

## 군산지역의 강하분진 및 금속원소의 침착속도 추정

### Estimation of Deposition Rates of Dustfall and Metallic Elements in Kunsan

김 성 천

군산대학교 공과대학 토목환경공학부 대기오염연구실  
(1999년 5월 31일 접수, 2000년 7월 20일 채택)

Seong Cheon Kim

*Air Pollution Lab., School of Civil and Environmental Engineering,  
College of Engineering, Kunsan National University*

(Received 31 May 1999; accepted 20 July 2000)

#### Abstract

The purpose of this experimental study is to investigate seasonal deposition flux variations and deposition velocities of the total dustfall and various inorganic elements in it. Total of 41 dustfall and TSP samples were collected from November, 1997 through December, 1998 in Kunsan. Each sample was analyzed by an AAS to determine the levels of 5 inorganic elements; Zn, Cd, Cr, Fe and Pb. Deposition fluxes, soluble/total fractions and deposition velocities for each element were extensively investigated. Estimated dry deposition fluxes of dustfall and elements in Kunsan were in the range of 14.6 ~ 48.8 (mean 25.6) ton/km<sup>2</sup>/yr for dustfall, 14.5 ~ 72.6 (mean 44.1) kg/km<sup>2</sup>/yr for Zn, 0.9 ~ 8.0 (mean 3.0) kg/km<sup>2</sup>/yr for Cd, 2.1 ~ 239.2 (mean 63.9) kg/km<sup>2</sup>/yr for Cr, 331.6 ~ 1,082.7 (mean 573.9) kg/km<sup>2</sup>/yr for Fe, 5.2 ~ 178.4 (mean 49.2) kg/km<sup>2</sup>/yr for Pb, respectively. And the concentration of TSP and elements in Kunsan were 71 µg/m<sup>3</sup> for TSP, 29.9 ng/m<sup>3</sup> for Zn, 0.6 ng/m<sup>3</sup> for Cd, 0.1 ng/m<sup>3</sup> for Cr, 1,061.0 ng/m<sup>3</sup> for Fe, 4.0 ng/m<sup>3</sup> for Pb, respectively. And the estimated deposition velocity of dustfall and elements in Kunsan were 1.13 × 10<sup>-2</sup> cm/sec for dustfall, 4.67 × 10<sup>-2</sup> cm/sec for Zn, 16.92 cm/sec for Cd, 15.69 cm/sec for Cr, 1.72 × 10<sup>-2</sup> cm/sec for Fe, 0.36 cm/sec for Pb, respectively.

**Key words** : deposition flux, deposition velocity, dustfall, inorganic element, soluble/total fraction

#### 1. 서 론

환경중에 침착된 물질의 영향으로 인해, 과거 10 여년에 걸쳐 대기 침착에 대한 관심이 증가하고 있다. 대기중 습, 건식 침착은 대기 중 독성과정에 영향을 주고, 종종 대기로부터 지표면으로의 물질수송

에 관여한다 (Allen *et al.*, 1991). 최근 연구에서 보면 거대입자가 대기중 건식침착의 대부분을 차지하고 있음을 보여주고 있다 (Lin *et al.*, 1993). 군산시는 면적이 376.35 km<sup>2</sup>로 주변에 위치한 국가공단과 향후 새만금 개발사업으로 인한 대기오염 문제가 점차 심화될 것으로 예상되며, 중국에서 유입되는 분진 및 중금속은 여러 인자에 의해 그 피해 정도가 다

르게 나타날 것으로 예상되는 지역이다. 분진은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 즉, 공기 중에 부유하고 입경이 작은 부유분진과 입경이 크고 자연상태로 지상에 낙하하는 강하분진이 있다. 보통 분진의 크기는 0.001~500  $\mu\text{m}$  정도이며, 보통 100  $\mu\text{m}$  미만의 경우 TSP라 하며, 10  $\mu\text{m}$  이하일 경우를 PM<sub>10</sub>이라 한다. 그리고 강하분진은 부유분진이 모두 포함되지만 침강특성에 따라 일반적으로 10~20  $\mu\text{m}$  이상을 의미한다. 대기 중 입자상 물질의 소멸과 지표면으로의 침착은 두가지 기본 경로로 이루어 진다. 첫째, 강수없이 진행되며, 중력, 침강, 확산과정에 의해 직접 지면으로 이동하는 건식침착이 있고, 둘째, 대기 중 오염물질이 강우, 안개, 응축 등에 의해 표면으로 이동되는 습식침착이 있다. 보통 총침착물(bulk deposition)이란 항시 개봉된 포집용기에 포집된 습식, 건식 강하물을 총칭한다. 이러한 침착현상은 산성우, 시정, 오염물질의 장거리 수송연구 등에서 기본이 되며, 대기오염물질이 토양, 수계 및 동식물 생태계와 재산상에 미치는 영향을 연구할 때도 중요시되고 있다. 다시 말해, 건식 및 습식침착에 의한 오염물질의 제거과정 연구는 대기오염학에서 가장 중요시 되어야 할 기초 연구중의 하나이다.

최근까지도 오염물질의 침착현상을 규명하는 과정에서, 운동학적 이론 및 건식침착 Flux를 추정 및 분석을 하는데 인정을 받을 만한 기술이 없다. 그리고 대기 중 분진의 건식침착은 매우 복잡한 과정이며, 지표면의 거침도, 지형, 기상학적 조건과 입자특성 등과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이와 같은 요인들 때문에, 분진의 침착은 시공간적으로 매우 변화가 크다. 바꾸어 말해서, 이 변화성은 분진의 역학적 침착 현상에 영향을 주고, 환경적, 기상학적 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구는 일단, 기존의 이론, 실험 및 관측자료를 최대한 활용하고, 각종 분진 포집기를 이용하여 분진 및 중금속의 침착량, 그리고 침착속도를 추정하고, 최종적으로 외국과 비교, 검토하였다. 최근까지 오염물질의 건식침착량을 정량화할 때 운동학 이론을 활용하고 있지만, 공정측정법은 존재하지 않고 있다. 이는 분진의 건식침착 과정이 지표면의 거침도, 지형, 기상학적 조건과 입자의 특성 등에 영향을 받기 때문이며 이로 인해 분진의 침착속도가 시공간적으로 크게 변화하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 침착판(deposition plate) (Noll *et*

*al.*, 1989), Cascade Impactor (Vawda *et al.*, 1992 Nicholas, 1988), 침착용기(deposit gauge) (Galbraith와 Hingston, 1991; Lin *et al.*, 1994) 등이 사용되고 있으며, 총강하분진의 시료채취를 위해 British Standard 포집기(BSI, 1969), 좀더 복잡한 British Standard 직접 포집기(BSI, 1972), ISO 먼지 포집기(ISO, 1986), WSL gauge (1983), 건식 Fresbee gauge (Hall과 Upton, 1988) 등이 사용되고 있다. 특히 Frisbee gauge는 내면이 건조된 상태이거나 액상 paraffin으로 코팅되어 있으며, British Standard 포집기와 ISO 먼지 포집기에 비해서 포집효율이 우수하다고 알려져 있다. 그리고 WSL에서 개발한 wet Frisbee (plastic)는 무게 100 g, 직경 227 mm, 배수구멍 직경 15 mm이며, 2m 길이의 플라스틱판 아래에 4.55 리터의 용기로 구성되어 있다 (Vallack과 Chadwick, 1992). Sheih *et al.* (1979)은 미국 북동부의 토지 이용도와 대기안정도를 이용하여 침착속도의 분포도를 구한 바 있다. 또한 미국에서는 1984년 이래 건식침착에 대한 측정망(NDDN: National Dry Deposition network)이 구성되어 건식침착과정에 관한 연구가 수행된 적이 있다. Meszaros와 Horvath (1984)은 헝거리를 대상으로 평가한 적이 있다. 영국에서는 Warren Spring Laboratory (WSL)의 모델(1983)을 사용하여 계절별로 건식침착 속도를 추정하였으며, 추정결과 겨울철의 침착속도는 여름철의 약 25~80%로써 변화의 정도가 극심하였다. 大喜多敏一과 北田敏廣(1983)은 일본의 기상조건과 환경요인을 감안하여 침착속도를 검토하였으며 이산화황과 입자상 황산염의 건식침착량을 추정하였다. 그의 결과에 의하면 여름철에 침착된 황산화물의 약 90%가 이산화황이었고, 황산화물의 습식침착량과 건식침착량은 비슷하였다. 또한 많은 연구에서 장거리 운송현상을 규명하려는 목적으로 강수 중의 미량원소를 분석한 바 있다. 지금까지 미진했던 서해안 공업도시의 지역별 농도분석을 통해 분진 및 중금속의 침착속도 추정과 지역의 먼오염원을 파악하고, 분진 중 방사능 낙진 등의 오염에 따른 인체 및 동식물의 피해 정도를 예측하는데 응용 가능하며, 인접국가에서 유입되는 오염물질의 양을 파악하여 향후 국가간의 환경 분쟁시 능동적으로 대처할 수 있다는 의미에서 대단히 중요한 일이다.

