

대구지역 도로먼지에 함유된 미량원소성분과 오염원 평가

송희봉[†] · 이은영 · 도화석 · 정철수 · 신동찬 · 이명숙 · 백윤경 · 전성숙 · 신원식*

대구광역시보건환경연구원 · *경북대학교 환경공학과

(2007년 1월 11일 접수, 2007년 6월 25일 채택)

Trace Elements and Source Assessment of Street Dust in Daegu, Korea

Hee-Bong Song[†] · Eun-Young Lee · Hwa-Seok Do · Cheol-Su Jung · Dong-Chan Shin

Myoung-Sook Lee · Yoon-Kyoung Paek · Seong-Suk Jeon · Won-Sik Shin*

Public Health and Environment Institute of Daegu Metropolitan City

*Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT : A total of 48 samples of street dust were collected in Daegu area during April and May 2006, were sieved below 100 μm , and analysed by ICP for the analysis of 14 elements after an acid extraction. Results obtained from the source assessment of trace elements using enrichment factor showed that Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na and V were influenced by natural sources such as soil and dust, while Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were influenced by urban anthropogenic sources such as fuel combustion and waste incineration. The measured values were remarkably higher in components from natural sources than in components from urban anthropogenic sources. The concentrations of trace elements in Daegu area were generally higher than in other foreign cities. Samples originated from industrial and commercial areas had higher concentrations of trace elements and pollution indices of heavy metals than those from residential and green areas. The correlation analysis among trace elements indicated that the correlations among components from urban anthropogenic sources were much significant, while those among components from natural sources were less correlated. In addition, there were significant correlations between traffic density and components from urban anthropogenic sources.

Key Words : Street Dust, Trace Elements, Pollution Indices, Enrichment Factor, Traffic Density

요약 : 2006년 4월과 5월에 대구지역의 도로먼지로 채취한 총 48개의 시료를 100 μm 이하로 체거름하고 산추출한 후 ICP로 14개 원소를 분석하였다. 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원 평가결과, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V의 성분은 토양과 먼지와 같은 자연적 발생원에 의한 영향을 받고 있는 반면에 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 성분은 연료연소와 폐기물소각과 같은 인위적 발생원에 의한 영향을 받고 있었다. 분석결과는 자연적 발생원과 관련된 성분이 인위적 발생원과 관련된 성분보다 매우 높은 농도를 보였다. 도로먼지에 함유된 미량원소성분은 대구지역이 외국의 다른 도시보다 대체로 더 높은 수준을 보였다. 미량원소성분의 농도와 중금속의 오염지수는 공업지역과 상업지역이 주거지역과 녹지지역보다 높았다. 그리고 미량원소성분간의 상관성 분석결과, 인위적 발생원과 관련된 성분간에는 유의한 상관성이 많았던 반면에 자연적 발생원과 관련된 성분간에는 유의한 상관성이 적었다. 게다가 교통량과 인위적 발생원과 관련된 성분간에도 유의한 상관성을 보였다.

주제어 : 도로먼지, 미량원소성분, 오염지수, 농축계수, 교통량

1. 서론

도시 실외환경에 축적된 고형입자(solid particles)인 도로먼지(street dust)는 도시지역의 각종 먼지 중에서도 인체에 유해한 중금속성분을 많이 축적하고 있는 것으로 알려져 있는데다 지속적인 교통량 증가에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다.¹⁾ 이러한 도로먼지는 달리는 자동차나 바람에 의해 가장 많이 날리고 있으며 또한 체내로 흡입이 쉬울(특히, 먼지입경 100 μm 이하) 뿐만 아니라 독성물질(예를 들면 Cd, Cr⁶⁺, Ni 등의 발암물질)의 섭취로 인해 특히 어

린이나 노약자에게 더욱 심각한 피해를 입힐 수도 있다.²⁾ 도로먼지연구의 선행연구를 보면 도로먼지의 축적과 조성은 도로조건, 기상인자, 차량밀도, 산업시설의 존재여부 등과 같은 복합적인 요인에 의해 영향을 받는다고 보고되고 있다.³⁾ 따라서 이러한 요인의 자료를 동시에 고려한 해석이 무엇보다도 중요하다고 본다. 본 연구의 대상지역인 대구광역시 북쪽에 팔공산, 남쪽에 대덕산과 비슬산으로 둘러싸여 있고, 동서부의 완만한 구릉지에 형성된 분지형태의 도시이다. 지형적으로는 대기의 확산이 어려워 대기질 관리가 국내 타도시에 비해 상대적으로 매우 불리한 조건을 갖추고 있다. 또한 염색공단, 3공단, 서대구공단, 성서공단 등이 북서부에 위치하고 있어 동절기에는 북서계절풍의 영향으로 이들 공단에서 발생된 대기오염물질들이 도심으로 이동하여 대기오염도

[†] Corresponding author
E-mail: 10000gj@hanmail.net
Tel: 053-760-1290

Fax: 053-760-1333

를 심화시키는 요인이 되고 있다.⁴⁾ 미량원소성분에 관한 국내 먼지연구는 주로 대기 중에 존재하는 부유먼지와 미세먼지를 대상으로⁵⁻⁷⁾ 이루어졌을 뿐 도로먼지에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러나 외국의 경우는 그 동안 여러 도시지역에서 도로먼지를 대상으로 활발하게 연구가⁸⁻¹⁴⁾ 진행되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 대구광역시의 지역용도별로 2006년 4월과 5월의 건조한 날에 도로먼지를 채취하여 분석한 미량원소성분의 원자료(raw data)를 바탕으로 그 특성을 평가하고자 한다. 즉, 연구의 주된 목적은 (1) 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 농도분포 특성을 밝힘과 동시에 국외 도시지역과의 오염수준을 비교하고, (2) 오염지수를 이용한 유해 중금속성분의 오염도를 평가하고, (3) 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 규명하고, (4) 최종적으로 미량원소성분간의 상관성 분석 및 교통량이 미량원소성분에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 이와 같은 연구는 국내 도로먼지 분석 연구 중 대구지역에서 처음으로 시도한 연구논문으로 향후 국내의 도로먼지 연구자들에게 충분히 참고자료로 활용될 가치가 높을 것으로 기대된다. 아울러 산업공정에서 배출되는 먼지저감, 비산먼지공공장 관리, 도로먼지저감, 불법소각 및 소각시설 관리 등 환경행정기관의 지역대기질 환경개선 대책 수립¹⁵⁾에 중요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험방법

