

Research Article

Open Access

태안지역 강우의 중금속 함량 평가

정구복,¹ 김민경,¹ 이종식,¹ 김원일,¹ 김건엽,¹ 고병구,² 강기경,¹ 권순익^{1*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²국립식량과학원

Wet Deposition of Heavy Metals during Farming Season in Taean, Korea

Goo-Bok Jung,¹ Min-Kyeong Kim,¹ Jong-Sik Lee,¹ Won-Il Kim,¹ Gun-Yeob Kim,¹ Byong-Gu Ko,² Kee-Kyung Kang¹ and Soon-Ik Kwon^{1*} (¹National Academy of Agricultural Science(NAAS), RDA, 150 Suin-ro, Suwon 441-707, Republic of Korea, ²National Institute of Crop Science(NICS), RDA, 1085 Neidong, Miryang 627-803, Republic of Korea)

Received: 8 June 2011 / Accepted: 22 June 2011
© The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: This experiment was conducted to investigate the distribution and burden characteristics of heavy metal in the rainwater sampled at Taean area, in the middle part of Korea, from April 2002 to October 2003.

METHODS AND RESULTS: The relationship between concentration of heavy metal and other chemical properties in the rainwaters was also evaluated. Chemical properties in the rainwater were various differences with raining periods and years. It appeared that a weighted average pH values of rainwater was ranged from 5.0 to 5.1. Heavy metal concentrations in the rainwater were ranked as Pb > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Cd. As compared with heavy metal concentrations of rainwater in 2002, Cu, Pb, and Zn were higher than other elements in 2003. There were positive correlation between major ionic components, such as NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, SO₄²⁻ and NO₃⁻, and As, Cd, Zn, Cr, and Ni concentrations in rainwater. For heavy metal distribution of rainwater, the order of average enrichment factor was Cd > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr, and these were relatively higher than the natural components such as Fe, Mg and Ca. The monthly enrichment factor were relatively high, from August to October at Taean. The monthly amount of heavy metal precipitation was high in the rainy season from July to

August because of great influence of rainfall.

CONCLUSION(s): The results of this study suggest that the heavy metals(Cd, Pb, As, Cu, and Zn) of rainwater is strongly influenced by anthropogenic sources rather than natural sources.

Key Words: Enrichment factor, Flux, Heavy metal, Rain-water

서론

최근 급속한 산업화로 환경오염에 대한 인식이 높아지면서 선진 국가에서는 대기침적 중 인위적인 유래로 기인되는 중금속 등 미량성분의 증가배턴이 산성비와 더불어 중요한 문제로 대두되고 있다. 대기 중 오염물질은 공기중에서 직접적인 피해를 주기도 하지만 주로 강우 등에 의해 낙하되면서 세정 또는 씻겨 내림으로 강우내 중금속 등이 증가한다(Nriagu, 1989; Lee *et al.*, 2003; Al-Khashman, 2005; Chudaeva *et al.*, 2006).

대기 중의 중금속은 강우, 강설 및 건식침적 등을 통하여 토양 및 수계에 유입될 수 있으며(Takeda *et al.*, 2000), 이렇게 유입된 중금속은 장기간에 걸쳐 생물 독성 및 축적을 야기시켜 환경생태계를 교란시킬 수 있다. 대기 중금속의 부화 원인은 크게 자연적 부화와 인위적 부화로 나눌 수 있다(Nriagu, 1989; Roy and Négre, 2001; Luck and Ben Othman, 2002; Hu *et al.*, 2003). 자연적 부화는 주로 토양 입자와 바다에서 유래되는 것을 의미하며, 인위적 부화는 주로 금속제련, 화석연료 연소, 자동차 매연 및 기타 인간활동

*교신저자(Corresponding author):
Tel: +82-31-290-0227 Fax: +82-31-290-0206
E-mail: sikwon@korea.kr

에 의한 오염이다(Halstead *et al.*, 2000; Al-Momani, 2003; Chudaeva *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2011;). 이러한 대기 중 강우에 의한 중금속 부화는 주로 세정과 흡수·흡착작용으로 침적되며, 습식침적에서는 80% 이상의 중금속이 강우에 용해되는 것으로 알려져 있다(Hou *et al.*, 2005). 특히 연소 과정에서 배출되는 중금속류는 운반체가 소립자로 구성되어 상대적으로 용해도가 높아 강우에 쉽게 녹고, 낮은 pH에서는 강우오염을 가중시킨다(Conko *et al.*, 2004; García *et al.*, 2006). 기존의 여러 연구자들이 강우의 중금속 부화와 관련하여 오염상태의 상대적인 지수로써 지각의 조성을 근거한 부화계수(Enrichment Factor, EFc) 값을 비교 검토하였다(Hu *et al.*, 2003; Jung *et al.*, 2007; Vuai and Tokuyama, 2011). 강우 중 부화계수 값이 1~10은 지각의 원소조성 차이에 의한 것으로 부화상태가 아니며, 10~100은 지각의 화학조성보다 강우가 상대적으로 부화가 된 상태, 100 이상은 인간 활동에 의한 인위적인 오염이 심각한 고농도 부화상태로 정의하고 있다(Duce *et al.*, 1975; Al-Momani, 2003).

