

## 부산지역 강우의 화학적 특성 II. 중금속의 공급원과 습성침적 플럭스

전은주·양한섭·옥곤·김영섭\*  
부경대 해양과학부·부경대 지구환경과학부  
(1998년 4월 8일 접수)

## Chemical Characteristics of Precipitation in Pusan II. Sources and wet deposition flux of heavy metals

Eun-Joo Jun, Han-Soeb Yang, Gon Ok\*, and Young-Seup Kim\*  
\*Division of Ocean Science and Earth Environmental Sciences,  
Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea  
(Manuscript received 8 April 1998)

The concentrations and wet deposition flux into the sea of heavy metals of precipitation in Pusan area were measured and estimated. The samples were collected by polyethylene bottle( 30 l ) from January to November in 1996, and heavy metals were analyzed by atomic absorption spectrometer.

The concentration order of heavy metals was Al > Fe > Zn > Pb > Mn > Cu > Ni > Cd > Co, and they were high at inland sites and low at coastal sites. The enrichment factors for some metals(Zn, Cu, Pb, Cd), based on crustal Al, were significantly greater than unity, and the order was Cd > Pb > Zn > Cu. This evidence suggests Cd and Pb are derived predominantly from non-crustal sources. Al, Fe and Mn contents showed good correlation with each other. Therefore this enrichment factor indicates similar geochemical behavior of these elements. The annual wet depositional flux(mg/m<sup>2</sup>/yr) from P1 site was as follows: Al(121.1), Fe(177.2), Zn(12.9), Mn(6.19), Pb(14.4), Cu(0.64), Ni(1.03), Cd(1.02) and Co(1.01).

Key words : heavy metals, precipitation, enrichment factors, annual wet depositional flux.

### 1. 서론

지각물질의 풍화로 생성되는 중금속원소들과 최근 급속한 산업화 및 인구의 도시집중과 교통량 증가 등으로 인해 인위적으로 발생하는 중금속원소들은 대기중으로 방출된 후 강우에 의해 세정 제거되어 최종적으로 지표 또는 해양표면으로 강하하게 된다. 특히, 인위적으로 배출된 중금속의 농도는 계속적으로 증가하고 있으며, 이는 식물의 기공이나 토양에 흡착되어 성장에 많은 장애를 주는 것으로 알려져 있다(강희양, 1988). 따라서, 비록 현재 대기중의 중금속이 미량일지라도 장차 생태계 및 건강에 악영향을 줄 수 있으므로 지속적이고 광범위한 연구가 요구된다고 할 수 있다. 강우중 중금속에 관한 국외의 연구내용을 살펴보면 중앙대서양 연안(Lewes, Delaware U.S.A.)에서 강우중 중금속의 농도경향은 Fe > Zn > Pb > Mn > Ni > Cu > Cd의 순으로 보고되고 있으며 Fe을 기준으로 한 중금속의 농축률(enrichment factor)은 Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Mn의 순으로 보고되고 있다(Church et al., 1984). 한편, 보다 내륙지역인 캐나다 남부 Ontario주에서 측정된 강우중 중금속의 평균농도는 Zn > Pb > Mn > Cu > Ni > Cd의

순으로 알려지고 있으며, 중앙대서양 연안이나 Bermuda섬에서의 강우중 중금속농도에 비해 상당히 높은 수준인 것으로 보고된 바 있다(Barrie et al., 1987; Jickells et al., 1984).

또한, 하천을 통해 해양으로 유입된 화학물질의 대부분은 하구 및 연안역에서 제거되므로 외양역에서 화학물질의 공급원으로서 대기가 가지는 역할이 매우 크다고 볼 수 있기 때문에, 외양에서의 중금속기여의 규명을 위하여 대기와 해양간 중금속물질의 flux에 대한 연구는 더욱 필요하다고 볼 수 있다. 이에 관한 국외의 연구동향은 대기와 해양간 화학물질 flux에 관한 종합적인 연구가 활발히 진행되고 있으며, 강우에 의해 년간 대기로부터 해양으로 유입되는 중금속의 습성침적 플럭스에 관한 연구가 그 대표적인 예라고 할 수 있다(Jickells et al., 1984; Church et al., 1984). 최근 미국 Virginia주와 Maryland주에 걸친 대서양 연안의 Chesapeake만에서의 연 평균 습성침적 플럭스( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$ )는 Al(13,600), Fe(10,400), Zn(1335), Mn(1190), Pb(556), Cu(260), Ni(257), Cd(48)로 보고되었다(Scudlark et al., 1994).

