

중형트럭에서 발생하는 배출가스 중 미량유해물질 발생 특성 연구

임윤성[†] · 문선희 · 이종태 · 동종인^{*}

A Study on the MSATs (Mobile source Air Toxics) Contribution from MDTs (Medium-duty Trucks) Exhaust Emission

Yun Sung Lim, Sun Hee Mun, Jong Tae Lee and Jong In Dong

Key Words: Mobile source air toxic(미량유해물질), Midium-duty trucks(중형트럭), Particle number(입자개수), Volatile organic carbons(휘발성유기화합물), Polycyclic aromatic hydrocarbons(다고리방향족화합물)

Abstract

In Korea, Medium-duty trucks are classified into GVW (Gross Vehicle Weight) 3.5~10tons. MDTs are mostly used for logistics or delivery between regions. There have been studied on diesel fuel vehicles for SUVs(Sports Utility Vehicle) or light-duty trucks. But MDTs have been not studied. Therefore, this study have been used MDTs for characteristic exhaust emission. Test was carried out using the certification test mode (NEDC, New European Driving cycle) and the NIER mode in chassis dynamometer of the MDTs. And emission gas was analyzed for PN (Particulate Number), PN size distribution and aldehydes, VOCs (Volatile Organic Compounds), PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons). This paper concluded that EURO-IV trucks produced more MSATs than EURO V trucks. Depending on the engine temperature, more MSATs were generated in cold temperature than in the hot start operation. However, the driving speed, the opposite results was obtained.

기호설명

MSATs: Mobile Source Air Toxics
MDTs : Medium-duty Trucks
PN : Particle Number
VOCs : Volatile Organic Carbons
PAHs : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

1. 서 론

서울특별시 대기환경정보(<http://cleanair.seoul.go.kr>)에 따르면 2017년 미세먼지 경보발령횟수는 6회, 일수는 10일로 최대농도는 $423 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 최대농도를 기록한 날의 미세먼지(PM-10) 발생농도는 미세먼지 ‘매우나쁨’ 기준($151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)의 2.8배에 해당하는 수치이다. 서울 같은 대도시의 미세먼지의 주요발생원은 비산먼지, 난방발전, 자동차 등의 영향으로 조사되고 있어, 특히 노후경유차 등 자동차에서 발생한 미세먼지인 입자상물질의 모니터링이 중요한 시점이다.

WHO 산하 국제암연구센터(IARC)에서는 2012년 6월에 경유자동차의 배출가스 영향 발암물질 등급을 2급에서 1급으로 상향조정을 하였다. 이는 자동차 배출가스 중 유해물질이 포함되어 있으며 또한 배출가스에 대한 관리 및 평가가 지속적으로 진행되어야 한다는 경각심을 불러일으킬 수 있는 중요한 발표였다.

(Received: 17 Feb 2019, Received in revised form: 20 Mar 2019, Accepted: 21 Mar 2019)

^{*}국립환경과학원, 서울시립대학교 일반대학원 환경공학과
[†]책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소
서울시립대학교 일반대학원 환경공학과
E-mail : yun911@korea.kr
TEL : (032)560-7648 FAX : (032)560-7980

자동차의 배출가스 중 유해물질(Mobile Source Air Toxic)은 휘발성유기화합물(VOCs), 알데히드(Aldehyde), 다고리방향족화합물(PAHs) 등으로 구분하고 있다. 이 물질들은 배출가스 내 미량으로 존재하고 있지만, 물질이 갖는 위해성이 다른 물질보다 높은 것으로 조사되고 있으며 Myung C-L *et al.* (2012) 연구에 따르면 벤젠(Benzene), 포름알데히드(Formaldehyde), 벤조피렌(Benzo(a)pyrene) 등은 대표적인 유해물질이라고 할 수 있다.

