

Article

남극 킹조지섬 마리안소만에서 침강 입자와 금속 플럭스의 계절 변화

심정희*¹, 강영철¹, 한명우², 김동선¹, 정호성¹, 이상훈¹

¹한국해양연구원 극지연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²인하대학교 해양학과
(402-751) 인천시 남구 용현동 253

Seasonal Variations of Settling Particles and Metal Fluxes at a Nearshore Site of Marian Cove, King George Island, Antarctica

JeongHee Shim*¹, Young Chul Kang¹, Myung Woo Han², Dongseon Kim¹,
Hosung Chung¹, and SangHoon Lee¹

¹Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea
²Department of Oceanography, Inha University
Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

Abstract : Seasonal variations of settling particles and metal fluxes were monitored at a nearshore site of Marian Cove, King Gerge Island, Antarctica from 28th February 1998 to 22nd January 2000. Near-bottom sediment traps were deployed at 30 m water depth of the cove, and sampling bottles were recovered every month by SCUBA divers. Total particulate flux and metal concentrations were determined from the samples. Total particulate flux showed a distinct seasonality, high in austral summer and low in austral winter: the highest flux ($21.97 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) was found in February of 1999, and the lowest ($2.47 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$) in September of 1998, when sea surface was frozen completely. Lithogenic particle flux accounted for 90% of the total flux, and showed a significantly negative correlation with the thickness of snow accumulation around the study site. It was suggested that the most of the lithogenic particles trapped in the bottles was transported by melt water stream from the surrounding land. Fluxes of Al, Fe, Ti, Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Cr, Cd, and Pb showed similar seasonal variations with the total flux, and their averaged fluxes were 34000, 9000, 960, 180, 13.8, 17.6, 3.0, 2.1, 5.4, 0.02, and $1.5 \text{ nmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectively. Among the metals, Cu and Cd showed the most noticeable seasonal patterns. The Cd flux correlated positively with the fluxes of biogenic components while the Cu flux correlated with both the lithogenic and biogenic particle fluxes. The Cu flux peak in the late summer is likely related to a substantial amount of inflow of ice melt water laden with Cu-enriched lithogenic particles. On the other hands, the Cd flux peak in the early spring may be associated with the unusually early occurred phytoplankton bloom.

Key words : 입자 플럭스(particle flux), 금속(metal), 마리안소만(Marian Cove), 남극(Antarctica), 침강입자 포집기(sediment trap).

1. 서 론

해양에 존재하는 금속성분들은 대부분이 육상에서 이동

한 결과이다. 금속 성분을 포함한 육상의 쇄설성 입자는 물리·화학적 풍화작용으로 강이나 대기를 통해 해양으로 유입되며, 이후 각 성분들은 생지화학 특성에 따라 용존 또는 입자의 형태로 수층에 존재하게 된다. 남빙양의 경우에는 유입되는 입자의 이동 경로와 입자 플럭스의 계절변

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

화가 다른 기후지역에 비해 독특하게 나타난다. 계절적으로 형성되는 해빙(sea ice)에 의해 입자 유입이 방해받기도 하지만 봄이 되면서 해빙주변부를 따라 발생하는 식물 플랑크톤의 대증식으로 입자가 증가하는 등의 계절변화가 뚜렷하게 나타나는 특징을 가진다(Fischer *et al.* 1988; Wefer *et al.* 1988; Dunbar *et al.* 1998). 또한, 대륙에서 멀고, 주변 육상에 하천과 강이 발달하지 못하며 상당한 기간 눈으로 덮여 있어, 육상기원 입자들이 빙하나 용설수류(melt water stream)를 통해 이동하는 특징을 가진다(Pecherzewski 1980; Cripps and Clarke 1998; Isla *et al.* 2001). 더욱이, 남빙양은 대기 중 이산화탄소의 제거지역으로 주목받고 있는 지역이므로, 이곳에서 일어나는 입자의 이동과 플럭스에 관한 연구는 지구규모의 물질 순환을 이해하는데 중요한 부분을 차지한다.

지역적인 접근의 어려움에도 불구하고, 남극에서도 입자 플럭스에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Wefer *et al.* 1988; Karl *et al.* 1991; Collier *et al.* 2000; Langone *et al.* 2000; Palanques *et al.* 2002). 그러나 이들 연구는 대부분이 하계기간에 외해에서 실시된 것으로, 연안환경에서 장기간의 모니터링을 실시한 연구는 거의 없다(Cripps and Clarke 1998; Isla *et al.* 2001). 한편, 남빙양에서 가장 높은 생산성을 보이는 해역은 바로 연안역과 극전선역이다(Wefer and Fischer 1991). 결국, 남빙양에서 일어나는 물질순환과 그 규모를 파악하기 위해서는, 연안역에서의 입자거동에 대한 연구가 필수적으로 선행되어야 한다.

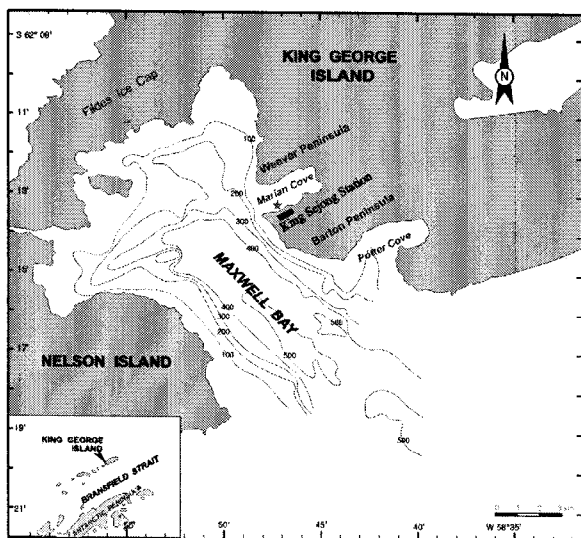


Fig. 1. Location of the study site : the Marian Cove, King George Island, Antarctica. The star symbol indicates the deployment site for the sediment trap and the benthic chamber during 1998-2000.

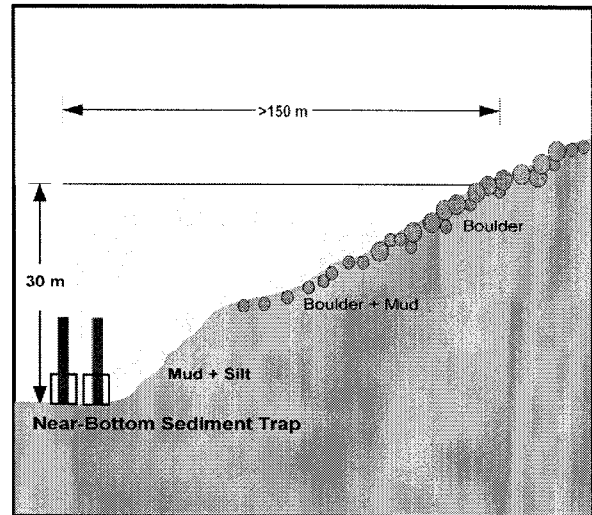


Fig. 2. Schematic diagram showing the deployment site for the sediment traps and the benthic chamber in the Marian Cove.

남극과 같은 청정지역의 경우도 인위적인 중금속오염이 발생하고 있으며, 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Flegal *et al.* 1993; Ahn *et al.* 1996; Hong *et al.* 1999; Wolff *et al.* 1999). 킹조지섬(King George Island)의 경우에도, 육상에 서식하는 지의류 중 인간활동이 많은 지역에서 서식하는 시료에서 납농도가 높게 나타났으며, 조간대에 서식하는 남극큰띠조개에서도 다른 지역에 못지 않은 중금속축적을 보인다는 보고가 있었다(Ahn *et al.* 1996; Hong *et al.* 1999). 따라서 본 연구에서는 남극 킹조지섬, 마리안소만(Marian Cove)의 조간대에서 침강입자 포집기를 계류하여(Figs. 1 and 2), 포집된 입자의 양과 그 금속성분 분석을 통해 남극 연안에서 일어나는 입자와 금속 플럭스에 영향을 끼치는 요인을 살펴보고자 한다.

