

대형유통업소주차장의 축적먼지 중 미량원소성분 분석과 오염원 평가

Trace Element Analysis and Source Assessment of Parking Lot Dust in Large Shopping Mall

송희봉[†] · 안정임 · 정연욱 · 윤호석 · 김종록 · 도화석 · 김선숙 · 김종우
Hee-Bong Song[†] · Jeong-Eem Ahn · Yeoun-Wook Jung · Ho-Suk Yoon
Jong-Lok Keum · Hwa-Seok Do · Sun-Suk Kim · Jong-Woo Kim

대구광역시 보건환경연구원
Public Health and Environment Institute of Daegu Metropolitan City

(2011년 5월 6일 접수, 2012년 3월 28일 채택)

Abstract : A total of 48 dust samples were collected from large shopping mall parking lots in Daegu metropolitan city in March 2011. Samples were sieved through a 100 μm mesh and the concentration of 14 elements have been determined using by ICP after acid extraction. Results showed that Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na and V were affected by natural sources while Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were affected by anthropogenic sources. The measured values were remarkably higher in components from natural sources than in components from anthropogenic sources. Anthropogenic trace element concentrations of ground roof dust were higher than those of ground and underground indoor dust. A large percentage of trace elements came from natural sources rather than anthropogenic sources. The percentage composition of chemicals of ground roof dust were higher than those of ground and underground indoor dust. This study showed that investigated parking lots were rarely contaminated with hazardous heavy metals. The heavy metal pollution of ground roof were higher than those of ground and underground indoors. The correlation analysis among trace elements suggest that components in ground roof were more highly correlated than those in ground and underground indoor. Also anthropogenic trace element levels were well correlated with parking lot age and parking density.

Key Words : Dust, Large Shopping Mall Parking Lots, Trace Elements, Parking Density

요약 : 2011년 3월에 대구광역시의 대형유통업소주차장을 대상으로 총 48개의 먼지시료를 채취하여 100 μm 이하로 걸러서 산 추출한 후 ICP로 14개 원소를 분석하였다. 미량원소성분 중 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V는 자연적 발생원의 영향을, 그리고 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn은 인위적 발생원의 영향을 받는 것으로 추정된다. 미량원소성분의 농도는 자연적 발생원 성분이 인위적 발생원 성분보다 뚜렷하게 높았고, 인위적 발생원 성분은 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 농도가 높았다. 미량원소성분의 조성백분율은 인위적 발생원 성분에 비해 자연적 발생원 성분이 대부분을 차지하였고, 인위적 발생원 성분은 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 함유율이 높았다. 주차장은 유해중금속오염이 거의 없는 수준을 보였고, 지상옥상은 지상실내와 지하실내보다 중금속오염도가 높았다. 미량원소성분간의 상관성은 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 양호한 상관성이 많았고, 인위적 발생원 성분은 주차장연수와 주차밀도와도 상관성이 양호하였다.

주제어 : 먼지, 대형유통업소주차장, 미량원소성분, 주차밀도

1. 서론

강하먼지가 오랫동안 쌓여서 형성된 축적먼지의 연구는 실내 혹은 실외공간에서 배출된 입자상물질에 의한 오랜 기간 동안의 영향을 평가하기 위한 방법으로 볼 때 대기 중의 부유먼지를 일정 시간동안 채취하여 평가한 방법보다도 오히려 더 중요한 의미를 지니고 있다고 본다. 이와 같은 축적먼지 중에 함유된 화학적 성분은 대기 중에 머무를 때나 날릴 때에 체내로 흡입되기 쉽고 각종 유해물질이 많아 특히 어린이와 노약자, 임산부에게 심각한 피해를 줄 수도 있다.¹⁾

이러한 환경보건학적 중요성을 고려한 축적먼지에 관한 연구는 국외의 경우 도로, 학교, 주택 등 다양한 시설물을 대상으로 하였으며,²⁻¹³⁾ 국내의 경우 주로 학교를 대상으로

한 연구¹⁴⁻¹⁶⁾가 있다.

이러한 국내 연구의 현실을 감안하여 최근에는 대구지역의 시설별(도로, 학교, 지하역사, 주택) 및 지역별(도시, 농촌)로 연구를 수행한 바 있다.¹⁷⁻²⁰⁾ 그러나 오늘날 도시화의 영향으로 인해 대기오염원으로 잘 알려진 자동차배출가스의 직접적인 영향을 받는 곳인 주차장의 바닥에 축적된 먼지(이하 '주차장먼지'라 함)를 대상으로 한 연구사례는 아직까지 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 자동차가 집중적으로 모이는 대구지역의 대형유통업소주차장을 오염시키고 있는 원인물질과 그 발생원을 규명해 쾌적한 환경개선을 위한 기초자료를 제공하기 위해 현장에서 축적먼지를 채취하여 실험실에서 분석한 미량원소성분의 원자료(raw data)를 바탕으로 나타난 특성을 해석하고자 한다.

[†] Corresponding author E-mail: 10000gj@daegu.go.kr Tel: 053-760-1320 Fax: 053-760-1333

그 해석의 주된 내용은 (1) 농축계수를 이용한 미량원소 성분의 발생원을 추정하고, (2) 미량원소성분의 농도분포를 파악하고, (3) 오염지수를 이용한 중금속성분의 오염도를 평가하고, (4) 미량원소성분간의 상관성 분석 및 건물노후, 주차밀도가 미량원소성분에 미치는 영향을 평가하는데 있다.

주차장먼지의 성분분석에 관한 연구는 국내와 국외에서 처음으로 시도한 사례이기 때문에 향후 이들과 관련된 분야의 연구자들에게도 충분히 도움이 될 만한 가치가 높은 논문으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 채취지점 및 기간

시료채취장소는 대구광역시에 위치한 대형유통업소 25개소를 대상으로 하였다. 선정된 대표지점은 총 48곳으로 건물 내에서 구조적·공간적 형태를 달리하는 지하실내주차장(16곳), 지상실내주차장(16곳), 지상옥상주차장(16곳)인 3그룹으로 구분하였다. 이때 지하실내주차장은 지하주차장 중 차량이 맨 먼저 채워져 오염도가 가장 높을 것으로 예상되는 주차장의 첫 층을, 지상실내주차장은 지상주차장 중 차량이 맨 먼저 채워져 오염도가 가장 높을 것으로 예상되는 주차장의 첫 층을, 그리고 이와는 달리 지상옥상주차장은 지상주차장 중에 가장 높는데 위치하고 지붕덮개가 없는 꼭대기 층이었다.

Table 1은 각 채취지점에 대한 주차장연수(건물연수), 바닥재질(에폭시/우레탄/콘크리트), 환기형태(강제/자연), 벽면형태(밀폐/개방), 주차밀도(주차면적당 최대주차대수) 등의 특성을 요약하였고, 이때 시료채취장소의 동일번호는 동일업소를 의미한다. 이들은 본 논문에서 원자료 및 결과해석의 보조자료로 활용하였다. 한편 주차장은 빗자루와 쓰레받기로 청소하는 지상옥상과는 달리 지상실내와 지하실내의 경우 물청소를 겸하는 습식진공청소차량을 이용해 주기적으로 바닥을 청소하고 있었다.