그동안 경유자동차에 대한 배출가스 중 미량유해물질 조사 및 연구는 RV와 1톤트럭 등 소형자동차(Light-duty Vehicles)를 위주로 진행되었다(Sunhee Mun *et al.* (2018)). 이번 연구에서는 그동안 잘 연구되어지지 않은 3.5톤~4.5톤의 중형트럭(MDTs)을 대상으로 진행 하였다. 중형트럭은 대부분 지역간의 배송, 운반 등에 활용이 되며, 활용측면에 있어서도 중장거리용으로 이용되어 있어서 운행거리와 운전시간이 일반 소형차량보다는 높은 것으로 조사되고 있다. 따라서 이번 연구에서는 중형트럭을 대상으로 입자상물질의 크기별 발생특성과 유해물질의 발생정도에 대해 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 중형트럭에서 배출되는 미량유해물질을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 적용하여 측정하였다. 차대동력계는 자동차가 실제 도로를 주행할 때 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 대

Table 1 Specifications of chassis dynamometer

Items	Specifications
Model	AVL chassis dynamometer 48" compact
Maximum speed	200 km/h
Maximum force	10096 N
Maximum calibration force	8000 N
Measured based interia	1610 kg
Minimum specified interia	454 kg
Maximum specified interia	5443 kg
Rollerdiameter	1219.2 mm
Encorder pulses	10,000

표화한 실측 주행모드를 사용하여 모사 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 걸어주는 장치, 관성중량, 동력흡수계, 제어기로 구성되어 있다. Table 1은 이번 시험에서 이용된 차대동력계의 제원을 나타내었다. 측정 장치 구성은 차대동력계, 보조운전장치, 시료채취장치, 희석터널, 입자상물질 측정장치 및 배출가스 분석 등으로 구성되어 있다. 또한 미량유해물질의 시료채취를 위해 VOCs는 차대동력계의 분석이 끝난 이후 시료처리 및 백(bag)청소를 하는 단계 전에서 차대동력계와 연결된 프로그램을 정지한 후 3L의 테들러백(Teddlar Bag)을 이용하여 옮겨 담은 후, 암냉장소에 보관 하여 백 내에서의 흡착, 변환 등을 최소화 하였다. PAHs는 PM의 무게 측정 후 여지를 향온항습실에 보관 후 입자상 물질 중 PAHs 물질만 추출하여 분석 하였다.

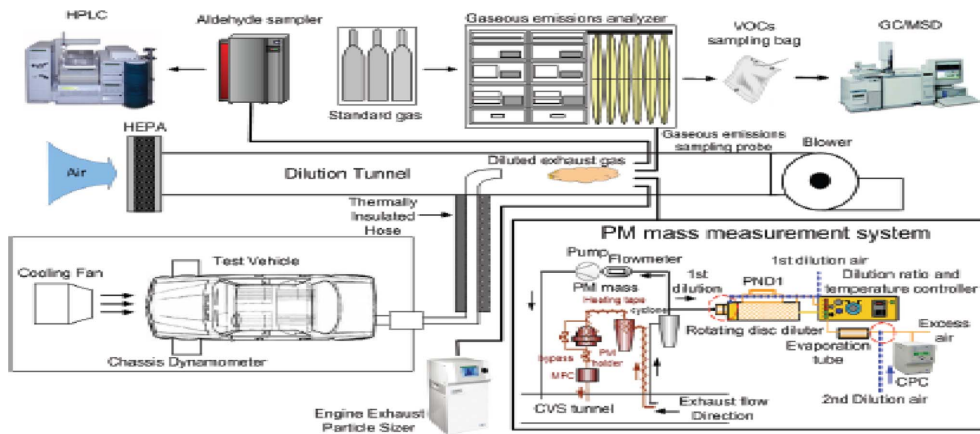


Fig. 1 Schematic Diagram of Vehicle Test System

2.2 실험방법

2.2.1 시험차량

국내의 중대형차량(버스, 화물 등)의 등록대수는 총 등록 차량 대수를 기준으로 비율이 5.8%이지만 연간 주행거리, 평균배출량 등을 고려할 때 중대형차량에서 배출되는 PM10은 국내 수송부문에서 발생하는 총량의 약 58%를 차지하는 것으로 보고되고 있다. 이번 논문에서는 촉매 및 기타부품이 안정화 되는 시점인 3,000 km 이상 주행한 차량을 선정 하였으며, 차량은 EURO-IV, EURO-V의 기준을 만족하는 차량을 선정하였다. 차량의 성능 유지를 위해 엔진오일 교환과 주행거리를 유사하게 일치 시켰으며, 차량에 대한 정보는 Table 2에 나타냈다.

2.2.2 배출가스 시험모드

자동차의 배출가스 인증 시험모드를 통해 인증조건에서 발생하는 오염물질의 양을 측정하였으며, 국립환경과학원에서 개발한 차속모드인 NIER 모드를 이용하여 차속에 따른 배출가스의 특성을 조사 분석 하였다. 또한 냉간시동(cold start)과 열간시동(hot start)의 특성을 확인 하기 위하여 NIER모드 중 중간 속도인 NIER-7모드를 이용하여 냉·열간에 따른 배출가스 특성을 비교 평가 하였다. 시험관련된 사항은 Table 3에서 나타냈다.

