

여과식 채취방법에 의한 대기오염 총침착물의 특성 -석탄화력발전소 주변지역을 중심으로

Characteristics of Total Atmospheric Deposition by the Filtration-Sampling Method at Coal-Fired Power Plant Area

박 정 호 · 조 인 철¹⁾ · 최 금 찬²⁾

진주산업대학교 환경공학과, ¹⁾경상남도 보건환경연구원, ²⁾동아대학교 환경공학과
(2001년 8월 13일 접수, 2002년 3월 15일 채택)

Jeong-Ho Park, In-Cheol Cho¹⁾ and Kum-Chan Choi²⁾

Department of Environmental Engineering, Chinju National University,

¹⁾Kyongsang Nam-do Provincial Government Institute of Health and Environment,

²⁾Department of Environmental Engineering, Dong-A University

(Received 13 August 2001; accepted 15 March 2002)

Abstract

Total (=wet + dry) atmospheric depositions were collected by filtration-sampling method at 17 sampling sites of the coal-fired power plant area from September 1999 to January 2000. The soluble and insoluble fractions of deposition were also measured to investigate a suitability of simplified collection method for a long-term monitoring of total deposition. In the study, the 50% of sampled soluble fractions showed the electric conductivity (E.C.) of below 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the 42% of them showed the lower pH than 5.0. The monthly mean fluxes of water soluble ionic components; SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} were 168.4 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 100.5 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 88.6 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 31.3 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 25.6 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 13.3 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 8.7 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, 43.1 $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{month}$, respectively. The mean ionic concentration of all sample ($n = 79$) was 314 $\mu\text{eq}/\text{l}$, with contributions of 24.2% and 23.0% by $[\text{nss}-\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{nss}-\text{SO}_4^{2-}]$. The ratio of $[\text{NO}_3^-]/[\text{nss}-\text{SO}_4^{2-}]$ and $[\text{NH}_4^+]/[\text{nss}-\text{Ca}^{2+}]$ were found to be 0.52 and 0.68, respectively.

Key words : total deposition, filtration sampling, soluble fraction, insoluble fraction, ionic components

1. 서 론

대기 중으로 방출된 대기오염물질의 제거과정에는 주로 강수에 의한 습성침착(wet deposition)과 직

접 지표면부근으로 침착하는 건성침착(dry deposition)으로 구분할 수 있다(Hicks, 1984; Slinn *et al.*, 1978). 습성침착의 경우 지구 환경문제의 하나로서 주목되고 있는 산성비 문제로 지금까지 국내외의 많은 보고들이 있다. 그러나 건성침착의 경우 침착현상의 복잡성 때문에(Davidson and Wu, 1989) 건성침착을 평가하는 표준적인 방법은 아직 정리되어

* Corresponding author

Tel : +82-(0)55-751-3345, E-mail : jhpark@jinju.ac.kr

있지 않은 실정이다. 그러나 건성침착량은 습성침착량과 거의 동등하다고 알려져 있어 (NAPAP, 1991; 藤田慎一, 1990), 침착 대기오염물질로 인한 지표면 부근의 환경에 주는 부하량을 평가하기 위해서는 습성침착 뿐만 아니라 건성침착을 포함한 총침착물 (total = wet + dry) 특성에 대한 연구가 중요하다 (Johnson and Lindberg, 1990; 大喜多敏一과 北田敏廣, 1987; Hidy and Countess, 1984). 한편, 지표면 부근으로 침착되는 오염물질의 거동 특성을 분석하기 위해서는 고가 외국산 침착물 채취장치의 국산화, 침착물 분석방법의 통일화 등 대기오염 침착물의 채취방법을 표준화하기 위한 연구가 시급한 실정이고 이에 관련된 데이터의 축적도 이루어져야 할 것으로 보인다 (이병규와 이채복, 2000; 이기호 등, 1999; 김현섭 등, 1999).

본 연구에서는 대기오염 총침착물의 장기간 침착 특성을 간편하게 평가하고, 채취된 시료의 장기간 보관에 따른 변질, 손실의 최소화 등을 고려한 여과식 대기오염 총침착물 채취방법에 주목하였다. 총침착물의 시료채취는 시료채취 기간 중 샘플러에 침착되는 건성침착물과 습성침착물을 모두 채취할 수 있으며 (bulk sampling), 여과방법에 의해 채취되는 시료는 불용성 성분 (insoluble fraction)과 수용성 성분 (soluble fraction)별로 나누어지게 된다.

이러한 방법으로 최근 지표면 부근의 산성화 문제가 지역사회 문제로 대두되고 있는 서부경남의 남해안에 위치한 삼천포, 하동 화력발전소 주변지역 17개 지점을 대상으로 대기오염 총침착물을 채취하였다. 그리고 각 항목의 침착 특성 고찰과 동시에 채취과정에서 나타난 문제점을 파악하여 향후 효율적인 대기오염 침착물 채취방법의 표준화 개발을 위한 자료로 활용하고자 한다.

2. 시료채취방법

2.1 시료채취장치의 제작

국내의 경우 전국적으로 대기오염 산성침착물을 모니터링하기 위하여 48개 시군에 97개소의 산성우, 23개 시군에 23개소의 산성강하물 측정망이 설치되어 있다 (환경부, 2000). 이들 측정망에서는 주로 자동식 습성강하물 (wet)과 건성강하물 (dry)의 분별

채취장치가 사용되고 있다. 그러나 채취장치의 대부분은 고가의 외국산으로 여러 지점에 설치가 어려운 경제적인 문제와 습성강하물의 경우 매 강우시 빗물을 채취하기 때문에 많은 노력이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 대기오염 총침착물의 침착특성을 장기간에 걸쳐 간편하게 평가하고 채취된 시료의 안정성을 고려한 채취의 표준화방법에 대한 개발을 추진하였다. 이를 위해 여과식 대기오염 침착물 채취방법에 주목하였다. 시료채취장치는 직경 15.5 cm 원통형 깔때기 (면적 188.7 cm²)의 시료 채취부, 침착물을 수용성 (soluble) 성분과 불용성 (insoluble) 성분별로 구분하기 위한 직경 47 mm, 공극 0.8 μm의 cellulose 혼합 membrane 필터가 장착된 여과기부, 그리고 채취된 수용성 침착물을 안정하게 보관하기 위해 알루미늄 호일로 둘러싼 폴리에틸렌 재질의 용기부 (5 l)로 구성되었고, 총 수직 높이는 약 1.5 m이다.

