일반대기 중 극미세입자와 중금속 농도에 관한 연구

조태진 · 전해리 · 윤형선* · 이미영** · 손부순†

순천향대학교 환경보건학과, *순천향대학교 임상병리학과, **순천향대학교 의료생명공학과
(2010. 8. 6. 접수/2010. 10. 28. 수정/2010. 12. 21. 채택)

A Study on the Size of Ultrafine Particles and Heavy Metal Concentrations in the Atmosphere

Tea-Jin Cho · Hye-Li Jeon · Hyung-Sun Youn* · Mi-Young Lee** · Bu-Soon Son†

Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam, Korea

**Department of Biomedical Laboratory Science, Soonchunhyang University, Chungnam, Korea*

***Department of Medical Biotechnology, Soonchunhyang University, Chungnam, Korea*

(Received August 6, 2010/Revised October 28, 2010/Accepted December 21, 2010)

ABSTRACT

This study evaluated the distribution of the concentrations of nano-particles and heavy metals (08-Pb, Cr, Zn, As, Fe, 09-Pb, Cr, Zn, Cu, Ni, Mn) in Seoul, Chungnam A and Gwangyang from August to December, in 2008 5 times each in the Seoul area, 5 times in and Chungnam A area and from August to November, in 2009 14 times in the Chungnam A area, 8 times in the Gwangyang area. The examined results showed high concentration level from PM₁ through PM_{0.1} in all three areas. These results were obtained the concentration of particles by diameter and statistically significant in Stage5 (1.0-0.56 μ m) from the result of conducting Kruskal-Wallis H test ($p < 0.05$). In the case of the heavy metal concentration included in 0.10-0.056 μ m, 0.056 μ m, the lead concentration of Chungnam Asan area was 6.49 ng/m³ and 9.93 ng/m³, which was higher than 3.05 ng/m³ and 4.22 ng/m³ of Seoul, respectively. The concentration of iron in Seoul was 9.28 ng/m³ and 13.24 ng/m³, that appeared higher than 2.38 ng/m³ and 3.23 ng/m³ of Chungnam A area, respectively. The concentration level was similar to other metals except lead and iron in Chungnam A area and Seoul. From the concentration of heavy metal included in 0.10-0.056 μ m, 0.056 μ m, the lead concentration of Chungnam A area was 0.31 ng/m³ and 0.12 ng/m³ while Gwangyang was 0.28 ng/m³, 0.06 ng/m³. Thus Chungnam A area showed higher lead concentration than Gwangyang. The manganese concentration of Chungnam A area was 0.12 ng/m³ and 0.03 ng/m³ while Gwangyang was 0.21 ng/m³ and 0.08 ng/m³. Therefore, the concentration of Gwangyang appeared higher than that of Chungnam A area. These two metals showed statistically significant in 0.056 μ m ($p < 0.05$, $p < 0.01$). Among the concentration of heavy metal in all regions, the result demonstrated that the order of higher concentration is arsenic > iron > zinc > chrome > lead > nickel > copper > manganese.

Keywords: nano-particles, heavy metal, distribution, concentration

I. 서 론

20세기말 이후 IT(InformationTechnology), BT(BioTechnology)와 함께 등장한 NT(NanoTechnology) 분야의 발달로 인한 공업용 제조 나노물질(Engineered Nanomaterials)의 생산이 급증하면서 환경 중 극미세입자의 노출이 증가하고 있음에도 불구하고, 극미세입자

의 환경 거동이나 물리적·화학적 특성 파악 등 이 분야의 연구가 활발히 이루어지지 않고 있다.¹⁾

대기 중 입자상 물질은 입자의 직경에 따라 Nucleation Range(3-100 nm), Accumulation Range(100-1,000 nm), Coarse Range(1-20 μ m)로 구분하며 앞의 두 범주를 미세입자(Fine Particle), Nucleation Range의 입자를 구분하여 극미세입자(Ultrafine Particle) 또는 극미세입자(Nano Particles)라고 한다. 극미세입자의 경우 직경이 100 nm 이하인 Nucleation Range에 속하며, 화산폭발, 화재, 디젤 자동차의 배기가스, 발전소 등을 통해 자연적으로 발생되거나 산업적 필요에 의

†Corresponding author : Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University
Tel: 82-41-530-1270, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : sonbss@sch.ac.kr

해 인위적으로 생산된다.^{2,5)}

기존의 많은 연구에서는 Coarse Range에 속하는 PM₁₀(Particulate Matters less than 10 μ m), PM_{2.5}(Particulate Matters less than 2.5 μ m)의 측정 자료를 기반으로 수행되어 왔지만, 최근 독성학적인 조사 및 역학연구에서 100 nm 이하의 극미세입자가 큰 입자(Coarse Range)에 비해 질량당 위해도가 높다는 것이 밝혀지면서 극미세입자에 대한 관심이 고조되고 있다.³⁾ 일반적으로 2.5 μ m 이하의 미세입자의 경우 호흡기 깊숙이 침입하여 폐에 염증을 일으키고 2차적으로 혈액에 영향을 주어 호흡기 및 심장질환을 초래하거나 조기사망 등 여러 가지 건강장해를 초래하는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 특히 극미세입자는 큰 입자, 미세입자보다 그 크기가 매우 작기 때문에 호흡에 의해 쉽게 폐포 깊숙이 침투가 가능하며, 입자의 화학적인 조성(Chemical Compounds), 입자의 형태(Shape), 구조(Structure), 표면적(Surface Area), 전기적 성질(Surface Charge)에 따라 인간에게 건강영향을 주는 잠재적인 요인으로 작용할 수 있다.

폐포에 침착된 극미세입자는 대식세포의 탐식작용과 기관지의 점액섬모운동으로 제거될 수 있으나, 일부 입자는 다양한 경로를 통하여 혈류나 림프계에 운송되어 독성작용을 일으킨다.⁵⁾ 폐포 깊숙이 운반된 극미세입자에 함유되어있는 화학성분은 독성작용을 하여 암을 일으킬 수 있으며, 산성 성분이 함유되어 있을 경우 폐조직의 염증과 부어오르게 된다고 보고되었다.⁶⁾

또한 시험관내(In Vitro) 세포독성 비교연구에서도 같은 노출 기준일 때 극미세입자가 보다 강한 염증을 유발하여 폐세포 경화를 일으키는 것으로 보고되었으며, 나노물질이 새로운 기작을 통해 폐를 손상시켜 이상 염증 유발과 폐경화를 일으킨다고 보고되었다.⁷⁾

입자상물질에 있는 미량의 금속성분 또한 화석연료나 목재의 연소, 고온의 산업공정, 폐기물소각, 산불, 바람에 의한 표면부식, 화산작용, 바다 염 등을 통해 인공적·자연적으로 발생하여 가스 또는 입자의 형태로 대기 중에 존재하며, 이들을 흡입했을 경우 인체에 독성 영향이 있다는 연구결과가 보고되고 있다.⁸⁾

인체에 영향을 줄 수 있는 화학 물질에는 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 망간(Mn), 아연(Zn), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 구리(Cu) 등이 있으며, 이들은 인체에 흡수되어 활성산소를 생산하는 등 여러가지 기전을 통해 호흡기 및 순환기계 뿐만 아니라 정신적인 질환을 야기할 수 있어 인체의 위해성을 평가하는데 중요한 지표이다.⁹⁾

하지만 우리나라에서는 PM_{2.5}, PM₁₀에 관한 중량·중금속 농도 및 위해성평가에 관한 보고는 활발히 진행

되어지고 있는 반면 일반 대기 중의 극미세입자(Ultrafine Particle)에 관한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 다단 임팩터인 Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor Model-110(MOUDI-110)을 이용하여 대도시와 중소도시, 공단지역의 일반 대기 중 극미세입자의 중량 농도와 중금속 농도를 산출하여 두 지역 간의 나노입자의 농도와 금속성분의 조성을 비교하고 극미세입자에 의한 대기오염 관리 대책을 마련하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 대상 지역을 대도시, 중소도시, 공단지역으로 나누어 대都市는 서울의 H대학교(서울시 성동구 행당동 소재), 중소都市는 충남 아산지역의 S대학교(충남 아산시 신창면 소재, 이하 충남 A지역), 공단지역은 광양의 태인 정수장(전남 광양시 태인동 소재)을 대상으로 하여 2008년 8월부터 12월(서울지역 5회, 충남 A지역 5회), 2009년 8월부터 11월(충남 A지역 14회, 광양지역 8회)까지 연구를 수행하였다. 세 지역의 측정지점 모두 주거지역과 인접하고 교통량이 많은 지역이었으며, 장비의 특성(높은 전력량, 큰 소음과 진동)을 고려하여 측정지점을 선정하였다.

