

낙동강 하류역 강하먼지의 화학적 조성 특성

전병일¹ · 황용식^{2,*}

¹신라대학교 환경공학과, 617-736 부산광역시 사상구 패법동 산1-1

²인제대학교 산업의학연구소 및 부산백병원 산업의학교실, 614-735 부산광역시 진구 개금동 633-165

Chemical Composition Characteristics of Dustfall in Nakdong River Area

Byung-Il Jeon¹ and Yong-Sik Hwang^{2,*}

¹Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

²Institute of Industrial Medicine, Department of Occupational and Environmental Medicine,
Busan Paik Hospital, Inje University, Busan 633-165, Korea

Abstracts: Dustfall samples were collected by the modified American dust jar (bulk type) at 5 sampling sites in the Nakdong river area from June 2002 to May 2003. Nineteen chemical species (Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, V, Zn, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, and NH₄⁺) were analyzed via the combination of ICP/AES, AAS, IC and UV. The purposes of this study were to qualitatively evaluate the chemical composition of dustfalls by examining their regional and seasonal distribution patterns. Computation of the enrichment factor showed that well-defined anthropogenic sources, particularly in Pb were found in the order: Gamjeondong (industrial area), Wondong, Silla University, Samrangjin and Mulgum. The seasonal mean of soil contribution showed its highest value (16.3%) during the winter with an annual mean of 11.2%. The concentration ratio of [SO₄²⁻/NO₃⁻] was found to be highest (5.12) during the winter, while the lowest ratio value (3.30) was seen during the fall. Also, regional equivalent ratios of [SO₄²⁻/NO₃⁻] were found in the order: Silla University (6.78), Gamjeondong (4.98), Mulgum (3.85), Wondong (3.04), and Samrangjin (2.87). Seasonal distribution of water soluble components for total dustfall were found in the order: spring (71.6%), summer (61.2%), fall (49.2%) and winter (48.6%) with a mean ratio of 57.6%. Regional contribution of sea salts of water soluble ions were found in the order: Silla university (34.5%), Gamjeondong (28.3%), Wondong (17.3%), Samrangjin (17.2%) and Mulgum (13.8%), the total mean contribution rate was 22.1%. As for the chemical composition of dustfall on the lower Nakdong river, there is a decreased influence of sea salt and artificial anthropogenic sources and increased influence of soil particle inland. Also, the total amount of deposition on the lower Nakdong river has decreased, with the river's surface serving as a confounding factor in resuspending dusts.

Keywords: dustfall, enrichment factor, anthropogenic source, soil contribution rate, equivalent ratio, sea salt

요약: 본 연구는 낙동강 하류역 강하먼지의 조성 특성을 파악하기 위하여, 광구병형 Dust jar를 사용하여 2002년 6월부터 2003년 5월까지 1년간 낙동강 하류역의 5개 지점에서 시료를 채취하였다. 채취된 강하먼지에 함유된 불용성 성분(Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, V, Zn) 및 수용성 성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺)들은 ICP/AES, AAS, IC 및 UV를 이용하여 정량하였다. 성분에 대한 지각농축계수를 지역별로 비교한 결과 인위적인 오염원인 Cd, Cu, Pb, Zn에서 10 이상의 높은 값을 보였다. 특히 Pb는 감전동, 원동, 신라대, 삼랑진 및 불금 지점 순으로 감소하는 것으로 조사되었다. 계절별 토양입자의 기여율은 겨울철에 16.3%로서 가장 높았으며, 1년간 평균 기여율은 11.2%이었다. 계절별 [SO₄²⁻/NO₃⁻] 당량비는 겨울철(5.12)이 가장 높았고, 가을철(3.30)이 가장 낮게 나타났다. 지역별로는 신라대, 감전동, 불금, 원동 및 삼랑진 순으로, 특히 도심에 인접한 지점의 경우가 높게 나타났으며, 평균 당량비는 4.28이었다. 총 강하먼지에 대한 수용성 이온성분의 총 침적량의 비율은 봄철(71.6%), 여름(61.2%), 가을

*Corresponding author: iimhys@inje.ac.kr

Tel: 82-51-890-6875

Fax: 82-51-895-7040

(49.2%) 및 겨울철(48.6%)의 순으로 나타났으며, 평균은 57.6%이었다. 해염입자의 지역별 기여율 분포는 신라대(34.5%), 감전동(28.3%), 원동(17.3%), 삼랑진(17.2%) 및 물금(13.8%)의 순으로 나타났으며, 평균 기여율은 22.1%로 나타났다.

주요어: 강하먼지, 지각농축계수, 인위적오염원, 토양기여율, 당량비, 해염입자

서 론

최근 부산광역시와 경남 일원의 낙동강 하류역에는 농·공단지의 입주가 많아졌고, 그에 따라 각종 도로의 건설과 차량 통행량의 증가 등으로 부유먼지와 강하먼지가 크게 증가하는 실정이다. 특히 공장과 자동차에서 배출된 대기오염물질은 낙동강 유역의 거주민에게 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 지표면 침착으로 인해 낙동강의 수질 및 토양에도 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 또한 중국으로부터 장거리 수송되는 대기오염물질에는 중금속을 비롯한 인체와 동·식물에 유해한 물질이 포함된 것으로 보고 되었으며(전병일, 2003), 이런 물질이 낙동강 하류역의 식생이나 수질에 미약하나마 영향을 미칠 것으로 판단된다. 강하먼지는 각종 금속성분이나 유기물 등을 함유하고 있어 인체 및 생활에 직·간접적으로 영향을 미치며, 수용성의 산성물질은 토양의 산성화를 일으켜 산림 및 농작물에 피해를 주며, 표층수의 산성화에 기여한다(Probst 등, 1995b). Garcia-Rodeja 등(1998)은 스페인 북서부에 있는 Sor 강 집수지에서 유입 및 유출 이온의 침적량을 통하여 유입 및 유출 수지가 미네랄 풍화(Si , Ca^{2+} , Mg^{2+} 그리고 Na^+ 의 손실)와 함께 SO_4^{2-} 의 보유과정을 밝힌 바 있다. 또한 먼지는 대기 중에서 응결핵 역할을 하여 시정악화의 원인이 되고, 태양복사를 산란 또는 흡수하는 직접 효과나 구름의 광학적 성질, 운량 및 구름의 수명 등을 변화시키는 간접효과(IPCC, 1995)를 통해 강수량에 영향을 미칠 수 있다. 강하먼지의 축정은 특정 오염원을 대상으로 하기보다는 일정한 지역에서 침강하는 대기침적물의 평균적인 침적량의 축정을 통해 그 지역의 대기오염도를 파악하는 간접적인 평가인자로서 활용될 수 있는 비교적 간편한 방법이다(최재천 등, 1995; 玉置元則, 1990). 이런 강하먼지의 침적량은 지형적인 특성과 기상학적인 특성에 따라서 큰 차이를 보이게 되며, 오염원의 지리적인 분포에도 영향을 받게 된다(윤훈주와 김동술, 1997).

강하먼지에 관한 국내의 연구는 주로 대기오염이

비교적 심한 지역(윤훈주와 김동술, 1997; 강병욱 등, 1992; 김동술 등, 1990)과, 인위적인 배출원들이 거의 존재하지 않거나 그 영향이 상대적으로 미미한 지역에서도 실시되고 있다(최재천 등, 1995; 이기호 등, 1999; 이기호와 허철구, 1999). 특히 낙동강 유역의 도시지역인 부산시를 대상으로 한 연구는 김은경 등(1996)이 강하분진과 중금속농도를 측정하고 각 지역별 농도분포와 월별 농도변화를 조사하고, 각 항목간의 상관관계를 조사하여 강하먼지의 특성과 오염물질의 기원을 연구한 바 있다. 이와 유사하게 김유근 등(2001)은 부산지역의 강하먼지와 불용성 성분의 침적량에 관한 연구를 실시한 바 있다. 서울시의 강하분진에 대한 연구는 강병욱 등(1992)에 의해 이루어졌고, 수원지역 강하분진의 화학조성과 공간분포 분석은 김현섭(1999)에 의해서, 광주시 강하분진 중 수용성 이온성분의 강하량에 관한 연구는 신대윤 등(1996)에 의해서, 군산지역의 강하분진 및 금속원소 침적량에 관해서는 김성천(1999, 2000)에 의해 이루어졌다.