2.2 시료채취방법

대기오염 총침착물은 서부경남 남해안에 위치한 삼천포, 하동 화력발전소 주변 반경 15 km 이내의 17개 지점 (삼천포 A~J 지점, 하동 K~Q 지점)을 대상으로 1999년 9월부터 2000년 1월까지 1개월 간격으로 총 5차에 걸쳐 직접 제작한 채취장치를 이용하여 시료를 채취하였다. 시료 채취지점의 선정은 주변에 인위적 발생원의 직접적인 영향이 적은

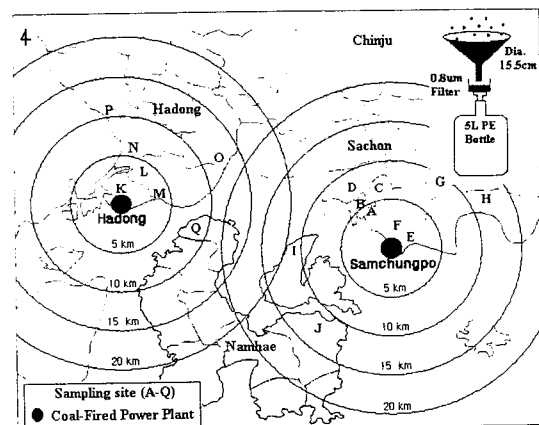


Fig. 1. The location of sampling sites.

지점을 고려하였으며, 그림 1에는 화력발전소 주변 17개 시료채취 지점과 여과식 채취장치를 표시하였다.

각 지점별 약 1개월의 시료채취가 완료되면, 채취된 수용성 성분으로 채취부의 내부표면에 붙어 있는 침착물까지 떨어낸 후 여과필터 위의 잔존물을 불용성 (insoluble) 성분 그리고 여과액인 수용성 (soluble) 성분별로 각각 구분하였다. 수용성 성분은 우선 1개월 기준으로 채취된 강수 즉, 수용성 성분의 침착량 (mm/month)과 pH, 전기전도도 (E.C.)를 측정하고 이온성분 분석을 위해서 IC (Dionex DX-300)을 이용하여, Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 의 음이온 성분 그리고 NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 양이온 성분을 각각 분석하였으며, 불용성 성분은 여과 필터를 데시케이터에서 약 2일간 완전 건조시킨 후 무게를 정량하였다.

한편, 수용성 이온성분은 각 이온 농도에 수용성 침착량을 곱하고 여기에 원통형 깔때기의 면적과 시료채취일 (1개월 기준)을 나누어 수용성 이온성분의 침착량 ($kg/km^2 \cdot month$)을 계산하였다. 불용성 성분의 경우 여과지의 시료채취 전후 무게차에 원통형 깔때기의 면적과 시료채취일로 나누어 불용성 성분의 침착량 ($kg/km^2 \cdot month$)을 계산하였다. 그리고 이온성분의 자연적 배출과 인위적 배출을 구분하기 위해 Na^+ 의 농도를 해양기원의 지표원소로 한 비해양기원 nss (non-sea salt)의 $[nss-SO_4^{2-}]$ 와 $[nss-Ca^{2+}]$ 를 구하였으며, 여기서 해수중 SO_4^{2-}/Na^+ 및 Ca^{2+}/Na^+ 의 중량비는 0.251과 0.038로 고

려되고 있다(酸性雨調査法研究會, 1993).

3. 결과 및 고찰

3.1 불용성, 수용성 성분의 침착 특성

본 연구에서는 대기오염 총침착물의 장기간 침착 특성을 간편하게 평가하고 채취된 시료의 안정성을 고려한 여과식 대기오염 침착물 채취방법에 주목하였다. 실제 침착 특성 자료와 그 적용 가능성을 평가하기 위해 17개 지점을 대상으로 채취된 대기오염 총침착물 중 대부분 빗물로 고려되어지는 수용성 침착량 (soluble, mm/month)과 수용성 성분 중 pH, 전기전도도 (E.C., $\mu S/cm$) 그리고 불용성 침착량 (insoluble, $kg/km^2 \cdot month$)을 측정하고 그 결과를 표 1에 표시하였다. 여기서, pH와 전기전도도의 평균값은 수용성 침착량을 고려한 가중평균으로 계산하였다.

전반적으로 대부분 강수로 고려되어지는 수용성 성분의 평균 침착량은 $115 mm/m$ ($2 \sim 511 mm/m$), 평균 pH는 4.9 ($4.5 \sim 7.1$), 평균 전기전도도는 $16.0 \mu S/cm$ ($9.7 \sim 124.6 \mu S/cm$), 그리고 여과 잔존물인 불용성 성분의 평균 침착량은 $380 kg/km^2 \cdot m$ ($40 \sim 2,122 kg/km^2 \cdot m$)로 나타났다. 조사기간별 pH, 전기전도도, 불용성 성분의 침착량은 수용성 침착량에 따라 큰 차이가 나타났는데, pH의 경우 월별 수용성 침착량이 높았던 1차 기간은 평균 4.7인 반면, 수용성 침착량이 적었던 4차기간은 평균 6.3으로 나타났다.

