

디젤 및 가솔린자동차 배출원의 구성물질 성분비 개발에 관한 연구

A Study on the Source Profile Development for Diesel and Gasoline-Powered Vehicles

강병욱 · 조민식 · 이승복¹⁾ · 배귀남¹⁾ · 임철수²⁾ · 나광삼³⁾ · 이학성^{4),*}

충주대학교 환경공학부, ¹⁾한국과학기술연구원 지구환경센터,

²⁾국립환경과학원 교통환경연구소, ³⁾California Environmental Protection Agency,

⁴⁾서원대학교 환경건설정보학과

(2010년 3월 26일 접수, 2010년 5월 17일 수정, 2010년 6월 1일 채택)

Byung-Wook Kang, Min-Shik Cho, Seung-Bok Lee¹⁾, Gwi-Nam Bae¹⁾,
Cheol-Soo Lim²⁾, Kwangsam Na³⁾ and Hak Sung Lee^{4),*}

Division of Environmental Engineering, Chungju National University

¹⁾*Global Environment Center, Korea Institute of Science and Technology*

²⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

³⁾*Mobile Source Control Division, California Environmental Protection Agency*

⁴⁾*Department of Environmental, Civil and Information System, Seowon University*

(Received 26 March 2010, revised 17 May 2010, accepted 1 June 2010)

Abstract

The purpose of this study was to develop the PM_{2.5} source profiles for diesel and gasoline-powered vehicles, which contained mass abundances in terms of mass fraction of PM_{2.5} of chemical species. Seven diesel-powered vehicles and nine gasoline-powered vehicles were sampled from a chassis dynamometer exhaust dilution system. The species measured were water-soluble ions, elements, elemental carbon (EC), and organic carbon (OC).

From this study, the large abundances of EC (54.5%), OC (26.0%), SO₄²⁻ (1.5%), NO₃⁻ (0.8%), and S (0.6%) were observed from the diesel-powered vehicle exhaust showing that carbons were dominant species. The gasoline-powered vehicle exhaust emitted large abundances of OC (38.3%), EC (4.2%), SO₄²⁻ (3.6%), NH₄⁺ (3.5%), and NO₃⁻ (3.0%). The abundances of SO₄²⁻, NH₄⁺, and NO₃⁻ from gasoline vehicle were greater than those of diesel vehicle. The emissions of P, S, Ca, Fe, and Zn among trace elements for the gasoline vehicle were greater than 1% of the PM_{2.5} mass unlike those for the diesel vehicle. Particularly, the fraction of Zn was five times higher from the gasoline vehicle than that from the diesel vehicle. The source profiles developed in this work were intensively examined by applying chemical mass balance model.

Key words : Source profiles, PM_{2.5}, Gasoline-powered vehicle, Diesel-powered vehicle, Chassis dynamometer

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

1. 서 론

대기 중에 존재하는 미세먼지 ($dp < 2.5 \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2.5}$)는 발생과정이나 양적인 면을 고려해 볼 때, 토양 등과 같은 자연적인 배출원의 기여도가 낮은 반면, 대부분이 인위적인 배출원에서 배출되는 것으로 알려져 있다. 미세먼지의 생성과정을 살펴보면, 연소과정에서 직접 배출되거나 배출된 후 대기 중에서 응집, 휘발성 물질의 응축, 가스에서 입자로의 전환 등에 의해서 생성된다. 미세먼지를 구성하는 주된 성분은 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , EC (elemental carbon), OC (organic carbon)으로 알려져 있고, 이들 성분들은 시정장애 (visibility reduction)에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 1999; Conner *et al.*, 1991; Seinfeld, 1986).

자동차에서 배출되는 오염물질들은 급성 및 만성 심혈관질환과 호흡기질환을 포함하여 인체에 악영향을 미치고 있다 (Urch *et al.*, 2004; Garshick *et al.*, 2003; Brunekreef *et al.*, 1997). 자동차에서 배출되는 오염물질의 혼합물에 포함된 유해한 구성성분이 대부분 아직까지 밝혀지지 않았지만 미세먼지는 그들의 화학적 및 물리적 특성으로 인하여 부분적으로 인체 위해성과 관련되는 것으로 믿어지고 있다. 미세먼지가 건강에 미치는 영향에 관하여 지금까지 많은 연구가 수행되었다 (Jerrett *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2005; Somers *et al.*, 2004; Pope *et al.*, 2002; Burnett *et al.*, 1995; Dockery *et al.*, 1993).

디젤자동차나 가솔린자동차에서 배출되는 미세먼지가 도시대기 중에서 차지하는 비율이 상당히 높은 것으로 알려져 있다 (Kang *et al.*, 2008). 결과적으로 도시대기 중 미세먼지에 대한 자동차의 기여도는 인체 노출을 저감하고자 하는 정책을 개발할 때 관심의 대상이 된다.

Chemical Mass Balance (CMB) 수용모델은 환경대기 중 미세입자의 배출원 기여도 산정에 폭넓게 사용되고 있다 (Kang *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2001). 환경대기 중 미세먼지의 배출원 기여도를 산정하기 위해서는 관심이 되는 각 배출원의 입자상 배출물질에 대하여 세부적인 화학적 조성구 성분비를 파악하여야만 한다.

대기오염 평가를 위해 필요한 정확한 CMB 배출

원 기여도 산정은 실질적인 배출원 구성물질 성분비 자료를 필요로 한다. 디젤과 가솔린자동차에서 배출하는 입자의 화학적 특성을 구분하고자 할 때 구성성분이 유사하기 때문에 정확한 배출원의 구성물질 성분비에 대한 필요성이 증대된다 (Lowenthal *et al.*, 1992). 그러나 자동차 배출원의 구성물질 성분비에 관한 연구를 수행하기 위해서는 다양한 차종에 대하여 차대동력계 (chassis dynamometer)의 이용이 필수적이거나 장비이용의 제한 등으로 포괄적인 차종에 대하여 국내에서 체계적으로 수행된 연구는 전무한 실정이다. 국내에서 수행된 배출원 구성물질의 성분비 개발에 대한 연구가 있었으나, 자동차의 경우 연료별 차종이 2~3대로 제한되었으며 표준화된 회석방법을 사용하지 못한 단점이 있었다 (Lee *et al.*, 2004; Kang *et al.*, 2000). 그리하여 국내 연구의 대부분은 국내의 상황을 잘 반영하지 못하고 있는 외국의 배출원 구성물질 성분비를 그대로 인용하여 사용하였다 (Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2001).

따라서 본 연구에서는 우리나라에서 아직 연구가 전무한 디젤 및 가솔린자동차에 대한 배출원 구성물질 성분을 직접 측정·분석한 결과를 고찰하고자 한다. 본 연구결과는 향후 국내에서 수용모델을 이용하여 미세먼지에 대한 각 배출원의 기여율을 추정하는데 중요한 자료를 제공할 수 있다고 사료된다.

2. 실험방법

2.1 실험대상 차량 선정

자동차 배출물질의 화학적 특성을 조사하기 위해서는 배출물질의 특성에 영향을 미치는 다양한 요인들을 반영하여야 하며 자동차 배출특성에 영향을 미치는 주요한 고려사항으로는 차량의 용도별 종류, 사용 연료의 종류, 엔진 배기량, 제작사, 모델, 차령 등을 들 수 있다.

2007년 한국자동차공업협회의 자료를 이용하여 우리나라 차종별 전국 자동차 등록현황을 통하여 특성을 분석한 결과에 의하면, 승용차의 비중이 73.4%로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 화물차가 19.5%로 높은 비중을 차지하고 있다. 자동차에 사용되는 연료의 비중은 가솔린, 경유, LPG의 순서로 각각 49.6, 37.0, 13.1%의 비중을 나타내었다. 승용차는

Table 1. Classification of test vehicles.

Vehicle type (fuel)	Model	Model year	Driving distance (km)	Registration fraction (%)
Passenger car (Gasoline)	New AVANTE	2006	26,758	3.9
	AVANTE XD	2006	39,280	3.3
	AVANTE 1.6	1996	124,614	1.8
	SONATA III	1998	124,465	3.1
	SEPHIA	1996	167,338	2.0
	CREDOS	1996	176,357	1.4
	VERNA	2002	89,583	1.2
	SM-520	2005	72,000	1.5
	GRANDEUR	1995	225,361	0.2
Light-duty vehicle (Diesel)	KORANDO	1999	240,000	5.3
	MUSSO	1998	229,605	17.0
	SANTA FE	2001	135,242	3.3
	REXTON	2005	92,522	14.0
	STAREX	2004	192,000	17.1
	STAREX	2003	134,270	17.1
Truck (Diesel)	1-ton PORTOR	2003	227,047	27.7
	1-ton PORTOR	2004	99,693	27.7

1,500 cc 및 2,000 cc의 유형이 기타 유형에 비하여 월등한 비중을 차지하고 있으며 승합차의 경우에는 15인승 이하의 비중이 전체 승합차량의 95% 정도로 높은 등록비율을 차지하고 있다. 화물자동차의 경우에는 화물 1톤 이하의 비중이 가장 높고 다음으로 화물 밴형 1톤 이하의 비중이 높게 나타내었다. 차령별 등록현황을 살펴보면 5~10년 미만에 속하는 비중이 35.9%로 가장 높았으며, 10년 이상에 속하는 차량의 비중도 30.5%로 비교적 높았다.

배출원의 화학물질 특성조사를 위한 대상차종의 선정은 전체 차종에 대한 조사가 불가능하므로 차량의 분류, 연료의 종류, 엔진 배기량, 제작사, 모델 및 차령을 종합적으로 고려하여 대표차종을 선정하였으며 연료특성에 의한 배출원 구성물질에 미치는 영향도 고려대상이나 본 연구에서는 연료특성은 고려하지 않았다(표 1).

2.2 차대동력계(chassis dynamometer) 실험

자동차에서 배출되는 미세먼지의 시료채취는 차대동력계(chassis dynamometer), 운전보조 장치(driver's aid), 시료채취장치(CVS: constant volume sampler), 희석터널(dilution tunnel), 미세먼지 시료채취기 등으로 구성된 배출가스 측정시스템을 사용하였다.

Table 2. Specification of chassis-dynamometer.

Items	Specifications
Model	DCE-80
Power absorption	40 HP
Maximum inertia weight	3,345 kg
Maximum roll speed	150 km/h
Roll size	21.97 cm
Trim wheel (lb)	680 kg

차대동력계는 자동차가 실제 도로를 주행할 때 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 대표화한 실측 시험모드를 사용하여 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 걸어주는 장치로 관성중량(inertia weight), 동력흡수계(power absorption unit) 및 제어기(controller)로 구성되어 있으며, 그 제원을 표 2에 나타내었다.

배출가스 중 미세먼지의 시료채취는 시험자동차가 차대동력계의 롤러위에서 각 모드별로 주행할 때 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량시료채취장치에서 일정량의 공기로 희석한 후, 시료채취장치를 이용하여 시료를 채취하였다. 운전 보조 장치는 운전자가 자동차로 도로에서 주행하는 상태로 운전할 수 있도록 화면에 운행상태를 표시해 주는 장치이다. 정용량시료채취장치는 자동차 배출가스를 공기와 희석

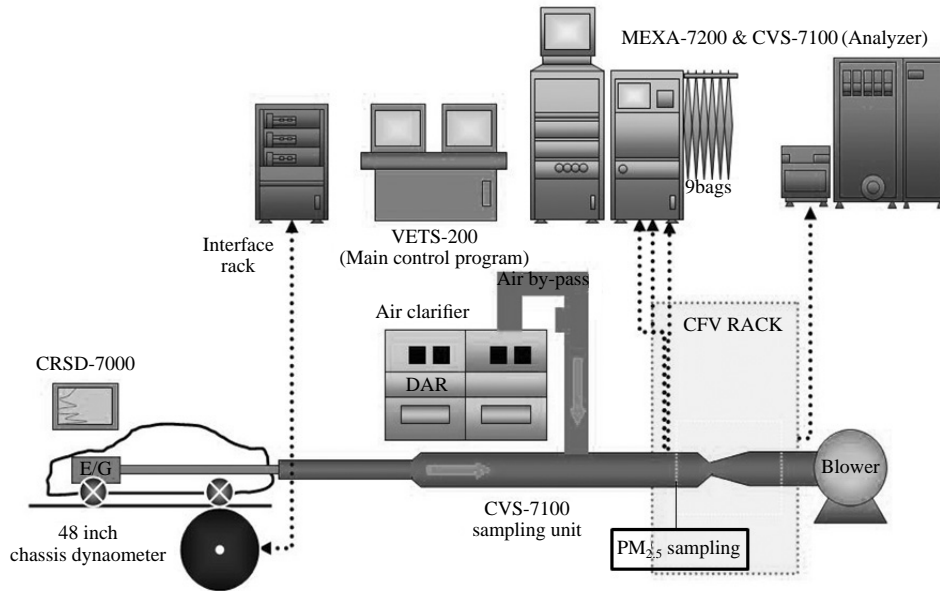


Fig. 1. Schematic diagram for exhaust emission test system.

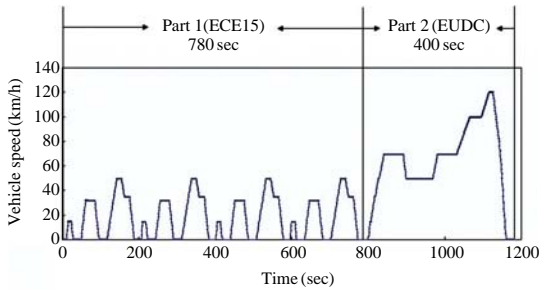
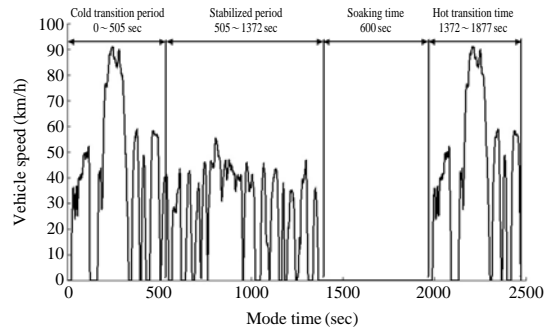


Fig. 2. Driving cycle of ECE15+EUDC mode for diesel-powered vehicles.

하여 채취할 수 있는 장치이며 회석터널은 고온에 의한 입자상물질의 변화를 배제시키고 대기조건으로 제어하기 위해 시료채취온도가 항상 52°C 이내로 유지되도록 외부공기와 배가스를 회석시키는 기능을 한다. 전체적인 시료채취장치의 개략도는 그림 1과 같다.

시험에 사용된 운전조건은 측정결과의 신뢰성확보를 위해 현재 “제작자동차 시험검사 및 절차에 관한 규정 (환경부고시 제2009-289호)”에 사용되는 규제시험모드로 사용하였고, 휘발유차는 CVS-75모드, 경유



Period	Driving distance (miles)	Duration (sec)	Average speed (mph)	Maximum speed (mph)
Cold/hot transition	3.57	505	25.26	56.68
Stabilized period	3.86	867	16.02	34.3
Total	11.04	1877 (+600)	21.29	56.68

Fig. 3. Driving cycle of CVS-75 mode for gasoline-powered vehicles.

차는 ECE15+EUDC 모드를 사용하였다. 이 운전조건들은 실제 자동차가 도로상에서 나타내는 운전조건들인 정지, 가속, 감속, 고속 등의 주행패턴을 실험

Table 3. Source profile for diesel-powered vehicles.

(unit: wt%)

Species	STAREX	GRACE	MUSSO	SANTAFE	KORANDO	1 ton PORTER	REXTON
Na ⁺	0.253	0.060	0.091	0.000	0.091	0.184	0.145
Mg ²⁺	0.024	0.009	0.000	0.000	0.010	0.020	0.034
Al	0.017	0.022	0.008	0.010	0.010	0.009	0.000
Si	0.032	0.084	0.110	0.000	0.133	0.014	0.126
P	0.046	0.028	0.128	0.041	0.078	0.227	0.054
S	0.103	0.148	0.098	0.008	0.096	1.400	0.114
Cl	0.059	0.019	0.012	0.011	0.009	0.028	0.031
K	0.052	0.005	0.002	0.000	0.010	0.021	0.025
Ca	0.114	0.079	0.163	0.096	0.094	0.264	0.109
Ti	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002
V	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Cr	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000
Mn	0.001	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.005
Fe	0.010	0.042	0.014	0.024	0.041	0.075	0.014
Ni	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.010	0.006
Cu	0.002	0.009	0.000	0.001	0.001	0.025	0.005
Zn	0.167	0.127	0.164	0.080	0.116	0.336	0.203
Br	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
Cd	0.006	0.003	0.002	0.008	0.003	0.009	0.003
Pb	0.008	0.004	0.002	0.000	0.002	0.000	0.006
OC	19.460	28.413	25.400	30.170	31.477	24.098	26.700
EC	58.320	42.577	61.675	64.215	36.727	53.543	49.680
NO ₃ ⁻	1.537	0.158	0.341	0.373	0.110	1.269	0.119
SO ₄ ²⁻	0.025	0.364	0.039	0.021	0.236	3.306	0.297
NH ₄ ⁺	0.097	0.577	0.046	0.047	0.294	0.651	0.306
Cl ⁻	0.231	0.167	0.105	0.000	0.172	0.263	0.286
K ⁺	0.159	0.034	0.090	0.011	0.055	0.199	0.059

실내 차대동력계상에서 모사할 수 있도록 개발된 것이다. 전체 주행조건의 구성은 그림 2, 3에서 보듯이 CVS-75모드의 경우 냉간 시동(cold start)구간(505초), 안정화 운전구간(867초), 그리고 약 10분 시동정지 후 다시 열간 시동(hot start)구간(505초)으로 운전되는 총 3단계로 구성되어있다. ECE15+EUDC 모드는 4개의 기초도시주행모드로 구성된 도시주행모드(part 1)와 추가 도시주행모드(part 2)로 구성되어 운전된다. 여기에서 냉간 시동과 열간 시동구간은 동일한 주행패턴으로 운전되었다.

2.3 시료채취

미세먼지를 채취하기 위하여 희석터널에 연결된 분배챔버(sampler plenum)에 PM_{2.5} 싸이클론, 47 mm 필터용 필터팩, 플로우트형 유량계, 진공펌프 순으로 연결된 시료채취장치 3쌍을 연결하여 각각 이온성분 분석용 테플론 필터(Gelman science, PTFE, 2.0 μm, 47 mm), 미량원소 분석용 테플론 필터(Gelman sci-

ence, PTFE, 2.0 μm, 47 mm), 그리고 원소탄소 및 유기탄소 분석용 석영필터(Whatman, QMA 4.7 cm)에 미세먼지 입자를 동시에 채취하였다. 이온분석용 테플론 필터는 미세먼지 중량을 분석하기 위해 채취 전에 무게를 칭량하였고, 석영필터는 시료 채취 전에 640°C에서 3시간 동안 구워서 준비하였다. 초기에 질량유량계(mass flow meter, TSI)를 이용하여 시료 채취유량을 10 L/min으로 설정한 후 일정하게 유지시켰다.

디젤자동차는 시험 전날 하루 동안 시동을 걸지 않은 상태로 보관한 후 다음날 첫 번째 시험을 시작할 때 시동을 걸어 총 3회 반복 시험을 실시하였다. 즉, 차종마다 첫 번째 시험은 냉간 시동(cold start) 조건에서 1개의 시료를 채취하였고, 그 이후 나머지 2개의 시료는 온간 시동(hot start) 조건에서 시료를 채취하였다. 그러나 가솔린자동차의 경우 입자의 농도가 낮아 CVS-75 mode를 3번 반복하여 1개의 시료를 채취하여 차종별로 총 3개씩 시료를 채취하였다.

Table 4. Source profile for gasoline-powered vehicles.

(unit: wt%)

Species	AVANTE	AVANTE XD	AVANTE1.6	GRANDEUR	SONATA III	SEPHIA	CREDOS	VERNA	SM-520
Na ⁺	1.451	2.800	2.090	0.592	0.319	0.917	1.064	1.468	4.560
Mg ²⁺	0.000	0.608	0.500	0.000	0.058	0.076	0.107	0.088	0.650
Al	0.304	0.000	0.000	0.542	0.000	0.226	0.414	0.063	2.273
Si	0.353	0.685	0.000	0.282	0.126	0.109	1.294	0.413	2.554
P	0.172	0.047	0.123	0.053	1.076	1.344	0.838	3.575	5.419
S	1.440	0.000	0.000	2.627	1.255	5.067	0.000	2.067	1.299
Cl	0.340	0.045	0.060	0.000	0.070	0.023	0.426	0.388	0.051
K	0.391	0.051	0.021	0.313	0.089	0.352	0.795	0.235	0.620
Ca	0.637	0.325	0.260	0.671	5.390	3.309	1.504	14.645	1.301
Ti	0.008	0.061	0.062	0.240	0.005	0.019	0.104	0.042	0.305
V	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.019	0.000	0.000
Cr	0.020	0.000	0.000	0.033	0.000	0.053	0.104	0.000	0.000
Mn	0.000	0.064	0.095	0.084	0.023	0.210	0.299	0.011	0.027
Fe	1.960	0.448	0.611	1.325	0.840	0.816	5.857	0.389	2.919
Ni	0.023	0.000	0.007	0.000	0.002	0.005	0.000	0.009	0.021
Cu	0.182	0.038	0.088	0.236	0.028	0.155	0.174	0.055	0.293
Zn	0.461	0.277	0.291	0.417	2.059	1.542	1.389	2.518	0.515
Br	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.000	0.039	0.000	0.000
Cd	0.019	0.031	0.050	0.000	0.007	0.085	0.000	0.049	0.786
Pb	0.053	0.000	0.243	0.150	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000
OC	39.480	27.19	56.000	19.580	39.98	26.310	65.570	21.330	42.060
EC	14.870	0.000	0.000	0.000	1.300	1.840	6.040	1.020	1.830
NO ₃ ⁻	10.301	0.598	1.120	1.448	0.267	3.964	0.412	0.275	1.240
SO ₄ ²⁻	2.761	2.153	2.077	4.118	2.608	11.029	1.254	2.456	6.385
NH ₄ ⁺	3.416	3.008	2.803	4.735	1.24	7.941	1.558	1.004	8.015
Cl ⁻	1.133	3.292	4.740	2.272	0.826	2.115	0.749	1.423	2.275
K ⁺	0.602	1.906	1.107	0.280	0.134	0.444	0.500	0.214	2.205

2. 4 화학적 분석

시료 채취 후 미세먼지의 중량을 분석하기 위하여 전자저울로 이온성분 분석용 테플론 필터의 무게를 측정하였고, 이온크로마토그래피 (Dionex, ICS-1000)를 이용하여 수용성 이온성분들(Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺)의 농도를 분석하였다. 원소성분은 미국 DRI (Desert Research Institute)에 의뢰하여 Na로부터 U까지 40종의 미량원소를 동시에 분석할 수 있는 고감도 XRF (X-ray fluorescence, PANalytical Epsilon 5)방법으로 분석하였다(Chow *et al.*, 2003). 탄소성분의 경우 미국 Riverside에 있는 캘리포니아 대학에서 Carbon Aerosol Analyzer (Sunset, USA)를 이용하여 TOT (Thermal/Optical Transmittance)방법으로 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC)를 분석하였다(Na *et al.*, 2004). 분석된 각 성분들의 정밀도(precision)와 정확도(accuracy)는 각각 10% 이내 및 ±10% 이내의 값을 나타내어 각 분석된 성분의 농도들은 매우 유의한 것으로 평가되었다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 배출원 구성물질 성분비(source profile)

미세먼지 질량, 이온, 원소, 원소탄소 및 유기탄소 등이 실험기간 동안 16대 차량(디젤 7대, 가솔린차량 9대)에 대하여 분석하였다. 디젤자동차의 경우 차량별 3회 측정결과를 산술평균하여 차량 대표치로 산정하였으며, 가솔린자동차는 차량별로 1회 측정하였기 때문에 측정결과를 대표치로 사용하였다. 차량별 배출원 구성물질 성분비 결과는 디젤과 가솔린자동차에 대하여 각각 표 3과 4에 나타내었다. 표 3과 4의 배출원 구성물질 성분비 결과를 보면 차량별로 상당한 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 시험에 사용한 차량별로 연식이나 주행거리 등의 차이가 원인인 것으로 사료된다.

디젤 및 가솔린자동차의 차량별 결과를 이용하여 대표적인 배출원 구성물질 성분비를 구하기 위하여 표 1에 제시한 시험대상 차종별 등류대수를 합산하

Table 5. Diesel-powered vehicle source profiles (Composite).

(unit: wt%)

Species	This study	U.S. EPA (2006) (profile 3219)	Watson <i>et al.</i> (1994)	Lee <i>et al.</i> (2004)
Na ⁺	0.130±0.013 ^a	NA ^b	0.000±0.100	0.131±0.013
Mg ²⁺	0.014±0.001	NA	NA	0.027±0.003
Al	0.010±0.027	0.000±0.019	0.174±0.121	0.000±0.000
Si	0.043±0.040	0.445±0.181	0.463±0.184	0.625±0.015
P	0.131±0.013	0.061±0.036	0.061±0.058	NA
S	0.635±0.036	1.189±0.592	1.240±0.280	0.762±0.022
Cl	0.024±0.006	0.049±0.031	0.028±0.061	NA
K	0.017±0.007	0.018±0.014	0.042±0.033	0.080±0.008
Ca	0.174±0.015	0.161±0.134	0.159±0.063	0.084±0.012
Ti	0.000±0.004	0.000±0.013	0.002±0.153	0.000±0.000
V	0.000±0.000	0.000±0.005	0.001±0.062	0.000±0.000
Cr	0.001±0.004	0.022±0.012	0.004±0.015	0.000±0.000
Mn	0.002±0.008	0.008±0.004	0.008±0.011	0.000±0.000
Fe	0.045±0.011	0.588±0.301	0.159±0.065	0.036±0.004
Ni	0.005±0.002	0.022±0.016	0.003±0.005	0.000±0.000
Cu	0.011±0.004	0.005±0.003	0.013±0.008	0.001±0.000
Zn	0.218±0.019	0.144±0.098	0.070±0.019	0.052±0.004
Br	0.002±0.006	0.015±0.010	0.002±0.009	NA
Cd	0.006±0.019	0.000±0.006	0.010±0.079	NA
Pb	0.002±0.010	0.171±0.136	0.015±0.029	0.000±0.000
OC	25.95±3.67	18.54±7.900	40.10±6.60	25.30±1.580
EC	54.48±6.61	78.83±23.30	32.90±8.00	54.46±5.113
NO ₃ ⁻	0.802±0.080	0.098±0.035	0.310±0.400	0.192±0.019
SO ₄ ²⁻	1.466±0.146	1.368±0.793	2.440±1.000	1.402±0.140
NH ₄ ⁺	0.374±0.037	0.339±0.103	0.866±0.126	0.256±0.026
Cl ⁻	0.185±0.018	NA	1.620±0.400	3.170±0.317
K ⁺	0.119±0.011	0.000±0.012	NA	0.080±0.008
Sum	84.85	102.0	80.69	86.66

^aStandard error, ^bNot available

여 총 차량대수로 하였으며 각 차종별 등록대수의 비율을 적용하여 가중 평균한 결과를 다른 연구결과들과 함께 표 5와 6에 나타내었다. 본 연구와 다른 연구들의 미세먼지에 대한 성분함량이 다르게 나타났는데, 이는 이용한 차량의 종류, 측정방법, 분석방법 등의 차이에 의해 생긴 결과로 사료된다. U.S. EPA (2006)의 자료는 9대의 디젤자동차와 12대의 가솔린 자동차를 차대동력계로 시험하여 얻은 결과이고, Lee *et al.* (2004)의 연구에서는 3대의 디젤자동차와 3대의 가솔린자동차를 차대동력계로 3단계의 정속 주행을 하면서 얻은 결과인데, 이 때 희석터널 대신 희석 챔버를 이용하였다. 또한, Watson *et al.* (1994)의 연구에서는 미국 아리조나주 피닉스에 위치한 자동차 검사시설에서 공전 및 부하모드에 대하여 차대동력계를 이용하여 얻은 결과이다.

본 연구에서 개발한 디젤자동차의 배출원 구성물

질 성분비를 나타낸 표 5에서 보듯이 국내 디젤자동차에서 배출되는 PM_{2.5}의 주요성분은 EC (54.5%) > OC (26.0%) > SO₄²⁻ (1.5%) > NO₃⁻ (0.8%) > S (0.6%) 이었으며, 탄소성분의 함량은 80% 수준으로 매우 높았다. 이와 같이 높은 탄소성분의 함량은 비교 대상인 U.S. EPA (2006), Watson *et al.* (1994), Lee *et al.* (2004)의 연구결과에서도 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 디젤자동차의 배출원 구성물질 성분비에서 EC/OC의 비율은 2.1로 국내 연구결과인 Lee *et al.* (2004)의 2.2와 잘 일치한 반면 국외 연구결과인 U.S. EPA (2006)의 4.3과 Watson *et al.* (1994)의 0.8과는 큰 차이를 보였다. 분석된 이온 성분의 합은 3.09%이며, NO₃⁻의 비율은 외국자료에 비하여 2배 이상의 높은 비율을 나타내었다. 또한, 분석된 원소 성분의 합은 1.37%이며, 중금속 중에서 Zn (0.2%)이 비교적 높게 나타난 것이 특징이다. 이와 같은 결과

Table 6. Gasoline-powered vehicle source profiles (Composite).

(unit: wt%)

Species	This study	U.S. EPA (2006) (profile 3227)	Watson <i>et al.</i> (1994)	Lee <i>et al.</i> (2004)
Na ⁺	1.715±0.171 ^a	NA ^b	0.000±0.000	1.889±0.189
Mg ²⁺	0.242±0.024	NA	NA	0.713±0.071
Al	0.311±0.262	0.000±0.177	0.412±0.205	0.000±0.000
Si	0.560±0.298	0.433±0.450	1.640±0.880	1.847±0.046
P	1.114±0.074	0.046±0.042	0.115±0.065	NA
S	1.346±0.242	0.300±0.278	1.010±0.480	4.884±0.522
Cl	0.162±0.059	0.214±0.470	0.338±0.322	NA
K	0.276±0.055	0.000±0.066	0.249±0.141	1.143±0.114
Ca	2.676±0.070	0.135±0.096	0.707±0.407	1.825±0.183
Ti	0.059±0.040	0.000±0.248	0.065±0.126	0.000±0.000
V	0.002±0.004	0.000±0.102	0.005±0.054	0.000±0.000
Cr	0.018±0.036	0.000±0.022	0.015±0.010	0.000±0.000
Mn	0.075±0.076	0.000±0.018	0.105±0.036	0.000±0.000
Fe	1.499±0.101	0.148±0.123	0.685±0.423	0.396±0.058
Ni	0.009±0.018	0.008±0.008	0.009±0.009	0.000±0.000
Cu	0.119±0.033	0.000±0.019	0.074±0.064	0.070±0.002
Zn	1.008±0.035	0.068±0.027	0.273±0.225	0.192±0.018
Br	0.004±0.055	NA	0.029±0.016	NA
Cd	0.091±0.189	0.000±0.118	0.011±0.068	NA
Pb	0.039±0.095	2.073±0.090	0.155±0.072	0.000±0.000
OC	38.32±4.93	75.64±28.98	30.10±12.30	10.97±1.071
EC	4.22±3.64	18.39±11.20	13.50±8.020	5.802±0.466
NO ₃ ⁻	3.039±0.030	1.651±2.835	3.890±2.870	2.061±0.206
SO ₄ ²⁻	3.646±0.036	2.107±3.214	2.290±1.320	20.47±2.047
NH ₄ ⁺	3.501±0.035	1.735±2.989	1.670±1.020	7.373±0.737
Cl ⁻	2.032±0.020	NA	0.640±0.655	15.30±1.530
K ⁺	0.879±0.087	0.000±0.781	NA	1.143±0.114
Sum	66.96	100.9	57.98	76.08

^aStandard error, ^bNot available

는 OC, EC, S, Cl, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Br, Zn 등을 자동차의 지표(marker) 원소로 분류하였던 기존 연구 결과와 잘 일치하는 결과를 나타내었다(Chow, 1995; Huang *et al.*, 1994). P, Br, Cd은 본 연구에서는 검출한계 이상으로 분석되었으나, 본 연구와 같은 방법으로 실시한 Lee *et al.* (2004)의 연구에서는 검출한계 이하로 분석되었다(표 5).

본 연구에서 개발한 가솔린자동차의 배출원 구성물질 성분비를 나타낸 표 6에서 보듯이 국내 가솔린 자동차에서 배출되는 미세먼지의 주요성분은 OC (38.3%)>EC (4.2%)>SO₄²⁻ (3.6%)>NH₄⁺ (3.5%)>NO₃⁻ (3.0%)이었는데, 디젤자동차와 비교하여 탄소성분의 함량(42.5%)이 낮았고, EC 성분비가 최고였던 디젤자동차와 달리 OC 성분비가 최고였다. 또한, EC의 함량(4.2%)은 다른 연구보다 낮게 측정되었다. 본 연구의 OC/EC의 비율은 약 9로 Lee *et al.*

(2004)보다 약 3배, U.S. EPA (2006)보다 약 2배, 그리고 Watson *et al.* (1994)보다 약 4배 높았다. 즉, 본 연구에서 OC의 함량이 매우 높았음을 의미하는데, 이는 시료 채취 시 필터팩 전단에 디누더를 사용하지 않았기 때문에 가스상 OC에 의한 영향이 원인 중의 하나일 것으로 추정된다. 분석된 이온 성분의 합은 15.1%이어서 디젤자동차보다 약 5배 높았다. 또한, 미세먼지의 주요 이온성분으로 알려진 SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻의 함량도 디젤자동차보다 높았고, 이 결과는 다른 연구에서도 유사한 결과를 나타내었다(표 5 및 6). 분석된 원소 성분의 합은 9.41%이어서 디젤자동차보다 약 7배 높았다. 또한, P, S, Ca, Fe, Zn의 함량은 디젤자동차의 경우 각 원소의 함량이 1% 미만이었었는데, 가솔린 자동차에서는 이들 원소들의 함량이 1% 이상을 나타내었다. 특히, Zn의 함량은 디젤자동차보다 5배 높았다(표 5 및 6).

Table 7. Comparison of source contributions to PM_{2.5} mass obtained from CMB model using old and new source profiles. (unit: µg/m³)

Sources	08/06/2001		08/16/2001	
	Old profile ³⁾	New profile	Old profile	New profile
Soil dust	0.00±0.00 ¹⁾	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Road dust	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Gasoline vehicles	17.27±2.10	2.77±0.54	16.39±1.91	4.64±0.78
Diesel vehicles	10.39±1.82	18.07±1.97	6.88±1.29	17.45±2.06
Municipal incinerator	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Point sources	0.00±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Residential boiler	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Agricultural burning	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Marine aerosol	0.61±0.07	0.28±0.05	0.61±0.07	0.20±0.06
Coal power plant	0.00±0.01	0.00±0.00	0.00±0.01	1.24±0.20
Chinese aerosol	0.00±0.00	1.15±0.77	0.02±0.12	2.91±1.00
NH ₄ NO ₃	5.31±0.67	5.62±0.64	1.15±0.23	1.39±0.20
(NH ₄) ₂ SO ₄	5.93±0.74	5.78±0.67	2.04±0.39	1.01±0.24
PMs ²⁾ R square	0.85	0.83	0.86	0.88
Chi square	6.65	11.63	4.87	10.76
DF	13	12	14	12
% mass	98.0	83.6	98.5	104.9

Sources	08/20/2001		08/28/2001	
	Old profile	New profile	Old profile	New profile
Soil dust	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Road dust	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Gasoline vehicles	16.44±2.51	9.65±0.86	14.01±1.63	5.59±0.78
Diesel vehicles	5.29±1.21	11.97±1.66	5.19±1.03	11.19±1.45
Municipal incinerator	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Point sources	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Residential boiler	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Agricultural burning	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Marine aerosol	0.85±0.10	0.15±0.07	0.53±0.07	0.19±0.06
Coal power plant	0.00±0.00	0.87±0.22	0.00±0.01	1.70±0.18
Chinese aerosol	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
NH ₄ NO ₃	0.31±0.18	0.61±0.12	1.25±0.23	1.83±0.22
(NH ₄) ₂ SO ₄	3.13±0.42	1.93±0.41	0.42±0.27	0.73±0.16
PMs ²⁾ R square	0.88	0.89	0.86	0.92
Chi square	5.12	8.41	5.33	7.70
DF	11	12	10	10
% mass	109.3	105.8	112	111.1

¹⁾SCE (Source Contribution Estimate) ± Standard Error (µg/m³)

²⁾PMs (Performance Measures): R square (>0.8), Chi square (>4.0), DF (>5), % mass (100% ± 20%).

³⁾Lee *et al.* (2004)

3.2 배출원 구성물질 성분비의 CMB 모델 적용

본 연구에서 개발한 가솔린 및 디젤자동차 배출원의 구성물질 성분비를 기존에 국내에서 개발된 배출원 구성성분비와 비교·분석하여 CMB 모델에의 적용가능성을 평가하였다.

비교 평가를 위하여 본 연구진이 2001년도 서울시

에 대하여 수행한 연구자료(Lee *et al.*, 2003) 중 자동차 배출원 기여도가 가장 높았던 여름철 기간 중 4일 동안의 CMB 모델을 이용한 배출원 기여도를 본 연구과제에서 새롭게 구축된 자동차 배출원 구성물질 성분비와 기존 구성성분비(Lee *et al.*, 2004)를 이용하여 얻은 결과를 비교 평가하여 표 7에 정리하여 나타냈다. 2001년 8월 6일, 16일, 20일, 28일의 PM_{2.5}

Table 8. MPIN (Modified Pseudo-Inverse Normalized) matrix result of 08/28/2001.

Species	Gasol. V.	Diesel V.	Marine	Coal PP	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄
NO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
SO ₄ ²⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Na	0.01	-0.01	1.00	-0.10	0.00	-0.02
Mg	-0.30	0.09	0.49	0.73	0.02	-0.05
Al	-0.37	0.12	0.13	1.00	0.03	-0.06
Cl	0.12	-0.03	0.75	-0.21	-0.01	-0.02
Ca	0.57	-0.16	-0.28	-0.35	-0.04	-0.02
V	-0.30	0.09	0.10	0.83	0.02	-0.05
Cr	0.06	-0.02	-0.03	0.01	0.00	-0.01
Mn	0.18	-0.06	-0.09	-0.12	-0.01	-0.01
Fe	0.37	-0.13	-0.30	0.99	-0.03	-0.12
Ni	0.02	0.05	-0.02	0.02	0.00	-0.01
Zn	1.00	-0.07	-0.54	-0.80	-0.09	-0.06
Pb	0.07	-0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0.00
EC	-0.62	1.00	0.22	0.45	0.00	-0.11
OC	0.28	0.42	-0.20	-0.27	-0.05	-0.08

농도는 40.25, 27.52, 23.77, 19.06 µg/m³이었다.

표 7에서 두 모델의 사용자 메뉴얼에서 지정하고 있는 지표 값인 R square (0.8 이상), Chi square (4.0 이상), DF (degree freedom, 5 이상) 및 % mass (80~120% 범위 이내)를 만족하고 있기 때문에 모델결과에 대한 신뢰도는 유의하다고 할 수 있다.

본 연구에서 개발한 자동차 배출원 구성물질 성분비(new profile)를 평가하기 위하여 조사된 4일 중 하루인 2001년 8월 28일에 모델 값에 대한 MPIN(modified pseudo-inverse normalized) 매트릭스를 표 8에 나타냈다. MPIN 매트릭스는 평가된 특정일에 각 배출원별로 가장 중요하게 인식되고 큰 영향을 미친 지표성분을 표시한다. 표 7에 나타냈듯이, 2001년 8월 28일의 주요 PM_{2.5} 배출원들은 가솔린 및 디젤자동차, 해염입자, 석탄화력 발전소 및 이차입자(NH₄NO₃와 [NH₄]₂SO₄)이었다. 표 7에서 보듯이 이날 배출원별 주요 지표성분이 가솔린자동차의 경우 Zn, 디젤 자동차의 경우 EC, 해염입자의 경우 Na, 석탄화력 발전소의 경우 Al, NH₄NO₃의 경우 NO₃⁻, (NH₄)₂SO₄는 SO₄²⁻이었으므로, CMB 모델에서 각 배출원별 가장 특징적인 지표성분이 잘 인식되었음을 확인할 수 있으며, 따라서 표 6의 기여도가 유의성 있는 모델 결과인 것으로 판단된다(표 8).

서울시에서 2001년부터 2002년까지 수행된 CMB 수용모델을 이용한 미세먼지 배출원 기여도 결과에 의하면, 미세먼지 배출원 중 여름철에 가장 높은 기

여도를 나타낸 배출원은 자동차 배출원으로 평가되었다(Lee *et al.*, 2003). 또한, 차종별로는 예상외로 가솔린자동차가 디젤자동차와 더불어 중요한 배출원인 것으로 평가되었다(Lee *et al.*, 2003). 표 7에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 개발한 자동차 배출원 구성물질 성분비를 이용한 CMB 배출원 기여도에서도 기존 연구결과와 동일하게 여름철 높은 자동차 배출원의 기여도를 나타내고 있다. 그러나 기존 배출원 구성물질 성분비를 이용한 경우 디젤자동차보다 가솔린자동차의 기여도가 1.7~3.1배로 높아 설명이 어려운 반면, 본 연구에서 개발된 배출원 구성물질 성분비를 이용한 경우 가솔린자동차의 기여도가 감소하면서 이 감소된 부분이 대부분 디젤자동차의 기여도에 추가되어 디젤자동차의 기여도가 가솔린자동차에 비해 1.2~6.5배로 높아진 것이 특이할 만한 점이다. 또한, 기존 배출원 구성물질 성분비를 사용한 경우 4일 모두 기여도가 0~0.02 µg/m³이었던 석탄화력 발전소 및 중국 에어로졸의 기여도가 1~3 µg/m³까지 증가하기도 하였다. 이는 기존 자동차 배출원 구성비 중 가솔린자동차 배출원 구성물질 성분비의 부정확도에 기인한 것으로 생각되어서 본 연구에서 개발된 자동차 배출원 구성물질 성분비를 수용모델에 적용하는 경우 보다 정확하게 디젤과 가솔린자동차의 기여도를 구분할 수 있고, 배출원의 종류를 더 많이 파악할 수 있게 되어, CMB 수용모델을 이용하여 국내 대기의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 대한 자동차의 기여도를

연구하는데 신뢰도를 높일 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 차대동력계가 연결된 배출가스 시험 시스템에서 디젤 및 가솔린자동차 각각 9대에서 배출되는 미세먼지($PM_{2.5}$)를 각각 3회씩 채취하여 이온, 미량원소, 원소탄소 및 유기탄소 성분의 농도를 분석하고, 국내 실정에 맞는 디젤 및 가솔린자동차의 배출원 구성물질 성분비를 개발하였으며, CMB 수용 모델에의 적용가능성을 평가하기 위해 2001년 여름철 4일의 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 배출원별 기여도를 추정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 디젤자동차의 주요성분은 EC (54.5%) > OC (26.0%) > SO_4^{2-} (1.5%) > NO_3^- (0.8%) > S (0.6%)으로 나타나서 탄소성분의 함량(80%)이 매우 높았으며, EC/OC 의 비율은 약 2로 나타났다. 중금속 중에서 Zn 이 비교적 높게 나타난 것이 특징이다.

2) 가솔린자동차의 주요성분은 OC (38.3%) > EC (4.2%) > SO_4^{2-} (3.6%) > NH_4^+ (3.5%) > NO_3^- (3.0%)으로 나타나서 디젤자동차와 비교하여 탄소성분의 함량(42.5%)이 낮았고, EC/OC 의 비율은 약 0.1로 OC 가 많은 양을 차지하였다. SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 의 함량은 디젤자동차보다 높았다. P , S , Ca , Fe , Zn 의 함량은 디젤자동차에서는 각 원소의 함량이 1% 미만 이었는데, 가솔린자동차에서는 이들 원소들의 함량이 1% 이상을 나타내었다. 특히, Zn 의 함량은 디젤자동차보다 5배 높았다.

3) 기존 자동차 배출원 구성물질 성분비를 이용한 경우와 달리 본 연구에서 개발된 결과를 이용한 경우 CMB 모델에 의해 추정된 디젤자동차의 배출원 기여도가 가솔린자동차보다 높고, 중국 에어로졸과 같은 추가적인 배출원의 기여도가 파악되므로, 본 연구를 통해 새롭게 구축된 자동차 배출원 구성물질 성분비가 국내 자동차의 실제 배출 특성을 더 잘 반영하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해

자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 본 연구를 수행하는 데 도움을 준 서원대학교의 김명환에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Brunekreef, B., N.A. Janssen, J. de Hartog, H. Harssema, M. Knape, and P. van Vliet (1997) Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways, *Epidemiology*, 8, 298-303.
- Burnett, R.T., R.E. Dales, D. Krewski, R. Vincent, T. Dann, and J.R. Brook (1995) Associations between ambient particulate sulfate and admissions to Ontario hospitals for cardiac and respiratory diseases, *Am. J. of Epidemiology*, 142, 15-22.
- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 45, 320-382.
- Chow, J.C., J.G. Watson, L.L. Ashbaugh, and K.L. Magliano (2003) Similarities and differences in PM_{10} chemical source profiles for geological dust from the San Joaquin Valley, California, *Atmos. Environ.*, 37, 1317-1340.
- Conner, W.D., R.L. Bennett, W.S. Weathers, and W.E. Wilson (1991) Particulate characteristics and visual effects of the atmosphere at Research Triangle Park, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 41(2), 154-160.
- Dockery, D.W., C.A. Pope III, X. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, and M.E. Fay (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *N. Engl. J. Med.*, 329, 1753-1759.
- Garshick, E., F. Laden, J.E. Hart, and A. Caron (2003) Residence near a major road and respiratory symptoms in US veterans, *Epidemiology*, 14, 728-736.
- Huang, X., I. Olmez, N.K. Aras, and G.E. Gorden (1994) Emissions of trace elements from motor vehicles: potential marker elements and source composition profile, *Atmos. Environ.*, 28(8), 1385-1391.
- Jerrett, M., R.T. Burnett, R. Ma, C.A. Pope III, D. Krewski, K.B. Newbold, G. Thurston, Y. Shi, N. Finkelstein, E.E. Calle, and M.J. Thun (2005) Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles, *Epidemiology*, 16, 727-736.
- Kang, B.-W., H.S. Lee, and H.-K. Kim (2000) Source identification of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chongju using a

- chemical mass balance model, *J. KOSAE*, 16(5), 477-485. (in Korean with English abstract)
- Kang, C.-M., B.-W. Kang, Y. Sunwoo, and H.S. Lee (2008) Application of representative PM_{2.5} source profiles for the chemical mass balance study in Seoul, *J. KOSAE*, 24(E1), 32-43.
- Kim, K.-S., I.J. Hwang, and D.-S. Kim (2001) Development of a receptor methodology for quantitative assessment of ambient PM-10 sources in Suwon area, *J. KOSAE*, 17(2), 119-131. (in Korean with English abstract)
- Lee, H., S.S. Park, K.W. Kim, and Y.J. Kim (2008) Source identification of PM_{2.5} particles measured in Gwangju, Korea, *Atmos. Res.*, 88, 199-211.
- 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, 3143-3152.
- Lee, H.S., C.-M. Kang, B.-W. Kang, and S.-K. Lee (2004) A study on the development of source profiles for fine particles (PM_{2.5}), *J. KOSAE*, 20(3), 317-330. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S., S.-K. Lee, B.-W. Kang, and C.-M. Kang (2003) Final report of the Korea Science & Engineering Foundation (R01-2000-000-00340-0) 2000. (in Korean with English abstract)
- Lowenthal, D.H., J.C. Chow, J.G. Watson, G.R. Neuroth, R.B. Robbins, B.P. Shafritz, and R.J. Countess (1992) The effects of colinearity on the ability to determine aerosol contributions from diesel and gasoline powered vehicles using the chemical mass balance model, *Atmospheric Environment*, 26A, 2341-2351.
- Na, K., A.A. Sawant, C. Song, and D.R. Cocker III (2004) Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California, *Atmos. Environ.*, 38, 1345-1355.
- 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. AWMA*, 51(3), 393-405.
- Pope III, C.A., R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, and G.D. Thurson (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution, *J. of the American Medical Association*, 287, 1132-1141.
- Seinfeld, J.H. (1986) *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*, Wiley Interscience, New York, NY.
- Somers, C.M., B.E. McCarry, F. Malek, and J.S. Quinn (2004) Reduction of particulate air pollution lowers the risk of heritable mutations in mice, *Science*, 304, 1008-1010.
- Sun, Q., A. Wang, X. Jin, A. Nataonzon, D. Duquaine, R.D. Brook, J.S. Aguinaldo, Z. Fayad, V. Fuster, M. Lippman, L.C. Chen, and S. Rajagopalan (2005) Long-term air pollution exposure and acceleration of atherosclerosis and vascular inflammation in an animal model, *J. of the American Medical Association*, 294, 3003-3010.
- Urch, B., J.R. Brook, D. Wasserstein, R.D. Brook, S. Rajagopalan, P. Corey, and F. Silverman (2004) Relative contributions of PM_{2.5} chemical constituents to acute arterial vasoconstriction in humans, *Inhalation Toxicology*, 16(6-7), 345-352.
- U.S. EPA (2006) *SPECIATE 4.0 Speciation database development documentation*.
- Watson, J.G., J.C. Chow, D.H. Lowenthal, L.C. Pritchett, and C.A. Frazier (1994) Differences in the carbon composition of source profiles for diesel- and gasoline-powered vehicles, *Atmos. Environ.*, 28(15), 2493-2505.