

Euro 5 경유 대형트럭의 유해대기오염물질 배출특성

홍희경* · 문선희* · 서석준* · 김정화* · 정성운* · 정택호* · 홍유덕* · 성기재** · 김선문†

Emission Characteristics of Hazardous Air Pollutants from Diesel Heavy duty Trucks for Euro 5

Heekyoung Hong, Sunhee Mun, Seokjun Seo, Jounghwa Kim, Sungwoon Jung,
Taekho Chung, Youdeog Hong, Kijae Sung and Sunmoon Kim

Key Words: Diesel heavy duty truck(경유대형트럭), HAPs(유해대기오염물질), VOCs(휘발성유기화합물), DPF(디젤 매연여과장치), SCR(선택적환원촉매)

Abstract

Emission characteristics of regulated pollutants (CO, NO_x, HC and PM) and hazardous air pollutants (HAPs) from diesel heavy duty trucks equipped with EGR+pDPF and SCR for Euro 5 emission standards were investigated using a chassis dynamometer. In the case of regulated pollutants, diesel heavy duty trucks with EGR+pDPF emitted 79% less CO than those with SCR. Also, those with the SCR emitted 36% less NO_x than those with the EGR+pDPF. The results of VOCs have show that alkanes emissions for heavy duty trucks with the EGR+pDPF and the SCR have been higher than alkenes, cycloalkanes and aromatics. In the case of individual VOCs, the highest of propene emissions for 11.3~16.1% occupied. For aromatics group, benzene emissions are the highest percentage for 4.4~15.5%. In the future, the results of present study will provide basic data to set up HAPs emissions inventory for mobile source.

1. 서 론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 방향족탄화수소와 지방족탄화수소 등의 일반 탄화수소와 할로겐, 질소, 산소 등을 포함한 비균질탄화수소 등으로 구성되어 있다. 방향족탄화수소와 할로겐화탄화수소는 그 자체로서 인체에 유해하며 지방족탄화수소(특히 올리핀계 탄화수소화합물)는 대기 중 광화학반응에 의해 오존 생성 등 2차 생성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

자동차에서 배출되는 가스상 물질 중 VOCs는 미량으로 배출되지만 직접적이고 장기적인 노출로 인하여 인간과 동물 및 식물에 악영향을 미칠 우려가 있으며 독성, 발암성, 생체축적과 대기 중 지속성, 확산 등의 특성을 지니고 있다^(1,2). 2012년 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 국제 암 연구소(International Agency for Reasearch on Cancer, IARC)에서는 인체 위해성 평가 결과들을 바탕으로 경유자동차 배출가스(Diesel Exhaust, DE)를 발암물질 1등급으로 지정하여 발표하였다⁽³⁾. 경유자동차에서 배출되는 VOCs는 연료의 물성과 연소방식의 특성상 일반적으로 휘발유자동차에 비해 적게 배출되며, 2016년 국토교통부 자동차등록대수 자료에서도 국내 경유 화물차 등록대수(3,492,173대)는 전체 자동차 등록대수(21,803,351대)의 16%로 낮은 비율을 차지한다. 그러나 도로이동오염원의 전체 배출량 중 화물차의 NO_x, PM 배출량은 각 56%, 68%⁽⁴⁾로 기여도가 높기 때문에 배출량

(Received: 28 Feb 2018, Received in revised form: 4 May 2018, Accepted: 6 May 2018)

*국립환경과학원 교통환경연구소

**호리바코리아

†책임저자, 회원, 국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : ksm432@korea.kr

TEL : (032)560-7613 FAX : (032)561-7013

측면에서 중요한 차종이라고 할 수 있다. Yao 등⁽⁵⁾은 소형, 중형, 대형트럭을 대상으로 이동식 배출가스 측정장치인 PEMS(Portable Emissions Measurement System)를 이용하여 실제 도로에서 총 64종의 VOCs를 분석한 결과, 오존생성의 영향을 주는 Carbonyls 및 Alkanes 계열의 구성비율이 높게 나타났다고 발표했다. 또한 Son 등⁽⁶⁾은 국내 중형트럭을 대상으로 후처리장치에 따른 오염물질 배출특성을 조사한 결과, 엔진미가열 조건에 따라 SCR 차량에서 HC, CO, PM이 58~74%, NOx는 약 24% 추가 배출되었으며 EGR 차량에서는 CO 산화반응을 저하로 배출량이 약 110% 증가하였다고 발표했다.

