

제철소 주변지역의 대기 중 미세먼지 및 중금속 농도에 관한 연구

조태진 · 정만호* · 전준민** · 손부순

순천향대학교 환경보건학과, *순천제일대학 그린전남환경종합센터, **순천제일대학 토목환경과
(2008년 8월 20일 접수; 2009년 2월 9일 수정; 2009년 2월 23일 채택)

A Study on the Concentration of Fine Particles and Heavy Metals in Iron Works

Tae-Jin Cho, Man-Ho Jeong*, Jun-Min Jeon** and Bu-Soon Son

Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam 336-745, Korea

*Green Jeonnam Environmental Complex Center, Suncheon First College, Jeonnam 540-744, Korea

**Department of Civil & Environmental Engineering, Suncheon First College, Jeonnam 540-744, Korea

(Manuscript received 20 August, 2008; revised 9 February, 2009; accepted 23 February, 2009)

Abstract

The results of particulate matters level and heavy metal concentration, which surveyed in Gwang-Yang, Dang-Jin steel industry area, are as follows; The $PM_{2.5}$, PM_{10} of exposure area are $22.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $40.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ each in Kum-Ho dong, and $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $51.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ each in Jung dong. The $PM_{2.5}$, PM_{10} of control area are $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $29.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ each in Bonggang-myeon. The level is higher in exposure area than control area. In case of Dang Jin, the concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ is higher in exposure area than control area ($PM_{2.5}$ - $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} - $39.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). The Pb level of Dang Jin area is higher in exposure area ($0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$) than control area ($0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), and both Gwang-Yang and Dang-Jin area lower level than the Guideline level of Korea EPA.

Key Words : $PM_{2.5}$, PM_{10} , Heavy metal

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 필요성

우리나라는 1960년대 이후 산업화 과정에서 철강, 조선, 자동차, 중화학공업 등을 전략적으로 육성하여 왔다. 그리하여 이러한 산업분야는 일정한 지역에 입지하여 지역사회에 경제, 사회 등의 제반 국면에서 광범위한 영향을 미치게 되었다. 반면 환경

분야의 경우, 환경문제를 사전에 방지하기 위한 여러 가지 조치를 취하고 있다고는 하나 산업체에서 발생하는 오염원으로 인한 대기, 수질, 토양 등의 환경문제는 끊임없이 제기되고 있으며, 일부 주민들의 유해건강영향 호소가 계속되어지고 있는 실정이다. 실제로 세계보건기구(WHO)와 유럽연합(EU)은 산업국가에서 환경오염이 질환발생에 25 - 30% 정도 기여한다고 추정하고 있으며, 최근에는 대기오염으로 인한 세계 사망자 수가 해마다 증가하고 있는 추세이다¹⁾.

국내 철강산업의 경우 1970년 이후 획기적인 성

Corresponding Author : Bu-Soon Son, Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam 336-745, Korea
Phone: +82-41-530-1270
E-mail: sonbss@sch.ac.kr

장을 이룩하여 국가 경제 발전에 있어 공허한 바가 매우 크나 반면에 에너지 과소비 및 폐기물의 대량 발생 등 환경오염 유발업종으로써의 역할도 무시할 수가 없다. 철강산업은 철광석에서부터 강철 재생산에 이르기까지 연소, 제련, 증발, 야적, 운반, 파쇄, 누출, 마모 등의 다양한 생산 공정이 있으며, 생산 설비도 대규모로서 이들의 설비에서 각종 대기, 수질, 토양 오염물질 및 폐기물 등이 다량 발생하기 때문에 대기, 수질 및 토양 등에 대한 종합적인 환경 대책이 요구되고 있다²⁾.

대기오염물질은 입자상 물질과 가스상 물질로 구분할 수 있는데 입자상 물질의 경우는 입경크기나 대기 배출원 특성에 따라 다양한 물리·화학적 특성을 나타낸다. 특히 산업활동이나 연료연소 과정과 같은 인위적 발생원에 의하여 배출되는 경우 입자의 직경이 상대적으로 작은 것(particulate matter less than 10 μm in aerodynamic diameter, 이하 PM_{10} , particulate matter less than 2.5 μm in aerodynamic diameter, 이하 $\text{PM}_{2.5}$)들이 대부분이며, 이들 미세입자를 구성하고 있는 화학물질도 유해성이 큰 중금속(Cadmium, 이하 Cd, Chrome, 이하 Cr, Arsenic 이하 As, Lead 이하 Pb, Beryllium, 이하 Be 등)이나 방향족 탄화수소류 같은 성분이 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 밝혀져 있다. 미세분진(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)에 포함된 물질 중 금속성 성분은 대부분 오래 전부터 알려진 독성물질로 주기율표 내 원소 중 약 80개의 원소가 중금속으로 분류되며, 그 중 약 30가지 금속이 사람에게 독성을 발현 하는 것으로 알려져 있다³⁾.