본 연구에서는 낙동강 하류역을 대상으로 5개 지점에서 미국식 광구병형 dust jar를 이용하여 강하먼지를 포집하고, ICP/AES와 IC를 이용한 화학분석을 통해 강하먼지 중의 불용성 및 수용성 성분을 정량화하고자 한다. 또한, 낙동강 하구역의 지점별 강하먼지의 침적과정과 화학적 분석을 통해 낙동강 수역에 침적하는 대기오염물의 양과 주요오염원을 파악하고, 간접적으로는 대기오염물질이 낙동강의 수질에 미치는 영향을 추정할 수 있다.

연구 방법

측정 지점 및 기간

본 연구에서는 낙동강 하류역 5개 지점을 선정하고, 측정기간은 2002년 6월부터 2003년 5월까지 월(30일 기준)별로 1년간 강하먼지를 측정하였다(Fig. 1 참조). 측정장소는 낙동강 하구에 인접하고 사상공단에 위치한 감전동(감전1동 사무소 옥상) 지점, 도심

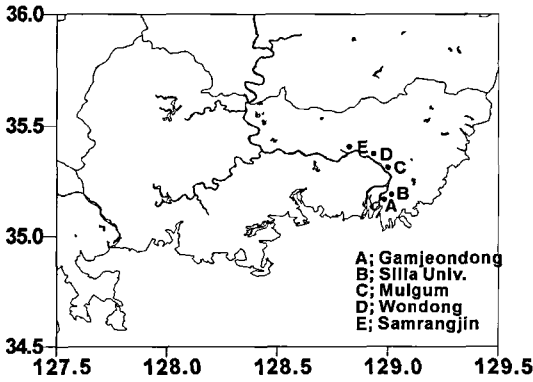


Fig. 1. The dustfall monitoring sites in Nakdong river area.

녹지지역으로서 사상공단의 동북쪽에 백양산으로 둘러싸인 신라대학교(자연과학대학 건물 옥상) 지점, 물금(물금면 증산리 회관 옥상) 지점, 원동(원동 면사무소 옥상) 지점 및 삼랑진(삼랑진 읍사무소 옥상) 지점이다. 이중 감전동 지점은 공업지역으로 분류되고 신라대학교 지점은 녹지지역, 물금, 원동, 삼랑진은 전원지역으로 구분된다. 다만 물금 지점은 최근 고속도로 확장 공사에 의해 비산먼지가 다소 발생하고 있다.

시료의 채취 및 분석 방법

강하먼지의 포집을 위하여 사방이 개방된 건물 옥상에 높이 1.5 m인 철재 구조물에 채취된 시료의 증발과 재비산 방지를 고려한 bulk type의 미국식 광구 병형 dust jar를 설치하고(Lodge, 1989), 직경 10 cm인 3.6l들이 폴리에틸렌 병에 탈이온수 2.0l를 넣어 포집에 이용하였다. 채취된 시료는 Whatman(No. 42) 여지를 105°C에서 2시간 건조(강병욱 등, 1992)하고 감도가 0.01 mg인 전자저울(Saritorius microbalance, Germany)로 무게를 칭량한 후 여과하였다. 분리된 여액은 100 ml 폴리에틸렌 병에 담아 4°C의 냉암소에 보관한 후 수용성 성분을 분석하였다. 또한 여지는 필터진 조건과 동일하게 하여 여과 전·후의 중량차로서 불용성 성분의 중량 농도를 측정하였으며, 불용성 미량 금속 성분을 정량하기 위하여 대기오염공정시험법(대기오염연구회, 2000)에 의거하여 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법으로 전처리 한 후 ICP/AES(ICP-IRIS, Thermo Jarrell Ash Co., USA)를 이용하여 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, Zn을 분석하였다. 각각의 검출한계는 3, 8, 3, 20, 7, 15, 5, 4

µg/l였다. 그리고 AAS(Perkin Elmer 4100ZL, Flameless method)을 이용하여 Cd, Cr, Mn, Ni, Pb를 정량하였으며, 각각의 검출한계는 2, 4, 5, 70, 50 ng/l이었다. 또한 이들 각 금속 성분들의 정도관리를 위하여 NIST SRM(3087a)을 이용하였으며, 주어진 정량범위를 만족할 때 분석을 수행하였다. 강하먼지 중의 수용성 성분을 정량하기 위하여 분리된 여액은 ICP/AES(ICP-IRIS, Thermo Jarrell Ash Co., USA)를 이용하여 Ca, K 그리고 Mg을 분석하였다. 그리고 IC(DX-500, Dionex Co., USA)를 이용하여 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻를 정량 분석하였으며, 각각의 검출한계는 30, 50, 60 µg/l이었다. NH₄⁺는 UV(U-2000, Hitachi Co., Japan)를 이용하여 인도페놀법(Lodge, 1989)으로 정량분석 하였으며, 검출한계는 51 µg/l로서 AIHA(1988) 방법을 이용하였다.

계산 및 통계처리 방법

침적하는 총 강하먼지량은 불용성 성분과 수용성 성분의 합으로서 아래와 같이 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$\text{강하먼지량}(\text{ton}/\text{km}^2/\text{month}) = 12.73 \times \frac{W}{D^3} \times \frac{30}{N} \quad (1)$$

여기서, W는 강하먼지량의 분석치(mg), D는 dust jar의 직경(cm), N는 dust jar의 방치일(day)이다. 각 불용성 성분의 농도 계산은 일반적인 식 (2)을 이용하였다.

$$\text{불용성 강하물}(\text{kg}/\text{km}^2/\text{month}) = 12.73 \times \frac{C \times V}{D^2} \times \frac{30}{N} \quad (2)$$

여기서, C는 강하물질의 불용성 성분 농도(µg/ml), D는 dust jar의 직경(cm), V는 수용액량(ml) 그리고 N은 dust jar의 방치일(day)을 나타낸다.

강하먼지 중 수용성 이온성분의 침적량 계산은 최재천 등(1995)이 사용한 일반적인 식으로, 아래 식 (3)을 이용하였다.

$$\text{수용성 강하물}(\text{kg}/\text{km}^2/\text{month}) = 12.73 \times \frac{C_s \times V}{D^2} \times \frac{30}{N} \quad (3)$$

여기서, D는 dust jar의 직경(cm), N은 dust jar의 방치일(day), C_s는 수용성 강하물질의 성분 농도(µg/ml) 그리고 V는 수용액 량(ml)을 나타낸다.

강하면지 중 불용성 성분의 지각농축계수(EF)를 구하기 위하여 식 (4)을 이용하였다.

$$EF = \frac{(X_i/AI)_{sample}}{(X_i/AI)_{crust}} \quad (4)$$

여기서, (X_i/AI) 는 시료(강하면지 또는 부유면지)에 대한 지각 중의 AI 농도에 대한 농도비를 의미한다. 비지각 성분의 질량분율을 계산하기 위하여 식 (5)를 이용하였다(Wu et al. 1994).

$$f_{i,noncrustal} = 1 - (C_{AI}/C_i)_{sample} \cdot (C_i/C_{AI})_{crust} \quad (5)$$

강하면지량에 대한 토양입자의 기여율(Mason, 1966; 이기호와 허철구, 1999)을 추정하기 위하여 식 (6)을 이용하였다.

$$CR_{soil}(\%) = \frac{C_{soil}}{C_{sample}} \times 100 = \frac{C_{AI}/0.0813}{C_{sample}} \times 100 \quad (6)$$

여기서, C_{soil} 은 시료중 토양입자의 함량, C_{sample} 은 시료의 총량(또는 침적량), C_{AI} 은 시료 중의 AI 함량, 0.0813은 지각 중의 AI의 질량 농도비를 나타낸 것이다.