Table 1. Mean concentration of heavy metal in precipitation for 4 sites in Pusan (Unit :  $\mu\text{g}/\ell$ )

Month (n)	Al	Fe	Pb	Zn	Mn	Cu	Ni	Cd	Co	precipitation (mm)	Wind (m/s)
Jan(1)	884.0	745.0	29.0	30.0	26.0	6.0	10.0	16.0	2.0	34.0	3.9
Mar(4)	425.8	339.3	27.5	72.1	28.7	19.6	4.0	1.4	2.5	170.8	4.3
Apr(4)	822.3	571.1	20.7	46.8	41.0	6.1	3.4	0.5	1.9	113.1	4.1
Jun(4)	307.0	269.0	12.1	19.9	8.5	3.5	1.2	0.4	1.1	314.6	3.7
Jul(4)	81.8	65.9	2.5	3.9	1.6	1.5	0.3	0.3	0.4	284.8	4.4
Aug(4)	400.6	476.6	14.5	26.5	15.8	4.5	2.9	0.3	0.2	139.5	3.7
Sep(4)	269.8	237.4	22.7	23.9	9.4	9.2	1.1	0.5	0.9	26.4	3.2
Nov(4)	48.0	362.0	14.1	17.6	7.2	4.9	0.7	1.9	0.2	52.8	3.5
Mean	404.9	383.3	17.9	30.1	17.3	6.9	2.9	2.7	1.2	142	3.9

(n): sample number

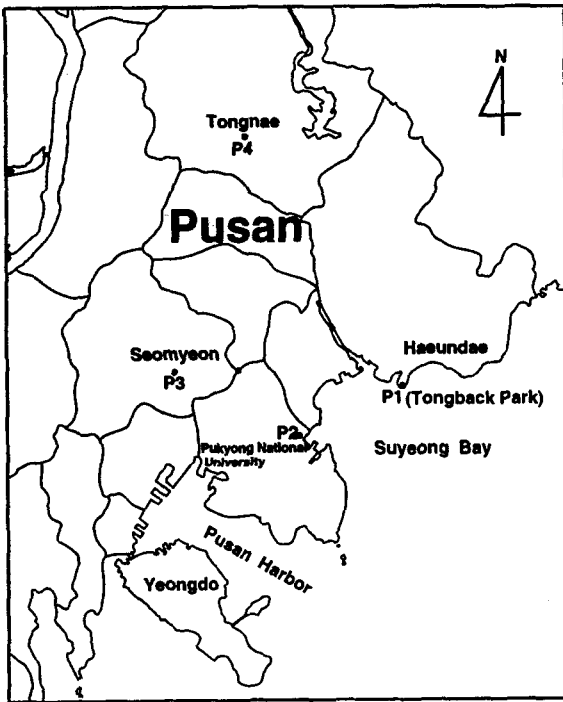


Fig. 1. Map showing the sampling stations.

한편, 중금속에 의한 대기중 오염에 관한 연구는 주로 대기중에 부유 또는 강하하는 입자상부유분진 및 강하 분진중의 중금속에 대한 연구가 많이 이루어져 왔었다 (김은경 외, 1996; 임영옥과 정용, 1989; Arimoto et al., 1987; Nriagu, 1979). 그러나 국내의 경우 강우중 중금속에 관한 연구가 미약한 실정이다. 따라서 본 연구는 부산지역의 해안에 인접한 지점과 보다 내륙지점의 총 4개 지점에서 한 해동안 시료를 채취하여 중금속의 시기별·지점별 농도변화를 비교하고, 지각물질 중 Al에 대한 각 중금속원소의 농축비율로부터 중금속성분의 강우중 오염정도를 고찰하고, 강우에 의해 년간 대기로부터 부산지역에 인접한 해양으로 유입되는 중금속의 습성침적 플럭스(wet deposition flux)를 추정하고자 하였다.

## 2. 시료채취 및 분석방법

### 2.1 시료채취

강우시료는 전보(전 외, 1998)에 나타낸 바와 같이 부산지역의 4개 지점에서 1996년 1월부터 11월까지 채취하였다. 중금속원소 분석용 강우는 적어도 1 l 이상의 시료의 양이 요구되므로 미리 산세척한 여러개의 30 l 폴리에틸렌병 여러 개를 이용하여 채취하였다. 그리고 채취기간은 강우 초기부터 강우 말기까지 연속적으로 채취하였고 말기강우 직후 시료를 채취하여 1개의 시료로 하였다. 그리고 중금속원소 분석용 시료는 채취 즉시 진한  $\text{HNO}_3$  약 20 ml를 첨가하여 pH를 1 이하로 하여 분석에 사용하였다.