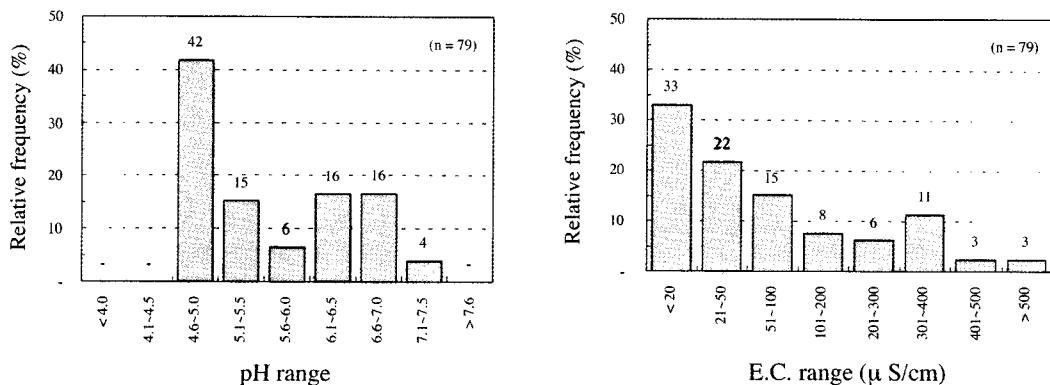


Fig. 2. Plots of frequency distribution pattern for pH and E.C. in soluble fraction.

Table 1. Fluxes of soluble and insoluble fraction in total deposition.

Site	1st sampling (*99. 9. 1~10. 5)				2nd sampling (*99. 10. 5~10. 25)				3rd sampling (*99. 10. 25~11. 26)			
	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)
A	365	4.7	14.1	149	324	5.7	9.7	175	40	4.9	17.8	676
B	332	4.7	12.8	172	167	5.3	10.5	445	49	6.1	22.3	1,317
C	327	4.7	11.9	115	171	5.1	9.7	87	38	5.0	18.6	134
D	309	4.6	13.6	103	132	5.1	10.0	238	41	6.1	24.5	765
E	401	4.6	12.7	92	46	4.6	35.8	127	-	-	-	-
F	332	4.6	12.9	92	191	4.6	23.5	350	-	-	-	-
G	481	4.7	10.8	103	485	5.0	10.7	40	55	4.7	19.8	224
H	511	4.7	11.2	126	175	4.6	26.5	151	-	-	-	-
I	303	4.6	15.4	115	159	5.0	13.0	87	49	4.5	32.6	60
J	309	4.6	16.4	69	171	5.1	21.7	254	57	4.7	19.2	253
K	178	4.7	14.8	344	76	4.8	20.4	580	33	6.6	25.1	1,615
L	189	5.1	12.4	1,204	79	4.6	23.2	294	33	5.4	21.7	492
M	227	4.6	15.5	92	109	4.7	19.5	382	27	6.3	45.2	144
N	321	4.7	10.7	126	81	4.6	21.3	215	45	5.0	18.8	1,148
O	261	4.7	12.6	80	101	4.8	17.8	374	41	6.7	30.2	1,227
P	338	4.8	11.0	138	99	4.8	16.9	437	42	5.8	20.2	1,287
Q	-	-	-	-	119	4.9	13.2	119	32	6.5	29.1	422
Mean	324	4.7	13.1	195	158	4.9	17.8	256	42	5.6	24.7	697
Min.	178	4.6	10.8	69	46	4.6	9.7	40	32	4.5	17.8	60
Max.	511	5.1	16.4	1,204	485	5.7	35.8	580	57	6.7	45.2	1,615

Site	4th sampling (*99. 11. 26~2000. 1. 7)				5th sampling (2000. 1. 7~2. 1)				Mean (1st~5th)			
	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)	Soluble (mm/m)	pH	E.C. (μ S/cm)	Insoluble. (kg/km ² m)
A	4	6.6	79.4	791	23	7.1	43.8	126	151	5.1	14.3	383
B	2	6.7	124.6	2,122	23	7.1	45.9	749	114	5.0	14.8	961
C	4	5.7	50.0	366	26	4.9	22.3	33	113	4.8	12.7	147
D	4	6.5	59.7	784	29	6.1	34.9	172	103	4.9	15.4	413
E	3	6.5	51.0	455	24	5.3	28.8	132	119	4.6	15.1	202
F	3	6.5	66.5	865	20	6.2	37.1	73	137	4.7	16.6	345
G	4	6.7	38.0	336	29	6.2	28.5	26	211	4.9	11.9	146
H	3	6.4	61.2	407	-	-	-	-	230	4.7	14.1	228
I	-	-	-	-	22	5.8	58.7	73	133	4.7	18.1	84
J	2	4.8	64.0	155	21	4.5	31.2	60	112	4.7	18.5	158
K	4	6.3	56.7	115	22	7.1	30.5	119	62	5.1	18.5	555
L	6	6.2	40.3	1,298	9	6.2	44.7	73	63	5.1	16.6	672
M	2	6.0	65.7	1,046	25	6.9	41.1	431	78	4.9	20.2	419
N	3	6.6	52.3	529	27	4.6	27.0	66	95	4.7	13.7	417
O	3	6.3	51.3	651	25	6.5	37.0	285	86	5.0	16.7	523
P	5	5.8	50.1	654	33	5.2	23.4	53	104	4.9	13.7	514
Q	4	6.4	54.3	599	5	6.7	86.3	13	40	5.5	21.8	288
Mean	3	6.3	60.3	698	23	6.0	38.8	155	115	4.9	16.0	380
Min.	2	4.8	40.3	115	5	4.5	22.3	13	40	4.6	11.9	84
Max.	6	6.7	124.6	2,122	33	7.1	86.3	749	230	5.5	21.8	961

- : sampler damage

또한, 전기전도도의 값과 불용성 성분의 침착량도 수용성 침착량이 많은 기간일수록 낮아지는 경향을 보였다.

