

Article

남극 브랜스필드 해협에서 침강입자의 금속원소 특성

김동선*¹ · 김동엽¹ · 김영준² · 강영철¹ · 심정희¹

¹한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²한국해양연구원 기기운영팀
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Behaviors of Metals in the Settling Particles in the Bransfield Strait, Antarctica

Dongseon Kim*¹, Dong-Yup Kim¹, Young-June Kim², Young-Chul Kang¹, and JeongHee Shim¹

¹*Polar Science Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*
²*Instrumentation Management Section, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Sediment trap samples were collected to find out characteristic behaviors of metals in the settling particles by using time-series sediment traps at 678 m and 1678 m water depths in the Bransfield Strait from December 27th, 1999 to December 26th, 2000. Total mass fluxes at the intermediate water depth (678 m water depth) were high in the austral summer and low in the austral winter, whereas at the deep water depth (1678 m water depth) they showed high values in both the summer and winter. Total mass fluxes were generally higher in the deep water depth than in the intermediate water depth, which indicates that a substantial amount of sediments are laterally transported by strong currents into the deep basin from the shallow water depths. Aluminium contents also showed large seasonal variations with high values in the winter and low values in the summer. On the contrary, organic carbon contents were high in the summer and low in the winter. Al contents were negatively correlated with organic carbon contents, which may be ascribed that detrital particles are diluted by organic matter produced by phytoplankton in the surface waters. Metals measured in this study exhibited three characteristic behaviors; 1) a positive correlation with Al - Ti, Fe, Mn, V, Co, and Ba, 2) a negative correlation with Al - Cd and Zn, 3) no relationship with Al - Sr, Cu, Cr, Ni. Terrestrial materials may act as a major source for metals that are positively correlated with Al, and organic matter may be a major source for metals that are negatively correlated with Al. Enrichment factor (EF) of Fe, Mn, Ba, V, Co, Sr, Cr, and Ni ranged from 0.5 to 1.5, whereas EF of Zn, Cu, and Cd showed much higher values than 1.

Key words : 남극(Antarctica), 브랜스필드 해협(Bransfield Strait), 침강입자(Settling particle), 금속원소(metal), 입자 플럭스(particle flux).

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

1. 서 론

해양에 존재하는 금속원소들은 주로 강이나 대기를 통해 육상으로부터 유입되며, 해양으로 유입된 금속원소들은 각각 원소들의 생지화학적 특성에 따라 용존 또는 입자 형태로 해수 중에 존재한다. 해양에서 생기원 입자의 생성, 침강, 분해는 금속원소들의 분포를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다(Fowler and Knauer 1986; Clegg and Whitfield 1990; Bruland et al. 1994). 생기원 입자가 침강하면서 미생물에 의해 분해되거나 탈착 또는 용해되면, 이런 입자와 결합되어 있던 금속원소들이 해수 중으로 방출된다. 또한 반대로 생기원 입자가 침강하면서 해수 중에 녹아 있는 금속원소들을 흡착시켜 해저면 퇴적물로 운반하기도 한다. 따라서 해양에서 용존 형태의 금속원소와 입자 형태의 금속원소 사이 상호관계에 대한 연구가 많이 수행되고 있다(Sherrell and Boyle 1992; Bruland et al. 1994).

최근 전세계적으로 퇴적물 트랩(sediment trap)을 이용한 물질 플럭스에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Honjo et al. 2000; Conte et al. 2001; Berelson 2002; Palanques et al. 2002). 하지만 대부분 이런 연구들은 해양에서의 탄소순환에 초점을 맞추어 생기원 원소들의 플럭스를 측정하는데 집중되어 있으며 금속원소 플럭스와 행동양식을 규명하는 연구는 미미한 실정이다(Jickells et al. 1984; Ramaswamy et al. 1991; Kuss and Kremling 1999). 특히 남빙양(Southern Ocean)에서는 퇴적물 트랩을 이용한 금속원소 플럭스에 대한 연구가 거의 수행되지

않았다(심 등 2002). 남빙양에서는 입자 플럭스의 계절변화와 입자의 유입경로가 다른 해역에 비해 매우 특징적으로 나타난다. 겨울철에는 대부분의 남빙양이 해빙으로 덮혀 있어 대륙으로부터 입자들의 유입이 제한받고 식물플랑크톤 생산성도 거의 일어나지 않아 입자 플럭스가 관측되지 않는다(Wefer et al. 1990; Honjo et al. 2000; Palanques et al. 2002). 하지만 봄이 되면 해빙주위 수괴가 안정되면서 식물플랑크톤 대번성(bloom)이 일어나 상당한 양의 입자 플럭스가 일어난다. 또한 남극대륙은 얼음으로 덮혀 있어 직접적으로 대륙으로부터 육상기원 입자들의 유입은 일어나지 않는 반면, 남극대륙 주변 섬에서는 여름철에 빙하나 눈이 녹으면서 생성되는 용설수류(melt-water stream)를 통해 육상기원 입자들이 해양으로 유입되는 특징이 있다(Cripps and Clarke 1998; Isla et al. 2001).

남빙양은 표층해수에 영양염이 풍부히 존재함에도 불구하고 식물플랑크톤 생산력이 낮은 "High nutrient-low chlorophyll(HNLC)" 해역으로 알려져 있다. 최근 연구에 따르면 남빙양에서 식물플랑크톤 생산력이 낮은 주된 요인은 표층해수의 낮은 철농도때문이라고 한다(de Baar et al. 1995; Ishii et al. 1998; Boyd 2002). 여름철에 용설수류를 통해 해양으로 유입되는 육상기원 쇄설물은 남극 해양생태계를 유지하는데 필수적으로 필요한 철을 공급하는 주요 공급원이다. 따라서 남빙양에서 해양으로 유입된 금속원소들이 해수 중에서 어떤 형태로 존재하고 어떤 메커니즘을 통해 해저면으로 제거되는지를 파악하는 것은 남극 해양생태계 변화를 이해하고 예측하는데 필수적이다.

본 연구에서는 2000년 1년 동안 동브렌스필드 해협 수

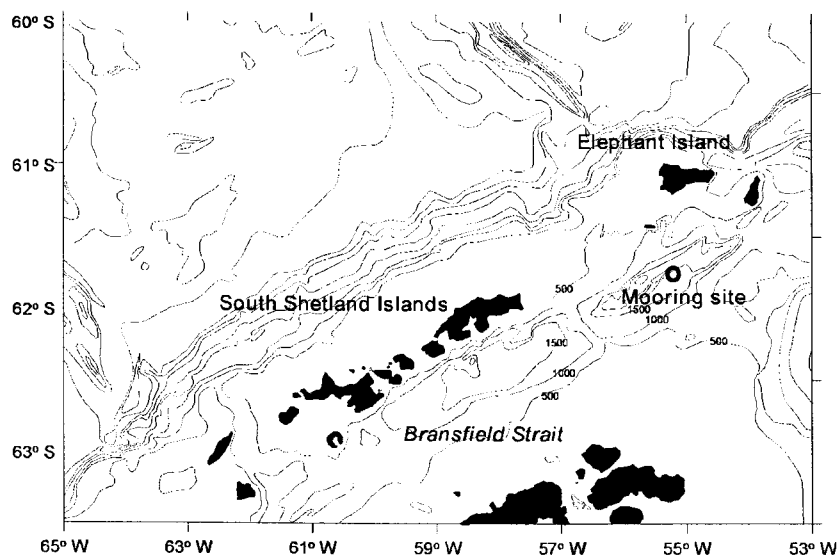


Fig. 1. Location of the sediment trap mooring sites in the eastern Bransfield Strait. The mooring site is marked by a open circle.