미세분진(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)의 흡입은 천식과 같은 호흡기관련 질환 및 심혈관계 질환 발생과 저체중이나 조기 출산과 같은 생식관련 이상에도 영향이 있으며, 대기오염에 민감한 집단 즉, 저항력이 약한 소아군과 60세 이상의 고연령층에서 호흡기 질환(폐기능 저하)에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다⁴⁾. 또한 미세분진(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)에 있는 많은 유해 중금속의 경우 위장관, 신장, 혈액학적 및 신경계독성 등의 치명적인 영향을 주는 것 뿐만 아니라, 식물의 기공이나 토양에 흡착되어 식물 성장에도 많은 장애를 주는 것으로 알려짐에 따라, 결과적으로 유해물질에 의한 오염 여부를 평가하는 것은 국민 건강 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다⁵⁾.

이러한 심각성을 우려해 우리나라는 1983년 총먼

지(total suspended particulates, 이하 TSP)에 대한 환경 기준(연간 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 설정하였으며, 그 후 10 μm 이하의 먼지가 호흡기에 영향을 주는 것으로 밝혀짐에 따라 미세먼지에 대한 중점관리에 필요성이 인정되어 2007년 PM_{10} 의 환경기준을 연간 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하여 관리하고 있다. 미국 등 일부 선진국의 경우에는 2.5 μm 이하의 먼지인 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 환경 기준도 설정하여 규제하고 있으나, 현재 우리나라는 환경기준이 아직 설정되지 않았을 뿐 아니라 이 분야의 연구도 미흡한 실정이다. 중금속의 경우에도 Pb(0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 제외한 다른 물질들은 기준치가 마련되지 않은 상태이다¹⁾.

국민의 소득수준의 향상과 쾌적한 환경에 대한 요구가 점차적으로 증가하고 환경오염사고에 따른 환경의식이 고조됨에 따라 기업과 시민·환경단체 사이에 갈등이 발생하고 있다. 이러한 시점에서 현재 규제되고 있는 물질과 그렇지 않은 물질들까지도 포함하여 환경오염의 현 수준을 파악하고 인체의 건강영향에 미치는 영향을 파악하는 것이 선행되어야 할 것이다.

1.2. 연구 목적

본 연구에서는 포스코-광양제철소와 당진-현대제철소 인근 지역을 노출지역(제철소를 중심으로 반경 5 km 이내의 지역)과 대조지역(제철소를 중심으로 반경 10 km 이외의 지역)으로 나누어 각각 2곳, 1곳을 선정하여 미세먼지(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)농도와 중금속(Cr, Cd, Pb, As) 함량을 알아보고 미세먼지에 의한 건강영향의 중요성을 인식함으로써, 지역주민을 대상으로 한 환경관리 대책을 수립하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 기간

본 연구는 전남에 위치한 광양제철소와 충남에 위치한 당진 현대제철소를 대상으로 공단 반경 5 km 이내에 있는 두 개의 노출지역(광양-금호동, 중동, 당진-고대리, 가곡리)과 공단 반경 10 km 이외에 있는 한 개의 대조지역(광양-봉강면, 당진-면천면)을 대상으로 하였다(Fig. 1). 광양의 중동의 경우 측정 장소가 아니었으나, 지역사회의 요구로 인

해 가을철과 겨울철에만 측정을 실시하였다. 측정 기간의 경우, 광양은 2006년 5월부터 12월까지 8개월에 걸쳐 총 4회(1회당 3번)수행 하였으며, 당진은 2006년 11월부터 2007년 8월까지 10개월에 걸쳐 총 4회(1회당 3번)수행 하였다. 계절별 측정기간은 아래의 Table 1과 같다.

2.2. 측정 및 분석 방법

2.2.1 대기 중 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})측정 및 분석
대기 중 미세먼지 측정 장비는 소용량 공기채취기(moni volume air sampler, Air metrics, U.S.A)를 이용하였다. 채취 시 흡인 유량은 5 L/min으로 계절별 각지점당 24시간씩 3일 동안 연속 측정하였고, 대기 중 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 중량농도를 산출하였다.

시료채취에 사용된 필터(Ø 47 mm, membrane filter, Advantec, Japan)는 시료채취 전·후 20 °C ± 1 °C,

45% ± 5%의 항온·항습장치(Desiccator)에 24시간 보관한 후 0.001 mg 이상의 감도를 갖는 분석용 저울(AT261, Mettler toledo, Switzerland)로 5회 반복하여 중량을 칭량한 후 그 결과를 평균하였다. 또한 미세먼지의 중량농도 산출시 온도와 습도 등에 의한 중량측정의 오차를 최소화하기 위하여 시료 채취 전·후 Control filter를 사용하여 채취된 필터와 동일한 방법으로 칭량하였으며, 전·후의 중량 차이를 각각의 시료 채취용 필터에 적용하였다.