이들 총 25개소의 주차장먼지 시료는 2011년 3월 중에 비가 내리지 않은 맑은 날, 교통량 변화가 휴일보다 적을 것으로 예상되는 평일(총 7일간 : 8일 1개소, 17일 9개소, 18일 5개소, 22일 3개소, 24일 2개소, 28일 2개소, 29일 3개소)에 채취하였다.

2.2. 시료채취 및 분석

주차장먼지 시료는 선정된 대표지점에서 빗자루와 쓰레받기를 이용하여 수분과 유분이 포함된 먼지를 제외하고 골고루 채취한 복합시료를 하나의 대표시료로 하였다. 이러한 대표시료를 폴리에틸렌백(PE Bag)에 담아 밀봉하고 실험실로 운반하여 실온에서 충분히 자연건조시킨 후 표준망체(Standard Testing Sieve, Aperture 100 μm , 한국청계상공사)를 이용하여 100 μm 이하로 분리해 분석용시료로 하였다. 시료

분석은 테프론비이커에 전자식저울(Ohaus, Galaxy 200D, Germany)로 정확하게 취한 분석용시료 1.0 g과 2 : 2 : 2 HCl-HNO₃-H₂O의 혼합용액(HCl와 HNO₃ : 유해금속측정용, H₂O : 크로마토그래피용) 6 mL를 넣고 초음파추출기(Elma, Transonic 890/H, Germany)로 95°C에서 2시간 동안 추출한 용액을 메스플라스크에 멤브레인필터로 여과한 후 탈이온수인 증류수를 넣어 최종액량이 정확히 25 mL가 되도록 하였다.¹³⁾ 이러한 전처리과정을 거친 시료를 유도결합플라즈마 방출분광광도계(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.¹⁷⁻²⁰⁾

2.3. 자료처리 및 통계분석

총 48개의 시료에 대해 ICP로 분석한 총 14개 원소의 농도자료는 각 원소별로 모두 검출한계 이상으로 나타났다. 시료분석방법인 염산-질산추출법에 의한 미량원소성분의 농도 자료에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 미국 국립표준시험연구소(NIST)의 표준참조물질인 SRM (urban particulate matter standard) 1648을 이용하여 실제시료와 동일한 방법으로 회수율 실험(Recovery Test)을 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 백성옥 등²¹⁾이 연구한 대구지역 공중시설의 실내공기 중 입자상물질의 농도평가에서 회수율 평가결과와 유사한 결과를 보였다. 그러나 본 논문에서는 미량원소성분의 농도계산에 있어서 이러한 회수율을 특별히 보정하지 않고 통계·처리하였다. 그 이유는 Table 2와 관련된 본 연구의 발생원 평가에서 낮은 회수율을 보인 Al을 기준으로 농축계수를 계산할 때 회수율을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우에 양자 모두 동일한 경향을 보였기 때문이다. 또한 분석자료의 모든 통계분석은 MS Excel과 SPSS/Windows Program을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주차장먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가

주차장먼지에 함유된 미량원소성분의 발생원 평가는 Rahn²²⁾에 의해 제안된 농축계수를 이용하였다. 지각물질의 원소조성과 주차장먼지의 원소조성을 비교해 그 발생원이 자연적 혹은 인위적 영향인지를 정성적으로 추정하기 위해 지각물질 중 비교적 균일하고 다량으로 함유되어 있는 Al을 기준 원소로 선정하였다. 이때 지각물질의 원소조성은 Taylor 등²³⁾이 제시한 지각성분표를 이용하였으며, 농축계수(Enrichment Factor, E.F)를 아래와 같은 식으로부터 산출한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Characteristic of different sampling sites

| Sampling place | Sampling site | | | | | | | |
|----------------|---------------|-----------|-----------------|------------------|--------------|------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| | Age (year) | Floor (F) | Bottom material | Ventilation type | Wall type | Area (m ²) | Parking number (car) | Parking density (car/m ²) |
| # 1 | 9 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 13,817 | 317 | 0.023 |
| # 2 | 10 | 3F | Epoxy | Natural | Partial open | 6,714 | 136 | 0.020 |
| # 2 | 10 | 4F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 1,014 | 186 | 0.183 |
| # 2 | 10 | 1F | Epoxy | Natural | Partial open | 3,354 | 87 | 0.026 |
| # 2 | 10 | 6F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 321 | 80 | 0.249 |
| # 3 | 7 | 3F | Epoxy | Forced + Natural | Partial open | 12,232 | 384 | 0.031 |
| # 3 | 7 | 4F (roof) | Concrete | Natural | Open | 1,537 | 336 | 0.219 |
| # 4 | 10 | 3F | Epoxy | Forced + Natural | Partial open | 5,738 | 194 | 0.034 |
| # 4 | 10 | 5F (roof) | Urethane | Natural | Open | 5,855 | 195 | 0.033 |
| # 5 | 12 | 4F | Concrete | Forced + Natural | Partial open | 6,925 | 121 | 0.017 |
| # 5 | 12 | 8F (roof) | Concrete | Natural | Open | 5,004 | 214 | 0.043 |
| # 6 | 11 | 2F | Epoxy | Forced + Natural | Partial open | 4,357 | 79 | 0.018 |
| # 6 | 11 | 7F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 209 | 105 | 0.502 |
| # 7 | 10 | 3F | Epoxy | Forced + Natural | Partial open | 9,768 | 297 | 0.030 |
| # 7 | 10 | 4F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 1,923 | 359 | 0.187 |
| # 8 | 9 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 10,754 | 241 | 0.022 |
| # 9 | 7 | 1F | Ascon | Natural | Partial open | 2,573 | 69 | 0.027 |
| # 9 | 7 | 3F (roof) | Concrete | Natural | Open | 2,587 | 90 | 0.035 |
| # 10 | 8 | 1F | Epoxy | Natural | Partial open | 3,434 | 76 | 0.022 |
| # 10 | 8 | 4F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 3,434 | 104 | 0.030 |
| # 11 | 14 | 3F | Epoxy | Natural | Partial open | 4,147 | 106 | 0.026 |
| # 11 | 14 | 7F (roof) | Concrete | Natural | Open | 341 | 130 | 0.381 |
| # 12 | 4 | B3F | Epoxy | Forced | Close | 10,579 | 275 | 0.026 |
| # 13 | 9 | B3F | Concrete | Forced | Close | 20,952 | 590 | 0.028 |
| # 14 | 13 | B3F | Epoxy | Forced | Close | 7,130 | 258 | 0.036 |
| # 14 | 13 | 2F | Epoxy | Natural | Partial open | 4,467 | 128 | 0.029 |
| # 14 | 13 | 5F (roof) | Urethane | Natural | Open | 606 | 149 | 0.246 |
| # 15 | 1 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 13,113 | 313 | 0.024 |
| # 16 | 10 | B1F | Epoxy | Forced | Close | 12,750 | 435 | 0.034 |
| # 16 | 10 | 3F (roof) | Concrete | Natural | Open | 11,738 | 435 | 0.037 |
| # 17 | 14 | 1F | Urethane | Forced + Natural | Partial open | 4,445 | 161 | 0.036 |
| # 17 | 14 | 5F (roof) | Urethane | Natural | Open | 2,970 | 126 | 0.042 |
| # 18 | 18 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 7,129 | 99 | 0.014 |
| # 19 | 14 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 2,376 | 55 | 0.023 |
| # 19 | 14 | B1F | Epoxy | Forced | Close | 1,149 | 31 | 0.027 |
| # 19 | 14 | 1F | Epoxy | Natural | Partial open | 1,032 | 20 | 0.019 |
| # 20 | 27 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 4,357 | 81 | 0.019 |
| # 20 | 14 | 1F | Epoxy | Natural | Partial open | 1,786 | 46 | 0.026 |
| # 20 | 14 | 6F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 150 | 52 | 0.347 |
| # 21 | 15 | B3F | Epoxy | Forced | Close | 3,761 | 120 | 0.032 |
| # 21 | 15 | B1F | Epoxy | Forced | Close | 1,341 | 40 | 0.030 |
| # 21 | 15 | 1F | Epoxy | Natural | Partial open | 1,474 | 31 | 0.021 |
| # 22 | 11 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 3,420 | 256 | 0.075 |
| # 23 | 6 | 5F (roof) | Epoxy | Natural | Open | 2,522 | 368 | 0.146 |
| # 24 | 7 | B2F | Epoxy | Forced | Close | 5,926 | 134 | 0.023 |
| # 25 | 1 | B2F | Concrete | Forced | Close | 15,729 | 400 | 0.025 |
| # 25 | 1 | 3F | Concrete | Forced | Close | 7,556 | 169 | 0.022 |
| # 25 | 1 | 6F (roof) | Concrete | Natural | Open | 2,311 | 199 | 0.086 |