강하면지 중 수용성 이온성분의 해염농축계수를 구하기 위하여 식 (7)을 이용하였으며,

$$EF_{sea} = \frac{(X_i/Na)_{sample}}{(X_i/Na)_{sea}} \quad (7)$$

(X_i/Na) 는 시료(강하면지 또는 부유면지)에 대한 지각 중의 Na 농도에 대한 농도비를 의미한다. 비해염 성분의 질량분율을 계산하기 위하여 식 (8)을 이용하였다.

$$f_{i,noncrustal} = 1 - (C_{Na}/C_i)_{sample} \cdot (C_i/C_{Na})_{sea} \quad (8)$$

강하면지량에 대한 해염입자의 기여율(Mason, 1966; 이기호와 허철구, 1999, 황용식, 2003)을 추정하기 위하여 식 (9)을 이용하였다.

$$CR_{SS}(\%) = \frac{\sum C_{i,ss}}{\sum C_{i,t}} \times 100 \quad (9)$$

여기서, $C_{i,ss}$ 는 식 (10)과 같이 Na 성분을 기준물질로 이용하여 해염입자로부터 각 이온성분들의 농도를 의미하고, $C_{i,t}$ 는 식 (11)과 같이 각 수용성 성분 농도

의 합을 의미한다.

$$\sum C_{i,ss} = [Na^+] + [SS - SO_4^{2-}] + [SS - Cl^-] + [SS - K^+] + [SS - Ca^{2+}] + [SS - Mg^{2+}] \quad (10)$$

$$\sum C_{i,t} = [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{2-}] + [NH_4^+] + [K^+] + [Mg^{2+}] + [Na^+] \quad (11)$$

그리고 식 (12)와 식 (13)은 비해염입자(none sea salts, NSS)를 Na 성분을 기준물질로 이용하여 계산하였다.

$$NSS - SO_4^{2-} = SO_4^{2-} - 0.251 \times Na^+ \quad (12)$$

$$NSS - Ca^{2+} = Ca^{2+} - 0.038 \times Na^+ \quad (13)$$

또한, 도시화와 산업화에 따른 각 성분의 기원을 추정하기 위한 통계적인 해석은 SPSS(windows v. 10.0)를 이용하였다. 강하면지량과 불용성 및 수용성 성분들과의 상관성을 조사하기 위하여 Pearson 상관계수를 구하고, 평균차이 검정을 위하여 t-test의 양측 검정을 수행하였다(정충영과 최이규, 1998). 강하면지 중 불용성 금속 성분들과 수용성 이온 성분들 사이의 상호 관계를 이용하여 유사한 변수들끼리 분류시키기 위하여 19개 측정 변수를 사용하였으며, 주성분 분석법과 Varimax 회전법을 이용하여 요인분석을 실시하였다(김현섭 등, 1998; 이기호와 허철구, 1999; Kaiser, 1958; Sinha and Banerjee, 1997).

결과 및 고찰

강하면지 중 불용성 금속 성분

Fig. 2는 낙동강 유역에서 측정된 총 강하면지의 월별 총 침적량을 조사하여 나타낸 것이다. 8월에 총 강하면지 침적량이 가장 높았으며, 2월이 그 다음이었고 가장 낮은 침적량을 보인 달은 3월이었다. 계절적인 특성을 파악하기 위하여 봄철(3~5월), 여름철(6~8월), 가을철(9~11월) 및 겨울철(12~2월)로 구분하면, 대체로 강하면지는 바람이 강하고 강수가 적은 겨울철이 높은 경향이 있다. 특히 황사가 발생하는 봄철에도 강하면지량이 많은 경향이 있으나, 2003년 봄철의 경우 우리나라에 황사가 발생하지 않아 강하면지의 침적량이 작았다. 계절적 특성으로는 불용성 강하면지와 금속 성분들은 겨울철에 높게 나타나는 경향

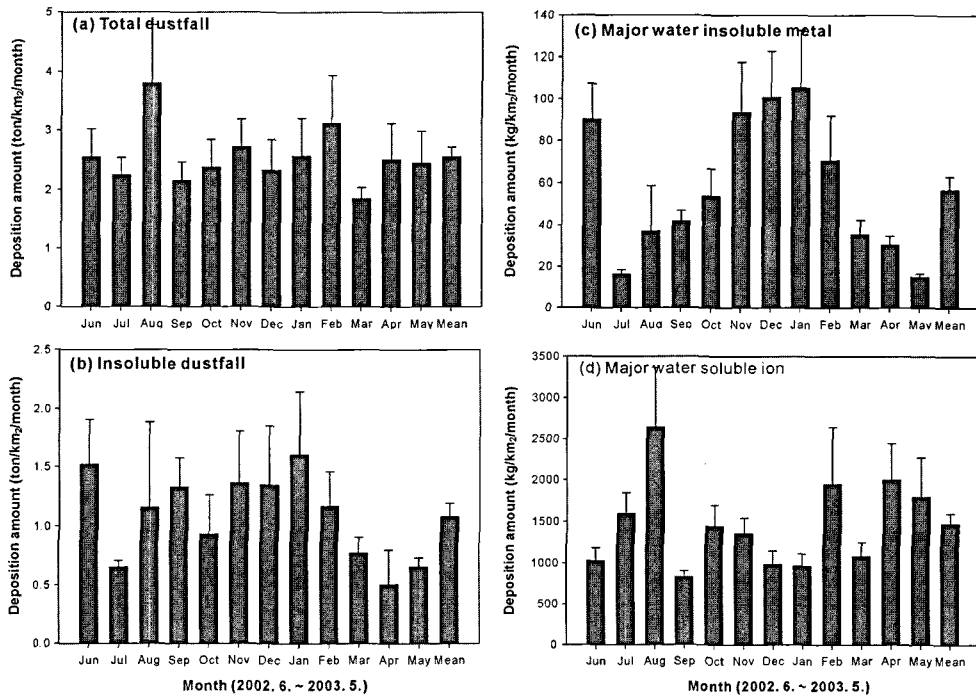


Fig. 2. Monthly deposition amount of (a) total dustfall, (b) insoluble dustfall, (c) major water insoluble metal and (d) major water soluble ion in Nakdong river area from June 2002 to May 2003.

이지만, 수용성 이온 성분들의 총 침적량은 겨울철에 낮게 나타나 총 강하면지의 계절별 분포에서는 차이점을 발견하지 못하였다. 수용성 이온성분의 총침적량은 강수량과 상관관계수 0.78로서 유의한 차이 ($p < 0.01$)를 보여 강수량이 낮은 겨울철에 침적량이 감소하는 것으로 나타났다. Table 1은 강하면지의 침적량을 계절별로 조사하여 타 연구지역과 비교한 것이다. 본 연구에서는 하계에 2.864 ton/km²/month로 가장 높았으며, 춘계에 2.268 ton/km²/month로 가장 낮았다. 그렇지만 계절별로 큰 차이는 발견되지 않았다. 또한 연간 총 강하면지의 침적량은 10.2 ton/km²/month로서 서울(강병욱 등, 1992) 및 제주도과 울릉

도(최재천 등, 1995), 군산(김성천, 1999) 및 부산(황용식, 2003)보다 낮게 나타났다. 측정 연도가 달라 절대적으로 비교하기가 곤란하지만, 본 연구지역은 비교적 청정지역이라고 하는 제주와 울릉도보다도 낮은 값을 나타내었다. Table 2는 강하면지와 불용성 미량 금속성분의 계절별 분포를 나타낸 것으로서 겨울철에 높게 나타났으며, 봄철에 낮은 침적량을 보였다. 또한 Cd, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Si 및 V은 계절의 변화에 따라 유의한 차이($p < 0.05$ 이상)가 있는 것으로 나타났다. 봄철에는 Ca, 여름철, 가을철, 겨울철에는 Fe가 가장 많이 함유되어 있었다. Table 3은 강하면지와 불용성 미량 금속성분의 지역별 분포를