2. 재료 및 방법

저층고정식 입자체 포집기(the near-bottom sediment trap)

마리안 소만 조간대로 공급되는 입자의 양과 금속성분들의 계절변화를 살펴보고자, 세종기지 부두 150 m 지점의 수심 30 m 해저면에 저층고정식 침강입자 포집기를 1998년 2월 28일부터 2000년 1월 22일까지 약 23개월 동안 설치하였다(Fig. 3, Table 1). 저층고정식 침강입자 포집기는 크게 3 부분으로 구성되어 있다: 1) 지름 7 cm, 길이 100 cm의 PVC 관으로 구성된 본체, 2) PE 재질의 시료병(2 liter), 3) 저층에 고정되어 본체를 지지하는 stainless steel 재질의 삼각대. 잠수부가 매월 시료병을 회수하

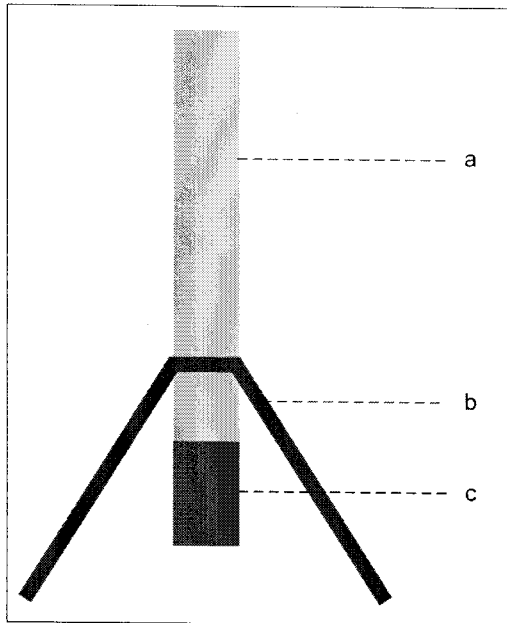


Fig. 3. Design of the near-bottom sediment trap: a. trap body (PVC, 100 cm long with mouth diameter of 7 cm), b. tripod (stainless steel), c. removable sample collection bottle (a 2-L wide mouth PE bottle).

Table 1. Durations and numbers of trap deployed in Marian Cove during 1998-2000.

#	Trap deployed (yy/mm/dd)	Trap recovered (yy/mm/dd)	Duration (days)	No. of traps deployed
1	98/02/28	98/03/30	30	2
2	98/03/30	98/04/29	30	1
3	98/04/29	98/05/29	30	2
4	98/05/29	98/07/02	34	2
5	98/07/02	98/07/30	28	2
6	98/07/30	98/10/09	71	2
7	98/10/09	98/11/09	31	2
8	98/11/09	98/12/09	30	2
9	98/12/09	99/01/11	33	2
10	99/01/11	99/02/09	29	2
11	99/02/09	99/03/08	27	1
12	99/03/08	99/04/08	31	2
13	99/04/08	99/05/10	32	2
14	99/05/10	99/06/10	31	2
15	99/06/10	99/07/09	29	2
16	99/07/09	99/08/12	34	2
17	99/08/12	99/09/16	35	2
18	99/09/16	99/10/27	41	2
19	99/10/27	99/11/17	21	2
20	99/11/17	99/12/03	16	2
21	99/12/03	99/12/31	28	2
22	99/12/31	00/01/22	22	2

였으며, 시료병은 분석 시까지 -20°C 에 냉동 보관하였다. 시료분석을 위해, 시료가 든 2 liter 병을 냉장실로 옮겨 해동한 후, 원심분리로 몇 차례 탈염을 하고, 냉동건조하였다.

본 연구에서는 일반적으로 침강입자 포집기 계류시, 시료보존을 위해 첨가하는 보존제(formalin, sodium azide, mercury chloride 등)를 넣지 않았다. 따라서 미생물을 비롯한 생물들의 활동으로 시료 중 유기물성분이 초과정량 또는 미달정량 되었을 가능성이 있지만, 보존제를 첨가하였을 경우 보존제 성분과 시료의 반응으로 발생하는 이차적인 성분 변화는 방지할 수 있었다. Knauer *et al.*(1984)에 의하면, azide ion을 보존제로 사용하였을 경우, 금속 성분 중 카드뮴(Cd)과 망간(Mn)의 경우는 $>70\%$ 를 용액상으로 잃어버리는 반면, 철(Fe)의 경우는 입자형태로 남는 문제가 발생하였다고 한다.

시료 분석

총 입자 플럭스는 건조된 시료의 무게와 입자체 포집기의 설치기간과 면적으로 계산하였으며, 암석기원 입자 플럭스(lithogenic particle flux)는 다음의 식에 의하여 계산하였으며, 나머지를 생물기원 입자 플럭스(biogenic particle flux)로 삼았다: Lithogenic particle flux = total mass flux - (opal flux + carbonate flux + $2 \times C_{org}$ flux) (Fischer and Wefer 1996). 중금속 및 미량원소 분석을 위하여, 시료 0.2 g을 테플론 용기에 넣고, 질산(HNO_3) 2.5 ml를 첨가하여, $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 를 유지하면서 4시간 이상 가열하였다. 시료를 냉각 후, 과염소산(HClO_4)과 불산(HF)을 각각 0.5 ml씩 첨가하여, 175°C 로 다시 가열하였다(Kitano and Fujiyoshi 1980). 건조된 분해산물에 1% 질산(HNO_3)을 일정량 첨가하여 원소에 따라 원하는 농도로 희석하였다. Al, Ti, Fe, Mn, Zn, Cr 등은 ICP-AES(Shimadzu model, ICPS-1000III)로 측정하였으며, Cu, Co, Ni, Cd, Pb 등은 ICP-MS(VG model, PQ3 STE)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

총 입자와 금속 플럭스의 계절변화

마리안 소만에서 측정된 침강 입자 플럭스는 여름에 높고 겨울에 낮은 뚜렷한 계절변화를 보였다(Fig. 4). 조사기간동안 총 입자 플럭스(total mass flux)는 1998년 4월(가을)부터 감소하여 8-9월(겨울)에 가장 낮은 플럭스($2.47 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)를 기록하였으며, 이후 10월부터 증가하여 1999년 2월(여름)에 가장 높은 플럭스($23.69 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)를 기록하였다. 이러한 계절변화는 1999/2000년에도 나타났으나, 최대·최소 플럭스 값의 규모와 시기가 다른 것은 연간 변동(interannual variation)이 있음을 시사하였다.

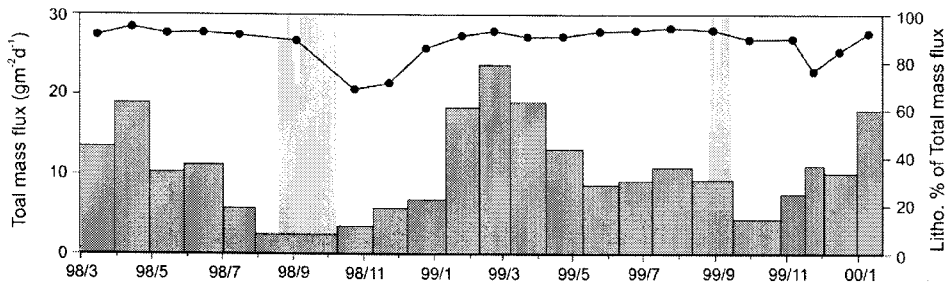


Fig. 4. Temporal variations of total mass flux in dry weight (bar) and percentages of lithogenic particle flux (line). The gray areas show durations and strengths of the period that sea ice covered over the study site during the study period.

