7.30 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 22.3%를 차지한다. 연간 탄산칼슘 플럭스는 $0.23 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 0.7%를 차지하고, 연간 육상기원 쇄설물 플럭스는 $19.2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 58.7%를 차지한다. 중앙브랜스필드 해협 중층에서는 생물기원 원소들이 총질량 플럭스에 기여하는 정도가 동브랜스필드 해협 중층보다 상대적으로 낮은 반면, 육상기원 쇄설물이 총질량 플럭스에 기여하는 정도는 높다. 대부분의 총질량 플럭스가 일어나는 1월 자료를 보면, 유기탄소, 생물기원규소, 탄산칼슘 플럭스는 두 해협에서 큰 차이를 보이지 않지만

육상기원 쇠설물 플럭스는 동브랜스필드 해협 중층보다 중앙브랜스필드 해협 중층에서 3배 가량 높다. 따라서 중앙브랜스필드 해협에서 육상기원 쇠설물이 총질량 플럭스에 기여하는 정도가 동브랜스필드 해협보다 높은 이유는 중앙브랜스필드 해협에서 생물기원 원소 플럭스가 상대적으로 낮았기보다는 육상기원 쇠설물 플럭스가 높았기 때문이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 중앙브랜스필드 해협에 계류한 퇴적물 트랩이 동브랜스필드 해협에 계류한 것보다 육상에 더 가까운 것이 이런 사실을 지지해준다.

중앙브랜스필드 해협(KAST2) 저층에서의 입자 플럭스

중앙브랜스필드 해협 저층에서 총질량 플럭스는 1월과 2월에 높은 값을 보였고 다른 계절에는 거의 관측되지 않았다. 중층에서는 2월에 총질량 플럭스가 거의 관측되지 않았지만 저층에서는 같은 시기에 $1000 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 정도의 높은 총질량 플럭스를 보였다. 이것은 이 시기에 저층에서 관측된 총질량 플럭스는 표층으로부터 수직적으로 유입된 것이 아니고 대부분이 분지 위 얇은 곳으로부터 수평으로 유입된 것을 지시해준다. 1월에도 총질량 플럭스가 중층보다 저층에서 높게 관측되었는데, 이것도 역시 총질량 플럭스의 일부가 수평으로 저층에 유입된 것을 지시해준다.

중앙브랜스필드 해협 중층과 저층에서 관측된 해류 자료를 보면 전반적으로 해류속도가 10 cm s^{-1} 이하로 동브랜스필드 해협에서 관측된 것보다는 느리지만 시간에 따른 해류속도 변동이 매우 커서 이 해협도 동브랜스필드 해협과 마찬가지로 조류에 의한 영향이 큰 것으로 보인다. 따라서 1월과 2월에 총질량 플럭스가 높은 값을 보이는 이유는 분지 위 얇은 곳에 있는 육상기원 쇠설물과 생기원 원소들이 조류에 의해 분지 내로 유입되어 퇴적되었기 때문인 것으로 보인다. 하지만 중층과 저층에서 관측된 해류가 계절에 따라 큰 차이를 보이지 않기에 총질량 플럭스가 1월과 2월에만 높은 값을 보이고 다른 계절에는 거의 관측되지 않는 이유는 현재로는 설명할 수 없다.

중앙브랜스필드 해협 수심 1960 m에서 2000년 1년 동안 총질량 플럭스는 $77.3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로, 이 해협 중층에서의 연간 총질량 플럭스보다 두배 이상 크다(Table 1). 하지만 이것은 동브랜스필드 해협 저층에서의 연간 총질량 플럭스의 1/5 정도이다. 연간 유기탄소 플럭스는 $3.79 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 4.9%를 차지하고, 연간 생물기원규소 플럭스는 $16.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 21.5%를 차지한다. 연간 탄산칼슘 플럭스는 $0.55 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 0.7%를 차지하고, 연간 육상기원 쇠설물 플럭스는 $53.1 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 총질량 플럭스의 68.7%를 차지한다.

5. 결 론

2000년 1년 동안 브랜스필드 해협에서 관측된 입자 플럭스는 시·공간적으로 매우 큰 변화양상을 보였는데 이들을 종합해보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 동브랜스필드 해협 수심 678 m에서 유기탄소 플럭스는 여름철에 높고 겨울철에 낮아 뚜렷한 계절변화를 보이는데, 이런 계절변화는 표층에서의 일차생산력에 의해 크게 영향을 받은 것으로 보인다. 이곳에서 연간 총질량 플럭스는 $65.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고 이 중에 유기탄소가 10.3%, 생물기원규소가 35.8%, 탄산칼슘이 0.7%, 육상기원 쇠설물이 31.6%를 차지한다.

2) 동브랜스필드 해협 수심 1678 m에서 총질량 플럭스는 시료가 채집된 4개의 퇴적물 트랩 중 가장 높게 관측되었고, 특히 겨울철인 6-8월에 매우 높은 값을 보였다. 이곳에서 이렇게 높은 총질량 플럭스를 보이는 것은 분지 위 얇은 곳에 있는 생기원 원소들과 육상기원 쇠설물이 강한 조류에 의해 분지 내로 운반되어 퇴적되었기 때문이다. 이곳에서 연간 총질량 플럭스는 $370 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고 이 중에 유기탄소가 3.5%, 생물기원규소가 17.5%, 탄산칼슘이 0.4%, 육상기원 쇠설물이 75.9%으로 육상기원 쇠설물이 총질량 플럭스의 3/4 이상 차지한다.

3) 중앙브랜스필드 해협 수심 960 m에서 총질량 플럭스는 1월에만 높은 값을 보였고 다른 계절에는 거의 관측되지 않았다. 이렇게 총질량 플럭스가 1월에만 집중적으로 일어나는 것은 1월 이외의 다른 계절에는 빠른 표층 해류에 의해 표층에 있는 육상 쇠설물이나 유기물들이 수직으로 침강하지 못해 계류된 퇴적물 트랩에 포집되지 않기 때문인 것으로 보인다. 이곳에서 연간 총질량 플럭스는 $32.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 가장 낮고 이 중에 유기탄소가 6.6%, 생물기원규소가 22.3%, 탄산칼슘이 0.7%, 육상기원 쇠설물이 58.7%를 차지한다.

4) 중앙브랜스필드 해협 수심 1860 m에서 총질량 플럭스는 1월과 2월에 높은 값을 보였고 다른 계절에는 거의 관측되지 않았다. 1월과 2월에 총질량 플럭스가 높은 것은 분지 위 얇은 곳에 있는 생기원 원소들과 육상기원 쇠설물이 조류에 의해 분지 내로 운반되어 퇴적되었기 때문이다. 하지만 다른 계절에 총질량 플럭스가 거의 관측되지 않는 이유는 현재로는 설명할 수 없다. 이곳에서 연간 총질량 플럭스는 $77.3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고 이 중에 유기탄소가 4.9%, 생물기원규소가 21.5%, 탄산칼슘이 0.7%, 육상기원 쇠설물이 68.7%를 차지한다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 기관고유사업인 “남극 해양

생물자원 및 생태계 연구(PP 001B4)”의 일환으로 수행되었다. 남극의 추운 바다에서 퇴적물 트랩을 회수하는데 많은 도움을 주신 신양기술의 함석현 선생님, 한국해양연구원의 강성호, 신형철, 심정희, 강재신 박사님, 한양대학교의 강돈혁 박사님께 심심한 감사를 드립니다. 본 논문이 개선될 수 있도록 많은 조언을 해주신 심사위원, 부산대학교 이동섭 교수님과 한국해양연구원 안인영, 김석현 박사님께도 감사드립니다.