본 연구의 목적은 강하분진 포집기 및 부유분진

포집장치를 동원하여, 대기 중 강하분진의 월별, 계절별 농도 변화의 추이를 조사하여 분진 및 중금속의 건·습식 침착량을 정량적으로 규명 및 중금속의 농도를 파악하고, 분진 및 금속원소의 침착속도를 추정하는데 있다.

## 2. 분진의 측정 및 분석 방법

분진의 농도측정에는 여러가지 방법이 있다. 부유분진의 경우, 총부유분진 및 입경에 따른 분진 등으로 나눌 수 있으며, 부유분진의 농도는 중량법을 이용하였고, 분진 중 무기, 유기 화합물을 분석하기 위해 적절한 기기분석 방법을 이용해야 한다. 반면, 강하분진을 측정하는 방법은 간단한 점시형의 포집기에서부터 첨단 포집기까지 매우 다양하다. 강하분진의 측정은 군산대학교 소룡 캠퍼스 옥상인데(그림 1), 이곳은 금강에서 남측으로 0.2km, 군산시 중심지에서 북측으로 약 5 km에 위치해 있으며, 주변 국가공단에는 크고 작은 공장들이 위치하고 있으며, 조사는 1997년 9월부터 1998년 12월까지 수행하였다. 소룡 캠퍼스 측정 장소는 금강과 황해 근처에 있으며 도로가 둘러 쌓인 주택지역이고 공단으로의 진입로이기도 하다. 강하분진의 측정을 위해 영국식 deposit gauge를 자체 제작하여 사용하였다. 이 gauge는 개구면의 직경이 32 cm(804.2 cm<sup>2</sup>)인 깔데기와 깔데기 하부에 5l의 PE 용기를 연결한 것이다. 측정기간 중 여름과 가을에는 조류의 번식을 막기 위해 무수 황산구리를 0.024 g씩 첨가하였다. 또한 건물 옥상에서 발생할 수 있는 난류의 영향을 피하기 위해 1.8 m 높이의 지지대에 포집장치를 고정시켰다. 시료 채취 지점에서 측정기는 전형적으로 약 30일 동안 우수량을 고려하여 공기중에 노출시켰으며, 기상상태, 온도 및 포집기의 이상 유무는 일별로 점검되었다. 강하분진이나 침강하는 입자상물질의 양은 불용성 강하분진을 결정시는 여과하므로써, 그리고 총(수용성+불용성) 강하분진을 결정하기 위해서는 여과물을 증발시켜 결정한다. 그리고 강하분진의 양은 질량/면적/시간의 단위로 계산한다. 연구기간 중 강수가 있을 때를 총침착으로, 전식 침착을 측정하기 위해 주변에 별도로 강수가 없는 1주일 동안 포집하는 것을 원칙으로 하였다. 그리고 대기 TSP를 포집하기 위하여 강하분진 포집위치로

부터 약 5 m 떨어진 위치에서 mini volume air sampler (Airmetrics Co., SN: 1831)를 가동하였다. TSP 채집은 유량 5 lpm의 minivol air sampler로 47 mm 유리섬유여지 (Gelman Science, Model 3905LR)를 사용했으며, 사용 여지는 시료 포집 전후 3일간 항온, 항습 상태의 건조장치 (dessicator; Shinai R-700C)에 보관하여 항량이 되게하였으며, 감도가 0.01 mg인 전자저울(OHAUS Co.: Model AP250D-0)로 칭량하여 여과전후의 중량차로 분진의 농도를 산출하였다. 본 연구에서 분석된 시료의 숫자는 41개로써, 이중 총침착 시료는 16개, 전식침착 시료가 11개, 그리고 총부유분진 시료가 14개이다. 그리고 강하분진의 금속원소 분석을 위하여 시료분석시 분석에 사용된 모든 초차들은 문헌에 권고된 방법으로 세척되고 관리되었으며 (Jaffe *et al.*, 1993; Ross와 MacGee, 1989). 포집용기는 분석 직전까지 냉장고에 보관하였다. 수용성 성분과 불용성 성분을 구분하기 위하여 직경 47 mm의 막여지 (membrane cellulose nitrate filter, pore size 0.45 μm; MFC)를 사용하여 흡입여과를 하였다. 흡입 이전에 용기 벽면에 부착된 분진을 수거하기 위해 policemen을 사용하였으며, 증류수를 수회 분출하여 완전히 수거하였다. 막여지는 흡입 전후에 20°C, 50%의 항온, 항습 조건하에서 최소 48시간 방치한 후 칭량하였으며, 불용성분에 대한 분석을 수행하기 이전까지 petridish에 밀봉하고 건조기 내에서 보관하였다. 불용성 시료의 양과 원소의 농도를 결정하기 위해, 표준시험법 (Standard Method, 1992)에 의거하여, 유리섬유여지에 포집된 분

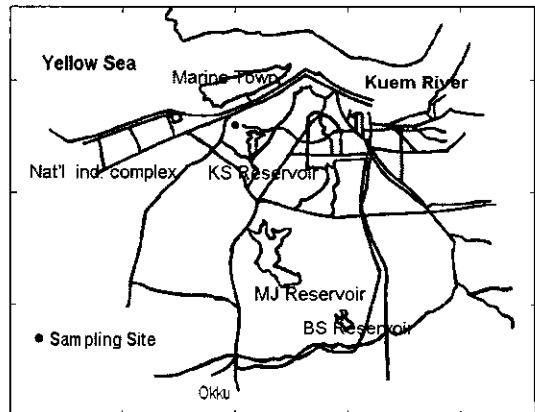


Fig. 1. Map of sampling site in Kunsan.

진을 질산법으로 용해시켰다. 이를 위해 시료 여지를 100 ml 테프론 비이커에 넣고 61% 농질산(특급, OSAKA Co., JAPAN) 10 ml와 과염소산(특급, Samchun Pure Chemical Ind., Japan) 5 ml과 불화수소(A.C.S급, J.T. Baker, U.S.A.) 1 ml를 차례로 가했다. 테프론 Watch glass를 덮고 130°C에서 약 30분간 가열해서 과염소산의 백색 연기가 발생할 때 테프론 Watch glass를 제거하였다. 그 후 완전히 건조되지 않을 정도로 증발시킨 후, 다시 질산 1 ml와 증류수 2~3 ml를 첨가하여 hot plate 상에서 가열하면서 기체의 잔존물을 용해시킨 후 증류수를 첨가하여 매스 플라스크에 25 ml로 맞추었다. 반면, 수용성 분진의 양과 무기원소를 결정하기 위해, 침착된 시료에서 막여지를 통과한 액을 hot plate 상에서 건조시킨 후, 분진 무게를 측정하고, 질산으로 용해한 후 증류수를 첨가하여 25 ml로 조정했다. 그리고 시료는 원자흡광광도계(AAS: Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu, Model AA-6601F)를 사용하여 금속원소의 농도를 결정했다. 본 연구에서 분석한 금속원소의 수는 5개, 즉 Zn, Cd, Cr, Fe, Pb이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 강하분진 및 금속원소의 월별 침착량