2.1. 채취지점 및 기간

채취지점은 대구광역시의 교통량이 많은 교차로(주로, 왕복 6~8차선)와 시경계 주요도로(주로, 왕복 2~4차선)를 대상으로 도로먼지의 발생원적 특성을 달리할 것으로 예상되는 4개 지역으로 구분하였다. 공업지역은 북서부의 대규모 공단이 밀집한 지역에 위치한 성서공단네거리와 서대구공단네거리, 비산염색공단네거리, 3공단 네거리 등의 12곳, 상업지역은 시내중심가의 교통과 상가건물 등이 밀집한 지역에 위치한 중앙네거리와 대구역네거리, 반월당네거리, 태평네거리 등

의 12곳이었다. 그리고 주거지역은 주택과 아파트 등이 밀집한 지역에 위치한 범어네거리와 효목네거리, 복현오거리, 만촌네거리 등의 12곳, 녹지지역은 시외곽경계의 농경지역에 위치한 성주대교앞(성주방면)과 고령교앞(고령방면), 숙천교앞(영천방면), 팔조령앞(청도방면) 등의 12곳으로 하였다(Fig. 1).

이들 총 48곳의 도로먼지 시료는 봄철인 2006년 4월 6일부터 5월 4일까지 1개월간 교통량의 변화가 휴일에 비해 적을 것으로 예상되는 평일(총 6일간 : 4월 6일/4곳, 4월 17일/3곳, 4월 18일/14곳, 4월 26일/2곳, 4월 27일/12곳, 5월 4일/13곳)을 택일해 채취하였다. 또한 시료채취당일의 모든 날씨는 비교적 맑고 건조한 상태(평균 : 기온 15.0℃, 습도 47.7%, 풍향 서북서~서풍, 풍속 2.3 m/sec, 강수량 0.0 mm)에서 이루어졌다.¹⁶⁾

2.2. 시료채취 및 분석

도로면에 축적된 먼지시료는 현장에서 쓰레받기와 브러시를 이용하여 채취하였다. 교차로인 경우는 전방향의, 그리고 교차로가 아닌 시경계도로는 양방향의 모든 가장자리로부터 1 m 간격으로 채취한 5개의 부분시료를 하나의 완전시료로 만들었다(Fig. 2). 이러한 완전시료를 폴리에틸렌 백에 담아 밀봉한 후 실험실로 운반하였다.

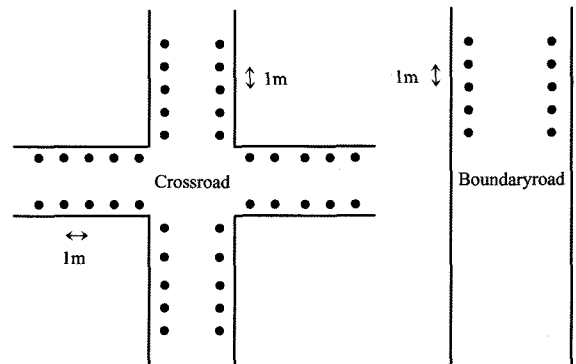


Fig. 2. Schematic diagram of sampling points in crossroad and boundaryroad.

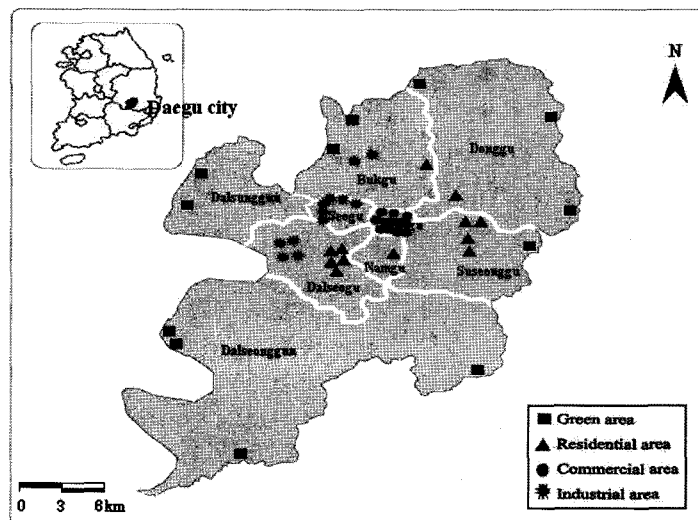


Fig. 1. Location of sampling sites in Daegu city.

이들 시료를 실온에서 1주일동안 건조시킨 후 표준망체 (Standard Testing Sieve, Aperture 100 μm, 한국청계상공사) 를 이용하여 100 μm 이하로 분리해 분석용시료로 하였다. 시료분석은 테프론비이커에 전자식저울(Electronic Balance : Ohaus, Galaxy 200D, Germany)로 정확히 취한 분석용시료 1.0 g과 2 : 2 : 2 HCl-HNO₃-H₂O의 혼합용액(HCl과 HNO₃은 증급속분석용, H₂O은 크로마토그래피용) 6 mL를 넣고 초음파추출기(Ultrasonic Extractor : Elma, Transsonic 890/H, Germany)로 95℃에서 2시간 동안 추출한 용액을 메스플라스크에 멤브레인필터로 여과한 후 탈이온수인 증류수를 넣어 최종액량이 정확히 25 mL가 되도록 하였다.¹⁷⁾ 이러한 전처리 과정을 거친 시료를 유도결합플라즈마방출분광광도계(ICP : Perkin Elmer, Optima 4300DV, USA)로 총 14개 원소(Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, V, Zn)에 대해 분석하였다.

