

# 산업 도시의 산업단지 부지와 주거 지역의 대기 중 호흡성 분진과 구성 미량 원소의 특성

김 모 근, 신 승 호<sup>1</sup>, 조 완 근<sup>1,\*</sup>

경상북도 보건환경연구원, <sup>1</sup>경북대학교 환경공학과

## Characteristics of Atmospheric Respirable Particulate Matters and Trace Elements within Industrial Complex and Residential Sites in an Industrial City

Mo-Geun Kim, Seung-Ho Shin<sup>1</sup> and Wan-Kuen Jo<sup>1,\*</sup>

National Environment and Health Research Institute of Kyungpook Province

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

### ABSTRACT

The current study was designed to scientifically evaluate the atmospheric particulate pollution in residences relative to their proximity to a Korean major iron/metal industrial complex (IMIC). This objective was achieved by measuring the concentrations and elemental composition of particulate matter with aerodynamic diameters equal to or less than 10 $\mu$ m (PM10) in industrial ambient air from IMIC and residential ambient air with relative proximities to IMIC. The trace metals were analyzed using an inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy (ICP-AES). The industrial mean values exceeded the Korean year/70- $\mu$ g/m<sup>3</sup> standard for PM10, whereas the residential mean values did not. However, the maximum residential values did exceed or were close to the Korean PM10 year standard. For individual elements, the ambient concentrations ranged widely from values in the order of a few ng/m<sup>3</sup> to thousands of ng/m<sup>3</sup>. The residential mean mass concentrations in the PM10 measured in the present study were higher than or similar to those reported in earlier studies. This study suggests that residents in neighborhoods near the IMIC are exposed to elevated particulate levels compared to residents living further away from such a source.

**Key words** : residential exposure, trace element, ICP-AES, iron/metal industrial complex, proximity

### 서 론

여러 연구자들이 대기 중 PM10(particulate mat-

ters less than 10 $\mu$ m)이 사망률에 직간접적으로 영향을 미치는 것으로 보고하였다(Ou *et al.*, 2008; Bae and Park, 2009; Jimwénez *et al.*, 2009). 나아가, PM10 분진에 포함하고 있는 대기오염물질인 중금속은 환경적인 독성연구 및 직업병의 재해물질로 분류되어 연구되어 왔다(Moreno *et al.*, 2006; Nyarko *et al.*, 2006; Sekine *et al.*, 2008). 이와 같은 유해성이 있는

\* To whom correspondence should be addressed.  
Tel: +82-53-950-6584, Fax: +82-53-850-6579  
E-mail: wkjo@knu.ac.kr

대기 중의 입자상물질을 포함한 각종 화학종들은 화석연료를 에너지원으로 이용하는 각종 산업시설이나, 급격히 증가한 대형화물차로부터 대기 중으로 방출되어 부유분진의 농도를 증가시키는 요인이 되고 있다 (Subramanian *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2008).

주요한 산업 활동 중의 하나인 제철산업은 대기 중에 각종 무기화합물질을 다량 배출하는데 (Ariane *et al.*, 2001; Gupta *et al.*, 2007; Hagelstein, 2009), 우리나라에서 제철산업은 대단히 중요한 기반 산업 활동의 한 영역이며 특히 포항지역에서는 핵심적인 산업생산 분야로 중추적인 역할을 해 왔다. 연구대상 지역인 포항지역은 남동 방향으로 20,211,000 m<sup>2</sup> 면적의 철강복합 산업지역 (iron/metal industrial complex, IMIC)이 위치하고 있다. IMIC의 지역에 위치하고 있는 Pohang iron and steel Co. Ltd. (POSCO)는 8,891,000 m<sup>2</sup>의 부지면적을 가진 오늘날 세계에서 가장 경쟁력이 있는 제철회사 중의 하나이다. 포항 철강복합 산업지역은 POSCO를 비롯하여 철강관련 산업체 및 비철금속관련 업체를 포함하여 약 260개의 업체가 입주하여 현재 활발한 산업 활동을 하고 있다. 포항의 인구는 약 52만이며, IMIC 지역과 인접한 지역에서도 주거지역을 형성하여 많은 시민들이 생산 활동을 영위하면서 살아가고 있다. IMIC 지역으로부터 배출되는 입자상 대기 오염물질은 산업지역 인근에 거주하고 있는 주민들의 건강에 유해한 영향을 줄 수 있을 것이다. 그러나 지금까지 일부 지역 연구자들이 IMIC 지역과 인근 주거지역에서의 입자상 대기오염물질의 측정과 분석을 수행해 왔지만, 공개된 문헌을 찾기는 쉽지 않은 실정이다. 공개 문헌 미비로 인해, 해당 지역의 대기오염은 포항시의 환경정책 관련자 또는 이해 당사자들의 다소 주관적이고 편향적인 주장 또는 의견에만 기초하여 평가되고 있는 실정이다. 따라서, 포항지역의 거주주민들, 오염원 배출 산업체 종사자나 사업주 모두에게 있어서 불만족스러울 뿐 아니라, 대기환경의 평가에 현실적인 대안을 제시하는 것이 쉽지 않은 상황이어서, IMIC 및 인근 주거지역의 입자상 대기오염물질의 적절한 평가방법의 필요성이 시급히 요구되는 실정이다. 결과적으로, 본 연구는 IMIC 지역 주변의 대기 입자상 오염물질의 노출을 과학적으로 평가하기 위하여 수행되었다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 IMIC 지역 안에 위치하고 각종 대기오염물질의 배출오염원으로 예상되는 산업

지역과 산업지역으로부터 인접한 거리가 다른 두 주거지역에서 PM10 중에 포함된 미량 원소 성분을 측정하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 지점

본 연구는 철강 산업단지의 지역적인 특성을 잘 대변해 줄 수 있는 산업지역 1개 지점과 그 지역으로부터 방출되는 부유오염물질에 대하여 직접 혹은 간접적으로 영향을 받는 주거지역의 대기 환경을 대상으로 PM10의 농도특성과 부유분진에 함유된 화합물의 성분비를 분석하여 시민들이 거주하는 주거지역에 대해 오염원 기여도와 노출정도를 평가해 보고자 고안되었다. 이를 위하여 본 연구에서는 제철과 관련하여 철광석의 운반, 소결, 용융, 제련 및 2차 가공시설을 포함한 금속관련 공장이 밀집해 높은 농도의 대기부유물질과 중금속의 배출이 예상되는 철강 산업지역을 오염원 배출 대상지역으로 선정하였으며, 산업단지 부지내 채취지점 (IND)은 장흥동 동일산업(주) 3층 옥상으로 지상으로부터 약 9m 높이에 High Volume Air Sampler를 설치했으며, 복합철강 산업지역으로 선정하여 표기하였다. 철강공단으로부터 오염원 노출평가를 위하여 선정한 주거지역 A (RES A)의 위치는 해도 2동 동사무소의 4층 건물옥상으로 지상으로부터 약 12m 높이에 시료채취 장치를 설치하였다. RES A는 간선 자동차도로와 인접하고, 철강공단지역과는 형산강을 사이에 두고 북쪽으로 약 1km 거리에 위치해 있으며, 동쪽방향으로 해안과 약 1.5km 거리에 위치해 있어 산업지역으로부터 배출되는 대기오염물질의 영향을 받을 수 있고, 인접한 해안으로부터 해염입자의 영향도 받을 수 있는 곳으로 주거지역으로 형성된 마을이다. 주거지역 B (RES B)는 최근에 신설된 대단지 아파트가 건립된 대표적인 주거 밀집지역으로, 철강공단지역과는 북쪽으로 약 6.5km 거리에 위치하고, 작은 야산이 북쪽에 위치하고 있으며, 동쪽방향으로는 해안과 약 2km 정도 떨어져 있어, 바다와는 가깝지만 철강공단으로부터 발생하는 대기오염물질의 영향이 다소 적을 것으로 예상된다. RES B의 시료채취 지점은 북구 장량동 보진소 4층 옥상으로 지상에서 약 12m 높이에 High Volume Air Sampler를

설치하였다.

IND, RES A 및 RES B의 3개 지역 PM10 시료채취는 해양성 기후와 계절풍을 감안하여 2004년 6월부터 2005년 2월 사이에 겨울, 여름 두 계절별로 구분하여 시료 채취하고, 매 측정 시 24시간 동안 연속하여 28~33일간 측정하였다.

## 2. 시료채취 방법

시료채취 장비를 현장에 운반하기 전 실험실에서 고용량 시료채취기(High volume air sampler)와 PM10 주입장치(Andersen Instrument MFC, USA)를 준비하고 샘플러의 유량을 보정하였다. 여지에 색인번호를 기입하고 전자저울에서 평량을 한 QM-A(Whatman QM-A, 8"×10" filter)필터를 비닐 팩에 준비하였다. 다음 단계로 여지필터의 균질도 등의 외관을 살핀 후에 시료채취 장소에서 시료 채취기를 설치하였다. 시료 채취기를 가동하고 날짜와 시간을 기록하고, 초기 가동 5분 후에 흡입유량의 배출구 쪽의 마노메타를 확인하여 미리 작성한 유량의 검량선으로 부터 유량 비를 체크하였다. 유량은 가동초기 5분과 종료 전 5분에 읽은 마노미터 값을 평균하여 미리 작성한 검량선으로 부터  $m^3/min$  단위로 기록되었다. 시료 채취 마지막 단계에서 유량, 온도, 기압, 채취시간을 기록하여 실측 유량의 체적을 보정하고, 시료 채취기의 여지홀더 상단의 QM-A 필터에 수집한 입자상물질의 손실에 주의해서 여지를 포집한 부분을 안쪽으로 하고 여지를 반으로 접어서 비닐 팩에 넣어 이력관리를 하였다.