심 678 m와 1678 m에 계류한 퇴적물 트랩 자료를 이용하여 입자 플럭스의 계절변화를 밝히고 침강 입자에 포함되어 있는 금속원소들의 행동양식을 파악하여 금속원소 플럭스에 직접적으로 영향을 미치는 요인들을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

시계열 퇴적물 트랩을 1999년 12월 27일부터 2000년 12월 26일까지 동브랜스필드 해협에 계류하였다(Fig. 1). 퇴적물 트랩을 계류한 곳의 위치는 남위 61°46.11', 서경 54°56.52', 수심은 1778 m이었다. 두 개의 퇴적물 트랩을 수심 678 m와 1678 m에 계류하였고 각각의 퇴적물 트랩 아래 20 m 지점에 유속계를 계류하였다. 본 연구에 이용한 시계열 퇴적물 트랩은 21개의 시료병을 갖는 McLane PARFLUX Mark 7G이었다. 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. 화학 분석을 위하여 4등분한 시료 중 하나를 증류수로 3번 이상 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 무기탄소 함량을 빼어 계산하였다. 금속원소의 함량은 기초 과학지원연구원에 있는 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES, Simadzu ICPS-1000III)를 이용하여 측정하였고 분석 정밀도는 5%였다. ICP-AES로 분석하기 전에 퇴적물 시료는 질산, 불산, 과염소산을 이용하여 완전히 용해시켰다(Park and Yoon, 1994).

3. 결과 및 토의

입자 플럭스의 계절변화

총질량 플럭스는 수심에 따라 매우 큰 차이를 보였다

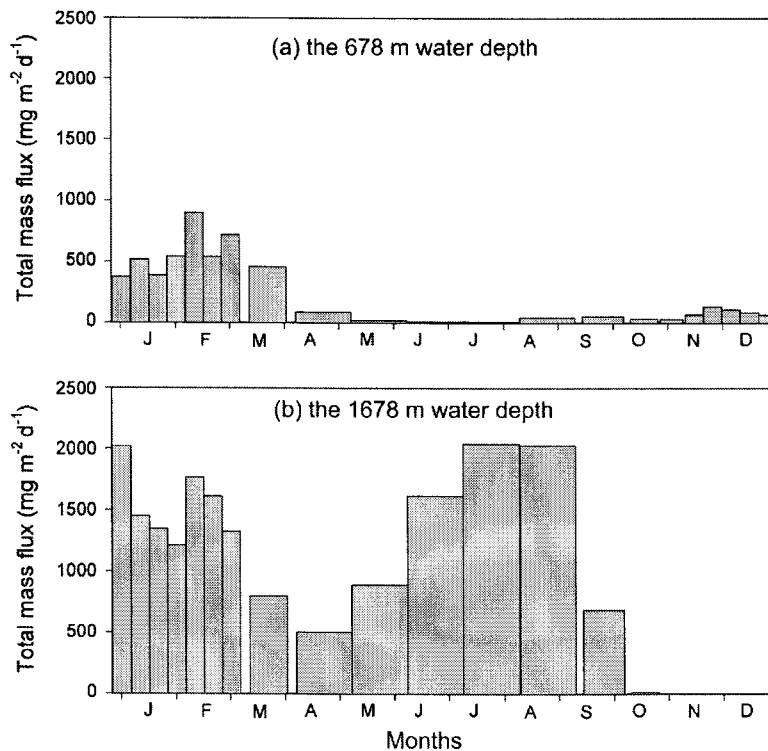


Fig. 2. Seasonal variation of total mass fluxes at (a) the 678 m water depth and (b) the 1678 m water depth of the sediment trap mooring site.

(Fig. 2). 또한 중층(수심 678 m)에서 총질량 플럭스는 계절적으로도 큰 변화를 보였다. 여름철인 1-3월에는 $500 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 내외의 높은 플럭스를 보이는 반면, 겨울철인 6월과 7월에는 $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하의 낮은 플럭스를 보였다. 봄과 가을에서는 총질량 플럭스가 $16\text{-}129 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 비교적 낮게 관측되었다. 총질량 플럭스의 최고 값은 $902 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 2월(2/5-2/15)에 관측되었고 최저 값은 $6.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 6월(6/7-7/7)에 관측되었다. 저층(수심 1678 m)에서 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 값을 보였다(Fig. 2). 하지만 10-12월에는 $0.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 플럭스가 관측되었다. 저층에서 총질량 플럭스의 최고 값은 $2041 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 7월(7/7-8/7)에 관측되었고 최저 값은 $0.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이하로 11월과 12월에 관측되었다. 총질량 플럭스는 10-12월을 제외하고는 중층보다 저층에서 매우 높게 관측되었다. 이처럼 중층보다 저층에서 총질량 플럭스가 높게 관측된 것은 상당한 양의 침강 입자들이 수평적으로 저층으로 유입되고 있음

을 지시해준다(Langone *et al.* 2000; Palnques *et al.* 2002). 본 연구 해역에 계류한 퇴적물 트랩은 동브랜스필드 분지의 가파른 남쪽사면에 위치하고 있어 분지사면 위 얇은 곳으로부터 퇴적물이 분지 내로 유입될 가능성이 크다. 특히 이 해역은 조류의 영향을 많이 받기 때문에 주변 육지로부터 유입된 쇄설물이나 해수 표층에서 생성된 생기원 원소들이 강한 조류에 의해 얇은 곳에 퇴적되지 않고 분지 속으로 유입될 가능성이 높다(김 등, 2002). 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 유속이 강해서 얇은 곳에 퇴적된 퇴적물이 재부유되어 분지 속으로 유입되어 퇴적되었기 때문인 것으로 보인다.

중층에서 5월, 6월, 7월, 10월, 12월에 얻은 퇴적물트랩 시료는 그 양이 충분하지 않아 알루미늄을 비롯한 금속 함량 자료를 얻지 못했다(Fig. 3a). 중층에서 알루미늄 함량은 계절에 따라 큰 변화를 보여 여름철인 1-3월에 1.9-