본 연구에서는 EGR+pDPF 및 SCR이 장착된 Euro 5 경유 대형트럭을 대상으로 HAPs 중 가스상물질 중심으로 배출특성을 분석하였으며, 이는 향후 국내 도로이동오염원에 대한 HAPs 인벤토리 구축의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시험차량

본 연구에서는 국토교통부에서 발표한 2016년도 국내

Table 2 Driving mode

Test mode	Driving distance (km)	Average speed (km/h)	Maximum speed (km/h)	Time (sec)
NIER 9	8.13	34.39	68.95	851

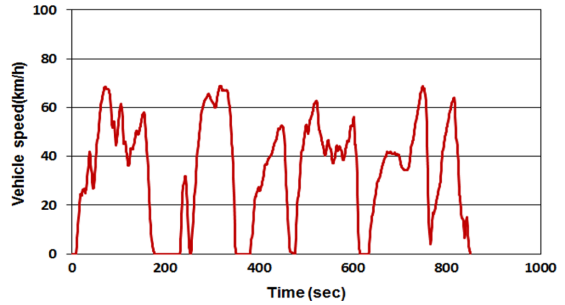


Fig. 1 Driving test mode

자동차등록대수 자료를 이용하여 차종별 점유율을 고려하여 Euro 5 기준의 경유 대형트럭 총 4대의 차량을 선정하여 시험하였다. 시험차량의 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of test vehicles

Test vehicle	Displacement (cc)	Driving distance (km)	Gross Vehicle Weight (kg)	Max. loading capacity	After treatment system	Emission standard	Fleet
A	5,899	237,705~442,756	14,345~14,385	7.5 ton	EGR+pDPF	Euro 5	2
B	5,880	213,464~436,101	14,640~15,750	7.5 ton	SCR	Euro 5	2

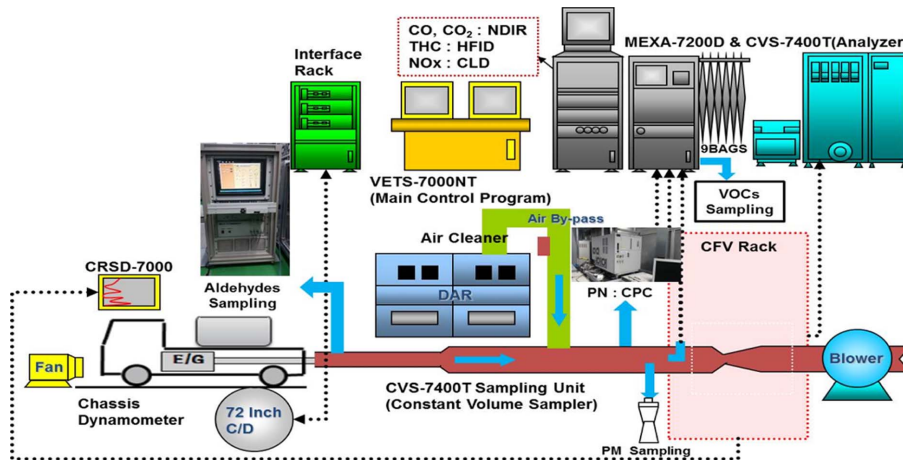


Fig. 2 Schematic diagram for exhaust emission test system

2.2 시험모드

경유 대형트럭의 배출특성을 분석하기 위하여 적용한 시험모드는 국립환경과학원에서 국내 운행조건을 반영하여 개발한 차속모드인 NIER(National Institute of Environmental Research) 모드이다. 본 연구에서는 전국 대형트럭의 평균주행속도⁽⁷⁾를 고려하여 NIER 9 모드를 적용하였으며, 적재중량 50%를 반영하여 각 3회 이상의 시험을 실시하였다. 시험모드의 제원은 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 시험방법

2.3.2 차대동력계 배출가스 측정장치 및 시스템

차대동력계는 가속, 감속, 정속, 정지 등의 실제 도로 주행을 모사하여 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 주는 장치이며, Fig. 2와 같이 차대동력계, 시료채취장치, 보조운전장치, 희석터널, 입자상물질측정장치, 배출가스 분석기로 구성되어 있다. 시험장치의 제원은 Table 3에 나타내었다.