고위도 해역은 계절적으로 형성되는 해빙에 의해 입자 유입이 상당히 방해받는다 (Fisher *et al.* 1988; Dunbar *et al.* 1998). 조사기간 중 마리안 소만에는 1998년 8월 20일부터 10월 8일까지 약 50일 동안 해빙이 형성되었으며, 1999년에는 8월 26일부터 9월 15일까지 21일 동안 형성되었다 (Fig. 4; 해양수산부 1999, 2000). 총 입자 플럭스가 1998년 8~9월에 가장 낮게 나타난 것은 이 시기에 마리안소만과 맥스웰만에 걸쳐 강하게 형성된 해빙의 영향을 받은 것으로 생각된다. 한편, 1999년 겨울 입자 플럭스는 이에 비해 높았는데, 이것은 1999년 겨울에 형성된 해빙은 국부적으로 약하게 형성되어, 입자유입을 방해하는 작용이 상대적으로 약하였던 것으로 생각된다. 결국, 마리안소만에서도 해빙의 분포에 의해 총 입자 플럭스의 계절 변화와 연간변화가 직접적으로 영향받을 수 있다.

한편, 마리안소만으로 유입되는 입자의 상당한 부분이 암석기원 입자로 구성되었다 (Fig. 4). 암석기원 입자 플럭스는 대부분의 시기에 총 입자 플럭스의 >90%를 차지하며, 생물기원 입자가 증가하는 11~12월에만 70~80%로 감소하였다 (Fig. 4). Cripps and Clarke (1998)과 Isla *et al.* (2001)에 의하면, 시그니섬 (Signy Is.)의 팩토리소만 (Factory Cove)과 리빙스턴섬 (Livingston Is.)의 존슨도크 (Johnson's Dock)에서도 암석기원 입자가 총 입자의 70~95%, 95~98%를 각각 차지한다고 하였다. 이처럼 남극 연안 환경으로 유입되는 입자 중 상당한 부분이 주변 육상에서 이동된 암석기원 입자였다.

남극권의 경우, 강이나 하천이 덜 발달하고, 상당한 기간 눈으로 덮여 있으므로 육상에서 이동하는 입자는 주로 빙하나 용설수류를 통해 해양으로 이동하게 된다. 이 연구 기간에도 남극 하계연구기간동안 세종기지 주변 육상에서 용설수류가 연안을 따라 발달된 것을 흔하게 관찰할 수 있었다. 실제 마리안소만 해안을 따라 빙하성 선상지 (outwash fan)를 형성하는 용설수류가 광범위하게 발달하며, 이를 통해 다량의 쇄설성 입자를 함유한 용설수가 소

만으로 유입된다 (Yoon *et al.* 1994, 1998; 유 등 1999). 킹조지섬의 애드미랄티만 (Admiralty Bay)의 경우, 용설수류에 의해 이동되는 육상기원물질이 약 200,000~240,000 tons yr⁻¹ 규모이며, 이들은 대부분 하계에 발생한다고 한다 (Pecherzewski 1980). 그러나, 용설수류의 분포가 시공

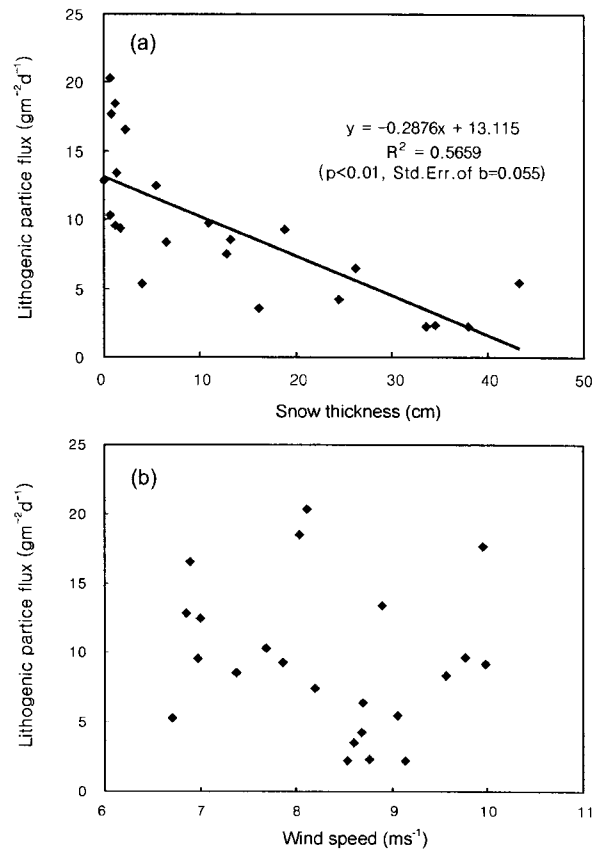


Fig. 5. Plots between lithogenic particle flux and snow accumulation (a) and wind speed (b) around King Sejong Station during the study period.

간적으로 불특정적이고 간헐적이므로, 이의 규모 및 성분
에 대한 정량이 힘들다. 이에 용설수류 형성의 근간이 되
는 적설량자료를 구하였다(해양수산부 1999, 2000). 세종
기지 주변 육상에서 측정된 적설량과 암석기원 입자플럭
스 사이의 상관관계를 구해본 결과, 음의 상관관계를 보
였다($r^2=0.57$, $p < 0.01$, Fig. 5a). 이것은 육상에 쌓인 눈
으로 인해, 육상기원 입자의 공급과 이동경로가 차단되었
음을 의미하며, 또한 눈이 녹으면서 형성되는 용설수류에
의해 육상기원 입자가 이동하였음을 의미한다. 그림에서
특히, 적설량이 영에 가까울 때 자료의 분산이 크게 나타
나는데, 이것은 용설수류의 규모는 그 당시의 적설량보다
그 전해 겨울의 적설량에 영향받고 또한 기지 주변뿐이
아니라, 먼 육상에서부터 유래하기 때문인 것으로 생각
된다.

한편, 본 연구에서 사용한 입자 포집기의 종류와 이의
설치수심으로 재부유한 저층퇴적물의 유입 가능성을 배제
할 수 없다. 마리안 소만과 같은 연안의 경우는 바람에 의
해 수층의 혼합이 두드러진다. 특히, 남극의 경우는 연 중

바람이 많이 부는 지역이다. 세종기지 기상실에서 측정된
바람의 유속과 암석기원입자플럭스와의 상관관계를 구해
본 결과, 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 5b). 또한, 시료병
을 채집한 잠수부들에 의하면, 기상상태가 나쁜 날에 잠수
를 하여도, 퇴적물 포집장치가 설치된 지역에는 퇴적물의
부유와 같은 현상을 전혀 관찰할 수 없었다고 한다. 이상
의 결과로 유추해볼 때, 이 연구에서 측정된 암석기원 입
자는 대부분이 용설수류를 통해 이동한 육상기원 입자이
며, 저층 퇴적물의 재부유에 의한 유입은 있더라도 거의
영향을 미치지 못하는 정도일 것으로 생각된다.