2.3. 자료처리 및 통계분석

총 48개의 시료에 대해 ICP로 분석한 총 14개 원소의 농도자료는 각 원소별로 모두 검출한계 이상으로 나타났다. 시료 분석방법인 염산-질산추출법에 의한 미량원소성분의 농도자료에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 미국 국립표준시험연구소(NIST)의 표준참조물질인 SRM(urban particulate matter standard) 1648을 이용하여 실제시료와 동일한 방법으로 회수율 실험을 실시하였다. 그 결과, 유해성이 높은 Cu, Pb, Zn 등의 원소들은 회수율이 88~95%(상대표준편차 0.1~0.6%) 수준으로 높았던 반면에 상대적으로 유해성이 낮은 Al, Fe, K 등의 원소들은 회수율이 26~79%(상대표준편차 0.4~1.7%) 수준으로 낮았다. 이와 같은 회수율은 백성욱 등¹⁸⁾이 연구한 대구지역 공중시설의 실내공기 중 입자상물질의 농도 평가에서 회수율 평가결과와 유사한 결과를 보였다. 그러나 본 논문에서는 미량원소성분의 농도계산에 있어서 이러한 회수율을 특별히 보정하지 않고 통계·처리하였다. 왜냐하면 표준참조물질(SRM)은 도시대기의 부유먼지이지만 본 연구의 실제시료는 도로바닥에 축적된 먼지로서 그 성상이 서로 상이하다고 보았기 때문이다. 한편 자료해석에서 교통량분석은 2006년도 발간된 대구광역시 교통량조사 자료집¹⁹⁾을 인용하였고, 본 연구와 동일장소에서 측정된 자료를 활용하였다. 여기에서 교통량인 차량통행대수는 승용차와 중·소·대형의 화물차와 버스를 모두 포함한 것으로, 교차로는 6시간 동안 전방향 교통량의 합계, 그리고 시경계도로는 16시간 동안 양방향 교통량의 합계로 표현하고 있다. 분석자료의 통계분석은 MS Excel²⁰⁾과 SPSS/Windows²¹⁾ 프로그램을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가

도로먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가는 Rahn²²⁾에 의해 제안된 농축계수를 이용하였다. 지각물질의 원소조

Table 1. Enrichment factors of trace elements in street dust

Element	Green area(n=12)	Residential area(n=12)	Commercial area(n=12)	Industrial area(n=12)	Total mean (n=48)
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ca	8.2	7.9	9.4	7.0	8.1
Cd	333.7	535.9	870.8	932.3	671.5
Cr	8.6	18.6	49.1	62.8	35.1
Cu	28.0	78.9	167.9	130.1	101.2
Fe	7.8	7.8	11.0	12.0	9.7
K	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
Mg	3.3	4.3	4.8	4.0	4.1
Mn	6.5	6.2	7.4	8.1	7.1
Na	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ni	6.9	13.5	41.0	63.5	31.6
Pb	27.8	48.2	73.3	84.0	58.7
V	4.3	4.1	4.7	4.7	4.4
Zn	29.1	63.4	93.9	124.8	78.7

성과 도로먼지의 원소조성을 비교해 발생원이 자연적 혹은 인위적 영향인지를 판단하기 위해 지각물질 중 비교적 균일하고 다량으로 함유되어 있는 Al을 기준원소로 선정하였다.

지각물질의 원소조성은 Taylor와 McLennan²³⁾이 제시한 지각성분표를 이용하였으며, 농축계수(E.F, Enrichment Factor)를 아래와 같은 식으로부터 산출한 결과는 Table 1과 같다.

$$\text{농축계수(E.F)} = \frac{\text{측정된 원소성분의 농도/측정된 Al의 농도}}{\text{지각원소성분의 농도/지각 Al의 농도}}$$

위 식으로부터 산출된 농축계수가 10 이하인 값을 나타내면 일반적으로 지각물질의 조성의 변화와 연관을 지을 수 있고, 그리고 10 이상인 값을 나타내면 인위적인 활동으로 인한 배출원의 영향으로 간주하였다.²⁴⁾

산출된 대구지역 전체평균으로 보면 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V성분은 농축계수가 10 이하인 값을 보였으며, 암석의 풍화, 토양의 재비산 등과 관련된 자연적인 발생원의 영향을 받는 것으로 추정되었다. 그리고 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn성분은 농축계수가 10 이상인 값을 보이므로 연료유의 연소, 폐기물의 소각 등과 관련된 인위적인 발생원의 영향을 받는 것으로 추정되었다.

이는 Al을 기준원소로 본 연구와 동일한 지각성분표를 이용하여 최진수 등⁵⁾과 최성우 등⁶⁾이 연구한 대구지역 부유먼지에 함유된 원소성분의 발생원 평가에서도 동일한 경향을 보였다.

그 결과는 본 연구와 같이 농축계수가 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V의 경우에는 10 이하로, 그리고 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 경우에는 10 이상으로 산출되었다. 그러나 석유류의 연소 연소와 관련이 높은 V의 경우에는 인위적인 발생원과 관련이 있을 것으로 보았던 예상과는 달리 농축계수가 5 이하인 값을 보여 자연적인 발생원과 관련이 있는 물질로 추정되었

다. 이러한 결과는 대구지역만의 경향인지는 앞으로 그 원인 규명을 위한 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

3.2. 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 농도분포

3.2.1. 미량원소성분의 분석결과 요약

대구지역 전체시료 48개에 대한 미량원소성분의 분석결과는 Table 2에 요약하였다. 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 전체평균농도는 분석된 총 14개 원소 중 자연적인 발생원과 관련된 성분으로 추정되는 Al, Ca, Fe, K, Mg의 5개 원소가 수 mg/g 혹은 수십 mg/g 수준의 높은 농도를 보였다. 그러나 인위적인 발생원과 관련된 성분으로 추정되는 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등과 같은 유해성이 높은 중금속성분은 수 µg/g에서 수백 µg/g 수준의 낮은 농도를 보였다.

또한 표준편차(S.D)를 평균농도(Mean)로 나눈 값인 변동계수(C.V)는 고농도로 나타난 Al, Ca, Fe, K, Mg의 경우 0.5 이하로 낮은 값을 보인 반면에 저농도로 나타난 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등은 0.5 이상으로 높은 값을 보였다. 이러

한 결과는 자연적인 발생원관련 성분들의 경우엔 전체지점에서 특징적인 배출원의 영향이 다소 미흡하여 지점별로 뚜렷한 농도차이가 없었다.