2.2.2. 대기 중 중금속 측정 및 분석

대기 중 중금속(heavy metal) 시료채취 장치는 고용량 시료채취기(high volume Air Sampler, KIMOTO, Japan)를 이용하였다. 채취유량은 중금속 분석에 필요한 충분한 양을 포집하기 위하여 1.2 m³/min - 1.4 m³/min로 계절별 각지점당 24시간씩 3일 동안 연속 측정하였으며, 시료채취에 사용된 필터(Ø 8" × 10" quartz filter, Whatman, England)는 사용 전 유기성 불순물을 제거하기 위하여 약 400 °C에서 5시간 열처리하여 휘발성분을 제거 하였다. 또한 중금속 분석을 위하여 일정한 크기로 절단하여 추출 및 전처리 과정을 거친 후 분석용 시료로 사용하였으며, 채취과정 및 분석오차를 줄이기 위하여 채취하지 않은 필터(blank filter)를 시료채취에 사용된 필터와 동일하게 분석하여 중금속 농도를 보정하였다.

대기 중 중금속(Cr, Pb, Cd, As) 분석에는 ICP/MS (Elan6100, Perkin Elmer, U.S.A)를 이용 하였다. 분석에 사용된 ICP/MS의 분석 조건은 Table 2와 같다.

중금속 분석에 사용된 용매는 1% HNO₃ in DI water이며 세척 용매는 1% HNO₃ in DI water를 사용하였다. 표준용액은 Accu Trace TM Reference Standard ICP/MS Calibration Standard 2이며, ICP/MS Multi-Element Standard Solution 100 ppm을 사용하여 0.1, 1, 10, 20 ppb로 희석한 용액을 표준물질로 사용하였다. 그리고 내부표준물질은 50 ppb Rh(Rhodium)을 사용하였다.

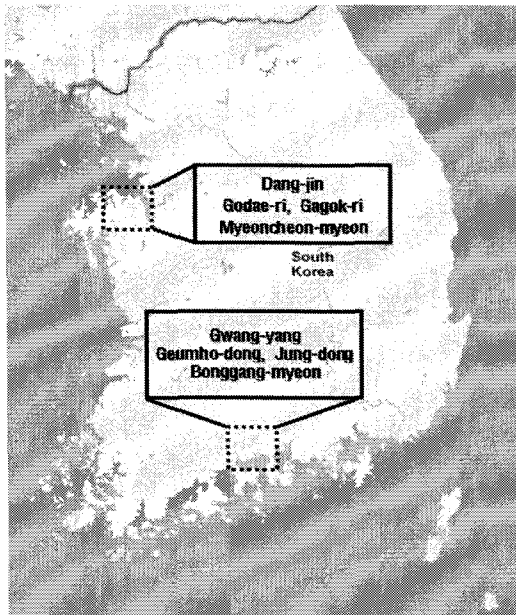


Fig. 1. Map of study Area.

Table 1. Sampling period

| Season | Site | Gwang-yang | Dang-jin |
|--------|------|---------------------|---------------------|
| Spring | | 06.06.12 - 06.06.21 | 07.04.02 - 07.04.05 |
| Summer | | 06.08.16 - 06.08.27 | 07.07.25 - 07.07.28 |
| Autumn | | 06.11.06 - 06.11.15 | 06.12.12 - 06.12.15 |
| Winter | | 06.12.04 - 06.12.08 | 07.02.05 - 07.02.08 |

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지 농도

3.1.1. 광양 지역의 계절별 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도

광양지역의 계절별 미세먼지농도(PM_{2.5}, PM₁₀)는 아래의 Table 3과 같다. 미세먼지 측정결과 급후동

Table 2. ICP/MS condition for heavy metal analysis

| Instrument | ICP/MS Perkin Elmer Elan 6100 | |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Analysis | R. F. generator | Free-running type, 40 MHz |
| | R. F. power | 1050 W |
| | Induction coil | 3-turn, 1/8 in. copper, 2.6 mm i.d. |
| | Coolant gas flow rate | 18.0 L/min. |
| | Auxiliary gas flow rate | 1.00 L/min. |
| | Nebulizer gas flow rate | 0.88 L/min. |
| | Sample introduction | Peristaltic pump |
| | Sample uptake flow | 1.2 mL/min. |
| | Nebulizer | Concentric type |
| | Spray chamber | Cyclonic type |
| | Torch | Demountable |
| | Interface cones | Platinum |
| | Mass analyzer | Quadrupole |
| | Vacuum system | Turbo molecular pumps |
| | Quadrupole chamber | 5 x 10 ⁻⁷ torr |
| | Replicate time (ms) | 800 |
| | Dwell time (ms) | 80 |
| Condition | Sweeps/Reading | 10 |
| | Reading/Replicate | 1 |
| | Number of Replicates | 3 |
| | Points/Spectral peak | 3 |
| | Cr,As,Cd,Pb/Mass (m/z) | 52,53,75,111,114,208 |
| | Scan mode | Peak hopping |
| | Resolution | 0.3-3.0 amu |

Solvent : 1% HNO₃ in DI water.