한편, 각 항목의 측정값은 동일 시료채취기간이라도 지점별에 따라서 다소의 차이가 있었다. 특히, 1차 조사기간의 불용성 침착량은 시료채취 지점에 따라 69~1,204 kg/km²·m의 큰 차이를 보이고 있으며, 석탄 저탄장의 비산먼지 민원이 종종 제기되고 있는 하동 발전소에 인접한 K, L, M 지점의 경우 조사기간에 따라 차이는 있지만 다른 지점에 비해 비교적 불용성 침착량이 높은 경향을 보이고 있었다.

그림 2에는 전체 79개의 채취된 수용성 성분 중 pH, 전기전도도의 발생빈도를 표시하였다. 전기전도도의 범위는 9.7~124.6 μS/cm로 이중 50 μS/cm 이하의 범위가 50%를 차지하고 20 μS/cm 이하의 범위가 33%를 차지하는 것으로 나타났다. 전체 pH 범위는 4.5~7.1로 pH 5.6 이하가 57%이며, 실질적으로 산성비라 할 수 있는 pH 5.0 이하가 42%로 나타났다. 이러한 본 연구에서 나타난 총침착물(wet+dry deposition) 중 수용성 성분의 pH 5.0 이하 발생빈도는 강우(wet deposition)만의 pH 발생빈도인 춘천지역 58.8%, 서울지역 52.7% 보다 낮은 비율이다(김만구 등, 1999). 이는 총침착물 채취시 강우뿐만 아니라 강하먼지도 동시에 채취되는 특성상 수용성 성분의 pH가 알칼리성 강하먼지에 의해 중화작용이 일어난 것으로 고려된다.

한편, 여과식 시료채취방법에 있어 여과식 채취방법으로 장기간에 걸쳐 보다 안정적으로 시료를 채취하기 위해서는 향후 해결하여야 할 문제점이 몇 가지 나타났다. 그 중 채취지점 주변의 비산먼지의 발생여부 등 주변 환경을 고려한 지점 선정이 중요할 것으로 판단되며, 장기간 대기중 노출시 장치 재질의 부식과 강한 바람에도 견딜 수 있도록 하는 등 장치의 구조적인 문제 그리고 각종 벌레들의 유입으로 인한 불용성 침착물의 정량 문제점 등이 나타났다. 또한, 여과지위에 이끼가 발생하거나 필터재질의 분해가 되는 문제점은 확인되지 않았다.

3.2 수용성 이온성분의 침착특성

총침착물 채취방법은 수용성 이온성분 침착량의 경우 기존의 주로 습성강하물만 채취하는 방법보다

용해성 건성 침착물에 의한 기여가 30~40% 정도 더 접하고 있다고 보고되고 있다(玉置 등, 1988). 표 2에는 수용성 성분 중 각 이온성분의 평균 침착량을 표시하였는데, (a)에는 1~5차 기간별 17개 전체 지점의 평균값(ppm 및 kg/km²·month), (b)에는 17개 지점별 1~5차 총기간의 평균값(kg/km²·month)과 당량 농도비를 표시하였다.

(a)에는 기간별 이온성분의 침착 특성을 나타냈다. 기간별 수용성 침착량과 비례관계가 있는 각종 이온성분의 침착량은 음이온 성분의 경우 1, 2차 기간은 SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻의 순으로, 3~5차 기간은 SO₄²⁻>NO₃⁻>Cl⁻의 순으로 높았다. 양이온 성분의 경우 1차 기간은 Na⁺>Ca²⁺>NH₄⁺>Mg²⁺>K⁺의 순으로, 2~5차 기간은 Ca²⁺>NH₄⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺의 순으로 높았다. 특히, 해염입자로 고려되는 Na⁺, Cl⁻의 침착 특성은 월별 침착량 변화가 서로 비슷하고 다른 이온성분에 비해 월별 침착량 변화가 큰 경향을 보이고 있었다. 이는 시료채취지점이 해안에 인접하고 있는 지리적 특성상 해염기원에 의한 영향이 조사기간별 풍향 등 기상조건에 따라서 큰 변화를 보이는 것으로 추정된다.

(b)에는 지점별 이온성분의 침착 특성을 나타냈다. 지점별로도 해염입자인 Na⁺, Cl⁻의 침착량 변화는 다른 이온성분에 비해 크게 나타났다. 특히, 바닷가와 인접하고 해풍의 직접적인 영향을 자주 받는 H, E, A 지점 등은 해염입자의 농도가 전체 평균치보다 높은 반면, 직선 거리로는 바다와 가깝지만 지형 특성상 산으로 둘러싸여 해풍의 직접적인 영향

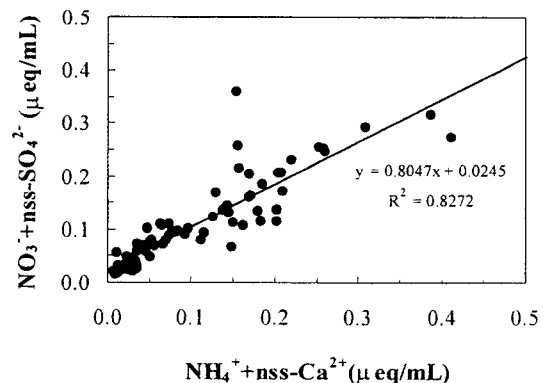


Fig. 3. Relationship between [NO₃⁻ + nss - SO₄²⁻] and [NH₄⁺ + nss - Ca²⁺].