2. 측정 및 분석방법

1) 시료의 포집방법

대기 중 극미세입자(Nano Particles)의 측정에는 MOUDI(MSP Corporation, USA)를 이용하여 분당 30 l/min의 유량으로 3일동안(72시간) 연속 측정하였다(Fig. 2). 필터(Filter)는 Stage 1-Stage 8까지 Pallflex Membrane Filter(47 mm, Pall Life Science 社)를 사용하였으며, 극미세입자에 해당하는 Stage 9-Stage 10의는 PTFE Filter(46.2 mm, Whatman 社, USA)를 사

Table 1. Specifications

	MOUDI Model-110
Impactor Stage	10 Stage
Flow Rate, l/min	30 l/min
Power	115VAC 50/60 Hz, 0.5A
Size (D×H)	220×560 mm
Cut-point Diameter, μ m	10, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32, 0.18, 0.10, 0.056
Pump	GAST Model 0823 Series

Table 2. Nominal cut size, number and diameter of nozzles

Stage	Nominal Cut Size (μm)	Number of Nozzles	Nozzle Diameter (mm)
1	10	1	8.89
2	5.6	10	3.80
3	3.2	10	2.47
4	1.8	20	1.37
5	1.0	40	0.720
6	0.56	80	0.410
7	0.32	900	0.130
8	0.18	900	0.100
9	0.10	2000	0.055
10	0.056	2000	0.052

용하였다. 필터는 항온, 항습 상태인 데시케이터 내에서 48시간 이상 보관하여 사용하였으며, $1\mu\text{g}$ 까지 측정 가능한 Micro Balance(CPA2P-F, Sartorius, 독일)를 이용하여 무게를 측정 한 후 시료를 포집하였다. MOUDI의 기기 사양 및 각 Stage에 대한 사항을 Table 1과 2에 제시하였다.

2) 시료의 분석방법

(1) 극미세입자(Nano Particles) 농도

포집한 시료는 채취 전과 동일한 방법으로 항온, 항습 상태인 데시케이터 내에서 48시간 이상 보관한 후 $1\mu\text{g}$ 까지 측정 가능한 Micro Balance(CPA2P-F, Sartorius, 독일)를 이용하여 필터 무게를 측정 한 후 대기오염 공정시험법에 따라 질량 농도를 분석하였다.

(2) 금속성분(Heavy Metal) 농도

극미세입자 중 중금속 농도는 ICP-AES를 사용하여 분석을 실시하였으며, 중금속 분석은 극미세입자에 해당하는 Stage 9($0.10\text{--}0.056\mu\text{m}$)와 Stage 10($\leq 0.056\mu\text{m}$)만 분석을 하였다. 2008년도의 경우 Pb, Cd, Cr, As, Fe, Mn을 분석하였으며, 2009년도의 경우 Mn, Zn, Ni, Cu, Cd, Pb, Cr에 대해 분석을 실시하였다.

극미세입자 중의 금속성분을 추출하기 위해 대기오염 공정시험법의 전처리 방법(초음파 추출법)을 이용하여 다음과 같이 실시하였다.¹⁰⁾ 포집한 시료를 100 ml 비커에 담은 후 용기에 염산(2.23 M HCl , Dongwoo Fine-Chem 社, Korea)과 질산(1.03 M HNO_3 , Dongwoo Fine-Chem 社, Korea)을 1대 1로 혼합하여 30 ml 첨가하고 sealing film으로 비커를 밀봉한다. 밀봉한 비커를 100°C 정도의 물이 담긴 초음파 추출기에 잠길 정도로 담근 후 28 kHz의 초음파로 2시간 동안 추출하였

다. 추출 후 비커내의 필터를 제거하고 갈때기를 이용하여 시료를 여과하여 최종용액이 30 ml가 되도록 필터를 증류수로 세척하였다.

전처리 후 ICP-AES(ICPS-7510, Shimadzu, Japan)를 이용하여 중금속 농도를 분석하고, 공시료 값에 대하여 보정을 하였다. 분석에 사용한 표준용액은 Multielement standard solution I for ICP 10% in nitric acid(Fluka)를 사용하여 0, 4, 10, 20, 40 ppb로 희석한 용액을 표준물질로 사용하였다.

3. 통계분석

측정결과와 분석을 위하여 SPSS Ver. 16.0 패키지를 이용하여 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

기상자료와 미세먼지(PM_{10}), 입자의 농도, 중금속 농도 등은 기술통계 분석을 이용하였고, 입경에 따른 지역별 농도 차이의 검정은 Kruskal-wallis H, 지역별, 월별, 계절에 따른 농도 차이의 검정은 Mann-Whitney U test를 사용하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 미세 · 극미세입자 농도

1) 입자의 입경별 농도

서울과 충남 A지역, 광양의 입경별 농도를 단(Stage 1-10)별로 나누어 Table 3에 제시하였으며, 농도 분포는 Fig. 1에 제시하였다.

세 지역의 입경별 농도를 살펴 본 결과 입자의 농도 분포가 비슷한 유형을 보이고 있었으며, $0.10\mu\text{m}$ 부터 $0.056\mu\text{m}$ 이하의 극미세입자가 지역별로 충남 A지역 6%, 서울 7%, 광양 13%를 차지하고 있었다.

또한 세 지역 모두 Stage 5(PM_{10})에서 Stage 9($\text{PM}_{0.1}$) 사이의 농도가 높게 나타났으며, 입자의 농도에 대한 검정을 실시한 결과 Stage 5($1.0\text{--}0.56\mu\text{m}$)에서 통계적

Fig. 1. Concentration and size of particles in three regions.