우리나라는 북반구의 중위도인 극동지역에 위치하여 아직은 대기 산성비 및 중금속 부화와 관련하여 뚜렷한 피해사례는 없었다. 또한 우리나라 강우와 관련된 기존의 보고(Lee *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2004)는 주로 화학성분 조성 및 산성비와 관련된 연구였다. 따라서 본 연구는 충남 태안지역 빗물의 중금속 농도 및 부화특성을 구명하기 위하여 2002년과 2003년에 영농기간 4~10월 사이에 매 강우마다 빗물을 채취하여 중금속 및 주요 화학성분들을 분석하였다. 분석된 결과를 바탕으로 빗물 중 각 중금속 가중평균 변화, 화학성분과의 관계, 부화계수 및 부하량을 비교 검토하였다.

재료 및 방법

빗물채취 및 분석

본 조사는 충청남도 태안군에 위치한 태안군 농업기술센터(36° 43' 47" 93 N, 126°, 18', 26", 18 E)에 설치된 강우 자동채취기를 이용하여 영농기간인 4월부터 10월까지 2002년과 2003년에 각각 25점 및 26점의 빗물을 채수하였다. 강우 채취는 Wet sampling 방식의 자동채취기(AQUA Controller사, 일본)를 사용하여 매 강우마다 채수하였고, 조사시기

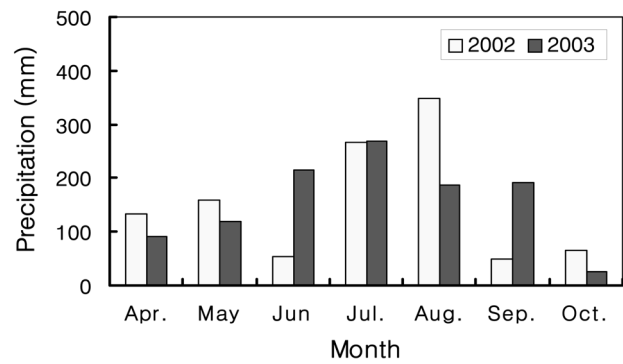


Fig. 1. Monthly integrated precipitation at Taean area during 2002-2003.

의 강우량은 Fig. 1과 같다. 빗물의 화학성분은 수질오염공정시험법(환경부, 2010)과 Standard Method(APHA, 1992)에 준하여 분석하였다. pH와 EC는 각각 Orion사의 EA 940 ion analyzer와 Model 162 conductivity meter를 사용하여 측정하였다. NH_4 는 차아염소산 이온의 공존하에서 페놀과 반응하여 생성되는 청색의 Indophenol을 640 nm에서 측정하는 Indophenol법, SO_4 는 BaCl_2 에 의한 비탁법으로 정량하였다. 또한 NO_3 는 1N HCl로 hydroxide와 carbonate에 의한 영향을 제거하고 흡광도를 측정하는 자외선 흡광도법, Cl은 치오시안산 제2수은법을 사용하여 비색 정량하였다. 또한 빗물 중의 중금속 및 양이온 분석은 ICP-OES(GBC Integra XMP, Australia)와 ICP-MS(HP, Agilent 7500cs, USA)를 이용하여 측정하였다.

화학성분 및 부화계수 평가

빗물 중의 중금속 함량과의 상호관계를 살펴보기 위하여 각 화학성분 조성과 Fig. 1의 강우량을 고려한 가중평균(volumn-weighted mean) 이온 농도는 Table 1과 같다. pH 값은 5.0~5.1로 2002년 및 2003년에 유사하였고, 전체 범위는 최저값이 3.9인 산성에서 최고치 7.3인 염기성까지 넓게 분포하였다. 빗물 중 양이온 농도는 $\text{Na} > \text{NH}_4 > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 의 순이었으며, 음이온은 $\text{SO}_4 > \text{NO}_3 > \text{Cl}$ 의 순으로 나타났다. 본 조사 결과는 Lee *et al.*(2007)이 2005년에 조사한 수원지역 빗물의 이온조성과 유사하였으나 1999년 조사한 수

Table 1. Volumn-weighted mean of ion concentration in rainwater samples from Taean areas

Sampling period		pH	EC (uS/cm)	NH_4	Ca	Mg	K	Na	SO_4	NO_3	Cl	Rainfall (mm)
2002 Apr.~Oct. (n=25) ²⁾	VWM ¹⁾	5.0	12	28.9	10.5	5.7	7.9	62.0	111.8	38.9	67.2	572.5
	Max.	6.1	377	387.8	315.2	207.8	72.6	273.9	1536.4	688.5	566.8	183.0
	Min.	3.9	2	5.4	2.1	0.8	3.5	21.2	49.1	8.1	2.8	1.5
2003 Apr.~Oct. (n=26)	VWM	5.1	24	49.8	9.6	5.1	4.7	44.5	84.0	58.4	27.0	684.5
	Max.	7.3	95	189.9	78.3	56.2	30.9	107.0	333.4	325.0	163.2	165.0
	Min.	4.0	4	1.83	1.3	0.8	0.5	1.4	1.6	2.1	1.4	1.5

¹⁾ VWM : Volumn-weighted mean, ²⁾ Sample number

원지역 이온농도보다 대체로 낮은 특징을 보였다.