그림 2는 건식 및 총(bulk) 강하분진과 5개 금속원소의 월별 침착량을 나타내었다. 건식 강하분진의 침착량은 1997년 11월에 48.8 ton/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 2월에 35.0 ton/km<sup>2</sup>/yr, 4월에 31.9 ton/km<sup>2</sup>/yr, 11월에 26.5 ton/km<sup>2</sup>/yr이었고, 총(bulk) 강하분진 침착량은 1998년 6월에 91.8 ton/km<sup>2</sup>/yr, 1997년 11월 63.5 ton/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 3월 52.0 ton/km<sup>2</sup>/yr으로 조사되었다. 그리고 Zn의 건식침착량은 1998년 4월 175.1 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1997년 12월 59.6 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 11월 57.7 kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, Zn의 총침착량은 1998년 4월에 532.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 3월 227.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 5월 94.3 kg/km<sup>2</sup>/yr의 순으로 봄철에 가장 높게 조사되었으며, Cd의 건식침착량은 1998년 6월 9.6 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 7월 6.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 11월 4.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 총침착량은 1998년 6월에 25.9 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 5월 25.4 kg/km<sup>2</sup>/yr로 여름철이 가장 높게 조사되었다. 그리고 Cr의 건식침착량은 1998년 4월 651.2 kg/

km<sup>2</sup>/yr, 6월 170.6 kg/km<sup>2</sup>/yr, 총침착량은 1998년 5월에 497.2 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 6월 351.2 kg/km<sup>2</sup>/yr로 조사되었다. 그리고 Fe의 건식침착량은 1998년 4월 2,120.5 kg/km<sup>2</sup>/yr, 12월 1,151.1 kg/km<sup>2</sup>/yr, 3월 932.6 kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 총침착량은 1998년 7월에 1,349.9 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 11월 609.5 kg/km<sup>2</sup>/yr의 순이었고, Pb의 건식침착량은 1998년 11월 178.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 12월 61.9 kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 총침착량은 1998년 5월에 199.4 kg/km<sup>2</sup>/yr, 1998년 7월 117.7 kg/km<sup>2</sup>/yr의 순이었다. 그런데 조사기간 동안의 건식 및 총 부분을 보면, 최고농도 발생시 풍향과 풍속은 강하분진이 각각 11월(서남서, 3 m/sec)과 4월(북동, 3.3 m/sec)이었고, Zn은 각각 4월(북동, 3.3 m/sec)이었고, Cd은 모두 6월(북동, 3.2 m/sec), Cr은 각각 4월(북동, 3.3 m/sec)과 5월(북동, 3.3 m/sec), Fe은 각각 4월(북동, 3.3 m/sec)과 7월(남서, 3.4 m/sec), 그리고 Pb은 11월(서남서, 3.4 m/sec)과 5월(북동, 3.3 m/sec)로 조사되었다. 이로 미루어 볼때 이 연구 시점에서 나타난 오염 현상은 군장 국가산업단지의 위치가 조사 지점에서 북서 방향에 위치해 있고 최고 농도가 나타난 달의 풍향이 다른 방향을 보이고 있으므로 군산지역의 오염 현상은 다른 지역에서 장거리 이동된 결과라 사료된다.

#### 3.2 계절별 침착량

침착량은 강수형태(비, 눈, 우박), 강수속도(가랑비, 폭우 등) 및 대기 중 부유분진의 농도에 의존한다. 본 연구에서는 강하분진을 포집할 때 강수가 있을 경우, 실험실에서 막여지에의 여과 유무에 따라 이를 수용성과 불용성 강하분진으로 분류하였다. 따라서, 본 연구에서의 침착량 w는 건식 및 습식침착이 혼합된 크기로서 다음과 같은 일반적인 공식을 사용하여 추정할 수 있다.

$$w = VC/TA$$

여기서, V = 포집된 강수량(L)

C = 포집된 강수중 오염물질의 농도(μg/L)

T = 시간(s)

A = 부하발생 노출면적(cm<sup>2</sup>)

표 2, 3은 건식침착량과 총침착량 중 불용성 성분 및 수용성 성분의 침착량과 건식/총침착량을 계절별로 추정한 결과이다. 표에서 12, 1, 2월은 겨울철,

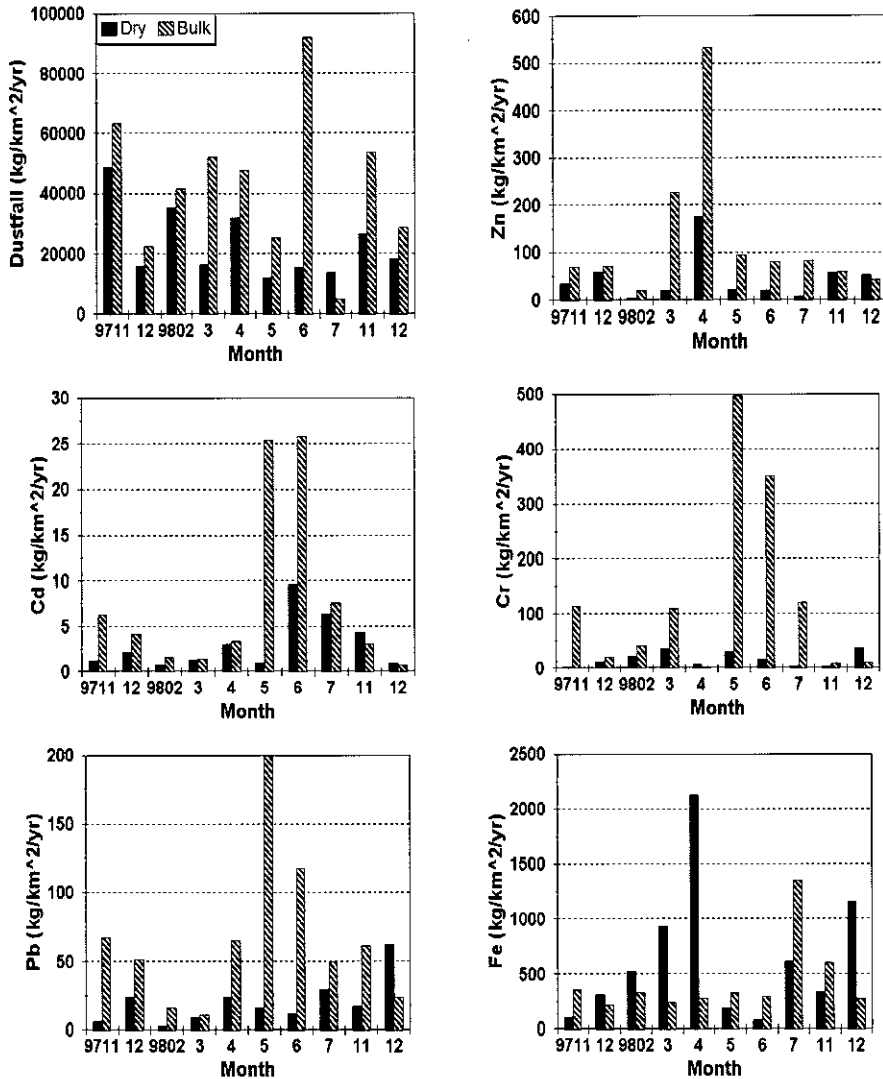


Fig. 2. Dry and bulk deposition fluxes of dustfall and metallic elements by months.

3, 4, 5월은 봄철, 6, 7, 8월은 여름철, 9, 10, 11월은 가을철로 간주하고 분류하였다. 일반적으로 대기침착 물질은 자연적 지각 기원원소(Al, Ca, Fe, Si)와 인위적 기원원소(Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn)로 구분할 수 있다. Noll *et al.* (1989)에 의하면, 지각 구성물질의 질량은 총 거대입자 질량의 15~50%를 차지하였으며, 인위적 물질량은 1% 이하로 조사되었다.

참고로 조사기간 동안 군산시의 기상 상태는 다음과 같다. 풍속은 봄이 3.7 m/s, 여름 2.9 m/s, 가을

3.7 m/s 그리고 겨울이 2.8 m/s로 조사기간 평균 3.5 m/s로 나타났으며, 특히 건기인 9, 10, 11월이 우기인 6, 7, 8월 보다 풍속이 강하게 불었다. 건기/우기의 풍속의 비는 1.3으로 건기때 풍속이 높게 조사되었다. 온도는 봄철이 11.9°C, 여름철이 23.8°C, 가을철이 15.7°C 그리고 겨울철이 4.6°C로 조사기간 평균 12.8°C이었다. 또한 기압은 봄 1,018.4 hPa, 여름 1,007.1 hPa, 가을 1,016.5 hPa 그리고 겨울이 1,023.4 hPa이었으며 조사기간 평균 1,017.1 hPa으로

여름철이 저기압을, 겨울철에 고기압을 나타내었다. 그리고 습도는 조사기간 동안 73.9%였고 봄이 74.8%, 여름 78.9%, 가을 72.6% 그리고 70.8%로 여름철이 고온 다습한 날씨를 보였다. 월평균 구름의 양과 강우량은 각각 봄 5.9%, 92.7 mm, 여름 22.4%, 387.7 mm, 가을 3.8%, 99.1 mm, 겨울 3.6%, 19.8 mm 이었고, 조사기간 평균 8.8%, 150.0 mm로 여름철이 구름양과 강우량이 가장 많은 계절임을 보이고 있다.