지점에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 전체 평균 농도는 각각 22.3 µg/m³, 40.4 µg/m³으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 55.2%를 차지하였고, PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도범위는 15.2 - 31.3 µg/m³, 29.1 - 63.1 µg/m³로 조사되었다. 중동의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀의 평균농도는 각각 28.1 µg/m³, 51.5 µg/m³으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 54.6%를 차지하고 있었으며, PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도범위는 각각 21.6 - 38.6 µg/m³, 40.5 - 72.2 µg/m³으로 금호동과 봉강면에 비해 높은 것으로 나타났다. 금호동과 중동의 겨울철 PM₁₀농도가 일평균기준치인 100 µg/m³를 초과하고 있지 않지만, 연평균기준치인 50 µg/m³를 초과하고 있는데 이는 제철소에서 배출 되는 것 뿐만 아니라 원료나 완제품을 싣고 다니는 대형차량의 배기가스나, 타이어마모 등에 의한 것으로 생각된다. 또한 Kim⁶⁾에 따르면 봄과 겨울철에 시베리아 고기압 강도 지수가 낮아질 경우 상승기류를 일으켜 황사의 발생을 일으킨다고 보고하고 있어 계절적인 영향을 받은 것으로 생각된다. 대조지역인 봉강면

의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀의 전체평균 농도는 각각 16.4 µg/m³, 29.5 µg/m³으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 55.6%였으며, PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도범위는 13.0 - 20.0 µg/m³, 23.4 - 43.2 µg/m³으로 타 지역에 비해 미세먼지의 농도가 적은 것으로 조사되었다. 노출군과 대조군 간에 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀) 농도의 상관성을 분석한 결과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이고 있었다.(p < 0.01)

3.1.2 당진 지역의 계절별 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도

당진지역의 계절별 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)농도는 아래의 Table 4와 같다. 미세먼지 측정결과 고대리 지점에서 PM_{2.5}와 PM₁₀의 전체 평균농도는 각각 27.2 µg/m³, 49.1 µg/m³으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 55.5%를 차지하였고, PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도범위는 15.0 - 43.9 µg/m³, 32.7 - 68.3 µg/m³으로 가곡리와 먼천면에 비해 평균농도가 높게 조사되었다. 가곡리의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀의 전체 평균농도는 25.6 µg/m³,

Table 3. Particulate matter(PM_{2.5}, PM₁₀) concentration in Gwang-yang by Season (Unit: µg/m³)

| Matter | Site | Case | | | p-value |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|---------|
| | | Geumho-dong | | Control | |
| | | Mean ± SD (Range) | Jung-dong Mean ± SD (Range) | Bonggang-myeon Mean ± SD (Range) | |
| PM _{2.5} | Spring | 22.37 ± 7.12 (16.30 - 30.20) | - | 14.43 ± 0.61 (13.90 - 15.10) | 0.000** |
| | Summer | 20.97 ± 1.42 (20.00 - 22.60) | - | 16.10 ± 0.70 (15.40 - 16.80) | |
| | Autumn | 19.47 ± 3.70 (15.20 - 21.80) | 25.63 ± 4.84 (21.60 - 31.00) | 18.80 ± 1.37 (17.30 - 20.00) | |
| | Winter | 26.40 ± 6.44 (19.10 - 31.30) | 30.70 ± 6.92 (25.70 - 38.60) | 16.43 ± 2.19 (13.00 - 18.70) | |
| | Mean± SD (Range) | 22.30 ± 5.18 (15.20 - 31.30) | 28.17 ± 6.02 (21.60 - 38.60) | 16.44 ± 2.19 (13.00 - 20.00) | |
| PM ₁₀ | Spring | 37.53 ± 6.26 (30.08 - 43.20) | - | 24.28 ± 1.16 (23.44 - 25.60) | 0.001** |
| | Summer | 37.16 ± 6.78 (29.60 - 42.70) | - | 25.10 ± 1.48 (24.10 - 26.80) | |
| | Autumn | 33.17 ± 4.76 (29.10 - 38.40) | 49.27 ± 8.38 (43.70 - 58.90) | 31.33 ± 6.50 (24.70 - 37.70) | |
| | Winter | 53.73 ± 9.94 (43.30 - 63.10) | 53.67 ± 16.52 (40.50 - 72.20) | 37.37 ± 3.95 (32.90 - 40.40) | |
| | Mean± SD (Range) | 40.40 ± 10.27 (29.10 - 63.10) | 51.47 ± 11.96 (40.50 - 72.20) | 29.52 ± 6.46 (23.44 - 43.20) | |