Table 3. The concentration of fine particles and ultrafine particles according to the size in three areas in three areas (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		10-5.6 μm		5.6-3.2 μm		3.2-1.8 μm		1.8-1.0 μm		1.0-0.56 μm		0.56-0.32 μm		0.32-0.18 μm		0.18-0.10 μm		0.10-0.056 μm		$\leq 0.056 \mu\text{m}$	
		(1)	s	(2)	s	(3)	s	(4)	s	(5)	s	(6)	s	(7)	s	(8)	s	(9)	s	(10)	s
Seoul (2008)	N	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
	Mean $\pm$ SD ^a	3.54 $\pm$ 4.67		3.91 $\pm$ 1.68		4.22 $\pm$ 2.00		3.05 $\pm$ 1.82		7.33 $\pm$ 7.37		7.94 $\pm$ 7.17		3.79 $\pm$ 2.78		2.61 $\pm$ 1.44		2.09 $\pm$ 2.76		0.94 $\pm$ 0.55	
	GM ^b	2.09	3.61	3.61	3.82	3.82	2.63	2.63	5.00	5.00	5.77	5.77	2.97	2.97	2.29	2.29	1.24	1.24	0.78	0.78	
	Min	0.93	2.09	2.09	1.88	1.88	1.33	1.33	2.44	2.44	3.03	3.03	0.98	0.98	1.12	1.12	0.58	0.58	0.25	0.25	
	Max	11.82	5.76	5.76	6.80	6.80	5.44	5.44	19.31	19.31	19.04	19.04	7.91	7.91	4.55	4.55	6.98	6.98	1.49	1.49	
Chungnam A (2008-2009)	N	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
	Mean $\pm$ SD ^a	3.73 $\pm$ 4.56		5.19 $\pm$ 3.36		6.60 $\pm$ 4.83		4.86 $\pm$ 3.11		5.76 $\pm$ 3.65		8.83 $\pm$ 9.26		4.55 $\pm$ 2.90		3.09 $\pm$ 1.24		2.01 $\pm$ 3.09		1.10 $\pm$ 0.88	
	GM ^b	2.68	4.31	4.31	5.49	5.49	4.04	4.04	4.77	4.77	6.51	6.51	3.94	3.94	2.87	2.87	1.30	1.30	0.85	0.85	
	Min	0.67	1.28	1.28	2.23	2.23	1.71	1.71	1.42	1.42	2.36	2.36	1.91	1.91	1.40	1.40	0.55	0.55	0.16	0.16	
	Max	21.69	14.69	14.69	21.98	21.98	11.84	11.84	14.56	14.56	43.48	43.48	13.93	13.93	6.16	6.16	14.23	14.23	3.61	3.61	
Gwangyang (2009)	N	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	Mean $\pm$ SD ^a	2.43 $\pm$ 1.25		3.52 $\pm$ 1.35		4.22 $\pm$ 1.48		2.62 $\pm$ 0.67		2.67 $\pm$ 1.06		4.62 $\pm$ 1.43		3.72 $\pm$ 1.29		2.04 $\pm$ 0.45		3.52 $\pm$ 4.35		2.24 $\pm$ 2.74	
	GM ^b	2.13	3.26	3.26	3.97	3.97	2.55	2.55	2.50	2.50	4.39	4.39	3.49	3.49	2.00	2.00	2.07	2.07	1.21	1.21	
	Min	0.74	1.42	1.42	1.84	1.84	1.93	1.93	1.78	1.78	2.25	2.25	1.70	1.70	1.48	1.48	0.82	0.82	0.29	0.29	
	Max	4.83	5.16	5.16	5.98	5.98	3.88	3.88	4.43	4.43	6.29	6.29	5.74	5.74	2.93	2.93	12.31	12.31	6.86	6.86	
p-value ^c		0.552		0.554		0.317		0.165		0.041*		0.420		0.869		0.084		0.231		0.828	

^aArithmetic mean $\pm$ Arithmetic standard deviation

^bGeometric mean.

^cKruskal-wallis H.

* p<0.05.

으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). Cabada 등¹¹⁾의 피츠버그시를 대상으로한 피츠버그 공기질연구(Pittsburgh Air Quality study, PAQS)에서도 PM에서 PM_{0.1} 사이의 입자들이 대부분의 농도를 차지한다고 보고하고 있어 본 연구결과와 동일하게 나타났으며, 이와 같은 결과는 자동차 내연기관(엔진)에서 발생하는 극미세입자가 크게 작용한 것으로 생각된다.

따라서 향후 PM₁₀, PM_{2.5}와 함께 극미세입자에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

2) 입경에 따른 각 지역의 월별 입자 농도

지역에 따른 월별 입자의 농도 분포를 살펴 본 결과 8월과 9월(여름)의 경우 모든 지역에서 비슷한 농도 분포를 보이고 있었으며, 대부분의 입경에서 저 농도를 나타냈다(Fig. 2-3). 10월과 11월은 Stage 5(PM₁)에서 Stage 9(PM_{0.1}) 사이의 농도가 다른 단(Stage)에 비해 높게 조사되었으며(Fig. 4, 5), 겨울철에 해당되는 12월은 입경이 작은 극미세입자 보다는 입경이 큰 입자들

의 농도가 높게 나타났다(Fig. 6). 이와 같은 결과는 교통지역의 계절별 미세먼지에 관한 Cheng 등¹²⁾의 연구결과와 일치하였으나, Cabada 등¹²⁾의 연구에서는 여름철의 농도가 높고 겨울철에 농도가 낮게 조사되어 본 연구와 상반된 결과를 보였다. 우리나라는 건기 상태가 오랫동안 지속되는 피츠버그에 비해 4계절이 뚜렷하고 여름철에 장마가 오기 때문에 상반된 결과를 나타낸 것

Fig. 2. The distribution of the particle concentrations among the areas in August. "08" indicates the result from 2008 measuring and "09" indicates from 2009.

Fig. 3. The distribution of the particle concentrations among the areas in September. "08" indicates the result from 2008 measuring and "09" indicates from 2009.

Fig. 4. The distribution of the particle concentrations among the areas in October. "08" indicates the result from 2008 measuring and "09" indicates from 2009.

Fig. 5. The distribution of the particle concentrations among the areas in November. "08" indicates the result from 2008 measuring and "09" indicates from 2009.

Fig. 6. The distribution of the particle concentrations among the areas in December. "08" indicates the result from 2008 measuring.

이라 생각된다.

3) 지역에 따른 월별 극미세입자 농도

(1) 충남 A지역의 월별 극미세입자 농도

충남 A지역의 2008년과 2009년의 월별 극미세입자의 기하평균 농도를 Table 4와 5에 나타내었다.

두 해 모두 $0.056\mu\text{m}$ 이하의 입자보다 $0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$ 사이의 입자 농도가 높게 나타났으며, 주로 8월과 11월의 극미세입자 농도가 9월과 10월에 비해 높은 것으로 조사되었다. 또한 2009년과 2008년의 농도를 비교해 본 결과 2009년 보다 2008년의 농도가 높게 나타났으며, 이는 2008년에 시작된 신축건물의 토목공사에 의한 영향으로 생각된다.

(2) 서울의 월별 극미세입자 농도

서울의 2008년 극미세입자의 기하평균 농도를 Table 6에 나타내었다.

서울의 경우 10월달의 $0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$, $\leq 0.056\mu\text{m}$ 의 농도가 $6.98\mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.49\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 달에 비하여 농도가 높게 조사되었으며, 실제 황사가 있었던 12월의 $0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$, $\leq 0.056\mu\text{m}$ 농도는 $1.46\mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.97\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 농도를 나타냈다. 김 등¹³⁾의 연구결과 황사 기간 동안은 큰 입자영역의 농도가 현격하게 증가하는 반면 미세입자의 영역은 절대적인 관점에서 미미한 수준이라고 말해 황사가 나타났던 12월의 극미세입자 농도가 낮게 조사된 것이라 생각된다.

(3) 광양의 월별 극미세입자 농도

2009년 광양의 월별 극미세입자의 기하평균 농도를 Table 7에 나타내었다.

광양의 경우 8월달의 $0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$, $\leq 0.056\mu\text{m}$ 의 농도가 $3.90\mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.31\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 달에 비하여 농도가 높게 나타났으며, 9월부터 11월까지의 농도를 보였다.