한편, Hien *et al.* (1997)은 지역 배출오염원의 영향을 조사할 때 주풍향과 금속원소 농도와와의 관계에서 아무런 유의한 관계가 없었다고 보고했다. 그래서 각 원소들 간의 상관성을 보기 위해서 SPSS를 이용하여 Pearson correlation을 실시한 결과를 표 1에 나타내었다. 강하분진, 금속원소들의 농도와 기상인자간의 관계를 살펴본 결과, 강하분진은 Pb, Fe, 온도 와는 역상관 관계인 반면, Zn, Cd, Cr, 강우량, 습도, 풍속 구름양간에는 정상관 관계를 나타내었다. 그리고 Cd은 Cr ( $r=0.937, p<0.01$ ), Pb ( $r=0.785, p<0.01$ ), 구름양 ( $r=0.744, p<0.01$ )를 나타냈고, Cr 은 Pb과  $r=0.819 (p<0.01)$ 을 보였다. 또한 Pb은 습도 ( $r=0.625, p<0.05$ ), 구름양 ( $r=0.704, p<0.05$ )의 관계로 보아 수분양의 존재와 관련이 있었다. 그리고 온도가 높은 계절일수록 비와 구름이 많았고, 구름양이 많을수록 Cd, Pb의 농도가 높게 나타났다. 일반적으로 금속원소는 풍속이 강할 때 감소한다고 알려져 있지만, 남과 풍속사이의 상관이 매우 약해

서 ( $r=-0.405$ ), 남의 변화를 지배하는 인자로는 적합하지 못했다. 그러나 3월에는 남의 농도가 가장 낮았고, 특히 남은 겨울에서 봄으로 옮기는 계절천이가 있을 때 농도가 감소함을 보여주었다. 특이한 점은 구름의 양과 Cd, Pb의 농도와 온도, 강우량, 습도들이 정관계를 나타내었지만, 나머지는 매우 낮은 관련성을 보였다. 이처럼 구름의 양의 증가에 따라 강하분진과의 관련이 매우 낮은 양상을 보이고 있는데, 이는 구름에 의한 rain-out과 비에 의한 wash-out 작용에 의한 것이라고 사료된다. 보통 분진은 구름에서 약 10개의 응축/증발하는 사이클이 있다 (Spokes *et al.*, 1988). 각각의 cycle에서 구름의 평균 수명은 0.5~1시간인 반면, 안개는 이보다 더 길다 (Williams *et al.*, 1988). 이러한 cycle에서 분진들은 수액상에 둘러 쌓여있거나 그 속에 있다. 이러한 작용과정은 화학적 구성요소의 특성(수용성, 흡습성)과 일정한 과포화 상태에서 분진 크기에 달려 있다 (Svenningsson *et al.*, 1992). 분진의 주 구성성분은  $H^+, NH^+, Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-$ 이다 (Warneck, 1988). 또 다른 성분으로 Al, Si, P, Ti, Fe, Zn 및 다른 많은 성분을 가지고 있다 (Jaenicke, 1988). 그래서 구름의 응축핵에서의 입자들과 상호 작용하는 분진들의 물에 대한 용해도는 다르며, 이런 분진과 구름 사이의 상호작용은 기후에 영향을 미친다 (Hansson *et al.*, 1994).

3. 2. 1 계절별 건식 침착량

표 2는 불용성 및 수용성 건식침착량과 수용성과

Table 1. Correlation coefficients between meteorological factors and metallic elemental concentrations in bulk deposition.

	Dust	Zn	Cd	Cr	Pb	Fe	Tem	Rain	Hum	WS	Cloud
Dust	1.00										
Zn	.178	1.00									
Cd	.343	-.093	1.00								
Cr	.188	-.157	.937**	1.00							
Pb	-.021	-.083	.785**	.819**	1.00						
Fe	-.431	-.173	-.035	-.052	-.069	1.00					
Tem	-.165	.031	.480	.483	.593	.560	1.00				
Rain	.215	.078	.450	.340	.436	.262	.826**	1.00			
Hum	.047	.503	.410	.345	.625*	-.046	.677*	.750**	1.00		
WS	.180	.158	-.118	.006	-.405	-.077	-.303	-.296	-.305	1.00	
Cloud	.320	.455	.744*	.664	.704*	-.334	.842**	.747*	.916**	.027	1.00

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

- Note: Temp (Temperature), Humi (Humidity), WS (Wind Speed) and Cloud (Cloud Mass)

건식 총침착량의 계절별 비를 보이고 있다. 강하분진의 계절별 불용성, 수용성 건식침착량은 각각 겨울철 및 가을철이 가장 높았고, 평균 불용성 침착량은 13.6 ton/km<sup>2</sup>/yr, 평균 수용성 침착량은 12.0 ton/km<sup>2</sup>/yr으로 조사되었다. 그리고 총 건식침착량은 평균 25.6 (범위 14.6~48.8) ton/km<sup>2</sup>/yr이었으며, 1997년 가을철이 48.8 ton/km<sup>2</sup>/yr로 평균 분진량의 1.9배로 많았음을 알 수 있었다. 그리고 총 건식분진량에 대한 수용성 분진량의 비는 평균 0.47로 가을철이 0.65, 봄철이 0.36으로 가을철이 타 계절에 비해 건식침착량 중 미세분진의 양이 많게 조사되었다. 그리고 건식침착물 중 금속원소의 침착량을 보면, Cd, Cr, Pb 그리고 Zn의 건식침착량은 비교적 낮게 검출되었으나 Fe은 높게 검출되었다. 각 원소의 건식침착량에 대한 계절 분포를 보면, Zn의 불용성분의 평균은 11.0 (범위 3.66~12.74) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 봄철이 여름철보다는 2.7배가 검출되었으며, 수용성분의 평균은 33.07 (범위 9.82~59.82) kg/km<sup>2</sup>/yr이었다. 한편, 겨울철은 31.02 kg/km<sup>2</sup>/yr였는데, 이는 1993~1994년 겨울 광주 지역의 수용성 Zn 167.8 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 5.4배 낮게 검출되었다 (김성천과 김동술, 1996). Zn의 총량은 평균 40.88 (범위 14.5~72.6) kg/km<sup>2</sup>/yr로 봄철이 72.6 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었고, 이는 광주의 1993~1994년 평균 Zn 75.8 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 1.9배 낮았다. 또한 건식침착총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.75로 봄, 가을, 겨울철이 비슷하게 존재하였다. Cd의 불용성분의 평균은 0.02 (범위 0.00~0.06) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 계절 평균치 보다 1.5배가 검출되었으며, 수용성분의 평균은 2.59 (범위 0.88~7.98) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Cd의 총량은 평균 2.61 (범위 0.9~8.0) kg/km<sup>2</sup>/yr로 여름철이 7.98 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높았고, 봄철은 1.82 kg/km<sup>2</sup>/yr로 조사되었다. 이는 강릉의 1994년 봄철의 Cd 6.1 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 3.4배 높은 양이다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.99이며, 4계절 모두 미세입자 중에 Cd의 양이 많이 존재하였다. 그리고 Cr의 불용성분의 평균은 4.42 (범위 0.00~11.33) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 여름철이 가을철보다는 10.8배가 검출되었으며, 수용성분의 평균은 59.4 (범위 0.51~232.53) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Cr의 총량은 평균 63.9 (범위 2.1~239.2) kg/km<sup>2</sup>/yr로 봄철이 239.2 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었

다. 이는 1994년 봄 강릉의 Cr 53.4 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 4.5배 높은 수치이다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.93으로 1998년 가을철을 제외하고 미세입자 중에 Cr의 양이 많이 존재하였다. Fe의 불용성분의 평균은 447.0 (범위 69.4~1,088.4) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 200.5 kg/km<sup>2</sup>/yr로 1994년 가을철 광주시의 Fe의 결과인 344.9 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 1.7배 낮게 조사되었다. 수용성분의 평균은 126.9 (범위 0.0~592.1) kg/km<sup>2</sup>/yr, 봄 592.1 kg/km<sup>2</sup>/yr였는데, 이는 1994년 수원지역의 봄철의 Fe 55.2 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 10.7배 높은 수치이다. 그리고 Fe의 총량은 평균 573.9 (331.6~1,082.7) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 봄철이 1,082.7 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었다. 이는 광주에서 1993~1994년 평균 Fe 273.5 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 2.1배 높았다. 이는 주풍향이 서풍인 점과 군산시 국가공단 내에 철강제조업체에서 발생하는 오염물의 영향 때문으로 사료된다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.22로 4계절 모두 매우 낮았다. 참고로 우리나라 5개 지역 (서울, 수원, 대전, 광주, 강릉)의 총 건식침착물 중 Fe의 수용성분 비율은 0.012~0.264 범위에 있었는데 군산시의 경우도 유사하게 조사되었다. Pb의 불용성분의 평균은 4.6 (범위 0.0~9.9) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 2.0 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 검출되었는데, 이는 광주의 1994년 겨울철 8.0 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 25% 수준이다. 그리고 수용성분의 평균치는 44.6 (범위 1.2~178.4) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, 가을철이 89.8 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높았는데, 이는 1994년 가을에 광주의 Pb 48.1 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 1.9배 높게 검출되었다. 또 Pb의 총량은 평균 49.2 (5.2~178.4) kg/km<sup>2</sup>/yr로 가을철이 91.8 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었는데, 광주에서 1994년 가을 Pb 48.9 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 1.9배 높았다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.91로 겨울철이 0.75로 나타나 미세입자 중에 Pb의 양이 많이 존재하였다. 따라서 총 건식침착물 중에서 수용성분이 차지하는 비율이 Cd>Cr>Pb>Zn>강하분진>Fe 순으로 나타났고, 이는 인위적 오염원에서 배출된 Cd, Cr, Pb, Zn은 미세입자 부분에, 그리고 강하분진과 Fe은 그 비율이 작아 거대입자 부분에 높게 검출된다는 점과 일치한다.