2.3.3 배출가스 분석방법

시험차량이 차대동력계 롤러 위에서 시험모드를 주행할 때 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량시료채취장치(Constant Volume Sample, CVS)에서 일정량의 공기로 희석한 후 시료채취백에 채취된 배출가스를 분석기로 분석하였으며 CO는 비분산적외선 분석법(Nondispersive Infrared, NDIR), NOx는 화학발광법(Chemiluminescence Detector, CLD), HC는 수소염이온화검출기법(Heated Flame Ionization Detector, HFID)을 이용하였다. 배출량은 주행거리당 중량단위(g/km)로 환산하여 산정하였다.

2.3.4 휘발성유기화합물(VOCs) 분석방법

차량 시험을 하는 동안 대형 시료채취백에 포집된 배

Table 3 Specification of chassis dynamometer

Items	Specifications
Model	AVL ZOLLNER
Power absorption	150 KW
Maximum force	10096 N
Maximum speed	200 km/h
Total inertia range	454~5443 kg
Roller diameter	1219.2 mm

출가스를 가스분석시 시료채취용으로 사용되는 5 L 테들러백에 시료를 채취하였으며, 자동차 배출 오염물질 이외에 희석공기 중에 포함된 오염물질의 양을 보정하기 위해 희석공기도 동시에 채취하였다. 채취한 시료는 14개의 시료주입구가 있는 Air-server장치를 이용하여 열탈착장치로 주입되어 저온농축 및 탈착하였다. 열탈착장치를 통한 시료농축 및 전처리과정은 시료가 Purge&Trap을 거치면서 Nafion dryer를 통해 수분을 제거하고 Unity의 Cold trap에 -15°C 상태에서 VOCs 성분을 저온농축 및 흡착시킨 시료를 300°C로 가열 후 탈착하여 GC 컬럼으로 주입되어 EPA TO-14A⁽⁸⁾ 시험방법에 따라 GC/MS로 정량분석 하였다. Mass filter는 Ion trap이며 초기 온도조건은 30°C에서 30분의 지속 시간으로 시작하여 200°C까지 승온 후 최종 77.33분의 분석시간을 가진다. 표준물질은 총 56종의 휘발성오존전구물질이

Table 4 Analysis Conditions of TD and GC/MS

Activity	Analysis conditions				
	Model	Markes International / Unity2			
TD ¹⁾	Purge	Prepurge time (min)	1		
		Trap prepurge time (min)	1		
	Sample flow	Sample flow rate (ml/min)	10		
	Trap desorber	Trap low temp (°C)	-15		
Trap high temp (°C)		300			
Trap hold time (min)		5			
Split flow (ml/min)		30			
GC/MS ²⁾	Model	Agilent 7890B / ALMSCO BenchTOF-Select			
	Column	DB-1 (60 m × 0.32 mm × 3 μm)			
	Column flow	2 ml/min			
	Column temp.	Temp (°C)	Rate (°C/min)	Hold (min)	Total (min)
		30	0	30	30
		150	5	10	64
	200	15	10	77.33	
Mass Range	35~350 amu (Scan mode)				