반면에 인위적인 발생원관련 성분들은 특정지점으로부터 배출되는 오염물질 때문에 이들의 농도차이에 큰 영향을 준 것으로 사료된다.

3.2.2. 외국 도시와의 미량원소성분 농도비교

미량원소성분의 농도결정은 시료처리방법, 분석용시료의 입자크기, 시료추출과정 그리고 시료채취지점별 배출원의 특성과 강도 등 복잡한 요인에 의해 그 결과가 서로 다르게 나타날 수도 있다. 따라서 이러한 요인 때문에 Table 3의 다른 연구결과⁸⁻¹⁴⁾와 비록 직접적인 비교가 어렵지만 간접적으로 비교해 볼 가치가 있다. 대구지역의 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 수준은 인도 델리를 제외하고는 대체로 외국의 다른 도시지역보다 높게 나타났다.

그러나 자동차연료와 관련된 오염원인 Pb의 경우는 대구지역이 외국의 여러 도시지역에 비해 매우 낮은 수준을 나타내어 주목할 만하다. 이러한 원인은 해당 도시지역에 따라 유연휘발유(lead gasoline, 옥탄가를 높이고 노킹을 방지하기 위해 4-에틸납을 첨가)의 사용량, 고체폐기물의 소각량 등과 같은 Pb의 배출원 조사를 충분히 검토한 후에 보다 명확한 해석이 가능할 것으로 사료된다. 특히, 우리나라의 경우 유연휘발유의 사용량은 1988년을 정점으로 감소추세를 나타내기 시작한 반면에 무연휘발유(unleaded gasoline)의 소비량은 급격한 증가추세에 있다.²⁵⁾ 이러한 사실은 정부가 자동차연료를 유연휘발유에서 무연휘발유로 대체한 대기환경정책의 결과로 인해 Pb의 농도가 크게 감소한 것으로 생각된다.

3.2.3. 지역별 미량원소성분의 농도비교

지역별로 분석된 미량원소성분의 농도분포는 Table 4와 같다. 측정지역별로 조사된 미량원소성분의 평균농도는 지각물질의 원소조성 중 비교적 다량으로 함유되어 있는 물질(Al, Ca, K, Na 등) 일부를 제외하고는 전반적으로 공업지역 > 상업지역 > 주거지역 > 녹지지역 순을 보였다. 이러한 결과는 시료채취지점과 비교적 가까운 곳에 위치한 대기오염자

Table 2. Summary of analytical results(µg/g) (n = 48)

Element	Mean	Median	S.D ¹⁾	C.V ²⁾	Min.	Max.
Al	10435	10460	1629	0.16	4526	13420
Ca	31518	31270	8254	0.26	14070	71960
Cd	9	8	4	0.51	1	23
Cr	159	94	259	1.62	17	1620
Cu	329	282	237	0.72	17	955
Fe	43922	40075	19461	0.44	22590	118200
K	1759	1746	272	0.15	1226	2411
Mg	7070	7048	1516	0.21	1805	9371
Mn	550	544	138	0.25	139	1083
Na	364	346	69	0.19	247	524
Ni	82	42	140	1.71	1	829
Pb	152	153	99	0.65	17	696
V	34	33	8	0.22	12	69
Zn	725	696	468	0.65	47	2573

¹⁾ Standard Deviation, ²⁾ Coefficient of Variation(= Standard Deviation/Mean)

Table 3. Mean concentration of trace elements(µg/g) in street dust in other cities

City	Cd	Cr	Cu	Fe	Pb	Zn	Particle size(µm)	Digestion
Daegu	9	159	329	43922	152	725	< 100	HCl + HNO ₃
Delhi ⁸⁾	18.94	4816.94	512.28		597.63	365.92	< 500	HClO ₄ + HNO ₃ + HF
Kuala Lumpur ⁹⁾	2.96		35.5	1790	2466	344	< 63	∑ sequential
London ¹⁰⁾	3.5		155	26000	1030	680	< 500	HCl + HNO ₃
Luanda ¹¹⁾	1.15	25.65	41.78	11572	351.3	316.6	< 100	HCl + HNO ₃
Madrid ¹²⁾		61	188	19300	1927	476	< 100	HClO ₄ + HNO ₃ + HF
Manchester ¹³⁾			113	8767	265	653	< 1000	HNO ₃
Oslo ¹²⁾	1.4		123	51452	180	412	< 100	HClO ₄ + HNO ₃ + HF
Ottawa ¹⁴⁾	0.6	59	188	25660	68	184	100-250	HClO ₄ + HF

Table 4. Regional mean concentration of trace elements($\mu\text{g/g}$) in street dust

Element	Green area (n=12)	Residential area (n=12)	Commercial area (n=12)	Industrial area (n=12)
Al	9834 ± 2212	11099 ± 1343	9735 ± 946	11073 ± 1374
Ca	29929 ± 15384	32868 ± 3967	34258 ± 3508	29015 ± 575
Cd	4 ± 3	7 ± 2	10 ± 3	13 ± 5
Cr	37 ± 19	90 ± 15	208 ± 210	303 ± 450
Cu	86 ± 50	272 ± 68	508 ± 192	448 ± 266
Fe	33448 ± 17969	37881 ± 4464	46772 ± 12151	57586 ± 27490
K	1802 ± 378	1814 ± 238	1720 ± 209	1700 ± 251
Mg	5300 ± 1590	7971 ± 1069	7751 ± 725	7260 ± 881
Mn	477 ± 141	516 ± 60	538 ± 80	670 ± 171
Na	363 ± 73	397 ± 70	345 ± 44	350 ± 78
Ni	17 ± 9	37 ± 8	99 ± 95	175 ± 242
Pb	68 ± 27	133 ± 28	177 ± 33	231 ± 153
V	31 ± 8	34 ± 4	34 ± 2	39 ± 11
Zn	252 ± 117	621 ± 176	808 ± 128	1221 ± 588