2.2.3 미량유해물질 분석방법

1) VOCs

배출가스 중 VOCs는 SKC사의 3L 테들러백을 이용

Table 2 Medium Duty Truck Specification

Model	A	B
Engine Type	CRDI	CRDI
Displacement (cc)	3,933	5,899
Max Power (PS/rpm)	160/2,500	250/2,500
Max Torque (kgf · m/rpm)	60	95
Fuel Efficiency (km/L)	10.1	8.0
Emission Standard	EURO IV	EURO V
After-Treatment	DOC+DPF	DOC+DPF

Table 3 WHVC, NEDC, NIER-7mode Test Cycle

Cycle	Total Driving Distance	Time	Average Speed	Max Speed
WHVC	20 km	1799s	33.4 km/h	88 km/h
NEDC	11 km	1180s	40.2 km/h	120 km/h
NIER-7	5.91 km	891s	23.5 km/h	65 km/h

하여 차대동력계에서 분취하였다. 채취된 시료는 6개의 시료주입구가 있는 Air-Server(Markers Corp.)를 이용하여 열탈착시스템 장치를 사용, 저온농축 후, 전처리과정 후에 GC/MSD로 분석하였다. 전처리과정은 Purge & Trap을 거치면서 Naflon Dryer를 통해 수분과 이산화탄소를 제거하고, Cold trap을 이용하여 -15°C상태에서 VOCs 성분을 저온농축 흡착시키고, 농축된 시료를 300°C로 가열 탈착하여 GC/MSD로 분석하는 과정이다. 전처리 및 GC/MSD의 실험조건은 Table 4에서 나타냈다.

2) PAHs

이번 연구에서 PAHs는 배출가스 PM 중 포함되어 있는 PAHs의 농도를 분석하였다. 배출가스 시험이 종료되고 PM의 무게를 측정 한 후 항온항습이 되는 챔버내에 PM 여지를 보관한 후 용매가속추출기를 이용하여 PAHs를 추출하여 GC/MSD로 분석하였다. PAHs의 표준물질

Table 4 Analytical conditions of TD and GC/MSD

Method	EPA TO-14A				
Instrument	Analysis conditions				
TD	Purge	Prepurge Time (ml/min)	3		
		Trap Prepurge Time (ml/min)	0.2		
	Sample Flow	Sample Flow Rate (ml/min)	20		
	Trap Desorb	Trap Low Temp (°C)	-15		
		Trap High Temp (°C)	300		
		Trap Hold Time (min)	5		
	Split Flow (ml/min)	10			
GC/MSD	Model	Varian CP-3800 / Saturn 2200			
	Column	DB-1 (60 m × 0.32 mm × 5.00 μm)			
	Column Temp	Temp (°C)	Rate (°C/min)	Hold (min)	Total (min)
		35	0.0	8	8
		180	4.0	12	56.25
		220	8.0	6	67.25
	Column Flow	1.0 ml/min			
Split Ratio	5:1				
MS scan range	45 ~ 350 amu				

Table 5 Analytical conditions of GC/MSD

Method	EPA TO-13A				
Instrument	Analysis conditions				
GC/MSD	Column	HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)			
	Column Temp	Rate (°C/min)	Value (°C)	Hold time	Run time
		Initial	50	1	1
		8	180	0	17.25
		5	240	0	29.25
		10	320	5	42.25
	Column Flow	2.5 ml/min			
	Inlet Heater	280°C			
Split Ratio	10:1				
Injection Volume	1 μl				

은 Supelco Corp.에서 제조한 16종의 물질이 혼합된 표준물질을 사용하였으며, 내부표준물질을 표준물질에 혼합하여 확인하는 과정을 통해 분석 정확도를 향상 시켰다. GC/MSD의 조건은 Table 5에서 나타났다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 EURO-IV, EURO-V에 따른 PN의 배출특성

배출가스 기준이 상이한 두차량(A, B)을 사용하여 PN의 배출특성을 살펴보았다. 차량의 배출특성을 확인하기 위해 사용한 주행시험방법은 NIER모드와 NEDC 모드를 이용하였다. NIER시험법은 차속에 따른 특성을,