Table 4. Monthly concentration of ultrafine particles in Chungnam A (2008) (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	August	September	October	November	December
	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)
$0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$	4.32(1)	1.03(1)	1.87(1)	2.40(1)	1.72(1)
$\leq 0.056\mu\text{m}$	3.61(1)	0.79(1)	2.58(1)	1.27(1)	1.71(1)

^aGeometric mean

Table 5. Monthly concentration of ultrafine particles in Chungnam A (2009) (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	August	September	October	November
	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)
$0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$	3.44(2)	0.96(5)	0.73(4)	1.18(3)
$\leq 0.056\mu\text{m}$	0.96(2)	0.61(5)	0.45(4)	0.97(3)

^aGeometric mean

Table 6. Monthly concentration of ultrafine particles in Seoul (2008) (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	August	September	October	November	December
	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)
$0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$	0.62(1)	0.58(1)	6.98(1)	0.79(1)	1.46(1)
$\leq 0.056\mu\text{m}$	0.25(1)	1.47(1)	1.49(1)	0.54(1)	0.97(1)

^aGeometric mean

Table 7. Monthly concentration of ultrafine particles in Gwangyang (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	August	September	October	November
	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)	GM ^a (N)
$0.10\text{-}0.056\mu\text{m}$	3.90(4)	1.22(2)	0.82(1)	1.20(1)
$\leq 0.056\mu\text{m}$	2.31(4)	0.45(2)	0.51(1)	1.49(1)

^aGeometric mean

Table 8. The concentration of seasonal fine particles and ultrafine particles in Chungnam A and Seoul(Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		Chungnam A(2008)			Seoul(2008)			p-value ^c
		N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	
Summer	PM ₁₀	2	39.54 $\pm$ 6.33 (35.07 - 44.02)	39.29	2	19.53 $\pm$ 1.89 (18.20 - 20.86)	19.49	0.333
	PM ₁	2	16.71 $\pm$ 0.89 (16.08 - 17.34)	16.70	2	10.35 $\pm$ 0.87 (9.74 - 10.96)	10.33	0.333
	0.10-0.056 μm	2	2.67 $\pm$ 2.33 (1.03 - 4.32)	2.11	2	0.60 $\pm$ 0.30 (0.58 - 0.62)	0.60	0.333
	$\leq 0.056 \mu\text{m}$	2	2.20 $\pm$ 2.00 (0.79 - 3.61)	1.69	2	0.86 $\pm$ 0.87 (0.25 - 1.47)	0.60	0.667
Autumn	PM ₁₀	3	85.66 $\pm$ 25.03 (59.57 - 109.48)	83.08	3	52.67 $\pm$ 23.48 (30.63 - 77.36)	49.12	0.200
	PM ₁	3	49.55 $\pm$ 27.88 (33.18 - 81.74)	45.06	3	34.26 $\pm$ 23.63 (11.15 - 58.37)	27.86	0.700
	0.10-0.056 μm	3	1.99 $\pm$ 0.36 (1.72 - 2.40)	1.97	3	3.07 $\pm$ 3.39 (0.79 - 6.98)	2.00	0.700
	$\leq 0.056 \mu\text{m}$	3	1.86 $\pm$ 0.67 (1.27 - 2.58)	1.78	3	1.00 $\pm$ 0.48 (0.54 - 1.49)	0.92	0.200

^aArithmetic mean $\pm$ Arithmetic standard deviation^bGeometric mean^cMann-Whitney U test

4) 계절별 미세 · 극미세입자 농도

Stage 1부터 Stage 10까지 모든 입경의 합인 PM₁₀과 Stage 5부터 Stage 10까지의 합인 PM₁, 극미세입자에 해당하는 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 으로 나누어 계절별 기하평균 농도를 제시하였다.

(1) 충남 A지역과 서울의 계절별 농도

2008년도의 계절별 농도를 여름과 가을로 구분하여 두 지역의 농도를 살펴 본 결과 여름철(8월-9월) 충남 A지역의 PM₁₀, PM₁, 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 의 농도는 39.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 16.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 서울은 19.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 충남 A지역의 농도가 서울보다 높은 것으로 나타났다(Table 8).

가을철(10월-12월) 충남 A지역의 PM₁₀, PM₁, 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 의 농도는 83.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 45.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 서울은 49.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 가을철의 경우도 충남 A지역이 서울보다 높은 농도를 보였으나 두 지역 간의 통계적인 유의한 차이는 없었다.

박¹⁴⁾의 연구결과에 의하면 상대습도가 증가할수록 극미세입자의 크기가 증가된다고 보고하고 있어 측정기간 동안의 기상자료를 비추어 볼 때 충남 A지역이 다른 지역에 비해 습도가 높고, 측정 장소 인근에 신축건물 공사현장이 인접해 있어 그로인한 영향을 받은 것으로 생각된다.

(2) 충남 A지역과 광양의 계절별 농도

2009년도 충남 A지역과 광양의 계절에 따른 농도를 살펴 본 결과 여름철(8월-9월) 충남 A지역의 PM₁₀, PM₁, 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 의 농도는 42.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 광양은 32.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 18.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM₁₀과 PM₁은 충남 A지역이 높았고, 극미세입자의 경우에는 광양의 농도가 높은 것으로 나타났다(Table 9). 이¹⁵⁾의 연구결과 큰 입자가 미세입자보다 풍속에 대한 영향을 받는 것으로 조사되어, 본 연구에서 풍속이 가장 높았던 광양지역이 큰 입자보다 미세입자 영역의 농도가 높게 나타난 것으로 생각된다.

가을철(10월-12월) 충남 A지역의 PM₁₀, PM₁, 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 의 농도는 30.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

Table 9. The concentration of seasonal fine particles and ultrafine particles in Chungnam A and Gwangyang(Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

		Chungnam A(2009)			Gwangyang(2009)			p-value ^c
		N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	
Summer	PM ₁₀	7	44.12 $\pm$ 14.40 (30.32 - 73.30)	42.44	8	34.06 $\pm$ 9.81 (25.19 - 49.33)	32.94	0.181
	PM ₁	7	26.22 $\pm$ 9.63 (13.48 - 43.81)	24.77	8	19.56 $\pm$ 8.41 (10.39 - 29.50)	18.04	0.234
	0.10-0.056 μm	7	2.85 $\pm$ 5.02 (0.70 - 14.23)	1.38	8	4.36 $\pm$ 4.80 (1.16 - 12.31)	2.65	0.073
	$\leq 0.056 \mu\text{m}$	7	0.78 $\pm$ 0.49 (0.42 - 1.85)	0.70	8	2.65 $\pm$ 3.09 (0.29 - 6.86)	1.34	0.295
Autumn	PM ₁₀	7	32.00 $\pm$ 12.64 (18.86 - 52.22)	30.05	2	40.97 $\pm$ 20.91 (26.18 - 55.75)	38.20	0.500
	PM ₁	7	16.56 $\pm$ 6.64 (8.71 - 28.82)	15.51	2	16.55 $\pm$ 0.38 (16.28 - 16.82)	16.55	0.889
	0.10-0.056 μm	7	0.97 $\pm$ 0.48 (0.55 - 2.00)	0.90	2	1.01 $\pm$ 0.27 (0.82 - 1.20)	0.99	0.667
	$\leq 0.056 \mu\text{m}$	7	0.79 $\pm$ 0.61 (0.16 - 2.09)	0.63	2	1.00 $\pm$ 0.69 (0.51 - 1.49)	0.87	0.889

^aArithmetic mean $\pm$ Arithmetic standard deviation^bGeometric mean^cMann-Whitney U test

0.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 광양은 38.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 16.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 여름에는 충남 A지역이, 가을에는 광양이 높은 농도를 보였으나, 두 지역 간의 통계적인 유의한 차이는 없었다.

2. 극미세입자 중 중금속 농도

1) 충남 A지역과 서울의 중금속 농도

2008년도 충남 A지역과 서울의 극미세입자 중 중금속의 기하평균 농도를 Table 10에 제시하였다.