Table 1. The amount of seasonal total dustfall deposition in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Season	Seoul ^a	Jeju ^b	Ullung ^b	Kunsan ^c	Busan ^d	This study
Spring	12.67	11.481	7.080	4.767	5.387	2.268
Summer	7.45	3.792	1.633	1.818	4.794	2.864
Fall	10.43			8.220	7.998	2.396
Winter	9.14			4.746	4.420	2.672
Annual total	39.69	31.303	14.962	19.551	22.588	10.200

unit; ton/km²/month

a; Kang et al. (1992), b; Choi et al. (1995), c; Kim (1999), d; Hwang (2003)

Table 2. Seasonal distribution of arithmetic mean deposition amount of water insoluble trace metal in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	Season				Annual mean
	Summer	Fall	Winter	Spring	
Dustfall	1.11	1.22	1.37	0.65	1.08
Al	7.40	10.73	18.19	3.24	9.86
Ca	7.67	10.62	11.10	11.25	10.14
Cd**	3.27	0.81	2.44	1.92	2.16
Cr	0.13	0.05	0.12	0.14	0.11
Cu	0.25	0.71	0.37	0.13	0.35
Fe*	15.47	17.75	30.71	4.45	17.07
K	3.22	4.45	3.05	2.29	3.21
Mg**	3.65	4.78	6.29	1.43	4.01
Mn**	0.46	0.44	0.66	0.12	0.42
Ni**	0.06	0.05	0.10	0.02	0.06
Pb*	0.23	0.19	0.24	0.10	0.19
Si**	8.49	10.69	20.70	3.45	10.84
V**	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03
Zn	0.66	0.84	0.67	0.32	0.61

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Dustfall; Insoluble dustfall (ton/km²/month)

Cd; g/km²/month, Other metals; kg/km²/month

Table 3. Regional distribution of arithmetic mean deposition amount of water insoluble trace metal in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Elements	Area					Total mean
	Gamjeon dong	Silla Univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin	
Dustfall*	1.16	1.29	1.59	0.57	0.78	1.08
Al*	9.29	10.12	17.13	4.09	8.59	9.86
Ca	10.22	10.04	12.33	7.32	10.86	10.14
Cd	2.81	2.03	3.00	1.41	1.46	2.16
Cr	0.12	0.18	0.07	0.10	0.11	0.11
Cu	0.42	0.25	0.66	0.26	0.14	0.35
Fe	21.12	17.18	25.32	8.78	12.60	17.07
K	3.19	3.20	3.62	2.86	3.18	3.21
Mg*	3.59	3.60	6.83	2.25	3.74	4.01
Mn	0.48	0.43	0.66	0.23	0.29	0.42
Ni*	0.088	0.079	0.055	0.029	0.027	0.056
Pb**	0.29	0.19	0.23	0.12	0.12	0.19
Si*	9.03	11.61	18.53	4.97	10.04	10.84
V*	0.039	0.031	0.044	0.014	0.022	0.03
Zn**	1.13	0.50	0.65	0.35	0.40	0.61

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Dustfall; Insoluble dustfall (ton/km²/month)

Cd; g/km²/month, Other metals; kg/km²/month

나타낸 것이다. 감전동 지점은 산업활동에 의해 발생하는 인위적 기원인 Ni, Pb 및 Zn의 농도가 가장 높았으며, 물금 지점은 인위적인 오염원을 제외한 자연적인 오염원에서 발생하는 토양기원의 원소(Al, Fe, Si 등)가 다른 지점보다 많이 침적하였다. 이는 앞에

서도 언급하였듯이 인근의 고속도로 확장공사로 인해 발생하는 비산먼지에 의한 영향으로 판단된다. 또한 모든 항목에서 가장 낮은 농도를 나타낸 지점은 원동으로 나타났다. 요약하면 토양기원(Al, Fe, Mn 및 Si)의 침적량은 물금 지점에서 가장 높았고, 원동에서

Table 4. Enrichment factor of insoluble each metal element in dustfall deposited in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	Gamjeon dong	Silla Univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin	Total mean	Busan ^a
Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ca	2.46	2.22	1.61	4.01	2.83	2.30	0.83
Cd	122.75	81.47	71.14	140.44	69.24	88.85	67.50
Cr	10.23	14.37	3.14	19.88	10.62	9.38	5.94
Cu	66.50	37.19	56.97	94.17	24.49	52.80	24.35
Fe	3.70	2.76	2.40	3.49	2.38	2.82	2.87
K	1.08	0.99	0.66	2.19	1.16	1.02	0.63
Mg	1.50	1.39	1.55	2.14	1.69	1.58	1.23
Mn	4.43	3.63	3.29	4.75	2.84	3.63	2.63
Ni	10.23	8.51	3.48	7.66	3.43	6.12	4.26
Pb	193.70	117.90	84.05	181.69	90.33	121.43	133.03
Si	0.28	0.34	0.32	0.36	0.34	0.32	0.15
V	3.40	2.50	2.09	2.75	2.05	2.47	
Zn	141.81	57.56	44.33	98.03	54.59	72.22	79.54

a; Hwang (2003)

가장 낮았다. 그리고 산업활동에 의한 인위적 기원 (Ni, Pb, V 및 Zn)의 침적량은 감전동이 가장 높았고, 원동이 가장 낮게 나타났다.

지각농축계수

강하먼지 중 불용성 성분의 기원을 추정하기 위하여, Mason(1966)의 지각 평균 농도를 이용하여 식 (4)을 이용하여 지역별 지각농축 계수를 구하였다 (Table 4). EF값이 클수록 인위적인 기원으로부터 기인한 정도가 높다는 것을 의미하며, EF 값이 1.0보다 크면 지각 이외의 오염원을 가지며, 10보다 적은 값 일 때는 지역별 토양과 Mason's compilation간의 화학적 구성사이의 차이가 존재하므로 그 기원을 필연적으로 나타내지는 못한다(Kaya and Tuncel, 1997). 토양기원인 Si는 1.0 이하의 분포를 보였으나, 인위적인 오염원인 Cd, Cu, Pb 그리고 Zn은 10 이상의 높은 값을 나타냈다. 특히 Pb는 감전동, 원동, 신라대, 삼랑진 및 물금 지점 순으로 조사되었으며, 유류 연소에 의한 인위적인 배출원에 기인한 것으로 추정된다. 1.0 이상이고 5이하의 분포를 보인 성분은 Ca, Fe, K, Mg, Mn 그리고 V로 나타났다. Cr의 경우 물금지역을 제외한 다른 지점에서는 10.0 이상의 분포를 보였으며, Cd, Cr 및 Cu는 원동에서 가장 높은 지각 농축계수를 보였다.

비토양 성분의 질량분율

비 토양성분의 강하먼지의 조성에 기여한 정도를

파악하기 위하여 식 (5)을 이용하여, 질량분율을 구하였다(Table 5). 인위적인 오염원에 기인한 낙동강 하류역의 강하먼지 중 불용성 성분의 비 토양성분의 질량분율은 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 그리고 Ni의 순으로 나타났으며, 인위적 기원인 Pb과 Zn은 감전동지점이 가장 높고 물금지역이 가장 낮게 나타났다. 또한 Fe는 감전동 지점이 높게 나타났으나, 삼랑진 지점에서 가장 낮게 나타났다. 산업활동(금속제련)에 기인한 Cd과 Cu는 감전동과 원동에서 높게 나타났다. 유류 연소에 기인한 Ni의 비 토양성분의 기여율은 83.7%로 나타났으며, 감전동에서 가장 높았고 삼랑진에서 가장 낮았다. 따라서 이러한 지점별 차이는 낙동강의 하류역에 위치한 감전동 지점이 사상공단을 끼고 있어서, 인위적인 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 상대적으로 내륙에 위치한 물금과 삼랑진 지점에서는 비 토양성분의 질량분율이 낮았으므로 인위적 오염원의 영향을 적게 받았다.