본 연구에서 EPA 표준상태(25°C, 760 mmHg)에서 채취유량과 여지의 무게는  $\mu g/ stdm^3$ (Inorganic Compendium Method IO-2.4) 단위로 표시하였다. 여지의 평량은  $25 \pm 1^\circ C$ , 상대습도 < 50% 이하인 청정실에서 0.01 mg까지 측정 가능한 전자저울(Sartorius LE225D, Germany)을 이용하여 중량을 분석하고 이력관리를 하였다. SPM(suspended particulate matter) 중의 중금속 전처리 방법으로, EPA methods(Inorganic Compendium Method IO-3)에서는 microwave extraction procedure(MEP)와 hot acid extraction procedure이 사용되고 있으나, 최근에 전처리 장비가 발달하여 사용이 간편하고, 회수율 시험에서 보다 우수한 MEP가 많이 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서도 MEP에 의한 전 처리방법으로 무기화합물의 각 성분들을 처리하였다.

## 3. 시료 전처리 및 분석

실험실에서 시료 용기의 준비과정에서 발생할 수 있는 오염원을 방지하기 위하여 모든 마이크로웨이브 장치용 용기(PFA) 12세트를 다음과 같은 방법으로 세정 후에 사용하였다. 먼저 용기 각각에 C-HNO<sub>3</sub> 10 mL를 넣고, MEP 전처리장치(CEM MDS 2000, USA)에 질산이 담긴 용기를 장착하고, 마이크로웨이브 장치를 100% power-10 min 동안 가동 처리한 후에 용기를 탈 이온화수로 세정하여 건조하였다. 이때에 CEM MDS 장치에는 용기를 최대 12개까지 장착할 수 있는데 용기 하나에 대략 5% 전력을 증감하여 사용하였다.

원소 분석을 위하여 유도결합플라즈마 원자 발광광도계(ICP-AES, Perkin Elmer Optima 4300DV, USA)가 이용되었다. 분석 방법은 먼저 압축공기와 가스(Ar)의 밸브를 연 후, 분광기 및 검출기의 최적화를 위하여 분석기기를 켜서 약 80분간 예비 가동시켰다. 검량선법에 의한 검량선을 작성하기 위하여 표준물질 농도는 최소 4개 이상을 이용하고, 공 시료 분석을 통해 측정 대상 물질의 농도에 공 시료의 농도를 자동으로 가감 계산되도록 프로그램이 구성되었다.

석영섬유여지에 채취된 부유분진 중의 분석 대상 오염물질의 농도가 공 시료 여지보다 낮은 것은 없었으나, 시료채취 기간 모터 이상으로 인한 채취유량( $1.13 m^3/min$ )이 미흡하거나, 채취시간( $24 h \pm 1 h$ )이 규정에 부합되는 경우는 포집된 부유물질의 여지는 그 농도를 참조만 하고 자료 분석에서는 제외되었다. 또한 분석대상오염물질 중의 Mo의 경우는 산업지역에서 겨울철에 5일 정도 미량 검출되었으나, 매 여지의 함량농도의 편차가 심하여 분석 자료에서 제외되었다. B와 Se의 경우는 주거지역에서 미량 검출되었으나 현저히 낮은 농도인 검출한계 이하 농도로 나타내어 분석 자료에서 제외되었으며, Be 또한 전 지역에서 검출한계 이하로 검출되어 통계적인 신뢰성이 낮은 것으로 판단하여 분석 자료에서 제외되었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 자료의 질 검증

자료의 질 검증을 위해서 대상오염물질에 대해

**Table 1.** Recovery (%) of standard reference materials (NIST SRM 1648) for trace metal analysis

| Component | NIST SRM 1648 certified values ( $\mu\text{g/g}$ ) | Recovery (%) |
|-----------|--|--------------|
| Ba        | 373  | 101          |
| Cd        | $75 \pm 7$   | 92           |
| Cu        | $609 \pm 27$                                       | 94           |
| Fe        | $39100 \pm 1000$                                   | 86           |
| Mg        | 8000   | 83           |
| Mn        | $786 \pm 17$                                       | 82           |
| Ni        | $82 \pm 3$   | 81           |
| Pb        | $6550 \pm 80$                                      | 94           |
| Se        | $27 \pm 1$   | 102          |
| V         | $140 \pm 3$  | 115          |
| Zn        | $4760 \pm 140$                                     | 91           |

회수율을 평가하였다. 공시료 여지를 1"×8" 크기의 strip로 자른 후, 2번째 1"×8" 크기의 strip을 선택하여 대상오염물질의 농도와 비슷한 표준품의 농도를 제조하고, 전처리 용기에 strip과 NIST 1648(National Institute for Standards and Technology Standard Reference Material)의 제조 농도를 혼합하여 시료 전처리 과정과 동일하게 처리한 후에 ICP-AES로 분석하여 회수율을 평가하여 Table 1에 나타내었다. 표준입자상물질을 microwave 추출 전처리 법에 따라 처리한 결과 회수율이 81~115% 범위로, 모든 대상오염물질에 대해 U.S. EPA에서 인정하는 회수율 범위인 80~120%를 만족하였다.

## 2. PM10 및 미량 원소 농도의 지역적 및 시간적 특성

산업단지 부지와 두개의 주거지역에서 PM10과 이를 구성하는 미량 원소 성분을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. PM10의 경우, 산업지역 평균 농도가  $76 \mu\text{g/m}^3$ 로서 두 주거지역 A와 B에서 각각 측정된 평균농도 47과  $37 \mu\text{g/m}^3$ 보다 훨씬 높게 나타났다. 미량 원소의 경우에도, Na를 제외하고는 모두 산업지역 농도가 두 주거지역 농도보다 통계적으로 높게 나타났다. 예를 들면, 산업지역의 Pb 평균 농도가  $94 \text{ ng/m}^3$ 로서 주거지역 B의  $19 \text{ ng/m}^3$ 보다 약 5배 높게 나타났다. 부유 분진에 함유된 Fe 농도의 경우, 산업지역 농도가 주거지역 농도보다 무려 16배 정도 높게 나타나 다른 미량원소들과 비교하여 가장 높았다. 산업지역과 주거지역에 있어서 대

상오염물질의 농도 차이에 있어서, 발생원이 주로 인위적인 성분인 Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn 등은 높은 농도 차를 나타내는 반면, 토양 및 도로 재 비산먼지, 해염입자 등이 오염원인 Al, Ca, K, Mg, Na, Si 등은 약간 높거나 비슷한 것으로 나타났다. 주거지역보다 산업지역에서 높게 나타난 것은 조사 산업지역의 주요한 산업 활동인 이에 관련된 원자재 및 제품과 같은 물류 이동 차량 자체의 PM10과 미량원소 배출과 차량 이동에 따른 도로상의 분진의 재비산, 그리고 지역의 다른 산업 활동에 의한 배출 때문인 것으로 추정된다. 이러한 가설은 제철산업 공정(Ariane *et al.*, 2001; Gupta *et al.*, 2007; Hagelstein, 2009)과 그 외 다양한 산업 활동(Bhanarkar *et al.*, 2005; Beddows and Harrison, 2008; Morawska *et al.*, 2008; Winiwarter *et al.*, 2009)이 PM10과 여러 중금속의 오염원이라는 선행연구 결과에 기초한다. 한편, Na의 경우 산업지역과 주거지역 A에서 서로 통계적 유의성을 나타내지 않았지만, 이들 두 지역의 농도가 주거지역 B 농도보다는 통계적으로 높게 나타났다. 이러한 경향은 해풍으로 인한 해염입자의 영향 차이 때문인 것으로 사료된다. 두 주거지역(주거지역 A와 B)와는 달리, 산업지역의 경우 평균 PM10 농도가 국내 대기환경기준인 24시간 평균치  $100 \mu\text{g/m}^3$ 을 초과하지는 않았지만 연간 평균치  $50 \mu\text{g/m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났으므로 포항 철강 산업 부지 주민 및 근로자들의 건강 보호를 위해서는 이 지역에서 효율적인 PM10 관리가 필요한 것으로 나타났다. 나아가, Table 2에 나타난 산업지역과 인접한 지역인 주거지역 A와 산업지역과 다소 멀리 떨어져 있는 주거지역 B와의 PM10 농도 비교에서는 인접 주거지역에서 PM10의 농도가 26~32% 정도 높은 농도를 나타내어 산업지역에 인접한 주거지역 A가 먼 주거지역 B보다 인위적인 오염물질의 발생원에 영향이 더 큰 것으로 추정할 수 있다.

지역별 PM10과 미량 원소의 시간적 특성을 조사하기 위하여 산업지역, 주거지역 A 그리고 주거지역 B에서 측정된 농도를 통계적으로 요약하여 각각 Table 3, 4 그리고 5에 나타내었다. 산업지역, 주거지역 A 그리고 주거지역 B의 계절별 PM10 평균 농도의 경우, 겨울철 농도가 여름철 농도보다 각각 21~30%, 22~23%와 17~18% 정도 높게 나타났다. PM10 농도의 이러한 계절적인 차이는 겨울철 산업용 및 난방용 연료의 소비량 증가와 겨울철 자동차