**p < 0.01

SD: Standard Deviation

48.7 µg/m³으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 52.6%를 차지하였으며, 농도범위는 16.5 - 37.9 µg/m³, 30.8 - 62.8 µg/m³으로 조사되었다. 고대리(봄, 가을, 겨울)와 가곡리(봄, 가을)의 PM₁₀농도가 일평균 기준치인 100 µg/m³는 초과하고 있지 않지만, 연평균 기준치인 50 µg/m³를 초과하고 있다. 이는 서산기상대의 당진지역 기상자료를 보았을 때, 측정기간 동안 안개나 박무가 자주 일어난 것에 기인한 것으로 생각된다. Shin⁷⁾의 연구에서도 황사 이외에 안개나 연무, 박무시 고농도의 PM₁₀이 발생하는 것으로 보고하고 있다. 대조군인 면천면의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 평균농도는 20.4 µg/m³, 39.2 µg/m³로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 52.0%를 차지하였고, 농도범위는 14.4 - 25.3 µg/m³, 21.2 - 49.6 µg/m³로 노출지역에 비해 현저히 낮은 수치를 나타내고 있다. 노출군과 대조군 간에 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀) 농도의 상관관계를 분석한 결과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이고 있었다.(p < 0.01, p < 0.05)

3.1.3. 두 지역간 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)농도비교
광양제철소와 당진제철소의 미세먼지농도 비교는 아래의 Table 5와 같다.

두 지역간 노출지역과 대조지역의 미세먼지 농도를 비교해 본 결과 당진지역의 미세먼지농도가 광양지역보다 높은 것을 볼 수 있다. Lee⁸⁾에 의하면 철광석을 주원료로 사용하는 고로제철소의 경우 소결먼지, 제강먼지, 소각먼지의 3종류 먼지가 다량 발생한다고 보고하고 있는 것으로 보아, 고로제철소로 원재료(철광석)를 이용하여 철생산을 하고 있는 광양제철소가 고로를 갖추고 있지 않은 당진제철소보다 미세먼지 발생이 많을 거라고 생각되나 실제로는 그렇지 않고 있다. 이는 당진지역의 측정기간 동안 안개나 박무, 연무 등의 기상현상이 자주 일어남에 따라 대기가 안정하여 확산을 하지 못하고, 인근의 서해안고속도로에 의한 영향을 받아 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 생각된다.

두지역의 대조군의 경우 제철소와의 거리도 멀지

Table 4. Particulate matter(PM_{2.5}, PM₁₀) concentration in Dang-jin by Season (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| Matter | Site | Case | | Control | | p-value |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------|
| | | Godae-ri | | Myeoncheon-myeon | | |
| | | Mean \pm SD (Range) | Gagok-ri Mean \pm SD (Range) | Mean \pm SD (Range) | Mean \pm SD (Range) | |
| PM _{2.5} | Spring | 35.03 \pm 7.69 (30.20 - 43.90) | 33.67 \pm 3.79 (30.60 - 37.90) | 23.70 \pm 1.55 (22.20 - 25.30) | | 0.008** |
| | Summer | 17.77 \pm 2.54 (15.00 - 20.00) | 17.73 \pm 2.05 (16.50 - 20.10) | 14.93 \pm 0.76 (14.40 - 15.80) | | |
| | Autumn | 29.07 \pm 2.63 (26.70 - 31.90) | 25.70 \pm 2.72 (23.40 - 28.70) | 20.83 \pm 0.75 (20.10 - 21.60) | | |
| | Winter | 26.73 \pm 2.40 (24.00 - 28.50) | 25.33 \pm 1.68 (23.50 - 26.80) | 22.30 \pm 2.65 (20.00 - 25.20) | | |
| | Mean \pm SD (Range) | 27.15 \pm 7.50 (15.00 - 43.90) | 25.61 \pm 6.31 (16.50 - 37.90) | 20.40 \pm 3.87 (14.40 - 25.30) | | |
| PM ₁₀ | Spring | 59.33 \pm 7.90 (53.40 - 68.30) | 60.13 \pm 3.63 (56.00 - 62.80) | 48.00 \pm 9.87 (46.90 - 49.60) | | 0.011* |
| | Summer | 33.37 \pm 0.76 (32.70 - 34.20) | 35.40 \pm 4.06 (30.80 - 38.50) | 23.77 \pm 2.38 (21.20 - 25.90) | | |
| | Autumn | 53.67 \pm 1.12 (52.70 - 54.90) | 52.67 \pm 0.67 (52.10 - 53.40) | 45.30 \pm 4.20 (41.20 - 49.60) | | |
| | Winter | 50.13 \pm 5.75 (44.40 - 55.90) | 46.60 \pm 3.82 (42.60 - 50.20) | 39.63 \pm 2.93 (36.50 - 42.30) | | |
| | Mean \pm SD (Range) | 49.12 \pm 10.94 (32.70 - 68.30) | 48.70 \pm 9.87 (30.80 - 62.80) | 39.18 \pm 10.12 (21.20 - 49.60) | | |

* p < 0.05, ** p < 0.01.

SD: Standard Deviation

Table 5. Concentration of Gwang-yang and Dang-jin (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| Matter | Site | Gwang-yang | | | Dang-jin | | |
|--------------------------------------|------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | Case | | Control | Case | | Control |
| | | Geumho-dong | Jung-dong | Bonggang-myeon | Godae-ri | Gagok-ri | Myeoncheon-myeon |
| PM _{2.5} (Mean \pm SD) | | 22.30 \pm 5.18 | 28.17 \pm 6.02 | 16.44 \pm 2.19 | 27.15 \pm 7.50 | 25.61 \pm 6.31 | 20.40 \pm 3.87 |
| PM ₁₀ (Mean \pm SD) | | 40.40 \pm 10.27 | 51.47 \pm 11.96 | 29.52 \pm 6.46 | 49.12 \pm 10.94 | 48.70 \pm 9.87 | 39.18 \pm 10.12 |

SD: Standard Deviation

만 농사를 짓는 청정지역으로써 노출군보다는 미세먼지 농도가 현저히 낮음을 볼 수 있다.