마리안소만 조하대로 공급되는 입자성분 중 금속원소
(Al, Fe, Ti, Mn, Zn, Cu, Cr, Co, Ni, Cd, Pb)플럭스 변화
를 Fig. 6에 나타내었다. 이들 금속들도 총 입자 플럭스와
같이 동계에 낮고 하계에 높은 계절 변화를 보였다. 알루
미늄(Al)의 경우는, 1999년 2월에 $74 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가
장 높은 플럭스를 보였으며, 98년 8~9월에 $9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
로 가장 낮은 플럭스를 기록하여 조사기간 중 총 평균
은 $34 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었다. 철(Fe), 티타늄(Ti)과 망간

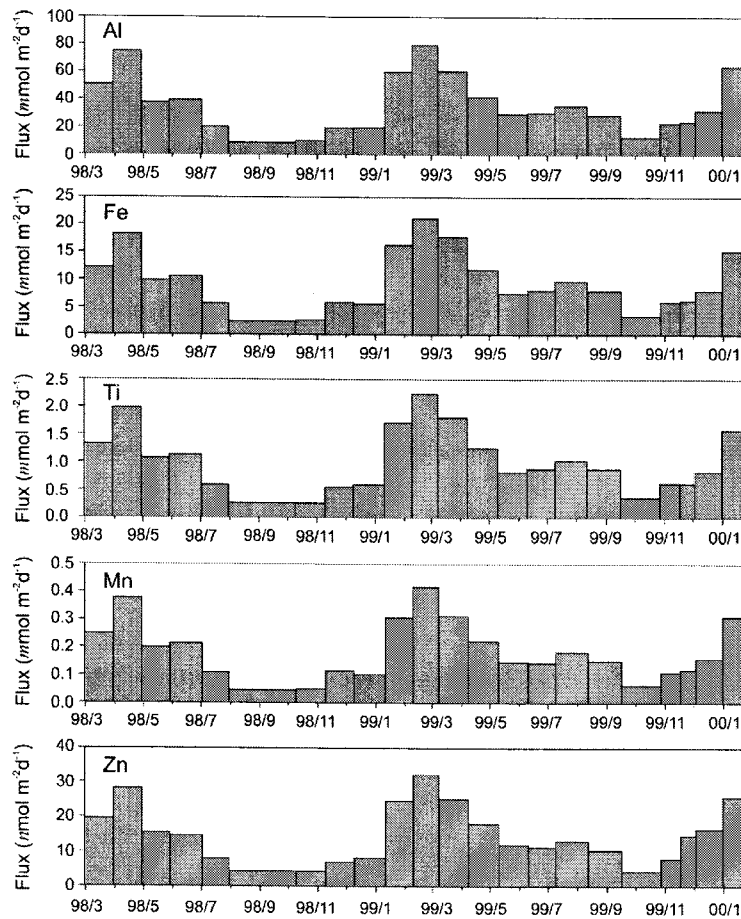


Fig. 6. Temporal variations of metal fluxes of Al, Fe, Ti, Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Cr, Cd, and Pb.

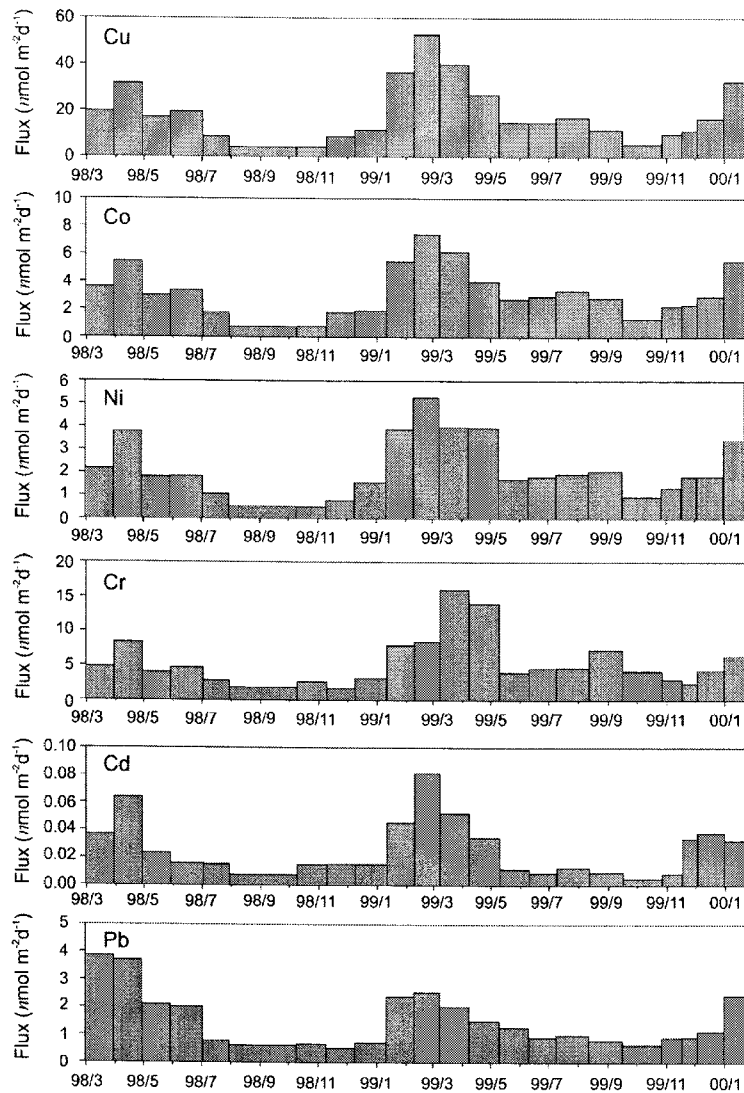


Fig. 6. Continued.

(Mn)도 Al과 마찬가지로 1999년 2월에 각각 20, 2.08, $0.38 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 가장 높고, 1998년 8~9월에 2, 0.26, $0.04 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 가장 낮은 플럭스를 각각 기록하였으며, 조사기간 총 평균은 각각 9, 0.96, $0.18 \text{ mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었다. 그 외 아연(Zn), 구리(Cu), 코발트(Co), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 카드뮴(Cd), 납(Pb)도 대체적으로 하계에 높고 동계에 낮은 플럭스를 나타내었으며, 그 범위는 각각 4.4~29.8, 4.0~47.6, 0.7~6.8, 0.5~4.8, 1.8~12.1, 0.01~0.07, $0.6\sim 3.9 \text{ nmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었으며, 이들 원소의 조사기간 평균은 각각 13.8, 17.6, 3.0, 2.1, 5.4, 0.02, $1.5 \text{ nmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이었다. 금속성분에 따라 최대·최소 플럭스를 나타내는 시기와 최대/최소비가 조금씩 다르지만, 대부분이 총 입자 플럭스와 상당히 유사한 경향을 나타내었다.

금속원소의 기원과 생지화학적 순환

육상에서 유입되는 쇄설성 입자의 지시자로 Al, Ti, Fe 등과 같이, 지각구성광물에 고농도로 균일하게 존재하는 성분을 이용한다. 특히, Al은 여러 암석종류에 비교적 높고 일정한 비율로 존재하기 때문에 암석기원의 기준물질로 널리 이용되고 있다. 그러나 최근 수층에서 Al이 생물체에 의해 추가적으로 제거되어(scavenged), 퇴적물과 침강입자에서 Al/Ti 비가 높게 나타난 바가 있다(Murray and Leinen 1996; Dymond *et al.* 1997). 따라서, Ti원소를 대표적인 지각기원물질(the reference element such as Al, Fe, Ti, and Zr)로 삼고, 침강 입자 중 지각에서 기인하는 성분에 대한 영향을 파악하고, 주변 지각의 특징적인 성분비를 파악하고자 enrichment factor(EF_{crust})를 다음 식에

Table 2. Average concentrations and EF values for metal elements in the vertical settling particles.