동측정소의 미세먼지(PM_{10}) 측정결과(평균 : 2006년 1~5월)와도 동일한 경향을 보였다. 즉, 미세먼지(PM_{10})는 공업지역($73.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 상업지역($63.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 주거지역($61.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 녹지지역($59.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었다.²⁶⁾ 이러한 원인은 산업시설밀집지역(비산염색공단, 3공단, 서대구공단, 성서공단 등)인 공업지역의 경우 각종 환경오염물질 배출사업장으로부터 배출되는 다량의 입자상물질에 의한 직접적인 영향을 받았다고 보아진다. 그리고 교통밀집지역인 상업지역은 차량밀도가 높은데서 비롯된 극심한 차량정체로부터 배출되는 다량의 입자상물질에 의한 직접적인 영향을 받았기 때문에 사료된다. 특히, 도심 속에 위치한 상업지역의 경우는 대구 북서부의 대규모 공단지역과 직선거리로 2 km 정도 떨어져 있어 대구지역의 주풍향인 북서풍의 영향으로,^{16,27)} 이들 공단지역으로부터 유입되어 축적된 오염물질도 배제할 수 없다고 사료된다.²⁸⁾

그리고 인위적인 발생원과 관련될 것으로 추정되는 성분(Cr, Ni, Pb, Zn 등)은 자연적인 발생원과 관련될 것으로 추정되는 성분(Al, Ca, K, Na 등)보다 지역별 농도차이가 큰 것으로 나타났다. 즉, 녹지지역에 비해 주거지역, 상업지역, 공업지역의 농도비는 자연적인 발생원에서 기인한 원소의 경우 대부분 2배 이하(예를 들면 Al, Ca, Na는 1.0~1.1배, K는 0.9~1.0배)로 지역별 큰 차이가 없었다. 그러나 인위적인 발생원에서 기인한 원소는 모두 2배 이상(예를 들면 Cr은 2.4~8.2배, Ni는 2.2~10.3배)으로 지역별 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 Table 2에서 설명된 인위적인 발생원 관련 성분이 자연적인 발생원 관련 성분보다 변동계수(C.V) 값이 높다는 사실에서도 어느 정도 확인할 수 있다.

3.3. 도로먼지에 함유된 중금속성분의 오염도 평가

도로먼지에 함유된 유해 중금속성분의 오염정도를 평가하

기 위해 우리나라 환경부²⁹⁾가 제시한 토양오염우려기준을 적용하였다. 이때 중금속의 토양오염우려기준은 각각 Cd 12 $\mu\text{g/g}$, Cu 200 $\mu\text{g/g}$, Ni 160 $\mu\text{g/g}$, Pb 400 $\mu\text{g/g}$ 그리고 Zn 800 $\mu\text{g/g}$ 이었다. 도로먼지에 대한 중금속의 오염지수(P.I, Pollution Index)는 아래와 같은 식으로부터 계산하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

오염지수(P.I) =

$$\frac{\text{Cd합량}(\mu\text{g/g})}{12(\mu\text{g/g})} + \frac{\text{Cu합량}(\mu\text{g/g})}{200(\mu\text{g/g})} + \frac{\text{Ni합량}(\mu\text{g/g})}{160(\mu\text{g/g})} + \frac{\text{Pb합량}(\mu\text{g/g})}{400(\mu\text{g/g})} + \frac{\text{Zn합량}(\mu\text{g/g})}{800(\mu\text{g/g})}$$

위 식으로부터 계산된 오염지수가 1.0 이하인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염되지 않은 지역으로, 그리고 1.0 이상인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염된 지역으로 간주하였다.

지역별로 선정된 도로의 오염지수가 1.0을 초과한 경우는 상업지역의 12곳 중 절반에 해당하는 6곳과 공업지역의 12곳 중 5곳으로 각각 50%와 42%를 차지하였으나 녹지지역과 주거지역은 총 24곳 중 1곳도 초과하는 지점이 없었다. 지역별로 계산된 평균오염지수로 보면 공업지역(1.30 ± 0.68)과 상업지역(1.09 ± 0.35)이 주거지역(0.66 ± 0.12)과 녹지지역(0.27 ± 0.12)에 비해 상대적으로 높은 값을 보여 중금속으로부터 오염된 지역으로 추정할 수 있었다. 이러한 원인은 공업지역의 경우 대규모 공단지역의 환경오염물질 배출사업장에서 발생하는 입자상물질(예를 들면 Ni·Zn은 B-C유·석탄 등의 산업용 연료연소, Cd·Cu·Pb는 산업폐기물의 소각)의 배출량이 많았기 때문으로 여겨진다. 또한 상업지역의 경우에는 도심지역에서의 극심한 차량정체와 교차로의 신호 대기차량 등 자동차로부터 발생하는 다량의 입자상물질(예를 들면 Ni·Zn·Pb는 휘발유·경유 등의 차량용 연료연소, Cd·Cu는 차량용 부속소모품의 마모) 등의 직접적인 영향을 받았다고 사료된다. 이러한 사실은 Table 4에서 설명된 공업지역과 상업지역이 주거지역과 녹지지역보다 중금속성분(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn)의 농도가 높다는 결과와도 같은 맥락에서 설명된다. 한편 전체지점으로 보면 총 48곳 중 77%에 해당하는 37곳이 오염지수 1.0을 초과하지 않았고 전체평균오염지수가 0.83 ± 0.55 인 값을 보여 대구지역의 주요 교차로와 시경계 도로에 축적된 도로먼지는 인위적인 중금속오염으로부터 우려할만한 수준은 아니었다.

