

부산지역 강하먼지와 불용성 성분의 침적량에 관한 연구

김 유 근^{*} · 박 종 길^{**} · 문 덕 환^{***} · 황 용 식^{****}
^{*}부산대학교 대기과학과, ^{**}인제대학교 환경시스템학부,
^{***}인제대학교 의과대학 산업의학교실 및 산업의학연구소
(2000년 9월 27일 접수)

A Study on Bulk Deposition Flux of Dustfall and Insoluble Components in Pusan, Korea

Yoo-Keun Kim^{*}, Jong-Kil Park^{**}, Deog-Hwan Moon^{***} and Yong-Sik Hwang^{****}

^{*}Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea

^{**}Dept. of Environmental Sciences, Inje University, Kimhae, Korea

^{***}Dept. of Industrial Medicine, College of Medicine and Institute of Industrial Medicine, Inje University, Pusan, Korea

(Manuscript received 27 September, 2000)

Dustfall particles were collected by the modified American dust jar (wide inlet bottle type) at 6 sampling sites in Pusan area from March, 1999 to February, 2000. Thirteen chemical species (Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, and Zn) were analyzed by AAS and ICP.

The purposes of this study were to estimate qualitatively various bulk deposition flux of dustfall and insoluble components by applying regional and seasonal distribution. Dustfall amount of regional variations were found in order of coastal zone, industrial zone, commercial zone, agricultural zone and residential zone, and seasonal total dustfall had higher concentrations during spring for 6.741 ton/km²/season, lower concentrations during summer for 1.989 ton/km²/season, and annual total concentration was 17.742 ton/km²/year.

The regional distributions of enrichment factor show well-defined anthropogenic metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) at industrial and agricultural zone, and contribution rate of soil particles were found in order of summer, fall, winter and spring. Factor loading effects of chemical composition of dustfall were found in order of road traffic emission source and combustion processed source, industrial activity source, soil source and marine source.

Key words : dustfall, bulk deposition, insoluble components, enrichment factor, factor loading

1. 서 론

산업화·도시화에 따라 인구 증가, 교통량 증가 및 도시 구조물의 증가 등으로 인하여 도시의 대기오염과 열섬 현상 등이 날로 심각한 사회문제로 제기되고 있다. 대기는 생태계 내의 독성 중금속들의 이동과 분포에 있어서 중요한 경로 중의 하나이다.¹⁾ 일반적으로 대기 중에 부유하는 오염물질들은 광화학 반응을 통하여 2차 오염물질이 생성되기도 하고, 기상인자에 의하여 확산 또는 수송되어 대기오염도가 감소하거나, 중력에 의하여 지표 부근에 침적되어 제거된다.

“Bulk deposition”은 일반적으로 총 습성과 건성 강하물이 개방된 필드에 위치한 개방된 용기에 지속적으로 포집된 것으로 정의되며, 단위 지역의 대기오염을 파악하거나 타 지역과의 비교에 있어서 지표로 활용되고 있다. 강하먼지를 측정한다는 것은 특정한 오염원을 대

으로 하기보다는 일정한 지역에서 침강하는 대기침적물질의 평균적인 침적량을 측정하는 것으로서 그 지역의 대기오염도를 파악하는 간접적인 평가 인자로서 활용될 수 있는 비교적 간편한 방법이며, 건성과 습성 침적물을 동시에 포집할 수 있는 장점이 있다.²⁾

대기 침적물에 관한 연구는 건성과 습성 침적물에 대해서 실시되고 있으며, 이 양자의 기여도는 시간과 공간, 그리고 기후 조건에 따라서 큰 차이를 보인다. 특히, 우리나라와 같이 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있고, 전 국토의 70% 이상이 산지로 형성되어 있는 지역은 기상 현상이 다양할 뿐만 아니라 계절에 따른 강우량의 변화가 심한 기상 여건을 지니고 있어 대기 침적물 성상을 파악함에 있어서 단순히 건성 또는 습성 침적량 중 하나만으로는 그 특성을 정확하게 파악할 수가 없다.²⁾ 강하먼지와 화학적 성분은 기상자료와 매우 밀접한 관계가 있으며,

강하먼지량과 각 성분 농도는 풍향, 풍속과 강수량 자료와 매우 밀접한 관계가 있다.^{3,4)} 또한 강하먼지의 침적량은 지형적인 특성과 기상학적인 특성에 따라 지역별 차이가 존재하며, 오염원의 지리적인 위치에 많은 영향을 받는다.⁵⁾ 특히, De Miguel⁶⁾은 도시형 오염원을 교통과 건축물의 건축, 풍화 그리고 부식에서 1차적으로 발생하고, 도시의 특성에 따라 먼지의 패턴이 다르다고 지적하였다. 따라서 선박 건조 및 수리업을 중심으로 기계기구, 도금업 등의 소규모 제조업 사업장으로 형성된 공업과 상업이 발달한 항구도시인 동시에 도시 외곽으로 농업지역이 형성된 부산지역에서 강하먼지의 조성 특성을 보다 분명하게 파악하기 위해서는 지각농축계수(Enrichment Factor, EF)⁷⁻¹¹⁾를 이용하여 강하먼지의 성상에 따른 토양입자의 기여율을 파악하고, 주성분 분석법과 Varimax 회전법을 이용한 요인분석¹¹⁾을 통하여 도시화와 산업화에 따른 각 성분의 기원을 추정할 필요가 있다.

대기 침적물은 자연적이거나 인위적인 오염물질이 포함되어 있어서 경제적인 피해는 물론이고, 문화재의 훼손과 건강장애 요인으로서 인체 및 생활에 직·간접적인 형태로 영향을 미친다. 이러한 이유로 인하여 미국 캐나다 등을 비롯한 많은 나라에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 우리나라에서는 서울과 제주도 등에서 일부 진행되고 있으나 부산지역의 경우 강하먼지에 대한 연구자료가 하계 또는 일부 지역에 편중되어 있어서 도시화에서 비롯되는 공업, 상업, 해안, 농업 그리고 주거지역 등에서서의 활용도가 매우 낮은 수준이다.

따라서 본 연구는 부산지역 강하먼지와 불용성 성분의 침적량에 대한 변동량을 파악하기 위하여 국지기상특성과 차량등록 현황 및 유류 소비량을 조사하고, 부산지역을 공단지역, 상업지역, 해안지역, 농업지역 그리고 주거지역으로 분류하여 강하먼지와 불용성 성분의 침적량에 대한 지역별·계절별 분포 그리고 화학적 조성 특성을 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정지점 및 기간

측정 지점은 Fig. 1과 같이 부산지역 내 6개 지점을 선정하였으며, 1999년 3월부터 2000년 2월까지 월별로 1년간 실시하였다. 또한 사상공단에 위치한 감전동 지점(감전1동 사무소 3층 옥상)과 신평·장림 공단에 위치한 신평동 지점(신평동 동사무소 3층 옥상)을 공단지역, 도로변에 위치한 개금동 지점(개금1동 사무소 3층 옥상)을 상업지역, 바다에 인접한 용호동 지점(오륙도 선착장에 인접한 3층 건물 옥상)을 해안지역으로, 기장읍 지점(읍사무소 3층 옥상)을 농업지역, 그리고 부곡동 지점(주택 3층 옥상)을 주거지역으로 하여 5개 지역으로 구분하여 실시하였다.

2.2. 시료의 채취 및 분석방법

강하먼지의 포집을 위하여 사방이 개방된 3층 건물 옥상에 높이 1.5m인 철재 구조물에 증발과 재비산을 고려한 미국식 광구병형 dust jar를 설치하여 지상의 영향

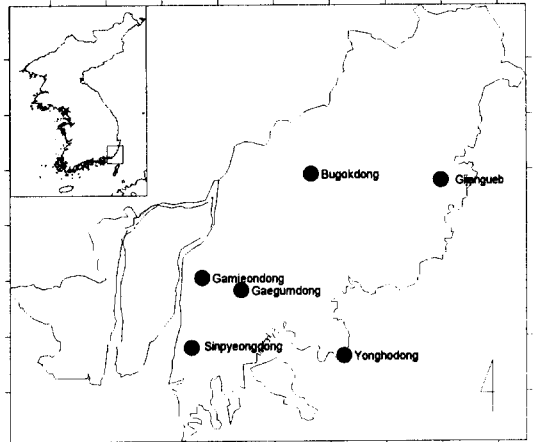


Fig. 1. Map of Pusan area. The dustfall monitoring sites are marked as Gamjeondong, Gaegumdong, Sinpyeongdong, Yonghodong, Gijangueb and Bugokdong.

을 받지 않도록 하였으며,^{4,12)} 진성과 습식 강하물이 동시에 포집될 수 있도록 직경 10cm인 3.6 l 들이 폴리에틸렌 병에 탈이온수 2.0 l를 넣어 포집에 이용하였다. 채취된 시료는 Whatman(No.42) 여지를 105℃에서 2시간 건조¹³⁾하고 감도가 0.01mg인 전자저울(Sarorius microbalance, Germany)로 무게를 칭량한 후 여과하였다. 분리된 여액은 100ml 폴리에틸렌 병에 담아 4℃의 냉암소에 보관한 후 수용성 성분을 분석하였다. 또한 여지는 필터 전 조건과 동일하게 하여 여과 전·후의 중량차로서 강하먼지의 농도를 측정하였으며, 불용성 성분을 정량하기 위하여 표준 시험법¹⁴⁾에 의거하여 습식 탄화법으로 전처리(비이커에 여지를 넣고, 질산 50v/v% 10ml 가한 후 watch glass를 덮고, hot plate에서 일정량으로 탄화시킨 후 여과하여 0.5% 질산으로 25 ml의 용량을 맞추다)하였다.

강하먼지 중의 불용성 성분을 정량하기 위하여 ICP/AES(ICP-IRIS, Thermo Jarrell Ash Co., USA)를 이용하여 Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Si 그리고 Zn을 분석하였으며, AAS(Perkin Elmer 4100ZL, Flameless method)를 이용하여 Cd, Cr, Mn, Ni 그리고 Pb를 분석하였다.

2.3. 계산 및 통계처리 방법

강하먼지량 각 불용성 성분의 농도 계산은 아래 식(1)과 같이 수행하였다.

$$\text{강하먼지량}(\text{ton}/\text{km}^2/30\text{일}) = 1.273 \times \frac{W}{D^2} \times \frac{30}{N} \times 10^4 \quad (1)$$

여기서, W는 강하먼지량의 분석치(g), D는 Dust Jar의 직경(cm) 그리고 N는 Dust Jar의 방치일(day)이다. 각 불용성 성분의 농도 계산은 일반적인 식(2)과 같이 수행하였다.

$$\text{불용성 강하물}(\text{ton/km}^2/30\text{일}) = 1.273 \times \frac{C \times V}{D^2} \times \frac{30}{N} \quad (2)$$

여기서, C는 강하물질의 불용성 성분 농도($\mu\text{g/ml}$), D는 Dust Jar의 직경(cm), V는 시료량(ml) 그리고 N은 Dust Jar의 방치일(day)을 나타낸다.

통계적인 해석은 SPSS (windows version 7.52)를 이용하였다. 기상요소와의 상관성을 파악하기 위하여 기상 월보에서 기온과 상대습도는 월 평균치를 사용하고, 강수량, 증발량, 그리고 일조시간은 월별 총량을 사용하고, 풍속은 월 평균풍속을 이용하였으며, 강하먼지량과 불용성 금속 성분들 간의 상관성을 조사하기 위하여 Pearson 상관계수를 구하고, T-test의 양측검정을 하였다.¹⁵⁾ 강하먼지량과 불용성 금속 성분들의 지역별 분포와 계절별 분포 특성을 파악하기 위하여 Levene 통계량으로 분산의 동질성에 대하여 검정하고, 집단간의 다중비교를 산출하기 위하여 Duncan의 다중범위 검정을 통하여 유의수준을 조사하였다.¹⁵⁾ 그리고 지각농축계수(EF)를 구하기 위하여 식 (3)을 이용하였다.

$$EF = \frac{(X_i/AI)_{\text{sample}}}{(X_i/AI)_{\text{crust}}} \quad (3)$$

(X_i/AI) 는 시료(강하먼지 또는 부유먼지)에 대한 지각 중의 AI 농도에 대한 농도비를 의미한다. 비 토양 성분의 기여율을 계산하기 위하여 식 (4)을 이용하였으며, Wu¹⁶⁾의 토양 이외의 기원으로부터 각 성분(i)별 질량분을 계산식은 다음과 같다.

$$f_{i, noncrustal} = 1 - (C_{AI}/C_i)_{\text{sample}} \cdot (C_i/C_{AI})_{\text{crust}} \quad (4)$$

강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율^{9,17)}을 추정하기 위하여 식 (5)를 이용하였다.

$$CR_{soil}(\%) = \frac{C_{soil}}{C_{\text{sample}}} \times 100 = \frac{C_{AI}/0.0813}{C_{\text{sample}}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, C_{soil} 은 시료중 토양 입자의 함량, C_{sample} 은 시료의 총량(또는 침적량), C_{AI} 은 시료 중의 AI 함량 그리고 0.0813은 지각 중의 AI의 질량 농도비를 나타낸 것이다. 또한, 도시화와 산업화에 따른 각 성분의 기원을 추정하기 위하여 강하먼지 중 불용성 금속 성분들 사이의 상호 관계를 이용하여 유사한 변수들끼리 분류시키기 위하여 13개 측정 변수를 사용하였으며, 주성분 분석법과 Varimax 회전법을 이용하여 요인분석을 실시하였다.^{11,17,18)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상요소와의 상관성

부산지역의 월별 강하먼지량과 기상요소들 간의 분포는 Fig. 2와 같다. $100\mu\text{m}$ 이하 먼지의 강하 효율을 결정하는 풍속은 7%보다 큰 풍속에서는 거의 0%에 가깝게 나타나고, 1%의 바람에서는 대략 60% 정도이다.¹⁹⁾ 연구 기간 중에는 황사가 없었으며, 2.8~4.5%인 서풍계열의 바람이 우세하여 강하먼지의 포집이 가능하였고, 7월과 8월에 강수가 집중되었다. 3월을 제외하고, 월별 강하먼

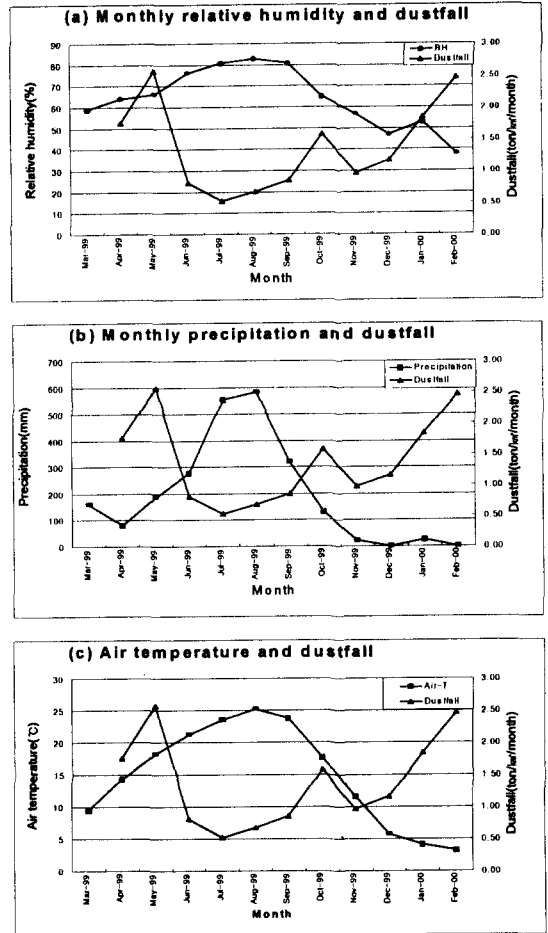


Fig. 2. Monthly meteorological observation data((a) relative humidity, (b) precipitation, and (c) air temperature) and dustfall of Pusan from March, 1999 to February, 2000.

지량은 5월이 가장 높고, 7월이 가장 낮게 나타났다.

Pearson 상관계수를 조사한 결과 강수량과 기온, 강수량과 상대습도, 기온과 상대습도는 각각 0.855, 0.880, 0.966의 매우 높은 정상관을 보였으며, $P < 0.01$ 의 높은 유의성을 보였다(Table 1). Dustfall과 각 기상인자와의 관계에서는 강수량과 상대습도에서 $P < 0.05$ 의 유의한 차이를 보였으며 음의 상관으로 나타났다. 그리고 일조시간과 증발량은 정상관 관계를 보였으나, 큰 의미는 없는 것으로 조사되었으며, 김현섭 등¹⁸⁾의 연구와는 달리 풍속과의 상관성은 거의 없는 것으로 조사되었다. 이는 부산지역을 대표하는 부산 지방기상청 자료이지만, 부산지역 내에서도 공단지역, 상업지역, 해안지역, 농업지역 그리고 주거지역과 같이 대도시의 지역적인 특성에 따라서 풍향·풍속과 같은 기상요소의 변동이 발생할 수 있으므로 각 측정지점에서 동시에 관측된 기상자료를 이용하여야 할 것으로 생각된다.

Table 1. Pearson correlation coefficient between monthly meteorological observation data and dustfall of Pusan from March, 1999 to February, 2000

	Dustfall	Air temperature	Relative humidity	Precipitation	Evaporation	Duration of sunshine	Wind speed
Dustfall	1.000						
Air temperature	-0.571	1.000					
Relative humidity	-0.642*	0.966**	1.000				
Precipitation	-0.619*	0.855**	0.880**	1.000			
Evaporation	0.149	0.657*	0.554	0.495	1.000		
Duration of sunshine	0.550	-0.151	-0.294	-0.437	0.439	1.000	
Wind speed	-0.007	0.226	0.292	0.434	0.350	-0.208	1.000

*; P < 0.05

**; P < 0.01

Table 2. Pearson correlation coefficient between monthly meteorological observation data and water insoluble trace metal of Pusan from March, 1999 to February, 2000.

Elements	Air temperature	Relative humidity	Precipitation	Evaporation	Duration of sunshine	Wind speed
Al	-0.504	-0.584*	-0.658*	-0.073	0.403	-0.239
Ca	-0.769**	-0.805**	-0.708**	-0.398	0.179	-0.105
Cd	-0.146	-0.053	-0.104	-0.285	-0.271	0.175
Cr	-0.702*	-0.825**	-0.779**	-0.442	0.275	-0.364
Cu	-0.417	-0.460	-0.507	-0.036	0.272	-0.118
Fe	-0.397	-0.458	-0.572	0.025	0.429	-0.187
K	-0.614*	-0.705*	-0.783**	-0.037	0.583*	-0.077
Mg	-0.439	-0.476	-0.602*	-0.014	0.385	-0.140
Mn	-0.564	-0.669*	-0.417	-0.198	0.044	-0.019
Ni	-0.638*	-0.559	-0.622*	-0.618*	0.140	-0.245
Pb	-0.279	-0.275	-0.404	0.089	0.310	0.144
Si	-0.147	-0.235	-0.236	-0.039	0.109	-0.378
Zn	-0.273	-0.315	-0.481	-0.013	0.260	-0.189

*; P < 0.05

**; P < 0.01

Table 2는 부산지역의 월별 기상관측자료와 불용성 성분들 간의 Pearson 상관관계를 나타낸 것이다. 기온은 Ca, Cr, Ni 그리고 K 순으로 높은 음의 상관을 보였으며, 유의수준 0.05 이하로 유의하게 나타났다. 상대습도는 Cr, Ca, K, Mn 그리고 Al 순으로 음의 상관으로서 유의수준(P<0.05) 이상의 유의성을 보였으며, 강수량은 K, Cr 그리고 Ca의 순으로 유의수준(P<0.01) 이상으로

유의한 음의 상관을 보였고, Al, Ni 그리고 Mg과는 유의수준(P<0.01) 이상으로 유의한 상관성을 보였다. 증발량은 Ni과 유의수준(P<0.05)에서 -0.618의 상관계수를 나타냈으며, 일사량은 K와 유의수준(P<0.05)에서 양의 상관관계를 보였다. 풍속은 Cr과 Si에서 각각 -0.364와 -0.378의 상관을 보였으나 유의한 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 불용성 성분들 중 Al, Ca, Cr, K 그리고 Ni은 기온, 상대습도 그리고 강수량과는 0.5이상의 음의 상관관계를 보였으며, 대기 중에 수분이 많아지면 불용성 성분들의 침적량이 감소하는데 이는 washout과 rainout에 의한 대기의 청정화에 기인한 것으로 생각된다. 특히, oil burning에 기인한 Ni은 기온이 상승하고 강수량과 증발량이 증가하는 하계에 농도가 낮아지는 패턴을 보였다.

3.2. 지역별 분포 특성

부산지역을 공단지역, 상업지역, 해안지역, 농업지역과 주거지역에 따른 강하먼지량과 불용성 성분의 평균 농도 분포는 Table 3와 같다.

Table 3. Areal variations of water insoluble trace metal and dustfall arithmetic mean concentration in Pusan.

Elements	Industrial zone	Commercial zone	Coastal zone	Agricultural zone	Residential zone	Total
Dustfall	1.794	1.204	1.804	0.876	0.755	1.362
Al	27.546	23.133	28.926	18.770	15.194	23.402
Ca*	9.802	4.450	13.595	4.745	4.063	7.701
Cd*	4.854	2.719	7.082	2.496	1.816	3.950
Cr*	0.282	0.227	0.200	0.083	0.079	0.191
Cu*	0.586	0.293	0.481	0.185	0.163	0.379
Fe*	67.617	50.820	43.467	23.417	22.835	45.620
K	4.539	3.909	5.084	3.674	2.609	4.036
Mg*	8.809	6.270	9.972	4.579	3.879	7.015
Mn	0.462	0.333	0.422	0.278	0.258	0.367
Ni	0.199	0.127	0.277	0.171	0.094	0.176
Pb	1.481	0.506	1.043	0.208	0.272	0.823
Si	12.014	16.990	17.461	19.160	14.368	15.312
Zn*	2.108	0.880	1.483	0.446	0.484	1.239

Dustfall; ton/km/month

Cd; g/km/month

Other metals; kg/km/month

*; P < 0.05

지역별 평균 강하먼지량은 해안지역 1.804ton/km/month, 공단지역 1.794ton/km/month, 상업지역 1.204 ton/km/month, 농업지역 0.876ton/km/month 그리고 주거지역 0.755 ton/km/month의 순으로 나타났다. 지역별 평균농도의 분포는 공단지역이 Dustfall, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn이 가장 높았으며, Si가 가장 낮게 나타났다. 상업 지역에서는 타지역에 비하여 중간정도의 농도분포를 나

타냈으며, 해안지역은 Al, Ca, Cd, K, Mg 그리고 Ni이 높았으며, 농업지역은 Si가 가장 높았고, Pb와 Zn이 다른 지역에 비하여 낮게 나타났다. 그리고 주거지역에서는 타지역에 비하여 대부분의 항목에서 낮게 검출되어 지역적인 특성에 의한 차이로 해석된다.

Levene 통계량으로 분산의 동질성에 대하여 검정하고, 집단간의 다중비교를 산출하기 위하여 Duncan의 다중범위 검정을 통하여 유의수준 $P < 0.05$ 에서 지역별 강하량의 차이를 조사하였다. 그 결과 Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg 그리고 Zn이 유의수준 $P < 0.05$ 에서 지역별 강하량에는 차이가 있는 것으로 나타났다.

3.3. 계절별 분포 특성

계절은 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 그리고 겨울(12~2월)로 구분하여 부산지역에서 강하먼지와 불용성 금속 성분의 계절별 평균 농도 분포를 조사한 결과 Table 4와 같이 나타났다. 계절별 평균 강하먼지량은 봄 2.247ton/km/month, 겨울 1.867ton/km/month, 가을 1.137ton/km/month 그리고 여름 0.663ton/km/month의 순으로 나타났으며, 연평균 농도는 1.362ton/km/month로 나타났다. 봄철의 경우 강하먼지량과 Pb가 다른 계절에 비하여 높게 나타났고, Cd와 Si가 가장 낮게 조사되었다. 그리고 대부분의 불용성 금속성분은 겨울철에 높게 나타났으며, 여름철에 낮게 조사되었다.

Table 4. Seasonal variations of water insoluble trace metal and dustfall arithmetic mean concentration in Pusan.

Elements	Spring	Summer	Fall	Winter	Total
Dustfall*	2.247	0.663	1.137	1.867	1.362
Al*	24.618	16.206	21.598	33.071	23.402
Ca*	5.245	4.088	6.637	16.262	7.701
Cd	1.180	4.250	4.150	5.770	3.950
Cr*	0.169	0.083	0.230	0.297	0.191
Cu	0.360	0.300	0.292	0.608	0.379
Fe	51.553	33.368	39.432	61.673	45.620
K*	5.370	1.535	4.133	5.422	4.036
Mg	7.943	5.027	6.076	9.578	7.015
Mn*	0.276	0.132	0.221	0.945	0.367
Ni*	0.100	0.091	0.176	0.366	0.176
Pb	1.562	0.249	0.568	1.003	0.823
Si	6.990	20.564	13.013	21.400	15.312
Zn	1.170	0.985	1.250	1.612	1.239

Dustfall: ton/km/month

Cd: g/km/month

Other metals: kg/km/month

*: $P < 0.05$

부산지역의 강하먼지량 및 불용성 성분들을 Levene 통계량으로 분산의 동질성에 대하여 검정하고, 집단간의 다중비교를 산출하기 위하여 Duncan의 다중범위 검정을 통하여 유의수준 $P < 0.05$ 에서 계절별 강하량의 차이를 조사하였다. 그 결과 Dustfall, Al, Ca, Cr, K, Mn 그리고

Ni이 유의수준 $P < 0.05$ 에서 계절별 강하량에는 차이가 있는 것으로 나타났다.

계절별 총 강하먼지량을 조사한 결과 Table 5와 같이 봄철이 6.741 ton/km²으로 가장 높고, 여름철이 1.989 ton/km²으로 가장 낮게 조사되어 서울¹³⁾, 제주도²⁾ 및 울릉도²⁾와 유사한 분포를 보였으며, 연간 총 강하먼지량은 17.742 ton/km²로서 울릉도²⁾보다는 높고 군산²⁰⁾보다는 낮게 나타났다.

Table 5. Seasonal variation of dustfall concentration. (units: ton/km²)

Season	Seoul ¹³⁾	Cheju ²⁾	Ullung ²⁾	Kunsan ²⁰⁾	This study
Spring	12.67	11.481	7.080	4.767	6.741
Summer	7.45	3.792	1.633	1.818	1.989
Fall	10.43			8.220	3.411
Winter	9.14			4.746	5.601
Total	39.69	31.303	14.962	19.551	17.742

3.4. 강하먼지의 조성특성

3.4.1. 지역별 지각농축계수

강하먼지 중 불용성 성분의 기원을 추정하기 위하여 Mason⁹⁾의 지각 평균 농도를 나타내는 식인 식(3)을 이용하여 지역별 지각농축 계수를 구하였으며, 그 결과 Table 6과 같이 조사되었다. EF값이 클수록 인위적인 기원으로부터 기인한 정도가 높다는 것을 의미하며, EF값이 1.0보다 크면 지각 이외의 오염원을 가지며, Kaya와 Tuncel⁸⁾은 10보다 적은 값일 때는 지역별 토양과 Mason's compilation간의 화학적 구성사이의 차이가 존재하므로 그 기원을 분명하게 나타내지는 못한다고 지적하였다.

Table 6. Enrichment factor of insoluble each metal element in dustfall deposited in Pusan.

Elements	Industrial zone	Commercial zone	Coastal zone	Agricultural zone	Residential zone	Total
Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ca	0.80	0.43	1.05	0.57	0.60	0.74
Cd	71.63	47.78	99.52	54.06	48.59	68.61
Cr	8.32	7.98	5.62	3.60	4.23	6.64
Cu	31.45	18.72	24.58	14.57	15.86	23.94
Fe	3.99	3.57	2.44	2.03	2.44	3.17
K	0.52	0.53	0.55	0.61	0.54	0.54
Mg	1.24	1.05	1.34	0.95	0.99	1.17
Mn	1.44	1.23	1.25	1.27	1.45	1.34
Ni	7.83	5.95	10.38	9.88	6.71	8.15
Pb	336.24	136.79	225.50	69.30	111.96	219.93
Si	0.13	0.22	0.18	0.30	0.28	0.19
Zn	88.88	44.18	59.54	27.60	37.00	61.49

본 연구에서는 Al을 기준물질로 이용하였다. 토양기원인 Ca, K, Si는 1.0 이하의 분포를 보였으나, 인위적 오염원인 Cd, Cu, Pb 그리고 Zn은 10 이상의 높은 값을

나타냈다. 특히 Cu, Pb 그리고 Zn은 공단지역, 해안지역, 상업지역, 주거지역 그리고 농업지역 순으로 조사되었으며, 산업활동, 유류 연소 및 타이어 마모에 의한 인위적인 배출원에 기인한 것으로 추정된다. 1.0 이상이고 10이하의 분포를 보인 성분은 Cr, Fe, Mg, Mn 그리고 Ni로 나타났다.

3.4.2. 지역별 비토양 성분의 기여율

비토양성분의 강하먼지의 조성에 기여한 정도를 파악하기 위하여 식(4)를 이용하여 계산한 결과 Table 7과 같다. 인위적인 오염원에 기인한 부산지역 강하먼지 중 불용성 성분의 비토양성분의 기여율은 Pb, Cd, Zn, Cu, Ni 그리고 Cr의 순으로 나타났으며, 인위적 기원인 Pb, Zn, Cu 그리고 Cr은 공단지역이 가장 높고 농업지역이 가장 낮게 나타났다. 또한 Fe는 공단지역이 높게 나타났으나, 해양기원인 Mg와 토사 및 도로먼지가 기원인 Mn은 비 토양 성분의 기여율이 낮게 나타났으며, 산업활동(금속제련)에 기인한 Cd과 유류 연소에 기인한 Ni의 비토양성분의 기여율은 각각 98.5%와 87.7%로 나타났다. 이들은 해안지역에서 가장 높은 기여율을 보였으나, 각 지역별 차이는 크게 나타나지 않았다. 이는 부산지역이 항구도시로서 선박에서 배출되는 오염원과 고정 배출원인 공단지역 및 차량에 의한 이동 배출원 등이 복합적으로 기여하는 거대도시의 오염원 패턴으로 생각된다.

Table 7. Mass fractions of insoluble each metal element in dustfall relative to noncrustal composition at Pusan area.

Elements	f _{i, noncrustal} (%)					Total
	Industrial zone	Commercial zone	Coastal zone	Agricultural zone	Residential zone	
Al	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	-	-	5.0	-	-	-
Cd	98.6	97.9	99.0	98.2	97.9	98.5
Cr	88.0	87.5	82.2	72.2	76.3	84.9
Cu	96.8	94.7	95.9	93.1	93.7	96.8
Fe	74.9	72.0	59.1	50.7	59.1	68.5
K	-	-	-	-	-	-
Mg	19.6	5.2	25.4	-	-	14.2
Mn	30.3	18.8	19.9	21.1	31.2	25.5
Ni	87.2	83.2	90.4	89.9	85.1	87.7
Pb	99.7	99.3	99.6	98.6	99.1	99.5
Si	-	-	-	-	-	-
Zn	98.9	97.7	98.3	96.4	97.3	98.4

3.4.3. 토양입자의 기여율

식(5)로부터 각 지역에서의 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율을 Table 8과 같이 추정하였다. 계절에 따른 각 지역에서 토양입자의 기여도를 정량적으로 평가하기 위하여 Al을 기준물질로 하여 계산하였다. 지역별 분포에서는 농업지역, 주거지역, 상업지역, 해안지역 그리고 공업지역 순으로 나타났으며, 부산지역의 총 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율은 21.1%로서 이기호와 허철규¹⁷⁾

의 26.4%보다는 다소 낮았다. 계절별 분포는 여름>가을>겨울>봄의 순으로서 여름철이 가장 높고, 봄철이 가장 낮게 나타나 이기호와 허철규¹⁷⁾의 연구 결과에서 나타난 봄철의 높은 토양기여율과는 차이를 보였는데 이는 본 연구기간에는 황사에 의한 영향이 없었기 때문인 것으로 생각된다. 지역에 따른 계절별 토양 기여율의 분포는 상업지역, 해안지역, 그리고 주거지역은 여름철이 가장 높고, 봄철이 가장 낮았다. 그리고 공업지역의 경우 가을이 가장 높게 나타났으며, 봄철이 가장 낮았다. 또한 농업지역은 겨울철에 가장 높았고, 봄철에 가장 낮게 나타났다. 특히, 여름철에 총 강하먼지량은 가장 낮았으나, 토양입자의 기여율은 오히려 가장 높게 나타났다. 이는 다른 계절보다 상대습도와 강수량이 높고, rainout과 washout에 의한 대기 에어로졸 입자의 입경별 세정특성은 거의 입경 2μm 이상의 초대입자 영역에서만 일어나고 미세입자 영역에서는 강수가 강하여도 세정효과가 없음을 박정호와 최금찬²¹⁾의 연구에서 지적하였다. 따라서 계절별 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율은 대기 중 초대입자의 세정효과에 의하여 결정될 것으로 생각된다.

Table 8. Predicted contributions of soil to bulk deposition in Pusan.

Season	CR _{soil} (%)					Total
	Industrial zone	Commercial zone	Coastal zone	Agricultural zone	Residential zone	
Spring	13.9	16.9	16.8	10.2	10.3	13.5
Summer	22.0	44.3	33.5	24.9	47.3	30.1
Fall	22.6	20.8	20.0	30.7	33.3	23.4
Winter	18.6	24.3	18.4	42.4	28.3	21.8
Annual average	18.9	23.6	19.7	26.4	24.8	21.1

3.5. 통계적 해석

3.5.1. 상관분석

부산지역에서 강하먼지와 불용성 성분과의 Pearson 상관계수가 0.5이상이고, T-test의 양측 검정으로 유의성을 조사한 결과 p<0.05인 경우는 K, Cu, Mg, Fe, Zn, Al, Ca, Cr, Mn의 순으로 나타났다(Table 9). 강하먼지와 Ni와 Si가 매우 낮은 상관을 보였으나, 그 외의 불용성 금속은 유의수준(P<0.01) 이상의 높은 상관성으로서 유의한 차이를 보였다. 이는 부산지역 강하먼지의 조성에 있어서 Si는 지역적인 영향이 큰 것으로 생각된다. 즉, 강하먼지와 Si의 상관계수는 공단지역(0.053), 상업지역(0.255), 해안지역(0.145), 농업지역(0.621), 그리고 주거지역(-0.086)에서 차이를 보였으며, 농업지역이 토양입자의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났다. Al은 강하먼지와 모든 불용성 금속과 유의수준(P<0.01) 이상의 유의한 차이를 보였으며, Ca은 Si를 제외하고 대부분 높은 상관성을 보였으며, Cd은 Mn, Pb, 그리고 Si와는 낮은 상관성을 보였다. 그리고 Cr은 Si와 매우 낮은 상관을 보여 서로 다른 기원임을 알 수 있었다. 또한 Si는 Al,

Cu, Fe, 그리고 Mg과 높은 상관성을 보임으로써 유사한 기원을 추정할 수 있었으며, Pb는 Cd, Mn, 그리고 Ni과 매우 낮은 상관성을 보여 발생기원에 차이가 있을 것으로 생각된다. Zn은 토양입자의 주성분인 Si와는 매우 낮은 상관성을 보였으나, 강하먼지 및 다른 불용성 금속과는 유의수준(P<0.01) 이상의 유의한 상관성을 보였다.

따라서 부산지역의 강하먼지는 도시 구조의 특성에서 비롯하여 토양, 교통, 공업 및 해양의 영향을 동시에 받는 것으로 나타났다.

Table 9. Pearson correlation coefficient between dustfall and water insoluble trace metals at Pusan area.

Dust fall	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Zn	
Dust fall	1.000													
Al	.725**	1.000												
Ca	.709**	.770**	1.000											
Cd	.441**	.442**	.655**	1.000										
Cr	.665**	.663**	.638**	.315*	1.000									
Cu	.781**	.861**	.853**	.578**	.704**	1.000								
Fe	.733**	.882**	.668**	.410**	.712**	.887**	1.000							
K	.822**	.786**	.660**	.255*	.685**	.688**	.740**	1.000						
Mg	.748**	.930**	.796**	.478**	.631**	.897**	.904**	.808**	1.000					
Mn	.554**	.469**	.629**	.191	.656**	.584**	.443**	.504**	.457**	1.000				
Ni	.255	.413**	.497**	.543**	.315*	.362**	.347**	.288**	.384**	.019	1.000			
Pb	.487**	.527**	.399**	.126	.370**	.552**	.648**	.590**	.621**	.197	.146	1.000		
Si	.075	.481**	.136	.192	.064	.326**	.365**	.090	.368**	.202	.108	-.055	1.000	
Zn	.729**	.824**	.786**	.537**	.655**	.917**	.881**	.671**	.868**	.382**	.369**	.706**	.169	1.000

*; P < 0.05

**; P < 0.01

3.5.2. 요인분석

강하먼지 중 불용성 성분들 사이의 상호 관계를 이용하여 유사한 변수들끼리 분류시키고자 13개 측정변수를 사용하여 요인분석을 실시한 결과 Table 10과 같이 나타났다. 자료의 통계분석은 SPSS (windows version 7.52)를 이용하였다. 요인분석의 적합성 여부를 검토하기 위한 바틀렛 검정(Bartlett test)의 구형성 검정치(sphericity value)는 1015.584으로 0.00001 유의수준에서 공통요인이 존재하였으며, 전체 항목에 대한 표본 적합도를 나타내는 통계값인 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO) 값은 0.800으로 나타나 요인분석에 적합한 자료임을 통계적으로 확인하였다. 최초 요인행렬을 추출하는 모형으로는 정보의 손실을 최소화하면서 보다 적은 수의 요인을 구하고자 할 때 널리 사용되는 주성분 분석법(Principle Components Analysis, PCA)을 선택하고, 고유치(eigen value), 공통성(communality) 그리고 누적기여율을 고려하였으며, 요인을 결정된 후 해석을 용이하게 하기 위하여 Kaiser²²⁾에 의해 제안된 직각회전방법인 varimax 방식을 이용하여 인자부하량(factor loading)을 구하였다. 부산지역 강하

먼지의 성상에 영향을 미치는 인자를 추출한 결과 4개의 인자에서 86.8%를 설명할 수 있었다. 59.7%를 설명하는 Factor 1은 유류 연소(Pb, Cu), 토양 기원(Fe, K, Al) 그리고 해양 기원(Mg) 순으로 나타났다. Factor 2는 토사 및 도로먼지 기원(Mn), 금속제련 등의 산업활동 기원(Cr) 그리고 토양 기원(Ca) 순으로 나타났으며, Factor 3은 산업활동에 의한 기원인 Cd와 유류 연소에 의한 기원인 Ni로 나타났다. Factor 4는 토양기원인 Si를 나타냄으로서 부산지역은 연안을 끼고 있는 전형적인 대도시의 특성을 보였다.

Table 10. Factor loading after varimax rotation

Elements	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communality
Pb	0.908	-0.014	-0.026	-0.173	0.856
Fe	0.818	0.323	0.239	0.284	0.912
Zn	0.816	0.283	0.386	0.081	0.901
Mg	0.793	0.340	0.324	0.295	0.937
K	0.729	0.466	0.126	-0.009	0.765
Al	0.724	0.361	0.320	0.406	0.922
Cu	0.677	0.487	0.393	0.247	0.911
Mn	0.151	0.932	-0.017	0.126	0.908
Cr	0.464	0.723	0.213	-0.052	0.786
Ca	0.452	0.581	0.573	0.104	0.881
Cd	0.139	0.170	0.853	0.132	0.794
Ni	0.173	-0.025	0.842	-0.010	0.739
Si	0.079	0.052	0.068	0.976	0.967
Eigenvalue	7.755	1.363	1.143	1.017	
Cumulative	59.655	70.136	78.927	86.753	

Initial factor method; principal components analysis

Rotation method; Varimax

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) value; 0.800

Sphericity value of Bartlett test; 1015.584

Probability; 0.000

따라서 부산지역 강하먼지의 조성에 영향을 미치는 인자 부하량은 유류 연소 및 차량, 산업활동, 토양 그리고 해양기원 순으로 나타났다. 또한 각 지역별 주성분을 조사한 결과 Zn의 경우 상업지역, 주거지역, 공단지역 그리고 해안지역 순으로 인자 부하량이 조사되었으나, 농업지역에서는 조사되지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 부산지역 강하먼지의 오염도를 조사하기 위하여 광구병형 Dust jar를 사용하여 부산지역의 각 지역별 특성에 따라 6개 지점을 선정하였다. 1999년 3월부터 2000년 2월까지의 강하먼지량과 강하먼지 중의 중금속(Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, 그리고 Zn)의 농도를 ICP와 AAS를 이용하여 정량하였으며, 계절별 농도변화와 지역별 농도분포를 파악하고, 각 분석항목들 간의 상관성을 분석하여 강하먼지의 분포 특성을 조사한 결과 다음과 같다.

1. 강하먼지는 상대습도와 강수량에서 P<0.05의 유의한 음의 상관성을 보였으며, Al, Ca, Cr, K 그리고 Ni은 기

은, 상대습도 그리고 강수량과 0.5 이상의 음의 상관을 보였다. Oil burning에 기인한 Ni은 기온이 상승하고 강수량과 증발량이 증가하는 하계에 농도가 낮아지는 패턴을 보였다.

2. 지역별 평균 강하먼지는 해안지역 1.804 ton/km²/month, 공단지역 1.794 ton/km²/month, 상업지역 1.204 ton/km²/month, 농업지역 0.876 ton/km²/month 그리고 주거지역 0.755 ton/km²/month의 순으로 나타났다.

3. 계절별 평균 강하먼지는 봄 2.247 ton/km²/month, 겨울 1.867 ton/km²/month, 가을 1.137 ton/km²/month 그리고 여름 0.663 ton/km²/month의 순으로 조사되었다. 봄철에 가장 높게 조사된 Pb를 제외한 불용성 성분의 계절별 분포는 겨울에 가장 높았고, 여름이 낮게 나타났다. 계절별 총 강하먼지는 봄철이 6.741 ton/km²/season으로 가장 높고, 여름철이 1.989 ton/km²/season으로 가장 낮게 조사되었으며, 연간 총 강하먼지량은 17.742 ton/km²/year로 나타났다.

4. 지각농축계수는 토양기원인 Ca, K, Si는 1.0 이하의 분포를 보였으나, Cd, Cu, Pb 그리고 Zn은 10 이상의 높은 값을 나타냈으며, Cu, Pb, 그리고 Zn은 공단지역, 해안지역, 상업지역, 주거지역 그리고 농업지역 순으로 조사되었다. 지역별 비토양 성분의 기여율은 Pb, Cd, Zn, Cu, Ni 그리고 Cr의 순으로 나타났으며, 인위적 기원인 Pb, Zn, Cu 그리고 Cr은 공단지역이 가장 높고 농업지역이 가장 낮았고, 토양입자의 기여율은 21.1%로서 여름>가을>겨울>봄 순으로 나타났다.

5. 강하먼지와 불용성 성분과의 상관분석 결과 Pearson 상관계수가 0.5 이상이고, 양측검정(two tailed test)에서 유의수준 P<0.05를 만족하는 것은 K, Cu, Mg, Fe, Zn, Al, Ca, Cr 그리고 Mn 순으로 나타났다. 부산지역 강하먼지의 조성에 영향을 미치는 인자 부하량은 oil burning 및 차량, 산업활동, 토양 그리고 해양기원 순으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Tripathi, R. M., S. C. Ashawa and R. N. Khandekar, 1993, Atmospheric deposition of Pb, Cd, Cu and Zn in Bombay, India, Atmos. Env., 27B(2), 269~273.
- 2) 최재천, 김산, 이민영, 이선기, 1995, 제주도와 울릉도의 강하분진 중 수용성 성분에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(4), 331~337.
- 3) 최재천, 이민영, 이선기, 유근배, 1993, 배경대기 강수의 화학성분 특성, 기상연구논문집, 10(1), 111~118.
- 4) Lodge, J. P., 1989, Methods of Air Sampling and Analysis, 3rd ed., Lewis Publishers, New York, 44 0~445.
- 5) Pruppacher, H. R., R. G. Semonin and W. G. Slinn, 1983, Vol. I. Precipitation scavenging, dry deposition and resuspension, Elsevier Science Publishers, New York, 729.
- 6) De Miguel, E. et al., 1997, Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust; Unleaded petrol and urban lead, Atmos. Env., 31(17), 2733~2740.
- 7) Gerdol, R. et al., 2000, Monitoring of heavy metal deposition in Northern Italy by moss analysis, Environmental Pollution, 108(2), 201~208.
- 8) Kaya, G. and G. Tuncel, 1997, Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey, Atmos. Env. 31(23), 3985~3998.
- 9) Mason, B., 1966, Principle of Geochemistry, 3rd ed., Wiley, New York, 21~24.
- 10) Yves, G. and J. P. Schmit, 1998, Estimation of the bulk atmospheric deposition of major and trace elements to a rural watershed, Atmos. Env., 32(9), 1473~1483.
- 11) Sinha S. and S. P. Banerjee, 1997, Characterization of haul road dust in indian opencast iron ore mine, Atmos. Env., 31(7), 2809~2814.
- 12) Vallack, H. W. and D. E. Shillito, 1998, Suggested guidelines for deposited ambient dust, Atmos. Env., 32(16), 2737~2744.
- 13) 강병욱, 강공언, 김민영, 1992, 서울시 강하분진 중 수용성 성분의 강하량, 한국대기보전학회지, 8(4), 240~246.
- 14) Franson, M. A. et al., 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater "Preliminary treatment of samples, 3030 E. Nitric acid digestion", 18th ed., American Public Health Association, Washington.
- 15) 정충영, 최이규, 1998, SPSSWIN을 이용한 통계분석, 제3판, 무역경영사, 서울, 518.
- 16) Wu, Z. Y., M. Han, Z. C. Lin and J. M. Ondov, 1994, CBAD Study, Year 1: Sources and Dry deposition of selected elements in Aerosol particles, Atmos. Env., 28(8), 1471~1486.
- 17) 이기호, 허철구, 1999, 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여: 2. 오염원 추정, 한국대기환경학회지, 15(2), 101~111.
- 18) 김현섭, 허정숙, 김동술, 1998, 강하분진의 화학적 특성 파악을 위한 통계적 해석, 한국대기보전학회지, 14(6), 631~641.
- 19) Ralph, M. O. and C. F. Barrett, 1984, Wind tunnel study of the efficiency of three deposit gauges. Report No. LR499, Warren Springs Laboratory, Stevanage, U.K.
- 20) 김성천, 1999, 서해 도시지역 군산의 강하분진 및 금속원소 침착량 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 29 1~303.
- 21) 박정호, 최금찬, 1999, 대기 에어로졸 입자의 이론적 강수 세정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(1), 1~11.
- 22) Kaiser, 1958, The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, Psychometrika, 23(3), 187~200.