	Al (%)	Fe (%)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)
Average concentration	8.85	4.93	928	88.1	102.4	17.21	11.53	29.26	0.26	30.74
Upper crust average*	8.04	3.50	600	71.0	25.0	10.00	20.00	35.00	0.10	20.00
Upper crust average**	7.74	3.09	527	52.0	14.3	11.60	18.60	35.00	0.10	17.00
EF value***	0.81	1.12	1.23	1.20	5.08	1.05	0.44	0.56	1.85	1.21

*from Taylor and McLennan (1995); **from Wedepohl (1995); ***calculated from Wedepohl(1995).

의해 계산하였다.

$$EF_{crust} = (X_s/M_s)/(X/M)_{rock,soil}$$

X_s 와 M_s 는 시료에서 측정된 어떤 성분(X)의 농도와 기준이 되는 성분(M)의 농도를 각각 의미하며, $(X/M)_{rock,soil}$ 는 지각이나 토양에서 이들의 평균 성분비를 의미한다. 각각 평균 성분비는 Taylor and McLennan(1995)과 Wedepohl(1995)이 상층지각(upper continental crust)의 평균 농도로 제시한 값들을 이용하였으며, 조사기간 평균 EF_{crust} 값을 구하였다(Table 2). 그 결과, Al, Fe, Mn, Zn, Co는 1에 가까운 값을 보였으며 Cu, Cd는 1보다 높은 값을 보였다. EF_{crust} 값이 1에 가까운 값을 보인 Al, Fe, Mn, Zn, Co는 이곳 주변 지각에 분포하는 이들의 성분비가 지각 평균 구성비와 유사함을 알 수 있었으며 주로 주변지각에서 유입된 것임을 유추할 수 있었다. Cu와 Cd는 EF_{crust} 값이 1보다 상당히 높은 것으로 보아, 다른 성분들에 비해 이곳 지각에 특징적으로 고농도로 분포하든지 육상지각 이외의 다른 유입원이 있음을 의미한다. 그리고 기준으로 삼은 Ti의 평균농도(4,479 ppm)가 Taylor and McLennan(1995)와 Wedepohl(1995)가 제시한 지각 평균농도(각각 3,000, 3,117 ppm)보다 상당히 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 EF 값이 1에 가까운 값을 보인 원소들도 평균 지각 농도보다 고농도로 존재함을 의미한다. 평균 지각 농도에 비해, 금속에 따라, 1.1~2.6배 높았으며 특히, Cu는 4~7배 높은 농도를 보였다. 이처럼 마리안소만의 입자체에서 금속성분들이 전반적으로 높게 나타나고 있는 것은 주변 육상을 구성하는 광물의 영향인 것으로 생각된다. 바톤반도와 위버반도의 지질도를 작성하고 있는 이와 허(personal communication in KORDI) 그리고 좌와 이(1992)에 의하면, 이곳 지각을 구성하는 암반에는 Al, Fe, Ti, Cu, Mn 등을 포함하는 황철광, 황동광이 많이 분포한다고 한다. 따라서 마리안 소만으로 유입되는 암석기원 입자는 주변 육상을 구성하는 광물의 영향으로 Al, Fe, Ti, Cu, Mn 등이 다른 지역에 비해 고농도로 존재하며, 특히 Cu는 매우 높게 존재함을 알 수 있었다.

일반적으로 해양에 존재하는 금속성분들이 육상기원의

암석물질에서 이동한 결과라고 하더라도 각 금속성분이 수층에서 겪는 생지화학적 순환은 상당히 다르다. 해양으로 유입된 금속성분들이 생명체나 입자체에 응집, 흡착, 흡수되거나 다시 용존, 침전 등의 반응을 겪으면서 해수와 퇴적물 그리고 침강입자에 따라 농도가 달리 나타나게 된다. 따라서, 각 금속성분들의 기원이 같더라도, 수층에서 일어나는 생지화학적 순환에 따라 그 시공간적 분포는 달라지게 된다. 이에 대표적인 암석기원물질이고 수층에서 비교적 생지화학반응에 참여하지 않는 티타늄(Ti)의 침강입자 내 함량과 다른 금속들의 함량 사이의 상관관계를 구하였다(Fig. 7). 그 결과, Al, Fe, Mn, Co는 Ti와 양의 상관관계를 보였으며, Cu는 다소 낮은 양의 상관관계를 보였다. 반면, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb는 Ti와 상관관계를 나타내지 않았다. Al, Fe, Mn는 앞서 구한 EF값에서도 알 수 있었지만, Ti와 같이 주된 공급원이 주변지각의 암석입자임을 알 수 있으며 해양에 유입된 이후에도 생지화학반응에 거의 참여하지 않고 재빨리 퇴적됨을 알 수 있다. 그러나 Ti와 낮은 상관관계를 보이는 Cu 그리고 거의 상관관계를 보이지 않는 Zn, Ni, Cr, Cd, Pb는 비록 평균 EF값이 1에 가깝더라도, 이들은 암석기원물질 이외의 공급원을 가지든지, 공급원이 같더라도 해양에 유입된 이후 생지화학적 반응에 적극적으로 참여되어 성분변화가 일어남을 의미한다. 실제로 Ni, Cr, Cd, Pb 등의 중금속은 생체에 이용되어 축적되고 배설됨으로 해양에서 복잡한 생지화학 순환을 함이 널리 알려져 있다. 따라서 이들 원소 중 EF값이 유난히 높고, Ti와 낮은 상관관계를 보이는 Cu와 Cd에 대해 이들의 기원과 수층에서 겪는 생지화학과정에 대해 자세히 고찰하고자 한다.

Cu

마리안 소만을 둘러싸는 바톤반도와 위버반도에 황동광과 황철광물이 특징적으로 많이 분포함은 이미 알려져 있다(좌와 이 1992). 이의 영향이 마리안 소만의 해수와 저서생물에서도 발견되었다. Lee et al.(1990)에 의하면 마리안 소만 표층해수의 Cu 농도(0.35-1.21 $\mu\text{g l}^{-1}$)가 맥스웰만에 비해 높으며 남빙양의 대서양-인도양에서 측정된 값