Table 2. Dry deposition flux of dustfall and metallic elements by seasons.

(kg/km<sup>2</sup>/yr, n = 11)

Season		97Fall.	97,98Win.	98Spr.	98Sum.	98Fall.	98Win.	Avg.
Dust-fall	Ins	14,393.2	15,535.0	12,874.1	12,107.5	10,823.2	16,093.4	13,637.7
	Sol	34,426.7	9,837.1	7,163.2	2,529.8	15,711.1	2,041.4	11,956.1
	Tot	48,819.8	25,372.1	20,037.4	14,637.3	26,534.3	18,134.8	25,589.3
	S/T	0.71	0.39	0.36	0.17	0.59	0.11	0.47
Zn	Ins	3.66	9.82	12.74	4.72	22.32	12.74	11.00
	Sol	31.37	22.07	59.82	9.82	35.35	39.97	33.07
	Tot	35.03	31.89	72.56	14.54	57.67	52.71	44.07
	S/T	0.90	0.69	0.82	0.68	0.61	0.76	0.75
Cd	Ins	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
	Sol	1.24	1.38	1.79	7.98	4.38	0.88	2.94
	Tot	1.30	1.42	1.82	7.98	4.38	0.88	2.96
	S/T	0.95	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99
Cr	Ins	2.1	3.15	6.70	11.33	0.00	3.23	4.42
	Sol	0.51	13.82	232.53	75.47	2.13	32.17	59.44
	Tot	2.61	16.97	239.23	86.79	2.13	35.40	63.86
	S/T	0.20	0.81	0.97	0.87	1.00	0.91	0.93
Fe	Ins	69.38	404.38	490.61	297.83	331.55	1088.37	447.02
	Sol	39.30	16.11	592.11	51.07	0.00	62.73	126.89
	Tot	108.68	420.49	1082.73	348.89	331.55	1151.10	573.90
	S/T	0.36	0.04	0.55	0.15	0.00	0.05	0.22
Pb	Ins	3.93	6.68	9.89	7.14	0.00	0.00	4.61
	Sol	1.23	6.51	6.12	13.57	178.43	61.87	44.62
	Tot	5.16	13.19	16.01	20.72	178.43	61.87	49.23
	S/T	0.24	0.49	0.38	0.66	1.00	1.00	0.91

3. 2. 2 계절별 총 침착량

표 3의 한달간 포집한 총(bulk) 침착량을 계절별로 보면, 강하분진의 불용성, 수용성 총침착량은 각각 가을철, 여름철이 가장 높았지만, 평균 불용성 침착량은 16.4 ton/km<sup>2</sup>/yr, 평균 수용성 침착량은 28.2 ton/km<sup>2</sup>/yr으로 조사되었다. 그리고 총침착량은 평균 44.6 ton/km<sup>2</sup>/yr이었으며, 1998년 여름철이 48.4 ton/km<sup>2</sup>/yr으로 조사되었고, 가을철에 58.6 ton/km<sup>2</sup>/yr로 가을철의 평균 분진 양이 평균치의 1.3배로 많았음을 알 수 있었다. 그리고 총분진에 대한 수용성 분진의 비는 평균 0.63로 여름철이 0.82, 봄철이 0.67, 가을철이 0.60 그리고 겨울철이 0.45로 여름철이 미세분진의 양이 높게 조사되었다. 그리고 총침착물 중 금속원소의 침착량을 보면, Cd, Cr, Pb 그리고 Zn의 총침착량은 비교적 낮게 검출되었으나 Fe은 높게 검출되었다. 각 원소의 총침착량에 대한 계절 분포를 보면, Zn의 불용성분의 평균치는 7.14 (범위 0.71 ~ 11.91) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 겨울철이 여름철보다는 12.3배가 검출되었으며, 수용성분의 평균치는

89.8 (범위 29.5 ~ 280.6) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Zn의 총량은 평균 97.0 kg/km<sup>2</sup>/yr이었으며, 봄철이 284.7 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.93이었고, 봄, 여름철이 각각 0.98, 0.99로 높았으며, 4계절 모두 미세입자 중에 Zn의 양이 많았음을 보였다. 이는 Rojas *et al.* (1993)이 조사한 Zn 20 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 높은 수치이며, Ottley와 Harrison (1993)이 북해에서 10번의 항해조사에서 조사한 Zn의 침착량 2,640 ton/yr에 비해 매우 낮았다. 이것은 조사지점의 상이점 때문으로 사료된다. Cd의 불용성분의 평균치는 0.6 (범위 0.01 ~ 1.90) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 여름철보다는 139.5배가 검출되었으며, 수용성분의 평균치는 6.1 (범위 0.38 ~ 16.69) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Cd의 총량은 평균 6.6 kg/km<sup>2</sup>/yr로 여름철이 16.70 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.92로 봄, 여름철이 높았으며, 가을철이 0.71로 조사되었다. 특히, Cd의 경우 측정기간 평균치는 수인(3.9 kg/km<sup>2</sup>/yr) 보다 1.7배 높았으며,



**Table 3. Bulk flux of dustfall and metallic elements by seasons.** (kg/km<sup>2</sup>/yr, n = 16)

Season		97Fall.	97,98Win.	98Spr.	98Sum.	98Fall.	98Win.	Avg.
Dust-fall	Ins	15,273.8	16,420.8	13,951.2	4,955.9	30,375.0	17,392.1	16,394.8
	Sol	48,159.3	15,719.0	27,650.4	43,455.2	23,179.1	11,255.2	28,242.4
	Tot	63,469.1	32,139.8	41,601.6	48,412.1	53,554.1	28,647.3	44,637.2
	S/T	0.76	0.51	0.67	0.82	0.43	0.39	0.63
Zn	Ins	7.13	5.62	4.08	0.71	13.40	11.91	7.14
	Sol	62.59	40.08	280.63	80.96	45.11	29.50	89.81
	Tot	69.71	45.70	284.71	81.68	58.51	41.40	96.95
	S/T	0.90	0.83	0.98	0.99	0.77	0.71	0.93
Cd	Ins	1.90	0.10	0.14	0.01	0.89	0.28	0.55
	Sol	4.39	2.80	9.94	16.69	2.17	0.38	6.06
	Tot	6.29	2.89	10.08	16.70	3.06	0.66	6.61
	S/T	0.70	0.96	0.99	1.00	0.71	0.57	0.92
Cr	Ins	0.08	1.92	5.49	3.42	0.96	1.35	2.20
	Sol	113.20	29.59	197.58	232.15	8.62	9.16	98.38
	Tot	113.28	31.51	203.07	235.57	9.58	10.51	100.59
	S/T	1.00	0.94	0.97	0.99	0.90	0.87	0.98
Fe	Ins	276.92	199.18	222.41	173.95	607.91	261.27	290.27
	Sol	75.86	77.56	61.59	648.67	1.59	16.91	147.03
	Tot	352.77	276.73	284.01	822.62	609.49	278.18	473.30
	S/T	0.22	0.27	0.22	0.48	0.00	0.06	0.34
Pb	Ins	16.50	11.00	5.25	0.05	8.16	10.40	8.56
	Sol	50.97	23.23	86.57	83.67	52.56	13.48	51.75
	Tot	67.46	34.23	91.82	83.72	60.73	23.88	60.31
	S/T	0.76	0.47	0.67	1.00	0.87	0.56	0.86