Table 5. Pollution index of heavy metals(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in street dust

Area	P.I > 1.0		P.I < 1.0		P.I ¹⁾ Mean±S.D ²⁾
	Number	%	Number	%	
Green(n=12)	0	0	12	100	0.27±0.12
Residential(n=12)	0	0	12	100	0.66±0.12
Commercial(n=12)	6	50	6	50	1.09±0.35
Industrial(n=12)	5	42	7	58	1.30±0.68
Total(n=48)	11	23	37	77	0.83±0.55

¹⁾ Pollution Index, ²⁾ Standard Deviation

Table 6. Correlation coefficient among trace elements in street dust(n=48)

	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Al	(1.0)													
Ca	-0.26	(1.0)												
Cd	0.25	0.11	(1.0)											
Cr	0.11	-0.05	0.22	(1.0)										
Cu	-0.09	0.01	0.45	0.70	(1.0)									
Fe	-0.22	0.28	0.25	0.75	0.73	(1.0)								
K	0.60	0.03	0.13	-0.27	-0.34	-0.49	(1.0)							
Mg	0.55	0.01	0.46	-0.03	0.21	-0.13	0.17	(1.0)						
Mn	0.35	-0.34	0.29	0.67	0.66	0.61	-0.18	0.27	(1.0)					
Na	0.23	0.28	0.05	-0.21	-0.23	-0.23	0.49	0.13	-0.18	(1.0)				
Ni	0.09	-0.08	0.26	0.99	0.73	0.80	-0.29	-0.06	0.72	-0.21	(1.0)			
Pb	-0.08	0.01	0.37	0.48	0.76	0.78	-0.31	0.16	0.74	-0.14	0.57	(1.0)		
V	0.43	-0.31	0.43	0.42	0.44	0.37	-0.03	0.29	0.68	0.02	0.49	0.47	(1.0)	
Zn	0.23	-0.10	0.75	0.61	0.66	0.58	-0.10	0.28	0.61	-0.08	0.65	0.60	0.62	(1.0)

Correlation coefficients exceeding 0.28 are significant at a level of 0.05.

3.4. 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 상관성 분석

3.4.1. 미량원소성분간의 상관관계

도로먼지에 함유된 미량원소성분들과의 상관성을 분석한 결과는 Table 6과 같다. 전반적으로 자연적인 발생원 관련 성분(Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na)간보다는 인위적인 발생원 관련 성분(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn)간에 더 양호한 상관성을 보였다.

지각물질로서 함량이 비교적 높은 토양관련 성분은 Al과 K간에 0.60, Al과 Mg간에 0.55, Fe과 Mn간에 0.61, Na과 K간에 0.49 등으로 유의한 상관성(P<0.05)을 보여 이들이 같은 무리를 이루는 즉, 토양의 재비산 등에서 유래된다는 사실을 보여준다. 인위적인 발생원 관련 성분은 Cu와 Cd, Cr

간에 0.45와 0.70, Ni과 Cr, Cu간에 0.99와 0.73, Pb과 Cd, Cr, Cu, Ni간에 0.37, 0.48, 0.76, 0.57, V과 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V간에 0.75, 0.61, 0.66, 0.65, 0.60, 0.62로 유의한 상관성(P<0.05)을 보였다. 따라서 이들 물질들은 동일한 발생원(예를 들면 Cd·Cu·Cr·Pb·Zn은 폐기물의 소각, Ni·V은 연료유의 연소)과 연계되어 있다는 사실을 뒷받침해 주고 있다. 이러한 사실은 Table 1의 도로먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가에서 2개 그룹(자연적인 발생원과 인위적인 발생원)으로 분류된 결과에서도 동일한 부류에 속해 있음을 어느 정도 확인할 수 있다. 이외에도 자연적인 발생원과 인위적인 발생원 관련 성분간에는 Fe과 Cr, Cu, Ni, Pb

Table 7. Correlation coefficient among trace elements in street dust(n=12)

● Industrial area \ Commercial area

	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Al	(1.0)	0.35	0.75	-0.42	-0.56	-0.55	0.96	0.76	-0.42	0.61	-0.43	-0.37	0.33	0.13
Ca	-0.23	(1.0)	0.49	-0.03	-0.13	-0.09	0.44	0.44	0.12	0.70	-0.04	-0.16	0.11	0.08
Cd	0.16	-0.01	(1.0)	-0.34	-0.31	-0.35	0.68	0.65	-0.20	0.52	-0.33	-0.17	-0.02	0.22
Cr	0.30	-0.26	-0.10	(1.0)	0.88	0.89	-0.29	-0.65	0.89	-0.32	1.00	0.82	-0.20	0.57
Cu	-0.25	-0.22	-0.05	0.68	(1.0)	0.94	-0.52	-0.72	0.88	-0.61	0.88	0.92	-0.28	0.52
Fe	-0.18	-0.38	-0.20	0.79	0.90	(1.0)	-0.49	-0.66	0.94	-0.47	0.92	0.87	-0.11	0.55
K	0.70	-0.11	0.22	-0.40	-0.61	-0.66	(1.0)	0.67	-0.35	0.69	-0.30	-0.33	0.33	0.21
Mg	0.46	0.10	0.17	-0.54	-0.74	-0.72	0.70	(1.0)	-0.53	0.66	-0.64	-0.60	0.31	-0.27
Mn	-0.12	-0.47	-0.30	0.73	0.85	0.97	-0.54	-0.60	(1.0)	-0.31	0.90	0.84	-0.10	0.64
Na	-0.28	0.20	-0.10	-0.23	-0.26	-0.26	0.02	-0.33	-0.35	(1.0)	-0.32	-0.63	0.29	-0.16
Ni	0.20	-0.30	-0.08	0.99	0.76	0.87	-0.48	-0.62	0.81	-0.23	(1.0)	0.83	-0.20	0.59
Pb	-0.35	-0.35	-0.33	0.29	0.73	0.81	-0.64	-0.56	0.85	-0.23	0.42	(1.0)	-0.31	0.74
V	-0.08	-0.27	0.47	0.47	0.67	0.66	-0.28	-0.55	0.57	-0.06	0.57	0.48	(1.0)	-0.06
Zn	0.10	-0.45	0.50	0.55	0.51	0.52	-0.20	-0.41	0.44	-0.09	0.58	0.23	0.72	(1.0)

Correlation coefficients exceeding 0.45 are significant at a level of 0.05.