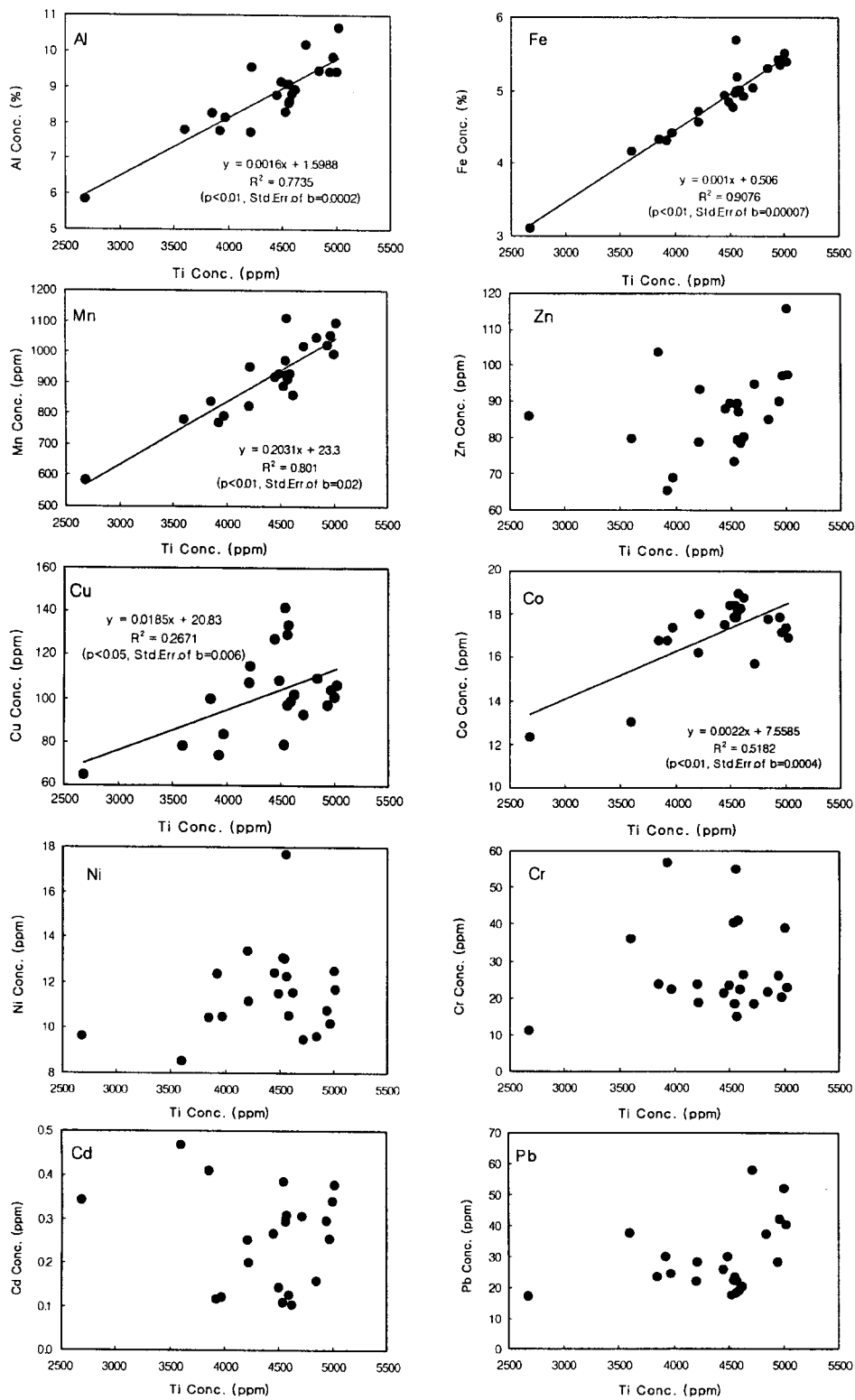


Fig. 7. Plots of Ti concentration vs. other metal concentration of settling particles at the subtidal benthic environment in Marian Cove.

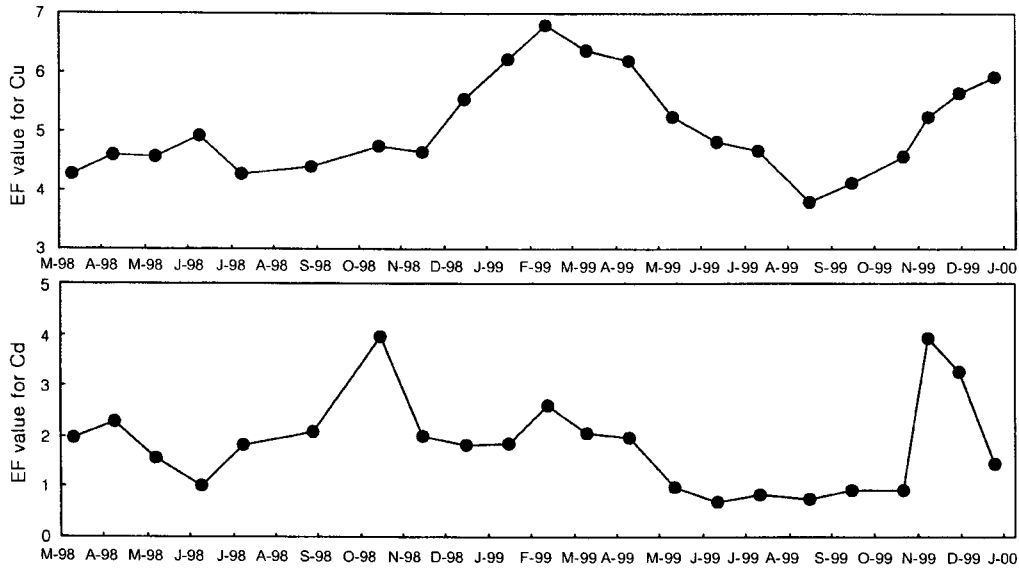


Fig. 8. Temporal variations of EF(enrichment factor) values of Cu and Cd.

(0.047-0.27 $\mu\text{g l}^{-1}$) 보다 매우 높게 나타났다고 보고하였다. 또한 마리안 소만과 인접한 콜린즈 만(Collins Harbor)에 서식하는 남극 큰따조개(*Laternula elliptica*)의 생체 ($38 \mu\text{g g}^{-1}$ dry weight in whole soft tissue)와 퇴적물($77 \mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)에서도 다른 연안지역에 서식하는 저서생물에 비해 상당히 높은 Cu농도가 측정되었음이 보고되었다(Ahn *et al.* 1996). 이에 대해 Lee *et al.*(1990)와 Ahn *et al.*(1996)은 마리안소만 주변 해양환경에서 Cu농도가 높게 측정된 것은 인위적인 오염이 아니라 용설수에 의해 주변 대륙지각에 풍부하게 존재하는 Cu가 해양으로 유입된 결과라고 하였다. 이와 같이 주변 육상에 풍부하게 존재하는 Cu는 해양으로 유입되어 모든 해양환경에 걸쳐 영향을 끼침을 알 수 있다. 이 연구에서 측정된 침강입자에서도 마찬가지로의 결과를 나타내었다. 앞에서 살펴보았듯이, Cu의 EF값이 다른 원소에 비해 월등히 높게 나타난 것은 이를 뒷받침하는 결과이다.

한편, 침강 입자 내 구리(Cu)원소의 EF값을 월별로 나타내었다(Fig. 8). Cu의 EF값은 년 중 4 이상의 상당히 높은 값을 나타내며, 전반적으로 하계에 높고 동계에 낮은 분포를 나타내어, 2월에 가장 높고(6.8), 8월에 가장 낮은 값(3.8)을 보였다. 이는 Cu의 공급이 다른 성분에 비해 항상 많음을 의미하며, 이런 현상은 하계에 더욱 심화됨을 의미한다. 이것은 앞서 말한 바와 같이 이곳 주변 지각에 풍부한 황동광과 황철광물의 유입으로 Cu가 마리안소만 해양환경에 전반적으로 높게 나타남을 의미하며, 특히 하계에는 용설수류에 의해 이들 광물이 선택적으로 더 많이 공급됨을 의미한다. 또한 생물활동이 활발한 하계에는 1

차생산자에 많이 이용되는 Cu가 생체에 이용된 후 유기입자와 함께 유입될 가능성이 있다. 그러나 Cu의 EF값과 암석기원 입자 플럭스, 생물기원 입자 플럭스와의 상관관계를 각각 살펴본 결과 비교적 암석기원 입자 플럭스와 더욱 좋은 상관관계($r^2 = 0.43, p < 0.01$)를 나타내었다(Figs. 9a and b). 결국, 마리안소만 조하대로 공급되는 Cu성분의 주된 공급원은 주변 육상에 풍부한 Cu함유광물이 공급된 결과이며, 이의 영향으로 다른 지역에 비해 상당히 높은 플럭스를 보였으며, 하계에 높고 동계에 낮은 계절변화를 보였다.