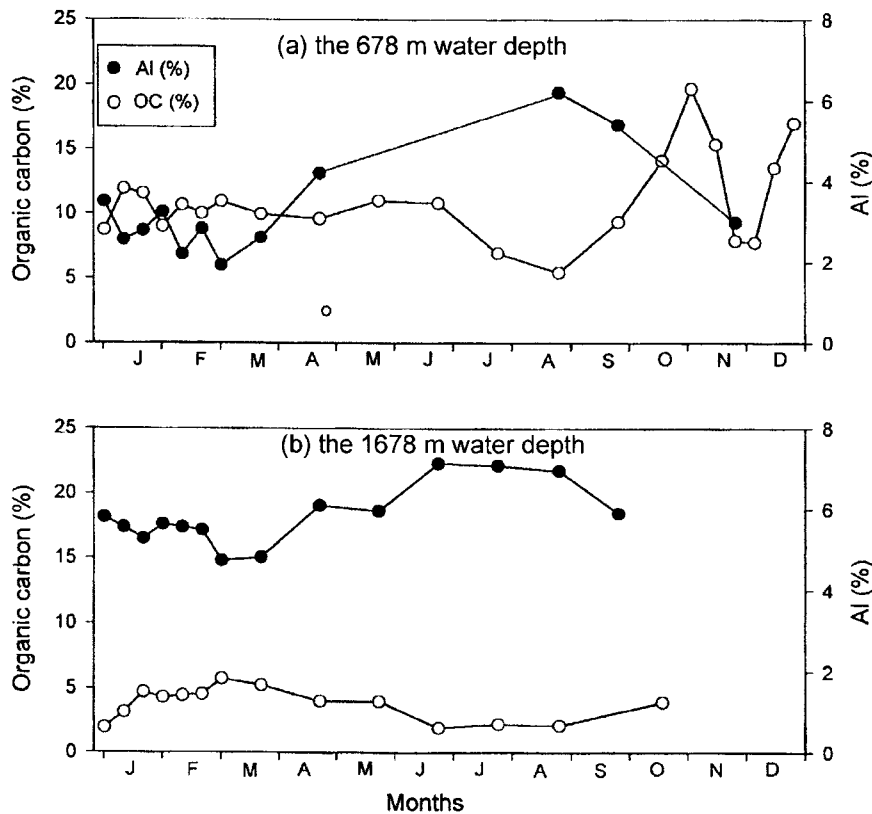


Fig. 3. Seasonal variation of aluminium and organic carbon contents at (a) the 678 m water depth and (b) the 1678 m water depth of the sediment trap mooring site. Closed circles indicate aluminium contents and open circles organic carbon contents.

3.5%로 비교적 낮았고 겨울철인 8월과 9월에 5.4-6.2%로 높았다. 저층에서도 10-12월에는 퇴적물트랩 시료 양이 충분하지 않아 금속 자료를 얻지 못했다(Fig. 3b). 저층에서 알루미늄 함량은 4.7-7.1%로 대체로 중층보다 높은 값을 보였다. 저층에서도 중층과 마찬가지로 여름철인 1-3월에 알루미늄 함량이 낮았고 겨울철인 6-8월에 높았다. 중층에서 포집된 침강입자의 유기탄소 함량은 5.5-19.7%으로, 10월에 최고 값, 8월에 최저 값을 보였다(Fig. 3a). 유기탄소 함량은 1월부터 6월까지 10% 내외로 큰 변화를 보이지 않다가 7월부터 점차 감소하여 8월에 최저 값을 보였고 9월부터 다시 증가하여 10월에 최고 값을 보였다. 저층에서 유기탄소 함량은 1.9-5.7%로 중층에 비해 매우 낮게 나타났으며, 2월과 3월에 비교적 높은 값을 보였다(Fig. 3b). 알루미늄 함량은 중층보다 저층에서 높았던 반면 유기탄소 함량은 그 반대로 중층에서 높게 관측되었다.

알루미늄은 주로 육상으로부터 쇄설성 입자를 통해 해양으로 유입된다. 특히 알루미늄은 여러 종류의 암석에 비교적 높은 농도로 존재하고 비율도 일정하기 때문에 육상기원 쇄설물의 지시자(proxy)로 많이 이용되고 있다. 따라서 퇴적물트랩 시료에서 측정된 알루미늄 함량은 퇴적물트랩에 채집된 퇴적물의 육상기원 쇄설물 함량을 지시해 준다. Honjo *et al.*(2000)은 육상기원 쇄설물의 알루미늄 함량이 일정하다고 가정하고 알루미늄 함량에 12.15를 곱하여 육상기원 쇄설물 함량을 계산하였다. 본 연구에서도 Honjo *et al.*(2000)과 같이 알루미늄 함량에 12.15를 곱하여 계산하면, 육상기원 쇄설물 함량이 상층에서 27-76%이었고 저층에서는 58-87%이었다. 퇴적물트랩에 포집된 퇴적물은 육상기원 쇄설물 이외 나머지는 유기탄소, 생물

기원규소, 탄산칼슘과 같은 생물기원 원소로 이루어졌다. 알루미늄 함량은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 유기탄소 함량과 좋은 음의 상관관계($R^2=0.83$)를 보인다. 이처럼 알루미늄 함량과 유기탄소 함량이 음의 상관관계를 보이는 것은 육상으로부터 주로 용설수나 대기분진을 통해 유입된 쇄설물이 표층해양에서 식물플랑크톤에 의해 생산된 유기물에 의해 희석(dilution effect)되었기 때문이다. 즉, 알루미늄과 유기탄소가 서로 다른 과정을 통해 해양으로 유입되기 때문에 두 원소들이 서로 상반된 관계를 보이는 것이다. 일반적으로 육지에서 멀리 떨어져 쇄설성 입자의 유입이 적은 해역에서는 심층으로 유입되는 알루미늄 플럭스와 유기탄소 플럭스가 강한 양의 상관관계를 보인다(Deuser *et al.*, 1983; Jickells *et al.*, 1984, 1990). 이것은 알루미늄을 포함하고 있는 쇄설성 입자가 해수 중에서 침강하는 유기물과 결합하여 심층으로 유입되기 때문이다. 따라서 알루미늄과 유기탄소가 같은 과정을 통해 해양 심층으로 침강하기 때문에 두 원소들의 플럭스가 양의 상관관계를 보이는 것이다. 하지만 육지와 인접해 있거나 대기를 통해 쇄설성 입자의 유입이 많은 해역에서는 육상기원 쇄설물 유입의 증가가 식물플랑크톤에 의해 생산된 유기물을 희석시키기 때문에 알루미늄 플럭스와 유기탄소 플럭스가 음의 상관관계를 보인다(Kremling and Streu, 1993). 본 연구해역도 남극반도와 남채틀랜드 군도에 의해 둘러싸여 있어 주변 육상으로부터 많은 육상기원 쇄설물이 유입되기 때문에(육상기원 쇄설물 함량이 중층에서 27-76%, 저층에서 58-87%), 알루미늄 함량과 유기탄소 함량이 음의 상관관계를 보인 것으로 보인다.

금속원소들의 행동양식

일반적으로 해양에 존재하는 금속원소들은 육상으로부터 강, 대기분진, 또는 용설수를 통해 해양으로 유입된다. 해양으로 유입된 금속원소들은 해수 중에서 각각의 특성에 따라 일부는 용해되어 다양한 생지화학적 순환을 통해 해저면에 퇴적되고 다른 일부는 아무런 생지화학적 반응을 보이지 않고 바로 해저면에 퇴적된다. 해양에서 금속원소들의 생지화학적 순환은 지역에 따라 일부 다른 양상을 보인다(Chester, 2000). 따라서 남극 브랜스필드 해협에서 금속원소들의 행동양식을 알아보기 위해, 이곳에서 얻은 퇴적물 트랩시료에서 측정된 각 금속원소들과 육상기원 쇄설물의 지시자로 널리 이용되고 있는 알루미늄과의 상관관계를 구해보았다(Figs. 5-7).