● Residential area \ Green area

	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Al	(1.0)	-0.48	0.08	-0.01	0.13	-0.71	0.72	0.62	0.71	0.55	0.31	-0.24	0.78	0.27
Ca	0.54	(1.0)	0.23	-0.17	-0.34	0.85	-0.06	-0.39	-0.60	0.31	-0.45	0.31	-0.59	-0.42
Cd	0.32	0.53	(1.0)	0.38	0.35	-0.05	0.37	0.34	0.26	0.62	0.31	0.59	0.15	0.52
Cr	-0.05	0.49	0.06	(1.0)	0.93	0.00	-0.36	0.67	0.59	-0.03	0.89	0.54	0.46	0.79
Cu	-0.36	0.19	0.24	0.67	(1.0)	-0.20	-0.31	0.77	0.66	0.01	0.87	0.44	0.55	0.84
Fe	0.23	0.33	0.12	0.64	0.54	(1.0)	-0.51	-0.49	-0.57	-0.11	-0.29	0.40	-0.59	-0.38
K	0.30	0.34	0.69	0.17	0.30	0.06	(1.0)	0.27	0.27	0.72	-0.12	-0.19	0.26	0.00
Mg	0.76	0.64	0.08	0.15	-0.28	0.37	-0.17	(1.0)	0.83	0.40	0.80	0.21	0.72	0.73
Mn	0.73	0.39	0.01	-0.05	-0.21	0.53	-0.13	0.78	(1.0)	0.23	0.86	0.27	0.82	0.76
Na	-0.04	0.55	0.52	0.67	0.46	0.31	0.55	-0.05	-0.28	(1.0)	-0.01	0.22	0.29	0.14
Ni	-0.24	0.34	0.23	0.84	0.90	0.59	0.30	-0.14	-0.16	0.67	(1.0)	0.44	0.66	0.83
Pb	0.23	0.61	0.66	0.56	0.45	0.60	0.64	0.18	0.12	0.79	0.53	(1.0)	-0.08	0.59
V	0.68	0.25	-0.12	0.11	-0.16	0.60	0.02	0.74	0.80	-0.15	-0.10	0.26	(1.0)	0.50
Zn	0.33	0.20	0.49	0.30	0.16	0.34	0.75	-0.12	0.01	0.46	0.19	0.66	0.14	(1.0)

Correlation coefficients exceeding 0.45 are significant at a level of 0.05.

간에 0.75, 0.73, 0.80, 0.78, Mn과 Ni, Pb간에 0.72와 0.74, Mn과 Cr, Cu, V, Zn간에 0.67, 0.66, 0.68, 0.61 등으로 유의한 상관성(P<0.05)을 보였다. 한편 지역별로 세분화한 미량원소성분간의 상관성 분석결과는 Table 7과 같고, 새로측은 공업지역과 주거지역을, 가로측은 상업지역과 녹지지역의 상관계수를 나타내었다.

지역별로 자연적인 발생원관련 성분간에는 녹지지역(항목간 7개)이 공업지역(항목간 4개)보다, 그리고 인위적인 발생원관련 성분간에는 공업지역(항목간 14개)이 주거지역(항목간 8개)보다 유의한 양의 상관성(P<0.05)을 보인 성분이 상대적으로 많았다. 이러한 특징은 녹지지역의 경우 인간의 활동과 관계없는 동일한 계통의 자연적인 발생원에, 그리고 공업지역의 경우에는 생산과 에너지소비 등 인간의 활동에 의한 동일한 계통의 인위적인 발생원에 의한 영향을 다소 많이 받았기 때문으로 사료된다.

3.4.2. 교통량과 미량원소성분과의 상관관계

교통량이 미량원소성분에 미치는 영향을 평가하기 위해 녹지지역(시경계도로)과 주거지역(교차로)을 비교하여 상관성을 분석한 결과는 Table 8과 같다. 녹지지역의 경우는 교통량과 연료연소, 폐기물소각 등 인위적인 발생원의 영향을 받는 성분들(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)간의 상관계수가 0.52~0.84로 나타났다. 또한 암석의 풍화, 토양의 재비산 등 자연적인 발생원의 영향을 받는 성분들(Fe, Mg, Mn)간의 상관계수는 0.67~0.85로 나타나 양호한 상관성을 보였다(P<0.05). 그러나 주거지역은 녹지지역과는 달리 전반적으로 교통량과 이들 미량원소성분간에 상관성이 양호하지는 않았다.

이러한 원인은 논과 밭이 인접한 녹지지역의 경우엔 개발형태의 외곽지에서 달리는 자동차에 의해 배출되는 오염물질과 자연 바람에 의해 날리는 토사 등 비교적 단일한 오염원으로부터 노출되어 단순한 영향을 받아 상관성이 높았을 것으로 생각된다. 그러나 주택과 아파트가 밀집한 주거지역의

Table 8. Correlation coefficients between traffic density and trace elements

Area	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K
Green(n=9)	-0.06	0.51	0.52*	0.84*	0.78*	0.82*	-0.14
Residential(n=12)	0.12	0.27	-0.14	0.14	-0.06	-0.09	0.06
Area	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	V	Zn
Green(n=9)	0.85*	0.67*	0.20	0.80*	0.55*	0.39	0.67*
Residential(n=12)	0.32	0.19	0.01	0.09	-0.04	0.13	-0.22

* : Correlation coefficient is significant at the 0.05 level.

경우에는 분지형태의 도심속에서 자동차, 난방시설, 음식물 조리시설, 건설공사 등에 의해 배출되는 오염물질과 상가건물 간판의 부식 등 다양한 오염원으로부터 노출되어 복합적인 영향을 받아 상대적으로 상관성이 낮아진 결과로 사료된다. 결과적으로 도로먼지에 함유된 미량원소성분(Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn)은 교통량이 많고 적음에 따라 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 특히, 교통량이 많은 곳일수록 자동차관련 계통의 중금속성분(예를 들면 Cd은 타이어의 마모, Cu는 브레이크라이닝의 마모, Cr·Ni·Zn은 연료연소 후 남은 재, Pb은 도로면 페인트의 마모)을 많이 함유하고 있는 것으로 해석된다.³⁰⁾

4. 결론

2006년 4월과 5월에 대구지역의 도로먼지 총 48개의 시료를 채취하여 100 μm 이하로 걸러서 산추출한 후 ICP로 14개 원소를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 평가한 결과, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V성분은 토양과 먼지와 관련된 자연적 발생원의 영향을 받았고, 반면에 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn성분은 연료연소와 폐기물소각과 관련된 인위적 발생

원의 영향을 받았다.