NEDC는 인증시험모드의 특성을 가지고 있어 두 개의 시험방법을 사용하였다. 입자상물질의 개수 시험결과 저속구간(NIER-1)과 냉간시동 조건에서 발생량이 많은 것으로 조사되었다. 차량간의 비교에서도 EURO-IV인 A차량이 EURO-V인 B차량보다 높게 발생하는 것으로 조사되었다. 이는 저속과 고속, 냉간과 열간시동 시에 후처리장치인 DPF의 활성 조건에 따른 결과와 차량의 특성은 규제 기준이 다른 차이에 의해 발생된 결과로 사료되며, 고속과 열간시동의 경우 DPF의 활성이 원활하게 진행되어 차량에서 발생하는 입자상물질을 제거한 배출가스 결과로 볼 수 있다.

NEDC모드를 이용하여 A, B차량의 EEPS를 이용한 입경별 입자개수의 특성 조사 결과 EURO-IV인 A차량은 14 < Dp < 39 nm와 Dp > 93 nm에서 발생분포가 높았으며, EURO-V인 B차량의 경우 Dp < 10 nm에서의 발생분포가 높은 것으로 나타났다. EURO-V의 배출가스 기준 중 PM의 농도가 0.025 g/km에서 0.005 g/km로 강화되었기에 이를 만족하기 위한 DPF의 기술 향상에 따른 결과로 사료된다. 이 결과는 Fig. 2에서 나타났다.

다만, 고속모드인 NIER-14에서는 B차량의 발생량이 A차량보다 높았다. 이 내용의 원인규명에 있어서는 EGR 순환비율 조사 등 보다 정밀한 해석이 필요한 것으로 생각된다. A, B차량의 PN농도 수준은 Fig. 3에서 나타내었다.

3.2 VOCs 배출특성 결과

VOCs는 배출가스 중 THC농도와 비례하여 나타나기 때문에 NEDC와 WHVC를 사용하였다. 이 시험모드를 사용한 이유는 차량의 운전패턴인 가속, 정속, 감속의 특성이 모드에 포함되어 있으며, 차량 주행을 대표하는 인증시험모드이기 때문에 이 모드를 사용하였다. A, B차량에서의 THC 발생 비율을 조사한 결과를 Fig. 4에