토양입자의 기여율

식 (6)으로부터 각 지역에서의 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율을 추정하여, Table 6에 나타내었다. 계절에 따른 각 지역에서 토양입자의 기여도를 정량적으로 평가하기 위하여, Al을 기준물질로 하여 계산하였다. 지역별 분포에서는 삼랑진, 물금, 감전동, 신라대 그리고 원동 순으로 나타났으며, 낙동강 하류역에서 총 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율은 11.2%로서 황용식(2003)의 18.8% 및 이기호와 허철

Table 5. Mass fractions of insoluble each metal element in dustfall relative to noncrustal composition in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	$f_i, \text{noncrustal} (\%)$					Mean
	Gamjeon dong	Silla Univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin	
Al	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	59.4	55.0	38.0	75.1	64.7	56.6
Cd	99.2	98.8	98.6	99.3	98.6	98.9
Cr	90.2	93.0	68.2	95.0	90.6	89.3
Cu	98.5	97.3	98.2	98.9	95.9	98.1
Fe	72.9	63.8	58.4	71.4	58.1	64.5
K	7.1	-0.7	-50.9	54.4	14.0	2.1
Mg	33.4	27.8	35.5	53.2	40.9	36.8
Mn	77.4	72.5	69.6	78.9	64.8	72.5
Ni	90.2	88.2	71.2	87.0	70.8	83.7
Pb	99.5	99.2	98.8	99.4	98.9	99.2
Si	-251.0	-197.3	-215.1	-180.6	-191.7	-210.3
V	70.6	60.0	52.1	63.6	51.2	59.6
Zn	99.3	98.3	97.7	99.0	98.2	98.6

Table 6. Contribution rate of soil to deposition amount for each area in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Area	Season				Annual mean
	Summer	Fall	Winter	Spring	
Gamjeondong	7.2	8.9	18.9	5.8	9.8
Silla Univ.	10.3	9.8	12.3	3.5	9.6
Mulgum	10.9	13.3	15.7	8.9	13.2
Wondong	5.9	9.5	30.3	4.6	8.8
Samrangjin	6.7	10.7	21.0	9.1	13.5
Total mean	8.2	10.8	16.3	6.2	11.2
Busan ^a	16.0	19.1	20.6	17.9	18.8
Jeju ^b					26.4

a; Hwang (2003), b; Lee and Hu (1999)

구(1999)의 26.4%보다는 낮았다. 계절별로는 겨울 > 가을 > 여름 > 봄의 순으로서 겨울철이 16.3%로서 가장 높고, 봄철이 가장 낮게 나타나 이기호와 허철구(1999)의 연구 결과에서 나타난 봄철 및 겨울철의 높은 토양기여율과는 다소 차이를 보였다. 이러한 차이는 지리적인 특성에 따른 것으로 시료의 포집 지점이 낙동강의 동부에 인접해 있어서 토양입자의 유입이 상대적으로 낮아졌으며, 낙동강 하류역에서 내륙에 가까울수록 겨울철에 토양입자의 유입이 많았다. 낙동강의 하류에 위치한 부산지역(황용식, 2003)은 봄철의 경우 서남풍이 가장 우세하게 나타나는 기상학적 특성으로 인하여, 연구지역 서남쪽의 낙동강 수 표면에서는 토양입자의 침적만 존재하고 재비산이 어렵게 되는 계절적 특성을 보였다. 반면 황용식(2003)의 겨울철(20.6%)의 높은 토양기여율과 유사한 경향

을 보였다. 따라서 토양입자와 같은 자연적인 발생원의 영향은 제주지역(이기호와 허철구, 1999)보다 낮게 나타났으며, 강수량이 적고 대기가 건조한 겨울철에는 낙동강의 하류역에서 내륙에 가까울수록 높아지는 경향을 보였다.

강하먼지 중 수용성 이온 성분

Table 7과 8은 낙동강 하류역에 침적하는 강하먼지 중 수용성 성분의 계절별 및 지역별 특성을 나타낸 것이다. 수용성 이온의 계절별 침적량은 Table 7과 같이 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났으며, 지역별 침적량은 Table 8과 같이 바다와 가장 가까운 낙동강 하류지점인 감전동에서 Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , K^+ 및 Mg^{2+} 이 가장 높게 나타났다. 또한 NSS-SO_4^{2-} 의 계절별 침적량은 Table 7

Table 7. Seasonal distribution of arithmetic mean deposition amount of water soluble ion in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	Season				Annual mean	p-value
	Summer	Fall	Winter	Spring		
Cl ⁻	395.0	199.5	340.7	271.1	305.1	0.760
NO ₃ ⁻	195.9	189.4	163.9	226.3	194.0	0.239
SO ₄ ²⁻	594.9	488.8	600.9	738.6	609.8	0.344
NH ₄ ⁺	41.4	40.6	32.3	78.2	48.4	0.006
Ca ²⁺	94.3	131.2	88.3	109.2	104.9	0.508
K ⁺	185.9	42.7	20.9	30.9	71.0	0.000
Mg ²⁺	23.4	10.8	7.9	17.2	15.0	0.039
Na ⁺	221.9	75.2	43.2	149.9	124.2	0.109
NSS-SO ₄ ²⁻	539.2	469.9	590.0	701.0	578.7	0.389
NSS-Ca ²⁺	85.8	128.4	86.7	103.6	100.2	0.453

unit; kg/km²/month, NSS; non sea salts

Table 8. Regional distribution of arithmetic mean deposition amount of water soluble ion in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	Area					Mean	p-value
	Gamjeondong	Silla univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin		
Cl ⁻	498.1	427.5	322.6	145.9	127.0	305.1	0.283
NO ₃ ⁻	212.6	168.0	223.3	174.0	189.7	194.0	0.435
SO ₄ ²⁻	845.3	743.5	653.0	419.7	379.6	609.8	0.003
NH ₄ ⁺	80.1	34.8	61.7	32.5	30.3	48.4	0.004
Ca ²⁺	119.7	138.3	83.0	58.1	130.2	104.9	0.068
K ⁺	87.3	74.2	74.3	53.5	65.6	71.0	0.958
Mg ²⁺	24.7	17.7	13.0	9.0	10.4	15.0	0.113
Na ⁺	187.4	259.2	72.0	54.2	53.3	124.2	0.072
NSS-SO ₄ ²⁻	798.3	678.4	634.9	406.1	366.2	578.7	0.012
NSS-Ca ²⁺	112.6	128.5	80.3	56.1	12d	100.2	0.094

unit; kg/km²/mont, NSS; non sea salts

과 같이 봄철(701.0 kg/km²/month)에 가장 높게 나타났으며, 가을철(469.9 kg/km²/month)에 가장 낮았다. NSS-Ca²⁺의 계절별 침적량은 가을철(128.4 kg/km²/month)에 가장 높았으며, 겨울철(86.7 kg/km²/month)에 가장 낮게 나타났다. 또한 NSS-SO₄²⁻의 지역별 침적량은 Table 8과 같이 감전동(798.3 kg/km²/month), 신라대, 물금, 원동 및 삼랑진의 순으로 나타났으며, 평균 침적량은 578.7 kg/km²/month이었다. NSS-Ca²⁺의 지역별 침적량은 신라대, 삼랑진, 감전동, 물금 및 원동의 순으로 나타났으며, 평균 침적량은 100.2 kg/km²/month이었다.

Table 9는 수용성 음이온 중 [SO₄²⁻/NO₃⁻] 당량비를 계절별, 지역별로 나타낸 것이다. 계절별로는 겨울철(5.12)에 가장 높았고, 가을철(3.30)에 가장 낮게 나타났다. 지역별로는 신라대, 감전동, 물금, 원동 및

삼랑진 순으로 나타나 도시에 인접한 지점의 경우가 높게 나타났다. 평균 당량비는 4.28로서 제주지역(이기호 등, 1999)과 서울지역(강병욱 등, 1992)보다 낮게 나타났다. 신라대 지점의 경우 제주지역(이기호 등, 1999)의 평균 당량비보다 높았으나, 낙동강 하류역은 청정지역일수록 [SO₄²⁻/NO₃⁻] 당량비가 매우 낮게 나타났다.