2) 분석된 미량원소성분의 농도는 자연적 발생원에서 유래되는 성분이 높은 농도를 보였고, 반면에 인위적 발생원에서 유래되는 성분이 낮은 농도를 보였다. 또한 미량원소성분의 농도는 외국의 여러 도시지역보다 높은 수준으로 나타났다.

3) 지역별 미량원소성분의 농도는 대체로 공업지역과 상업지역이 주거지역과 녹지지역보다 높게 나타났다. 또한 중금속성분의 오염도를 평가하기 위해 오염지수를 산출한 결과에서도 지역별로 동일한 경향을 보였다.

4) 미량원소성분간의 상관성을 분석한 결과 자연적 발생원에서 유래된 성분간보다는 인위적인 발생원에서 유래된 성분간에 더 양호한 상관성을 보였다. 또한 인위적 발생원인 교통량과 미량원소성분은 교통량이 많을수록 특히, 자동차관련 계통의 중금속성분을 많이 함유하는 상관성을 보였다.

참고문헌

- Xueli, J., Dahe, J., Simei, F., Hui, Y., Pinjing, H., Boming, Y., Zhongliang, L., and Chang, F., "Road dust emission inventory for the metropolitan area of Shanghai city," *Atmos. Environ.*, **27**(11), 1735~1741(1993).
- Fergusson, J. E. and Kim, N. D., "Trace elements in street and house dusts : sources and speciation," *Sci. of the Total Environ.*, **100**, 125~150(1991).
- Fergusson, J. E., "The elemental composition of street dust from large and small urban areas related to city type, source and particle size," *Sci. of the Total Environ.*, **34**(1-2), 101~116(1984).
- 송희봉, 이은경, 정동숙, 김인옥, 이명숙, 권병윤, 이경출, "대구지역의 빗물 중 화학적 성분의 계절별 및 지역별 농도분포," *대한환경공학회지*, **28**(5), 522~526(2006).
- 최진수, 황승만, 백성욱, "대구지역 대기 중 부유먼지에 함유된 화학성분의 입도별 분포 특성," *대한환경공학회지*, **17**(12), 1245~1259(1995).
- 최성우, 송형도, "대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구," *한국대기환경학회지*, **16**(5), 469~476(2000).
- 최만식, 박은주, "제주도 대기 분진 중 미량금속의 농도 특성," *한국대기환경학회지*, **15**(6), 727~738(1999).
- Banerjee, A. D. K., "Heavy metal levels and solid phase speciation in street dust of Delhi, India," *Environ. Pollut.*, **123**(1), 95~105(2003).
- Ramlan, M. N. and Badri, M. A., "Heavy metals in tropical city street dust and road side soils: a case of Kuala Lumpur, Malaysia," *Environ. Tech. Lett.*, **10**, 435~444(1989).
- Schwar, M. J. R., Moorcroft, J. S., Laxen, D. P. H., Thompson, M., and Armorgie, C., "Baseline metal-in-dust concentrations in Greater London," *Sci. of the Total Environ.*, **68**, 25~43(1988).
- Ferreira-Baptista, L. and De Miguel, E., "Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola : A tropical urban environment," *Atmos. Environ.*, **39**(25), 4501~4512(2005).
- De Miguel, E., Llamas, J. F., Chacon, E., Berg, T., Larssen, S., Roysset, O., and Vadset, M., "Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: Unleaded petrol and urban lead," *Atmos. Environ.*, **31**(17), 2733~2740(1997).
- Robertson, D. J., Taylor, K. G., and Hoon, S. R., "Geochemical and mineral magnetic characterisation of urban sediment particulates, Manchester, UK," *Appl. Geochem.*, **18**(2), 269~282(2003).
- Rasmussen, P. E., Subramanian, K. S., and Jessiman, B., "Geochemistry of house dust, soil, and street dust in the city of Ottawa, Canada," *2000 CSEG Conference*, www.cseg.ca/conference/2000/session/ss03-1.htm(2000).
- 대구광역시, 환경백서(2006).
- 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr/intro.html>, 기후자료(2006).
- Ordenez, A., Loreda, J., De Miguel, E., and Charlesworth, S., "Distribution of heavy metals in street dust and soils of an industrial city in Northern Spain," *Arch. of Environ. Contam. and Toxicol.*, **44**, 160~170(2003).
- 백성욱, 송희봉, 신동찬, 홍성희, 장혁상, "대구지역 공중위생법 규제대상시설의 실내공기 중 입자상 오염물질의 계절별 및 지점별 농도분포 특성," *한국대기보전학회지*, **14**(3), 163~175(1998).
- 대구광역시, 2005년 교통량조사 자료집(2006).
- 노형진, Excel에 의한 조사방법 및 통계분석, 법문사, 서울(1998).
- 원태연, 정성원, 통계조사분석, SPSS academy, 서울(2001).
- Rahn, K. A., "Sources of trace elements in aerosols-an approach to clean air," Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, pp. 325(1971).
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., "The Continental Crust : Its Composition and Evolution," Blackwell Sci., Cambridge, Mass, pp. 46~47(1985).
- Watson, J. G., "Transections receptor models in air resources management," An international specialty conference, San Francisco, California, pp. 491(1988).
- 환경부, 환경백서(2006).
- 대구지방환경청 홈페이지, http://www.daegu.me.go.kr/user/sub3/envir/envir_main.html?topmenu=C, 환경질현황(2006).
- 대기기사대, 대구지방의 기후특성(1999).
- 대구광역시, 대구지역 대기개선 중기계획(1995).
- 환경부, 토양환경보전법(2006).
- 나덕재, 이병규, "산업도시 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소성분의 특성연구," *한국대기환경학회지*, **16**(1), 23~35(2000).