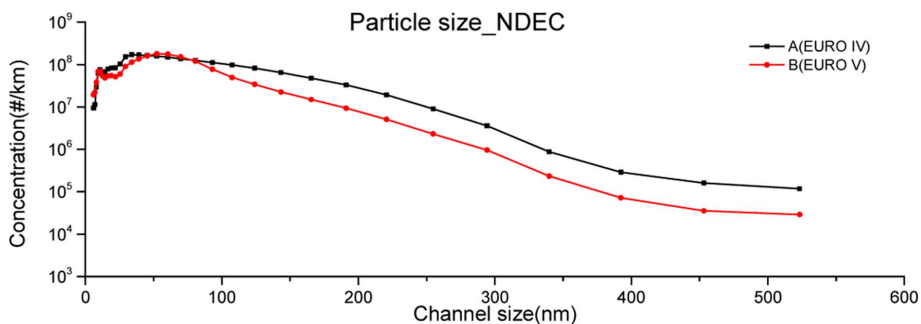


Fig. 2 Distribution of Particle size and PN by NEDC

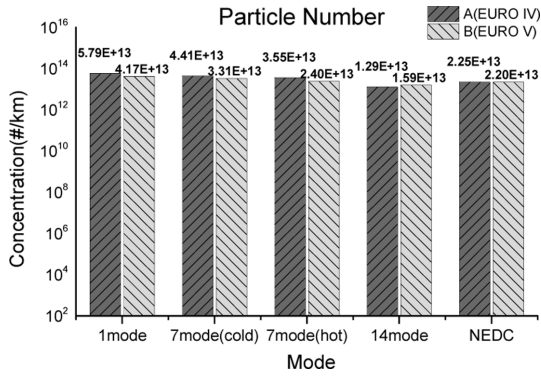


Fig. 3 Results of Particle Number by NEDC and NIER Mode

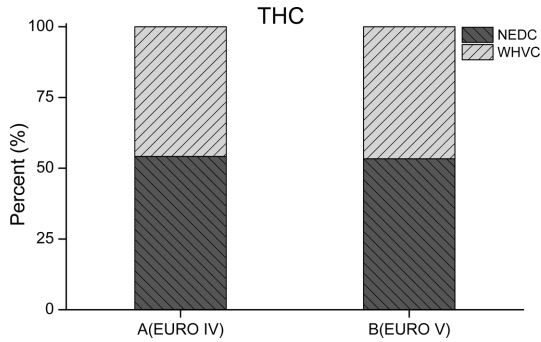


Fig. 4 Results of THC Emission Ratio

나타냈다. 모드에 따라 A차량이 B차량보다 약 7~30% THC의 발생이 높았다. B차량이 A차량 보다 배출가스 규제기준이 강화된 차량으로 그결과 THC의 농도의 차이가 나타난 것으로 사료된다.

VOCs 결과를 주요물질인 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)를 중심으로 조사하였다. 톨루엔 > 자일렌 > 벤젠 ≥ 에틸벤젠 순으로 발생비율이 높았으며 모드별 발생비율은 NEDC > WHVC 보다 높게 나타났다. A차량 B차량의 결과를 Fig. 5에서 나타냈다.

3.3 입자상물질 중 PAHs의 배출특성 결과

NEDC 모드를 이용하여 PAHs를 분석한 결과 A, B차량에서 발생하는 PAHs의 발생비율이 유사한 결과를 나타냈다. 우선 PAHs의 물질을 방향족의 결합 숫자와 비교한 경우 대부분의 차량에서 2-3 aromatic ring의 구조의 물질 배출이 70~80%로 발생비율이 가장 높았다.

EPA에서 규정하고 있는 물질 중 2 aromatic ring의 발생 비율이 높은 물질은 Naphthalene이었고 3 aromatic ring은 Phenanthrene 이었다. 1급 발암물질로 알려진 Benzo(a)pyrene은 5 aromatic ring에 속하며 발생비율은

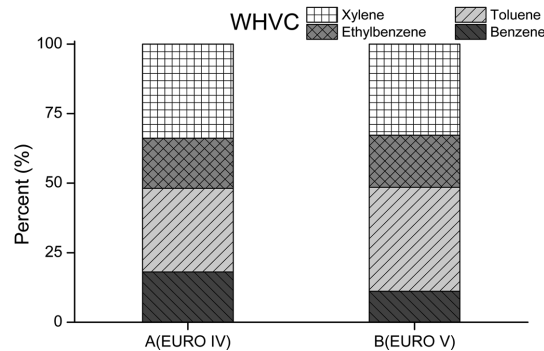
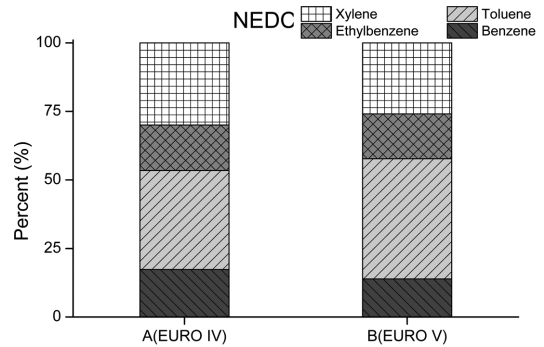


Fig. 5 Results of BTEX Ratio by NEDC and WHVC

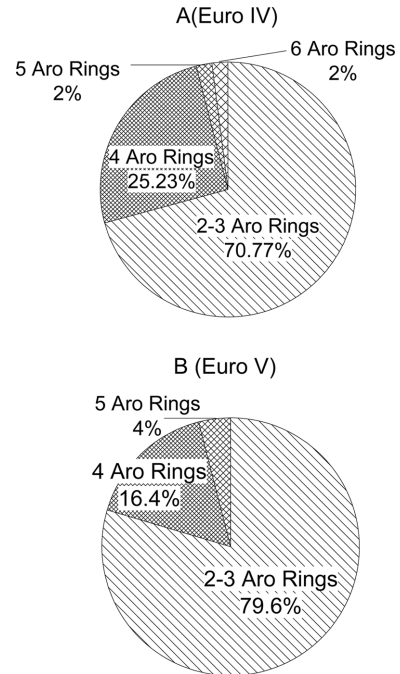


Fig. 6. Result of PAHs Aromatic Rings Ratio

1%미만으로 나타났다. A, B에서 발생한 PAHs 결과를 Fig. 6에서 나타냈다.