1) TD: Thermal Desorber

2) GC/MS: Gas Chromatograph/Mass Spectrometer

Table 5 VOCs analyzed in this study

Group	Component
Aromatics	Benzene Toluene Ethylbenzene m,p-Xylene Styrene o-Xylene 1-Methylethylbenzene Propylbenzene 1-Ethyl-3-Methylbenzene 1-Ethyl-4-Methylbenzene 1-Ethyl-2-Methylbenzene 1,3,5-Trimethylbenzene 1,2,4-Trimethylbenzene 1,2,3-Trimethylbenzene 1,3-Dimethylbenzene 1,4-Dimethylbenzene
Alkenes	Propene 1-Butene 1-Butene trans-2-Butene cis-2-Butene 1-Pentene 2-methyl-1,3-butadiene trans-2-Pentene cis-2-Pentene 1-Hexene
Alkanes	Isobutane Butane 2-Methylbutane Pentane 2,2-Dimethylbutane 2,3-Dimethylbutane 2-Methylpentane 3-Methylpentane Hexane 2,4-Dimethylpentane 2-Methylhexane 2,3-Dimethylpentane 3-Methylhexane Octane Nonane Decane Undecane Dodecane
Cycloalkanes	Cyclopentane Methyl-cyclopentane Cyclohexane Methyl-cyclohexane

혼합된 100 ppb Standard gas를 사용하였으며 2, 5, 10, 20, 50 ppb의 농도로 검정곡선을 확인하였다. 또한 분석의 정도관리를 위해 각 물질들에 대해 방법검출한계 (Method Detection Limit, MDL)를 구한 후, 각 분석결과 값에 적용하였다. Table 4, Table 5에 TD 및 GC/MS 분석조건과 이번 연구의 분석물질을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 규제오염물질 배출특성

Figure 3에 규제오염물질 배출 결과를 나타내었으며 EGR+pDPF 차량은 SCR 차량 대비 CO가 79% 낮게 배출되었다. 이는 EGR+pDPF 차량의 pDPF 표면에서 DOC (Diesel Oxidation Catalysts) 장치에 의해 산화반응이 일어나 CO가 CO₂로 산화되어 CO가 낮게 배출된 것으로 판단된다⁽⁶⁾. HC(EGR+pDPF: 0.193 g/km, SCR: 0.038 g/km)는 EGR+pDPF 차량이 높게 배출되었는데 원인은 EGR로 인해 연소온도가 낮아져 불완전연소에 따라 높게 배출된 것으로 판단된다^(9,10). SCR차량의 NOx는 EGR+pDPF 차량 대비 36 % 낮게 배출되었으며 SCR 시스템에 따라 NOx 저감이 나타난 것으로 판단된다. PM은 미미한 배출 수준으로 SCR차량이 다소 높게 배출되었다.

추가로 엔진 냉간시 규제오염물질의 변화수준을 확인하기 위하여 시험차량을 일정한 온도/시간(20~30°C, over 12 hours)동안 충분히 냉화(soak) 한 후 동일 시험을 실시, 냉간시의 배출특성을 확인 하였다. 모든 시험차량에서 냉간시 배출량이 증가하였으며 EGR+pDPF 차량의 배출량비는 1.0~2.3으로 항목별로 1~134%, SCR 차량의 배출량비는 1.1~1.4로 항목별로 5~44% 높게 배출되었다. 자동차는 냉간시동 시 연소실내 낮은 분위온도 및 배출가스저감장치의 촉매활성화온도 미도달 등의 이유로 인해 연소효율, 소염층(Quenching area)증대 및 배출가스저감효율이 확보되지 않으며, 이러한 이유로 인해 비교적 연소 및 배출가스 개선에 유리한 조건의 빠른 확보를 위하여 ECU의 연료분사량이 높게 설정되어있다. 이로 인해 불완전연소의 산물인 CO와 PM이 다른 물질보다 많이 배출된 것으로 판단된다. 엔진 열간 및 냉간 조건에서의 배출량 비는 Table 6과 같다.