빗물 중의 중금속과 화학성분에 대한 오염특성을 비교하기 위하여 중금속별 오염상태의 상대적인 지수로 표현할 수 있는 부화계수(Enrichment Factor, EFc)를 산출하였다. 부화계수는 어떤 금속에 대한 배경농도와 비교하여 오염상태의 절대성을 평가하는데 유용하며, 지각과 토양입자의 전형적인 지시원소인 Al 함량을 이용하여 오염정도를 평가하였다. 강우 중 부화계수의 환산식은 $EFc = [(X/Y_{Al})_{rainwater} / (X/Y_{Al})_{crust}]$ 로 표현되며, 여기에서 $(X/Y_{Al})_{rainwater}$ 은 빗물 중의 원소(중금속) X 및 Al의 농도비, $(X/Y_{Al})_{crust}$ 은 지각(토양) 중의 원소(중금속) X 및 Al의 농도비를 각각 나타낸다(Duce *et al.*, 1975). 본 논문의 부화계수 환산은 Bowen(1979)이 제시한 지각 중의 원소농도를 기준으로 환산하였고, 부화계수 값이 높을수록 인위적인 발생원에 의한 영향이 큰 것으로 설명할 수 있다.

결과 및 고찰

태안지역 영농기에 내린 빗물의 중금속 함량과 부화특성을 밝히기 위하여 2002년과 2003년에 채수하여 분석한 강우 중의 중금속별 함량분포와 강우량을 고려한 가중평균은 Table 2와 같다. 빗물 중의 중금속별 산술평균 농도와 강우량을 고려한 가중평균 값은 $Pb > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Cd$ 순이었다. 빗물 중 평균 농도는 2003년과 비교하여 2002년에 Cu 및 Zn이 높았으나 Cd, Cu, Zn 및 As의 가중평균은 오히려 2003년에 높게 나타났다. 본 조사 결과에서 강우의 중금속 농도 편차가 큰 것은 봄철의 황사 발생 시 높은 농도의 영향을 받은 것으로 생각되며, 이러한 황사의 영향은 일본지역

까지 미치는 것으로 보고되었다(Takeda *et al.*, 2000; Vuai and Tokuyama, 2011).

동일 시기에 조사한 수원지역 강우의 가중평균 농도 값은 $Zn > Pb > Cu > Ni$ 순이며, 대체적으로 수원과 비교하여 태안에서 낮은 특징을 보였다(Jung *et al.*, 2007). 또한 Hu *et al.*이 조사한 Singapore 지역 강우와 비교해 보면, 미량성분인 Al 및 Fe는 15 ug/L 이상, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn 및 Ti은 1~10 ug/L, 그리고 Cd 및 Co는 1 ug/L이하로 농도가 분포하여 본 결과와 비슷한 경향을 보였다(Hou *et al.*, 2005; García *et al.*, 2006).

Table 3은 태안지역 빗물의 월별 중금속 평균농도 변화양상을 나타낸 것이다. 월별 농도변화는 2002년도 4~5월 및 10월에 대체로 높았고, 2003년은 10월이 대체로 높은 경향이였다. 대체로 봄철 및 가을철에 중금속 농도가 높은 것은 Fig. 1의 강우량이 다른 달보다 적은데 그 원인이 있다고 볼 수 있으며, 특히 2002년 4월 및 5월에 높은 것은 황사 대발생의 영향이라고 판단된다(Jung *et al.*, 2007). 본 조사 결과를 보면 강우 중의 년차 및 월별 중금속 농도 차이는 있었으나 그 범위는 Galloway *et al.*(1982)이 제시한 세계의 빗물 중금속 평균농도와 유사하였다. 또한 Roy and Négrel(2001)이 보고한 프랑스 중부지역의 중금속 농도패턴과 범위 값과는 유사하였으나, Pb 성분의 농도(1.30~465 ug/L) 및 부하량(996 ug/m²/y)은 프랑스가 상대적으로 높은 경향이였다. 다른 한편으로 Takeda *et al.*(2000)은 자연적인 토양입자 유래 원소는 초기 강우에 대부분이 세정 희석되는 반면, 중금속인 Cd, Pb 및 Zn 성분은 강우에 의한 영향 및 계절적인 변화 폭이 크지 않다고 보고하였다.

Table 4는 태안지역 영농기 빗물의 화학성분과 중금속 농

Table 2. Comparison of heavy metal concentration in rainwater samples from Taean areas

Year	metals	Mean	S.D.	Median	Min	Max	VWM
		(ug/L)					
2002 (n=25) ¹⁾	Cd	0.26	0.31	0.07	0.03	0.91	0.10
	Cu	5.94	5.73	4.05	1.43	26.41	3.54
	Pb	9.42	1.78	8.87	7.19	16.32	8.83
	Zn	19.87	23.73	7.19	3.18	104.92	8.03
	Ni	3.85	6.69	1.58	0.43	32.82	1.53
	Cr	0.96	0.91	0.78	0.15	4.41	0.50
	As	1.22	1.39	0.79	0.14	6.10	0.57
2003 (n=26)	Cd	0.08	0.06	0.06	0.03	0.23	0.07
	Cu	6.84	10.06	4.22	1.23	52.40	4.73
	Pb	10.09	2.72	9.31	8.83	22.91	9.59
	Zn	11.49	12.44	8.05	1.30	51.88	8.17
	Ni	2.64	6.77	0.73	0.23	35.03	1.03
	Cr	0.65	0.67	0.43	0.02	3.00	0.45
	As	0.53	0.50	0.28	0.15	1.86	0.58

¹⁾ Sample number

Table 3. Monthly variation of heavy metal concentration in rainwater samples from Taean areas

Year	Months	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
		(ug/L)					
2002 (n=25) ¹⁾	Apr.	0.33	11.02	9.26	23.09	12.07	1.01
	May	0.28	5.28	9.04	38.43	5.12	1.92
	Jun	0.13	3.74	8.98	5.90	1.35	0.61
	July	0.10	4.51	10.54	14.38	3.07	0.97
	Aug.	0.04	6.04	8.64	9.20	1.16	0.77
	Sep.	0.35	6.68	8.86	9.05	2.25	0.93
	Oct.	0.71	5.20	10.52	40.94	4.22	0.72
2003 (n=29)	Apr.	0.09	9.82	9.72	13.50	1.63	0.58
	May	0.13	4.25	9.77	17.78	2.10	1.12
	Jun	0.05	8.81	9.19	6.39	0.62	0.57
	July	0.07	10.44	11.26	8.51	0.78	0.43
	Aug.	0.12	2.96	9.69	10.95	1.58	0.51
	Sep.	0.06	2.15	9.12	6.29	0.68	0.35
	Oct.	0.07	8.64	10.48	23.44	14.05	1.59

¹⁾ Sample number

도와의 관계를 나타낸 것이다. 빗물의 중금속 성분 중 Cd, Zn, Ni, Cr 및 As 함량은 Cl성분을 제외한 모든 화학성분과 고도의 유의한 정의 상관을 보였다. 그러나 Pb 성분은 모든 화학성분과 관련이 없는 것을 나타냈고, Cu성분도 일부 성분과 관련성이 있으나 대체로 상관관계수가 낮게 나타났다. 빗물 중 이온 성분의 총량을 나타내는 염농도, 양이온 및 음이온의 합은 Pb성분을 제외한 다른 모든 중금속과 고도의 정의 상관을 보였다. 특히 모든 양이온과 음이온 함량이 Cd, Zn 및 As 농도와의 상관관계수가 매우 높아 관련성이 큰 것을 알 수 있었다. 여러 보고에 따르면 인간활동에 의한 높아지는 금속류는 대기확산 및 오염원 조건에 의해 각 화학성분과의 관련성이 결정되며, 이러한 전형적인 예로써 여름철 전력공장에서 유출되는 동반 오염물질인 황 이온이다(García *et al.*, 2006). 또한 Conko *et al.*(2004)이 보고한 미국 버지니아주 빗물의 중금속 가중평균 값이 온도가 높은 계절에 2배 이상의 농도

를 보여 오염물질 간의 상호 관련성도 바람, 온도, 강우특성 등 대기확산 조건에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

Fig. 2는 빗물의 중금속별 오염상태의 상대적인 지수로 표현하기 위하여 지각 중의 중금속 농도를 기준으로 계산하여 나타낸 부화계수 값이다. 빗물의 중금속 부화계수 값은 년차별로 약간의 차이는 있으나 그 경향치는 대체로 Cd > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr 순이었다. 또한 일반 양이온 및 미량성분의 부화계수 값도 Na > K > Mn > Ca > Mg > Fe 순으로 Jung *et al.*(2007)이 보고한 동일 시기의 수원지역 강우에서 나타난 경향치와 유사하였다. 부화계수를 제안한 Duce *et al.*(1975)은 부화계수 값이 1~10은 토양 및 지각의 원소 조성 차이에서 비롯되어 부화상태가 아니며, EFc 10~100은 지각의 자연 화학조성보다 강우 중 성분조성이 상대적으로 부화가 있는 상태, EFc 100 이상은 인간활동에 의한 인위적인 오염으로 부화조건이 매우 높은 상태로 정의하였다.