양의 상관관계를 보이는 금속원소

Fig. 5에 보이는 것과 같이 Ti, Fe, Mn, V, Co, Ba은 Al과 매우 좋은 양의 상관관계를 보인다. 이들 금속원소 중에서 Ti와 V은 Al과 마찬가지로 주로 광물 격자(lattice)

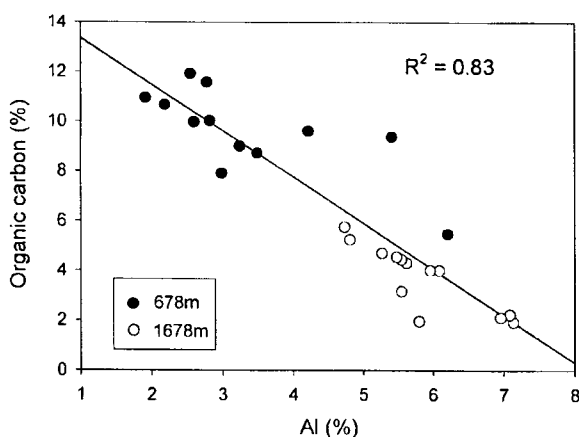


Fig. 4. A plot of aluminium contents versus organic carbon contents of settling particles in the eastern Bransfield Strait. Closed circles indicates sediment trap samples collected at 678 m water depth and open circles at 1678 m water depth.

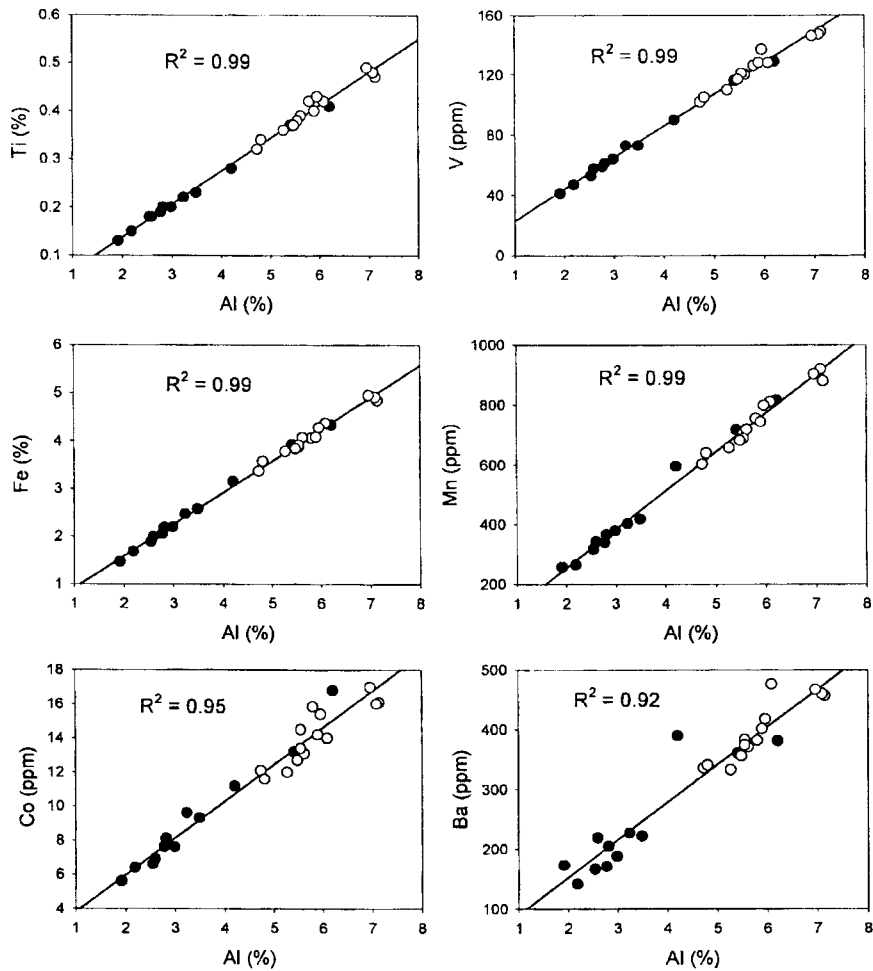


Fig. 5. Plots of Aluminium contents versus titanium, iron, manganese, vanadium, cobalt, and barium contents of settling particles in the eastern Bransfield Strait. Closed circles indicates sediment trap samples collected at 678 m water depth and open circles at 1678 m water depth.

내에 많이 존재하여 생지화학적 반응을 잘 보이지 않는 원소로 알려져 있기 때문에(Brewer *et al.*, 1980), 이 원소들이 Al과 좋은 양의 상관관계를 보인다. Fe, Mn, Co 등은 “scavenged elements”로 분류되어 이들 원소와 Al 비율이 수심에 따라 증가하는 것으로 알려져 있는데(Masuzawa *et al.*, 1989), 이것은 이들 원소들이 해수 중에서 산화물을 형성하여 부유물질에 흡착되어 수심에 따라 농도가 증가하기 때문이다. 하지만 본 연구에서는 이들 원소들이 Al과 좋은 양의 상관관계를 보이고 Al과의 비율도 수심에 따라 뚜렷한 차이를 보이지 않는다(Fig. 5). 이처럼 브랜스필드 해협에서 Fe, Mn, Co 등이 일반적으로 보이는 행동양식과 다른 양상을 보이는 것은 다음과 같은 두 가지 이유 때문인 것으로 생각된다. 첫째 이유는 퇴적물 트랩을 계류한 위치가 남극반도와 남셰틀랜드 군도와 인접해 있어 육상기원 쇄설물 유입이 많아(육상기원 쇄설물

함량이 중층에서 27-76%, 저층에서 58-87%), Fe, Mn, Co 등이 해수 중에서 산화물을 형성하여 부유물질에 흡착해도 그 양이 육상기원 쇄설물에 포함된 것에 비하면 극히 적기 때문이다. 둘째 이유는 브랜스필드 해역에서 부유물질들이 해수 중에 체류하고 있는 시간이 다른 해역에 비해서 짧아서 Fe, Mn, Co 등이 해수 중에서 산화물을 형성하여 부유물질에 흡착하는 정도가 상대적으로 작기 때문이다. 브랜스필드 해역에서 포집된 침강입자들은 주로 동물플랑크톤 분립(fecal pellet)으로 이루어져 있는데(Bodungen *et al.*, 1987), 이런 동물플랑크톤 분립들은 입자 크기가 다른 부유물질보다 크기 때문에 침강속도가 매우 빠르다. 연구해역에서 발견되는 동물플랑크톤 분립 중에서 크릴 분립이 가장 많은 양을 차지하는데, 크릴 분립은 해수 중에서 침강속도가 500 m/day로 매우 빨라서 표층에서 생성된 크릴 분립은 3-4일이면 해저면에 퇴적된

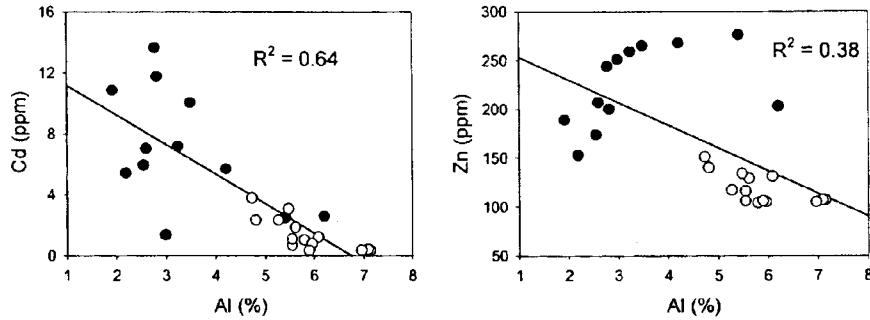


Fig. 6. Plots of aluminium contents versus cadmium and zinc contents of settling particles in the eastern Bransfield Strait. Closed circles indicates sediment trap samples collected at 678 m water depth and open circles at 1678 m water depth.