3.2 휘발성유기화합물(VOCs) 배출특성

3.2.1 저감장치에 따른 배출특성

Figure 4에 저감장치에 따른 배출 결과를 나타내었

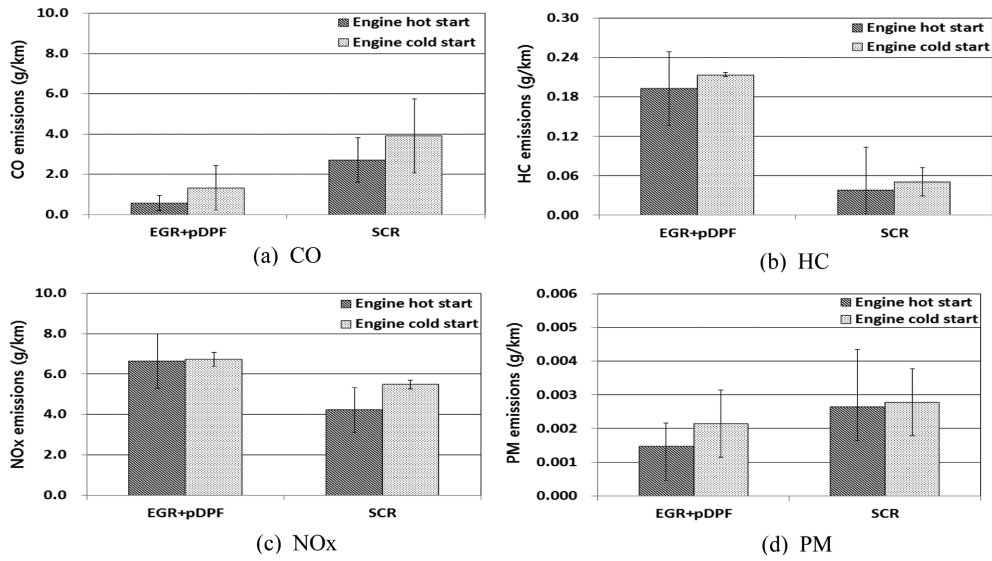


Fig. 3 Effects of aftertreatment system on regulated pollutants emissions

Table 6 Engine cold/hot start emission ratio of regulated pollutants

Pollutants	Trucks with EGR+pDPF	Trucks with SCR
CO	2.3	1.4
HC	1.1	1.3
NOx	1.0	1.3
PM	1.5	1.1

으며 EGR+pDPF 차량 대비 SCR 차량의 배출량은 Alkanes 59%, Alkenes 56%, Cycloalkanes 34%, Aromatics 49% 낮게 배출되었다. 이는 규제오염물질 HC의 배출 특성과 유사한 결과를 보여주었다. VOCs도 탄화수소에

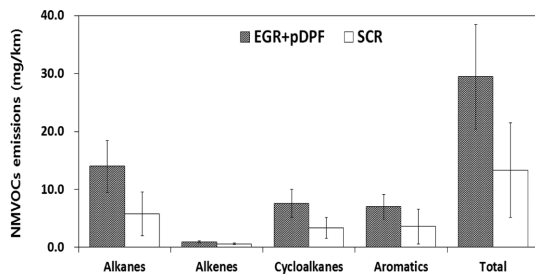


Fig. 4 Effects of aftertreatment system on emission characteristics of NMVOCs

포함되므로 생성메커니즘이 같은 과정인 것으로 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다. Fig. 5와 같이 NMVOC 구성성분은 EGR+pDPF 차량의 경우 Alkanes 47% > Alkenes 26% > Aromatics 24% > Cycloalkanes 3%, SCR 차량은 Alkanes 42% > Aromatics 28% > Alkenes 25% > Cycloalkanes 5%의 구성비율을 나타내었으며, 두 차량에서 Alkanes 계열의 구성비율이 높게 나타났다. 이는 Alkanes 계열이 다른 물질에 비해 산화촉매장치에서 산화효율이 낮아 본 연구에서도 이러한 영향으로 결과가 나온 것으로 판단된다⁽¹¹⁾. Table 7과 같이 오존생성 잠재력이 높은 Propene이 11.3%, 16.1%로 높은 비율을 나타내었으며 Aromatics 계열에서는 벤젠이 4.4%, 15.5%로 높은 조성비를 보여주었다.