3.2. 중금속 농도

3.2.1. 광양지역의 중금속 농도

대기 중 중금속(Cr, As, Cd, Pb) 성분들의 조사 결과는 아래의 Table 6과 같이 조사지역에서 불검출(Not detected: 이하 ND)되거나 낮은 농도로 조사되었다. Pb의 경우 금호동 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중동 0.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

봉강면 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 중동지점이 대체로 높은 것으로 나타났다. Kim⁹⁾에 의하면 Pb의 경우 자동차의 연료에 포함되어있어 배기가스의 배출로 인한 대기 중 Pb의 함량이 커진다고 보고하고 있다. 제철소의 특성상 자동차의 유동이 많기 때문에 다른 중금속보다는 그 함량이 많은 것으로 생각된다. 하지만 국내 대기환경기준(연평균: 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 비교해 보면 모두 기준치 이하를 보였다(Fig. 2).

Table 6. Concentration of metallic elements in Gwang-yang (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| Site | Matter | Cr | As | Cd | Pb | | |
|--------|-------------|----------------|--------|------|------|------|------|
| Case | Geumho-dong | Spring | ND | ND | ND | 0.08 | |
| | | Summer | 0.03 | ND | ND | 0.04 | |
| | | Autumn | ND | ND | ND | 0.04 | |
| | | Winter | ND | ND | ND | 0.07 | |
| | | Mean | 0.01 | ND | ND | 0.06 | |
| | Jung-dong | Autumn | 0.01 | 0.01 | ND | 0.11 | |
| | | Winter | 0.02 | 0.01 | ND | 0.09 | |
| | | Mean | 0.01 | 0.01 | ND | 0.10 | |
| | Control | Bonggang-myeon | Spring | ND | 0.01 | ND | 0.08 |
| | | | Summer | 0.02 | 0.01 | ND | 0.07 |
| Autumn | | | ND | 0.01 | ND | 0.08 | |
| Winter | | | ND | 0.02 | ND | 0.07 | |
| Mean | | | 0.01 | 0.01 | ND | 0.07 | |

ND : Not detected

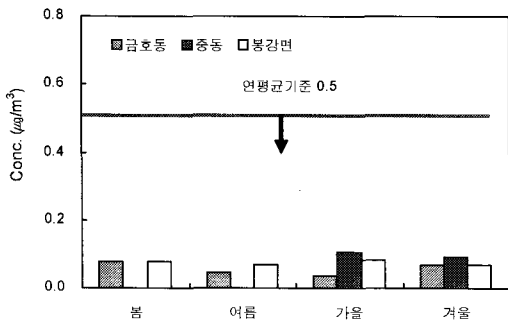


Fig. 2. Concentration of Lead(Pb) by Season.

3.2.2. 당진지역의 중금속농도

당진지역의 경우 Pb, Cd, Cr에 대해서만 대기중 중금속 농도를 조사한 결과는 Table 7과 같다. 대기 중 중금속의 경우 Pb성분은, 고대리 $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가곡리 $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 면천면 $0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 노출지역인 고대리와 가곡리가 대조지역인 면천면에 비해 Pb 농도가 높은 것으로 조사되었는데, 이는 광양지역과 마찬가지로 제철소에서 사용되는 원료나 완제품을 운반하는 차량 뿐만아니라 제철소 인근 서해안고속도로에 의한 영향을 받았을 것이라 생각

Table 7. Concentration of metallic elements in Dang-jin (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| Site | Matter | Pb | Cd | Cr | |
|---------|------------------|--------|------|------|------|
| Case | Godae-ri | Spring | 0.04 | ND | 0.02 |
| | | Summer | 0.02 | ND | ND |
| | | Autumn | 0.17 | ND | 0.02 |
| | | Winter | 0.31 | 0.01 | 0.02 |
| | | Mean | 0.13 | ND | 0.02 |
| | Gagok-ri | Spring | 0.08 | 0.01 | ND |
| | | Summer | ND | ND | ND |
| | | Autumn | 0.25 | 0.01 | 0.02 |
| | | Winter | 0.17 | N.D. | 0.02 |
| | | Mean | 0.13 | N.D. | 0.02 |
| Control | Myeoncheon-myeon | Spring | 0.05 | 0.01 | 0.04 |
| | | Summer | ND | ND | ND |
| | | Autumn | 0.16 | ND | 0.09 |
| | | Winter | 0.25 | 0.01 | 0.02 |
| | | Mean | 0.11 | 0.01 | 0.04 |