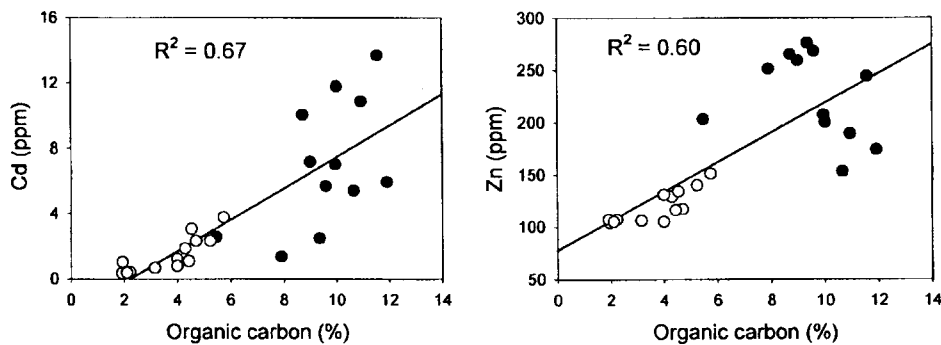


Fig. 7. Plots of organic carbon contents versus cadmium and zinc contents of settling particles in the eastern Bransfield Strait. Closed circles indicates sediment trap samples collected at 678 m water depth and open circles at 1678 m water depth.

다. 따라서 브랜스필드 해협에서는 부유물질들이 주로 동물플랑크톤 분립으로 구성되어 있어 다른 해역에 비해 해수 중에 체류하고 있는 시간이 매우 짧다.

알루미늄과 양의 상관관계를 보이는 금속원소들 중에서 가장 흥미로운 것은 Ba이다. Ba은 “biogenous group”에 속하여 유기물과 같은 생기원 입자와 잘 결합하는 것으로 알려져 있다(Brewer *et al.*, 1980; Masuzawa *et al.*, 1989). 또한 Ba은 해수 중에서 유기물이 많은 부유물질에서 바라이트(barite, BaSO₄)로 침전되기 때문에 퇴적물 내의 Ba은 표층해양에서의 일차생산성 변화를 지시해주는 지시자로 많이 이용되고 있다(Dymond *et al.*, 1992; Francois *et al.*, 1995; Paytan *et al.*, 1996). 하지만 본 연구에서는 Ba이 Al과 좋은 양의 상관관계를 보이고 있다(Fig. 5). 이것은 Ba이 유기물에 의한 영향보다는 주로 육상기원 쇄설물에 의해 영향을 받는다는 것을 지시해준다. 이처럼 브랜스필드 해협에서 Ba이 유기물에 의한 영향을 거의 받지 않는 것은 다른 연구해역에 비해 육상기원 쇄설물 유입이 상대적으로 많기 때문인 것으로 보인다. 다른 연구해역은 주로

Table 1. Metal concentrations in the marine plankton and the upper continental crust.

Element	Marine plankton (ppm) ¹	Upper continental crust(ppm) ²
Al	159-202	80400
Fe	306-862	35000
Mn	7.7-9.3	600
V	<3	107
Co	<1	17
Ba	55-60	550
Zn	131-257	71
Cd	4.6-22	0.098
Cu	14-27	25
Ni	12-17	44
Cr	<1	83
Sr	862	350

¹sources : Chester and Aston, (1976), Collier and Edmond (1983).

²source : Taylor and McLennan, (1985).

수심이 3000 m 이상인 원양(open ocean)으로 육상기원 쇄설물 함량이 10% 미만인 것에 비해 본 연구해역에서는 육상기원 쇄설물 함량이 27-87%나 된다. 그리고 동·식물 플랑크톤에 존재하는 Ba의 평균농도는 55-60 ppm이고 육상기원 쇄설물의 기원이 되는 대륙지각 상부층에 존재하는 Ba의 평균농도는 550 ppm이다(Table 1). 따라서 육상기원 쇄설물의 Ba 농도가 유기물의 Ba 농도보다 10배 가량 많기 때문에 본 연구해역과 같이 육상기원 쇄설물 함량이 많은 곳에서는 Ba가 유기물의 영향을 많이 받지 않는다. 또한 Fig. 5에 보는 바와 같이 Ba/Al 비율이 수심에 따라 큰 차이를 보이지 않는데, 이것은 해수 중에 존재하는 부유물질에서 바라이트가 직접 침전되어 형성되고 있지 않음을 지시해준다. 앞에서 이미 설명한 바와 같이 브랜스필드 해협에서 부유물질이 해수 중에 체류하는 시간이 짧기 때문에 바라이트가 부유물질에서 침전하기에 충분한 시간이 없어 형성되지 않는 것으로 보인다. 따라서 브랜스필드 해협에서는 Ba가 표층해수의 일차생산성 변화를 지시해주는 지시자로 이용하기에 부적합한 것으로 보인다.

음의 상관관계를 보이는 금속원소

Cd과 Zn은 알루미늄과 음의 상관관계를 보인다(Fig. 6).

Cd은 비교적 좋은 음의 상관관계를 보이지만 Zn은 양호한 상관관계를 보이지는 않는다. Zn의 경우, 수심 678 m에서 측정된 것만을 고려해 보면 오히려 양의 상관관계를 보인다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 Al은 유기탄소와 좋은 음의 상관관계를 보인다. Cd과 Zn이 유기탄소와 어떤 상관관계를 보이는 지를 알아보기 위해서 Fig. 7에 이들을 도시하였다. Cd과 Zn은 대체로 유기탄소와 양의 상관관계를 보이는데, 이것은 Cd과 Zn이 육상기원 쇄설물에 의해 영향보다는 주로 유기물에 의한 영향을 받는다는 것을 지시해준다. 육상기원 쇄설물의 기원이 되는 대륙지각 상부층에 존재하는 Cd과 Zn의 평균농도는 각각 0.098 ppm과 71 ppm인 반면, 해양에 존재하는 동·식물 플랑크톤에서 측정된 Cd과 Zn 농도는 각각 4.6-22 ppm과 131-257 ppm으로, 대륙지각 상층부의 평균농도보다 Cd의 경우 50-250배, Zn의 경우 2-4배 가량 높다(Table 1). 따라서 브랜스필드 해협에서 침강입자의 Cd과 Zn 농도는 주로 유기물의 영향을 많이 받는 것으로 보인다.