충남 A지역의 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 에 포함된 납 농도는 각각 6.49 ng/m^3 , 9.93 ng/m^3 로 서울의 3.05 ng/m^3 , 4.22 ng/m^3 에 비해 높게 나타났으며, 철의 경우에는 서울이 9.28 ng/m^3 , 13.24 ng/m^3 로 충남 A지역 2.38 ng/m^3 , 3.23 ng/m^3 에 비해 높게 조사되었다. 공미현의¹⁶⁾ 아산과 서울을 대상으로 PM_{2.5}의 중금속 농도 연구에서 납의 경우, 아산 44.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울 21.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 아산이 서울보다 높게 나타나 본 연구와 같은 결과를 보였으나, 철은 아산 221.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울 70.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 아산이 더 높게 나타났다. 이는 발생원이 토양에 주가 되는 철의 경우 시골인 아산지역이 대도시인 서울 지역에 비해 포장도로가 적고, 전

답 등으로부터 부유된 분진에 의한 영향 때문으로 생각된다. 또한 Fang 등⁶⁾의 연구에서 납과 철의 경우 건설현장이나, 차량의 배기가스, 토양과 부유먼지에 많이 함유되어 있다고 보고하고 있어 교통량이 많고 부유먼지가 많은 서울과 공사가 진행되고 있는 충남 A지역에서 철과 납이 다른 성분에 비해 높은 농도로 조사된 것으로 판단된다.

납과 철을 제외한 나머지 물질에서는 두 지역 모두 비슷한 농도를 보이고 있었으며, 지역에 따른 Mann-Whitney U test에서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

2) 충남 A지역과 광양의 중금속 농도

(1) 충남 A지역과 광양의 중금속 농도

2009년도 충남 A지역과 광양의 극미세입자 중 중금속의 기하평균 농도를 Table 11에 나타내었다.

납의 경우 0.10-0.056 μm , $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 에서 충남 A지역이 0.31 ng/m^3 , 0.12 ng/m^3 , 광양이 0.28 ng/m^3 , 0.06 ng/m^3 로 충남 A지역의 납 농도가 광양보다 높게 나타났으며, $\leq 0.056 \mu\text{m}$ 에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 충남 A지역은 2008년에도 서울보다

Table 10. Heavy metal concentrations in Chungnam A and Seoul (2008) (Unit:ng/m³)

		Chungnam A			Seoul			p-value ^c
		N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	
Pb	0.10-0.056 μm	2	6.49 ± 0.03 (6.47 - 6.51)	6.49	3	5.55 ± 6.95 (1.01 - 13.55)	3.05	0.800
	≤0.056 μm	3	10.25 ± 3.08 (7.06 - 13.20)	9.93	3	5.22 ± 3.40 (1.56 - 8.29)	4.22	0.200
Zn	0.10-0.056 μm	4	1.22 ± 0.63 (0.68 - 1.89)	1.10	3	1.72 ± 0.39 (1.45 - 2.17)	1.69	0.629
	≤0.056 μm	4	1.06 ± 0.98 (0.04 - 2.34)	0.51	3	2.35 ± 0.93 (1.30 - 3.06)	2.21	0.114
Cr	0.10-0.056 μm	2	1.90 ± 0.04 (1.87 - 1.93)	1.90	3	8.58 ± 12.44 (0.87 - 22.93)	3.38	0.800
	≤0.056 μm	3	1.66 ± 0.87 (1.13 - 2.67)	1.53	4	5.87 ± 9.46 (0.76 - 20.04)	2.22	0.857
As	0.10-0.056 μm	3	5.92 ± 2.51 (3.02 - 7.55)	5.47	2	9.24 ± 4.49 (6.07 - 12.42)	8.68	0.800
	≤0.056 μm	3	8.90 ± 2.36 (6.44 - 11.15)	8.68	3	5.85 ± 3.15 (3.75 - 9.47)	5.35	0.400
Fe	0.10-0.056 μm	4	2.41 ± 0.42 (2.03 - 2.96)	2.38	4	38.42 ± 68.34 (2.34 - 140.88)	9.28	0.114
	≤0.056 μm	4	4.03 ± 2.97 (1.40 - 7.95)	3.23	4	39.80 ± 65.97 (2.90 - 138.65)	13.24	0.200

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation^bGeometric mean^cMann-Whitney U test

납 농도가 높게 조사된 바 있어, 향후 충남 A지역의 납 농도에 영향을 미치는 영향요인을 밝힐 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에서 크롬의 농도는 광양에서 0.69 ng/m³, 0.38 ng/m³로 충남 A지역 0.31 ng/m³, 0.20 ng/m³보다 높게 조사되었으며, 아연 또한 광양 2.57 ng/m³, 0.94 ng/m³로 충남 A지역 1.12 ng/m³, 0.72 ng/m³보다 높게 나타났다. 최¹⁷⁾의 연구에서 아연의 주된 배출원이 토양과 자동차, 유류이며, 크롬은 토양과 시멘트가 주된 배출원으로 보고하고 있어, 제철소 인근의 대형 자동차와 여수 석유화학단지에 의한 영향, 제철소 인근의 시멘트 공장들로 인해 광양의 아연과 크롬 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

망간은 0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에서 충남 A지역이 0.12 ng/m³, 0.03 ng/m³, 광양이 0.21 ng/m³, 0.08 ng/m³로 광양의 농도가 높게 나타났으며, ≤0.056 μm에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.01).

(2) 충남 A지역과 광양의 계절에 따른 중금속 농도
2009년 충남 A지역과 광양의 계절별 극미세입자 내 중금속 농도를 Table 12와 13에 나타내었다.

여름철 충남 A지역의 0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에서 납의 기하평균 농도는 0.32 ng/m³, 0.09 ng/m³, 광양 0.27 ng/m³, 0.07 ng/m³로 충남 A지역의 농도가 높게 나타났으며, 가을 또한 충남 A지역(0.31 ng/m³, 0.17 ng/m³)이 광양(0.31 ng/m³, 0.04 ng/m³)에 비하여 높게 나타났다. 대형차량의 이동이 많고 제철소와 시멘트공장이 인접해 있는 광양지역에 비하여 충남 A지역의 납 농도가 높게 조사된 것은 납 농도에 영향을 주는 이벤트가 있었을 것으로 생각된다.

0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에서 망간의 기하평균 농도를 살펴 본 결과 여름철 광양에서 각각 0.25 ng/m³, 0.09 ng/m³로 충남 A지역 0.18 ng/m³, 0.03 ng/m³보다 높게 조사되었으며, 가을철에도 광양(0.11 ng/m³, 0.06 ng/m³)이 충남 A지역(0.09 ng/m³, 0.04 ng/m³)보다

Table 11. Heavy metal concentrations in Chungnam A and Gwangyang (2009) (Unit:ng/m³)