Table 2. Enrichment factor of trace elements

| Element | Ground roof (n=16) | Ground indoor (n=16) | Underground indoor (n=16) | Total (n=48) |
|-----------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|
| Al | (1.0) | (1.0) | (1.0) | (1.0) |
| Ca | 9.8 | 8.6 | 10.3 | 9.6 |
| Cd | 922.5 | 410.4 | 446.5 | 610.8 |
| Cr | 44.1 | 26.8 | 36.7 | 36.3 |
| Cu | 64.7 | 71.4 | 146.4 | 92.5 |
| Fe | 4.2 | 4.6 | 4.9 | 4.6 |
| K | 0.8 | 1.0 | 1.5 | 1.1 |
| Mg | 3.7 | 4.8 | 4.7 | 4.3 |
| Mn | 7.0 | 7.0 | 7.5 | 7.2 |
| Na | 0.3 | 1.4 | 1.5 | 1.0 |
| Ni | 18.2 | 16.4 | 28.9 | 21.0 |
| Pb | 391.7 | 74.6 | 98.0 | 199.0 |
| V | 3.6 | 4.3 | 4.0 | 3.9 |
| Zn | 139.2 | 138.7 | 172.1 | 149.4 |

$$\text{농축계수(E.F)} = \frac{\text{축적먼지 중 원소성분의 농도} / \text{축적먼지 중 Al의 농도}}{\text{지각물질 중 원소성분의 농도} / \text{지각물질 중 Al의 농도}}$$

위 식으로부터 산출된 농축계수가 1에 가까운 값일수록 그 원소의 기원은 지표원소와 동일함을 의미한다. 또한 농축계수가 10 이하인 값이면 자연적인 발생원의 영향으로 간주하고, 농축계수가 10 이상인 값이면 인위적인 발생원의 영향으로 간주하였다.²⁴⁾

산출된 전체평균농축계수는 Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > Ca > Mn > Fe > Mg > V > K > Na 순으로 농축정도가 높았다. 여기에서 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V 성분은 농축계수 10

이하인 값을 보여 지각물질의 조성변화(예 : 암석의 풍화, 토양의 재비산 등)와 관련된 자연적인 발생원의 영향^{25,26)}을 받고 있었다. 그리고 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn과 같은 성분은 농축계수 10 이상인 값을 보여 인간의 활동(예 : 연료유의 연소, 폐기물의 소각 등)과 관련된 인위적인 발생원의 영향^{25,26)}을 받는 것으로 추정되었다. 그러나 인위적인 발생원 성분으로 알려진 V의 경우는 예상과는 달리 농축계수 10 이하를 보여 자연적인 발생원 성분으로 추정되었다. 이는 Al을 기준원소로 하여 본 연구와 동일하게 지각성분표를 이용한 송희봉 등¹⁷⁻²⁰⁾ 및 최진수 등²⁵⁾·최성우 등²⁶⁾의 연구사례인 대구지역 축적먼지(도로, 학교, 지하역사, 주택) 및 부유먼지(일반대기)에 함유된 원소성분의 발생원 평가에서도 V를 포함한 모든 성분이 동일한 결과를 보였다.

한편 주차장그룹별 평균농축계수는 자연적 발생원 성분의 경우 그룹간에 뚜렷한 차이가 없었으나, 인위적 발생원 성분의 경우에는 Cd, Cr, Pb 등의 일부 성분이 다른 성분과 비해 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 뚜렷하게 높았다(Cd 2.2배와 2.1배, Cr 1.6배와 1.2배, Pb 5.3배와 4.0배). 이러한 사실은 그룹별간에 자연적인 오염원은 비슷하게 영향을 받고 있지만 인위적인 오염원은 Table 1의 바닥재질, 환기형태, 벽면형태, 청소형태, 주차밀도 등의 복합적인 환경요인의 차이로 사료된다.

3.2. 주차장먼지에 함유된 미량원소성분의 농도분포

주차장먼지에 함유된 미량원소성분의 분석결과는 Table 3에 요약하였다.

전체평균농도는 Ca > Fe > Al > Mg > K > Na > Zn > Mn > Pb > Cu > Cr > Ni > V > Cd 순으로 높았는데, 이는 Table 2에서 추정된 자연적인 발생원관련 성분들이 인위적인 발생원관련 성분들에 비해 높은 경향을 보였다. 평균농도범위의

Table 3. Analytical results of trace elements (µg/g)