해염농축계수

강하먼지 중 수용성 성분의 기원을 추정하기 위하여 Mason(1966)의 해수 평균 농도를 이용하여 식 (7)를 이용하여 지역별 해염농축 계수를 구하여 Table 10과 Table 11에 나타내었다. EF값이 클수록 인위적인 기원으로부터 기인한 정도가 높다는 것을 의미하며, EF 값이 1.0보다 크면 지각 이외의 오염원

Table 9. Seasonal and areal equivalent ratio of $[SO_4^{2-}/NO_3^-]$ of water soluble anion in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Area	Season				Annual mean
	Summer	Fall	Winter	Spring	
Gamjeondong	4.93	3.80	5.92	5.26	4.98
Silla Univ.	4.40	4.14	7.77	9.94	6.78
Mulgum	4.41	2.94	4.83	3.20	3.85
Wondong	2.49	3.29	3.53	2.83	3.04
Samrangjin	2.29	2.29	3.52	3.16	2.87
Total mean	3.71	3.30	5.12	4.88	4.28
Jeju ^a	5.89	5.67	5.84	5.09	5.68
Seoul ^b	4.48	21.15	13.05	14.78	12.97

a; Lee et al. (1999), b; Kang et al. (1992)

Table 10. Seasonal enrichment factor (EF_{sea}) of water soluble ions in dustfall relative to non sea salts composition in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	$(C_i/C_{Na})_{sea}$	Seasonal enrichment factor (EF_{sea})				Annual mean
		Summer	Fall	Winter	Spring	
Cl ⁻	1.798	0.99	1.48	4.38	1.01	1.37
NO ₃ ⁻						
SO ₄ ²⁻	0.251	10.68	25.92	55.38	19.64	19.57
NH ₄ ⁺						
Ca ²⁺	0.038	11.21	46.07	53.93	19.24	22.29
K ⁺	0.036	23.27	15.79	13.41	5.73	15.89
Mg ²⁺	0.121	0.87	1.19	1.52	0.95	1.00
Na ⁺	1.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 11. Regional enrichment factor (EF_{sea}) of water soluble ions in dustfall relative to non sea salts composition at Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	$(C_i/C_{Na})_{sea}$	Regional enrichment factor (EF_{sea})						
		Gamjeondong	Silla univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin	Mean	Busan ^a
Cl ⁻	1.798	1.48	0.92	2.49	1.50	1.32	1.37	2.33
NO ₃ ⁻								
SO ₄ ²⁻	0.251	17.97	11.43	36.13	30.83	28.36	19.57	10.65
NH ₄ ⁺								
Ca ²⁺	0.038	16.85	14.08	30.43	28.28	64.39	22.29	15.07
K ⁺	0.036	12.94	7.96	28.64	27.42	34.17	15.89	3.61
Mg ²⁺	0.121	1.09	0.57	1.50	1.37	1.62	1.00	1.21
Na ⁺	1.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

a; Hwang (2003)

을 가지며, 10보다 적은 값일 때는 지역별 해염입자와 Mason's compilation간의 화학적 구성사이의 차이가 존재하므로 그 기원을 단정하여 나타내지는 못한다(Kaya and Tuncel, 1997). 본 연구에서는 Na를 기준물질로 이용하였으며, Ca²⁺와 SO₄²⁻의 해염농축계수는 10 이상으로서 인위적인 영향이 있음을 보였으며, 계절별로는 겨울철, 가을철, 여름철 및 봄철의 순

으로 나타났으며, 지역별로는 삼랑진, 물금, 원동, 감전동 및 신라대의 순으로 나타났다. NO₃⁻와 NH₄⁺는 해수에 존재하기 보다는 인위적인 유입에 의하여 존재하므로 평가하기 어려웠다. 또한 황용식(2003)에 의해서 조사된 부산지역보다 Ca²⁺, SO₄²⁻, K⁺는 본 연구에서 높게 나타났고 Cl⁻와 Mg²⁺는 낮은 값을 보였다.

Table 12. Regional mass fractions of water soluble ions in dustfall relative to non sea salts composition in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	(C/C _{Na}) _{sea}	Regional mass fractions(f _{ions} (%))						
		Gamjeondong	Silla univ.	Mulgum	Wondong	Samrangjin	Mean	Busan ^a
Cl ⁻	1.798	32.3	-9.0	59.9	33.1	24.4	26.8	57.1
NO ₃ ⁻		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
SO ₄ ²⁻	0.251	94.0	91.3	97.2	96.8	96.5	94.9	90.6
NH ₄ ⁺		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Ca ²⁺	0.038	94.1	92.9	96.7	96.5	98.4	95.5	93.4
K ⁺	0.036	92.3	87.4	96.5	96.4	97.1	93.7	72.3
Mg ²⁺	0.121	8.4	-76.5	33.5	27.1	38.1	0.1	17.6
Na ⁺	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

a; Hwang (2003)

Table 13. Regional and seasonal contribution of sea salts of water soluble ion in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Area	Season				Annual mean
	Summer	Fall	Winter	Spring	
Gamjeondong	55.5	33.1	11.0	13.2	28.2
Silla univ.	36.6	14.5	19.4	60.9	34.5
Mulgum	18.3	14.1	13.7	9.2	13.8
Wondong	33.4	21.2	5.2	9.6	17.3
Samrangjin	29.7	24.7	6.7	10.3	17.2
Mean	34.7	21.8	11.2	20.6	22.1
Busan ^a	25.5	27.1	23.1	31.2	26.7
Jeju ^b	23.8	33.0	49.0	22.9	32.2

unit; %, a; Hwang (2003), b; Lee and Hu (1999)

비해염 성분의 질량분율

비해염 성분이 강하먼지 중 수용성 이온의 조성에 기여한 정도를 파악하기 위하여 식 (8)을 이용하였으며, 그 결과를 Table 12에 나타내었다. 인위적인 오염원에 기인한 낙동강 하류역에서 강하먼지 중 비해염 성분의 질량분율은 Ca²⁺, SO₄²⁻, K⁺, Cl⁻, Mg²⁺의 순으로 나타났다. 인위적 기원인 SO₄²⁻은 물금(97.2%)이 가장 높고, 신라대(91.3%) 지점이 가장 낮게 나타났다. 물금지역의 경우 최근 고속도로 공사로 인하여 차량의 통행이 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한 토사 및 도로먼지가 기원인 Ca²⁺는 삼랑진 지점에서 높게 나타났다. 그러나 해양기원인 Mg²⁺는 가장 내륙에 위치한 삼랑진에서 비해염 성분의 질량분율이 38.1%로서 가장 높게 나타났다. 바다에 인접한 하류역보다는 내륙에 위치한 청정지역일수록 비해염 성분의 질량분율이 높게 나타났다. 또한 황용식(2003)이 조사한 부산지역의 결과보다 Ca²⁺, SO₄²⁻, K⁺는 본 연구에서 더 높게 나타났다. Cl⁻와 Mg²⁺는 낮은 값을

보였으며, 이는 해염농축계수와 같은 결과를 나타내었다. 즉, 낙동강 하류역의 강하먼지 중 수용성 성분은 부산지역(황용식, 2003)보다 비해염성분의 인위적인 오염원에 의한 영향을 상대적으로 많이 받았다.