### 2.2 분석 방법

강우중 중금속원소의 농도는 여과하지 않은 시료수 약 1 l를 증발 건조하여 농축시킨 다음 진한  $\text{HNO}_3$  용액으로 용해한 후 HF를 첨가하여 잔사를 분해시켰다. 여기에 진한  $\text{HNO}_3$  용액 소량을 첨가한 뒤 증발시켜 시료중에 남아 있는 HF를 제거한 후 다시 0.1N  $\text{HNO}_3$ 로 용해한 다음 정확히 50 ml로 정용(mass up)하여 원자흡광광도법(flame atomic absorption spectrometer, Varian 250 Plus)으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 강우중 중금속원소의 농도분포특성

부산지역 4개 지점에서 1996년 1월부터 11월까지 채취한 강우중 중금속의 분석결과를 Table 1에 월 평균치로 나타내었다. 부산지역에서의 강우중 Al의 농도는 48.0~884.0  $\mu\text{g}/\ell$ 로 평균 404.9  $\mu\text{g}/\ell$ 이었으며, Fe은 65.9~745.0  $\mu\text{g}/\ell$ 로 평균 383.3  $\mu\text{g}/\ell$ 를 나타내었으며, Zn은 3.9~72.1  $\mu\text{g}/\ell$ 로 평균 30.1  $\mu\text{g}/\ell$ , Pb은 2.5~29.0  $\mu\text{g}/\ell$ 로 평균 17.9  $\mu\text{g}/\ell$ , Mn이 1.6~41.0  $\mu\text{g}/\ell$ 의 평균 17.3  $\mu\text{g}/\ell$ 로 나타났으며, Cu, Ni, Cd, Co의 평균농도는 각각 6.9, 2.9, 2.7, 1.2  $\mu\text{g}/\ell$  수준을 나타내었다.

지구환경에서 금속성분의 농도변화가 적고 안정한 농도수준으로 오랜기간동안 환경수로서의 대표성을 지닌다고 할 수 있는 해수에 포함되어있는 중금속의 농도수준은 일반적으로 Al과 Fe이 약 2  $\mu\text{g}/\ell$ , Pb이 0.003  $\mu\text{g}/\ell$ , Zn이 0.3  $\mu\text{g}/\ell$ , Mn이 0.05  $\mu\text{g}/\ell$ , Cu가 0.2

부산지역 강우의 화학적 특성. II

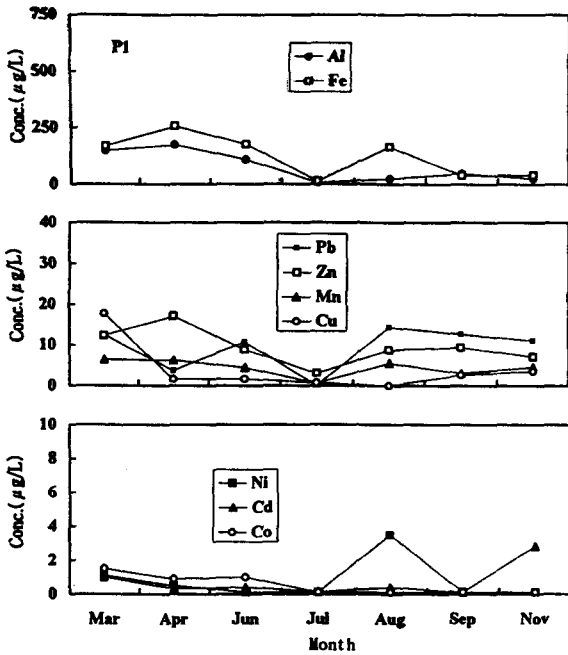


Fig. 2. Monthly variation of each heavy metal concentration in precipitation at site P1.

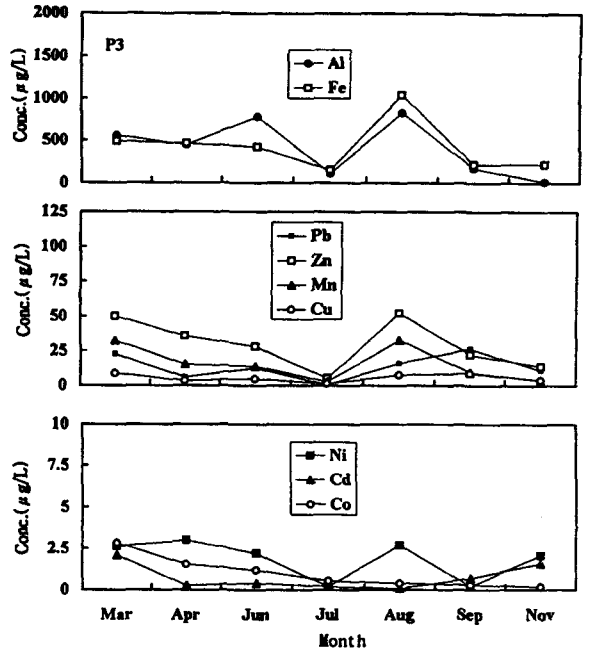


Fig. 4. Monthly variation of each heavy metal concentration in precipitation at site P3.