광주 (1.7 kg/km<sup>2</sup>/yr) 보다 3.9배 높았다. 그러나 Rojas *et al.* (1993)이 조사한 Cd 0.43 kg/km<sup>2</sup>/yr 보다 15.4배 높은 결과를 보였다. Cd은 우리나라의 특정 유해 대기오염물질로서 호흡기관 및 심장 혈관증을 유발시킬 수 있는 중금속이다. Cr의 불용성분의 평균치는 2.2 (범위 0.08~5.49) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 봄철이 5.49 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 검출되었으며, 수용성분의 평균치는 98.4 (범위 8.6~232.2) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Cr의 총량은 평균 100.6 kg/km<sup>2</sup>/yr로 봄철이 203.1 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.98로 4계절 모두 높았으며, 미세먼자 중에 Cr의 양이 많이 존재하였다. Cr의 경우 조사기간 평균치는 수원 (33.4 kg/km<sup>2</sup>/yr)보다 3.0배 높았으며, 서울 (23.3 kg/km<sup>2</sup>/yr)보다 4.3배 높았다 (김성천과 김동술, 1996). Fe의 불용성분의 평균치는 290.3 (범위 174.0~607.9) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 가장 높게 조사되었으며, 수용성분의 평균치는 147.0 (범위 1.6~648.7) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Fe의 총량은 평균 473.3 kg/km<sup>2</sup>/yr로 여름철이

822.6 kg/km<sup>2</sup>/yr으로 봄철 보다 2.9배 높게 조사되었다. 또한 총량에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.34로 여름철이 0.48로 높았으며, 가을철이 0.11로 나타나 4계절 모두 거대입자 중에 Fe의 양이 많이 존재하였다. 이는 서울 0.19, 수원 0.09, 대전 0.11, 광주 0.09, 강릉 0.11에 비해 높은 수치이다. 그리고 Pb의 불용성분의 평균치는 8.6 (범위 0.1~16.5) kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 가을철이 12.6 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 검출되었으며, 수용성분의 평균치는 51.8 (범위 13.5~86.6) kg/km<sup>2</sup>/yr였고, Pb의 총량은 평균 60.3 kg/km<sup>2</sup>/yr로 봄철이 91.8 kg/km<sup>2</sup>/yr로 가장 높게 조사되었다. 또한 총량 중에 대한 수용성분의 비율은 평균 0.86으로 여름철이 1.00로 높았으며, 가을철이 0.82로 미세먼자 중에 Pb의 양이 많이 존재하였다. Pb의 경우 조사기간 평균치는 광주 (112.6 kg/km<sup>2</sup>/yr)보다 1.9배 낮았고, 강릉 (74.4 kg/km<sup>2</sup>/yr)보다 1.2배 낮았으며, 대전 (37.7 kg/km<sup>2</sup>/yr) 보다 1.6배 높았다. 이는 Rojas *et al.* (1993)이 조사한 8.7 kg/km<sup>2</sup>/yr에 비해 높은 수치를 나타내었지만, Ottley와 Harrison

(1993)이 북해에서 10번의 항해조사에서 조사한 Pb 370 ton/yr에 비하면 매우 낮았다. 우리나라는 무연 휘발유의 대체정책으로 Pb의 전반적 침착량은 꾸준한 감소추세에 있지만 조사지점에서 보인 침착량은 유사 오염원에 대한 규제부실을 의미한다. 본 연구 수행과정에서 군산의 오염현황은 특이하였다. 자연적 오염물질로 추정되는 Fe 이외에 대표적 유해물질인 Zn, Cd, Cr, Pb 등이 검출되어 주변지역의 오염원 조사가 시급하다고 사료되며 육상 오염원 뿐만 아니라, 해상 오염원의 규제 필요성이 절실하였다. 또한 조사대상 물질이 검출된 것은 시료채취 장소의 서측에 황해와 국가 공단이 위치해 있고 군산시의 주풍향이 서풍인 점을 감안하면 중국 및 공단으로부터 오염물질이 유입된 결과로 사료되며, 향후 연구대상이라고 사료된다.

3.3 총 건식침착량과 총강하분진의 침착량의 비

월별 건식침착량과 총침착량의 비를 살펴본 결과, 강하분진 비의 범위가 0.17~2.75였으며, 1998년 2월에 0.84, 1998년 6월 0.17로 나타났으나 1998년 7월에는 2.75로 오히려 건식침착량이 높게 계산되었다. 이는 시료포집 당시에 포집장소 주변의 도로 공사 때문으로 사료된다. 그리고 Zn의 범위는 0.11~1.27였으며, 1998년 12월에 1.27, 3월에 0.09로 조사되었고, Cd의 범위는 0.04~1.43, 1998년 11월에 1.43, 1998년 5월에 0.04로 조사되었다. 그리고 Cr의 범위는 0.03~3.37, 1998년 12월에 3.37, 1997년 7월에 0.03로 조사되었고, Fe의 범위는 0.27~7.54, 1998년 6월에 0.27, 1998년 4월에 7.54로 조사되었다. 또한 Pb의 범위는 0.08~2.59, 1997년 11월에 0.08, 1998년 12월에 2.59으로 조사되었다. 그리고 표 4의 계절별 건식침착량과 총침착량의 비를 보면, 강하분진의 비는 평균 0.57이었으며 겨울철 0.71로 가장 높게 조사되었으며, 가을 0.64, 봄, 여름이 각각 0.48, 0.30으로 조사되었다. 금속원소 중 Zn의 비는 평균 0.45이었으며 겨울 0.99, 가을 0.75로 조사되었으며, Cd의 비는 평균 0.45이었으며 겨울 0.92로 조사되었고, Cr의 비는 평균 0.63로, 겨울 1.96으로 조사되었다. 그리고 Fe의 비는 평균 1.31로 가장 높았으며 봄 3.81로 조사되었고, Pb의 비는 평균 0.82이었으며, 겨울 1.49로 조사되었다. 조사기간 동안 총 건식침착량과 총 강하분진 침착량의 비

Table 4. Ratio of dry deposition flux and bulk deposition flux of dustfall and metallic elements by seasons.

Season	97Fall.	97,98Win.	98Spr.	98Sum.	98Fall.	98Win.	Avg.
Dust-fall	0.77	0.79	0.48	0.30	0.50	0.63	0.57
Zn	0.50	0.70	0.25	0.18	0.99	1.27	0.45
Cd	0.21	0.49	0.18	0.48	1.43	1.34	0.45
Cr	0.02	0.54	1.18	0.37	0.22	3.37	0.63
Fe	0.31	1.52	3.81	0.42	0.54	4.14	1.31
Pb	0.08	0.39	0.17	0.25	2.94	2.59	0.82

는 강하분진, Zn, Cd, Cr, Pb, 그리고 Fe이 겨울에 높게 검출되었다. 특이한 점은 Fe의 비가 평균 1.31로 총침착량에 비해 건식침착량이 높게 조사되었는데, 이는 건식침착되는 기간에 철강업체 등에서 배출 및 기상학적 인자들에 의해 높게 나타난 결과라고 사료된다.

3.4 건식 침착속도의 추정

대기 중 분진의 건식침착은 지표면 근처의 기상학적 조건과 입자의 특성, 표면의 조도 등에 의존하는 매우 복잡한 과정이다. 이러한 영향 인자로 인해 강하분진의 침착량은 시·공간적으로 크게 변화할 수 있다. 건식침착은 분진의 대기 중 체류시간과 관련한 소멸과정의 하나이기 때문에, 측정변수를 이용하여 침착속도를 결정하는 일이 중요하다. 건식침착에 대한 확고한 연속 측정방법은 최근까지 존재하지 않지만, 간접적 측정기술은 실험적으로 개발된 바 있다(Hicks *et al.*, 1980). 또한, 각종 보고서는 실험적으로 다음과 같은 건식침착 속도식을 사용하고 있다.

$$F = V_d \cdot C_a$$

여기서, F = 침착량 또는 flux ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{sec}$ )

$V_d$  = 침착속도 (cm/s)

$C_a$  = 시료채취 지역에서의 부유분진의 농도 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )

최근까지, 침착속도  $V_d$ 에 대한 대표치는 존재하지 않고 있다. 이는 분진에 대한 중력침강 속도와 사용된 각종 유사 경험변수들에 많은 가정들이 내재되어 건식 침착속도를 정확히 계산할 수 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고 각종 대기오염물질에 대

한 건식 침착속도 관련 자료가 제시되고 있다(Eisenreich *et al.*, 1980). 지금까지 각종 연구를 통해 얻은 침착속도치의 범위는 매우 광범위하게 나타나고 있으며, plume의 소멸을 예측하는 가장 좋은 방법은 입자의 건식 침착속도를 이용하는 것이다. 침착속도에 가장 큰 영향을 주는 요인은 입자의 직경이고, 다른 변수로는 풍속을 들 수 있다. 또한 경우에 따라서는 동일물질에 대한 동일장소에서의 실험에서도 침착속도 값은 수십배 정도 차이를 보이고 있다. 이는 각 조사대상 물질의 공기 중 체류시간이 입자의 크기에 따라 큰 편차를 보이기 때문으로, 예를 들어, 가스상 물질에 대한 건식 침착속도는  $2 \times 10^{-3}$  cm/s에서 26 cm/s 범위를 보여 약 10,000배 정도의 차이를 보이기도 하며, 입자상 물질에 대한 건식 침착속도는  $10^{-3}$ 에서 180 cm/s 범위로 100,000배 정도 차이를 보인다. 그러므로 입자의 크기, 지형, 기상 등을 고려한 정교한 실험을 수행하여야만 이들 속도범위의 차를 줄일 수 있다.