		Chungnam A(2009)			Gwangyang(2009)			p-value ^c
		N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean $\pm$ SD ^a (Range)	GM ^b	
Pb	0.10-0.056 μ m	14	0.34 $\pm$ 0.13 (0.13 - 0.67)	0.31	8	0.34 $\pm$ 0.26 (0.15 - 0.91)	0.28	0.482
	$\leq$ 0.056 μ m	13	0.14 $\pm$ 0.07 (0.04 - 0.27)	0.12	6	0.07 $\pm$ 0.05 (0.03 - 0.18)	0.06	0.036*
Zn	0.10-0.056 μ m	14	1.18 $\pm$ 0.41 (0.54 - 1.95)	1.12	8	2.94 $\pm$ 1.61 (1.38 - 5.22)	2.57	0.000**
	$\leq$ 0.056 μ m	14	0.92 $\pm$ 0.90 (0.27 - 3.84)	0.72	8	1.01 $\pm$ 0.38 (0.42 - 1.59)	0.94	0.165
Cr	0.10-0.056 μ m	9	0.74 $\pm$ 0.93 (0.03 - 2.69)	0.31	7	0.97 $\pm$ 0.93 (0.18 - 2.95)	0.69	0.299
	$\leq$ 0.056 μ m	8	0.41 $\pm$ 0.58 (0.03 - 1.79)	0.20	6	0.43 $\pm$ 0.26 (0.25 - 0.94)	0.38	0.414
Mn	0.10-0.056 μ m	14	0.17 $\pm$ 0.16 (0.03 - 0.61)	0.12	8	0.27 $\pm$ 0.24 (0.10 - 0.80)	0.21	0.165
	$\leq$ 0.056 μ m	14	0.04 $\pm$ 0.05 (0.02 - 0.21)	0.03	8	0.21 $\pm$ 0.41 (0.02 - 1.22)	0.08	0.005**
Ni	0.10-0.056 μ m	14	0.35 $\pm$ 0.33 (0.01 - 1.10)	0.22	8	0.53 $\pm$ 0.56 (0.12 - 1.81)	0.36	0.441
	$\leq$ 0.056 mm	14	0.49 $\pm$ 1.08 (0.04 - 4.19)	0.18	8	0.18 $\pm$ 0.14 (0.03 - 0.46)	0.13	0.525
Cu	0.10-0.056 μ m	14	0.20 $\pm$ 0.06 (0.11 - 0.31)	0.19	8	0.44 $\pm$ 0.52 (0.05 - 1.64)	0.27	0.330
	$\leq$ 0.056 mm	14	0.27 $\pm$ 0.33 (0.05 - 1.26)	0.16	8	0.12 $\pm$ 0.13 (0.02 - 0.40)	0.08	0.188

^aArithmetic mean $\pm$ Arithmetic standard deviation^bGeometric mean^cMann-Whitney U test

*p<0.05

**p<0.01

높게 나타났다. 이와 같은 결과는 포항지역의 주거지역과 공단지역의 PM_{2.5} 내의 중금속 연구에서의 마찬가지로 공단지역이 주거지역에 비해 망간의 농도가 높게 조사되어 본 연구의 결과와 같은 경향을 보였다.¹⁸⁾

납과 망간을 제외한 나머지 물질에서는 두 지역 모두 비슷한 농도를 보이고 있었으며, 지역에 따른 Mann-Whitney U test에서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

(3) 충남 A지역과 광양 지역의 월별 중금속 농도

2009년 충남 A지역과 광양의 월별 중금속 농도를 Table 14-17에 나타내었다.

8월의 경우 두 지역에서 아연과 크롬, 니켈의 농도가 높게 나타났으며, 납과 망간, 구리의 농도는 비교적 작은 농도로 나타났다. 9월은 전체적으로 모든 물질의 농도가 높게 조사되었으며, 8월달과 흡사한 형태의 농도 분포를 보였다. 10월과 11월에는 8, 9월과 같이 아연의 농도가 높게 나타났고 다른 물질들은 미량의 농도를 나타냈으며, 두 달의 농도 분포가 흡사한 형태를 보이고 있었다.

3) 전체지역의 중금속 농도

모든 지역의 중금속 농도를 종합하여 살펴본 결과 비소>철>아연>크롬>납>니켈>구리>망간 순서로 높

Table 12. Seasonal concentration of heavy metals in Chungnam A and Gwangyang (2009) (Unit:ng/m³)

	Summer						Autumn					
	Chungnam A			Gwangyang			Chungnam A			Gwangyang		
	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b
Pb	7	0.34 ± 0.16 (0.19 - 0.67)	0.32	6	0.34 ± 0.30 (0.15 - 0.91)	0.27	7	0.33 ± 0.11 (0.13 - 0.46)	0.31	2	0.32 ± 0.14 (0.22 - 0.42)	0.31
	6	0.09 ± 0.04 (0.04 - 0.14)	0.09	4	0.08 ± 0.06 (0.04 - 0.18)	0.07	7	0.17 ± 0.06 (0.11 - 0.27)	0.17	2	0.04 ± 0.02 (0.03 - 0.06)	0.04
Zn	7	1.41 ± 0.47 (0.54 - 1.95)	1.32	6	2.77 ± 1.74 (1.38 - 5.22)	2.38	7	0.95 ± 0.10 (0.80 - 1.05)	0.94	2	3.44 ± 1.53 (2.36 - 4.53)	3.27
	7	1.15 ± 1.23 (0.27 - 3.84)	0.81	6	1.04 ± 0.41 (0.42 - 1.59)	0.96	7	0.70 ± 0.35 (0.37 - 1.46)	0.64	2	0.92 ± 0.38 (0.65 - 1.19)	0.88
Cr	6	0.97 ± 1.08 (0.03 - 2.69)	0.38	6	1.03 ± 1.00 (0.18 - 2.95)	0.71	3	0.29 ± 0.27 (0.11 - 0.60)	0.22	1	0.59 ± - -	0.59
	6	0.50 ± 0.65 (0.05 - 1.79)	0.26	6	0.43 ± 0.26 (0.25 - 0.94)	0.38	2	0.14 ± 0.17 (0.03 - 0.26)	0.08		N.D	N.A

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation^bGeometric mean^cMann-Whitney U test between concentration of heavy metal in Summer, Asan and Gwangyang^dMann-Whitney U test between concentration of heavy metal in Autumn, Asan and Gwangyang

N.D: Not Detectable, N.A: Not Applicable

Table 13. Seasonal concentration of heavy metals in Chungnam A and Gwangyang (2009) (Unit:ng/m³)

	Summer						Autumn					
	Chungnam A			Gwangyang			Chungnam A			Gwangyang		
	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b
Mn	0.10- 0.056 μm	0.24 ± 0.20 (0.05 - 0.61)	0.18	6	0.32 ± 0.25 (0.10 - 0.80)	0.25	7	0.09 ± 0.04 0.03 - 0.13	0.09	2	0.11 ± 0.01 (0.10 - 0.12)	0.11
	≤0.056 μm	0.03 ± 0.01 (0.02 - 0.05)	0.03	6	0.26 ± 0.47 (0.02 - 1.22)	0.09	7	0.06 ± 0.07 0.22 - 0.21	0.04	2	0.06 ± 0.00 (0.06 - 0.06)	0.06
	0.10- 0.056 μm	0.55 ± 0.35 (0.22 - 1.10)	0.47	6	0.66 ± 0.59 (0.21 - 1.81)	0.51	7	0.15 ± 0.11 0.01 - 0.35	0.11	2	0.13 ± 0.02 (0.12 - 0.14)	0.13
Ni	≤0.056 μm	0.87 ± 1.48 (0.06 - 4.19)	0.37	6	0.23 ± 0.13 (0.11 - 0.46)	0.21	7	0.11 ± 0.09 0.04 - 0.26	0.09	2	0.04 ± 0.01 (0.03 - 0.04)	0.04
	0.10- 0.056 μm	0.22 ± 0.03 (0.18 - 0.27)	0.22	6	0.53 ± 0.58 (0.05 - 1.64)	0.32	7	0.17 ± 0.07 0.11 - 0.31	0.16	2	0.18 ± 0.06 (0.13 - 0.22)	0.17
	≤0.056 μm	0.30 ± 0.44 (0.05 - 1.26)	0.15	6	0.15 ± 0.14 (0.02 - 0.40)	0.09	7	0.24 ± 0.22 0.05 - 0.64	0.17	2	0.04 ± 0.02 (0.03 - 0.05)	0.04

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation

^bGeometric mean

^cMann-Whitney U test between concentration of heavy metal in Summer, Asan and Gwangyang