Table 2. Mean values of ionic components in soluble fraction.

(a) Mean values for all sampling sites.

Sampling	Anion, ppm (kg/km ² · month)			Cation, ppm (kg/km ² · month)				
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1st ('99. 9. 1 ~ 10. 5)	0.728 (235.9)	0.435 (141.0)	0.889 (288.2)	0.262 (84.9)	0.139 (45.1)	0.095 (30.7)	0.053 (17.1)	0.153 (49.6)
2nd ('99.10. 5 ~ 10. 25)	0.961 (141.0)	0.846 (109.9)	1.800 (250.2)	0.186 (28.3)	0.269 (36.4)	0.091 (12.5)	0.074 (10.6)	0.331 (47.6)
3rd ('99.10.25 ~ 11. 26)	1.420 (56.3)	2.199 (90.4)	3.436 (137.8)	0.371 (15.4)	0.666 (26.9)	0.323 (12.8)	0.156 (6.3)	1.402 (54.9)
4th ('99. 11. 26 ~ 2000. 1. 7)	2.519 (17.2)	4.556 (31.9)	8.614 (59.4)	0.971 (6.8)	0.716 (4.9)	0.643 (4.4)	0.446 (3.1)	3.899 (27.3)
5th (2000. 1. 7 ~ 2. 1)	1.293 (26.7)	3.282 (66.0)	4.051 (83.3)	0.718 (15.2)	0.753 (15.8)	0.266 (5.5)	0.250 (5.0)	2.038 (39.9)

(b) Mean values for all sampling periods.

Site	Anion (kg/km ² · month)			Cation (kg/km ² · month)					[NO ₃ ⁻]	[NH ₄ ⁺]	[NH ₄ ⁺ + nss-Ca ²⁺]
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	[nss-SO ₄ ²⁻]	[nss-Ca ²⁺]	[NO ₃ ⁻ + nss-SO ₄ ²⁻]
A	123.6	86.5	182.1	45.2	22.8	18.2	11.2	81.7	0.50	0.42	1.20
B	100.7	95.2	174.4	49.3	45.4	13.9	10.9	62.7	0.50	0.79	1.20
C	90.5	70.8	119.1	29.7	10.7	15.3	6.6	27.6	0.59	0.43	0.66
D	72.6	82.6	150.9	23.0	37.0	7.6	6.7	38.6	0.47	1.00	1.00
E	131.8	85.6	141.3	39.1	11.4	8.6	10.1	30.5	0.61	0.44	0.64
F	119.6	87.2	190.4	33.1	23.8	6.5	9.2	34.2	0.50	0.78	0.75
G	128.0	104.9	226.2	37.8	27.6	11.4	10.0	39.9	0.52	0.74	0.72
H	234.3	99.3	315.6	68.3	18.4	27.9	17.5	37.0	0.38	0.43	0.43
I	128.5	139.4	176.3	37.7	33.3	13.9	10.6	41.8	0.71	1.09	0.71
J	147.6	115.9	242.6	41.3	37.8	14.6	10.9	31.9	0.42	1.09	0.52
K	60.0	64.4	137.8	19.6	16.6	7.3	6.5	59.4	0.35	0.32	1.22
L	66.3	72.9	123.6	19.1	20.7	22.9	6.7	39.6	0.57	0.51	0.91
M	84.2	69.7	161.4	23.1	14.2	10.8	7.8	49.8	0.40	0.32	0.89
N	56.1	82.3	128.8	19.0	21.6	10.4	5.4	29.7	0.58	0.76	0.75
O	64.8	94.7	139.5	16.5	48.7	13.2	5.8	43.4	0.57	1.24	1.16
P	69.6	88.2	152.6	22.8	18.5	17.9	7.7	48.7	0.51	0.47	0.82
Q	30.1	67.0	100.7	7.5	27.2	5.6	4.5	36.4	0.61	0.72	1.09
Mean	100.5	88.6	168.4	31.3	25.6	13.3	8.7	43.1	0.52	0.68	0.86
Min.	30.1	64.4	100.7	7.5	10.7	5.6	4.5	27.6	0.35	0.32	0.43
Max.	234.3	139.4	315.6	68.3	48.7	27.9	17.5	81.7	0.71	1.24	1.22

감소가 고려되는 Q, N, P 지점 등은 해염입자의 농도가 전체 평균치보다 낮게 나타났다. 그리고 SO₄²⁻, NO₃⁻의 침착량은 전반적으로 각 화력발전소에서 가까운 E, F, K 지점보다 다소 거리가 떨어져 있는 G, H, I, J 지점이 오히려 높은 경향을 보이고 있는데, 이는 배출원에서 주로 가스상 SO_x, NO_x의 형태로 배출된 뒤 바람확산으로 인해 배출원 인접 지역보다 다소 멀리 떨어진 지점에 더 많이 침착된 결과로 추정된다. 반면, 대기 중 침착속도가 클 것으로

판단되는 불용성 성분 (insoluble)이나 Ca²⁺성분의 경우(박정호와 최금찬, 2000; Milford and Davidson, 1985) 배출원에 가까운 E, F, K, L 지점이 비교적 높은 침착량 경향을 나타냈다. 이러한 각 이온성분의 침착량 특성과 김만구 등(1999)이 보고하는 있는 '97년 9월부터 12월 사이의 서울과 춘천지역의 침착량과 비교하여 보면 Na⁺, Cl⁻의 침착량은 서울, 춘천지역보다 높은 경향을 나타내고 있어 지역 특성상 해염기원의 영향을 많이 받는 것으로 나타났

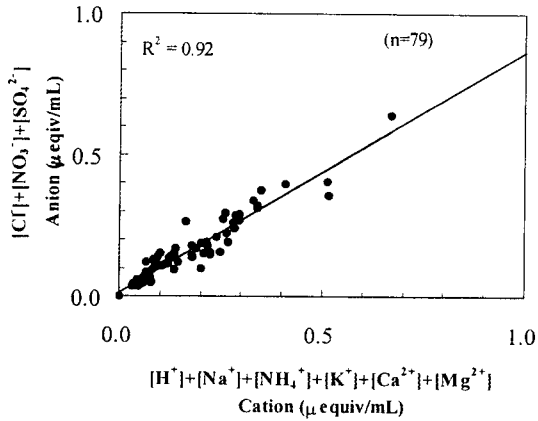


Fig. 4. Relationship between anion and cation.