Table 4. Correlation coefficients between chemical composition and heavy metals concentration in rainwater samples from Taean areas(n=51)

Metals	EC	NH ₄	Ca	Mg	K	Na	Cations	SO ₄	NO ₃ ⁻	Cl	Anions
Cd	0.498***	0.524***	0.670***	0.641***	0.805***	0.757***	0.776***	0.657***	0.621***	NS	0.660***
Cu	0.424**	0.317*	NS	0.279*	0.323*	NS	0.294*	0.412**	0.486**	NS	0.416
Pb	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Zn	0.598***	0.798***	0.849***	0.747***	0.731***	0.583***	0.855***	0.701***	0.700***	NS	0.708***
Ni	0.782***	0.519***	0.398**	0.584***	0.569***	0.448***	0.560***	0.764***	0.724***	NS	0.777***
Cr	0.596***	0.847***	0.686***	0.627***	0.558***	0.399**	0.724***	0.607***	0.651***	NS	0.609***
As	0.749***	0.565***	0.662***	0.729***	0.876***	0.781***	0.815***	0.837***	0.807***	NS	0.844***

*, **, *** Significant at P = 0.05, 0.01, 0.001 respectively, NS : Not significant.

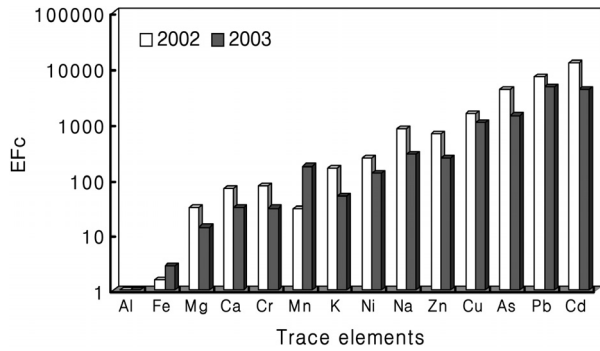


Fig. 2. Average enrichment factor of heavy metals in rainwater at Taean area during 2002-2003.

부화계수 환산의 기준물질인 Al은 토양입자 구성의 전형적인 기원원소이기 때문에 토양 및 지각 구성물질의 비산이나 기타 물리적 작용에 의해 발생된다. 따라서 지각조성과 비슷한 자연적 유래 성분들은 낮은 EF 값을 보이지만, 인위적으로 발생되는 성분들의 EF 값이 높은 특징을 보인다(Halstead *et al.*, 2000; Al-Momani, 2003; Hou *et al.*, 2005; García *et al.*, 2006).

본 조사결과에서도 빗물의 중금속 부화계수는 일반적으로 자연적으로 발생하는 원소로 알려진 철, 마그네슘 및 칼슘 성분과 비교하여 상대적으로 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 관련하여 Vuai and Tokuyama, 2011는 대만북부 섬에서 강우의 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn) 부화계수는 1,500 이상으로 인위적인 영향이 크다고 하였다(Luck and Ben Othman, 2002). 또한 Uygur *et al.*(2009)도 터키 이스탄불 강우의 부화계수를 평가한 결과, 다량성분인 K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn 및 Ti는 부화가 낮고 토양입자 등 자연적인 부하(Hu *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2003)인 반면, 중금속 류인 Cd, Cr, Co, Ni, Cu, V, Pb 및 Zn 성분은 인위적인 영향으로 부화 정도가 큰 것으로 보고하였다(Halstead *et al.*, 2000; Chudaeva *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2011; Vuai and Tokuyama, 2011).

태안지역 영농기에 대한 월별 빗물의 중금속 부화계수 값은 Fig. 3과 같다. 영농기의 월별 부화계수 값의 경향치는 대체로 8~10월에 높았으며, 상대적으로 갈수기인 4~6월이 낮게 나타났다. 중금속 원소별로 보면 인위적 발생원의 영향이 크다고 판단되는 빗물 중 Cd, Pb 및 As는 대체로 8~10월에 높았고, 봄철에 낮은 경향을 보였다. 다른 중금속류 중에서 Cu 및 Zn는 7~8월, Ni 및 Cr은 8~9월이 상대적으로 높게 나타났다. 이와 관련하여 Al-Momani (2003)는 강우 중 양이온인 Na, K, Mg 및 Ca의 부화증가는 주로 지각 및 해안에서 자연적으로 유래되나, 본 조사결과와 같이 부화계수가 높은 Pb 성분은 도로변 자동차 배기가스의 영향이 매우 크다고 하였다. 여러 보고(Takeda *et al.*, 2000; Roy and Négre, 2001; Luck and Ben Othman, 2002; Al-Momani, 2003; García *et al.*, 2006)에서도 대기 중의 중금속 부화의 주 원인은 지각 및 해안 등 자연적 부하, 그리고 자동차 배출 및 공장연소 등 인위적 부하로 크게 구분하고 있다.