^dMann-Whitney U test between concentration of heavy metal in Autumn, Asan and Gwangyang

*p<0.05

Table 14. The concentrations of heavy metal in August and September, Chunnam A and Gwangyang (Unit:ng/m³)

	August						September							
	Chungnam A			Gwangyang			Chungnam A			Gwangyang				
	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b		
Pb	0.10-0.056 μm	2	0.28 ± 0.02 (0.26 - 0.30)	2	0.24 ± 0.15 (0.15 - 0.46)	0.2	4	0.37 ± 0.18 (0.19 - 0.67)	0.2	5	0.55 ± 0.51 (0.18 - 0.91)	0.34	2	0.41
	≤0.056 μm	2	0.10 ± 0.01 (0.10 - 0.10)	3	0.09 ± 0.08 (0.04 - 0.18)	0.10	3	0.09 ± 0.05 (0.04 - 0.14)	0.07	4	0.06 ± - -	0.08	1	0.06
Zn	0.10-0.056 μm	2	1.61 ± 0.48 (1.28 - 1.58)	4	2.42 ± 1.58 (1.38 - 4.76)	1.58	4	1.33 ± 0.49 (0.54 - 1.89)	2.12	5	3.47 ± 2.48 (1.72 - 5.22)	1.23	2	2.99
	≤0.056 μm	2	0.76 ± 0.11 (0.69 - 0.76)	4	1.11 ± 0.51 (0.42 - 1.59)	0.76	4	1.30 ± 1.47 (0.27 - 3.84)	0.99	5	0.91 ± 0.17 (0.79 - 1.03)	0.83	2	0.90
Cr	0.10-0.056 μm	2	0.91 ± 1.24 (0.03 - 0.24)	4	0.61 ± 0.43 (0.18 - 1.08)	0.24	4	1.00 ± 1.19 (0.07 - 2.69)	0.49	4	1.87 ± 1.53 (0.78 - 2.95)	0.47	2	1.52
	≤0.056 μm	2	0.92 ± 1.23 (0.05 - 0.31)	4	0.46 ± 0.32 (0.25 - 0.94)	0.31	4	0.29 ± 0.16 (0.07 - 0.42)	0.40	4	0.36 ± 0.08 (0.31 - 0.41)	0.24	2	0.36
Mn	0.10-0.056 μm	2	0.26 ± 0.22 (0.11 - 0.41)	4	0.24 ± 0.13 (0.10 - 0.41)	0.21	4	0.23 ± 0.22 (0.05 - 0.61)	0.21	5	0.49 ± 0.44 (0.18 - 0.80)	0.17	2	0.38
	≤0.056 μm	2	0.03 ± 0.02 (0.02 - 0.05)	4	0.06 ± 0.03 (0.02 - 0.09)	0.03	4	0.03 ± 0.01 (0.02 - 0.04)	0.05	5	0.65 ± 0.81 (0.08 - 1.22)	0.03	2	0.32
Ni	0.10-0.056 μm	2	0.68 ± 0.42 (0.38 - 0.98)	4	0.46 ± 0.22 (0.21 - 0.68)	0.61	4	0.50 ± 0.36 (0.22 - 1.10)	0.42	5	1.06 ± 1.06 (0.31 - 1.81)	0.42	2	0.74
	≤0.056 μm	2	2.39 ± 2.54 (0.60 - 4.19)	4	0.26 ± 0.16 (0.11 - 0.46)	1.58	4	0.26 ± 0.16 (0.06 - 0.48)	0.22	5	0.17 ± 0.02 (0.16 - 0.19)	0.21	2	0.17
Cu	0.10-0.056 μm	2	0.23 ± 0.01 (0.22 - 0.23)	4	0.25 ± 0.19 (0.05 - 0.50)	0.23	4	0.22 ± 0.04 (0.18 - 0.27)	0.18	5	1.11 ± 0.75 (0.58 - 1.64)	0.22	2	0.97
	≤0.056 μm	2	0.14 ± 0.14 (0.05 - 0.24)	4	0.19 ± 0.16 (0.02 - 0.40)	0.11	4	0.37 ± 0.51 (0.05 - 1.26)	0.12	5	0.08 ± 0.06 (0.03 - 0.12)	0.17	2	0.06

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation^bGeometric mean.

Table 15. The concentrations of heavy metal in October and November; Chunnam A and Gwangyang (Unit:ng/m³)

		October				November			
		Chunnam A		Gwangyang		Chunnam A		Gwangyang	
		N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)
Pb	0.10-0.056 µm	4	0.36 ± 0.06 (0.29 - 0.42)	0.35	1	0.42 ± - -	0.42	3	0.29 ± 0.16 (0.13 - 0.46)
	≤0.056 µm	4	0.19 ± 0.06 (0.13 - 0.27)	0.18	1	0.06 ± - -	0.06	3	0.16 ± 0.07 (0.11 - 0.24)
Zn	0.10-0.056 µm	4	0.98 ± 0.09 (0.82 - 1.05)	0.97	1	4.53 ± - -	4.53	3	0.91 ± 0.13 (0.80 - 1.04)
	≤0.056 µm	4	0.76 ± 0.49 (0.37 - 1.46)	0.66	1	1.19 ± - -	1.19	3	0.62 ± 0.08 (0.57 - 0.71)
Cr	0.10-0.056 µm	1	0.17 ± - -	0.170.17		N.D		2	0.35 ± 0.35 (0.11 - 0.60)
	≤0.056 µm	2	0.14 ± 0.17 (0.03 - 0.26)	0.08		N.D			N.D
		August				September			
		Chunnam A		Gwangyang		Chunnam A		Gwangyang	
		N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b	N	Mean ± SD ^a (Range)
Mn	0.10-0.056 µm	4	0.11 ± 0.03 (0.07 - 0.13)	0.10	1	0.12 ± - -	0.12	3	0.08 ± 0.05 (0.03 - 0.12)
	≤0.056 µm	4	0.08 ± 0.09 (0.02 - 0.21)	0.06	1	0.06 ± - -	0.06	3	0.03 ± 0.01 (0.02 - 0.04)
Ni	0.10-0.056 µm	4	0.14 ± 0.15 (0.01 - 0.35)	0.08	1	0.14 ± - -	0.08	3	0.17 ± 0.06 (0.10 - 0.23)
	≤0.056 µm	4	0.12 ± 0.10 (0.04 - 0.26)	0.09	1	0.04 ± - -	0.09	3	0.11 ± 0.09 (0.04 - 0.20)
Cu	0.10-0.056 µm	4	0.19 ± 0.08 (0.11 - 0.31)	0.17	1	0.22 ± - -	0.17	3	0.14 ± 0.02 (0.13 - 0.17)
	≤0.056 µm	4	0.31 ± 0.27 (0.08 - 0.64)	0.22	1	0.05 ± - -	0.05	3	0.14 ± 0.08 (0.05 - 0.20)

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation^bGeometric mean

N.D: Not Detectable

Table 16. Heavy metal concentrations in all regions

(Unit:ng/m³)

		N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b		N	Mean ± SD ^a (Range)	GM ^b
Pb	0.10-0.056 μm	27	1.37 ± 2.95 0.13 - 13.55	0.49	Fe	0.10-0.056 μm	20.41 ± 48.71 2.03 - 140.88	4.70
	≤0.056 μm	25	1.94 ± 3.79 0.03 - 13.20	0.26		≤0.056 μm	21.91 ± 47.27 1.40 - 138.65	6.54
Zn	0.10-0.056 μm	29	1.73 ± 1.18 0.54 - 5.22	1.46	Mn	0.10-0.056 μm	0.20 ± 0.19 0.03 - 0.80	0.15
	≤0.056 μm	29	1.11 ± 0.87 0.04 - 3.84	0.83		≤0.056 μm	0.10 ± 0.25 0.02 - 1.22	0.05
Cr	0.10-0.056 μm	21	2.05 ± 4.86 0.03 - 22.93	0.68	Ni	0.10-0.056 μm	0.42 ± 0.42 0.01 - 1.81	0.27
	≤0.056 μm	21	1.64 ± 4.27 0.03 - 20.04	0.51		≤0.056 μm	0.38 ± 0.87 0.03 - 4.19	0.16
As	0.10-0.056 μm	5	7.25 ± 3.39 3.02 - 12.42	6.58	Cu	0.10-0.056 μm	0.29 ± 0.32 0.05 - 1.64	0.22
	≤0.056 μm	5	7.37 ± 3.00 3.75 - 11.15	6.82		≤0.056 μm	0.22 ± 0.28 0.02 - 1.26	0.12

^aArithmetic mean ± Arithmetic standard deviation^bGeometric mean

은 농도를 나타냈다.