PAHs의 발생은 특히 발생된 PM의 양과 직접적으로 관계가 있으며, A차량의 경우 발생된 PM, PN이 B차량보다 많은 것으로 Fig. 2에서 나타났다. 또한 PAHs의 발생비율은 2-3aromatic rings의 발생부분이 약 70~80%로 나타나며, 4aromatic rings는 약 16~25% 발생되는 것으로 나타났다.

사용된 시험용 경유의 다고리방향족(poly aromatic hydrocarbon) 함유량 분석결과 총 PAH는 21%(wt) 였으며 이중 4 aromatic rings 이상의 함유는 1%(wt) 이기 때문에 연료에서 기인하여 발생된 PM의 PAHs 구성의 2-3 aromatic rings이 대부분을 차지하는 것은 타당한 이유로 사료된다.

4. 결 론

이번 연구에서는 경유트럭의 미량유해물질 특성을 조사하였으며, 특히 입자상물질의 개수별 발생 분포와 PAHs의 발생특성을 나타냈다. 연구결과에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 2015년 자동차 배출계수자료에 따르면 중대형차의 등록대수는 전체 중 약 5.8%를 차지하지만, PM10의 발생비율은 전체 발생량의 약 59%를 차지한다. 이는 주행거리와 운행시간이 길기 때문에 발생하는 것이다.

2. 입자상물질의 개수는 $D_p < 100$ nm 발생이 약 70%로 조사되었으며, 문헌에 따르면 10 nm는 ultrafine particle에 해당되며 폐포속 침착으로 DNA손상 등을 유발하는 것으로 조사되고 있다.

3. 배출가스 중 VOCs 발생 특성 분석 결과 톨루엔 > 자일렌 > 벤젠 ≥ 에틸벤젠 순으로 발생분포를 나타냈다. VOCs는 불완전연소와 연소온도에 따른 발생의 영향이 큰 것으로 조사되었다.

4. PAHs는 aromatic ring에 따른 발생비율 결과 2-3 ring의 발생비율이 70~80%로 발생비율이 가장 높았으며, 고위험군 물질인 benzo(a)pyrene의 발생비율은 1% 미만으로 나타났다. 또한 연료의 방향족화합물의 구성과 발생된 PAHs의 비율은 대부분 2-3 ring 구조로 되어 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(2013-NIER-1946-303-03).

참고문헌

- (1) Seoul Air quality information (<http://cleanair.seoul.go.kr>).
- (2) W. Kam, J. W. Liacos, J. J. Schauer, R. J. Delfino, C. Sioutas "Size-segregated composition of particulate matter(PM) in major roadways and streets", Atmospheric Environment, Vol. 55, 2012, pp. 90~97.
- (3) Dongyoung Jin, Kwanhee Choi, Cha-Lee Myung, Yunsung Lim, Jongtae Lee, Simsoo Park "The impact of various ethanol-gasoline blends on particulates and unregulated gaseous emissions characteristics from a spark ignition direct injection (SIDI) passenger vehicle", Fuel, Vol. 209, 2017, pp. 702~712.
- (4) Myung C-L, Choi K-C, Kim J-W, Lim Y-S, Lee J-T, Park S-S, "Comparative study of regulated and unregulated toxic emissions characteristics from a spark ignition light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase LPG", Energy, Vol. 44, No. 1, 2012, pp. 189~196.
- (5) Winnie Kam, James W. Liacos, James J. Schauer, Ralph J. Delfino, Constantinos Sioutas "On-road emission factors of PM pollutants for light-duty vehicles (LDVs) based on urban street driving conditions", Atmospheric Environment, Vol. 61, 2012, pp. 378~386.
- (6) Peter F. Nelson, Anne R. Tibbett, Stuart J. Day "Effects of vehicle type and fuel quality on real world toxic emissions from diesel vehicles", Atmospheric Environment, Vol. 42, 2008, pp. 5291~5303.
- (7) Zhi Ning, Andrea Polidori, James J. Schauer, Constantinos Sioutas "Emission factors of PM species based on freeway measurements and comparison with tunnel and dynamometer studies", Atmospheric Environment, Vol. 42, 2008, pp. 3099~3114.
- (8) Leanidas Ntziachristos, Zhi Ning, Michael D. Geller, Rebecca J. Sheeley, James J. Schauer, Constantinos Sioutas "Fine ultrafine and nanoparticle trace element compositions near a major freeway with a high heavy-duty diesel fraction" Atmospheric Environment, Vol. 41, 2007, pp. 5684~5696.