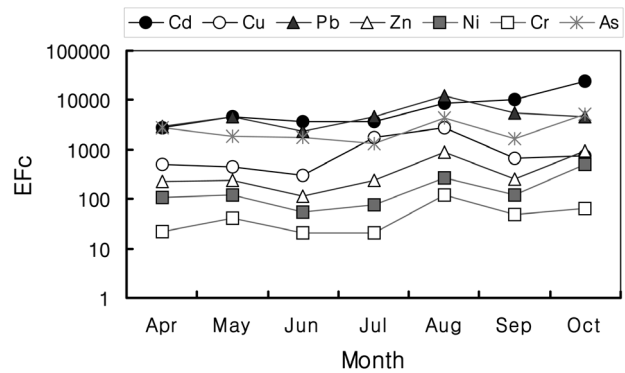


Fig. 3. Seasonal variation of enrichment factor of heavy metals in rainwater at Taean area during 2002-2003.

태안지역 2002년 및 2003년 영농기 빗물의 Al 함량과 중금속별 부화계수 값과의 관계는 Fig. 4와 같다. 일반적으로 부화계수의 지시원소인 Al 농도는 지각유래 원소와는 정의 상관관, 인위적인 오염원소와는 반대되는 부의 상관관을 보이는 특징이 있다(Hu *et al.*, 2003; Al-Momani, 2003). 이와 관련하여 Al-Momani(2003)은 강우 중 이온성분의 부화계수를 평가한 결과에서 Fe, Mn 및 Co는 부화계수가 10 이하로 인위적으로 오염되는 성분이 아니며, 인위적인 유래로 부화계수가 높아진 오염물질은 Al농도와 반비례 관계를 가진다고 하였다. 본 조사 결과에서도 부화계수의 지시원소인 Al 함량과 인간활동에 의하여 발생하는 것으로 알려진 중금속 부화계수와는 유의적인 부의상관을 보였다. 이러한 경향은 이온성분 중 부화계수가 높은 대부분의 중금속류가 인위적인 증가요인으로 발생되며, 특히 As, Cd, Zn 및 Pb 성분은 자연유래 부화보다 체련 및 연료공정 등의 대기 환산에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Nriagu, 1989; Halstead *et al.*, 2000; Hu *et al.*, 2003).

Fig. 5는 태안지역에서 채취한 영농기 빗물의 강우량 및 기중평균 농도를 근거로 하여 계산한 월별 중금속의 부하량 변화를 나타낸 것이다. 월별 강우의 중금속 부하량은 주로 강우량과 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 특히 강우량이 많은 7월 및 8월이 상대적으로 높았고, 강우량이 매우 적었던 2002년 6월, 9월과 2003년 4월, 10월에 낮은 부하량을 보였다. 빗물의 중금속별 부하량 순위는 Cu, Pb 및 Zn 성분이 대체로 높았고, Ni, Cr 및 As는 중간정도, Cd는 가장 낮게 나타났다. 이와 관련하여 미국 버지니아 강우의 년 중 부하량은 Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > As > Cd 순으로 본 조사 경향치와 일치하였고, 그 부하 원인으로는 자동차 관련 배출이 가장 크다고 하였다(Conko *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2003; Vuai and Tokuyama, 2011).

이상의 결과에서 태안지역 빗물의 중금속 부하는 일반 화학성분과는 달리 그 조성이 지각보다 상대적으로 매우 높아 인위적 활동에 의해 농축된 것을 알 수 있었다. 또한 강우 중 Pb, Cu 및 Zn 성분의 부하량이 상대적으로 높았고, 빗물의 기중평균 pH 값이 5.0~5.1로 산성조건인 것을 감안할 때 강우에 의한 중금속 농축도 증가할 수 있다고 판단되었다. 따라