ND : Not detected

된다. Heo¹⁰⁾의 연구에서 또한 Motor Vehicle(자동차)의 연소에 의해 Pb성분의 발생이 높은 것으로 보고하고 있다. 하지만 국내 대기환경기준(연평균: 0.5 µg/m³)과 비교해 보면 모두 기준치 이하를 보였다(Fig. 3.). 반면 Cr은 고대리 0.02 µg/m³, 가곡리 0.02 µg/m³, 면천면 0.04 µg/m³으로 대조지역이 노출지역보다 높은 농도를 나타내고 있다. Cr은 자연계에 토양이나 암석에 다량 존재하므로, 대조지역의 경우 주로 농사를 짓는 농촌이기에 지역적인 영향을 받았을 것이라 생각된다. Cd은 불검출(ND)되었거나 낮은 농도로 조사되었다.

3.2.3. 국내 타 지역과의 중금속 농도 비교

본 연구 조사지점의 중금속 농도와 국내 타 지역에서 조사된 농도와 비교해 보았을 때(Table 8), Cr, As, Cd, Pb 성분의 계절평균 농도는 시화공단, 반월

공단 등에 비해 전체적으로 낮은 수치를 보였으며, 시화공단(2001), 울산공단(2004), 반월공단(2006)의 Pb 성분이 국내 대기환경 기준치(연평균: 0.5 µg/m³)를 초과하거나 비슷한 양상을 보이는 반면, 본 연구의 조사지점인 광양(금호동, 중동, 봉강면), 당진(고대리, 가곡리, 면천면)에서는 대기환경기준치에 비해 낮은 수치의 농도범위를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구는 전남에 위치한 광양제철소와 충남에 위치한 당진 현대제철소를 대상으로 공단 반경 5 km 이내에 있는 두 개의 노출지역(광양-금호동, 중동, 당진-고대리, 가곡리)과 공단 반경 10 km 이 외에 있는 한 개의 대조지역(광양-봉강면, 당진-면천면)을 대상으로 광양은 2006년 5월부터 12월까지 8개월에 걸쳐, 당진은 2006년 11월부터 2007년 8월까지 10개월에 걸쳐 수행한 대기 중 미세먼지농도와 중금속 함량을 측정·분석한 결과는 다음과 같다.

1) 광양지역의 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀) 농도는 노출균인 금호동의 경우 각각 22.3 µg/m³, 40.4 µg/m³였으며, 중동은 28.1 µg/m³, 51.5 µg/m³였다. 대조균인 봉강면의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도는 16.4 µg/m³, 29.5 µg/m³로 노출균에 비해 미세먼지의 농도가 적은 것으로 조사되었다. 노출균의 농도가 대조균에 비해 높게 조사되었는데, 이는 제철소에서 발생하는 것 뿐만 아니라 주변의 대형차량의 이동에 의한 배기가스나 타이어마모, 계절적인 영향에 의해 농도가 높은

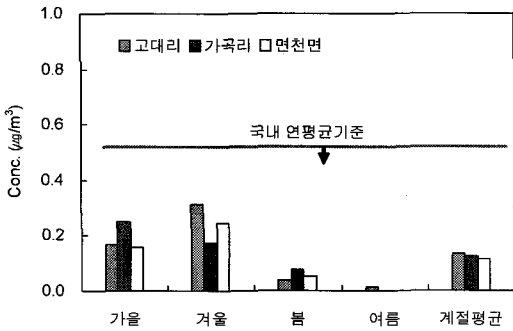


Fig. 3. Concentration of Lead(Pb) by Season.

Table 8. Comparison of metallic elements by industrial area (Unit: µg/m³)

| Site | Matter | Cr | As | Cd | Pb |
|-----------|----------------------------|------|------|------|------|
| | Ulsan(2004) ¹⁾ | ND | ND | 0.02 | 0.67 |
| | Daegu(1993) ²⁾ | ND | 0.01 | ND | 0.26 |
| | Sihwa(2001) ³⁾ | 0.27 | 0.03 | 0.02 | 0.73 |
| | Sihwa(2006) ⁴⁾ | 0.24 | 0.01 | 0.01 | 0.30 |
| | Banwol(2006) ⁴⁾ | 0.16 | 0.01 | 0.02 | 0.49 |
| GwangYang | Geum-dong | 0.01 | ND | ND | 0.06 |
| | Jung-dong | 0.01 | 0.01 | ND | 0.10 |
| | Bonggang-myeon | 0.01 | 0.01 | ND | 0.07 |
| Dangjin | Godae-ri | 0.02 | - | ND | 0.13 |
| | Gagok-ri | 0.02 | - | ND | 0.13 |
| | Myeoncheon-myeon | 0.04 | - | 0.01 | 0.11 |

¹⁾국립환경과학원(2004), ²⁾최진수(1997), ³⁾시흥환경기술개발센터, ⁴⁾국립환경과학원(2006)
 ND : Not detected

것으로 생각된다. 노출군과 대조군 간에 미세먼지 (PM_{2.5}, PM₁₀) 농도의 상관성을 분석한 결과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이고 있었다.(p < 0.01)