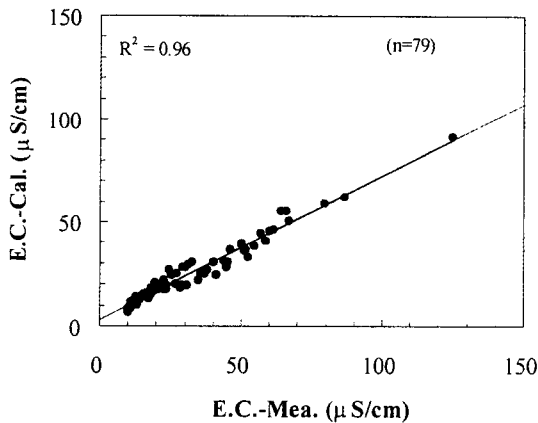


Fig. 5. Relationship between E.C.-cal and E.C.-mea..

으며, SO_4^{2-} , NO_3^- 의 음이온은 서울보다 낮고, 춘천보다 높은 경향, 그리고 Ca^{2+} , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ 의 양이온은 서울보다 낮거나 비슷한 수준이고 춘천보다 낮은 경향을 보였다.

한편, 수용성 침착물의 pH를 결정하는 주요 이온성분의 당량 농도비 인자 중 $[NO_3^-]/[nss-SO_4^{2-}]$ 는 평균 0.52 (0.35~0.71), $[NH_4^+]/[nss-Ca^{2+}]$ 는 평균 0.68 (0.32~0.71), $[NH_4^+ + nss-Ca^{2+}]/[NO_3^- + nss-SO_4^{2-}]$ 는 평균 0.86 (0.43~1.22)의 특성을 나타내었다. 특히, 그림 3의 전체 시료 (n=79)에 대한 $[NO_3^- + nss-SO_4^{2-}]$ 과 $[NH_4^+ + nss-Ca^{2+}]$ 의 상관관계를 보면, 이들 이온성분간에는 매우 높은 상관성이 있

음을 알 수 있으며, 이러한 사실은 수용성 침착량중에 유입된 산성물질의 대부분이 NH_4^+ 과 Ca^{2+} 과 같은 알카리성 물질에 의해 중화됨을 알 수 있다.

그리고 이온성분의 분석자료의 신뢰성을 알아보기 위해 그림 4에는 양이온과 음이온의 비와 그림 5에는 측정된 전기전도도 (E.C.-Mea)와 이온 당량값으로 계산된 전기전도도 (E.C.-Cal)의 비를 표시하였으며, R^2 가 각각 0.92, 0.96의 양호한 분석 신뢰를 표시하였다.

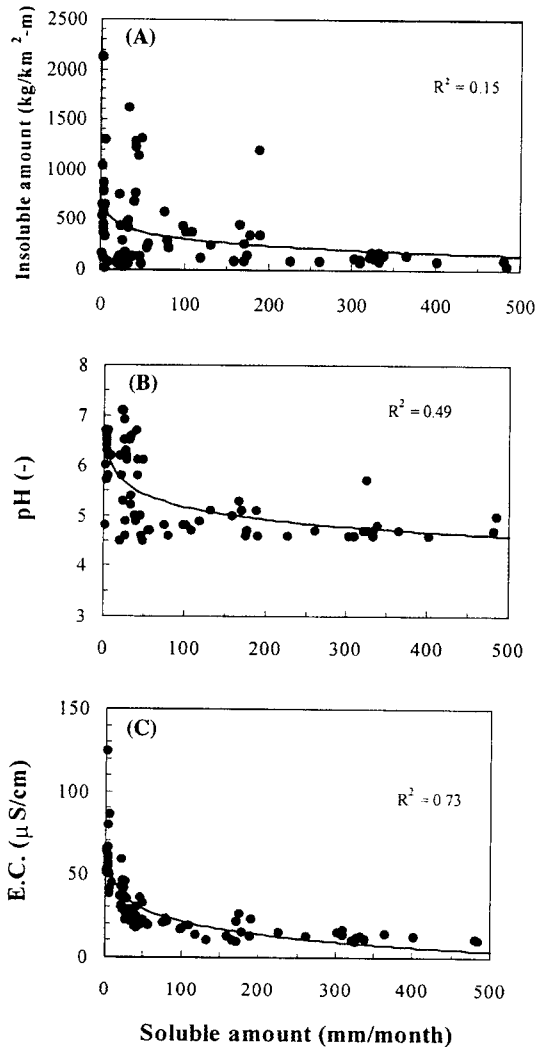


Fig. 6. Variations of insoluble amount, pH and E.C. for soluble amount.

3.3 수용성 침착량에 따른 항목별 변화 특성

전체 채취된 79개 시료에 대해 수용성 침착량에 따른 불용성 침착량 그리고 pH, 전기전도도 항목의 변화 특성을 그림 6에 표시하였다. 전반적으로 수용성 침착량 약 50 mm/m까지는 각 항목 수치의 변화가 크게 나타나다가 그 이후 점차 변화 폭이 줄어드는 경향을 보였다. 특히, pH 변화폭은 수용성 침착량에 약 50 mm/m까지는 pH 약 4.5~7.0 사이의 넓은 범위를 보이고 있지만, 그 이후 점차 pH 5 전후 부근으로 안정된 범위를 나타내었다. 이는 초기 강수때 대기중의 오염물질을 대부분 washout의 영향으로 pH의 변동이 크게 변화하지만 강수량이 많아질수록 rainout 효과가 크게 반영되기 때문으로 전기전도도의 변동에서도 같은 경향을 볼수 있다 (오길영 등, 1999).

또한, 불용성 성분의 침착량과 전기전도도 값은 수용성 침착량 약 50 mm/m까지는 큰 변화폭을 나

타내고 있으나, 그 이후 각각 250 kg/km² · m, 25 μS/cm 전후 부근으로 안정된 범위를 나타내는 경향을 보였다. 이러한 각 항목의 변화 특성에서 대기오염물질의 세정작용은 특히, 초기 수용성 침착량에 의해 크게 일어나는 것으로 고려되어진다 (김만구 등, 1999; 박정호와 최금찬, 1999).

한편, 그림 7에는 이온성분의 발란스를 전체 79개 시료(total)를 대상으로 그리고 수용성 침착량에 따라 <25 mm/m 시료(시료수 26개), 25~50 mm/m 사이의 시료(시료수 19개) 그리고 >50 mm/m 시료(시료수 34개)별로 대한 이온 발란스를 각각 표시하였다. 전체 79개 시료(total)의 총이온 성분의 평균 당량농도는 314 μeq/l로 이 중 [nss-Ca²⁺]가 24.4%, [nss-SO₄²⁻]가 23.0%의 순으로, 비해염입자(nss) 농도만을 고려할 때 [nss-Ca²⁺]이 [nss-SO₄²⁻]보다 약간 높은 것으로 나타났다. 그리고 수용성 침착량 범위별로 <25 mm/m, 25~50 mm/m, >50 mm/m에

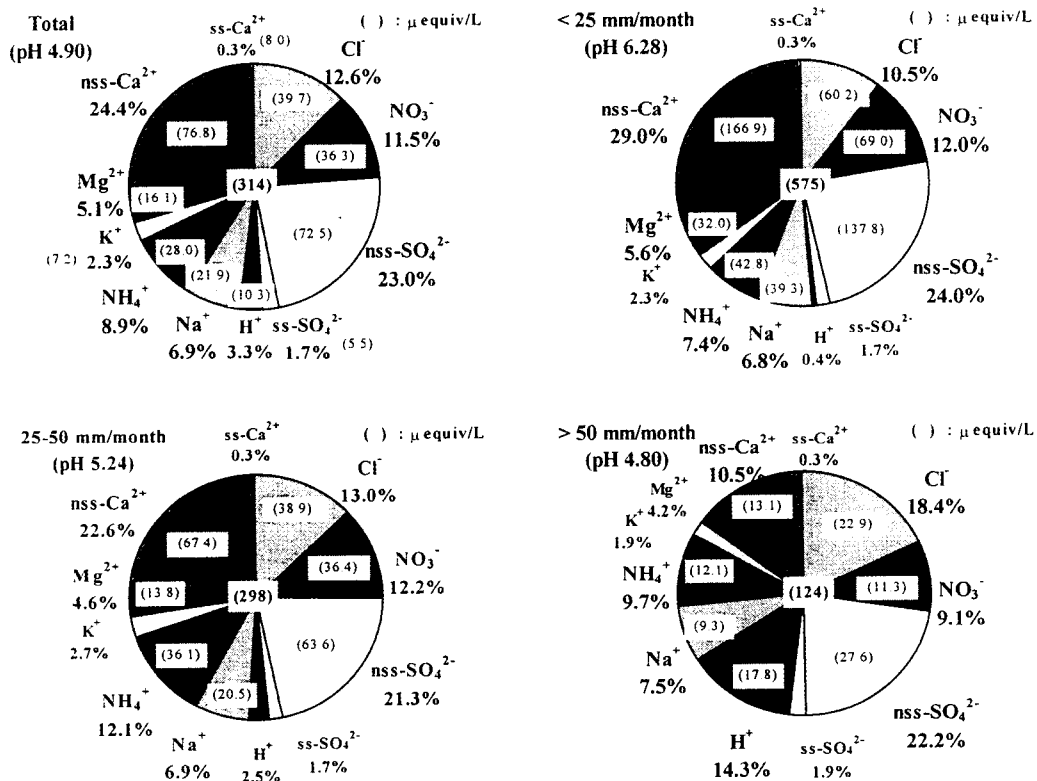


Fig. 7. Mean ionic composition for soluble amount.

서 총이온 성분의 평균 당량농도는 각각 575 $\mu\text{eq/l}$ → 298 $\mu\text{eq/l}$ → 124 $\mu\text{eq/l}$ 으로 수용성 침착량이 증가할 수록 농도가 점차 낮아졌다. 특히, 수용성 침착량 범 위별에 따른 각 이온성분의 함량은 양이온 중 $[\text{nss}-\text{Ca}^{2+}]$ 의 경우 29.0% → 22.6% → 10.5%로 점차 크게 낮아진 반면, $[\text{Na}^+]$ 의 경우 6.8% → 6.9% → 7.5%로 함량이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 음이온 중 $[\text{nss}-\text{SO}_4^{2-}]$ 의 경우 24.0% → 21.3% → 22.2%로 수용성 침착량에 따른 함량의 큰 변화가 없는 반면, $[\text{Cl}^-]$ 의 경우 10.5% → 13.0% → 18.4%로 증가하는 경향을 나타내었다.