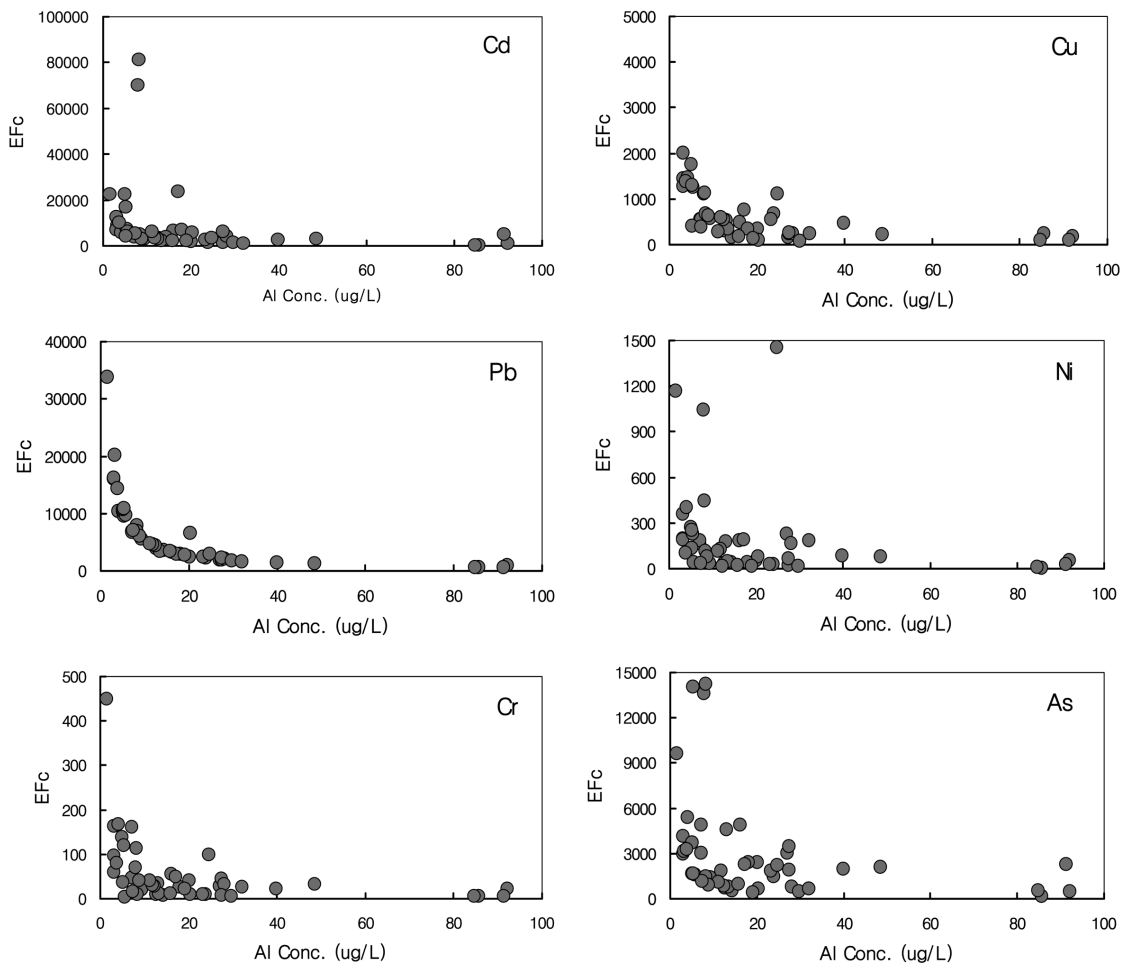


Fig. 4. The EFc-Al diagrams for heavy metals in rainwater at Taean area during 2002-2003.

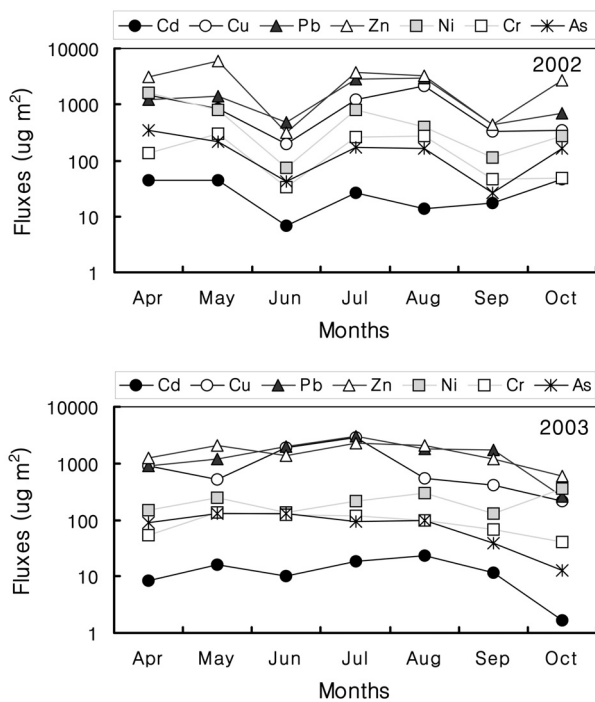


Fig. 5. Monthly Comparison of heavy metals fluxes in rainwater during 2002-2003 at Taean site.

서 빗물의 인위적인 오염원인 파악과 더불어 주 오염물질을 구명하기 위해서는 기존의 일반 이온조성뿐만 아니라 인위적인 원인이 높은 중금속 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

요 약

태안지역 영농기 빗물의 중금속 농도 및 부화특성을 구명하기 위하여 2002년과 2003년 4~10월 사이에 빗물을 채수하여 중금속 분포와 가중평균 변화, 화학성분과의 관계 및 부화정도를 비교 검토하였다. 빗물 중 화학성분 함량은 조사 시기에 따라 함량변이가 심하였고, 강우량 대비 pH의 가중평균 값은 5.0~5.1 수준이었다. 빗물의 중금속 가중평균은 Pb > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Cd 순이었고, 2002년과 비교하여 2003년에 Cu, Pb, 및 Zn 성분이 상대적으로 높게 나타났다. 강우 중의 주 이온성분(NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, SO₄²⁻ 및 NO₃⁻)은 중금속 중 As, Cd, Zn, Cr 및 Ni 성분함량과 고도의 정의 상관을 보였다. 빗물의 중금속 농도분포를 이해하기 위하여 부화계수(Enrichment factor)를 조사한 결과, 부화계수 평균치가 대체로 Cd > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr 순이었고, 주로 자연적 발생 유래원소로 알려진 Fe, Mg 및 Ca

등보다 상대적으로 높은 경향을 보였다. 월별 빗물의 중금속 부하계수는 8~9월이 상대적으로 높았고, 중금속의 습식침적은 대체로 강우량의 영향을 받아 강우기인 7~8월에 높은 경향을 보였다.