| Parking lot | | Al | Ca | Cd | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | V | Zn |
|--|-------------------|-------|-------|----|-----|------|-------|-------|------|-----|-------|-----|------|----|------|
| G _R ¹⁾ (n=16) | Mean | 10227 | 37211 | 12 | 197 | 206 | 18866 | 3014 | 6218 | 536 | 1061 | 46 | 997 | 27 | 1258 |
| | S.D ⁴⁾ | 2688 | 18169 | 10 | 196 | 80 | 3438 | 1163 | 1171 | 131 | 812 | 29 | 1955 | 6 | 605 |
| | Min | 5119 | 16190 | 0 | 55 | 110 | 12860 | 1225 | 3876 | 286 | 242 | 19 | 83 | 14 | 425 |
| | Max | 13950 | 69560 | 40 | 799 | 399 | 24160 | 5531 | 8173 | 748 | 2938 | 142 | 7155 | 34 | 2324 |
| G _I ²⁾ (n=16) | Mean | 8747 | 27938 | 4 | 102 | 194 | 17429 | 3011 | 6893 | 456 | 4368 | 36 | 162 | 28 | 1071 |
| | S.D | 1088 | 5934 | 2 | 23 | 53 | 1396 | 1215 | 753 | 60 | 4035 | 9 | 85 | 4 | 578 |
| | Min | 6675 | 20920 | 2 | 75 | 128 | 15280 | 1571 | 5072 | 344 | 1208 | 26 | 63 | 19 | 550 |
| | Max | 11390 | 39960 | 8 | 157 | 324 | 21060 | 6651 | 8126 | 552 | 15900 | 63 | 417 | 32 | 2406 |
| U _J ³⁾ (n=16) | Mean | 8728 | 33598 | 5 | 140 | 397 | 18714 | 4584 | 6812 | 491 | 4704 | 63 | 213 | 26 | 1327 |
| | S.D | 1564 | 8188 | 2 | 81 | 657 | 3421 | 2812 | 768 | 81 | 3448 | 66 | 150 | 5 | 1152 |
| | Min | 6747 | 23010 | 2 | 68 | 117 | 14570 | 2065 | 4905 | 383 | 1240 | 27 | 55 | 16 | 414 |
| | Max | 12210 | 50910 | 9 | 364 | 2789 | 28800 | 13520 | 7948 | 700 | 14650 | 283 | 587 | 32 | 5105 |
| Total (n=48) | Mean | 9234 | 32916 | 7 | 146 | 266 | 18336 | 3536 | 6641 | 494 | 3378 | 48 | 457 | 27 | 1219 |
| | S.D | 1992 | 12364 | 7 | 127 | 387 | 2925 | 1996 | 948 | 99 | 3458 | 43 | 1174 | 5 | 812 |
| | Min | 5119 | 16190 | 0 | 55 | 110 | 12860 | 1225 | 3876 | 286 | 242 | 19 | 55 | 14 | 414 |
| | Max | 13950 | 69560 | 40 | 799 | 2789 | 28800 | 13520 | 8173 | 748 | 15900 | 283 | 7155 | 34 | 5105 |

¹⁾ Ground roof, ²⁾ Ground indoor, ³⁾ Underground indoor, ⁴⁾ Standard Deviation

경우 대체로 자연적 발생원으로 추정된 성분(Al, Ca, Fe, K, Mg 등)은 수~수십 mg/g 수준의 고농도를 보였고, 인위적 발생원으로 추정된 성분(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 등)은 수~수백 µg/g 수준의 저농도를 보였다. 또한 이러한 결과는 송희봉 등¹⁷⁾의 축적먼지 연구사례인 대구지역의 도로먼지에 비해 주차장먼지 중 일부의 인위적 발생원 성분이 더 높은 농도(Pb : 주차장 457 µg/g, 도로 152 µg/g, Zn : 주차장 1,219 µg/g, 도로 725 µg/g)를 보였다. 이는 이들의 장소가 자동차배출가스의 직접적인 영향을 받는 동일한 여건 속에 있으나 주차장의 경우 실외의 도로와는 달리 중금속 농축이 상대적으로 용이한 국소적인 환경조건이기 때문으로 사료된다.

주차장그룹별 평균농도는 특히 인위적 발생원 성분인 Cd, Cr, Pb이 다른 성분에 비해 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 뚜렷하게 높은 농도를 보였다(Cd 3.0배와 2.4배, Cr 1.9배와 1.4배, Pb 6.2배와 4.7배). 이는 물청소와 강제환기가 이루어지는 실내와는 달리 지상옥상의 경우 햇볕에 의한 바닥과 벽면의 마모, 환기시설과 물청소가 없는 청소, 높은 주차밀도(옥상평균 0.173 car/m², 지상평균 0.025 car/m², 지하평균 0.029 car/m²), 비 내린 후 먼지의 침착 등이 많은 영향을 준 결과로 사료된다. 이는 Table 2에서 인위적 발생원 성분인 Cd과 Cr, Pb의 경우에도 지상옥상이 지상실내와 지하실내에 비해 평균농축계수가 높았다는 사실과도 같은 맥락에서 설명된다.

한편 주차장먼지에 함유된 미량원소성분(14개 원소)의 조성을 Table 2에서 오염원의 정성적인 확인으로서 추정된 자연적 발생원 성분의 합(Al + Ca + Fe + K + Mg + Mn + Na + V)과 인위적 발생원 성분의 합(Cd + Cr + Cu + Ni + Pb + Zn)으로 구분해 백분율을 산출한 결과는 Table 4와 같다. 이때 Ca은 비교를 위해 자연적 발생원 성분으로 간주하였다.

전체 백분율로 비교하면 자연적 발생원 성분과 인위적 발생원 성분이 각각 97.2%와 2.8%를 함유해 자연적인 발생원 관련 성분이 대부분을 차지하였다. 그룹별 함유율은 자연적 발생원 성분의 경우 지상실내(97.8%) > 지하실내(97.3%) > 지상옥상(96.6%) 순으로, 반면에 인위적 발생원 성분의 경우 지상옥상(3.4%) > 지하실내(2.7%) > 지상실내(2.2%) 순으로 높았다. 이러한 결과는 Table 2와 Table 3에서 설명된 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다도 인위적인 영향(특히, Cd과 Cr, Pb)을 많이 받는다는 사실에서도 어느 정도 확인할 수 있다.

Table 4. Contribution of natural and anthropogenic sources (µg/g)

| Source | Ground roof (n=16) | Ground indoor (n=16) | Underground indoor (n=16) | Total (n=48) |
|---------------|--------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|
| Natural | 77162 (96.6%) | 68870 (97.8%) | 77656 (97.3%) | 223687 (97.2%) |
| Anthropogenic | 2714 (3.4%) | 1570 (2.2%) | 2143 (2.7%) | 6428 (2.8%) |
| Total | 79876 (100.0%) | 70440 (100.0%) | 79799 (100.0%) | 230115 (100.0%) |

3.3. 주차장먼지에 함유된 유해중금속성분의 오염도 평가

주차장먼지에 함유된 유해중금속성분의 오염정도를 평가하기 위해 우리나라 환경부²⁷⁾에서 제시한 토양오염기준(3지역의 ‘주차장’에 해당)을 적용하였다. 이때 중금속의 토양오염우려기준(A)은 Cd 60 µg/g, Cu 2,000 µg/g, Ni 500 µg/g, Pb 700 µg/g, Zn 2,000 µg/g이었고, 토양오염대책기준(B)은 Cd 180 µg/g, Cu 6,000 µg/g, Ni 1,500 µg/g, Pb 2,100 µg/g, Zn 5,000 µg/g이었다.

주차장먼지에 대한 중금속의 오염지수(P.I, Pollution Index)는 위에서 제시한 기준값을 이용하였으며 아래와 같은 식으로부터 산출한 결과는 Table 5와 같다.

$$\text{오염지수(P.I)} = \frac{\text{Cd함량/A(B)} + \text{Cu함량/A(B)} + \text{Ni함량/A(B)} + \text{Pb함량/A(B)} + \text{Zn함량/A(B)}}{5}$$

위 식으로부터 산출된 오염지수가 1.0 이하인 값을 나타내면 중금속이 오염되지 않은 지역으로 간주하고, 오염지수가 1.0 이상인 값을 나타내면 중금속이 오염된 지역으로 간주하였다.