Cd

카드뮴(Cd)은 지각에 널리 분포하며, 해양으로 유입되는 경로는 강과 대기를 통해서 이루어지며, 때로는 대기를 통한 유입이 더 많다고 알려져 있다(Clark 1992). 해양환경에서 용존 Cd는 인산염과 밀접하게 행동하며 생체에 많이 이용됨으로 인해, 수층에서 영양염형태(nutrient type)의 분포를 보인다(De Baar *et al.* 1994). 이것은 유광층에서 생물체에 Cd가 이용되고, 유기입자와 함께 생지화확순환을 함을 의미한다. 한편, Lee *et al.*(1990)는 Marian Cove 표층해수의 Cd 농도가 맥스웰만에 비해 상당히 높고, 특히 세종기지 주변이 높다고 보고하였다. 그리고 Hong *et al.*(1999)은 세종기지 주변의 눈 시료에서 측정된 Cd 농도가 리빙스턴섬(Livingston Is.)에 비해 14배나 높으며, 이것은 육상광물 먼지기원이기 보다는 해수분무기원이라고 하였다. 이것은 마리안 소만 해양환경에 Cd 농도가 높음을 의미한다. 더욱이, 강 등(1998)과 안과 김

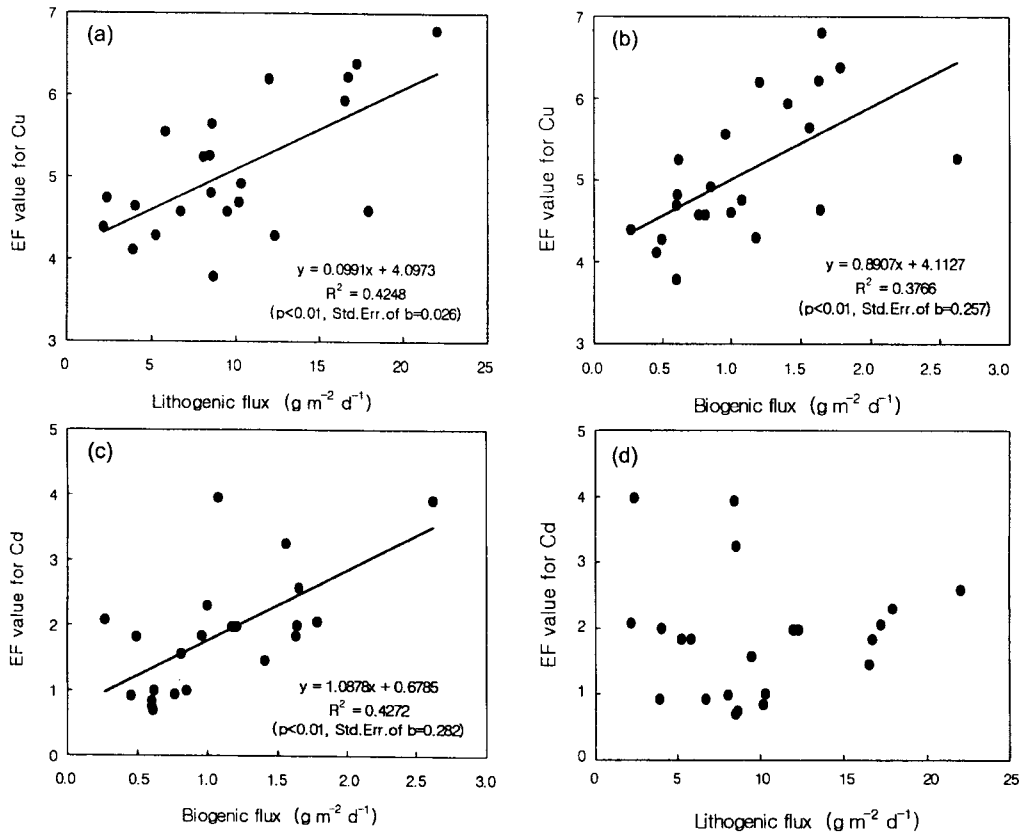


Fig. 9. Relationships between (a) EF values of Cu and lithogenic particle flux, (b) EF values of Cu and biogenic particle flux, (c) EF values of Cd and biogenic particle flux, and (d) EF values of Cd and lithogenic particle flux.

(1999)에 의하면 조간대에 서식하는 부착규조류를 먹이로 하는 남극 삿갓조개의 체내 중금속 농도를 분석한 결과, 특히 Cd의 농도가 높다고 하였다. 강 등(1998)은 이와 같은 현상은 남극 해수에 높은 농도로 존재하는 인산염이 Cd와 결합하여 기초생산자를 통해 초식동물에 축적된 결과라고 하였다. 또한 삿갓조개의 체내 Cd 농도가 채집지역에 따라 큰 차이를 보였는데, 이것은 지역에 따라 용설수의 유입이 큰 차이를 보이기 때문이라고 하였다. Cd가 용설수보다 해수에 높게 존재하기 때문에, 용설수의 유입이 상대적으로 적은 지역에서 채집한 삿갓조개의 체내 Cd 농도가 다른 지역에 비해 높게 나타났다고 하였다.

침강 입자에서 Cd의 월별 EF값을 살펴본 결과, 0.7~4.0의 범위를 보였으며, 특히 봄에 상당히 높게 나타났다 (Fig. 8). 이처럼 Cd의 월별 EF 값이 전반적으로 1보다 높게 나타나며 봄에 급격히 높은 값을 보이는 것은, 이곳 소만에 Cd가 풍부하게 존재하고 생체에 이용되어, 유기입자와 함께 퇴적됨을 의미한다. EF값이 최대로 나타난 1998년 10월에 소만에서 측정된 엽록소 농도($1.32 \mu\text{g l}^{-1}$, 강 등 2000)가 조사기간 중 최대 값을 나타낸 것은 이를 뒷

받침하는 결과이다. 또한 Cd의 EF값과 생물기원 입자 플럭스, 암석기원 입자 플럭스와의 상관관계를 각각 살펴본 결과, 생물기원 입자 플럭스와 높은 상관관계($r^2=0.43$, $p<0.01$)를 나타내었으며 암석기원 입자 플럭스와의 상관관계를 보이지 않았다(Figs. 9c and d). 이와 같이 마리안 소만에 분포하는 Cd는 수층에서 생지화학 순환에 관여함으로 인해, 이의 기원이나 공급량보다는 해양의 1차생산자 생물량에 따라 농도변화를 나타낸다. 결국, 침강 입자 중 Cd 플럭스는 생물기원 입자에 포함되어 퇴적된 결과이며, 엽록소 농도가 급격히 증가하는 봄에 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 1998년 3월부터 2000년 1월 동안 남극 마리안소만 조하대로 공급되는 침강입자와 금속성분의 플럭스와 생지화학적 순환에 대해 고찰하였다.

가. 마리안 소만 조하대로 공급되는 총 입자 플럭스의 조사기간 평균은 $10.26 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었으며, 동계에 낮고 하계에 높은 계절성을 보였다. 특히, 해빙이 형성된 시기

에 가장 낮은 입자 플럭스(2.47 g m⁻² d⁻¹)를 보였으며, 1999년 2월에 가장 높은 플럭스(21.97 g m⁻² d⁻¹)를 나타내었다. 암석기원 입자 플럭스는 대부분의 시기에 총 입자 플럭스의 90% 이상을 차지하며, 평균 플럭스는 9.26 g m⁻² d⁻¹이었다. 암석기원 입자 플럭스와 세종기지 적설량 사이에 음의 상관관계를 나타내는 것으로 보아, 이의 기원은 주변 육상의 광물입자들이 용설수류를 통해 이동한 결과로 생각된다.