참고문헌

- Al-Momani, I. F., 2003. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources, *Atmos. Environ.* 37, 4507-4515.
- Al-Khashman, O. A., 2005. Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan, *Atmos. Environ.* 39, 6175-6183.
- Bowen, H. J. M., 1979. Environmental chemistry of the elements, Academic press. London, p.333.
- Cheng M. C., You C. F., Lin F. J., Huang K. F., Chung C. H., 2011. Sources of Cu, Zn, Cd and Pb in rainwater at a subtropical islet offshore northern Taiwan, *Atmos. Environ.* 45(11), 1919-1928.
- Chudaeva, V. A., Urchenko, S. G., Chudaev, O. V., Sugimory, K., Matsuo, M., Kuno, A., 2006. Chemistry of rainwaters in the south Pacific area of Russia, *J. Geochem. Explor.* 88, 101-105.
- Conko, K. M., Rice, K. C., Margaret, M. M., Kennedy, M., 2004. Atmospheric wet deposition of trace elements to a suburban environment, Reston, Virginia, USA, *Atmos. Environ.* 38, 4025-4033.
- Duce, R. A., Hoffman, G. L., Zoller, W. H., 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural?, *Science.* 187, 339-342.
- Galloway, J.N., Thornton, J. D., Norton, S. A., Volchok, H. L., McLean, R. A., 1982. Trace metals in atmospheric deposition: a review and assessment, *Atmos. Environ.* 16, 1677-1700.
- García, R., del Torres Ma, C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., Báez, A., 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico, *Atmos. Environ.* 40, 6088-6100.
- Halstead, M. J. R., Cunninghame, R. G., Hunter, K. A., 2000. Wet deposition of trace metals to a remote site in Fiordland, New Zealand, *Atmos. Environ.* 34, 665-676.
- Hou, H., Takamatsu, T., Koshikawa M. K., Hosomi, M., 2005. Trace metals in bulk precipitation and throughfall in a suburban area of Japan, *Atmos. Environ.* 39, 3583-3595.
- Hu, G. P., Balasubramanian, R., Wu, C. D., 2003. Chemical characterization of rainwater at Singapore, *Chemosphere.* 51, 747-755.
- Jung, G. B., Lee, J. S., Kim, W. I., Kim, J. H., Yun, S. G., 2007. Wet Deposition of Heavy metals in Suwon Area, *Korean J. Environ. Agric.* 26(2), 116-123.
- Kang, G. G., Collett, J. L., Shin, D. Y., Fujita, S. I., Kim, H. K., 2004. Comparison of the chemical composition of precipitation on the western and eastern coasts of Korea, *Water, Air, and Soil Pollut.* 151, 11-34.
- Lee, J. S., Jung, G. B., Kim, J. H., Kim W. I., Lee, J. T., 2007. Characteristics of ionic composition of rainwater in Suwon, *Korean J. of Soil Sci. Fert.* 40(2), 151-155.
- Lee, J. S., Kim, J. H., Jung, G. B., Eom, K. C., 2003. Volume-weighted ion concentration of rainwater in Suwon area during farming season, *Korean J. Agric. For. Meteor.* 5, 1-5.
- Luck, J. M., and Ben Othman, D., 2002. Trace element and Pb isotope variability during rainy events in the NW Mediterranean: constraints on anthropogenic and natural sources, *Chemical Geology.* 182, 443-460.
- Nriagu, J. O., 1989. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals, *Nature.* 338, 47-49.
- Roy, S., and Négrel, P., 2001. A Pb isotope and trace element study of rainwater from the Massif Central (France), *Sci. Total Environ.* 277, 225-239.
- Takeda, K., Marumoto, K., Minamikawa, T., Suku-gawa, H., Fujiwara, K., 2000. Three-year determination of trace metals and lead isotope ratio in rain and snow depositions collected in Higashi-Hiroshima, Japan, *Atmos. Environ.* 34, 4525-4535.
- Uygun N., Karaca F., Alagha O., 2009. Prediction of sources of metal pollution in rainwater in Istanbul, Turkey using factor analysis and long-range transport models, *Atmos. Res.* 95(1), 55-64.
- Vuai, S. A., Tokuyama, A., 2011. Trend of trace metals in precipitation around Okinawa Island, Japan, *Atmos. Res.* 99(1), 80-84.