2) 당진지역의 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀) 농도는 노출군인 고대리의 경우 각각 27.2 µg/m³, 49.1 µg/m³였으며, 가곡리는 25.6 µg/m³, 48.7 µg/m³였다. 대조군인 면천면의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도는 20.4 µg/m³, 39.2 µg/m³로 광양지역과 마찬가지로 대조군에 비해 노출군의 농도가 높게 조사되었다. 당진지역과 광양지역의 노출군과 대조군의 농도를 비교해 보았을 때, 대체적으로 당진지역의 미세먼지 농도가 높게 나타났는데 이는 당진지역에 박무, 안개와 같은 기상현상이 잦았으며, 인근에 서해안고속도로를 끼고 있는 지형적인 영향을 많이 받아 농도치가 높은 것으로 생각된다. 노출군과 대조군 간에 미세먼지 (PM_{2.5}, PM₁₀) 농도의 상관성을 분석한 결과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이고 있었다.(p < 0.01, p < 0.05)

3) 광양지역의 대기 중 중금속(Cr, As, Cd, Pb)의 대부분은 불검출(ND)되거나 낮은 농도였으며, Pb의 경우 금호동 0.06 µg/m³, 중동 0.10 µg/m³, 봉강면 0.07 µg/m³으로 조사되었다.

4) 당진지역의 대기 중 중금속(Cr, Cd, Pb)의 경우 Pb성분은 고대리 0.13 µg/m³, 가곡리 0.13 µg/m³, 면천면 0.11 µg/m³로 노출지역이 대조지역에 비해 높은 농도로 조사되었다. 반면 Cr은 고대리 0.02 µg/m³, 가곡리 0.02 µg/m³, 면천면 0.04 µg/m³로 대조지역이 노출지역보다 높은 농도를 나타내고 있다. 이는 자연계에 토양이나 암석에 다량 존재하는 Cr의 특성상 농사를 주로 짓는 대조지역의 지역적인 영향을 받은 것이라 생각된다.

5) 국내 타 지역과 중금속 농도를 비교해 본 결과 시화공단(2001), 울산공단(2004), 반월공단(2006)의 Pb성분이 국내 대기환경기준치(연평균: 0.5 µg/m³)를 초과하거나 비슷한 양상을 보이는 반면, 본 연구의 조사지점인 광양(금호동, 중동, 봉강면), 당진(고대리, 가곡리, 면천면)에서는 대기환경기준치에 비해 낮은 수치의 농도범위를 보이고 있었다.

이상의 조사결과로 공단지역 대기 중 미세먼지 (PM_{2.5}, PM₁₀)와 중금속(Cd, Cr, As, Pb)농도를 통해 미세먼지에 의한 건강영향의 중요성을 인식함으로써, 지역주민을 대상으로 한 환경관리 대책을 수립

하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 현재 당진의 경우 연구사업이 진행되고 있지 않기 때문에 당진 지역에 설치되어 있는 자동측정망 자료를 활용하고, 광양의 경우 환경부에서 실시하는 모니터링 사업의 연차적 수행을 통하여, 미세먼지 발생원의 추적과 정확한 측정, 그에 따른 오염원의 정량적 확인이 계속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) Ministry of Environment, 2007, Environment White Paper, 383 - 384.
- 2) 지역주민 환경오염 노출수준 및 생체지표 모니터링(광양 1차년도).
- 3) Gong M. Y., 2002, Concentration and Metallic Compositions of Particulated Matter(PM_{2.5}) in Certain Focal Area of Asan and Seoul, Master Dissertation, Dep. Environmental Health Science, Soon Chun Hyang University, Asan.
- 4) 이종태, 2003, 미세먼지 건강영향에 대한 국내 역학 연구 사례, 환경독성학회 춘계학술대회, 129 - 142.
- 5) Yoo S. H., 1990, Ecological Society of Korea Report, 87 - 96.
- 6) Kim S. Y., Lee S. H., 2006, The Spatial Distribution and Change of Frequency of the Yellow sand Days in Korea, Env. Impact Assessment, 15(3), 207 - 215.
- 7) Shin M. K., Lee C. D., Ha H. S., Choe C. S., Kim Y. H., 2007, The Influence of Meteorological Factors on PM₁₀ Concentration in Incheon, Atmos. Env., 23(3), 322 - 331.
- 8) Lee J. S., Hwang K. S., Gong S. Y., 1997, Electrostatic Precipitation Characteristics of Dust from Iron and Steel Plant, Env. Engineers, 19(8), 1033 - 1042.
- 9) Kim S. W., 1997, Source Characterization and Concentration of Chemical Elements in Fine Particulate in An Industrial Area, Master Dissertation, Graduate School of Env. Studies, Hanyang University, Seoul.
- 10) Heo J. B., 2005, Source Identification of PM_{2.5} in Gwang-yang by Positive Matrix Facatorization, Master Dissertation, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul.