

미세입자 (PM_{2.5})의 배출원 구성물질 성분비 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Source Profiles for Fine Particles (PM_{2.5})

이학성* · 강충민¹⁾ · 강병욱²⁾ · 이상권³⁾

서원대학교 환경건설정보학과

¹⁾진국대학교 환경공학과, ²⁾국립청주과학대학 환경공학과,

³⁾한국외국어대학교 환경학과

(2004년 1월 17일 접수, 2004년 5월 12일 채택)

Hak Sung Lee*, Choong-Min Kang¹⁾, Byung-Wook Kang²⁾ and Sang-Kwun Lee³⁾

Dept. of Environmental, Civil and Information System, Seowon University

¹⁾*Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University*

²⁾*Dept. of Environmental Industry, Chongju National College of Science and Technology*

³⁾*Dept. of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

(Received 17 January 2004, accepted 12 May 2004)

Abstract

The purpose of this study was to develop the PM_{2.5} source profiles, which are mass abundances (fraction of total mass) of a chemical species in PM_{2.5} source emissions. The source categories studied were soil, road dust, gasoline and diesel vehicles, industrial source, municipal incinerator, coal-fired power plant, biomass burning, and marine. The chemicals analyzed were ions, elements, and carbons.

From this study, soil source had the crustal components such as Si, Al, and Fe. In the case of road dust, Si, OC, Ca, Fe had large abundances. The abundant species were SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺, and EC in the gasoline vehicle and EC, OC, Cl⁻, and SO₄²⁻ in the diesel vehicle. The main components were SO₄²⁻, S, NH₄⁺, and EC in the industrial source using bunker C oil as fuel, Cl⁻, NH₄⁺, Fe, and OC in the municipal incinerator source, and Si, Al, SO₄²⁻, and OC in the coal-fired power plant source. In the case of biomass burning, OC, EC, and Cl⁻ were mainly emitted. The main components in marine were Cl⁻, Na⁺, and SO₄²⁻.

Key words : Source profiles, PM_{2.5}, Dilution chamber, Receptor model

1. 서론

우리나라 도시지역에 살고 있는 많은 사람들은 대

기오염에 대한 심각성을 경험해 왔다. 특히, 서울지역에서 대기오염물질 중에서도 호흡기 계통의 질병, 산성비, 시정장애에 영향을 많이 미치는 것으로 알려진 입자크기가 2.5 μm 이하인 미세입자 (PM_{2.5})의 농도가 다른 나라의 대도시와 비교했을 때 상당히 높은 것으로 보고 되어서 (Lee *et al.*, 1999) 미세입자에 대

* Corresponding author

Tel : +82-(0)43-299-8722, E-mail : hsl@seowon.ac.kr

한 체계적인 연구가 절실하다. 현재, 한국에서는 입자 크기가 $10\ \mu\text{m}$ 이하인 PM_{10} 에 대하여만 환경기준으로 정하였지만, 미국에서는 1997년부터 좀더 국민의 건강을 위하여 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 대기환경기준을 정하여 시행하고 있다. 우리나라도 국민의 건강을 위하여 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 대기환경기준을 빠른 시일 내에 마련되어야 할 것이다.

미세입자에 대한 관리가 성공적으로 수행되어지기 위해서는 미세입자의 화학적 특성 및 배출원의 특성과 각종 오염원에서 배출되는 미세입자의 양과 수용지점 농도사이의 관계가 규명되어야 한다. 우리나라에서는 미세입자의 화학적 특성에 관한 연구는 여러 편 발표되었지만 (Lee *et al.*, 2001, 1999; 강병욱 등, 1997), 어떤 배출원에서 미세입자가 얼마나 배출되고, 배출시의 배출원 구성물질 성분비 (source profile)는 어떠한 특성을 가지고 있고, 그리고 수용모델 (receptor model)을 이용하여 알 수 있는 어떤 미세입자 배출원에서 얼마나 수용지점에 영향을 미치는지에 대한 연구는 미미한 실정이다 (Park *et al.*, 2001; 강병욱 등, 2000). 수용모델을 이용하기 위해서는 미세입자 배출원에서의 화학적 특성에 대한 자료가 필요한데, 우리나라에서는 아직 이와 같은 연구가 보고되지 않았고, 단지 기초적인 미세입자 배출원 조사를 통하여 수용모델에 적용한 사례는 있다 (강병욱 등, 2000). 배출원 구성물질 성분비는 각 배출원에서 각 성분이 차지하는 양을 나타내는 것으로, 어떤 배출원에서 어떤 성분이 표준편차는 적으면서 (정밀도는 높고) 차지하는 양이 많으면 이 성분을 유의인자 (good marker)로 사용될 수 있고, 또한, 다른 배출원에서는 이 성분이 많이 배출되지 않으면 수용모델 적용 시 다른 배출원과 구별되어질 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라에서 아직 연구가 미미한 미세입자 ($\text{PM}_{2.5}$)에 대한 배출원 구성물질 성분을 직접 측정·분석한 결과를 고찰하고자 한다. 본 연구에서는 서울지역에 영향을 미칠 수 있고, 국내·외 연구들에서 미세입자에 대한 수용모델에 적용되었던 (Watson *et al.*, 2001, 1997, 1994; Park *et al.*, 2001; 강병욱 등, 2000; Chan *et al.*, 1999; Coutess, 1999; Olmez *et al.*, 1988) 배출원을 대상으로 하였으며, 이는 토양 및 도로먼지, 자동차, 식물소각 (biomass burning), 해염입자, 도시 생활폐기물 소각로, 석탄연소 화력발전소 등이다. 토양, 도로먼지 및 해염입

자는 주로 조대입자 (coarse particle)를 배출하지만, 미세입자에 대한 수용모델 적용 시 포함시키고 있다. 또한, 서울지역의 산업시설로는 우리나라 산업시설들의 주요 연료인 B-C유 (황 함유 1.0%)를 사용하는 연소시설을 선정하였다. 본 연구의 결과는 향후 국내에서 수용모델을 이용하여 미세입자에 대한 각 배출원에서의 기여율을 추정하는데 중요한 자료를 제공할 수 있다고 사료된다.

2. 실험방법

2.1 배출원에서의 미세입자 시료채취 및 분석

본 연구를 위해 사용된 배출원 시료채취장치는 이온, 원소, 탄소 측정을 위하여 3대의 디누더 측정기 (annular denuder system; University Research Glassware)를 이용하였다. 첫 번째 디누더 측정기는 입경 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 입자 ($\text{PM}_{2.5}$)만을 분리 채집할 수 있는 테프론 코팅 싸이클론 (cyclone), 층류형성을 위한 코팅하지 않은 디누더, 미세입자 ($\text{PM}_{2.5}$)의 중량 및 수용성 이온성분을 측정하기 위한 $47\ \text{mm}$ 직경의 Teflon 여과지 ($1\ \mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)와 입자에서 휘발되는 NO_3^- 를 포집하기 위한 $47\ \text{mm}$ 직경의 Nylon 여과지 ($1\ \mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)를 넣을 수 있는 여과팩 (filter pack), 펌프로 구성되며, 채집유량은 $16.7\ \text{l/min}$ 이었다. 미세입자 ($\text{PM}_{2.5}$)의 원소 성분 및 탄소성분을 측정하기 위한 시료채취장치는 두 번째 및 세 번째의 디누더 측정기로 코팅하지 않은 디누더 한 단에 각각 $2.5\ \mu\text{m}$ 절단입경의 싸이클론과 여과팩으로 구성되었다. 원소성분 측정용 여과지는 수용성 이온성분과 같은 $47\ \text{mm}$ 직경의 Teflon 여과지 ($1\ \mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)를 사용하였고, 탄소성분을 측정하기 위한 여과지는 여과지 자체에 포함된 유기물질을 사전에 고온 (650°C)에서 가열하여 탄소의 함량이 낮은 $47\ \text{mm}$ 직경의 석영섬유여과지 (University Research Glassware)를 사용하였다. 원소성분 및 탄소성분을 측정하기 위한 채취유량은 수용성 이온성분과 같이 $16.7\ \text{l/min}$ 이었다. 주요 배출원에서의 시료채취시간은 각각의 분석법에 따라서 필요한 먼지 채집량을 고려하여 경험적으로 결정하였으며, 배출원에 따라서 차이가 있지만 최소 5분에서 최대 6시간 동안 시료를 채취하였다. 본 연구에서

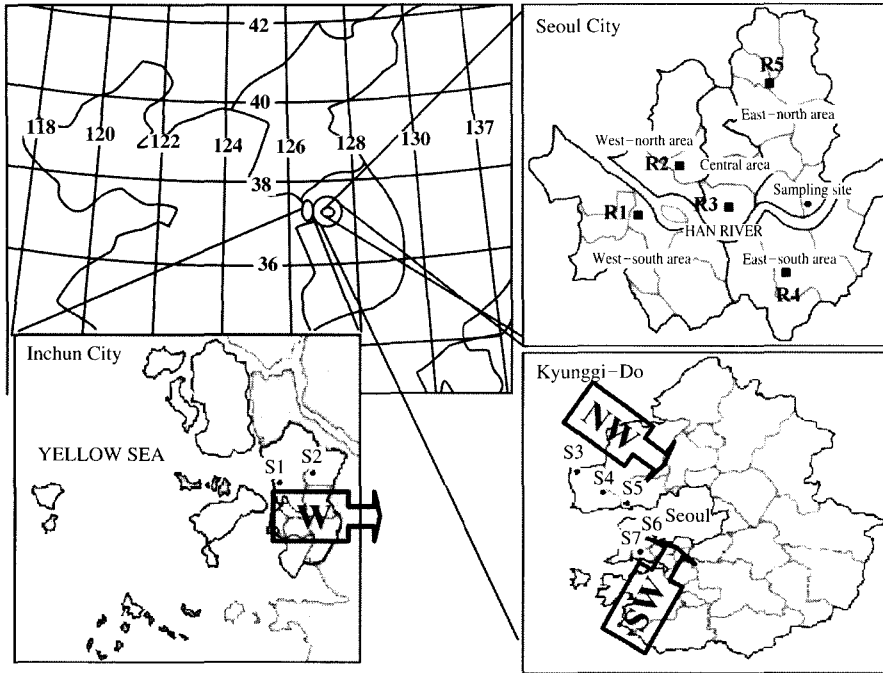


Fig. 1. Sampling sites of soil and road dust samples.

사용한 시료채취나 처리방법은 외국의 문헌을 참조하여 자체적으로 제작하여 사용하였다.

주요 배출원에서 채취된 PM_{2.5}의 중량은 전자저울 (Cahn, C-35)을 이용하여 무게를 측정하였고, 수용성 이온성분들(Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺)의 농도를 측정하기 위하여 이온크로마토그래피(IC, Dionex DX-100)를 이용하였다. 원소성분은 미국 EAC (Element Analysis Corporation, Kentucky)에 보내져 나트륨부터 우라늄까지 72개 원소를 동시에 분석할 수 있는 PIXE (proton-induced x-ray emissions) 분석법을 이용하였다. 검출한계 이상으로 검출된 원소들은 Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb 등이었다. 원소탄소 (elemental carbon)와 유기탄소 (organic carbon)의 분석은 미국 DRI (Desert Reseach Institute)에서 TOR (Thermal Optical Reflectance) 방법으로 분석하였다. 분석된 각 성분들의 정밀도 (precision)와 정확도 (accuracy)는 각각 10% 이내 및 ±10% 내의 값을 나타내어 각 분석된 성분농도들은 매우 유의한 것으로 평가될 수 있었다.

더누더 측정기의 특성, 시료 정량을 위한 전처리

방법 및 이온 분석방법에 대하여는 이학성과 강병욱 (1996)와 Lee *et al.* (1993)에 상세히 기술하였고, 원소 분석방법은 강병욱 등 (1997)에서 자세히 기술하였다. 그리고, 탄소 분석방법은 이학성과 강병욱 (2000)에 자세히 기술하였다.

2.2 토양 및 도로먼지

토양 및 도로비산먼지의 시료채취방법으로 재비산 실내실험장치 (resuspension chamber)를 자체 제작하여 시료를 채취하였다. 토양시료의 채취는 서울의 최근 10년간의 풍향을 고려하여 수용지점인 건국대학교 (환경대기 측정지점)로부터 새 방향(NW, W, SW)에 대하여 일정 간격의 등심원을 그린 후 만나는 지점을 시료채취 대상지역으로 선정하였고, 각 지점에서 최대한 자연 상태의 토양을 채취하기 위하여 발이나 도로 등에서 떨어진 산 사면을 채취위치로 선정하였고, 표토를 제거한 후 수 kg씩 토양을 채취하였다. 선정된 채취지점은 그림 1에서처럼 인천시 가정동(S1), 인천시 작전동(S2), 김포 용정리(S3), 김포 장기리(S4), 행주산성(S5), 광명시 소하동(S6), 안산

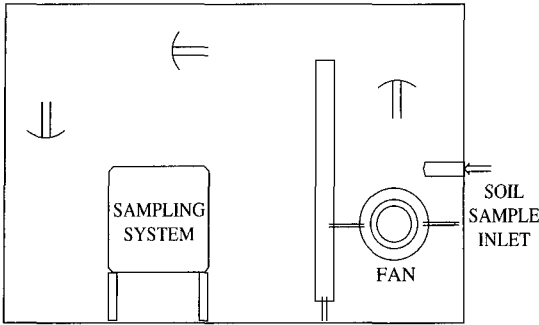


Fig. 2. Diagram of resuspension chamber.

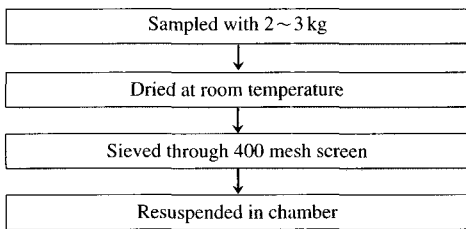


Fig. 3. Pre-treatment of soil and road dust samples.

시 고잔동(S7) 등으로 각 지역에 대해 2~3 지점에서 동일한 방법으로 채취하였다.

채취된 토양은 실험실로 옮겨져 평평한 용기에 토양을 얇게 펼쳐 20°C의 일정온도로 유지하면서 2일간 건조한 후, 400 mesh 체 (Chung Gye industrial MFG 사제)로 진동시켜 얻은 토양을 시료로 하였다. 처리된 토양은 실내공간에 폴리에틸렌 비닐을 이용하여 제작한 사각형 실내실험장치 (resuspension chamber)에서 비산시키고, 시료 토양 먼지를 함유한 기류가 실내실험장치의 상, 하로 순환할 수 있도록 한쪽 면에 통로를 실내실험장치의 상단과 하단에 연결하고, 실내실험장치내에 배출원 측정장치와 동일한 형태의 시료채취장치를 설치하여 입자의 크기가 2.5µm 이하인 미세입자만 채취하였다(그림 2).

도로먼지의 시료채취는 도로 위의 먼지를 대상으로 하고, 시료채취장소 선정은 수용지점인 건국대학교에서 환경대기 시료채취가 이루어지는 인근지역을 포함하여 통행량이 많은 지역과 외곽지역에 대해서 고르게 시료를 채취하였다. 선정된 채취지점은 그림 1에 나타냈듯이, 영등포(R1), 연희동(R2), 서울시청

(R3), 강남역(R4), 미아사거리(R5) 등 5개 지역에서 각각 지역별 2 지점에 대해 도로먼지시료를 채취하였다. 시료채취방법은 도로 위에서 빗자루를 이용하여 먼지를 일정량 쓸어 담는 방법으로 시료를 채취하였고, 채취된 시료는 토양시료와 마찬가지로 실험실로 옮겨져 평평한 용기에 도로먼지를 얇게 펼쳐 20°C의 일정온도로 유지하면서 2일간 건조한 후, 400 mesh 체 (Chung Gye industrial MFG 사제)로 진동시켜 얻은 먼지를 시료로 하였다. 전처리된 시료는 그림 2에서와 같이 토양의 시료채취방법과 동일한 실내공간에 폴리에틸렌 비닐을 이용하여 제작한 사각형 실내실험장치에서 비산시켜 실내실험장치내에 배출원 측정장치와 동일한 형태의 시료채취장치를 설치하여 입자의 크기가 2.5µm 이하인 미세입자만 채취하였다. 토양 및 도로먼지의 시료채취과정은 그림 3에 나타내었다.

2.3 자동차 배출원

자동차는 차체중량과 사용연료에 따라 소형, 중형, 대형차를 휘발유, 디젤(경유) 자동차로 구분하였다. 국립환경연구원의 자동차공해연구소의 도움으로 휘발유 자동차 시료는 국내에서 많이 운행되고 있는 엑센트(현대자동차), 누비라(대우자동차), 세피아(기아자동차)를 각각 1대씩 선정하였다. 시료채취는 자동차가 실제 도로 위를 주행할 때와 똑같은 운전조건을 모사하기 위해 시험차량을 차대동력계(chassis dynamometer) 위에 올려놓고 서울 시내의 일정 구간을 운행하여 차속별로 분류시켜 만든 대표차속별 주행모드로 운전하였다. 이중 본 시험에 사용된 대표차속은 저속모드(4.7 km/h)와 서울 시내 평균차속(24.6 km/h)과 유사한 값을 갖는 모드, 고속모드(79.6 km/h) 등 3개 모드에 따라서 9개의 시료를 채취하였다. 이때 배기관에서 배출되는 오염물질을 그림 4와 같이 3m×2.5m×2m의 알루미늄 프레임 위에 비닐로 씌워 만든 챔버로 유입시키고, 그 안에 2.5µm 절단입경의 싸이클론 3대를 장착하여 시료를 채취하였다. 이때 사용된 연료는 시중에서 일반적으로 사용되는 무연휘발유를 사용하였다. 또한, 디젤 자동차는 휘발유 자동차와 마찬가지로 국내에서 많이 운행되고 있는 승용(무쏘, 쌍용자동차), 승합(스타렉스, 현대자동차), 트럭(1톤 포터, 현대자동차)을 각각 1대씩 선정하여, 휘발유 자동차와 마찬가지로 저속, 서울평균

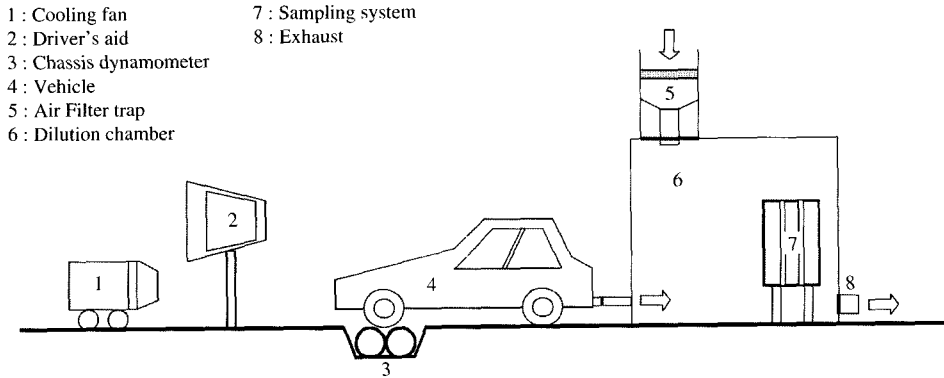


Fig. 4. Chassis dynamometer for motor vehicle exhausts.

차속, 고속주행시의 9개의 시료를 챔버(그림 4)를 이용하여 채취하였다. 또한 시험에 사용된 연료는 황 함유량 0.05 wt% 이하의 일반 경유를 사용하였다.

2.4 고정오염원 (산업시설, 폐기물 소각로, 화력발전소)

고정오염원의 미세입자 측정용 굴뚝시료 채취기(stack sampler)보다는 굴뚝에서 배출된 가스 및 입자상 물질들이 환경대기로 배출되었을 때의 상태로 채취할 수 있는 회석식 시료채취장치(dilution source chamber)를 외국문헌(Hopke, 1991)을 근거로 자체 개발하여(특허출원번호: 10-2002-0032390) 시료를 채집하였다(그림 5). 굴뚝에서 대기 중으로 배출되는 배가스는 대부분 고온조건이며, 이 배가스 중에는 여러 종류의 산성물질 및 유기물질이 가스상태로 존재하고 있으며 이러한 가스상물질들이 대기 중으로 배출되는 경우 상온 혹은 상온 이하의 온도에 노출되므로 급격히 응축되어 입자상 오염물질로 전환된다. 기존의 굴뚝시료 채취장치를 사용하여 입자상 오염물질을 채집하는 경우에 고온의 상태를 유지하면서 시료를 채집하므로 이러한 가스상물질의 응축으로 인하여 생성되는 입자상물질의 채집이 이루어지지 못한다. 그러나, 본 연구에서 사용된 회석식 시료채취 장치는 굴뚝에서 배출되는 고온의 가스를 배출구 주변의 공기를 이용하여 회석시킴으로써 배출가스의 온도와 압력을 배출구 주변의 대기상태로 유지하면서 시료를 채취/채집할 수 있다. 본 장치에 사용하는 회석공기는 대기 중에 존재하는 입자상 오염물질이 유입되지 않도록 여과지를 통과한 후에 회석실로 공

급이 되며 회석공기의 공기유입량은 내부의 온도와 압력에 따라 변화되는데 회석실 내부에 설치된 온도계를 이용하여 회석실 내의 온도가 주변 대기온도와 같아지도록 조절하였으며, 압력센서를 이용하여 자동 밸브 및 밸브 자동제어장치에 의해서 유입유량을 조절하였다. 회석실의 회석용량은 굴뚝의 배가스와 주변 대기를 10:1 ~ 100:1의 혼합배율을 조정하여 온도, 수분의 영향 및 화학적 반응을 충분히 반영하므로써 수용모델 적용에 보다 더 적합한 장치이다.

본 연구에서 고정오염원을 위한 배출원은 B-C유(황 함유 1.0%)를 주 연료로 하는 산업시설, 도시 생활폐기물 소각로 및 석탄연소 화력발전소 등으로 선정하였다. 이 중에서 석탄연소 화력발전소는 중국에서 수입된 석탄을 사용하는 발전소로서 중국에서의 유사 배출원을 고려하기 위하여 선정되었다. 산업시설은 경기도에 위치하고 있으면서 방지시설로 Cyclone을 설치하고, 주 연료로서 B-C유(황 함유 1.0%)를 사용하는 산업시설인 ○○물산, ○○정밀, ○○판지 공장 등에서 3번씩 측정하였고, 도시 생활폐기물 소각로에서의 측정은 방지시설로 여과 집진장치가 설치된 경기도에 위치하고 있는 곳에서 2번씩 실시하였고, 석탄연소 화력발전소의 측정은 방지시설로 전기집진장치를 사용하는 우리나라 서해안에 위치하고 있는 한 화력발전소에서 2번씩 실시하였다.

2.5 식물소각 (Biomass burning)

농촌에서 이루어지는 식물소각은 대상물질에 따라서 두 가지 종류로 구분할 수 있으며, 그 중 하나는

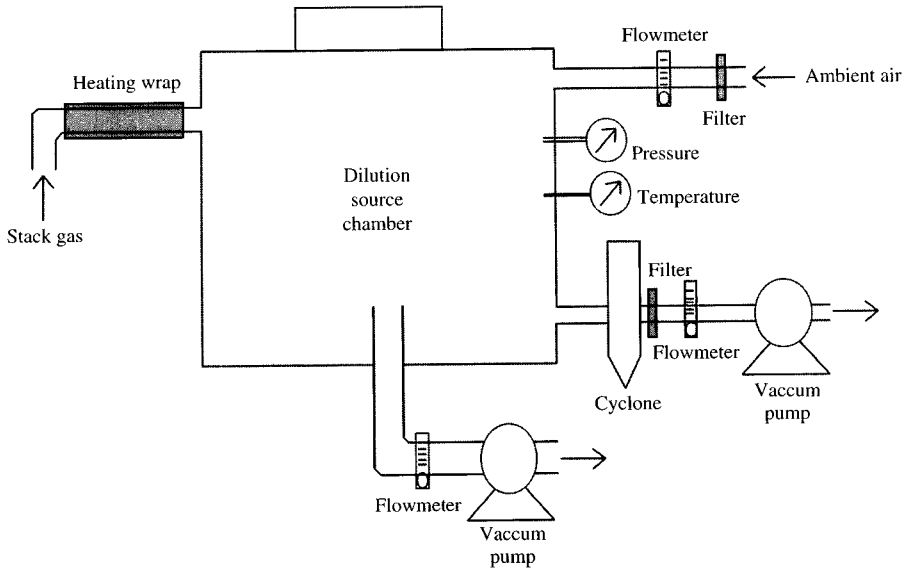


Fig. 5. Schematic diagram of the dilution source chamber.

Table 1. Descriptions of source profiles applied in this study.

Source type	Size fraction	Samples
Soil	PM _{2.5}	7 soil samples collected from seven areas
Road dust	PM _{2.5}	5 samples of paved road dust collected from five areas
Gasoline vehicle	PM _{2.5}	7 samples of gasoline-powered vehicle exhaust collected using a chassis dynamometer
Diesel vehicle	PM _{2.5}	9 samples of diesel-powered vehicle exhaust collected using a chassis dynamometer
Industrial source	PM _{2.5}	3 samples of a factory using B-C oil containing 1.0% sulfur as fuel by a dilution source chamber
Municipal incinerator	PM _{2.5}	1 samples of a municipal incinerator collected using a dilution source chamber
Coal-fired power plant	PM _{2.5}	2 samples of a coal-fired power plant collected using a dilution source chamber
Biomass burning	PM _{2.5}	10 samples of agricultural burning of rice straw and weeds
Marine	Aerosol	2 samples of pure marine aerosol

논두렁 및 밭두렁에 자연적으로 서식하는 잡풀이고 다른 하나는 가을철 벼를 추수하고 난 후에 논에 잘게 썰어서 두었다가 늦가을~봄철 사이에 태우는 벼짚 등으로 볼 수 있다. 이 중에서 벼짚은 자연적으로 논에서 장시간 동안 놓아두기 때문에 상당량의 수분을 머금고 있으며, 따라서 벼짚 연소 시에 불완전한 연소조건이 형성되게 된다. 농촌지역에서 식물소각 배출원 구성물질 성분비 작성을 위한 시료채취 및 연소실험은 경기도 화성군 한 농가에서 경작하는 논에서 이루어졌다. 시료는 대부분 가을철에 추수한 후

장시간 동안 논에서 수분을 머금은 벼짚으로 하였으며 논두렁이나 밭두렁에 서식하는 잡풀 일부를 섞어서 시료로 하였다. 실험은 실제 연소조건과 가장 유사하도록 맞추기 위해서 실제 경작된 논바닥에 준비된 시료를 소량씩 연소시키면서 연소 시에 발생하는 연기를 레시버식 후드에 모아서 직경 20cm 연결관을 통하여 크기가 1 m 80 cm × 1 m 80 cm × 1 m 80 cm 인 비닐로 밀폐시킨 챔버에 연결되도록 하였으며 챔버 내에는 3개의 디너더 측정기를 설치하여 시료를 채취하였다. 시료채취시간은 분석에 필요한 적당량이

여과지에 채취될 때까지 5분~20분 간격으로 총 10개의 시료를 채취하였다.

2.6 해염입자

해염입자에 대한 배출원 구성물질 성분비를 위한 측정은 우리나라 청정지역인 제주도 남쪽해안(서귀포시 대포동)과 충남 태안반도에서 주로 해풍이 부는 여름철 오전 8시~오후 6시 동안 대기 중 미세입자를 측정하였다. 하지만, 이들 시료들을 분석해 본 결과, 많은 인위적인 성분들이 검출되었고, 해염입자의 주요성분인 Na⁺ 및 Cl⁻의 함량이 너무 낮아 해염입자에 대한 배출원 구성물질 성분비로 적합하지 않았다. 따라서, 해염입자의 시료채취는 국외의 문헌(Watson *et al.*, 1994)에서 보고된 해염입자의 배출원 구성물질 성분비의 조성이 순수 해수를 분석한 것에 착안하여 태안반도의 해수를 2개의 폴리에틸렌 용기로 채수하였다. 실험실로 옮겨진 해수는 여과지를 이

용하여 부유물질을 제거한 후 각각 세 종류의 여과지(이온, 원소 및 탄소성분용)가 담겨있는 패트리디쉬에 50 ml를 부은 후 순수 수분을 제거하기 위하여 35°C로 유지된 실리카겔 데시케이터에 7일 동안 보관한 후 분석하였다.

각 배출원에서 배출원 구성물질 성분비 작성을 위한 배출원 유형, 입자크기 및 시료 수 등에 대한 내용을 표 1에 요약하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양 및 도로먼지

배출원 구성물질 성분비를 구하기 위하여 이온, 원소 및 탄소성분을 분석하여 얻은 결과는 농도와 표준오차 형식으로 표시하였으며, 여기서 표준오차는 측정 및 분석 시 유발되는 오차를 의미한다. 또한 배

Table 2. Soil and road dust profiles (weight percent of mass).

Species	This study		U.S. EPA (1992)	
	Soil	Road dust	Soil (profile #41350)	Road dust (profile #41130)
Na ⁺	0.170±0.017 ¹⁾	0.151±0.015	NA ²⁾	NA
Mg ²⁺	0.060±0.006	0.156±0.016	NA	NA
Al	11.09±0.069	6.444±0.053	6.289±0.898	7.924±1.447
Si	17.14±0.079	15.41±0.070	17.01±2.261	21.48±2.778
S	0.021±0.004	1.131±0.030	0.525±0.494	0.565±0.165
Cl ⁻	0.647±0.065	0.790±0.079	NA	NA
K	2.566±0.057	2.992±0.055	0.728±1.083	1.140±0.199
Ca	0.337±0.036	9.774±0.103	0.843±0.201	2.278±0.555
Ti	0.663±0.022	0.571±0.023	0.335±0.075	0.375±0.074
V	0.000±0.000	0.000±0.000	0.014±0.007	0.017±0.008
Cr	0.004±0.000	0.006±0.001	0.011±0.016	0.040±0.010
Mn	0.161±0.006	0.156±0.007	0.096±0.037	0.097±0.016
Fe	8.444±0.031	7.841±0.033	3.010±0.657	3.646±0.476
Ni	0.000±0.000	0.000±0.000	0.004±0.012	0.008±0.007
Cu	0.028±0.002	0.121±0.006	0.035±0.015	0.095±0.024
Zn	0.037±0.004	0.401±0.009	0.039±0.025	0.202±0.045
Pb	0.007±0.002	0.082±0.006	0.053±0.103	0.391±0.100
OC	4.339±0.178	13.57±0.750	0.691±0.676	3.180±1.500
EC	0.000±0.000	1.676±0.119	0.094±0.156	0.465±0.328
NO ₃ ⁻	0.232±0.023	0.000±0.000	0.011±0.230	0.010±0.009
SO ₄ ²⁻	0.191±0.019	1.254±0.125	0.011±0.017	0.066±0.112
NH ₄ ⁺	0.147±0.015	0.145±0.015	NA	NA
K ⁺	0.300±0.030	0.547±0.055	NA	NA
Sum	46.58	63.22	29.80	41.98

¹⁾Standard error

²⁾Not available

출원 구성물질 성분비 결과는 외국 연구결과와의 비교 및 수용모델 적용에의 편리성 등을 고려하여 무게 %로 나타내었으며, 성분비 결과는 배출원에서 배출되는 입자상물질 중 총 먼지량을 100%로 보았을 때 각 성분별 질량 %를 의미한다.

토양 및 도로먼지의 이온, 원소 및 탄소성분을 분석하여 얻은 배출원 구성물질 성분비 결과를 U.S. EPA (1992)에서 보고된 배출원 구성물질 성분비와 비교하여 표 2에 나타내었다. 본 연구에서 수행한 표 2의 결과는 각 채취지점에서 채집된 시료를 각각 분석하여 평균한 자료이다.

표 2에 의하면, 토양에 대한 배출원 구성물질 성분비 (soil profile)를 위해 분석된 성분들은 전체 중량의 약 46.6%이었고, 수용성 이온성분들의 함량이 다른 성분들에 비해 비교적 낮은 특징을 갖는다. 주요성분으로는 Si (17.1%) > Al (11.1%) > Fe (8.4%) > OC (4.3%) 순이었다. 이는 U.S. EPA (1992) 자료에서 주요성분의 순서인 Si (17.0%) > Al (6.3%) > Fe (3.0%) > Ca (0.8%)과 유사한 패턴이었지만, Al, Fe 및 OC의 함량이 상대적으로 높은 값을 보인 반면, Si의 함량은 유사한 값을 나타내고 있다. 토양에서 EC는 거의 측정되지 않는다고 했는데 (Watson *et al.*, 1997; U.S. EPA, 1992), 본 연구에서도 EC는 측정되지 않았다. Watson and Chow (2001)의 연구에 의하면, 토양에서는 이온성 칼륨(K⁺)이 낮게 측정되어서 원소와 이온을 합친 칼륨(K)과 이온성 칼륨(K⁺)의 비가 약 10이라고 했는데, 본 연구에서도 유사한 값인 약 9.6을 나타냈다. 이 결과는 K⁺가 높게 측정되는 식물연소(biomass burning)와의 배출원을 구별할 수 있는 척도가 될 수 있다.

표 2에 의하면, 도로먼지에 대한 배출원 구성물질 성분비 (road dust profile)의 경우, 분석된 성분은 전체 중량의 약 63.2%에 해당되었으며, 주요성분으로는 Si (15.4%) > OC (13.6%) > Ca (9.8%) > Fe (7.8%) 순이었고, 토양 배출원 구성물질 성분비에 비해 OC와 Ca의 함량이 증가한 반면, Al의 함량은 감소하였다. Watson *et al.* (1994) 연구에서는 도로먼지에서 분석된 성분이 차지하는 양은 전체중량의 약 50%이고, 나머지 50%는 산화물(oxides)과 물의 양으로 보고하였다. U.S. EPA (1992) 자료(표 2)에서 도로먼지의 주요성분이 Si (21.5%) > Al (7.9%) > Fe (3.6%) > OC (3.2%)인 것에 비해 본 연구에서는 Si, Al은 낮게 측

Table 3. Gasoline vehicle source profiles (weight percent of mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #33010)	Watson <i>et al.</i> (1994)
Na ⁺	1.889±0.189 ¹⁾	NA ²⁾	0.000±0.000
Mg ²⁺	0.713±0.071	NA	NA
Al	0.000±0.000	0.046±0.005	0.412±0.205
Si	1.847±0.046	0.092±0.009	1.640±0.880
S	4.884±0.522	0.092±0.009	1.010±0.480
Cl ⁻	15.30±1.530	NA	0.640±0.655
K	1.143±0.114	0.320±0.032	0.249±0.141
Ca	1.825±0.183	NA	0.707±0.407
Ti	0.000±0.000	NA	0.065±0.126
V	0.000±0.000	NA	0.005±0.054
Cr	0.000±0.000	NA	0.015±0.010
Mn	0.000±0.000	NA	0.105±0.036
Fe	0.396±0.058	NA	0.685±0.423
Ni	0.000±0.000	NA	0.009±0.009
Cu	0.070±0.002	NA	0.074±0.064
Zn	0.192±0.018	NA	0.273±0.225
Pb	0.000±0.000	2.500±0.250	0.155±0.072
OC	10.97±1.071	NA	30.10±12.30
EC	5.802±0.466	NA	13.50±8.020
NO ₃ ⁻	2.061±0.206	NA	3.890±2.870
SO ₄ ²⁻	20.47±2.047	NA	2.290±1.320
NH ₄ ⁺	7.373±0.737	NA	1.670±1.020
K ⁺	1.143±0.114	NA	NA
Sum	76.08	3.05	57.49

¹⁾Standard error

²⁾Not available

정되었고, OC, Ca, Fe는 높게 평가되었다. 또한, 도로먼지에서의 Pb, OC, EC의 양이 토양보다 아주 높게 나타났는데, 이는 도로먼지에 자동차(타이어 마모, 브레이크 오일)에서 배출된 성분들이 포함됐기 때문으로 생각된다. U.S. EPA (1992)의 도로먼지(표 2)에서 OC와 TC(OC+EC)의 비가 0.87로, 본 연구에서도 아주 유사한 값인 0.89를 보였다. Watson and Chow (2001)의 연구에서는 도로먼지에서 OC와 TC(OC+EC)의 비가 0.97~0.99이었다. 지각 배출원으로 알려진 토양과 도로먼지에서의 OC는 약 5~15%를 차지한다고 했는데 (Watson *et al.*, 1997), 본 연구에서는 토양에서 4.3%, 도로먼지에서 13.6%를 차지하여 유사성을 나타내었다.

3.2 자동차 배출원

표 3에 나타난 가솔린 자동차에 대한 배출원 구성물질 성분비는 차종별로 저속, 서울 시내 평균차속, 고속주행시의 결과를 개별적으로 분석한 결과를 평

균한 자료이고, 주요성분은 SO_4^{2-} (20.5%) > Cl^- (15.3%) > OC (11.0%) > NH_4^+ (7.4%) > EC (5.8%)으로 수용성 이온성분과 탄소의 함량이 높다는 특징을 갖는다. 또한, 표 3에는 U.S. EPA (1992) 자료와 본 연구에서 사용된 차대동력계와 유사한 실험방법에 의해 미국에서 시판중인 가솔린 자동차를 대상으로 평가된 Watson *et al.* (1994)의 결과를 나타내었다. 가솔린 자동차에서 배출되는 입자 중 90% 이상이 PM_{2.5}에 해당된다고 보고한 Watson *et al.* (1994) 연구에서의 배출원 구성물질 성분비의 주요성분 순서는 OC (30.1%) > EC (13.5%) > NO_3^- (3.9%) > SO_4^{2-} (2.3%)이어서 주요성분들이 차지하는 양이 본 연구의 결과와 다른 분포를 보이고 있다. 그러나, Watson *et al.* (1994)에서 연구한 가솔린 자동차에서의 OC/TC (OC+EC)의 값이 0.69이었는데, 본 연구에서도 OC가 EC보다 약 1.9배정도 많이 차지하여 OC/TC의 값이 0.65로 유사한 결과를 얻었다(표 3).

표 4에는 차종별로 저속, 서울 시내 평균차속, 고속 주행시의 결과를 개별적으로 분석한 결과를 평균한 자료인 디젤 자동차에 대한 배출원 구성물질 성분비를 U.S. EPA (1992) 및 Watson *et al.* (1994)와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 디젤 자동차 배출원 구성물질 성분비의 특징은 탄소성분의 함량이 상당히 높다는 것이다. 이와 같이 높은 탄소성분 함량은 비교대상인 U.S. EPA (1992)와 Watson *et al.* (1994)의 연구결과에서도 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발된 디젤 자동차의 주요성분들은 EC (54.5%) > OC (25.3%) > Cl^- (3.2%) > SO_4^{2-} (1.4%) 순이었고, 탄소성분(OC+EC)은 전체 중량의 약 80%에 해당되는 값을 나타내고 있다. U.S. EPA (1992) 자료의 배출원 구성물질 성분비의 주요성분으로는 EC 및 OC로서 이들 성분은 전체 중량의 98%에 해당하여 디젤자동차에서 배출되는 배기가스 중 입자의 대부분은 탄소성분임을 의미하고 있으며, Watson *et al.* (1994)의

Table 4. Diesel vehicle source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #32104)	Watson <i>et al.</i> (1994)
Na ⁺	0.131 ± 0.013 ¹⁾	NA ²⁾	0.000 ± 0.000
Mg ²⁺	0.027 ± 0.003	NA	NA
Al	0.000 ± 0.000	0.008 ± 0.000	0.174 ± 0.121
Si	0.625 ± 0.015	0.128 ± 0.000	0.463 ± 0.184
S	0.762 ± 0.022	0.605 ± 0.000	1.240 ± 0.280
Cl ⁻	3.170 ± 0.317	NA	1.620 ± 0.400
K	0.080 ± 0.008	0.009 ± 0.000	0.042 ± 0.033
Ca	0.084 ± 0.012	0.022 ± 0.000	0.159 ± 0.063
Ti	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.002 ± 0.153
V	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.062
Cr	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.004 ± 0.015
Mn	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.008 ± 0.011
Fe	0.036 ± 0.004	0.009 ± 0.000	0.159 ± 0.065
Ni	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.003 ± 0.005
Cu	0.001 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.013 ± 0.008
Zn	0.052 ± 0.004	0.042 ± 0.000	0.070 ± 0.019
Pb	0.000 ± 0.000	0.021 ± 0.000	0.015 ± 0.029
OC	25.30 ± 1.580	33.50 ± 0.000	40.10 ± 6.60
EC	54.46 ± 5.113	64.30 ± 0.000	32.90 ± 8.00
NO ₃ ⁻	0.192 ± 0.019	NA	0.310 ± 0.400
SO ₄ ²⁻	1.402 ± 0.140	NA	2.440 ± 1.000
NH ₄ ⁺	0.256 ± 0.026	NA	0.866 ± 0.126
K ⁺	0.080 ± 0.008	NA	NA
Sum.	86.66	98.65	80.59

¹⁾Standard error

²⁾Not available

Table 5. Industrial source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #13504)	U.S. EPA (1992) (profile #13502)
Na ⁺	1.586 ± 0.159 ¹⁾	NA ²⁾	NA
Mg ²⁺	0.009 ± 0.001	NA	NA
Al	0.000 ± 0.000	1.203 ± 0.120	0.210 ± 0.000
Si	0.134 ± 0.029	2.077 ± 0.208	NA
S	14.85 ± 0.174	13.07 ± 1.307	9.600 ± 0.000
Cl ⁻	0.263 ± 0.026	NA	NA
K	0.055 ± 0.005	0.056 ± 0.006	0.085 ± 0.000
Ca	0.050 ± 0.011	0.208 ± 0.021	0.085 ± 0.000
Ti	0.000 ± 0.000	0.079 ± 0.009	0.074 ± 0.000
V	0.537 ± 0.027	1.004 ± 0.100	0.920 ± 0.000
Cr	0.000 ± 0.000	0.003 ± 0.012	0.021 ± 0.000
Mn	0.000 ± 0.000	0.011 ± 0.002	0.012 ± 0.000
Fe	0.314 ± 0.015	0.357 ± 0.036	0.460 ± 0.000
Ni	1.122 ± 0.261	1.595 ± 0.160	0.490 ± 0.000
Cu	0.000 ± 0.000	0.051 ± 0.008	0.000 ± 0.000
Zn	0.033 ± 0.007	0.052 ± 0.005	0.040 ± 0.000
Pb	0.000 ± 0.000	0.032 ± 0.006	0.033 ± 0.000
OC	1.743 ± 0.077	8.960 ± 0.896	NA
EC	2.129 ± 0.189	8.690 ± 0.869	NA
NO ₃ ⁻	0.143 ± 0.014	NA	NA
SO ₄ ²⁻	31.78 ± 3.178	NA	NA
NH ₄ ⁺	2.203 ± 0.220	NA	NA
K ⁺	0.055 ± 0.005	NA	NA
Sum.	57.01	37.45	12.03

¹⁾Standard error

²⁾Not available

결과에서도 주요성분은 OC (40.1%) > EC (32.9%) > SO₄²⁻ (2.4%) 이었고, 탄소성분은 전체 중량의 약 73%에 해당하였다. 또한, Watson *et al.* (1994) 연구에서 디젤 자동차에서의 OC/TC (OC+EC)의 값이 0.55이었는데, 본 연구에서와 U.S. EPA (1992)에서는 EC가 OC보다 각각 약 2.2배, 1.9배정도 많이 차지하여 OC/TC의 값은 각각 0.32와 0.34이었다(표 3).

3.3 고정오염원

본 연구에서 고정오염원에서 희석식 시료채취장치를 이용하여 측정된 자료 중 신빙성이 있다고 판단한 B-C유(황 함유 1.0%)를 주 연료로 하는 산업시설인 ○○물산공장에서의 3개 자료, 도시 생활폐기물 소각로에서는 1개의 자료, 석탄연소 화력발전소에서는 2개의 자료를 가지고 고정오염원의 배출원 구성물질 성분비가 개발되었다. 고정오염원에서의 측정자료가 다른 미세입자 배출원보다 상대적으로 적은 것은 대학기관에서 각 업체로부터 측정허가를 받기

에는 많은 어려움이 있었고, 또한, 측정 자료 중 많은 자료가 채집된 양이 적거나 수분이 많이 포함되는 경우가 있었다. 산업시설에서 측정된 배출원 구성물질 성분비를 U.S. EPA (1992)의 자료와 비교한 결과를 표 5에 나타내었다. 산업시설 배출원의 주요성분이 SO₄²⁻ (31.5%) > S (14.9%) > NH₄⁺ (2.2%) > EC (2.1%) 순이었으며, 총중량의 약 57%가 분석된 성분이었다. U.S. EPA (profile # 13504, 1992) 자료의 경우 수용성 이온성분에 관한 자료가 없어 비교할 수 없지만, 주요 성분이 S (13.1%) > OC (9.0%) > EC (8.7%) 인 것에 비해 본 연구에서는 S가 차지하는 양은 비슷하고, EC와 OC는 아주 낮게 평가되었다.

표 6에는 도시 생활폐기물 소각로에 대한 배출원 구성물질 성분비의 결과를 U.S. EPA (1992) 및 Olmez *et al.* (1988)의 연구결과와 비교하여 나타내었다. Olmez *et al.* (1988)은 미국 Philadelphia의 대기질 개선을 위한 연구의 일환으로 총 7개의 대기오염물질 배출원에서 측정하였고, 자체 개발한 희석식 시료

Table 6. Municipal incinerator source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #17106)	Olmez <i>et al.</i> (1988)
Na ⁺	2.510±0.251 ¹⁾	NA ²⁾	NA
Mg ²⁺	0.063±0.006	NA	NA
Al	0.000±0.000	1.170±0.000	0.250±0.100
Si	0.245±0.097	ND	1.700±0.300
S	1.493±0.150	4.300±0.000	2.900±0.800
Cl ⁻	24.90±2.490	NA	NA
K	2.210±0.199	5.000±0.000	7.600±2.300
Ca	1.404±0.261	0.767±0.000	0.230±0.100
Ti	0.000±0.000	0.193±0.000	0.030±0.015
V	0.000±0.000	0.000±0.000	0.001±0.001
Cr	0.000±0.000	0.036±0.000	0.010±0.003
Mn	0.000±0.000	0.083±0.000	0.019±0.004
Fe	12.93±0.153	0.627±0.000	0.220±0.050
Ni	0.000±0.000	0.014±0.000	0.029±0.004
Cu	0.000±0.000	0.180±0.000	0.130±0.050
Zn	0.216±0.032	11.80±0.000	10.40±0.500
Pb	0.000±0.000	8.230±0.000	5.800±1.200
OC	3.120±0.111	NA	0.570±0.260
EC	0.417±0.019	NA	3.500±0.200
NO ₃ ⁻	0.414±0.041	NA	NA
SO ₄ ²⁻	2.400±0.240	NA	6.800±2.300
NH ₄ ⁺	14.22±1.422	NA	0.360±0.070
K ⁺	1.736±0.174	NA	NA
Sum.	68.28	32.40	40.55

¹⁾Standard error
²⁾Not available

Table 7. Coal-fired power plant source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #11205)	Watson <i>et al.</i> (2001)
Na ⁺	0.199±0.020 ¹⁾	NA ²⁾	NA
Mg ²⁺	0.118±0.012	NA	NA
Al	9.579±0.187	10.02±1.503	3.830±2.570
Si	15.04±0.187	17.12±2.568	6.810±4.030
S	1.458±0.072	0.501±0.050	5.910±3.180
Cl ⁻	0.000±0.000	NA	1.030±0.669
K	1.113±0.092	1.136±0.170	0.498±0.289
Ca	1.676±0.138	0.575±0.058	6.490±6.570
Ti	0.634±0.051	0.614±0.092	0.230±0.204
V	0.000±0.000	0.051±0.005	0.015±0.063
Cr	0.000±0.000	0.064±0.013	0.008±0.013
Mn	0.061±0.011	0.023±0.003	0.051±0.047
Fe	3.325±0.051	2.330±0.350	2.100±1.030
Ni	0.025±0.007	0.028±0.007	0.005±0.005
Cu	0.000±0.000	0.023±0.003	0.014±0.018
Zn	0.051±0.011	0.039±0.006	0.029±0.017
Pb	0.000±0.000	0.016±0.009	0.011±0.032
OC	5.556±0.351	NA	5.200±10.24
EC	0.422±0.006	NA	4.090±4.410
NO ₃ ⁻	0.614±0.061	NA	0.363±0.454
SO ₄ ²⁻	6.269±0.627	NA	15.20±8.250
NH ₄ ⁺	0.197±0.020	NA	3.150±3.620
K ⁺	0.088±0.009	NA	0.143±0.108
Sum.	46.43	32.54	55.18

¹⁾Standard error
²⁾Not available

채취장치에서 이단면지체집장치 (dichotomous sampler)를 이용하여 시료채취한 후, IC, XRF, INAA 및 Carbon Analyzer (Envirotech Corp., USA)로 분석하였다. 조사된 배출원중에서 도시 생활폐기물 소각로에서 검출되는 주요성분은 Zn (10.4%) > K (7.6%) > SO₄²⁻ (6.8%) 순이었다. 반면에, 본 연구결과에 의하면, 주요성분들은 Cl⁻ (24.9%) > NH₄⁺ (14.2%) > Fe (12.9%) > OC (3.1%) 순으로서 미국 Philadelphia의 연구결과와는 다른 결과를 나타내고 있다. 이는 생활폐기물의 구성비율 및 소각조건의 차이로 인한 것으로 생각될 수 있을 것이다.

석탄연소 화력발전소에 대한 배출원 구성물질 성분비는 U.S. EPA (1992) 및 Watson *et al.* (2001)의 배출원 구성물질 성분비와 비교하여 표 7에 나타났다. 표 7에 의하면, 본 연구에서의 주요성분들은 Si (15.0%) > Al (9.6%) > SO₄²⁻ (6.3%) > OC (5.6%) > Fe (3.3%) 순이었고, 총중량의 약 46%가 분석되었다. 반면, U.S. EPA (1992) 자료의 석탄연소 화력발전소에 대한 배출

원 구성물질 성분비의 경우는 주요성분이 Si (17.1%) > Al (10.0%) > Fe (2.3%)였으며, 4개의 화력발전소에서 채취된 10개의 시료를 composite한 Watson *et al.* (2001)의 연구결과에서는 SO₄²⁻ (15.2%) > Si (6.8%) > Ca (6.5%) > S (5.9%)였다. 본 연구에서 측정한 Si, Al, Fe이 차지하는 양이 U.S. EPA (1992)와 유사한 경향을 보인 반면, SO₄²⁻의 경우는 Watson *et al.* (2001)의 연구결과보다 아주 낮았다. 이는 사용된 석탄(예: 황 함유량)과 방지시설이 서로 다르기 때문으로 생각된다.

3. 4 식물소각 (Biomass burning)

서울시에서의 10년간의 주풍향을 고려할 때, 주풍향인 서풍계열(북서풍, 서풍, 남서풍)이란 점에서 식물소각은 수용지점에 영향을 줄 수 있는 중요한 미세입자 배출원이다. 왜냐하면, 서울시 서쪽에 위치하고 있는 서해안 농업지대 및 중국의 농업지대가 모두 서울시를 기준으로 서쪽 계열에 위치하고 있기

Table 8. Biomass burning source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #42304)	U.S. EPA (1992) (profile #42320)	Watson <i>et al.</i> (2001)
Na ⁺	0.210±0.021 ¹⁾	NA ²⁾	NA	NA
Mg ²⁺	0.108±0.011	NA	NA	NA
Al	0.008±0.003	0.340±0.300	0.313±0.247	0.012±0.019
Si	0.116±0.015	0.300±0.200	0.411±0.384	0.025±0.022
S	0.409±0.032	1.500±0.700	0.638±0.425	0.180±0.132
Cl ⁻	1.500±0.150	NA	NA	0.258±0.114
K	0.493±0.028	5.900±2.500	2.321±1.454	0.934±1.130
Ca	0.012±0.003	0.400±0.300	0.660±0.605	0.031±0.032
Ti	0.000±0.000	0.005±0.005	0.005±0.010	0.000±0.013
V	0.000±0.000	0.000±0.000	0.000±0.000	0.000±0.008
Cr	0.000±0.000	0.005±0.007	0.002±0.004	0.000±0.003
Mn	0.004±0.001	0.004±0.005	0.121±0.088	0.002±0.002
Fe	0.012±0.002	0.200±0.600	0.202±0.377	0.017±0.026
Ni	0.000±0.000	0.000±0.000	0.000±0.000	0.000±0.001
Cu	0.000±0.000	0.110±0.400	0.037±0.231	0.000±0.001
Zn	0.002±0.000	0.000±0.000	0.011±0.012	0.030±0.138
Pb	0.000±0.000	0.030±0.040	0.012±0.024	0.000±0.002
OC	43.69±3.369	35.60±10.75	31.62±8.700	51.37±11.72
EC	4.627±0.485	5.800±1.740	5.183±2.303	12.39±4.200
NO ₃ ⁻	0.717±0.072	0.890±0.900	0.649±0.888	0.074±0.019
SO ₄ ²⁻	0.823±0.082	5.000±4.300	1.988±2.492	0.914±0.381
NH ₄ ⁺	0.259±0.026	NA	0.309±0.265	0.127±0.020
K ⁺	0.827±0.083	NA	NA	1.400±1.160
Sum.	53.82	56.08	44.48	67.76

¹⁾Standard error

²⁾Not available

때문이다. 이러한 현상은 1년 중 겨울철과 봄철에 이루어지기 때문에 이 계절 동안에는 식물소각에 의한 미세입자의 영향을 받을 것으로 예상되어진다. 또한 겨울철에 중국의 경우, 취사 및 난방의 목적으로 아직도 많은 식물소각이 행하여진다는 사실을 근거로 하면, 겨울철에도 어느 정도 영향을 받을 것으로 기대되어진다. 따라서 식물소각에 대한 배출원 구성물질 성분비는 국내의 미세입자의 연구 및 관리를 위해 매우 중요하다.

본 연구의 결과를 U.S. EPA (1992) 및 Watson *et al.* (2001)의 연구와 비교하여 표 8에 나타내었다. 본 연구에서의 주요성분은 OC (43.7%) > EC (4.6%) > Cl⁻ (1.5%) > K⁺ (0.8%) = SO₄²⁻ (0.8%)로서 가장 큰 비중을 차지하는 성분은 OC임을 알 수 있다. Watson *et al.* (2001)는 겨울철 난방용으로 사용되는 소나무, 가문비나무 및 당버를 등을 연소시켜 발생하는 미세입자를 희석챔버에서 채취·분석하였으며, 주요성분은 OC, EC, K⁺, NH₄⁺, K 등이다. 이중에서 OC는 포집된 미세입자 중량의 약 51%에 해당한다고 보고하였다(표 8). 또한 U.S. EPA (1992) 자료(표 8)에서도 주요성분들은 OC, EC, K, SO₄²⁻였으며, 이 중에서 OC가 가장 큰 비중을 차지하여 본 연구에서 개발된 식물소각에 대한 배출원 구성물질 성분비는 외국의 자료와 매우 유사한 분포를 보였고, 식물소각에서 다량의 OC가 검출된다는 것을 알 수 있었다. 또한, Chow and Watson (1997) 연구에 의하면, 식물소각에서 OC/TC (OC+EC)의 값이 0.93으로 보고했는데, 본 연구에서도 OC가 EC보다 약 9.5배정도 많이 차지하여 OC/TC의 값이 0.90으로 유사한 결과를 얻었다. U.S. EPA (1992)와 Watson *et al.* (2001)의 연구에서는 OC/TC의 값이 0.89와 0.81을 보였다(표 8).

3.5 해염입자

해수자체를 분석한 해염입자에 대한 배출원 구성물질 성분비를 U.S. EPA (1992)와 Watson *et al.* (1994)의 연구와 비교하여 표 9에 나타내었다. 본 연구결과를 보면, 주요성분들은 Cl⁻ (26.2%) > Na⁺ (18.6%) > SO₄²⁻ (7.1%) > Mg²⁺ (4.0%)였으며, Na⁺와 Cl⁻은 총중량의 약 44.8%에 해당되는 주된 성분이었다. 이론적인 해수의 성분비를 근거로 한 U.S. EPA (1992)에서의 주요성분들은 Cl⁻와 SO₄²⁻이었으

Table 9. Marine source profiles (weight percent by mass).

Species	This study	U.S. EPA (1992) (profile #43101)	Watson <i>et al.</i> (1994)
Na ⁺	18.59 ± 1.859 ¹⁾	NA ²⁾	32.00 ± 3.800
Mg ²⁺	3.953 ± 0.395	NA	NA
Al	0.000 ± 0.000	NA	0.000 ± 0.000
Si	0.044 ± 0.007	NA	0.009 ± 0.001
S	0.230 ± 0.013	3.300 ± 1.300	2.670 ± 0.320
Cl ⁻	26.15 ± 2.615	40.00 ± 10.00	57.40 ± 6.900
K	0.043 ± 0.014	1.400 ± 0.200	1.180 ± 0.140
Ca	0.340 ± 0.022	1.400 ± 0.200	1.220 ± 0.150
Ti	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
V	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Cr	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Mn	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Fe	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Ni	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Cu	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Zn	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
Pb	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
OC	0.015 ± 0.001	NA	0.000 ± 0.100
EC	0.001 ± 0.000	NA	0.000 ± 0.100
NO ₃ ⁻	0.000 ± 0.000	NA	0.004 ± 0.000
SO ₄ ²⁻	7.111 ± 0.711	10.00 ± 4.000	8.000 ± 0.960
NH ₄ ⁺	0.000 ± 0.000	NA	0.000 ± 0.100
K ⁺	1.499 ± 0.150	NA	NA
Sum.	58.00	56.10	102.5

¹⁾Standard error
²⁾Not available

며, 순수한 해수를 분석하여 얻은 결과인 Watson *et al.* (1994)에서는 Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻가 주요성분이어서 본 연구결과와 유사하지만, 차지하는 양은 서로 상이하였다. 본 연구와 Watson *et al.* (1994)의 연구 결과는 순수 해수를 여과지를 이용하여 채집하여 분석한 결과이어서 미세입자와 조대입자의 조성이 합쳐진 자료이다.

4. 결 론

본 연구에서는 미세입자(PM_{2.5})에 대한 배출원 구성물질 성분의 특성을 조사하였는데, 결과는 다음과 같다.

1) 토양 배출원 구성물질 성분비의 주요성분은 Si (17.1%) > Al (11.1%) > Fe (8.4%) > OC (4.3%) 순이었으며, 도로먼지의 경우는 Si (15.4%) > OC (13.6%) > Ca (9.8%) > Fe (7.8%) 순이었다. 따라서, 지각 배출원

으로 알려진 토양과 도로먼지에서 Si가 가장 많은 양을 차지하였다.

2) 가솔린 자동차의 배출원 구성물질 성분비의 경우는 SO_4^{2-} (20.5%) > Cl^- (15.3%) > OC (11.0%) > NH_4^+ (7.4%) > EC (5.8%) 순이었고, 디젤 자동차의 경우는 EC (54.5%) > OC (25.3%) > Cl^- (3.2%) > SO_4^{2-} (1.4%) 이었다. 가솔린 자동차에서는 OC가 EC보다 많은 양을 차지한 반면, 디젤 자동차에서는 EC가 차지하는 양이 OC보다 많았다.

3) 고정 오염원 중에서 B-C유를 주 연료로 사용하는 산업배출원의 배출원 구성물질 성분비는 SO_4^{2-} (31.5%) > S (14.9%) > NH_4^+ (2.2%) > EC (2.1%) 이 주요성분이었으며, 도시 생활폐기물 소각로의 경우는 Cl^- (24.9%) > NH_4^+ (14.2%) > Fe (12.9%) > OC (3.1%) 순이었다. 또한 석탄연소 화력발전소의 배출원 구성물질 성분비의 경우는 Si (15.0%) > Al (9.6%) > SO_4^{2-} (6.3%) > OC (5.6%) 이 주요 성분이었다.

4) 식물연소에 대한 배출원 구성물질 성분비의 경우는 OC (43.7%) > EC (4.6%) > Cl^- (1.5%) 로서 OC가 큰 비중을 차지하였다.

5) 해염입자의 배출원 구성물질 성분비의 경우는 Cl^- (26.2%) > Na^+ (18.6%) > SO_4^{2-} (7.1%) > Mg^{2+} (4.0%) 의 순이어서, 해수성분인 Cl^- 와 Na^+ 가 주요성분이었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2000-000-00340-0) 지원으로 수행되었음. 본 연구를 수행하는데 도움을 준 서원대학교의 최영민, 권동혁, 이지영, 안홍만, 한국외국어대학교의 이민영, 류동길, 황상규, 박경언, 김지용, 국립환경연구원 자동차공해연구소의 임철수에게 감사드립니다.

참고 문헌

- 강병욱, 이학성, 김희강 (2000) 수용모델을 이용한 청주시 미세입자 (PM_{2.5})의 기여도 측정, 한국대기환경학회지, 16(5), 477-485.
- 강병욱, 이학성, 김희강 (1997) PIXE를 이용한 청주지역 미세입자 중 원소의 계절 변동 특성, 한국대기환경학회지, 13(4), 307-317.
- 이학성, 강병욱 (2000) 미세입자 (PM_{2.5})에 포함된 탄소농도 계절 특성, 한국대기환경학회지, 16(2) 103-111.
- 이학성, 강병욱 (1996) 디누더 측정기를 이용한 여름철 청주시의 산성오염물질 측정과 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 441-448.
- Chan, Y.C., R.W. Simpson, G.H. Mctainsh, P.D. Vowles, D.D. Cohen, and G.M. Bailey (1999) Source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane (Australia) by receptor modelling, Atmos. Environ., 33 (1999), 3251-3268.
- Chow, J.C., and J.G. Watson (1997) Fugitive dust and other source contributions to PM₁₀ in Nevada's Las Vegas Valley, Report No. DRI 4039.1F, Desert Research Institute.
- Countess, R.J. (1999) Development of a PM_{2.5} emissions inventory for the south coast air basin, J. Air & Waste Manage. Assoc., 49, 125-132.
- Hopke, P.K. (1991) Receptor modeling for air quality management, 1st Ed., Elsevier Science Publishing Company Inc., U.S.A., 48-53pp.
- Lee, H.S., and B.W. Kang (2001) Chemical characteristics of principal PM_{2.5} species in Chongju, South Korea, Atmos. Environ., 35, 739-746.
- Lee, H.S., C.M. Kang, B.W. Kang, and H.K. Kim (1999) Seasonal variations of acidic air pollutants in Seoul, South Korea, Atmos. Environ., 33 (1999), 3143-3152.
- Lee, H.S., R.A. Wadden, and P.A. Scheff (1993) Measurement and evaluation of acid air pollutants in Chicago using an annular denuder system, Atmos. Environ., 27A (4), 543-553.
- Olmez, L., A.E. Sheffield, G.E. Gordon, J.E. Houck, L.C. Pritchett, J.A. Cooper, T.G. Dzubay, and R.L. Bennett (1988) Compositions of particles from selected sources in Philadelphia for receptor modeling applications, J. Air Pollut. Control Assoc., 38, 1392-1402.
- Park, S.S., M.S. Bae, and Y.J. Kim (2001) Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} particles in the Sihwa area, Korea, J. Air & Waste Manage. Assoc., 51, 393-405.
- U.S. EPA (1992) VOC/PM speciation data system user's manual, version 1.5.
- Watson, J.G., J.C. Chow, and J.E. Houck (2001) PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995, Chemosphere,

43, 1141-1151.

- Watson, J.G., and J.C. Chow (2001) Source characterization of major emissions sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the U.S./Mexico border, *The Sci. of The Total Environ.*, 276, 33-47.
- Watson, J.G., N.F. Robinson, C. Lewis, and T. Coulter (1997) *Chemical mass balance receptor model version 8*

(CMB8) user's manual, U.S. EPA/DRI.

- Watson, J.G., J.C. Chow, Z. Lu, E.M. Fujita, D.H. Lowenthal, and D.R. Lawson (1994) Chemical mass balance source apportionment of PM₁₀ during the Southern California Air Quality Study, *Aerosol Sci. Technol.*, 21, 1-36.