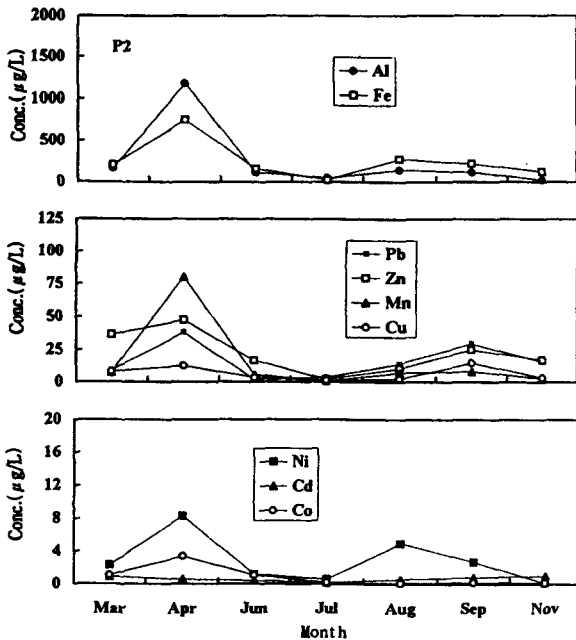


Fig. 3. Monthly variation of each heavy metal concentration in precipitation at site P2.

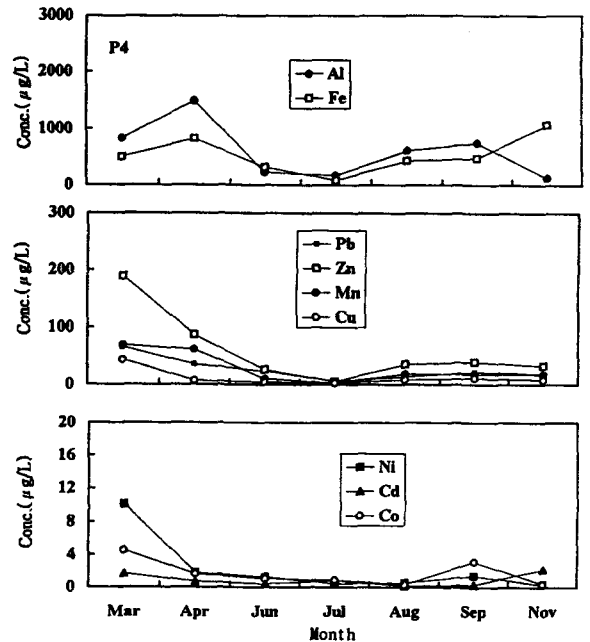


Fig. 5. Monthly variation of each heavy metal concentration in precipitation at site P4.

μg/l, Ni이 0.5 μg/l, Cd 및 Co가 0.08과 0.03 μg/l로 알려져 있는 것에 비해 본 연구의 결과인 강우 중 중금속의 농도수준은 해수에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 그러나 본 연구와 마찬가지로 安部 외 (1984)가 측정된 일본 츠쿠바지역 강우중의 연구결과에서는 Al이 최대 351 μg/l, Fe이 377 μg/l으로 보고

되어, 본 연구결과에서의 월별 최대 평균농도가 2배정도 높으나 연간 평균농도는 비슷한 수준을 나타내었다. 그리고 Pb의 경우도 마찬가지로 결과였으나 Zn, Cu, Ni은 그와 반대로 본 연구결과가 상당히 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Cd와 Co는 츠쿠바의 경우 검출한계이하의 결과를 나타내었지만, 본 연구의 결과에서는 0.08과

Table 2. Concentration of each heavy metal in precipitation at 4 sites in Pusan

(Unit :  $\mu\text{g}/\ell$ )

Site	Heavy metal	Al	Fe	Pb	Zn	Mn	Cu	Ni	Cd	Co
P1		103.9	135.1	9.5	10.1	4.3	9.0	1.1	0.8	0.6
P2		170.8	233.6	15.9	28.0	7.2	5.7	2.8	0.8	0.7
P3		376.0	433.1	14.3	28.2	18.8	5.2	2.0	0.7	1.0
P4		470.1	455.6	15.5	31.5	13.8	7.2	1.3	0.8	1.2

Table 3. Enrichment factors of each heavy metal in precipitation collected from Pusan and different regions.

	Fe	Pb	Zn	Mn	Cu	Ni	Cd	Co	reference
Pusan rainwater	1.4	291	87	3.7	26	7.9	2744	9.8	this study
Bermida rainwater	-	800	200	3	140	30	3500	-	Jickells <i>et al.</i> (1984)
Mid-Atlantic Coast (Lewes, DE)	-	890	350	5.2	45	40	3200	-	Church <i>et al.</i> (1984)

Table 4. Correlation coefficients between heavy metals in Pusan precipitation

	Al	Fe	Pb	Zn	Mn	Cu	Ni	Cd	Co
Al	1.00								
Fe	0.74	1.00							
Pb	0.52	0.43	1.00						
Zn	0.57	0.46	0.87	1.00					
Mn	0.82	0.73	0.74	0.73	1.00				
Cu	0.10	0.15	0.40	0.29	0.15	1.00			
Ni	0.59	0.43	0.63	0.68	0.73	0.03	1.00		
Cd	0.08	0.14	0.34	0.22	0.11	0.99	-0.01	1.00	
Co	0.63	0.49	0.65	0.73	0.79	0.34	0.73	0.29	1.00

0.03  $\mu\text{g}/\ell$  으로 나타났다. 또한, 부산지역 강우중 중금속의 평균농도는 캐나다의 Ontario주에서 Barrie *et al.* (1987)가 조사한 결과에 비해 2~4배 정도 높았고, Cd은 약 17배나 높은 농도를 보였다. 그리고, 원소에 따라 다소 차이는 있으나 미국 중앙대서양 연안 Lewes, Delaware에서 Church *et al.*(1984)가 측정된 농도에 비해 약 10배 정도 높은 농도였고, 서대서양 Bermuda섬에서 보다는 100배 정도 높게 나타났다. 한편, 국내의 경우에서 강우중 중금속원소중 Cd의 평균농도는 충북 청원군에서 노세원 *외*(1993)가 조사한 2.7 ppb의 분석치와 거의 동일한 수준을 나타내었지만, Pb은 부산지역이 충북지역의 14.3 ppb에 비해 약 1.3배 정도 높은 농도를 나타내었다.

Table 1에서 알 수 있듯이 부산지역 전체 강우중 중금속의 시기별 평균농도변화 양상을 살펴보면, Al, Fe, Pb, Ni, Cd은 1월에 가장 높았으며 분석대상의 전 성분이 1월~4월 사이에 평균농도는 다른 시기에 비하여 높은 결과를 나타내었다. 그러나, 6월부터 낮아져서 7월 전 성분이 가장 낮은 농도를 나타내었고, 8월에서 9월 사이에 다소 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, Figs. 2~5에 각 지점별 강우중 중금속원소의 시기별 농도변화 경향을 나타낸 결과를 살펴보면, 해안에 가장 인접한 지점 P1은 봄철의 3~4월 사이에 대부분의 성분이 높고 하절기 6~7월에 농도감소가 나타나, 8월에는 다시 증가경향을 나타내었다. 지점 P2에서는 마찬가지로 봄철의 3~4월 사이에 농도증가가 나타났고, 하절기

에는 감소 가을에 증가양상을 나타내었으며, 해안에서 떨어진 P3과 P4도 P1과 P2와 유사한 경향을 나타내고 있었다. 이러한 결과를 나타낸 원인중의 하나는 측정개시의 전 연도 11월의 강우량이 5 mm정도였으며 12월에는 강우가 없었으며, 측정기간동안의 2월에는 부산지역의 강우량이 6.5 mm정도로 작았던 것과도 상관이 있는 것으로 판단되며, 4월에는 최대 풍속이 21.7 m/s로 나타나 대기 비산량의 증가가 일어남으로써 높은 농도를 나타낸 것으로 사료된다. 그리고, 강우량이 다른 기간에 비해 상당한 증가가 나타나는 6~7월의 장마기간동안에 가장 낮은 농도를 나타내었으며, 이는 강우의 세정효과에 의해 대기중 농도의 감소와 강우에 의한 희석효과와 영향으로 판단된다. 뿐만아니라, 김은경 *외* (1996)가 강하분진 중의 중금속농도의 연구결과에서 분진량의 증가에 따라 중금속농도의 증가를 설명하고 있는 것과 마찬가지로 강우의 경우에 있어서도 대기중 부유입자등의 분진량과 강우중의 중금속성분의 농도와도 상관성이 큰 것으로 판단된다.

그리고 관측된 전 지점에서 분석가능한 양의 강우시료가 동시에 확보된 시기(3월, 4월, 6월, 7월, 8월, 9월, 11월) 동안 측정된 중금속의 농도수준을 지점별로 비교하여 Table 2에 나타내었다. 부산지역의 4개 지점중 가장 내륙지역인 지점 P4에서 다른 지역에 비해 Al, Fe, Zn이 높게 나타났으며 해안에 가장 인접한 지점 P1에서는 분석대상 항목중 Cu를 제외한 모든 성분이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한, 지점 P1을 제외한 지점에서는 Pb과 Zn이 유사한 농도수준을 나타내어, 이들 성분들은 발생원 상태에서의 유사성을 가질수 있는 가능성이 높은 것으로 사료된다. 한편, 小林和池澤(1979)는 대기중 Mn의 거동을 해석하여 Mn이 제강산업에 의한 대기오염의 지표라고 지적하고 있지만, 본 연구의 결과에서는 고정발생적인 제강산업의 영향을 받을 수 있는 제강시설과 가장 인접하게 위치한 지점 P2에서 Mn의 농도가 다른 지점에 비해 높지 않았고, 고정 발생원에 맞은 편에 위치하고 주풍방향이 남서풍인 지점 P1에서도 Mn의 농도는 내륙에 비해서 월등히 낮은 결과를 나타내고 있었으며, 오히려 교통량이 많고 도시중심부인 지점 P3에서 높은 농도를 나타내었다. 따라서, 본 연구

Table 5. A comparison of wet depositional fluxes of heavy metals to the ocean

	Al	Fe	Pb	Zn	Mn	Cu	Ni	Co	Cd	reference
Pusan Coast	121.1	177.2	14.4	12.9	6.19	0.64	1.03	1.01	1.02	this study
Sargasso Sea	-	7.39	1.18	1.76	0.41	1.01	0.32	-	0.09	Jickells et al., (1984)
Mid-Atlantic Coast	-	19.2	3.72	7.92	1.60	0.84	0.98	-	0.22	Church et al., (1984)
Chesapeake Bay	13.6	10.4	0.50	1.34	1.19	0.26	0.26	-	0.05	Scudlark et al., (1994)

All measurements in mg/m<sup>2</sup>/yr.

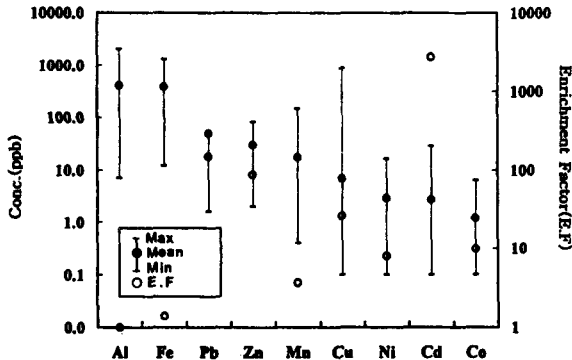


Fig. 6. Mean concentrations and enrichment factors for heavy metals in Pusan precipitation.

결과에서 Mn이 제강산업에 의한 지표성분으로서 평가할 수 있는 항목으로 추정하기는 어려운 것으로 판단된다. 또한, 전 지점에서 특히 Cd의 농도수준이 가장 유사한 결과를 나타내고 있는 것으로보아 강우중 중금속성분의 대기오염에 대한 광역지역의 수준을 나타낸다고 판단되며, 지역별로의 농도수준차가 적게 나타난 결과는 Cd자체가 특정 발생원에서의 기여가 없는 한 지역적으로 큰 차이를 나타낼 수 없다는 것을 반영하고 있는 것으로 사료된다.

### 3.2 중금속원소의 농축률(Enrichment Factor) 및 상관관계

강우중 중금속원소들을 측정 한 후 토양(지각)에서 기원된다고 생각되는 Al을 기준으로 각 중금속의 농축률(Enrichment Factor; E.F)을 계산하여 중금속 원소들의 기원을 추정하고 있다(Duce et al., 1976; Buat-Mernard and Chesselet, 1979; Mackenzie et al., 1979). 본 연구에서도 다음과 같이 Chester(1991)의 평가 방법에 근거하여 각 중금속성분의 농축률을 추정하였다.

$$EF = \frac{(E/Al)_{sample}}{(E/Al)_{Crust}}$$

여기서, (E/Al)<sub>sample</sub>은 강우중 Al농도에 대한 임의의 중금속원소농도 비율이며, (E/Al)<sub>Crust</sub>는 Taylor(1964)의 자료를 바탕으로 구한 지각중 Al에 대한 임의의 중금속원소 평균농도 비율이다. Chester(1991)은 중금속성분의 농축률이 1에 가까우면 지각기원으로, 10이상이면 비지각기원으로 설명하고 있다. 본 연구에서 추정된 부산지역 강우중 중금속원소들의 평균농도를 근거로 구한

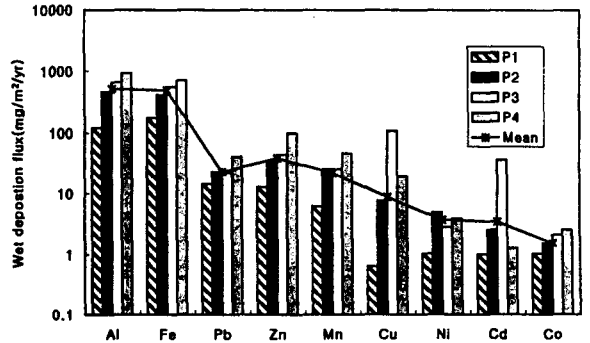


Fig. 7. Wet deposition fluxes of heavy metals from 4 sites in Pusan.

농축률(EF)을 Table 3에 나타내었으며, 중금속성분의 농도수준과 농축률을 Fig 6에 나타내었다. 이들 결과에서 알 수 있듯이 강우중 중금속성분의 농도변화폭은 Cu가 가장크게 나타났으며, 중금속원소의 농축률의 경우는 Fe, Mn, Ni, Co가 농축률 10 이하로 나타나 지각기원에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으며, 농축률이 10~100인 Zn과 Cu, 100~1000인 Pb, 1000 이상인 Cd등의 원소들은 인위적 오염이 많은 성분으로 추정된다. 그리고, 이 중에서도 특히 농축률이 상당히 높은 Cd과 Pb이 비지각기원의 대표적 원소로 나타났다. 또한 Table 3에서 알 수 있듯이 Mn을 제외한 Pb, Zn, Cu, Ni은 외국의 연구결과에 비해 농축률이 상당히 낮게 나타났다. 본 연구결과에서 농축률이 가장 높은 Cd의 경우에서도 외국에 비해 낮은 결과를 나타냄으로서 부산지역 강우에서 토양이외의 기여가 외국에 비해 적은 것으로 나타났다.