**Table 2.** Statistics of PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) concentrations measured in an industrial (IND) and two residential sites (RES A and RES B)<sup>a</sup>

| PM10/TM | IND                |      |        | RES A             |      |        | RES B             |     |        |
|---------|--------------------|------|--------|-------------------|------|--------|-------------------|-----|--------|
|         | Mean               | SD   | Median | Mean              | SD   | Median | Mean              | SD  | Median |
| PM10    | 76 <sup>AB</sup>   | 24   | 70     | 47 <sup>AC</sup>  | 24   | 42     | 37 <sup>BC</sup>  | 14  | 35     |
| Al      | 421 <sup>AB</sup>  | 193  | 411    | 329 <sup>AC</sup> | 215  | 241    | 160 <sup>BC</sup> | 82  | 160    |
| Ba      | 18 <sup>AB</sup>   | 9.0  | 19     | 45 <sup>AC</sup>  | 51   | 25     | 7.6 <sup>BC</sup> | 6.2 | 6.4    |
| Ca      | 1484 <sup>AB</sup> | 804  | 1415   | 829 <sup>AC</sup> | 757  | 676    | 413 <sup>BC</sup> | 316 | 361    |
| Cd      | 1.9 <sup>AB</sup>  | 0.9  | 1.8    | 0.9 <sup>AC</sup> | 0.6  | 0.8    | 0.5 <sup>BC</sup> | 0.4 | 0.5    |
| Co      | 1.1 <sup>AB</sup>  | 0.5  | 1.0    | 0.4 <sup>A</sup>  | 0.2  | 0.5    | 0.2 <sup>B</sup>  | 0.1 | 0.2    |
| Cr      | 24 <sup>AB</sup>   | 17   | 20     | 6.4 <sup>AC</sup> | 7.4  | 4.0    | 2.5 <sup>BC</sup> | 2.3 | 1.8    |
| Cu      | 196 <sup>AB</sup>  | 128  | 166    | 68 <sup>AC</sup>  | 123  | 29     | 36 <sup>BC</sup>  | 20  | 33     |
| Fe      | 5423 <sup>AB</sup> | 2789 | 4881   | 788 <sup>AC</sup> | 494  | 642    | 334 <sup>BC</sup> | 203 | 270    |
| K       | 382 <sup>AB</sup>  | 242  | 355    | 281 <sup>A</sup>  | 169  | 228    | 245 <sup>B</sup>  | 122 | 164    |
| Mg      | 387 <sup>AB</sup>  | 261  | 333    | 233 <sup>AC</sup> | 127  | 189    | 172 <sup>BC</sup> | 93  | 147    |
| Mn      | 245 <sup>AB</sup>  | 219  | 163    | 32 <sup>AC</sup>  | 22   | 28     | 16 <sup>BC</sup>  | 9.6 | 16     |
| Na      | 1071               | 764  | 885    | 1340 <sup>C</sup> | 1063 | 962    | 955 <sup>C</sup>  | 754 | 701    |
| Ni      | 14 <sup>AB</sup>   | 8.4  | 13     | 5.3 <sup>AC</sup> | 5.4  | 2.8    | 2.0 <sup>BC</sup> | 1.7 | 1.8    |
| Pb      | 94 <sup>AB</sup>   | 61   | 89     | 25 <sup>A</sup>   | 14   | 22     | 19 <sup>B</sup>   | 9.7 | 17     |
| Sb      | 1.8 <sup>AB</sup>  | 0.9  | 0.4    | 0.8 <sup>AC</sup> | 0.9  | 0.4    | 0.2 <sup>BC</sup> | 0.5 | 0      |
| Si      | 734 <sup>AB</sup>  | 347  | 685    | 950 <sup>AC</sup> | 1080 | 483    | 232 <sup>BC</sup> | 122 | 219    |
| Ti      | 21 <sup>AB</sup>   | 8.8  | 20     | 9.9 <sup>AC</sup> | 6.9  | 11     | 7.8 <sup>BC</sup> | 4.6 | 7.3    |
| Tl      | 0.7 <sup>B</sup>   | 0.7  | 0.7    | 0.5               | 0.5  | 0.5    | 0.4 <sup>B</sup>  | 0.4 | 0.3    |
| V       | 6.5 <sup>AB</sup>  | 4.2  | 5.4    | 1.1 <sup>AC</sup> | 1.1  | 0.9    | 0.7 <sup>BC</sup> | 0.9 | 0.3    |
| Zn      | 389 <sup>AB</sup>  | 397  | 217    | 93 <sup>AC</sup>  | 62   | 83     | 38 <sup>BC</sup>  | 34  | 32     |

<sup>a</sup>The number of samples: IND, N=55; RES A, N=55; RES B, N=55; RES A represents a residential site near the industrial complex; RES B represents a residential site far away the industrial complex; concentrations measured below the detection limit were set equal to 1/2 of the detection limit for calculations of the median and mean values; Superscript A represents that there is a significant difference between IND and RES A; Superscript B represents that there is a significant difference between IND and RES B; Superscript C represents that there is a significant difference between RES A and RES B; Different characters represent a significant difference at  $p < 0.05$  obtained from a statistical analysis (analysis of variance).

배출가스 증가가 하나의 요인이고 (Morawska *et al.*, 2008), 겨울철의 낮은 강수량도 겨울철 PM10 농도 증가 요인이지만 (Vardoulakis S and Kassomenos, 2008), 겨울철의 상대습도(58%)가 여름철의 상대습도(77%) 보다 낮은 것은 겨울철 PM10 농도 감소 요인이다 (Sasaki and Sakamoto, 2005; Vardoulakis and Kassomenos, 2008). 이와 같이 계절별 PM10 농도 증가와 감소 요인 모두가 작용할 수 있지만, 겨울철의 높은 PM10 농도 결과를 고려할 때 PM10 증가 요인들이 감소 요인보다 큰 영향을 미친 것으로 해석된다.

부유분진 중의 각종 화학성분의 경우에는, 산업지역에서는 5종의 미량원소(K, Mn, Na, Sb, Ti), 주거지역 A에서는 4종의 미량원소(Cd, Mn, Tl, V) 그리고 주거지역 B에서는 10종의 미량원소(Cd, Co, Cr,

Mn, Ni, Pb, Sb, Si, Ti, V)의 겨울철 농도가 여름철 농도 보다 오히려 낮게 나타났고 각 지역의 나머지 원소에 대해서는 겨울철 농도가 여름철 농도보다 높거나 계절 별로 차이가 없는 것으로 나타났다. 여름철 농도와 비교하여 겨울철 농도가 높게 나타난 미량원소 성분들에 대해서는 겨울철에 산업용 및 난방용 연료 연소 증가가 주요 요인 중에 하나인 것으로 추정된다 (Vardoulakis and Kassomenos, 2008). 반면에, 여름철 농도가 높게 나타난 미량원소 성분들의 경우, 두 계절간의 산업 활동 차이 그리고 대기의 안정도와 혼합고와 같은 환경적 인자 차이가 주요 변수 중 하나로 추정된다.

산업지역, 주거지역 A 그리고 주거지역 B의 PM10 과 미량원소들의 평균 농도, 표준편차, 중간 값을 주중과 주말로 구분하여 분석한 결과도 Table 3, 4 그

**Table 3.** Summary of PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) concentrations measured in an industrial (IND) according to measurement period<sup>a</sup>

| PM <sub>10</sub> /TM | Season | Weekday            |      |        | Weekend            |      |        |
|----------------------|--------|--------------------|------|--------|--------------------|------|--------|
|                      |        | Mean               | SD   | Median | Mean               | SD   | Median |
| PM <sub>10</sub>     | Win.   | 91 <sup>AB</sup>   | 28   | 81     | 57 <sup>AB</sup>   | 16   | 57     |
|                      | Sum.   | 71 <sup>AB</sup>   | 16   | 67     | 72 <sup>AB</sup>   | 24   | 65     |
| Al                   | Win.   | 533 <sup>AB</sup>  | 313  | 479    | 399 <sup>AB</sup>  | 179  | 360    |
|                      | Sum.   | 373 <sup>AB</sup>  | 105  | 377    | 294 <sup>AB</sup>  | 78   | 281    |
| Ba                   | Win.   | 25 <sup>B</sup>    | 11   | 22     | 23 <sup>B</sup>    | 7.1  | 24     |
|                      | Sum.   | 14 <sup>B</sup>    | 8.1  | 12     | 8.4 <sup>AB</sup>  | 6.1  | 8.6    |
| Ca                   | Win.   | 1519 <sup>AB</sup> | 1025 | 1431   | 974 <sup>AB</sup>  | 567  | 1027   |
|                      | Sum.   | 1663 <sup>AB</sup> | 643  | 1519   | 1497 <sup>AB</sup> | 785  | 1167   |
| Cd                   | Win.   | 2.3 <sup>B</sup>   | 0.9  | 2.2    | 1.4 <sup>B</sup>   | 0.5  | 1.4    |
|                      | Sum.   | 1.9 <sup>B</sup>   | 0.9  | 1.7    | 1.7                | 1.1  | 1.2    |
| Co                   | Win.   | 1.5 <sup>AB</sup>  | 0.7  | 1.4    | 1.0 <sup>A</sup>   | 0.3  | 1.1    |
|                      | Sum.   | 0.9 <sup>B</sup>   | 0.3  | 1.0    | 0.7                | 0.3  | 0.6    |
| Cr                   | Win.   | 32 <sup>AB</sup>   | 28   | 27     | 21 <sup>AB</sup>   | 22   | 15     |
|                      | Sum.   | 20 <sup>AB</sup>   | 7.7  | 18     | 16 <sup>AB</sup>   | 8.1  | 16     |
| Cu                   | Win.   | 120 <sup>B</sup>   | 164  | 61     | 113 <sup>B</sup>   | 146  | 43     |
|                      | Sum.   | 275 <sup>B</sup>   | 111  | 297    | 270 <sup>B</sup>   | 68   | 275    |
| Fe                   | Win.   | 6912 <sup>AB</sup> | 3573 | 6832   | 3569 <sup>AB</sup> | 1868 | 3807   |
|                      | Sum.   | 5552 <sup>AB</sup> | 2044 | 5645   | 3413 <sup>AB</sup> | 1353 | 3150   |
| K                    | Win.   | 388 <sup>A</sup>   | 239  | 354    | 307 <sup>AB</sup>  | 148  | 243    |
|                      | Sum.   | 359 <sup>A</sup>   | 185  | 365    | 512 <sup>AB</sup>  | 410  | 331    |
| Mg                   | Win.   | 436 <sup>B</sup>   | 303  | 457    | 418 <sup>B</sup>   | 549  | 239    |
|                      | Sum.   | 335 <sup>B</sup>   | 123  | 325    | 364 <sup>B</sup>   | 180  | 304    |
| Mn                   | Win.   | 252 <sup>A</sup>   | 265  | 137    | 93 <sup>AB</sup>   | 49   | 83     |
|                      | Sum.   | 242 <sup>A</sup>   | 169  | 179    | 407 <sup>AB</sup>  | 253  | 382    |
| Na                   | Win.   | 992                | 654  | 892    | 999 <sup>B</sup>   | 726  | 1024   |
|                      | Sum.   | 899                | 613  | 656    | 1803 <sup>B</sup>  | 1117 | 1572   |
| Ni                   | Win.   | 21 <sup>AB</sup>   | 14   | 17     | 13 <sup>AB</sup>   | 7.9  | 14     |
|                      | Sum.   | 11 <sup>AB</sup>   | 4.4  | 12     | 8.8 <sup>AB</sup>  | 3.7  | 8.7    |
| Pb                   | Win.   | 133 <sup>AB</sup>  | 70   | 127    | 108 <sup>AB</sup>  | 54   | 99     |
|                      | Sum.   | 57 <sup>AB</sup>   | 47   | 53     | 77 <sup>AB</sup>   | 80   | 41     |
| Sb                   | Win.   | 1.7 <sup>A</sup>   | 1.1  | 0.6    | 0.4 <sup>A</sup>   | 0.6  | 0.0    |
|                      | Sum.   | 1.8 <sup>A</sup>   | 0.7  | 0.9    | 0.4 <sup>A</sup>   | 0.9  | 0.0    |
| Si                   | Win.   | 896 <sup>AB</sup>  | 540  | 806    | 822 <sup>AB</sup>  | 550  | 628    |
|                      | Sum.   | 616 <sup>AB</sup>  | 168  | 647    | 540 <sup>AB</sup>  | 133  | 532    |
| Ti                   | Win.   | 25 <sup>A</sup>    | 12   | 23     | 17 <sup>A</sup>    | 7.8  | 16     |
|                      | Sum.   | 22 <sup>A</sup>    | 6.8  | 22     | 16 <sup>A</sup>    | 3.8  | 16     |
| Tl                   | Win.   | 0.3 <sup>B</sup>   | 0.6  | 0.0    | 0.5 <sup>AB</sup>  | 0.4  | 0.6    |
|                      | Sum.   | 0.8 <sup>B</sup>   | 0.7  | 0.7    | 1.4 <sup>AB</sup>  | 0.4  | 1.3    |
| V                    | Win.   | 9.2 <sup>AB</sup>  | 5.6  | 8.1    | 5.0 <sup>AB</sup>  | 4.1  | 3.7    |
|                      | Sum.   | 5.7 <sup>AB</sup>  | 3.1  | 5.1    | 3.4 <sup>AB</sup>  | 1.2  | 3.3    |
| Zn                   | Win.   | 470 <sup>AB</sup>  | 355  | 254    | 392 <sup>AB</sup>  | 512  | 216    |
|                      | Sum.   | 294 <sup>AB</sup>  | 348  | 187    | 433 <sup>AB</sup>  | 508  | 200    |