상관관계를 보이지 않는 금속원소

Sr, Cu, Cr, Ni 등은 Al과 특별한 상관관계를 보이지 않는다(Fig. 8). 해수 중에서 이들 원소농도는 표층에서 비교적 낮고 수심에 따라 증가하기 때문에 Bruland(1983)는

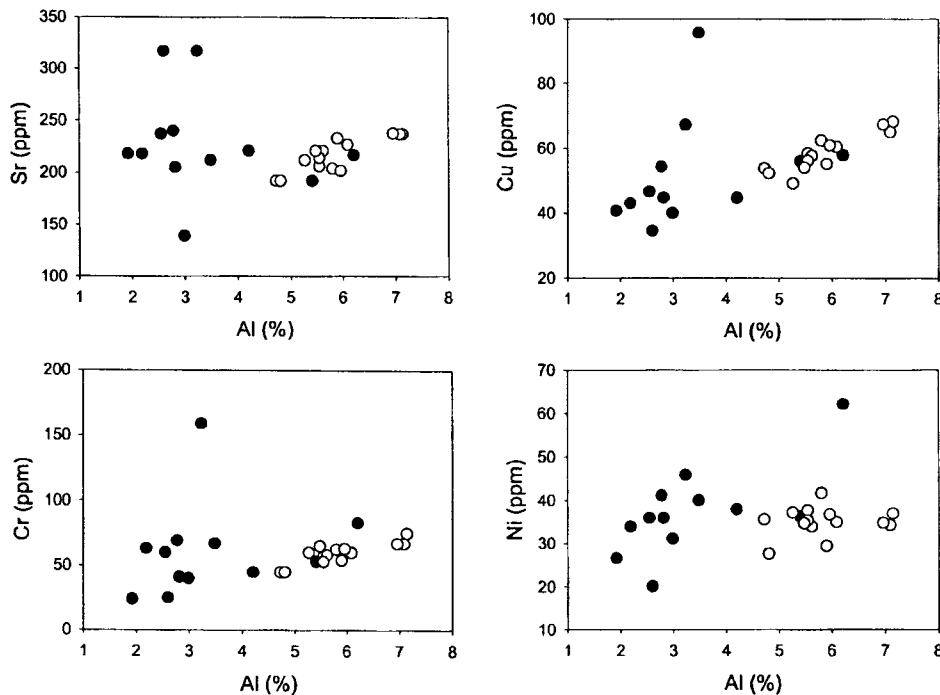


Fig. 8. Plots of aluminium contents versus strontium, copper, chromium, and nickel contents of settling particles in the eastern Bransfield Strait. Closed circles indicates sediment trap samples collected at 678 m water depth and open circles at 1678 m water depth.

이 원소들을 “Nutrient-type”으로 분류하였다. Nutrient-type 원소들은 유기물, 탄산칼슘, 생기원규소와 같은 생기원물질에 잘 결합하여 표층해수에서 생물체에 의해 섭취되기 때문에 농도가 낮다. 그리고 생물체가 죽어 해수 중에서 박테리아에 의해 분해되면 이 원소들은 다시 해수 중으로 유입되기 때문에 수심에 따라 농도가 증가한다. 이 원소들 모두가 Nutrient-type으로 분류되어 해수 중에서의 행동양식은 동일하지만, 해양에서 유기물의 기원이 되는 플랑크톤과 육상기원 쇄설물의 기원이 되는 대륙지각 상부층에 존재하는 이들 원소농도는 원소에 따라 큰 차이를 보인다(Table 1). Sr의 경우, 플랑크톤에 존재하는 농도가 대륙상부층에 존재하는 것보다 2배 이상 높은 반면, Cr의 경우 대륙상부층에는 83 ppm이 존재하지만 플랑크톤에는 거의 존재하지 않는다. Cu는 플랑크톤과 대륙상부층에 존재하는 농도가 거의 유사하지만 Ni은 플랑크톤보다 대륙상부층에 3배 가량 많이 존재한다. 이렇게 원소에 따라 플랑크톤과 대륙상부층에 존재하는 농도가 큰 차이를 보임에도 불구하고, Fig. 8에서 보는 바와 같이 이들 원소 모두가 유기물 함량이 비교적 많고 육상기원 쇄설물 함량이 적은 중층과 유기물 함량이 비교적 적고 육상기원 쇄설물 함량이 많은 저층에서 큰 차이를 보이지 않는다. Cu의 경우, 플랑크톤과 대륙상부층에 존재하는 농도가 거의 유사하기 때문에 유기물과 육상기원 쇄설물 함량 비율이 다른 중층과 저층에서 알루미늄 농도에 따라 차이를 보이지 않는 것은 당연하다. Sr은 일반적으로 플랑크톤 내의 유기물에 존재하기보다는 플랑크톤의 껍질인 탄산칼슘에 많이 존재한다. 남극해에서는 탄산질 플랑크톤보다는 규산질 플랑크톤이 많이 존재하기 때문에 퇴적물 트랩의 시료에서 측정된 탄산칼슘 함량이 2% 이하로 매우 적고 중층과 저층, 두 곳에서 큰 함량 차이를 보이지 않는다(김 등, 2002). 따라서 중층에서 채집된 시료는 저층 시료보다 유기물 함량이 높지만 탄산칼슘 함량은 큰 차이를 보이지 않기 때문에 Sr 농도가 중층과 저층에서 차이를 보이지 않는 것으로 보인다. Ni과 Cr은 플랑크톤에서보다 대륙상부층에서 상당히 높은 농도가 존재함에도 불구하고 알루미늄 농도에 따라 중층과 저층에서 큰 차이를 보이지 않

는다. 이것은 Ni과 Cr 농도가 유기물이나 육상기원 쇄설물 이외에 다른 요인에 의해 많은 영향을 받고 있음을 나타내준다. 결국 Cu와 Sr의 경우는 Al과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 이유를 설명 가능하지만, Ni과 Cr은 아직 그 이유를 확실히 밝힐 수 없어 “Metal speciation”과 같은 보다 구체적인 자료가 필요한 것으로 보인다.

Enrichment factor

브랜스필드 해협에서 퇴적물 트랩에 의해 채집된 침강입자의 금속원소 농도가 육상기원 쇄설물의 기원이 되는 대륙상부층의 금속원소 농도와 얼마나 큰 차이가 있는지 알아보기 위하여 각 금속원소들의 Enrichment Factor(EF)를 구하였다. 다양한 암석에 비교적 높은 농도로 일정하게 존재하는 Ti을 기준물질로 삼아 다음과 같은 식을 이용하여 EF를 구하였다;

$$EF = (M/Ti)_{\text{sample}} / (M/Ti)_{\text{crust}}$$

여기서, $(M/Ti)_{\text{sample}}$ 은 퇴적물 트랩 시료에서 금속원소와 Ti의 비율을 의미하고 $(M/Ti)_{\text{crust}}$ 은 대륙상부층의 금속원소와 Ti의 비율을 의미한다. Table 2에 중층과 심층에서 채집된 퇴적물의 평균 금속원소 농도, 대륙상부층의 평균 금속원소 농도, 그리고 중층과 저층에서 구한 각 원소들의 EF 값을 도시하였다. EF 값이 1보다 작으면 대륙상부층 금속원소 농도보다 낮은 것을 의미하고 1보다 크면 높은 것을 의미한다. Ba과 Co는 중층과 저층 모두에서 1보다 낮은 EF 값을 보이고 Sr과 Ni은 중층에서는 1보다 높은 반면 저층에서는 낮은 값을 보인다. 이들 외의 다른 모든 금속원소들은 1보다 높은 EF 값을 보여, 브랜스필드 해협에서 침강하는 입자들의 이들 금속원소 농도가 대륙상부층 금속원소 농도보다 높은 것으로 나타났다.

매우 흥미로운 사실은 알루미늄과 양의 상관관계를 보이는 원소들, 즉 Fe, Mn, Ba, V, Co 등은 중층과 저층에서 EF 값이 큰 차이를 보이지 않는 반면, 알루미늄과 음의 상관관계를 보이거나 아무런 상관관계를 보이지 않은 원소들, 즉 Sr, Cr, Zn, Ni, Cu, Cd 등은 저층보다 중층에서 높은 EF 값을 보인다. 이것은 Sr, Cr, Zn, Ni, Cu, Cd 등이

Table 2. Average concentrations and enrichment factor(EF) values for metal elements in the settling particles obtained at 678 m and 1678 m water depth.

	Fe (%)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	V (ppm)	Cr (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)
Concentration at 678 m	2.49	435	228	237	72	61	224	9	37	52	7.00
Concentration at 1678 m	4.14	750	217	397	125	59	118	14	35	59	1.40
Upper continental crust*	3.50	600	350	550	107	83	71	17	44	25	0.098
EF at 678 m	1.27	1.29	1.16	0.77	1.20	1.30	5.63	0.95	1.51	3.72	127
EF at 1678 m	1.21	1.28	0.64	0.74	1.20	0.73	1.71	0.85	0.82	2.40	15

*source : Taylor and McLennan (1985).

육상기원 쇄설물 이외에 유기물 또는 해수 중에서 침전 등과 같은 다른 요인에 의해서도 영향을 받았다는 것을 지시해준다. 하지만 Zn, Cu, Cd를 제외한 대부분 금속원소들의 EF 값들이 0.5-1.5의 범위를 보여, 육상기원 쇄설물의 기준 값이 되는 1과 큰 차이를 보이지 않는다. 이처럼 Fe, Mn, Sr, Ba, V, Cr, Co, Ni 등의 EF 값이 1과 큰 차이를 보이지 않는 것은 이들 금속원소들의 농도가 주로 육상기원 쇄설물에 의해 영향을 받았다는 것을 나타내준다. 따라서 Fe, Mn, Ba, V, Co의 농도는 육상기원 쇄설물에 의해서만 영향을 받는 반면, Sr, Cr, Ni의 농도는 유기물 또는 해수 중에서 침전 등과 같은 요인에 의해서도 영향을 받지만 육상기원 쇄설물에 의한 영향에 비하면 그다지 크지 않은 것으로 보인다.

Zn, Cu, Cd의 EF는 모두 1보다 매우 높은 값을 보이고 저층에서 보다 중층에서 높다. 특히 Cd의 경우, 중층에서 EF 값이 127로 다른 어느 금속원소보다도 높다. 이처럼 Zn, Cu, Cd의 EF 값들이 1보다 매우 큰 것은 이들 금속원소들이 육상기원 쇄설물보다 다른 요인, 즉 유기물 또는 해수 중에서 침전이나 흡착에 의해 크게 영향받고 있음을 지시해준다. 만약 이들 원소들이 해수 중에서 침전이나 흡착에 의해 크게 영향을 받았다면 이들 원소의 EF 값이 수심에 따라 증가할 것이다. 하지만 Table 2에서 보는 바와 같이 이들 원소의 EF 값이 저층에서 보다 중층에서 높게 측정되었다. 따라서 Zn, Cu, Cd 농도는 해수 중에서 침전이나 흡착에 의해서는 영향을 거의 받지 않은 것으로 보인다. Zn와 Cd는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 유기탄소와 양의 상관관계를 보인다. 이것은 Zn와 Cd 농도가 유기물에 의해 크게 영향을 받았다는 것을 지시해준다. 따라서 Zn와 Cd의 EF 값이 매우 큰 것은 유기물에 의한 영향인 것으로 보인다. 하지만 Cu는 유기탄소와 아무런 상관관계를 보이지 않아 유기물에 의한 영향이 그다지 크지 않아 것으로 보인다. 본 연구해역 주위에 위치한 남해틀랜드 군도에는 Cu를 다량 함유하는 황동광이 특징적으로 많이 분포한다고 알려져 있다(좌와 이, 1992). King조지 섬에 위치한 마리안 소만에서 퇴적물트랩에 의해 채집된 침강입자에서 측정된 Cu의 EF 값은 5.1로, 본 연구에서 측정된 값보다도 높았다(심 등, 2002). 심 등(2002)은 이렇게 Cu의 EF 값이 큰 것은 주변 대륙지각에 많이 존재하는 Cu가 용설수에 의해 해양으로 유입된 결과라고 해석하였다. 따라서 본 연구에서 Cu의 EF 값이 높은 것도 황동광을 다량 함유하는 주변 대륙주변으로부터 Cu가 용설수에 의해 해양으로 유입되었기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

- 1) 총질량 플럭스는 수심에 따라, 그리고 계절에 따라서

도 큰 변화를 보였다. 총질량 플럭스가 전반적으로 중층보다 저층에서 높은 값들을 보였는데, 이것은 분지 주위 앞은 곳으로부터 퇴적물이 분지 내로 수평적으로 유입되었기 때문인 것으로 보인다.

- 2) 알루미늄 함량도 계절에 따라 큰 변화를 보여 여름철에 비교적 낮았고 겨울철에 높았다. 유기탄소 함량은 알루미늄과 반대적인 계절변화를 보여 여름철에 높았고 겨울철에 낮았다. 알루미늄 함량은 유기탄소 함량과 좋은 음의 상관관계($R^2 = 0.83$)를 보이는데, 이것은 육상으로부터 주로 용설수나 대기분진을 통해 유입된 알루미늄이 표층해양에서 식물플랑크톤에 의해 생산된 유기물에 의해 희석되었기 때문이다.

- 3) Ti, Fe, Mn, V, Co, Ba는 알루미늄과 매우 좋은 양의 상관관계를 보이는데, 이것은 육상기원 쇄설물이 이들 원소의 주요 기원이기 때문인 것으로 보인다.

- 4) Cd와 Zn은 알루미늄과 음의 상관관계를 보이는데, 이것은 Cd와 Zn 농도가 주로 유기물의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 보인다.

- 5) Sr, Cu, Cr, Ni 등은 알루미늄과 특별한 상관관계를 보이지 않는다.

- 6) Fe, Mn, Ba, V, Co, Sr, Cr, Ni의 Enrichment Factor (EF)는 대체로 0.5-1.5의 범위 값들을 보여, 육상기원 쇄설물의 기준 값인 1과 큰 차이를 보이지 않는다.

- 7) Zn, Cu, Cd의 EF는 1보다 매우 높은 값들을 보이는데, 이것은 이들 원소 농도가 육상기원 쇄설물보다는 유기물 또는 황동광에 의한 영향을 보다 많이 받았다는 것을 지시해준다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 기본사업인 “시계열 퇴적물 트랩을 이용한 남극해 물질순환 연구 및 남극 미생물 활용기술 개발(PP03104)”의 일환으로 수행되었다. 남극의 추운 바다에서 퇴적물 트랩을 회수하는데 많은 도움을 주신 한국해양연구원의 신형철, 강성호, 강재신 박사님, 한양대학교의 강돈혁 박사님께 심심한 감사를 드립니다. 그리고 금속원소 분석을 맡아 해주신 한국기초과학지원연구원의 최만식 박사님께도 감사드립니다.

참고문헌

- 김동선, 김동엽, 김영준, 강영철. 2002. 남극 브랜스필드 해협에서 입자 플럭스 계절변화. *Ocean and Polar Research*, 24, 153-166.
- 심정희, 강영철, 한명우, 김동선, 정호성, 이상훈. 2002. 남극 King조지섬 마리안소만에서 침강 입자와 금속 플럭스의 계

- 질 변화. *Ocean and Polar Research*, 24, 123-134.
- 좌용주, 이종익. 1992. Geochemistry of the volcanic rocks from the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *한국지구과학회지*, 13, 200-211.
- Berelson, W.M. 2002. Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-Sea Res. II*, 49, 237-251.
- 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, ed. by Degens, E.T., E. Izdar, and S. Honjo. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 62, Geol.-Palaont. Institut Universitat, Hamburg.
- Boyd, P.W. 2002. The role of the iron in the biogeochemistry of the Southern Ocean and equatorial Pacific: a comparison of in situ iron enrichments. *Deep-Sea Res. II*, 49, 1803-1821.
- Brewer, P.G., Y. Nozaki, D.W. Spencer, and A.P. Fleer. 1980. Sediment trap experiments in the deep North Atlantic: isotope and chemical fluxes. *Jour. Mar. Res.*, 38, 703-728.
- Bruland, K.W. 1983. Trace elements in sea water. In: Chemical Oceanography vol. 8, ed. by Riley, J.P. and R. Chester. Academic Press, London, pp. 157-220.
- Bruland, K.W., K.J. Orians, and J.P. Cowen. 1994. Reactive trace metals in the stratified central North Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 3171-3182.
- Chester, R. 2000. Marine Geochemistry. Second Edition, Blackwell Sci. Ltd., Oxford, 506 pp.
- Chester, R. and S.R. Aston. 1976. The geochemistry of deep-sea sediments. p. 281-390. In: Chemical Oceanography vol. 6. ed. by Riley, J.P. and R. Chester. Academic Press, London.
- Clegg, S.L. and M. Whitfield. 1990. A generalized model for the scavenging of trace metals in the open ocean - 1. Particle cycling. *Deep-Sea Res.* 37, 809-832.
- Collier, R.W. and J.M. Edmond. 1983. Plankton compositions and trace element fluxes from the surface ocean. p. 789-809. In: Trace Metals in Sea Water. ed. by Wong, C.S., E. Bolye, K.W. Bruland, J.D. Burton, and E.D. Goldberg. Plenum, New York.
- Conte, M.H., N. Ralph, and E.H. Ross. 2001. Seasonal and interannual variability in deep ocean particle fluxes at the Oceanic Flux Program (OFP)/Bermuda Atlantic Time Series (BATS) site in the western Sargasso Sea near Bermuda. *Deep-Sea Res. II*, 48, 1471-1505.
- Cripps, G.C. and A. Clarke. 1998. Seasonal variation in the biochemical composition of particulate material collected by sediment traps at Signy Island, Antarctica. *Polar Biol.*, 20, 414-423.
- de Baar, H.J.W., J.T.M. Jong, D.C.E. Bakker, B.M. Loscher, C. Veth, U. Bathmann, and V. Smetacek. 1995. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide draw-down in the Southern Ocean. *Nature*, 373, 412-415.
- Deuser, W.G., P.G. Brewer, T.D. Jickells, and R.F. Commeau. 1983. Biological control of the removal of biogenic particles from the surface ocean. *Science*, 219, 388-391.
- Dymond, J., E. Suess, and M. Lyle. 1992. Barium in deep-sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography*, 7, 163-181.
- Fowler, S.W. and G.A. Knauer. 1986. Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Progress in Oceanography*, 16, 147-194.
- Francois, R., S. Honjo, S. Maganini, and G. Ravizza. 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction. *Global Biogeochem. Cycles*, 9, 289-303.
- Honjo, S., R. Francois, S. Maganini, 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.
- Ishii, M., H.Y. Inoue, H. Matsueda, and E. Tanoue. 1998. Close coupling between seasonal biological production and dynamics of dissolved inorganic carbon in the Indian Ocean sector and the western Pacific Ocean sector of the Antarctic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, 45, 1187-1209.
- Isla, E., A. Palanques, V. Alva, P. Puig, and J. Guillen. 2001. Fluxes and composition of settling particles during summer in an Antarctic shallow bay of Livingston Island, South Shetlands. *Polar Biol.*, 24, 670-676.
- Jickells, T.D., W.G. Deuser, and A.H. Knap. 1984. The sedimentation rates of trace elements in the Sargasso Sea measured by sediment trap. *Deep Sea Res.*, 31, 1169-1178.
- Jickells, T.D., W.G. Deuser, A. Fleer, and C. Hemleben. 1990. Variability of some elemental fluxes in the western tropical Atlantic Ocean. *Oceanologica Acta*, 13, 291-298.
- Kremling, K. and P. Streu. 1993. Saharan dust influenced trace element fluxes in deep North Atlantic subtropical waters. *Deep Sea Res.*, 40, 1155-1168.
- Kuss, J. and K. Kremling. 1999. Particulate trace element fluxes in the deep northeast Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, 46, 149-169.
- 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). *Jour. Mar. Syst.* 27, 221-234.
- Masuzawa, T., S. Noriki, T. Kurosaki, and S. Tsunogai. 1989. Compositional changes of settling particles with water depths in the Japan Sea. *Mar. Chem.*, 27, 61-78.
- 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.
- Park, B-K and H.I. Yoon. 1994. Trace elements in sediments of Admiralty Bay and Bransfield Strait, Antarctica. *Kor. Jour. Polar Res.*, 5, 13-37.
- Paytan, A., M. Kastner, and F.P. Chavez. 1996. Glacial to interglacial fluctuations in productivity in the equatorial Pacific as indicated by marine barite. *Science*, 274, 1355-1357.
- Ramaswamy, V., R.R. Nair, S. Manganini, B. Haake, and V. Ittekkot. 1991. Lithogenic fluxes to the deep Arabian Sea measured by sediment traps. *Deep-Sea Res.*, 38, 169-184.
- Sherrell, R.M. and E.A. Boyle. 1992. The trace metal composition of suspended particles in the oceanic water column near Bermuda. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 111, 155-174.
- Taylor, S.R. and S.M. McLennan. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell.
- 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*. ed. by U. Bleil and J. Thiede. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Received Feb. 12, 2003

Accepted Mar. 10, 2003