이처럼 침착속도를 추정하는에는 많은 제약과 제한점이 있지만, 본 연구에서는 강수가 없을 때 채집된 시료를 건식침착 분진으로 간주하고 조사한 결과, 11개의 시료를 채취할 수 있었다. 금속원소들의 건식 침착속도를 계산하기 위해 군산지역에서 부유분진에 관한 측정작업을 병행하였다. 즉, mini volume air sampler를 사용하여 부유분진의 중량농도를 측정하였으며, AAS를 이용하여 원소분석 후 농도 분석을 하였고, 이들 측정자료를 이용하여 상기 건식침착 속도식에 대입하여 침착속도를 계산하였다.

먼저 TSP와 5개 금속원소의 농도를 계절별로 조사한 결과를 보면(표 5), TSP의 농도는 평균  $71.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1998년 봄에  $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 겨울이  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 그리고 Zn의 농도는 평균  $29.9 \text{ng}/\text{m}^3$ , 가을이  $41.0 \text{ng}/\text{m}^3$ , 봄이  $35.0 \text{ng}/\text{m}^3$ 였고, Cd은  $0.56 \text{ng}/\text{m}^3$ , 봄에  $2.1 \text{ng}/\text{m}^3$ , 여름  $0.9 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었으며, Cr은  $0.13 \text{ng}/\text{m}^3$ , 봄  $0.22 \text{ng}/\text{m}^3$ , 여름  $0.14 \text{ng}/\text{m}^3$ , Fe은  $1,061.0 \text{ng}/\text{m}^3$ , 봄  $1,456.5 \text{ng}/\text{m}^3$ , 여름  $1,034.9 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로 높게 검출되었다. 그리고 Pb은  $4.4 \text{ng}/\text{m}^3$ , 봄  $16.5 \text{ng}/\text{m}^3$ , 여름이  $7.0 \text{ng}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 특히 TSP, Cd, Cr, Fe 그리고 Pb의 농도가 봄에 높게 조사되었고, Zn은 가을에 높았다.

그리고 표 6에서는 강하분진 및 금속원소의 침착속도의 결과를 보여주고 있다. 본 조사에서는 강하

**Table 5. Concentration of TSP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and metallic elements ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) by seasons.** (n = 14)

Season	97Fall.	97,98Win.	98Spr.	98Sum.	98Fall.	98Win.	Avg.
TSP	67	72	89	60	67	74	71
Zn	40.83	18.90	35.02	25.75	40.83	18.15	29.91
Cd	0.10	0.10	2.06	0.88	0.10	0.10	0.56
Cr	0.13	0.08	0.22	0.14	0.13	0.08	0.13
Fe	1,182.02	722.35	1,456.54	1,034.93	1,182.02	788.01	1,060.98
Pb	0.10	0.10	16.48	7.00	2.50	0.10	4.38

**Table 6. Dry deposition velocity of dustfall and metallic elements by seasons.** (cm/sec)

Season	97fall.	97,98win.	98spr.	98sum.	98fall.	98win.	avg.
Dust-fall	0.02311	0.01103	0.00711	0.00780	0.01256	0.00777	0.01137
Zn	0.02721	0.05350	0.06569	0.01791	0.04479	0.09211	0.04671
Cd	0.41318	0.44998	0.02798	0.28940	1.38783	0.27943	0.16917
Cr	0.66133	7.03400	33.79000	19.74000	0.54003	13.44768	15.69000
Fe	0.00292	0.01846	0.02357	0.01069	0.00889	0.04632	0.01715
Pb	1.63578	4.18184	0.03080	0.09380	2.26320	19.62022	0.35640

분진과 AAS로 측정이 가능하였던 Zn, Cd, Cr, Fe, Pb의 침착속도 값을 구하였다. 건식침착물의 평균 침착속도는 강하분진이  $1.13 \times 10^{-2}$  (범위  $0.71 \times 10^{-2} \sim 1.26 \times 10^{-2}$ ) cm/sec이었다. 그리고 Zn이  $4.67 \times 10^{-2}$  (범위  $1.79 \times 10^{-2} \sim 9.21 \times 10^{-2}$ ) cm/sec, Cd  $16.92 \times 10^{-2}$  (범위  $2.80 \times 10^{-2} \sim 138.78 \times 10^{-2}$ ) cm/sec이었고, Cr  $15.69$  (범위  $0.54 \sim 33.79$ ) cm/sec였고, Fe  $1.72 \times 10^{-2}$  (범위  $0.29 \times 10^{-2} \sim 4.63 \times 10^{-2}$ ) cm/sec, 그리고 Pb은  $0.36$  (범위  $0.03 \sim 19.62$ ) cm/sec이었다. 조사기간 동안 Cr의 침착속도가 다른 원소에 비해 매우 높게 조사되었고, 특히 봄철에는 Cr, 가을철에는 강하분진과 Cd, 그리고 겨울철에는 Zn, Fe 그리고 Pb의 침착속도가 크게 조사되었다. 이 결과는 침착속도가 Zn  $0.57 \sim 0.87$ , Pb  $0.35 \sim 0.45$ , Fe  $0.21 \sim 0.48$  cm/sec인 수원지역의 침착속도와 비교해 볼 때(김성천과 김동술, 1996), Zn과 Fe은 낮았고, Pb과는 비슷하게 조사되었다. 이는 Rojas *et al.* (1993)이 북해의 남부만에서 조사한 결과인 Zn  $0.35$ , Cd  $0.39$  보다는 낮았고, Pb  $0.25$  cm/sec 보다는 높았다. 그리고 An *et al.* (1990)이 보고한 중국의 황토에서 방출된 원소 (Al, Si, Ca, Fe, Ti)의 침착속도인  $3.1 \sim 3.7$  cm/sec에 비하면 낮았으며, Ottley와 Harrison (1993)이 북해에서 10년의 항해조사에서 조사한 침착속도가 각각 Zn  $0.30$  cm/sec, Cd  $0.24$  cm/sec, Fe  $0.30$  cm/sec, Pb

0.13 cm/sec, Al 0.33 cm/sec, Cu 0.44 cm/sec였는데, 이에 비하면 Pb를 제외하고는 모두 침착속도가 작았다.

#### 4. 결 론

1997년 11월부터 1998년 12월까지 근산지역에서 41개(총침착 16개, 건식침착 11개, 총부유분진 14개)의 시료를 포집하고 Zn, Cd, Cr, Pb, Fe 등 5개 원소를 AAS를 사용하여 정량적으로 분석하였다. 그리고 이들 원소를 수용성 성분과 불용성분으로 분류하고 침착량을 계산하였으며, 특히 건식침착 분석을 수행하여 건식침착속도를 추정된 결과는 다음과 같다.

1. 남은 겨울에서 봄으로 옮기는 계절천이가 있을 때 농도가 감소함을 보여주었고, 구름의 양과 강하분진은 관련이 매우 낮았는데, 이는 구름에 의한 rain-out과 비에 의한 wash-out 작용에 의한 것이라 고 사료된다.

2. 건식침착량은 강하분진 25.6 ton/km<sup>2</sup>/yr, Zn 40.88 kg/km<sup>2</sup>/yr, Cd 2.61 kg/km<sup>2</sup>/yr, Cr 63.9 kg/km<sup>2</sup>/yr, Fe 573.9 kg/km<sup>2</sup>/yr, 그리고 Pb는 49.2 kg/km<sup>2</sup>/yr 이었고, 총 건식침착량에 대한 수용성분의 비는 강하분진 0.47, Zn 0.75, Cd 0.99, Cr 0.93, Fe 0.22 그리고 Pb 0.91로 Cd, Cr, Pb, Zn은 미세입자 부분이, 강하분진과 Fe은 거대입자 부분이 많게 검출되었다.