<sup>a</sup>The number of samples: summer-IND, N=29; winter-IND, N=26; concentrations measured below the detection limit were set equal to 1/2 of the detection limit for calculations of the median and mean values; Superscript A represents that there is a significant difference between weekday and weekend; Superscript B represents that there is a significant difference between winter and summer; Different characters represent a significant difference at  $p < 0.05$  obtained from a statistical analysis (analysis of variance).

**Table 4.** Summary of PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) concentrations measured in a residential site (RES A) near the industrial complex according to measurement period<sup>a</sup>

| PM10/TM | Season | Weekday            |      |        | Weekend            |      |        |
|---------|--------|--------------------|------|--------|--------------------|------|--------|
|         |        | Mean               | SD   | Median | Mean               | SD   | Median |
| PM10    | Win.   | 49 <sup>AB</sup>   | 18   | 45     | 59 <sup>AB</sup>   | 54   | 40     |
|         | Sum.   | 40 <sup>AB</sup>   | 15   | 39     | 48 <sup>AB</sup>   | 17   | 44     |
| Al      | Win.   | 386 <sup>AB</sup>  | 241  | 318    | 503 <sup>AB</sup>  | 298  | 490    |
|         | Sum.   | 227 <sup>AB</sup>  | 171  | 171    | 265 <sup>AB</sup>  | 178  | 149    |
| Ba      | Win.   | 45 <sup>AB</sup>   | 48   | 31     | 83 <sup>AB</sup>   | 67   | 44     |
|         | Sum.   | 31 <sup>AB</sup>   | 44   | 14     | 42 <sup>AB</sup>   | 58   | 12     |
| Ca      | Win.   | 818 <sup>AB</sup>  | 649  | 726    | 1304 <sup>AB</sup> | 993  | 1188   |
|         | Sum.   | 712 <sup>AB</sup>  | 802  | 520    | 620 <sup>AB</sup>  | 478  | 394    |
| Cd      | Win.   | 1.0                | 0.6  | 0.9    | 1.2                | 0.5  | 1.0    |
|         | Sum.   | 0.7                | 0.4  | 0.6    | 0.8                | 0.5  | 0.9    |
| Co      | Win.   | 0.6 <sup>CD</sup>  | 0.2  | 0.7    | 0.6 <sup>CD</sup>  | 0.2  | 0.6    |
|         | Sum.   | 0.2                | 0.1  | 0.2    | 0.1                | 0.1  | 0.1    |
| Cr      | Win.   | 10 <sup>AB</sup>   | 14   | 5.0    | 6.1 <sup>AB</sup>  | 2.5  | 5.7    |
|         | Sum.   | 4.2 <sup>AB</sup>  | 2.9  | 3.4    | 2.9 <sup>AB</sup>  | 1.4  | 2.5    |
| Cu      | Win.   | 66 <sup>AB</sup>   | 92   | 33     | 43 <sup>AB</sup>   | 29   | 35     |
|         | Sum.   | 92 <sup>AB</sup>   | 190  | 28     | 29 <sup>AB</sup>   | 22   | 23     |
| Fe      | Win.   | 917 <sup>AB</sup>  | 600  | 759    | 1082 <sup>AB</sup> | 584  | 1055   |
|         | Sum.   | 5530 <sup>AB</sup> | 360  | 463    | 775 <sup>AB</sup>  | 492  | 610    |
| K       | Win.   | 309 <sup>AB</sup>  | 213  | 254    | 350 <sup>AB</sup>  | 197  | 375    |
|         | Sum.   | 226 <sup>AB</sup>  | 119  | 201    | 282 <sup>AB</sup>  | 171  | 206    |
| Mg      | Win.   | 264 <sup>AB</sup>  | 165  | 204    | 316 <sup>AB</sup>  | 172  | 327    |
|         | Sum.   | 176 <sup>AB</sup>  | 79   | 167    | 216 <sup>AB</sup>  | 112  | 163    |
| Mn      | Win.   | 32 <sup>A</sup>    | 18   | 31     | 41 <sup>AB</sup>   | 23   | 41     |
|         | Sum.   | 30 <sup>A</sup>    | 27   | 22     | 22 <sup>AB</sup>   | 15   | 22     |
| Na      | Win.   | 1436 <sup>AB</sup> | 1109 | 1080   | 1669 <sup>AB</sup> | 1235 | 1187   |
|         | Sum.   | 1037 <sup>AB</sup> | 906  | 702    | 1593 <sup>AB</sup> | 1223 | 1113   |
| Ni      | Win.   | 7.5 <sup>B</sup>   | 9.2  | 3.1    | 7.4 <sup>B</sup>   | 6.8  | 5.2    |
|         | Sum.   | 3.3 <sup>AB</sup>  | 2.4  | 2.4    | 2.0 <sup>AB</sup>  | 1.3  | 1.5    |
| Pb      | Win.   | 27 <sup>B</sup>    | 18   | 26     | 30 <sup>B</sup>    | 15   | 26     |
|         | Sum.   | 22 <sup>B</sup>    | 13   | 19     | 21 <sup>B</sup>    | 13   | 15     |
| Sb      | Win.   | 0.6 <sup>B</sup>   | 0.9  | 0.3    | 0.5 <sup>B</sup>   | 0.8  | 0.3    |
|         | Sum.   | 1.0 <sup>B</sup>   | 1.0  | 0.9    | 1.1 <sup>B</sup>   | 1.2  | 0.7    |
| Si      | Win.   | 917 <sup>AB</sup>  | 1011 | 624    | 1553 <sup>AB</sup> | 1463 | 780    |
|         | Sum.   | 729 <sup>AB</sup>  | 916  | 268    | 970 <sup>AB</sup>  | 1241 | 156    |
| Ti      | Win.   | 14 <sup>B</sup>    | 7.8  | 14     | 15 <sup>B</sup>    | 9.4  | 14     |
|         | Sum.   | 10 <sup>B</sup>    | 6.2  | 8.6    | 9.2 <sup>B</sup>   | 5.0  | 7.6    |
| Tl      | Win.   | 0.4                | 0.5  | 0.2    | 0.4                | 0.8  | 0.1    |
|         | Sum.   | 0.6                | 0.4  | 0.7    | 0.7                | 0.4  | 0.6    |
| V       | Win.   | 1.0 <sup>A</sup>   | 1.5  | 0.7    | 1.4 <sup>A</sup>   | 0.7  | 1.5    |
|         | Sum.   | 0.9 <sup>A</sup>   | 0.7  | 0.8    | 1.5 <sup>A</sup>   | 1.2  | 1.4    |
| Zn      | Win.   | 97 <sup>AB</sup>   | 72   | 89     | 123 <sup>AB</sup>  | 60   | 132    |
|         | Sum.   | 75 <sup>AB</sup>   | 55   | 54     | 100 <sup>AB</sup>  | 58   | 112    |

<sup>a</sup>The number of samples: summer-RES A, N=29; winter-RES A, N=26; concentrations measured below the detection limit were set equal to 1/2 of the detection limit for calculations of the median and mean values; Superscript A represents that there is a significant difference between weekday and weekend; Superscript B represents that there is a significant difference between winter and summer; Different characters represent a significant difference at  $p < 0.05$  obtained from a statistical analysis (analysis of variance).

**Table 5.** Summary of PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) concentrations measured in a residential site (RES B) far away from the industrial complex according to measurement period<sup>a</sup>

| PM10/TM | Season | Weekday           |     |        | Weekend            |      |        |
|---------|--------|-------------------|-----|--------|--------------------|------|--------|
|         |        | Mean              | SD  | Median | Mean               | SD   | Median |
| PM10    | Win.   | 40                | 15  | 34     | 39                 | 11   | 36     |
|         | Sum.   | 34                | 15  | 35     | 33                 | 13   | 32     |
| Al      | Win.   | 187 <sup>B</sup>  | 82  | 179    | 171 <sup>B</sup>   | 109  | 161    |
|         | Sum.   | 145 <sup>AB</sup> | 82  | 143    | 116 <sup>AB</sup>  | 46   | 126    |
| Ba      | Win.   | 12 <sup>AB</sup>  | 8.3 | 13     | 7.5 <sup>AB</sup>  | 4.1  | 7.4    |
|         | Sum.   | 4.2 <sup>B</sup>  | 4.0 | 3.6    | 4.8 <sup>B</sup>   | 6.8  | 2.5    |
| Ca      | Win.   | 522 <sup>AB</sup> | 488 | 435    | 449 <sup>AB</sup>  | 340  | 404    |
|         | Sum.   | 341 <sup>AB</sup> | 215 | 326    | 281 <sup>AB</sup>  | 103  | 270    |
| Cd      | Win.   | 0.7               | 0.5 | 0.6    | 0.5                | 0.6  | 0.3    |
|         | Sum.   | 0.4               | 0.2 | 0.4    | 0.4                | 0.2  | 0.4    |
| Co      | Win.   | 0.2               | 0.1 | 0.2    | 0.2                | 0.2  | 0.1    |
|         | Sum.   | 0.1               | 0.1 | 0.2    | 0.1                | 0.1  | 0.1    |
| Cr      | Win.   | 2.4 <sup>A</sup>  | 2.2 | 1.9    | 3.0 <sup>AB</sup>  | 3.3  | 1.5    |
|         | Sum.   | 2.5 <sup>A</sup>  | 1.9 | 2.1    | 1.8 <sup>AB</sup>  | 2.2  | 0.8    |
| Cu      | Win.   | 21 <sup>B</sup>   | 13  | 18     | 20 <sup>B</sup>    | 7.9  | 19     |
|         | Sum.   | 55 <sup>AB</sup>  | 24  | 49     | 43 <sup>AB</sup>   | 37   | 30     |
| Fe      | Win.   | 390 <sup>B</sup>  | 207 | 311    | 364 <sup>B</sup>   | 282  | 313    |
|         | Sum.   | 316 <sup>B</sup>  | 190 | 309    | 209 <sup>B</sup>   | 124  | 213    |
| K       | Win.   | 253 <sup>B</sup>  | 131 | 200    | 225                | 165  | 182    |
|         | Sum.   | 168 <sup>AB</sup> | 103 | 115    | 215 <sup>A</sup>   | 100  | 225    |
| Mg      | Win.   | 198 <sup>B</sup>  | 103 | 164    | 170                | 89   | 152    |
|         | Sum.   | 134 <sup>B</sup>  | 79  | 131    | 203                | 99   | 163    |
| Mn      | Win.   | 18                | 9.6 | 18     | 16 <sup>B</sup>    | 14   | 14     |
|         | Sum.   | 15 <sup>A</sup>   | 9.0 | 15     | 10 <sup>AB</sup>   | 5.3  | 9.2    |
| Na      | Win.   | 937 <sup>B</sup>  | 726 | 670    | 1046 <sup>B</sup>  | 683  | 975    |
|         | Sum.   | 706 <sup>AB</sup> | 567 | 499    | 1551 <sup>AB</sup> | 1046 | 1169   |
| Ni      | Win.   | 2.0               | 1.5 | 1.9    | 2.0 <sup>B</sup>   | 2.4  | 0.7    |
|         | Sum.   | 2.3 <sup>A</sup>  | 1.6 | 2.2    | 1.3 <sup>AB</sup>  | 1.4  | 0.6    |
| Pb      | Win.   | 23 <sup>A</sup>   | 13  | 21     | 19                 | 16   | 13     |
|         | Sum.   | 17                | 5.7 | 15     | 16                 | 5.0  | 13     |
| Sb      | Win.   | 0.2               | 0.4 | 0.3    | 0.2                | 0.5  | 0.3    |
|         | Sum.   | 0.2               | 0.5 | 0.3    | 0.2                | 0.5  | 0.3    |
| Si      | Win.   | 231 <sup>A</sup>  | 131 | 213    | 126 <sup>AB</sup>  | 118  | 200    |
|         | Sum.   | 259 <sup>A</sup>  | 123 | 254    | 182 <sup>AB</sup>  | 94   | 183    |
| Ti      | Win.   | 9.1               | 4.9 | 8.4    | 7.8 <sup>B</sup>   | 5.3  | 6.9    |
|         | Sum.   | 7.5 <sup>A</sup>  | 4.6 | 7.8    | 5.1 <sup>AB</sup>  | 2.1  | 5.4    |
| Tl      | Win.   | 0.1 <sup>B</sup>  | 0.2 | 0.1    | 0.1 <sup>B</sup>   | 0.1  | 0.1    |
|         | Sum.   | 0.5 <sup>B</sup>  | 0.5 | 0.4    | 0.7 <sup>B</sup>   | 0.5  | 0.6    |
| V       | Win.   | 0.6               | 0.8 | 0.2    | 0.7 <sup>B</sup>   | 1.3  | 0.1    |
|         | Sum.   | 0.8 <sup>A</sup>  | 0.8 | 0.7    | 0.3 <sup>AB</sup>  | 0.7  | 0.4    |
| Zn      | Win.   | 54                | 38  | 42     | 45 <sup>B</sup>    | 44   | 32     |
|         | Sum.   | 42 <sup>A</sup>   | 32  | 36     | 28 <sup>AB</sup>   | 22   | 22     |

<sup>a</sup>The number of samples: summer-RES B, N=29; winter-RES B, N=26; concentrations measured below the detection limit were set equal to 1/2 of the detection limit for calculations of the median and mean values; Superscript A represents that there is a significant difference between weekday and weekend; Superscript B represents that there is a significant difference between winter and summer; Different character represents a significant close to or less than 0.05.



**Table 6b.** Correlation relationship among trace metals measured in an a residential site (RES A) near the industrial complex

| PM10 | Al                | Ba                | Ca                | Cd                | Co                | Cr                | Cu                | Fe                | K                 | Mg                | Mn                | Na                | Ni                | Pb    | Sb                | Si                | Ti                | Tl                | V    | Zn                |      |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|-------------------|------|
| Al   | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Ba   | 0.23              | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Ca   | 0.48 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Cd   | 0.30              | 0.65 <sup>c</sup> | 0.31 <sup>a</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Co   | 0.38              | 0.43 <sup>c</sup> | 0.17              | 0.39 <sup>b</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Cr   | 0.13              | 0.23              | 0.02              | 0.19              | 0.08              | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Cu   | -0.13             | -0.04             | -0.19             | 0.13              | -0.09             | 0.02              | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Fe   | 0.29              | 0.78 <sup>c</sup> | 0.65 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 0.60 <sup>c</sup> | 0.36 <sup>a</sup> | 0.19              | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| K    | 0.39 <sup>b</sup> | 0.86 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.50 <sup>c</sup> | 0.76 <sup>c</sup> | 0.31 <sup>a</sup> | 0.13              | -0.12             | 1.00              |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Mg   | 0.38 <sup>a</sup> | 0.86 <sup>c</sup> | 0.69 <sup>c</sup> | 0.49 <sup>c</sup> | 0.55 <sup>c</sup> | 0.37 <sup>a</sup> | 0.31 <sup>a</sup> | -0.04             | 0.73 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Mn   | 0.19              | 0.67 <sup>c</sup> | 0.37 <sup>b</sup> | 0.65 <sup>c</sup> | 0.68 <sup>c</sup> | 0.32 <sup>a</sup> | 0.22              | 0.45 <sup>c</sup> | 0.49 <sup>c</sup> | 0.58 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Na   | 0.28 <sup>a</sup> | 0.69 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.32 <sup>a</sup> | 0.20              | 0.10              | 0.22              | 0.13              | 0.63 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.80 <sup>c</sup> | 0.39 <sup>b</sup> | 1.00              |       |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Ni   | 0.26              | 0.20              | 0.01              | 0.33 <sup>a</sup> | 0.12              | 0.66 <sup>c</sup> | 0.87 <sup>c</sup> | 0.23              | 0.20              | 0.08              | 0.25              | 0.28 <sup>a</sup> | 0.15              | 1.00  |                   |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Pb   | 0.27              | 0.49 <sup>c</sup> | 0.13              | 0.48 <sup>c</sup> | 0.92 <sup>c</sup> | 0.41 <sup>b</sup> | 0.08              | 0.00              | 0.52 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.40 <sup>b</sup> | 0.64 <sup>c</sup> | 0.06              | 0.12  | 1.00              |                   |                   |                   |      |                   |      |
| Sb   | 0.06              | 0.22              | -0.02             | 0.25              | 0.61 <sup>c</sup> | 0.05              | 0.01              | -0.01             | 0.22              | 0.37 <sup>a</sup> | 0.11              | 0.49 <sup>c</sup> | -0.07             | 0.05  | 0.71 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |      |                   |      |
| Si   | 0.20              | 0.84 <sup>c</sup> | 0.95 <sup>c</sup> | 0.35 <sup>a</sup> | 0.30 <sup>a</sup> | 0.11              | 0.08              | 0.04              | 0.74 <sup>c</sup> | 0.71 <sup>c</sup> | 0.72 <sup>c</sup> | 0.46 <sup>c</sup> | 0.80 <sup>c</sup> | 0.04  | 0.14              | 0.01              | 1.00              |                   |      |                   |      |
| Ti   | 0.35 <sup>a</sup> | 0.79 <sup>c</sup> | 0.50 <sup>c</sup> | 0.50 <sup>c</sup> | 0.75 <sup>c</sup> | 0.47 <sup>c</sup> | 0.20              | -0.03             | 0.59 <sup>c</sup> | 0.74 <sup>c</sup> | 0.59 <sup>c</sup> | 0.65 <sup>c</sup> | 0.37 <sup>b</sup> | 0.22  | 0.70 <sup>c</sup> | 0.43 <sup>b</sup> | 0.49 <sup>c</sup> | 1.00              |      |                   |      |
| Tl   | -0.10             | 0.16              | 0.20              | 0.07              | 0.01              | -0.18             | -0.03             | 0.15              | 0.03              | 0.04              | 0.13              | 0.29 <sup>a</sup> | 0.23              | -0.09 | -0.05             | 0.11              | 0.22              | 0.08              | 1.00 |                   |      |
| V    | 0.32 <sup>a</sup> | 0.56 <sup>c</sup> | 0.33 <sup>a</sup> | 0.52 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.20              | 0.07              | 0.07              | 0.78 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 0.52 <sup>c</sup> | 0.39 <sup>b</sup> | 0.13  | 0.66 <sup>c</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 0.57 <sup>c</sup> | 0.00 | 1.00              |      |
| Zn   | 0.27              | 0.79 <sup>c</sup> | 0.63 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 0.82 <sup>c</sup> | 0.32 <sup>a</sup> | 0.10              | 0.05              | 0.81 <sup>c</sup> | 0.80 <sup>c</sup> | 0.61 <sup>c</sup> | 0.74 <sup>c</sup> | 0.47 <sup>c</sup> | 0.13  | 0.75 <sup>c</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.74 <sup>c</sup> | 0.17 | 0.82 <sup>c</sup> | 1.00 |

<sup>a</sup>Correlation is significant at  $p < 0.05$  level; <sup>b</sup>correlation is significant at  $p < 0.005$  level; and <sup>c</sup>correlation is significant at  $p < 0.001$  level.

**Table 6c.** Correlation relationship among trace metals measured in a residential site (RES B) far away from the industrial complex

| PM10 | Al                | Ba                | Ca                | Cd                | Co                | Cr                | Cu                | Fe                 | K                 | Mg                | Mn                | Na                | Ni    | Pb                | Sb                | Si                | Ti                | Tl                | V     | Zn                |      |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|------|
| Al   | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Ba   | 0.31 <sup>a</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Ca   | 0.19              | 0.81 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Cd   | 0.30 <sup>a</sup> | 0.73 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Co   | 0.37 <sup>a</sup> | 0.76 <sup>c</sup> | 0.43 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Cr   | 0.05              | 0.44 <sup>c</sup> | 0.01              | 0.47 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Cu   | -0.12             | 0.03              | -0.07             | -0.09             | -0.04             | -0.06             | 1.00              |                    |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Fe   | 0.37 <sup>a</sup> | 0.83 <sup>c</sup> | 0.50 <sup>c</sup> | 0.71 <sup>c</sup> | 0.73 <sup>c</sup> | 0.75 <sup>c</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | 1.00               |                   |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| K    | 0.30 <sup>a</sup> | 0.64 <sup>c</sup> | 0.37 <sup>b</sup> | 0.62 <sup>c</sup> | 0.71 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | -0.20              | 1.00              |                   |                   |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Mg   | 0.21              | 0.58 <sup>c</sup> | 0.36 <sup>a</sup> | 0.59 <sup>c</sup> | 0.47 <sup>c</sup> | 0.30 <sup>a</sup> | 0.25              | -0.29 <sup>a</sup> | 0.39 <sup>b</sup> | 0.83 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Mn   | 0.38 <sup>a</sup> | 0.82 <sup>c</sup> | 0.51 <sup>c</sup> | 0.72 <sup>c</sup> | 0.81 <sup>c</sup> | 0.79 <sup>c</sup> | 0.52 <sup>c</sup> | 0.13               | 0.96 <sup>c</sup> | 0.67 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 1.00              |       |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Na   | 0.09              | 0.07              | -0.04             | 0.10              | 0.02              | -0.20             | 0.04              | -0.22              | 0.00              | 0.46 <sup>c</sup> | 0.63 <sup>c</sup> | -0.02             | 1.00  |                   |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Ni   | 0.22              | 0.55 <sup>c</sup> | 0.20              | 0.56 <sup>c</sup> | 0.63 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.84 <sup>c</sup> | 0.08               | 0.68 <sup>c</sup> | 0.52 <sup>c</sup> | 0.21              | 0.70 <sup>c</sup> | -0.15 | 1.00              |                   |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Pb   | 0.25              | 0.66 <sup>c</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | 0.71 <sup>c</sup> | 0.91 <sup>c</sup> | 0.69 <sup>c</sup> | 0.46 <sup>c</sup> | 0.07               | 0.76 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.41 <sup>b</sup> | 0.82 <sup>c</sup> | -0.03 | 0.60 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |                   |       |                   |      |
| Sb   | 0.22              | 0.46 <sup>c</sup> | 0.22              | 0.48 <sup>c</sup> | 0.65 <sup>c</sup> | 0.58 <sup>c</sup> | 0.33 <sup>a</sup> | 0.26               | 0.67 <sup>c</sup> | 0.46 <sup>c</sup> | 0.18              | 0.69 <sup>c</sup> | -0.07 | 0.54 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |                   |       |                   |      |
| Si   | 0.35 <sup>a</sup> | 0.82 <sup>c</sup> | 0.46 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 0.59 <sup>c</sup> | 0.58 <sup>c</sup> | 0.22              | 0.34 <sup>b</sup>  | 0.72 <sup>c</sup> | 0.45 <sup>c</sup> | 0.39              | 0.72 <sup>c</sup> | 0.08  | 0.41 <sup>b</sup> | 0.53 <sup>c</sup> | 0.49 <sup>c</sup> | 1.00              |                   |       |                   |      |
| Ti   | 0.26              | 0.76 <sup>c</sup> | 0.30 <sup>a</sup> | 0.55 <sup>c</sup> | 0.55 <sup>c</sup> | 0.61 <sup>c</sup> | 0.24              | 0.10               | 0.64 <sup>c</sup> | 0.40 <sup>b</sup> | 0.31              | 0.62 <sup>c</sup> | -0.06 | 0.38 <sup>a</sup> | 0.50 <sup>c</sup> | 0.34              | 0.67 <sup>c</sup> | 1.00              |       |                   |      |
| Tl   | -0.11             | -0.11             | -0.25             | -0.15             | -0.14             | -0.10             | -0.08             | 0.45 <sup>c</sup>  | -0.10             | -0.07             | -0.04             | -0.11             | 0.09  | -0.05             | -0.05             | 0.15              | 0.07              | -0.03             | 1.00  |                   |      |
| V    | 0.28 <sup>a</sup> | 0.56 <sup>c</sup> | 0.29 <sup>a</sup> | 0.49 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.68 <sup>c</sup> | 0.42 <sup>c</sup> | 0.20               | 0.77 <sup>c</sup> | 0.46 <sup>c</sup> | 0.15              | 0.79 <sup>c</sup> | -0.14 | 0.69 <sup>c</sup> | 0.66 <sup>c</sup> | 0.85 <sup>c</sup> | 0.54 <sup>c</sup> | 0.48 <sup>c</sup> | 0.03  | 1.00              |      |
| Zn   | 0.33 <sup>a</sup> | 0.62 <sup>c</sup> | 0.48 <sup>c</sup> | 0.60 <sup>c</sup> | 0.77 <sup>c</sup> | 0.70 <sup>c</sup> | 0.43 <sup>b</sup> | 0.21               | 0.88 <sup>c</sup> | 0.57 <sup>c</sup> | 0.27 <sup>a</sup> | 0.92 <sup>c</sup> | -0.09 | 0.64 <sup>c</sup> | 0.82 <sup>c</sup> | 0.79 <sup>c</sup> | 0.56 <sup>c</sup> | 0.47 <sup>c</sup> | -0.02 | 0.83 <sup>c</sup> | 1.00 |

<sup>a</sup>Correlation is significant at  $p < 0.05$  level; <sup>b</sup>correlation is significant at  $p < 0.005$  level; and <sup>c</sup>correlation is significant at  $p < 0.001$  level.

**Table 7.** Comparison with previous studies for PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) mean concentrations measured in industrial sites

| PM10/TM | Spain, Llodio <sup>a</sup><br>(PM10) | China, Shanhai <sup>b</sup><br>(PM10) | Daejeon <sup>c</sup><br>(PM10) | Ulsan <sup>d</sup><br>(PM10) | Banwool <sup>e</sup><br>(TSP) | Unknown <sup>f</sup><br>(PM10) | This study (PM10)<br>Industrial complex |
|---------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| PM10    | 32                                   | 138                                   | 92                             | 99.9                         | NA                            | 70                             | 76                                      |
| Al      | 14                                   | 2479                                  | 28                             | NA                           | NA                            | 35                             | 421                                     |
| Ba      | NA                                   | 9634                                  | NA                             | NA                           | NA                            | 27                             | 18                                      |
| Ca      | 1.2                                  | 11                                    | 3.2                            | NA                           | NA                            | NA                             | 1484                                    |
| Cd      | 0.5                                  | 2.8                                   | 1.5                            | 19                           | 12                            | 34                             | 1.9                                     |
| Co      | 25                                   | 32                                    | 25                             | NA                           | 3.2                           | NA                             | 1.1                                     |
| Cr      | 33                                   | 171                                   | 41                             | 7.2                          | 41                            | 181                            | 24                                      |
| Cu      | NA                                   | 2690                                  | 1633                           | 48                           | NA                            | NA                             | 196                                     |
| Fe      | NA                                   | 3331                                  | NA                             | 37                           | 3720                          | 3927                           | 5423                                    |
| K       | NA                                   | 1984                                  | NA                             | NA                           | NA                            | NA                             | 382                                     |
| Mg      | 87                                   | 186                                   | 50                             | NA                           | NA                            | NA                             | 387                                     |
| Mn      | 16                                   | 6.3                                   | NA                             | 6.1                          | 123                           | NA                             | 245                                     |
| Na      | NA                                   | 1257                                  | NA                             | NA                           | NA                            | NA                             | 1071                                    |
| Ni      | 33                                   | 14                                    | 38                             | NA                           | 29                            | 45                             | 14                                      |
| Pb      | 103                                  | 515                                   | 243                            | 125                          | 460                           | 227                            | 94                                      |
| Sb      | 2.0                                  | 23                                    | NA                             | NA                           | NA                            | 52                             | 1.8                                     |
| Si      | 2.8                                  | 20                                    | NA                             | NA                           | NA                            | NA                             | 734                                     |
| Ti      | NA                                   | NA                                    | NA                             | NA                           | NA                            | NA                             | 21                                      |
| Tl      | 25                                   | 0.8                                   | 33                             | NA                           | NA                            | NA                             | 0.7                                     |
| V       | 0.4                                  | NA                                    | NA                             | NA                           | 7.6                           | NA                             | 6.5                                     |
| Zn      | 8.0                                  | 2.3                                   | 13                             | 146                          | 910                           | 1543                           | 389                                     |

<sup>a</sup>Querol *et al.* (2004); <sup>b</sup>Zheng *et al.* (2004); <sup>c</sup>Kim *et al.* (2002); <sup>d</sup>Na and Lee (1999); <sup>e</sup>Park *et al.* (2008); <sup>f</sup>Lim *et al.* (2009), sampling site was not reported; NA, not available.

2001). Tl, Ba, V 등의 변수들에 있어서는 음의 상관성이 나타났다. Table 6b는 산업지역과 인접한 주거지역 A에서 포집한 PM10 시료 중의 각 화학성분과의 상관관계를 나타낸 것으로 Fe, Al, Mg, Si 등에서 높은 상관성을 보이며 금속관련 산업과 연관되며 (Pakkanen *et al.*, 2001), 다음으로 Ba, Cd, Pb, Zn 등에서 상관성이 높고 통계적인 유의성 ( $p < 0.001$ )이 있는 것으로 나타나 자동차 배출과 연관된다 (Nyarko *et al.*, 2006). 변수들 사이에서 상관성이 높은 관계인 Cd, Pb, Zn과 Fe, V, Al과 Ba, Si와 Cr, Ni도 중유 및 석탄과 같은 화석연료의 연소와 연관된다 (Pakkanen *et al.*, 2001). Table 6c는 포항의 대표적인 주거지역인 장성동(주거지역 B)에서 포집한 PM10 시료 중의 각 화학성분과의 상관관계를 나타낸 것으로 Fe, Mn, Pb, Zn 등에서 높은 상관성을 보였고, Al, Ca, Si, Ti, K 및 Na 등도 비교적 높은 상관성을 나타내어 이는 토양이나 도로비산 먼지관련 오염원, 해양오염원과 같은 자연발생원과 관련성이 있을 것으로 추정된다. Mg, Cu 등의 변수

들에 있어서는 음의 상관성을 가지며, 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다 ( $p < 0.05$ ).

#### 4. 타 연구와의 비교

PM10과 미량원소 농도에 대하여 본 연구의 산업지역과 선행 연구의 산업지역을 비교한 결과를 Table 7에 나타내었다. PM10 평균농도의 경우, 본 연구의  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 스페인의 복합 산업지역인 Llodio (Querol *et al.*, 2004)에서 측정된  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  보다는 높고, 지역명이 보고되지 않은 국내 한 제철 산단 인근지역(임영욱 등, 2009)에서 측정된  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 포항 산업 지역 내에 위치한 장흥동 대기오염자동차 측정소에서 모니터링된 2004 평균농도  $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 2005년도 평균농도인  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 유사하고, 중국의 상하이 (Zheng *et al.*, 2004)에서 측정된  $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 국내 대전의 복합 산업지역에서 측정된  $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 (Kim *et al.*, 2002), 울산의 석유화학 및 비철금속 산업단지의  $99.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (나덕재와 이병규, 1999) 보다 낮게 나타났다. 이러한 차이는 지역간 PM10의 배출

**Table 8.** Comparison with previous studies for PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and trace metal (TM,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) mean concentrations measured in residential sites

| PM10/TM | Helsinki <sup>a</sup><br>(Summer, PM2.3-15) |       | Switzerland <sup>b</sup><br>(Annual, PM10) |          |       | This study<br>(Summer, PM10) |       |
|---------|---|-------|--|----------|-------|------------------------------|-------|
|         | Urban                                       | Rural | Urban                                      | Suburban | Rural | RES-1                        | RES-2 |
| PM10    | 13  | 5.8   | 40   | 25       | 14    | 47                           | 37    |
| Al      | 520   | 150   | 152  | 98       | 91    | 329                          | 160   |
| Ba      | 8.3   | 1.5   | NA   | NA       | NA    | 45                           | 7.6   |
| Ca      | 480   | 140   | 1199                                       | 368      | 100   | 829                          | 413   |
| Cd      | >0.1  | >0.1  | 0.3  | 0.4      | 0.3   | 0.9                          | 0.5   |
| Co      | 0.3   | 0.2   | NA   | NA       | NA    | 0.4                          | 0.2   |
| Cr      | NA  | NA    | NA   | NA       | NA    | 6.4                          | 2.5   |
| Cu      | 6.2   | 7     | 74   | 8.5      | 6.0   | 68                           | 36    |
| Fe      | 520   | 88    | 2048                                       | 295      | 89    | 788                          | 334   |
| K       | 200   | 65    | 255  | 404      | 98    | 281                          | 245   |
| Mg      | 130   | 42    | 85   | 52       | 48    | 233                          | 172   |
| Mn      | 8.6   | 2.1   | 25   | 7.9      | 2.8   | 32                           | 16    |
| Na      | 300   | 92    | 665  | 260      | 298   | 1340                         | 955   |
| Ni      | 0.8   | 0.9   | 3.0  | 2.2      | 1.2   | 5.3                          | 2.0   |
| Pb      | 2.0   | 0.6   | 49   | 21       | 10    | 25                           | 19    |
| Sb      | 0.8   | >0.1  | 5.6  | >0.1     | 0.3   | 0.8                          | 0.2   |
| Si      | NA  | NA    | NA   | NA       | NA    | 950                          | 232   |
| Ti      | 27  | 7.1   | NA   | NA       | NA    | 9.9                          | 7.8   |
| Tl      | >0.1  | >0.1  | >0.1                                       | >0.1     | >0.1  | 0.5                          | 0.4   |
| V       | 1.4   | 0.3   | 1.4  | 2.4      | 0.7   | 1.1                          | 0.7   |
| Zn      | 7.9   | 310   | NA   | NA       | NA    | 93                           | 38    |

<sup>a</sup>Pakkanen *et al.* (2001); <sup>b</sup>Hassanien *et al.* (2005); NA, not available.

특성과 대기 안정도와 풍속 등 기상인자가 복합적으로 작용한 것으로 해석된다(Vardoulakis and Kassomenos, 2008).

주거지역의 경우, 본 연구에서와 같이 산업지역과 인접한 주거지역, 산업지역으로부터 약간 떨어진 주거지역으로 구분하여, 거리에 따른 오염원으로부터 발생한 부유분진의 농도 영향을 조사한 선행연구 결과가 없으므로, 핀란드와 스위스의 일반 주거지역에서 측정된 평균농도와 비교하였다(Table 8). 핀란드 헬싱키(Pakkanen *et al.*, 2001)의 도심지역은 해안과 2km 거리로 떨어져 있으며 교통오염원이 대부분을 차지하는 지역으로 PM 농도가 도심지역 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 시골지역 5.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고되었고, 스위스의(Hassanien *et al.*, 2005) 도심지역인 베른, 준 도심인 바셀, 시골의 파이에른에서의 PM10 농도는 각각 40, 25, 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고되었다. 본 연구의 주거지역 A와 주거지역 B지역의 PM10 농도는 각각 47과 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서, 포항의 두 주거지역의 PM10 농도가

선행 연구의 다른 도시지역보다 높게 측정되었는데, 이는 포항의 철강 산업에서 발생하는 점오염원의 영향이 선행 연구된 다른 지역보다 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

미량원소의 경우, 포항 산업지역에서 측정된 9종의 미량원소(Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, K, Pb, Sb)의 농도가 중국 상하이(Zheng *et al.*, 2004)의 농도보다 낮게 나타났고, 나머지 11종 미량원소의 농도는 포항 산업지역에 높거나 서로 유사한 것으로 나타나 철강 산업 단지의 제철관련 산업 배출원의 특이성을 나타내고 있다. 나아가, 본 연구에서 측정된 7개 미량원소(Ba, Cd, Cr, Ni, Pb, Sb, Zn)의 농도가 지역명이 보고되지 않은 국내의 다른 연구자가 제철 산업 단지에서 측정한 농도보다 낮게 나타났고, 2개 미량원소(Al, Fe)는 오히려 본 연구에서 더 높게 나타났다. 또한, 본 연구에서 측정된 2개 미량원소(Cd, Pb)의 농도가 반월 산업지역에서 측정한 농도보다 낮게 나타났고, 5개 미량원소(Cr, Cu, Fe, Mn, Zn)의 농