타이완의 도로변을 대상으로한 Fang 등⁶⁾의 연구결과에서 극미세입자 중 중금속 농도가 철>마그네슘>크롬>아연>납>구리의 순서로 높게 조사되어 본 연구와 비슷한 경향을 보였으며, 이러한 결과로 보아 본 연구 대상지역 또한 도로변에서 발생하는 차량의 배기가스나 타이어마모 등의 영향을 받은 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 2008년 8월부터 12월(서울지역 5회, 충남 A지역 5회), 2009년 8월부터 11월(충남 A지역 14회, 광양지역 8회)까지 서울과 충남 A지역, 광양을 대상으로 극미세입자와 중금속(08-Pb, Cr, Zn, As, Fe, 09-Pb, Cr, Zn, Cu, Ni, Mn) 농도를 분석한 결과 다음과 같다.

1. 입경별 입자의 농도를 살펴 본 결과 세 지역 모두 PM₁에서 PM_{0.1} 사이의 농도가 높게 나타났으며, Kruskal-Wallis H 검정을 실시한 결과 1.0-0.56 μm에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

2. 지역에 따른 월별 농도 분포의 경우 8월과 9월에는 세 지역 모두 비슷한 농도 분포를 보이고 있었으며, 10월과 11월에는 PM₁에서 PM_{0.1} 사이의 농도가 높

게 나타났다. 겨울철에 해당되는 12월은 입경이 작은 입자보다 큰 입자의 농도가 높게 나타났다.

3. 0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에 포함된 충남 A지역의 납 농도는 각각 6.49 ng/m³, 9.93 ng/m³로 서울의 3.05 ng/m³, 4.22 ng/m³에 비해 높게 나타났으며, 철의 경우에는 서울이 9.28 ng/m³, 13.24 ng/m³로 충남 A지역 2.38 ng/m³, 3.23 ng/m³에 비해 높게 조사되었다.

4. 충남 A지역과 광양의 중금속 농도를 살펴 본 결과 납의 경우 0.10-0.056 μm, ≤0.056 μm에서 충남 A지역이 0.31 ng/m³, 0.12 ng/m³, 광양이 0.28 ng/m³, 0.06 ng/m³로 광양보다 높게 나타났으며, 망간은 충남 A지역이 0.12 ng/m³, 0.03 ng/m³, 광양이 0.21 ng/m³, 0.08 ng/m³로 광양의 농도가 높게 나타났다. 두 물질 모두 ≤0.056 μm에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05, p<0.01).

5. 모든 지역의 중금속 농도를 종합하여 살펴본 결과 비소>철>아연>크롬>납>니켈>구리>망간 순서로 높은 농도를 나타냈다.

본 연구의 결과는 국내 대도시와 중소도시, 공단지역을 대상으로한 일반 대기 중의 극미세입자와 중금속 농도 결과를 제시함으로써 향후 극미세입자에 관한 지표를 선정하는데 중요한 데이터로 활용될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경기술진흥원의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, M. Y. : Development of molecular level biomarkers against the risk assessment of heavy metals in the air-borne nanoparticles through metalloproteomic technology, 2008.
2. Thomas, K. and Sayre, P. : Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, Part I: Evaluating the human health implications of exposure to nanoscale materials. *Toxicological Sciences*, **87**(2), 316-321, 2005.
3. Montaya, L., Lawrence, J., Murthy, K., Sarnat, J., Godleski, J. and Koutrakis, P. : Continuous measurements of ambient particle deposition in human subjects. *Aerosol Science and Technology*, **38**, 980-990, 2004.
4. Kang, G. U. : Concentration characteristics and health effect assessment of atmospheric particulate matters during asian dust storm episodes. *Korean Journal of Environmental Health*, **35**(1), 21-35, 2009.
5. Yoon, C. S. : Potential health risks and issues of nanoparticles, *Biochemistry and Molecular Biology News*, 8-21, 2007.
6. Fang, G. C., Wu, Y. S., Wen, C. C., Lin, C. K., Huang, S. H., Rau, J. Y. and Lin, C. P. : Concentrations of nano and related ambient air pollutants at a traffic sampling site. *Toxicology and Industrial Health*, **21**, 259-271, 2005.
7. Muller, J., Huaux, F., Moreau, N., Misson, P., Heilier, J. F., Delos, M., Arras, M., Fonseca, A., Nagy, J. B. and Lison, D. : Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **207**, 221-231, 2005.
8. Allen, A. G., Nemitz, E., Shi, J. P., Harrison, R. M. and Greenwood, J. C. : Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Environment*, **35**, 4581-4591, 2001.
9. Donaldson, K. and Macnee, W. : Potential mechanisms of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution (PM₁₀). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **203**, 411-415, 2001.
10. Kim, K. H. : Air Pollution Test Methods for Environmental Analysis, Donghwa Technology, 313-364, 2000.
11. Cabada, J. C., Rees, S., Takahama, S., Khlystov, A., Pandis, S. N., Davidson, C. I. and Robinson, A. L. : Mass size distributions and size resolved chemical composition of fine particulate matter at the Pittsburgh supersite. *Atmospheric Environment*, **38**, 3127-3141, 2004.
12. Cheng, Y., Ho, K. F., Lee, S. C. and Law, S. W. : Seasonal and diurnal variations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁₀ in the roadside environment of Hong Kong. *China Particuology*, **4**(6), 312-315, 2006.
13. Kim, K. H., Kim, M. Y., Shin, J. Y., Choi, G. H. and Kang, C. H. : PM_{2.5}, PM₁₀, TSP, based on observations over time of dust particles during the study on the characteristics of the distribution: of the four stations around Seoul, a 2001 case study on the duration of the spring dust. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **18**(5), 419-426, 2002.
14. Park, K. H. and Peter, H. McMurry : Studies on size-resolved hygroscopic properties of fine aerosol particles in the atlanta ambient atmosphere. *Korea Society for Atmospheric Environment*, 2006.
15. Lee, H. B. : Characteristics of atmospheric aerosols in Chungnam, Korea. Sangmyung University of Graduate School, 2007.
16. Gong, M. H. : Asan and Seoul in some areas fine particles (PM_{2.5}) concentration and composition of metals, Soonchunhyang University of Graduate School, 2002.
17. Choi, D. M. : A source identification and characteristics by the airborne heavy metals of cement factory outskirts area inhabitants. Hanyang University of Graduate School, 2008.
18. Baek, S. O., Heo, Y. K. and Park, Y. H. : Characterization of concentrations of fine particulate matter in the atmosphere of Pohang Area. *Korean Society of Environmental Engineers*, **30**(3), 302-313, 2008.