해염입자의 기여율

식 (9)를 이용하여 각 지역에서의 강하먼지에 대한 해염입자의 기여율을 추정하여 Table 13에 나타내었다. 계절에 따른 각 지역에서 해염입자의 기여도를 정량적으로 평가하기 위하여 Na⁺을 기준물질로 하여 계산하였다. 계절별 분포는 여름철(34.7%), 가을철(21.8%), 봄철(20.6%) 및 겨울철(11.2%)의 순으로 나타났다. 이는 해염입자의 기여율이 강수량과 상관관계 수 0.88로서 유의한 차이(p < 0.01)를 보여 강수량이 많은 여름철에 해염입자의 기여율이 높고, 강수량이 적은 겨울철에 해염입자의 기여율이 낮게 나타나는 경향을 보였다. 또한 지역별 분포에서는 신라대(34.5%), 감전동(28.3%), 원동(17.3%), 삼랑진(17.2%)

Table 14. Pearson correlation coefficient between water insoluble dustfall and trace metals in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

	Dustfall	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	V
Dustfall	1.000													
Al	0.797**	1.000												
Ca	0.542**	0.630**	1.000											
Cd	0.630**	0.501**	0.423**	1.000										
Cr	0.279*	0.250	0.570**	0.465**	1.000									
Cu	0.317*	0.316*	0.214	0.082	0.032	1.000								
Fe	0.812**	0.952**	0.584**	0.590**	0.297*	0.357**	1.000							
K	0.593**	0.282*	0.195	0.274*	0.008	0.010	0.290*	1.000						
Mg	0.822**	0.974**	0.621**	0.522**	0.223	0.384**	0.930**	0.345**	1.000					
Mn	0.880**	0.909**	0.645**	0.694**	0.408**	0.348**	0.940**	0.346**	0.931**	1.000				
Ni	0.628**	0.652**	0.502**	0.566**	0.374**	0.324*	0.752**	0.266*	0.613**	0.721**	1.000			
Pb	0.703**	0.662**	0.489**	0.672**	0.368**	0.488**	0.786**	0.268*	0.685**	0.797**	0.786**	1.000		
Si	0.755**	0.982**	0.606**	0.488**	0.262*	0.305*	0.934**	0.234	0.955**	0.874**	0.642**	0.646**	1.000	
V	0.863**	0.854**	0.499**	0.680**	0.267*	0.322*	0.916**	0.453**	0.870**	0.917**	0.729**	0.845**	0.828**	1.000
Zn	0.690**	0.515**	0.445**	0.536**	0.286*	0.426**	0.665**	0.401**	0.560**	0.716**	0.617**	0.783**	0.447**	0.732**

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Table 15. Pearson correlation coefficient between water soluble anions and cations in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NSS-SO ₄ ²⁻	NSS-Ca ²⁺
Cl ⁻	1.000									
NO ₃ ⁻	-0.003	1.000								
SO ₄ ²⁻	0.358**	0.564**	1.000							
NH ₄ ⁺	-0.038	0.429**	0.445**	1.000						
Ca ²⁺	0.203	-0.025	0.110	-0.007	1.000					
K ⁺	0.419**	-0.059	0.121	-0.100	0.239	1.000				
Mg ²⁺	0.290*	-0.013	0.225	0.154	0.393**	0.619**	1.000			
Na ⁺	0.486**	-0.228	0.077	-0.051	0.250	0.591**	0.750**	1.000		
NSS-SO ₄ ²⁻	0.285*	0.598**	0.989**	0.453**	0.073	0.032	0.112	-0.073	1.000	
NSS-Ca ²⁺	0.156	-0.002	0.104	-0.001	0.995*	0.181	0.322*	0.149	0.082	1.000

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, NSS; non sea salts

및 몰금(13.8%)의 순으로 나타났으며, 해염입자의 평균 기여율은 22.1%로서 부산지역(황용식, 2003)의 26.7%와 제주지역(이기호와 허철규, 1999)의 32.2% 보다는 다소 낮게 나타났다. 이는 낙동강 하류역의 지형적인 특성과 해염입자의 이동에 관여하는 대기물리적인 특성(풍향, 풍속 및 습도 등)에 기인하여 낙동강 하구에서 멀어질수록 해염입자의 기여율이 감소하는 것으로 판단된다.

상관 분석

강하먼지 중 불용성 금속 성분간의 Pearson's 상관성을 조사하여 Table 14에 나타내었다. 불용성 강하먼지와 0.7 이상($p < 0.01$)의 높은 상관성을 보인 금

속 성분은 Mn, V, Mg, Fe, Al, Si 및 Pb의 순으로 나타났으며, 토양기원인 Al은 Si > Mg > Fe > Mn > V의 순으로 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였다. 강하먼지 중 수용성 이온성분들 간의 Pearson's 상관성을 조사하여 Table 15에 나타내었다. 비 해염성 SO₄²⁻는 NO₃⁻ 및 NH₄⁺와 유의한 차이($p < 0.01$)가 있음을 보였으며, NH₄⁺의 경우 SO₄²⁻ 및 NO₃⁻와는 유의한 관련성($p < 0.01$)을 보였다. 또한 해염입자의 기여율에 관여하는 성분은 Na⁺, Mg²⁺, K⁺ 및 Cl⁻의 순으로서 유의한 차이($p < 0.05$ 이상)가 있는 것으로 나타났으며, NO₃⁻, SO₄²⁻ 및 NH₄⁺는 음의 상관을 보여 기원이 다른 것을 알 수 있었다.

Table 16. Factor loadings after varimax rotation of total dustfall in Nakdong river area from June 2002 to May 2003

Element	Factor					Communality
	1	2	3	4	5	
Mn	0.964					0.944
Fe	0.948					0.967
V	0.942					0.895
Pb	0.893					0.862
Al	0.878					0.947
Si	0.852					0.948
Ni	0.819					0.678
Zn	0.783					0.750
Cd	0.727					0.810
Na		0.835				0.807
K		0.793				0.700
Mg		0.774				0.818
Cl ⁻		0.619		0.450		0.601
Ca		0.374			0.359	0.400
NO ₃ ⁻			0.818			0.728
NH ₄ ⁺			0.765			0.742
SO ₄ ²⁻			0.749			0.788
Cr	0.422			-0.545	0.399	0.635
Cu	0.416				-0.703	0.725
Eigenvalue	7.511	2.959	2.220	1.169	1.104	
Cumulative	39.53	55.105	65.644	71.794	77.603	

Initial factor method; principal components analysis

Rotation method; Varimax

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) value; 0.771

Sphericity value of Bartlett test; 1093.033

Probability; 0.00001

요인 분석

낙동강 하류역의 강하먼지를 조성하는 요인들을 파악하기 위하여 불용성 금속 성분과 수용성 이온 성분 19개를 측정변수로 하여 이들의 상호 관계를 통하여 주성분 분석법과 Varimax 회전법을 이용하여 요인분석을 실시한 결과 Table 16과 같이 나타났다. 즉, 자료의 통계분석은 SPSS(windows version 10.0)를 이용하였다. 요인분석의 적합성 여부를 검토하기 위한 바틀렛 검정(Bartlett test)의 구형성 검정치(Sphericity value)는 1093.033으로서 0.00001의 유의 수준에서 공통요인이 존재하였으며, 전체 항목에 대한 표본 적합도를 나타내는 통계값인 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO) 값은 0.771로 조사되어 요인분석에 적합한 자료임을 통계적으로 확인하였다. 최소 요인 행렬을 추출하는 모형으로는 주성분 분석법을 선택하고, 고유치, 공통성 그리고 누적기여율을 고려하였으며, 요인을 결정한 후 해석을 용이하게 하기 위하여 Kaiser (1958)에 의해 제안된 직각회전 방법인 Varimax 방식

을 이용하여 인자부하량을 구하였다.

낙동강 하류역에서 강하먼지의 조성에 영향을 미치는 화학적 인자를 추출한 결과 5개의 인자에서 77.6%를 설명할 수 있었다. 39.5%를 설명하는 Factor 1은 토양기원(Fe, Al 및 Si), 토사 및 도로먼지 기원(Mn), 유류연소에 의한 기원인 Ni 그리고 Tire 마모 등에서 유래될 수 있는 Zn 및 금속제련 등의 산업활동 기원(V, Pb과 Cd)으로 조사되었다. Factor 2는 해양기원인 Na, K, Mg, Cl⁻ 및 Ca, 그리고 Factor 3은 유류연소에 의한 인위적 기원인 SO₄²⁻ 및 NO₃⁻와 퇴비, 축산폐수 및 농업활동에 의한 인위적 기원인 NH₄⁺로 조사되었다. Factor 4는 금속제련 및 산업활동 기원인 Cr으로 나타났으며, Factor 5는 유류연소에 의한 인위적 기원(Cu)으로 나타났다. 따라서 낙동강 하류역의 강하먼지는 인근 용도지역의 인위적인 산업 및 농업활동에 의한 기원과 해염입자와 같은 자연적인 기원이 공존하는 특성을 보였다.

결 론

낙동강 하류역에 5개 지점을 선정하여 2002년 6월부터 2003년 5월까지 1년간 강하먼지를 측정하여 화학적 조성 특성을 조사한 결과 토양기원(Al, Fe, Mn, Si)의 침적량은 물금 지점에서 가장 높았고, 원동에서 가장 낮았다. 그리고 산업활동에 의한 인위적 기원(Ni, Pb, V, Zn)의 침적량은 감전동이 가장 높았고, 원동이 가장 낮게 나타났다. 이는 낙동강 하류역의 강하먼지는 하류로 갈수록 도시화 공업화로 인하여 인위적 기원의 조성이 우세하였다.

지역별 지각농축계수는 토양기원인 Si는 1.0 이하의 분포를 보였으나, 인위적인 오염원인 Cd, Cu, Pb 그리고 Zn은 10 이상으로 높게 나타났다. 특히 Pb는 감전동, 원동, 신라대, 삼랑진 및 물금 지점 순으로 조사되었다. 비 토양성분의 질량분율은 Pb, Cd, Zn, Cu, Cr 그리고 Ni의 순으로 나타났으며, 인위적 기원인 Pb와 Zn은 감전동지점이 가장 높고 물금지역이 가장 낮게 나타났다. 따라서 낙동강 하류역에서 인위적인 오염원은 삼랑진 및 물금지역보다 사상공단이 위치한 감전동지점으로 갈수록 심화되는 경향을 보였다. 지역별 토양입자의 기여율 분포는 삼랑진(13.5), 물금(13.2), 감전동(9.8), 신라대(9.6) 그리고 원동(8.8) 순으로 나타났으며, 평균 기여율은 11.2%이었다.

계절별 $[SO_4^{2-}/NO_3^-]$ 당량비는 겨울철(5.12)에 가장 높았고, 가을철(3.30)에 가장 낮게 나타났다. 지역별로는 신라대(6.78), 감전동(4.98), 물금(3.85), 원동(3.04) 및 삼랑진(2.87) 순으로 나타나 도심에 인접한 지점의 경우가 높게 나타나는 것으로 나타났으며, 평균 당량비는 4.28이었다. 총 강하먼지에 대한 수용성 이온성분의 총 침적량의 비율은 봄철(71.6%), 여름(61.2%), 가을(49.2%) 및 겨울철(48.6%)의 순으로 나타났으며 평균은 57.6%이었다. 수용성 이온성분의 총침적량은 강수량이 낮을수록 감소하는 특성을 보였다.

Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 의 해염농축계수는 10 이상으로서 인위적인 영향이 있음을 보였으며, 계절별로는 겨울철, 가을철, 여름철 및 봄철의 순으로 나타났으며, 지역별로는 삼랑진, 물금, 원동, 감전동 및 신라대의 순으로 나타났다. 해염입자의 지역별 기여율 분포에서는 신라대(34.5%), 감전동(28.3%), 원동(17.3%), 삼랑진(17.2%) 및 물금(13.8%)의 순으로 나타났으며, 평균 기여율은 22.1%로 나타났다. 강수량이 많은 여름철에 해염입자의 기여율이 높고, 강수량이 적은 겨울철에

해염입자의 기여율이 낮게 나타나는 경향을 보였다.

낙동강 하류역에서 강하먼지의 화학적조성은 내륙으로 갈수록 해염입자와 인위적인 오염원의 영향이 감소하고 토양입자의 영향이 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 낙동강 하류역의 총침적량은 낙동강의 수면이 먼지의 재비산을 방해하는 요인으로 작용하여 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 2002년 신라대학교 낙동강연구원의 연구비에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

강병욱, 강공언, 김민영, 1992, 서울시 강하분진 중 수용성 성분의 강하량. 한국대기보전학회지, 8 (4), 240-246.
 김동술, 김희강, 김신도, 김태오, 1990, 수용모델을 이용한 강하분진의 농도분포에 관한 연구. 대한환경공학회지, 12 (1), 1-9.
 김성천, 1999, 서해 도시지역 군산의 강하분진 및 금속원소 침착량 연구. 한국대기환경학회지, 15 (3), 291-303.
 김성천, 2000, 군산지역의 강하분진 및 금속원소의 침착속도 추정. 한국대기환경학회지, 16 (5), 431-443.
 김유근, 박종길, 문덕환, 황용식, 2001, 부산지역 강하먼지와 불용성 성분의 침적량에 관한 연구. 한국환경과학회지, 10 (3), 209-216.
 김은경, 옥곤, 김영섭, 1996, 부산지역 대기 중 강하분진의 특성에 관한 연구. 한국환경과학회지, 5 (4), 463-471.
 김현섭, 허정숙, 김동술, 1998, 강하분진의 화학적 특성파악을 위한 통계적 해석. 한국대기보전학회지, 14 (6), 631-641.
 대기오염연구회, 2000, 환경분석을 위한 대기환경시험법. 동화기술, 514 p.
 신대윤, 조선희, 문옥란, 임철수, 강공언, 1996, 광주시 강하분진 중 수용성 이온성분의 강하량에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 22 (2), 124-129.
 윤훈주, 김동술, 1997, GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포 특성. 한국대기보전학회지, 13 (6), 463-474.
 이기호, 허철구, 1999, 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여: 2. 오염원 추정. 한국대기환경학회지, 15 (2), 101-111.
 이기호, 허철구, 송문호, 박용이, 1999, 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여: 1. 화학적 조성 및 침적량. 한국대기환경학회지, 15 (1), 12-22.
 전병일, 2003, 2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM10 중의 중금속 농도 특성. 환경영향평가, 12 (2), 99-108.
 정충영, 최이규, 1998, SPSSWIN을 이용한 통계분석, 제3

- 관. 무역경영사, 서울, 518 p.
- 최재천, 김 산, 이민영, 이신기, 1995, 제주도와 울릉도의 강하분진 중 수용성 성분에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 11 (4), 331-337.
- 황용식, 2003, 부산지역 강하분진의 화학적 조성과 대기환경적 특성. 부산대학교 박사학위논문, 250 p.
- 玉置元則, 1990, 地球規模大氣汚染に關聯する簡易測定法. 環境技術, 19 (4), 218-231.
- American Industrial Hygiene Association (AIHA), 1988, Quality assurance manual for industrial hygiene chemistry. 11-50.
- Garcia-Rodeja, E., Fernandez-Sanjurjo, M.J., and Fernandez-Vega, V., 1998, Input-output ion fluxes in the river Sor catchment (Galicia, NW Spain). Chemosphere, 36 (4-5), 1107-1112.
- IPCC, 1995, "Climate Change", The IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP, 572pp.
- Kaiser, H.F., 1958, The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psychometrika 23, 187-200.
- Kaya, G. and Tuncel, G., 1997, Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey. Atmospheric Environment. 31 (23), 3985-3998.
- Lodge, J.P., 1989, Methods of Air Sampling and Analysis. 3rd ed., Lewis Publishers, New York, 440-445.
- Mason, B., 1966, Principle of Geochemistry. 3rd ed., Wiley, New York, 21-24.
- Probst, A., Probst, J.L., Massabuau, J.C., and Fritz, B., 1995b, Surface water acidification in the Vosges Mountains: Relation to bedrock and vegetation cover. In: Landmann, G. and Bonneau, M., (eds.), Forest decline and air pollution effects in the Frecch mountains, New York, NY: Springer Verlag.
- Sinha, S. and Banerjee, S.P., 1997, Characterization of haul road dust in indian opencast iron ore mine. Atmospheric Environment, 31 (7), 2809-2814.
- Wu, Z.Y., Han, M., Lin, Z.C., and Ondov, J.M., 1994, CBAD Study, Year 1: Sources and Dry deposition of selected elements in Aerosol particles. Atmospheric Environment, 28 (8), 1471-1486.

2004년 7월 9일 원고 접수
 2004년 7월 15일 수정원고 접수
 2004년 7월 15일 원고 채택