참고문헌

- Bakker, D.C.E., H.J.W. de Baar, and U.V. Bathmann. 1997. Changes of carbon dioxide in surface waters during spring in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 44, 91-127.
- Basterretxea, G. and J. Aristegui. 1999. Phytoplankton biomass and production during late austral spring (1991) and summer (1993) in the Bransfield Strait. *Polar Biol.*, 21, 11-22.
- Bodungen, B.V., G. Fisher, E.M. Nothing, and G. Wefer. 1987. Sedimentation of Krill faeces during spring development of phytoplankton in Bransfield Strait, Antarctica. p. 243-257. In: *Particle Flux in the Ocean*, eds. by E.T. Degens, E. Izdar, and S. Honjo. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 62, Geol.-Palaont. Institut Universitat Hamburg.
- Brinton, E. 1991. Distribution and population structures of immature and adult *Euphausia superba* in the western Bransfield Strait region during the 1986-1987 summer. *Deep-Sea Res.*, 38, 1169-1193.
- Caron, D.A., M.R. Dennett, D.J. Lonsdale, D.M. Moran, and L. Shalapyonok. 2000. Microzooplankton herbivory in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II*, 47, 3249-3272.
- Collier R., J. Dymond, S. Honjo, S. Manganini, R. Francois, and R. Dunbar. 2000. The vertical flux of biogenic and lithogenic material in the Ross Sea: moored sediment trap observation 1996-1998. *Deep-Sea Res. II*, 47, 3491-3520.
- DeMaster, D.J. 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 1715-1732.
- DeMaster, D., O. Ragueneau, and C.A. Nittrouer. 1996. Preservation efficiencies and accumulation rates for biogenic silica and organic C, N, and P in high-latitude sediments: The Ross Sea. *J. Geophys. Res.*, 101, 18501-18518.
- Dunbar, R.B., A.R. Leventer, and D.A. Mucciarone. 1998. Water column sediment fluxes in the Ross Sea, Antarctica: Atmospheric and sea ice forcing. *J. Geophys. Res.*, 103, 30741-30759.
- Fisher, G., D. Futterer, R. Gersonde, S. Honjo, D.R. Osterman, and G. Wefer. 1988. Seasonal variability of particle flux in the Weddell Sea and its relation to ice cover. *Nature*, 335, 426-428.
- Fisher, G., V. Rattmeyer, and G. Wefer. 2000. Organic carbon fluxes in the Atlantic and the Southern Ocean: relationship to primary production compiled from satellite radiometer data. *Deep-Sea Res. II*, 47, 1961-1997.
- Helbling, E.W., V.E. Villafane, and O. Holm-Hansen. 1995. Variability of phytoplankton distribution and primary production around Elephant Island, Antarctica, during 1990-1993. *Polar Biol.*, 15, 233-246.
- Holm-Hansen, O. and B.G. Mitchell. 1991. Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Res.*, 38, 961-980.
- Holm-Hansen, O., C.D. Hewes, V.E. Villafane, E.W. Helbling, N. Silva, and T. Amos. 1997. Distribution of phytoplankton and nutrients in relation to different water masses in the area around Elephant Island, Antarctica. *Polar Biol.*, 18, 145-153.
- Honjo, S., R. Francois, S. Manganini, J. Dymond, and R. Collier. 2000. Particle fluxes to the interior of the Southern Ocean in the Western Pacific sector along 170°W. *Deep-Sea Res. II*, 47, 3521-3548.
- Ittekkot, V., P. Schafer, S. Honjo, and P. Depetris. 1996. *Particle Flux in the Ocean*. John Wiley & Sons, Chichester. 372 p.
- Karl, D.M., B.D. Tilbrook, and G. Tien. 1991. Seasonal coupling of organic matter production and particle flux in the western Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Res.*, 38, 1097-1126.
- Keir, R.S. 1988. On the late Pleistocene ocean geochemistry and circulation. *Paleoceanography*, 3, 413-445.
- Kim, D., D.-Y. Kim, J. Shim, S.-H. Kang, and Y.-C. Kang. 2001. Particle flux in the eastern Bransfield Strait in 1999, Antarctica. *Ocean and Polar Res.*, 23, 395-400.
- Kim, D., S.-H. Kang, D.-Y. Kim, Y.-H. Lee, and Y.-C. Kang. 2001. Distribution of nutrients and phytoplankton biomass in the area around the South Shetland Islands, Antarctica. *Ocean and Polar Res.*, 23, 77-95 (In Korean).
- Langone, L., M. Frignani, M. Ravaoli, and C. Bianchi. 2000. Particle fluxes and biogeochemical processes in an area influenced by seasonal retreat of the ice margin (northwestern Ross Sea, Antarctica). *J. Mar. Syst.*, 27, 221-234.

- Lopez O., M.A. Garcia, D. Gomis, P. Rojas, J. Sospedra, and A. Sanchez-Arcilla. 1999. Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep-Sea Res. I*, 46, 1755-1778.
- Palanques, A., E. Isla, P. Puig, J.A. Snaches-Cabeza, and P. Masque. 2002. Annual evolution of downward particle fluxes in the Western Bransfield Strait (Antarctica) during the FRUELA project. *Deep-Sea Res. II*, 49, 903-920.
- Rabouille, C., J.-F. Galliard, P. Treguer, and M.-A. Vincendeau. 1997. Biogenic silica recycling in surficial sediments across the Polar Front of the Southern Ocean (Indian Sector). *Deep-Sea Res. II*, 44, 1151-1176.
- Reynolds, J.M. 1981. Distribution of mean annual air temperature in the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Bulletin*, 43, 49-58.
- Robertson, J.E. and A.J. Watson. 1995. A summer-time sink for atmospheric carbon dioxide in the Southern Ocean between 88°W and 80°E. *Deep-Sea Res. II*, 42, 1081-1091.
- Smith, R.C., H.M. Dierssen, and M. Vernet. 1996. Phytoplankton biomass and productivity in the western Antarctic Peninsula region. p. 333-356. In: *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula*, eds. by R.M. Ross, E.H. Hofmann, and L.B. Quetin. Antarctic Research Series V. 70, The American Geophysical Union.
- Smith, W.O., L. Marra, M.R. Hiscock, and R.T. Barber. 2000. The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res. II*, 47, 3119-3140.
- Wefer, G., G. Fisher, D. Fuetterer, R. Gersonde, S. Honjo, and D. Ostermann. 1990. Particle sedimentation and productivity in Antarctica waters of the Atlantic sector. p. 363-379. In: *Geological History of the Polar Ocean: Arctic Versus Antarctic*, eds. by U. Bleil and J. Thiede. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Received Mar. 7, 2002

Accepted Jun. 24, 2002