한편, 부산지역 강우중 중금속성분들간의 상관관계를 Table 4에 나타내었다. 농축률로부터 Al과 동일하게 지각물질 기원으로 추정된 Fe과 Mn은 Al에 대하여 상관계수가 각각 r=0.74와 0.82로 다른 원소에 비해 상대적으로 높은 정의 상관성을 나타내었으며, Fe역시 Mn과 r=0.73로 높은 상관성을 나타내었다. 또한, Mn은 Ni과 Co와도 상관성이 0.73과 0.79로 높았고, Pb과 Zn도 높은 상관성(r=0.87)을 보였다. 그리고 가장 높은 농축률을 나타낸 Cd은 Cu와 r=0.99로 가장 높은 상관성을 나타내었다.

### 3.3 해양으로 유입되는 중금속의 습성침적 플럭스(wet deposition flux)

지금까지 많은 연구자들은 해양에서 중금속성분의 지화학 순환에 있어서 대기로부터의 중금속성분의 유입이 중요한 역할을 한다고 보고 하였다(Scudlark et al.,

1994; Jickells et al., 1984; Church et al., 1984). 따라서, 몇몇 연구자들은 강우에 의해 대기로부터 공급되는 중금속성분의 습성침적 플럭스를 추정하여 왔으며, 이는 습성침적이 대기중에 존재하는 물질의 중요한 제거 기작이며, 중금속성분들이 해양으로 유입되는 중요한 과정이기 때문이라고 설명하고 있다(Church et al., 1984; Jickells et al., 1984). 본 연구결과에서도 부산지역에서 강우에 포함되어 인근 해양으로 유입되는 중금속원소의 농도수준을 알아보고자 Jickells et al.(1984)의 실험식을 근거로 해안에 가장 인접한 지점 P1에서 전시기동안 측정된 중금속의 평균농도에 1996년 한해 동안의 총 강우량을 곱하여 계산한 습성침적 플럭스( $mg/m^2/yr$ )를 계산하여 Table 5에 나타내었으며, 부산지역 4개 지점에서의 습성침적 플럭스를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 해양에 인접한 지점 P1에서 측정된 중금속의 평균농도를 바탕으로 계산한 해양으로 유입되는 중금속의 습성침적 플럭스의 순서는  $Fe > Al > Pb > Zn > Mn > Ni > Cd > Co > Cu$ 로, 부산지역 4개 지점에서 계산한 습성침적 플럭스와는 다소 차이를 나타내었다. 이는 지점 P1이 다른 지점과 달리 Al보다 Fe이 높은 농도를 나타내었고, Cu가 가장 낮았기 때문으로 판단된다.

본 연구의 결과 부산에 인접한 해양으로 유입되는 중금속원소의 습성침적 플럭스는 대서양 Sargasso Sea에서 측정된 Jickells et al.(1984)의 연구결과와 비교해서 원소에 따라 약 3.2~24배 정도로 높았으나, Cu는 오히려 1.5배 정도 낮게 나타났다. 또한, 미국 중앙대서양 연안 Lewes, Delaware에서 측정된 Scudlark et al.(1994)의 연구결과와 비교하더라도 약 1.6~9.2배 정도 높게 나타났고 Cu는 다소 낮았으며, 미국 동부 버지니아 근처 Chesapeake만에 비해서는 약 2.5~29배 정도 높게 나타났다.

이처럼 부산지역에서 강우에 포함되어 인근 해양으로 공급되는 중금속의 농도가 다른 해양주변 지역에 비해 상당히 높은 것을 알 수 있으며, 이는 대기중에 존재하는 중금속의 농도가 높은 것을 반영한다고 볼 수 있다. 또한, 본 연구에서는 외국의 연구결과와 마찬가지로 각 중금속원소 중에서 대체로 농도가 높은 Al과 Fe의 습성침적 플럭스가 가장 높게 나타났다. 그리고 농도가 다소 낮고 습성침적 플럭스의 최소치를 나타내는 성분의 경우는 외국의 연구결과에서는 Cd이 본 연구에서는 Cu가 가장 낮은 결과를 나타내어 지역적으로 중금속성분의 flux 차이가 나타났으며, 이는 지역에 따른 발생원 기여의 차이가 flux차이를 나타내는 원인중의 하나라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 해안에 인접해 있는 부산지역의 특성을 고려하여 해안지역인 해운대(P1)와, 대연동 지점(P2) 그리고 보다 내륙지역인 서면(P3)과, 동래 지점(P4)에서 1996년 1~ 11월까지의 기간동안 강우를 채취하여 중금속원소들의 시기별·지점별 농도분포를 파악하고, 중금속의 기원 및 연간 해양으로 유입되는 습성침적 플럭스를 살펴보았다.