나. 입자 내 금속원소(Al, Fe, Ti, Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Cr, Cd, Pb)의 플럭스는 총 입자 플럭스와 매우 유사한 계절변화를 보였으며, 각 평균 플럭스는 각각 34,000, 9,000, 960, 180, 13.8, 17.6, 3.0, 2.1, 5.4, 0.02, 1.5 nmol m⁻² d⁻¹이었다. 대부분의 금속성분들은 평균지각농도보다 높았으며, 특히 Cu는 5~7배 높았다.

다. 침강 입자성분 중 Cu는 평균지각 농도보다 월등히 높으며, 암석기원 물질플럭스와 상당히 높은 양의 상관관계를 나타낸 것으로 보아, 주변 지각에 풍부하게 존재하는 황동광과 황철광물의 유입 결과임을 유추할 수 있다. 입자 성분 중 Cd는 봄에 높은 EF_{crust} 값을 보이며, 생물기원 입자 플럭스와 양의 상관관계를 나타내는 것으로 보아, 마리안소만 해수에 풍부하게 용존하는 Cd가 생체에 이용된 후, 생물기원 입자에 포함되어 침강함을 유추할 수 있다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 기관과유사업인 ‘극지환경 특성 및 보존에 관한 연구’의 연구비에 의해 이루어졌다. 시료 채집에 도움을 주신 김현수, 한성수 과학삼수기사께 깊이 감사드립니다. 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 한국해양대학교 노일 교수님과 경남대학교 안순모 교수님 그리고 편집위원이신 한국해양연구원 안인영박사님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

강재균, 안인영, 김동엽. 1998. 킹조지섬 조간대에 서식하는 남극삿갓조개, *Nacella concinna* (복족강: 삿갓조개과)의 체내 중금속 농도에 관한 기초 연구. 남극 세종기지 주변 인간활동으로 인한 환경변화 모니터링. 한국해양연구소 보고서, BSPP 98001-02-1151-7, 55 p.

강재신, 강성호, 최돈원, 한성수, 심정희, 정경호, 이상훈, 정호성. 2000. 1998/1999 남극 킹조지섬 마리안소만 표층수에 서식하는 미세조류의 계절적 변동과 해수의 물리, 화학적 요인의 변화. 극지환경 특성 및 보존에 관한 연구. 한국해양연구소 보고서, ECPP 99001-03, 88 p.

안인영, 김고운. 1999. 킹조지섬 조간대에 서식하는 남극삿갓

조개, *Nacella concinna*(복족강: 삿갓조개과)의 체내 중금속 농도: 지역별 변화양상에 관한 연구. 남극 세종기지 주변 인간활동으로 인한 환경변화 모니터링. 한국해양연구소 보고서, ECPP 99001-02, 27 p.

유규철, 윤호일, 오재경, 김예동, 강천운. 1999. 남극 킹조지섬 마리안 소만의 하계 수층 특성과 부유물질 분산. *한국해양학회지 바다*, 4(4), 266-274.

좌용주, 이종익. 1992. Geochemistry of the volcanic rocks from the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *한국지구과학학회지*, 13(2), 200-211

해양수산부. 1999. 대한민국 제11차 남극과학연구단 월동연구대 월동보고서(1997년 12월-1998년 12월). 한국해양연구소, BSE 400001-00-1164-7, 33 p.

해양수산부. 2000. 대한민국 제12차 남극과학연구단 월동연구대 월동보고서. 한국해양연구소 (In press).

Ahn, I.-Y., S.H. Lee, K.T. Kim, J.H. Shim, and D.Y. Kim. 1996. Baseline heavy metal concentrations in the Antarctic Clam, *Laternula Elliptica* in Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *Mar. Pollut. Bull.*, 32(8/9), 592-598.

Clark, R.B. 1992. *Metals In Marine Pollution*. Clarendon Press, Oxford, 66 p.

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 observations 1996-1998. *Deep-Sea Res. II*, 47, 3491-3520.

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., P.M. Saager, R.F. Nolting, and J. van der Meer. 1994. Cadmium versus phosphate in the world ocean. *Mar. Chem.*, 46, 261-281.

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(C13), 30741-30759.

Dymond, J., R. Collier, J. McManus, S. Honjo, and S. Manganini. 1997. Can the aluminium and titanium contents of ocean sediments be used to determine the paleoproductivity of the oceans? *Paleoceanography*, 12, 586-593.

Fischer, G., D. Futterer, R. Gersonde, S. Honjo, D. Ostermann, and G. Wefer. 1988. Seasonal variability of particle flux in the Weddell Sea and its relation to ice cover. *Nature*, 335, 426-428.

Fischer, G. and G. Wefer. 1996. Seasonal and interannual particle fluxes in the Eastern Equatorial Atlantic from 1989 to 1991 : ITCZ migrations and upwelling. p. 199-

214. In: *Particle Flux in the Ocean*, eds. by V. Ittekkot, P. Schäfer, S. Honjo, and P.J. Depetris. John Wiley & Sons Ltd.
- Flegal, A.R., H. Maring, and S. Niemeier. 1993. Anthropogenic lead in Antarctic sea water. *Nature*, 365, 242-244.
- Hong, S., C.Y. Kang, and J. Kang. 1999. Lichen biomonitoring for the detection of local heavy metal pollution around King Sejong Station, King George Island, Antarctica. *Korean J. Polar Res.*, 10, 17-24.
- Isla, E., A. Palanques, V. Alvà, P. Puig, and J. Guillén. 2001. Fluxes and composition of settling particles during summer in an Antarctic shallow bay of Livingston Island, South Shetlands. *Polar Biol.*, 24, 670-676.
- 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 Research*, 38, 1097-1126.
- Kitano, Y. and R. Fujiyoshi. 1980. Selective chemical leaching of cadmium, copper, manganese and iron in marine sediments. *Geochem. J.*, 14(3), 113-122.
- Knauer, G.A., D.M. Karl, J.H. Martin, and C.N. Hunter. 1984. *In situ* effects of selected preservatives on total carbon, nitrogen and metals collected in sediment traps. *J. Mar. Res.*, 42, 445-462.
- Langone, L., M. Frignani, M. Ravaioli, 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. Marine Systems*, 27, 221-234.
- Lee, S.H., K.T. Kim, and S.H. Kim. 1990. Trace metals in the surface waters of Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *Korean J. Polar Res.*, 1(2), 11-15.
- Murray, R.W. and M. Leinen. 1996. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 3869-3878.
- Palanques, A., E. Isla, P. Puig, J.A. Sanchez-Cabeza, and P. Masqué. 2002. Annual evolution of downward particle fluxed in the Western Bransfield Strait (Antarctica) during the FRUELA project. *Deep-Sea Res. II*, 49, 903-920.
- Pecherzewski, K. 1980. Distribution and quantity of suspended matter in Admiralty Bay (King George Island), South Shetland Islands. *Pol. Polar Res.*, 1, 75-82.
- Taylor, S.R. and S.M. McLennan. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33, 241-265.
- Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 59(7), 1217-1232.
- Wefer, G., G. Fischer, D. Fuetterer, and R. Gersonde. 1988. Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Res.*, 35(6), 891-898.
- Wolff, E.W., E.D. Suttie, and D.A. Peel. 1999. Antarctic snow record of cadmium, copper, and zinc content during the twentieth century. *Atmos. Environ.*, 33, 1535-1541.
- Yoon, H.I., Y. Kim, M.Y. Choe, and S.H. Nam. 1994. Glaciomarine sedimentation and paleoglacial setting of Marian Cove, King George Island, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 50, 41-48.
- Yoon, H.I., B.-K. Park, E.W. Domack, and Y. Kim. 1998. Distribution and dispersal pattern of suspended particulate matter in Mawell Bay and its tributary, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Mar. Geol.*, 152, 261-275.

Received Nov. 20, 2001

Accepted Jun. 24, 2002