도 비교 결과는 반대로 나타났다. 측정된 화학종의 농도에 있어서 지각성분인 Al을 제외한 금속성분 중 Fe, Zn은 다른 화학종에 비하여 가장 높은 농도를 나타내었고, 또한 Fe : Zn : Mn 농도비가 대략 14 : 1 : 0.6의 패턴이었는데 이는 Zhifan *et al.* (2008)이 중국 북경 지역의 철강 생산 공장과 인접한 지역에서 연구한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 한편, Cheng *et al.* (2000)은 Pb 단일 대기 중의 분진입자를 이용하여 여러 가지 오염원의 잠재적인 발생원을 평가해 왔는데, 이러한 Pb의 농도는 오염된 토양에서 69 µg/g, 석탄에서 13~86 µg/g, 석탄의 연소 먼지에서 1,078 µg/g, 제련관련 부유분진에서 400 µg/g, 유연·무연 휘발유 연소 배출가스에서 450~3,800 µg/g 등 높은 농도로 대기 부유분진의 2차 오염원으로 작용하고, Zheng *et al.* (2004)에 의하면 보일러에 사용하는 중유의 연소 시 배출가스 부유분진의 Pb 농도는 45 µg/g로 보고되었다. 이와 같이 오염된 토양, 오일연소, 제철관련 산업, 자동차 배출가스의 부유분진 중의 Pb가 대기 전체 Pb의 농도에 주요한 기여를 하는 것으로 보고된 바가 있다(Zheng *et al.*, 2004). 본 연구의 산업지역 대기 중 Pb의 평균농도가 94 ng/m<sup>3</sup>로 선행연구 지역의 Pb 농도 95~515 ng/m<sup>3</sup> 범위와 비교하여 낮은 농도를 나타내었는데, 이는 Pb 배출원의 대기방지시설의 관리가 적절하게 운용되어 오일연소, 제철관련 산업의 배출원으로 부터 배출가스의 부유분진 중 Pb 농도가 전체대기 중의 Pb 농도에 미치는 기여도가 낮고 상대적으로 도로에서 발생하는 Pb 기여도가 높기 때문인 것으로 사료된다. 선행연구 결과는 도심, 준 도심, 시골지역에서 측정된 각종 화합물질의 농도를 나타낸 것이며, 포항의 도심과 준도심지역의 각종 화합물질의 농도와 비교하면, Fe, Mn, Zn 등이 도심지역 평균농도가 핀란드 헬싱키의 도심지역 평균농도(Pakkanen *et al.*, 2001)보다 높게 나타났다. 스위스 베른도심지역(Hassanien *et al.*, 2005)의 경우에는 Fe의 평균농도는 포항지역보다 낮고, Mn의 평균농도가 포항지역과 비슷한 수준이었다. 이는 산업지역의 배출원으로부터 적은 농도의 Pb가 배출되므로 산업지역과 인접한(반경 1 km) 주거지역 A에 미치는 영향도 적기 때문인 것으로 사료된다. 산업지역과 6.5 km 거리의 주거지역 B 역시 Pb의 평균값은 유사한 경향을 나타내었다.

## 결 론

본 연구는 IMIC 지역 주변의 대기 입자상 오염물질의 노출을 평가하기 위하여 수행되었다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 IMIC 지역 안에 위치하고 각종 대기오염물질의 배출오염원으로 예상되는 산업지역과 산업지역으로부터 인접한 거리가 다른 두 주거지역에서 PM10 중에 포함된 미량원소 성분을 측정하였다. PM10과 대부분의 미량원소에 대하여 산업지역의 농도가 주거지역보다 높았고, 산업지역에 인접한 주거지역의 농도가 산업지역에서 비교적 멀리 떨어진 주거지역의 농도보다 높게 나타나, 산업지역에서 배출된 오염물질들이 인근 주거지역으로 이동될 수 있을 가능성이 제기된다. 나아가, 산업지역, 인근 주거지역 그리고 먼 거리 주거지역에서 조사된 미량원소간의 상관성 분석 결과 또한 이러한 가능성을 시사하였다. 산업지역과 주거지역에서 조사된 PM10과 미량원소 농도를 국내외의 선행연구와 비교한 결과, 지역 특성에 따라 다르게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 나덕재, 이병규. 산업도시 대기 중 PM<sub>10</sub>의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구, 한 국대기환경학회지 1999; 16: 23-35.
- 박영화, 전미경, 한진석, 이민도, 백성욱. 대규모 산단지역 환경대기 중 중금속 농도 분포, 한국대기환경학회 2008 추계학술대회 논문집 270-271.
- 임영욱, 이용진, 양수희, 박민석. 제철산단지역의 대기 중 중금속 농도 분포 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2009 추계학술대회 논문집 354-355.
- Ariane L, Hemon D, Nisse C, Auque G, Mazzuca M and Haguener J-M. Determinants of cadmium burden levels in a population of children living in the vicinity of nonferrous smelters, Environ Res 2001; 87: 147-159.
- Bae HJ and Park J. Health benefits of improving air quality in the rapidly aging Korean society, Sci Total Environ 2009; 407: 5971-5977.
- Beddows DCS and Harrison RM. Comparison of average particle number emission factors for heavy and light duty vehicles derived from rolling chassis dynamometer and field studies, Atmos Environ 2008; 42: 7954-7966.
- Bhanarkar AD, Rao PS, Gajghate DG and Nema P. Inventory

- of SO<sub>2</sub>, PM and toxic metals emissions from industrial sources in Greater Mumbai, India, *Atmos Environ* 2005; 39: 3851-3864.
- Brunekreef B and Holgate S. Air pollution and health, *Lancet* 2002; 360: 1233-1242.
- Cheng ZL, Lam KS, Chan LY, Wang T and Cheng KK. Chemical characteristics of aerosols at coastal station in Hong Kong. I. Seasonal variation of major ions, halogens and mineral dusts between 1995 and 1996, *Atmos Environ* 2000; 34: 2771-2783.
- Gupta AK, Karar K and Srivastava A. Chemical mass balance source apportionment of PM10 and TSP in residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India, *J Hazard Mater* 2007; 142: 279-287.
- Hagelstein K. Globally sustainable manganese metal production and use, *J Environ Manage* 2009; 90: 3736-3740.
- Hassanien MA. Assessment of human exposure to atmospheric trace metals in a residential area of Cairo, Egypt, *CEJOEM*, 2001; 7: 253-262.
- Jiménez E, Linares C, Rodríguez LF, Bleda MJ and Díaz J. Short-term impact of particulate matter on daily mortality among the over-75 age group in Madrid (Spain), *Sci Total Environ* 2009; 407: 5486-5492.
- Karar K and Gupta AK. Source apportionment of PM10 at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India, *Atmos Res* 2007; 84: 30-41.
- Kim KH, Lee JH and Jang MS. Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea, *Environ Poll* 2002; 118: 41-51.
- Morawska L, Ristovski Z, Jayaratne ER, Keogh DU and Ling X. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure, *Atmos Environ* 2008; 42: 8113-8138.
- Moreno T, Querol X, Alastuey A, Viana M, Salvador P, de la Campa AS, Artiñano B, de la Rosa J and Gibbons W. Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: Illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail, *Atmos Environ* 2006; 40: 6791-6803.
- Nyarko BJB, Adomako D, Serfor-Armah Y, Dampare SB, Adotey D and Akaho D. Biomonitoring of atmospheric trace element deposition around an industrial town in Ghana, *Rad Phys Chem* 2006; 75: 954-958.
- Ou C-Q, Hedley AJ, Chung RY, Thacha T-Q, Chaua YK, Chan KP, Yang L, Ho SY, Wong C-M and Lama T-H. Socioeconomic disparities in air pollution-associated mortality, *Environ Res* 2008; 107: 237-244.
- Pakkanen TA, Loukkola K, Korhinen CH, Aurela M, Makela T, Hillamo RE, Aarnio P, Koskentalo T, Kousa A and Maenhaut W. Sources and chemical composition of atmospheric fine land coarse particles in the Helsinki area, *Atmos Environ* 2001; 35: 5381-5391.
- Querol X, Alastuey A, Viana MM, Rodriguez S, Artinano B, Salvador P, Garcia do Santos S, Fernandez Patier R, Ruiz CR, De la Rosa J, Sanchez de la Campa A, Menendez M and Gil JI. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain, *Aerosol Sci* 2004; 35: 1151-1172.
- Sasaki K and Sakamoto K. Vertical differences in the composition of PM10 and PM2.5 in the urban atmosphere of Osaka, Japan, *Atmos Environ* 2005; 39: 7240-7250.
- Sekine Y, Sakajiri K, Kikuchi E and Matsukata M. Release behavior of trace elements from coal during high-temperature processing, *Powder Tech* 2008; 180: 210-215.
- Subramanian R, Donahue NM, Bernardo-Bricker A, Rogge WF and Robinson AL. Contribution of motor vehicle emissions to organic carbon and fine particle mass in Pittsburgh, Pennsylvania: Effects of varying source profiles and seasonal trends in ambient marker concentrations, *Atmos Environ* 2006; 40: 8002-8019.
- Vardoulakis S and Kassomenos P. Sources and factors affecting PM10 levels in two European cities: Implications for local air quality management, *Atmos Environ* 2008; 42: 3949-3963.
- Winiwarter W, Kuhlbusch TAJ, Viana M and Hitzenberger R. Quality considerations of European PM emission inventories, *Atmos Environ* 2009; 43: 3819-3828.
- Yue W, Stölzel M, Cyrus J, Pitz M, Heinrich J, Kreyling WG, Wichmann H-E, Peters A, Wang S and Hopke PK. Source apportionment of ambient fine particle size distribution using positive matrix factorization in Erfurt, Germany, *Sci Total Environ* 2008; 398: 133-144.
- Zheng J, Tan M, Shibata Y, Tanaka A, Li Y, Zhang G, Zhang Y and Shan Z. Characteristics of isotope ratios and elemental concentrations in PM10 fraction of airborne particulate matter in Shanghai after the phase-out of leaded gasoline, *Atmos Environ* 2004; 38: 1191-1200.
- Zhifan C, Qinfang Q, Zhang XF, Nianqing L, Weiyu F, Minxu K, Hongyu W and Yongzheng Z. A study on environmental pollution monitoring and occupational health in the Capital Iron and Steel Company, Beijing, China, using nuclear and related analytical techniques. International Atomic Energy Agency, [Technical Document], IAEA-TECDOC, (IAEA-TECDOC-1576), 2008; 41-57.