3. 총(bulk) 침착량은 강하분진 44.6 ton/km<sup>2</sup>/yr, Zn 97.0 kg/km<sup>2</sup>/y, Cd 6.6 kg/km<sup>2</sup>/yr, Cr 100.6 kg/km<sup>2</sup>/yr, Fe 473.3 kg/km<sup>2</sup>/yr, 그리고 Pb 60.3 kg/km<sup>2</sup>/yr이었고, 총침착량에 대한 수용성분의 비는 강하분진 0.63, Zn 0.93, Cd 0.92, Cr 0.98, Fe 0.34 그리고 Pb 0.86으로 Fe은 자연적 오염원에서 배출되는 것으로 사료된다.

4. 계절별 건식침착량과 총침착량의 비는 강하분진 0.57, Zn 0.45, Cd 0.45, Cr 0.63, Fe 1.31, 그리고 Pb 0.82이었고, 강하분진, Zn, Cd, Cr, Pb, 그리고 Fe 모두 겨울철에 높게 검출되었다.

5. TSP의 농도는 평균 71.0 µg/m<sup>3</sup>, Zn 29.9 ng/m<sup>3</sup>, Cr 0.13 ng/m<sup>3</sup>, Pb 4.4 ng/m<sup>3</sup>, 그리고 Fe 1,061.0 ng/m<sup>3</sup>로 조사되어, TSP, Cd, Cr, Fe 그리고 Pb의 농도가 봄에 높게 조사되었고, Zn은 가을에 높았다.

6. 강하분진의 침착속도는  $1.13 \times 10^{-2}$  cm/sec, Zn

$4.67 \times 10^{-2}$  cm/sec, Cd 침착속도  $16.92 \times 10^{-2}$  cm/sec, Cr 15.69 cm/sec, Fe  $1.72 \times 10^{-2}$  cm/sec, 그리고 Pb 0.36 cm/sec이었으며, 봄철에 Cr, 가을철에 강하분진과 Cd, 그리고 겨울철에는 Zn, Fe, Pb의 침착속도가 크게 조사되었다.

#### 사 사

“이 논문은 1999년 근산대학교 수산과학연구소에서 출연한 일부 학술연구비에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.”

#### 참 고 문 헌

- 김성천, 김동술(1996) 한국에서 분진 및 금속원소의 건식 침착속도 추정에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 101-112.
- 大喜多敏一, 北田敏廣(1983) 酸性雨-乾性沈着, 氣象研究 저널, 158, 119-583.
- Allen, A.G., R.M. Harrison, and K.W. Nicholson (1991) Dry deposition of fine aerosol to a short grass surface, Atmospheric Environment, 22, 2653-2666.
- An, Z.S., G. Kukla, S.C. Porter, and Y.L. Xiao (1990) Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130,000 years, Quatern. Res. 36, 91-95.
- BSI (1969) Methods for the measurement of air pollution Part 1, Deposit Gauges, BS 1747, British Standards Institution, London.
- BSI (1972) Directional dust gauges, BS 1974: Part 5. British Standards Institution, London.
- Eisenreich, S.J., B.B. Loony, and J.D. (1980) Thornton, In *Appendix to the Great Lakes science advisory board's 1980 annual report*, Great Lakes regional office, The international Joint Commission, Windsor, Ontario.
- Galbraith, J.H. and F.J. Hingston (1991) Application of a directional dust gauge to measurement of impaction of atmospheric salt. Atmospheric Environment, 25A(10), 2211-2221.
- Hall, D.J. and S.L. Upton (1988) A wind tunnel study of the particle collection efficiency of an inverted Frisbee used as a dust deposition gauge, Atmospheric Environment, 22, 1383-1394.
- Hansson, H.C., I.B. Svenningsson, B. Martinsson, E. Swieclicki, and A. Wiedensohler (1994) In Proceedings

- of EUROTRAC Symposium '94 (edited by Borrell P.M.), p. 984. SPB Academic Publishing, The Hague.
- Hicks, B.B., M.L. Wesley, and J.L. Durham (1980) *Critique of methods to measure dry deposition*; Workshop Summary, U.S. EPA Report EPA-600/9-80-050 (NTIS PB81-126443).
- Hien, P.D., N.T. Binh, N.T. Ngo, V.T. Ha, Y. Truong, and N.H. An (1997) Monitoring lead in suspended air particulate matter in Ho Chi Minh city, Atmospheric Environment, 31(7), 1073-1076.
- ISO (1986) Measurement of particulate fallout by a horizontal deposit gauge, ISO/TC 146/ET 4 (Paris 75-2) 69E, International Organization for Standardization, Paris.
- Jaenicke, R. (1988) Aerosol physics and chemistry, In Landolt-Boernstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, V4b (edited by Fischer G.), 391. Springer, Berlin.
- Jaffe, R.H., C.A. Cabrera, and J. Alvarado (1993) Organic compounds and heavy metals in the atmosphere of the City of Caracas, Venezuela I: Atmospheric Particles, II: Atmospheric Deposition. Water, Air, and Soil pollution, 71, 293-313, 315-329.
- Lin, J.J. and K.E. Noll, and T.M. Holsen (1994) Dry deposition velocities as a function of particle size in ambient atmosphere. Aerosol Science, 20, 239-252.
- Lin, J.-M., G.-C. Fang, T.M. Holsen, and K.E. Noll (1993) A comparison of dry deposition modeled from size distribution data and measured with a smooth surface for total particle mass. Lead and Calcium in Chicago, Atmospheric Environment (In Press)
- Meszaros, E. and L. Horvath (1984) Concentration and dry deposition of atmospheric sulfur and nitrogen compounds in Hungary, Atmospheric Environment. 18, 1725-1730.
- Nicholas, K.W. (1988) The dry deposition of small particles: a review of experimental measurement, Atmospheric Environment., 22, 2653-2666.
- Noll, K.E., K.Y.P. Fang, and A.W. Laura (1989) Characterization of the deposition of Particles from the atmosphere to a flat plate. Atmospheric Environment, 22(7), 1461-1468.
- Ottley, C.J. and R.M. Harrison (1993) Atmospheric dry deposition flux of metallic species to the North Sea. Atmospheric Environment, 27A(5), 685-695.
- Rojas, C.M., J. Injuk, R.E. Van Grieken, and R.W. Laane (1993) Dry and wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb, and Zn into the southern bight of the North sea, Atmospheric Environment, 27A, 251-259.
- Ross, M. and E.S. MacGee (1989) Chemical and mineralogical effects of acid deposition on marble and Salem limestone test samples placed at four NAPAP weather-monitoring sites. Am. Miner, 74, 367-383.
- Sheih, C.M., M. Wesley, and B.B. Hicks (1979) Estimated dry deposition velocities of sulfur over the eastern united states and surrounding regions, Atmospheric Environment, 13, 1361-1368.
- Spokes, L.J., Jickells, T.D. and Lim, B. (1988) Solubilisation of aerosol trace metals by cloud processing: a laboratory study, Geochimica Cosmochimica Acta, 58, 3281.
- Standard Methods, for the examination of water and wastewater (1992) 18th Ed., preliminary treatment of samples, 3030 E. Nitric acid digestion, 3-5, American Public Health Association, Washington, DC.
- Svenningsson, I.B., H.C. Hansson, A. Wiedensohler, J.A. Ogren, K.J. Noone, and A. Hallberg (1992) Hygroscopic growth of aerosol particles in Po Valley, Tellus 44B, 556.
- Warneck, P. (1988) Chemistry of the Natural Atmosphere, Academic Press, San Diego.
- Vawda, Y., I. Colbeck, R.M. Harrison, and K.W. Nicholson (1992) Assessment of the performance of a tunnel sampler and cascade impactor system for ambient air sampling. Aerosol Sci., 23(3), 233-243.
- Vallack, H.W. and M.J. Chadwick (1992) A field comparison of dust deposit gauge performance at two sites in Yorkshire, 1987-1989. Atmospheric Environment, 26A(8), 1445-1451.
- Warren Spring Laboratory (1983) *Acid deposition in the United Kingdom*, WSL, p.104.
- Williams, P.T., M. Radojevic, and A.G. Clarke (1988) Dissolution of trace metals from particles of industrial origin and its influence on the composition of rain water. Atmospheric Environment, 22, 1433-1441.