부산지역 강우중 중금속의 농도 함량은  $Al > Fe > Zn > Pb > Mn > Cu > Ni > Cd > Co$ 순이었다. 지점별로 중금속 농도를 비교해보면 가장 내륙지역인 동래에서 높은 농도를 나타내었고, 해안에 인접한 해운대에서 가장 낮은 농도를 보였다.

지각 원소인 Al을 기준으로하여 강우중 중금속의 농축률(EF)을 구한 결과 Pb, Zn, Cu, Cd는 농축률이 1보다 훨씬 크게 나타났고 농축률의 순서는  $Cd > Pb > Zn > Cu$ 이었다. 이로써 Cd 과 Pb이 비지각 기원 성분으로 추정된다. 또한, 농축률로부터 Al과 동일하게 지각 물질 기원으로 추정된 Fe, Mn은 Al과 높은 상관성을 나타내어, 이들 성분들의 공급원 및 지구화학적 거동이 유사함을 시사하고 있다.

강우에 포함되어 부산에 인접한 해양으로 유입되는 중금속성분의 습성침적 플럭스는( $mg/m^2/yr$ ) Al(121.1), Fe,(177.2), Zn(12.9), Mn(6.19), Pb(14.4), Cu(0.64), Ni(1.03), Cd(1.02), Co(1.01)로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- 김은경, 옥곤, 김영섭, 1996, 부산지역 대기 중 강하분진의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(4), 463~471.
- 강희양, 1998, 도로변 지표생물을 이용한 대기오염이 식물에 미치는 영향에 관한연구, 한국환경위생학회지, 14(2), 29~41.
- 노세원, 송기형, 박용남, 1993, 공침 선농축법에 의한 강수속의 Pb와 Cd의 정량분석, 대기보전학회지, 9(4), 265~270.
- 小林 樽樹, 池澤正 : 環境大氣中におけるMnの舉動, 第20回大氣汚染學會講演要旨集, 429(1979).
- 安部喜也, 西川雅高 : 第25回日本大氣汚染學會講演要旨集, 1984.
- 임영옥, 정용, 1989, 호흡성분진중의 중금속 오염도에 관한 조사연구, 한국대기보전학회지, 5(1), 68~78.
- Arimoto, R., R. A. Duce, B. J. Ray, A. D. Hewitt and J. Williams, 1987, Trace elements in the atmosphere of American Samoa, J. of Geophy. Res., 92(D7), 8465~8479.
- Barrie, L. A., S. E. Lindberg, W. H. Chan, H. B. Ross, R. Arimoto and T. M. Church, 1987, On the concentration of trace metals in Precipitation, Atmos. Environ., 21(5), 1133~1135.
- Buat-Menard, P. and R. Chesselet, 1979, Variable influence of the atmospheric flux on trace metal chemistry of oceanic suspended matter, Earth Planet. Sci. Lett., 42, 399~411.
- Church, T. M., J. M. Tramontano, J. R. Scudlark, T. D. Jickells, J. J. Tokos, and A. H. Knap, 1984, The wet deposition of trace metals to the western Atlantic ocean at the Mid-Atlantic coast and on Bermuda, Atmos. Environ.,

- 18, 2657~2664.
- Chester, R., A. S. Berry, K. J. T. Murphy, 1991, The distributions of particulate atmospheric trace metals and mineral aerosols over the Indian Ocean, *34*, 261~290.
- Duce, R. A., G. L. Hoffman, B. J. Ray, I. S. Fletcher, G. T. Wallace, J. L. Fasching, S. R. Piotrowicz, P. R. Walsh, E. J. Hoffman, J. M. Miller and J. L. Heffter, 1976, Trace metals in the marine atmosphere: Source and fluxes, in *Marine Pollution Transfer*, edited by H. L. Windom and R. A. Duce, Lexington Books, Lexington, Mass, 77~119.
- Jickells, T. D., A. H. Knap, and T. M. Church, 1984, Trace metals in Bermuda rainwater, *J. geophys.* 89(D1), 1423~1428.
- Mackenzie, F. T., R. J. Lantzy and V. Patterson, 1979, Global trace metal cycles and predictions, *Math. Geol.*, 11, 99~142.
- Nriagu, J. O, 1979, Global inventory of natural and anthropogenic emission of trace metals to the atmosphere, *Nature*, 279, 409~400.
- Scudlark, J. R. K. M. Conko and M. Church, 1994, Atmospheric wet deposition of trace elements to Chesapeake Bay, *Atmos. Environ.*, 28(8) 1487~1498.