전체자료로 보면 주차장은 토양오염우려기준과 토양오염대책기준을 적용하여 산출된 전체평균오염지수는 각각 0.32 ± 0.38과 0.12 ± 0.13으로 오염지수기준인 1.0의 1/3을 크게 밑돌았다. 이는 주차장먼지가 사람의 건강에 지장을 주지 않을 정도로 중금속이 거의 오염되지 않은 낮은 수준이었다.

주차장그룹별로는 평균오염지수가 지상옥상(우려 0.49, 대책 0.17) > 지하실내(우려 0.27, 대책 0.10) > 지상실내(우려 0.20, 대책 0.03) 순으로 높았다. 그룹별로 볼 때 토양오염우려기준을 적용하면 지상옥상은 총 16곳 중 2곳(12.5%)이 중금속으로부터 오염된 곳인 오염지수 1.0을 초과하였고, 지상

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

| Site | P.I > 1.0 | | | | P.I < 1.0 | | | | P.I ¹⁾ | |
|---------------------------|-----------|---|------|-----|-----------|----|-------|-------|--------------------------|-----------------|
| | Number | | % | | Number | | % | | Mean ± S.D ²⁾ | |
| | A | B | A | B | A | B | A | B | A ³⁾ | B ⁴⁾ |
| Ground roof (n=16) | 2 | 0 | 12.5 | 0.0 | 14 | 16 | 87.5 | 100.0 | 0.49 ± 0.61 | 0.17 ± 0.20 |
| Ground indoor (n=16) | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 16 | 16 | 100.0 | 100.0 | 0.20 ± 0.07 | 0.07 ± 0.03 |
| Underground indoor (n=16) | 0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 16 | 16 | 100.0 | 100.0 | 0.27 ± 0.07 | 0.10 ± 0.07 |
| Total (n=48) | 2 | 0 | 4.2 | 0.0 | 46 | 48 | 95.8 | 100.0 | 0.32 ± 0.38 | 0.12 ± 0.13 |

¹⁾ Pollution Index, ²⁾ Standard Deviation, ³⁾ Soil contamination warning standard(Korea), ⁴⁾ Soil contamination countermeasure standard(Korea)

실내와 지하실내는 각각의 총 16곳 중 한군데도 중금속이 오염되지 않은 곳인 오염지수 1.0을 초과하지 않았다. 또한 토양오염대책기준을 적용하면 지상옥상, 지상실내, 지하실내의 경우, 각각 16곳 중 한군데도 중금속이 전혀 오염되지 않은 곳인 오염지수 1.0을 초과하지 않았다. 그러나 토양오염 우려기준을 초과한 2곳은 Table 1의 #6과 #20업소의 지상 옥상으로서, 다른 곳에 비해 특히 주차면적당 최대주차대수인 주차밀도(0.502 car/m²와 0.347 car/m²)가 상당히 높았고 또한 주차장 노후화(11년과 14년)로 인한 바닥재질의 마모 등이 주된 요인으로 작용했다고 사료된다. 이러한 결과로부터 주차장의 중금속 오염을 줄이기 위해 주차장을 지을 때는 가능한 주차면적당 최대주차대수를 최대한으로 줄일 필요가 있음을 알 수 있었다.

한편 전술한 바와 같이 전체지점으로 보면 토양오염대책 기준을 적용하면 총 48곳 중 한군데도 오염지수 1.0을 초과하지 않았고, 토양오염우려기준을 적용하면 총 48곳 중 95.8%에 해당하는 46곳이 오염지수 1.0을 초과하지 않았다. 따라서 대구지역의 대형유통업소주차장은 이곳을 이용하는 고객이나 근무자들이 주차장먼지 속에 함유한 중금속의 노출로 인해 사람의 건강에 지장을 초래할만한 정도의 우려수준은 아니라고 판단된다.

3.4. 주차장먼지에 함유된 미량원소성분의 상관성 분석

3.4.1. 미량원소성분간의 상관관계

주차장먼지에 함유된 미량원소성분들의 상관성을 분석한 결과는 Table 6과 같다.

전체자료를 보면 통계적으로 유의한 양의 상관성(P < 0.05)을 보인 성분으로는 자연적-인위적 발생원 성분간(12개) > 자연적-자연적 발생원 성분간(8개) > 인위적-인위적 발생원 성분간(4개) 순으로 신뢰할 만한 상관성이 많았다. 여기에서 자연적 발생원 성분과 인위적 발생원 성분의 구분 기준은

Table 2의 발생원 평가결과에 따랐다.

특히 자연적-자연적 발생원 성분간인 Al과 Mg, Mn, V간(0.57, 0.55, 0.67), Ca과 K간(0.49), Fe과 K, Mn간(0.32, 0.71), V과 Mg, Mn간(0.73, 0.43)에 유의하여(P < 0.05) 같은 무리를 이루고 있는데, 이는 흙먼지 혹은 도로 재비산먼지 등에서 유래된다²⁵⁾는 사실을 보여준다. 또한 인위적-인위적 발생원 성분간인 Cd과 Cr, Pb간(0.76, 0.88), Cr과 Pb간(0.92), Cu와 Ni간(0.38)에도 유의하여(P < 0.05) 역시 같은 무리를 이루고 있는데, 이는 폐기물소각 혹은 연료유연소 등에서 유래된다²⁵⁾는 사실을 보여준다. 이외에 자연적-인위적 발생원 성분간인 Al과 Cd, Pb, Zn간(0.59, 0.33, 0.36), Cd과 Mn간(0.36), Cr과 Fe, Mn간(0.31, 0.34), Cu와 Fe, Mn간(0.52, 0.37), Fe과 Ni간(0.69), K과 Ni, Zn간(0.63, 0.35), Mn과 Ni간(0.33)에도 유의한 상관(P < 0.05)을 보였다. 그러나 전체적으로 자연적-인위적 발생원 성분간이 공통된 무리를 이루는 성분간(자연적-자연적, 인위적-인위적)에 비해 신뢰할 만한 양의 상관성을 많이 보이는데, 이에 대한 일의적인 결론을 내리기 어렵기 때문에 명확한 해석을 위해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요하다고 본다.

한편 전체자료를 주차장그룹별로 세분화한 미량원소성분간의 상관성 분석결과는 Table 7과 같다.

통계적으로 유의한 양의 상관(P < 0.05)을 보인 그룹별로는 지상옥상(성분간 28개 : 자연-자연 13개, 자연-인위 11개, 인위-인위 4개) > 지상실내(성분간 19개 : 자연-자연 11개, 자연-인위 7개, 인위-인위 1개) > 지하실내(성분간 15개 : 자연-자연 6개, 자연-인위 6개, 인위-인위 3개) 순으로 신뢰할 만한 상관성을 많이 보였다. 이러한 원인은 Table 1(벽면형태)의 지붕덜개가 없고 외부환경에 그대로 노출되어 있는 지상옥상과는 달리 지상실내와 지하실내의 경우 벽면이 부분적인 밀폐 혹은 완전히 밀폐된 구조물로서 벽면페인트의 마모, 자동차배출가스, 고객의 물품 등 다양한 오염원의 복합적인 영향을 받아 성분간의 상관성이 낮아진 결과로 사료된다

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

| | Al | Ca | Cd | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | V | Zn |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Al | (1.0) | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | 0.10 | (1.0) | | | | | | | | | | | | |
| Cd | <u>0.59</u> | 0.15 | (1.0) | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0.25 | 0.21 | <u>0.76</u> | (1.0) | | | | | | | | | | |
| Cu | -0.16 | 0.08 | -0.05 | 0.14 | (1.0) | | | | | | | | | |
| Fe | 0.24 | -0.06 | 0.23 | <u>0.31</u> | <u>0.52</u> | (1.0) | | | | | | | | |
| K | -0.01 | <u>0.49</u> | 0.10 | 0.13 | 0.27 | <u>0.32</u> | (1.0) | | | | | | | |
| Mg | <u>0.57</u> | -0.03 | 0.18 | 0.14 | -0.26 | 0.08 | -0.06 | (1.0) | | | | | | |
| Mn | 0.55 | 0.14 | <u>0.36</u> | <u>0.34</u> | <u>0.37</u> | <u>0.71</u> | 0.09 | 0.28 | (1.0) | | | | | |
| Na | -0.20 | 0.01 | -0.25 | -0.08 | 0.02 | -0.19 | 0.21 | 0.11 | -0.09 | (1.0) | | | | |
| Ni | -0.13 | 0.15 | -0.07 | 0.22 | <u>0.38</u> | <u>0.69</u> | <u>0.63</u> | -0.14 | <u>0.33</u> | 0.05 | (1.0) | | | |
| Pb | <u>0.33</u> | 0.18 | <u>0.88</u> | <u>0.92</u> | -0.02 | 0.16 | 0.06 | 0.18 | 0.23 | -0.16 | -0.05 | (1.0) | | |
| V | <u>0.67</u> | -0.20 | 0.22 | 0.02 | -0.28 | 0.28 | -0.34 | <u>0.73</u> | <u>0.43</u> | -0.18 | -0.20 | 0.10 | (1.0) | |
| Zn | <u>0.36</u> | 0.11 | 0.28 | 0.14 | 0.27 | 0.28 | <u>0.35</u> | -0.17 | 0.25 | 0.06 | 0.13 | 0.14 | -0.03 | (1.0) |

Correlation coefficients of underlined value are significant at a level of 0.05.

Table 7. Correlation coefficient among trace elements by sites

| | Al | Ca | Cd | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | V | Zn |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| • Ground roof (n=16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | (1.0) | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0.04 | (1.0) | | | | | | | | | | | | |
| Cd | <u>0.53</u> | -0.06 | (1.0) | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0.29 | 0.12 | <u>0.85</u> | (1.0) | | | | | | | | | | |
| Cu | 0.35 | 0.10 | -0.15 | 0.05 | (1.0) | | | | | | | | | |
| Fe | <u>0.56</u> | -0.28 | 0.27 | 0.26 | <u>0.66</u> | (1.0) | | | | | | | | |
| K | 0.37 | <u>0.82</u> | 0.32 | 0.36 | 0.20 | -0.09 | (1.0) | | | | | | | |
| Mg | <u>0.92</u> | 0.09 | <u>0.57</u> | 0.47 | 0.41 | <u>0.59</u> | 0.48 | (1.0) | | | | | | |
| Mn | <u>0.77</u> | -0.01 | 0.31 | 0.24 | <u>0.61</u> | <u>0.84</u> | 0.23 | <u>0.75</u> | (1.0) | | | | | |
| Na | 0.03 | <u>0.81</u> | -0.17 | -0.10 | 0.15 | -0.33 | <u>0.78</u> | 0.10 | -0.12 | (1.0) | | | | |
| Ni | 0.16 | -0.01 | -0.23 | 0.04 | <u>0.80</u> | <u>0.58</u> | 0.02 | 0.18 | <u>0.56</u> | -0.06 | (1.0) | | | |
| Pb | 0.28 | 0.11 | <u>0.90</u> | <u>0.98</u> | -0.10 | 0.18 | 0.34 | 0.44 | 0.18 | -0.12 | -0.14 | (1.0) | | |
| V | <u>0.88</u> | -0.09 | 0.40 | 0.20 | 0.43 | <u>0.77</u> | 0.16 | <u>0.83</u> | <u>0.80</u> | -0.11 | 0.24 | 0.18 | (1.0) | |
| Zn | <u>0.58</u> | -0.28 | 0.38 | 0.36 | 0.45 | <u>0.73</u> | -0.05 | <u>0.54</u> | <u>0.75</u> | -0.52 | 0.48 | 0.30 | <u>0.65</u> | (1.0) |
| • Ground indoor (n=16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | (1.0) | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | <u>0.55</u> | (1.0) | | | | | | | | | | | | |
| Cd | <u>0.83</u> | <u>0.57</u> | (1.0) | | | | | | | | | | | |
| Cr | -0.09 | 0.02 | -0.16 | (1.0) | | | | | | | | | | |
| Cu | 0.07 | -0.15 | 0.03 | 0.42 | (1.0) | | | | | | | | | |
| Fe | 0.17 | -0.04 | -0.05 | <u>0.68</u> | 0.44 | (1.0) | | | | | | | | |
| K | 0.18 | <u>0.63</u> | <u>0.52</u> | -0.21 | -0.02 | -0.39 | (1.0) | | | | | | | |
| Mg | <u>0.67</u> | 0.39 | 0.38 | -0.05 | -0.12 | 0.26 | -0.21 | (1.0) | | | | | | |
| Mn | <u>0.53</u> | 0.39 | 0.27 | 0.42 | -0.02 | <u>0.75</u> | -0.20 | <u>0.58</u> | (1.0) | | | | | |
| Na | -0.06 | 0.39 | 0.06 | -0.31 | -0.49 | -0.39 | <u>0.57</u> | -0.16 | -0.13 | (1.0) | | | | |
| Ni | -0.06 | -0.07 | -0.14 | <u>0.68</u> | 0.36 | <u>0.78</u> | -0.16 | -0.14 | <u>0.55</u> | -0.17 | (1.0) | | | |
| Pb | 0.19 | 0.31 | 0.34 | 0.32 | -0.01 | -0.21 | 0.15 | 0.02 | -0.05 | 0.17 | -0.19 | (1.0) | | |
| V | <u>0.54</u> | 0.08 | 0.16 | 0.05 | -0.09 | <u>0.57</u> | -0.46 | <u>0.81</u> | <u>0.74</u> | -0.33 | 0.16 | -0.37 | (1.0) | |
| Zn | 0.09 | 0.30 | 0.48 | -0.29 | 0.18 | -0.45 | <u>0.77</u> | -0.34 | -0.52 | 0.32 | -0.30 | 0.22 | -0.57 | (1.0) |
| • Underground indoor (n=16) | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | (1.0) | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0.05 | (1.0) | | | | | | | | | | | | |
| Cd | 0.47 | <u>0.69</u> | (1.0) | | | | | | | | | | | |
| Cr | -0.25 | 0.20 | 0.04 | (1.0) | | | | | | | | | | |
| Cu | -0.35 | 0.16 | 0.11 | 0.40 | (1.0) | | | | | | | | | |
| Fe | -0.35 | 0.14 | 0.09 | 0.33 | <u>0.68</u> | (1.0) | | | | | | | | |
| K | -0.16 | <u>0.64</u> | <u>0.52</u> | 0.16 | 0.22 | <u>0.64</u> | (1.0) | | | | | | | |
| Mg | <u>0.51</u> | -0.26 | -0.22 | -0.29 | -0.73 | -0.59 | -0.52 | (1.0) | | | | | | |
| Mn | -0.28 | 0.03 | 0.00 | 0.35 | <u>0.73</u> | <u>0.54</u> | 0.18 | -0.45 | (1.0) | | | | | |
| Na | -0.07 | -0.19 | -0.06 | 0.41 | -0.04 | -0.09 | -0.13 | -0.03 | 0.36 | (1.0) | | | | |
| Ni | -0.41 | 0.34 | 0.11 | <u>0.57</u> | 0.33 | <u>0.81</u> | <u>0.78</u> | -0.45 | 0.29 | 0.07 | (1.0) | | | |
| Pb | 0.12 | 0.34 | 0.50 | <u>0.73</u> | 0.33 | 0.10 | 0.12 | -0.25 | 0.16 | 0.15 | 0.22 | (1.0) | | |
| V | <u>0.52</u> | -0.68 | -0.38 | -0.45 | -0.50 | -0.32 | -0.55 | <u>0.73</u> | -0.30 | -0.15 | -0.46 | -0.44 | (1.0) | |
| Zn | 0.42 | 0.48 | <u>0.70</u> | -0.04 | 0.29 | 0.19 | 0.34 | -0.26 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | 0.12 | -0.22 | (1.0) |

Correlation coefficients of underlined value are significant at a level of 0.05.

Table 8. Mean concentration of trace elements ($\mu\text{g/g}$) in dust by parking lot age

| Age | Al | Ca | Cd | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | V | Zn |
|------------------------|------|-------|-----|-----|-----|-------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|
| A \geq 11year (n=22) | 9696 | 32031 | 8 | 164 | 326 | 18895 | 3503 | 6898 | 510 | 3880 | 41 | 718 | 28 | 1365 |
| B \leq 10year (n=26) | 8843 | 33664 | 6 | 131 | 215 | 17863 | 3565 | 6423 | 481 | 2953 | 55 | 236 | 26 | 1095 |
| A/B ratio | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.5 | 1.1 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 0.7 | 3.0 | 1.1 | 1.2 |

All subgroups are not significantly different at a level 0.05 by Mann-Whitney U test.

Table 9. Correlation coefficient between parking density and trace elements

| Site | Al | Ca | Cd | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | V | Zn |
|---------------------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|------|-------------|
| Ground roof (n=16) | -0.07 | -0.14 | <u>0.55</u> | <u>0.61</u> | -0.09 | 0.30 | -0.14 | 0.09 | 0.05 | -0.35 | -0.16 | <u>0.67</u> | 0.01 | 0.16 |
| Ground indoor (n=16) | -0.36 | -0.24 | -0.30 | 0.11 | -0.07 | 0.43 | -0.29 | -0.30 | 0.27 | -0.07 | <u>0.53</u> | -0.38 | 0.10 | -0.16 |
| Underground indoor (n=16) | <u>0.67</u> | 0.16 | 0.48 | -0.35 | -0.25 | -0.20 | 0.02 | 0.23 | -0.22 | 0.04 | -0.27 | -0.15 | 0.26 | <u>0.81</u> |
| Total (n=48) | 0.21 | 0.07 | <u>0.67</u> | <u>0.58</u> | -0.09 | 0.23 | -0.15 | -0.16 | 0.22 | -0.34 | -0.08 | <u>0.69</u> | 0.05 | 0.12 |

Correlation coefficients of underlined value are significant at a level of 0.05.

다. 이러한 결과는 송희봉 등¹⁸⁾과 도화석 등¹⁹⁾의 축적먼지 연구사례인 대구지역 학교(성분간 : 운동장 34개, 교실 17개)와 지하역사(성분간 : 실외 38개, 실내 27개)에서 미량원소성분간의 상관성 분석결과와도 모두 동일한 경향을 보였다.

한편 그룹별로 보면 지상옥상, 지상실내, 지하실내는 공통적으로 자연적-자연적 발생원 성분간인 Al과 Mg, V간(0.92, 0.67, 0.51과 0.88, 0.54, 0.52), Ca과 K간(0.82, 0.63, 0.64), Fe과 Mn간(0.84, 0.75, 0.54), Mg과 V간(0.83, 0.81, 0.73) 및 자연적-인위적 발생원 성분간인 Fe과 Ni간(0.58, 0.78, 0.81)에서 모두 유의한 상관성($P < 0.05$)을 보였다. 이러한 결과는 Table 6의 전체자료에서 이들 성분간에도 공통적으로 유의한 상관을 보인 결과와도 일치하였다.

3.4.2. 건물연수, 주차밀도와 미량원소성분간의 상관관계

건물연수가 미량원소성분에 미치는 영향을 평가하기 위해 주차장이 비교적 오래된 곳(11년 이상, 총 48곳 중 22곳)과 덜 오래된 곳(11년 미만, 총 48곳 중 26곳)을 기준으로 해서 그 평균농도를 비교한 결과는 Table 8과 같다.

통계적으로 유의한 상관성($P < 0.05$)을 보인 성분은 없었으나, 전반적으로 주차장연수가 11년 이상인 곳이 11년 미만인 곳에 비해 미량원소성분의 농도가 높거나 비슷한 수준을 보였다. 특히, 이들 중 11년 이상인 곳이 11년 미만인 곳보다 인위적 발생원 성분인 Cd과 Cu, Pb은 각각 1.4배와 1.5배, 3.0배나 높았다. 이는 주차장노후에 따른 바닥재질의 마모, 노면페인트의 마모, 벽면페인트의 마모, 환기시설의 노후 등의 복합적인 영향으로 사료된다. 이러한 결과는 도화석 등²⁰⁾과 Kim 등²⁸⁾의 연구사례인 대구지역과 대전지역의 주택노후에 따른 중금속성분의 분석결과(Pb : 대구 1.6배, 대전 1.6배)와도 동일한 경향을 보였다.

한편 주차밀도(Table 1)가 미량원소성분에 미치는 영향을 평가하기 위해 상관성을 분석한 결과는 Table 9와 같다.

전체자료로 보면 연료유의 연소, 폐기물의 소각 등의 인위적 발생원 성분^{25,26)}인 Cd (0.67), Cr (0.58), Pb (0.69)이 주차밀도와 통계적으로 유의한 상관성($P < 0.05$)을 보였다. 또한 주차장그룹별로 보면 지상옥상은 Cd (0.55), Cr (0.61),

Pb (0.67)이, 지상실내는 Ni (0.53)이, 지하실내는 Al (0.67)과 Zn (0.81)이 유의한 상관성($P < 0.05$)을 보였다. 이때 유의한 상관성을 보인 성분은 자연적 발생원 성분보다는 주로 자동차배출가스로부터의 오염물질과 관련된 인위적 발생원 성분²⁵⁾이 많았다. 이러한 결과는 Table 3의 주차밀도와 관련된 해석, 그리고 송희봉 등²⁹⁾의 실내공기질 연구사례인 대구지역 지하주차장에서의 연구결과(CO : 0.0099 car/m³일 때 11.6 ppm, 0.0073 car/m³일 때 4.9 ppm)와도 비슷한 해석을 하였다. 이상의 결과로부터 주차장먼지에 함유된 유해중금속성분은 주차장연수가 오래될수록 주차밀도가 높을수록 높은 농도를 보여 건물주는 오래된 주차장을 리모델링하고 주차면적당 주차대수를 최대한 줄여서 관리해야 할 필요성이 있다고 생각된다.

4. 결론

2011년 3월에 대구광역시에 위치한 대형유통업소주차장 총 48곳을 대상으로 축적된 먼지시료를 채취하여 100 μm 이하로 걸러서 산추출 후 ICP로 14개 원소를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 농축계수를 이용한 미량원소성분의 발생원을 평가한 결과, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, V의 경우엔 자연적인 발생원의 영향을 받고 있는 것으로 추정되었고, 반면에 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 경우엔 인위적인 발생원의 영향을 받고 있는 것으로 추정되었다.
- 2) 분석된 미량원소성분의 농도는 자연적 발생원 성분(수~수십 mg/g)이 인위적 발생원 성분(수~수백 $\mu\text{g/g}$)보다 뚜렷하게 높은 수준을 보였다. 그룹별로는 인위적 발생원 성분의 경우엔 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 더 높은 농도를 보였다.
- 3) 미량원소성분의 조성백분율은 인위적 발생원 성분에 비해 자연적 발생원 성분이 대부분을 차지하였다. 그룹별로는 자연적 발생원 성분의 경우 지상실내가 지상옥상과 지하실

내보다 함유율이 높았고, 반면에 인위적 발생원 성분의 경우 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 함유율이 높았다.

4) 오염지수를 이용한 유해중금속성분의 오염도를 평가한 결과, 전반적으로 중금속으로부터 거의 오염되지 않은 수준을 보였다. 그룹별로는 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 상대적으로 주차밀도가 높아 중금속오염도도 높았다.

5) 미량원소성분간의 상관성을 분석한 결과, 자연적-인위적 발생원 성분간이 자연적-자연적 발생원 성분간과 인위적-인위적 발생원 성분간에 비해 유의한 양의 상관성이 많았다. 그룹별로는 지상옥상이 지상실내와 지하실내보다 미량원소성분간에 유의한 양의 상관성이 많았다. 아울러 유해중금속성분은 주차장연수가 오래될수록 주차밀도가 높을수록 높은 농도를 보였다.

KSEE

참고문헌

- Fergusson, J. E. and Kim, N. D., "Trace elements in street and house dusts : sources an speciation," *Sci. Total Environ.*, **100**, 125~150(1991).
- Banerjee, A. D. K., "Heavy metal levels and solid phase speciation in street dust of Delhi, India," *Environ. Pollut.*, **123**(1), 95~105(2003).
- Meza-Figueroa, D., De la O-Villanueva, M. and De la Parra, M. L., "Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, Mexico," *Atmos. Environ.*, **41**, 276~288(2007).
- Yap, C. K., Chew, W. Y. and Tan, S. G., "Heavy Metal Concentrations in Ceiling Fan and Roadside Car park Dust Collected from Residential Colleges in Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor," *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.*, **35**(1), 75~83(2012).
- 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., Royset, 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).
- Chattopadhyay, G., Lin, K. C. P. and Feitz, A. J., "Household dust metal levels in the Sydney metropolitan area," *Environ. Res.*, **93**, 301~307(2003).
- Tong, S. T. Y., "Indoor and outdoor household dust contamination in Cincinnati, Ohio, USA," *Environ. Geochem.*, **20**, 123~133(1998).
- Akhter, M. S. and Madany, I. M., "Heavy metals in street and house dust in Bahrain," *Water, Air, Soil Pollut.*, **66**, 111~119(1993).
- Rasmussen, P. E., Subramanian, K. S. and Jessiman, B. J., "A multi-element profile of housedust in relation to exterior dust and soil in the city of Ottawa, Canada," *Sci. Total Environ.*, **267**, 125~140(2001).
- Ordóñez, A., Loredo, 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).
- 이진현, 민병연, "우리나라 일부도시의 중·고등학교에서 강하분진으로 형성된 축적분진에 함유된 중금속의 분포와 특성에 대한 연구," *한국환경위생학회지*, **29**(3), 21~27(2003).
- 조규성, "전주시내 중고등학교 실내·외 환경의 중금속 오염에 대한 연구," *한국환경과학회지*, **9**(6), 495~503(2000).
- 김용환, 정덕호, 조규성, "전북 고창지역 학교 실내외 환경의 중금속 오염 특성," *한국지구과학회지*, **27**(1), 73~82(2006).
- 송희봉, 이은영, 도화석, 정철수, 신동찬, 이명숙, 백윤경, 전성숙, 신원식, "대구지역 도로먼지에 함유된 미량원소성분과 오염원 평가," *대한환경공학회지*, **29**(7), 793~800(2007).
- 송희봉, 도화석, 이명숙, 신동찬, 윤호석, 박진희, 정철수, 강제형, "대구지역 학교먼지에 함유된 미량원소성분 분석과 오염원 평가," *대한환경공학회지*, **29**(12), 1390~1399(2007).
- 도화석, 송희봉, 신동찬, 박진희, 이명숙, 윤호석, 강혜정, 피영규, "대구지역 지하철역사 공기여과필터 포집먼지에 함유된 중금속성분의 특성평가," *대한환경공학회지*, **31**(1), 42~50(2009).
- 도화석, 송희봉, 정연옥, 윤호석, 박진희, 한정옥, 강혜정, 피영규, "대구지역 일반주택의 축적먼지 중 미량원소성분 분석과 오염원 평가," *대한환경공학회지*, **32**(1), 69~78(2010).
- 백성욱, 송희봉, 신동찬, 홍성희, 장혁상, "대구지역 공중위생법 규제대상시설의 실내공기 중 입자상오염물질의 계절별 및 지점별 농도분포 특성," *한국대기보전학회지*, **14**(3), 163~175(1998).
- Rahn, K. A., "Sources of trace elements in aerosols-an approach to clean air," Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 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, 491(1988).
- 최진수, 황승만, 백성욱, "대구지역 대기 중 부유먼지에 함유된 화학성분의 입도별 분포 특성," *대한환경공학회지*, **17**(12), 1245~1259(1995).
- 최성우, 송형도, "대구지역 부유분진 중 미량중금속성분의 발생원 특성연구," *한국대기환경학회지*, **16**(5), 469~476(2000).
- 환경부, 토양환경보전법 시행규칙(2011).
- Kim, K. W., Myung, J. H., Ahn, J. S. and Chon, H. T., "Heavy metal contamination in dusts and stream sediments in the Taejon area, Korea," *J. Geochem. Explor.*, **64**, 409~419(1998).
- 송희봉, 권택규, 홍성희, 백성욱, "대구지역 대규모 지하주차장의 실내공기질 특성평가," *대한환경공학회지*, **20**(9), 1315~1330(1998).