따라서 $[\text{nss}-\text{SO}_4^{2-}]$ 의 경우 수용성 성분의 pH를 저하시키는 역할이 가장 큰 반면, 주로 토양기원의 알칼리성 강하먼지인 $[\text{nss}-\text{Ca}^{2+}]$ 의 경우 적은 수용성 침착량이 증가할수록 산성을 중화시키는 기여율이 점차 낮아지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

대기오염 총침착물의 장기간 침착 특성을 간편하게 평가하고 채취 시료의 안정성 확보 등을 고려한 대기오염 총침착물의 채취를 위해 여과식 채취장치를 이용하여, 서부경남의 화력발전소 주변지역 17개 지점을 대상으로 대기오염 총침착물의 침착 특성을 파악한 결과 다음과 같다.

1) 총침착물 중 수용성 성분의 pH 범위는 강수 뿐만 아니라 강하먼지도 동시에 채취되는 특성상 서울, 춘천 지역의 강수만의 pH 발생빈도보다 높은 것으로 고려되어진다. 또한, 이온성분 중 $[\text{nss}-\text{SO}_4^{2-}]$ 의 경우 수용성 성분의 pH를 저하시키는 역할이 침착량에 관계없이 가장 큰 기여를 나타낸 반면, $[\text{nss}-\text{Ca}^{2+}]$ 의 경우 수용성 침착량이 증가할수록 산성을 중화시키는 기여율이 점차 낮아지는 것으로 나타났다.

2) 주로 배출원에서 가스상의 형태로 배출되는 SO_4^{2-} , NO_3^- 의 침착량은 발전소 인접지점보다 다소 멀리 떨어진 지점에서 많았으며, 반면 침착속도가 높을 것으로 판단되는 불용성 성분이나 Ca^{2+} 성분의 경우 배출원에 가까울수록 침착량이 비교적 많은 경향을 나타냈다.

한편, 총침착물의 채취방법에 있어 채취지점 주변

의 비산먼지의 발생여부 등 주변 환경을 고려한 시료채취 지점 선정이 중요할 것으로 판단된다. 또한, 장기간에 걸쳐 보다 안정적 시료채취를 위해서는 장치의 구조적인 문제, 그리고 각종 벌레들의 유입으로 인한 불용성 침착물의 정량 문제 등을 해결하여야 할 것으로 보인다.

감 사

본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 (KRF-2000-003-E00414), 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김만구, 강미희, 임양석, 박기준, 황 훈 (1999) 산성강하물의 침착량과 동태 해명에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(2), 89-100.
- 김현섭, 이태정, 김동술 (1999) 수원지역 강하분진의 화학 조성 및 공간분포 분석, 한국대기환경학회지, 15(1), 23-32.
- 오길영, 양수인, 이완진 (1999) 목포, 여천지역 강수의 무기 이온 성분농도와 거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(4), 385-392.
- 이기호, 허철구, 송문호, 박용이 (1999) 제주지역 강하먼지의 조성에 대하여, 한국대기환경학회지, 15(1), 13-22.
- 이병규, 이채복 (2000) 새로운 건성 및 습성 침착 채취기의 개발, 한국대기환경학회지, 16(6), 675-684.
- 박정호, 최금찬 (1999) 대기 에어로졸 입자의 이론적 강수세정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(1), 1-11.
- 박정호, 최금찬 (2000) 저압입펄터를 이용한 대기 에어로졸 중 원소성분의 건성침착속도 추정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(5), 445-451.
- 환경부 (2000) 대기환경연보 (1999).
- 大喜多敏一, 北田敏廣 (1987) 酸性雨-乾性沈着, 氣象研究ノート, 158, 119 pp.
- 酸性雨調査法研究会 (1993) 酸性雨調査法, ぎょうせい, 268 pp.
- 玉置元則, 平木 降年, 鳥橋 義和 (1988) 濾過式大氣降下物採取装置の捕集効率低下をもたらす因子, 兵庫縣公害研究所報告, 20, 1-12.
- 藤田慎一, 高橋章, 村治能孝 (1990) わが國における硫黄

- 化合物の乾性沈着量に関する検討, 大氣汚染學會誌, 25(5), 343-353.
- Davidson, C.I. and Yee-Lin Wu. (1989) *Acidic Precipitation Volume 1-Dry Deposition of Particle and Vapors*, Springer-Verlag New York, 103-216.
- Hicks, B.B. (1984) *Deposition Both Wet and Dry*, An Ann Arbor Science book.
- Hidy, G.M. and R. Countess (1984) *Deposition Both Wet and Dry-Combined Analysis of Air Quality and Precipitation Chemistry Data*, An Ann Arbor Science Book, 37-62.
- Johnson, D.W. and S.E. Lindberg (1990) *Acidic Precipitation Volume 3-Acidic Deposition on Walker Branch Watershed*, Springer-Verlag New York, 1-38.
- Milford, J.B. and C.I. Davidson (1985) The size of particulate trace elements in the atmosphere-A review, *J. of the Air Pollution Control Association*, 35(12), 1249-1260.
- NAPAP Office of the Director (1991) NAPAP 1990 Integrated Assessment Report.
- Rojas, C.M. *et al.* (1993) Dry and Wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb and Zn into the southern bight of the north sea, *Atmospheric Environment*, 27A(2), 251-259.
- Sehmel, G.A. (1980) Particle and Gas Dry Deposition, *Atmospheric Environment*, 14, 983-1011.
- Slinn, W.G.N. *et al.* (1978) Review Paper-Some Aspects of the Transfer of Atmospheric Trace Constituents Past the Air-Sea Interface, *Atmospheric Environment*, 12, 2055-2087.