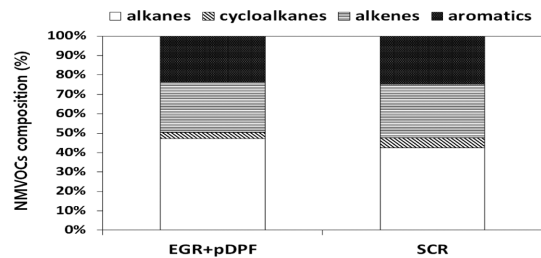


Fig. 5 Effects of aftertreatment system on NMVOCs composition

Table 7 Comparison of major components in NMVOCs composition

No.	Trucks with EGR+pDPF		Trucks with SCR	
	Components	%	Components	%
1	Propene	11.30	Propene	16.12
2	1-Butene	11.29	Benzene	15.54
3	Nonane	7.71	1-Butene	10.28
4	Decane	7.63	Dodecane	7.02
5	Dodecane	7.36	Octane	5.01
6	Undecan	5.56	Heptane	4.67
7	Octane	4.74	Nonane	4.58
8	Benzene	4.43	Isobutane	3.89
9	Heptane	3.99	Undecan	3.61
10	m,p-Xylene	3.86	Decane	3.34
11	Others	32.13	Others	25.94

Table 8 Engine cold/hot start emission ratio of NMVOCs

Groups	Trucks with EGR+pDPF	Trucks with SCR
Alkanes	1.1	1.3
Alkenes	1.1	1.0
Cycloalkanes	1.2	1.1
Aromatics	1.3	1.6

Cycloalkanes 1.1~1.2배, Aromatics 1.3~1.6배 높게 배출되었으며 이러한 엔진 냉간시의 배출량 증가는 저온으로 인한 불완전연소 및 배기가스의 온도가 촉매 활성화 온도(light-off temperature)에 도달하지 못하여 높게 배출된 것으로 판단 된다^(12,13). 엔진 열간 및 냉간의 배출량비는 Table 8과 같다.

4. 결론

3.2.2 엔진 열간 및 냉간 조건에 따른 배출특성
Figure 6에 엔진 열간 및 냉간 조건에 따른 배출결과를 나타내었으며 냉간시 열간시보다 배출량이 증가하였다. 두 차량은 그룹별 Alkane 1.1~1.3배, Alkenes 1.0~1.1배,

본 연구에서는 EGR+pDPF 및 SCR이 장착된 Euro 5 경유 대형트럭을 대상으로 유해대기오염물질 배출 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.
(1) 대형 차대동력계를 이용하여 규제오염물질을

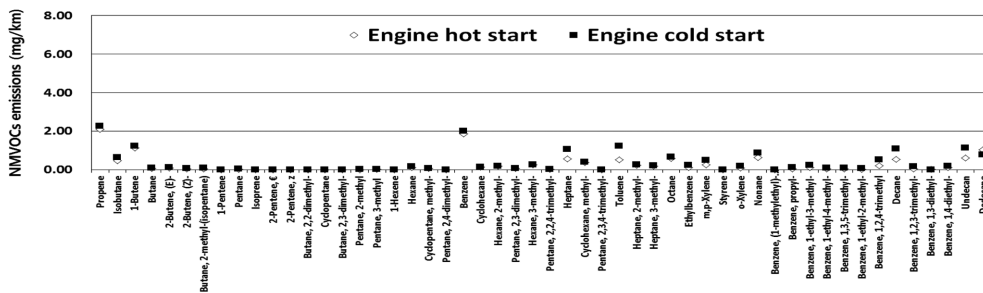
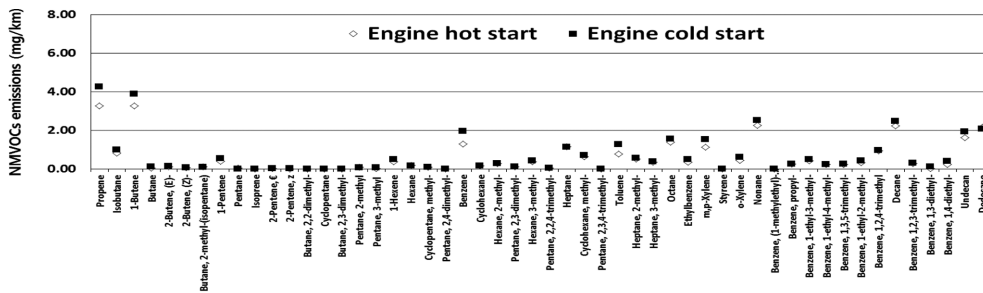


Fig. 6 Emission characteristics of NMVOCs according to engine hot and cold start condition

분석한 결과, EGR+pDPF 차량은 SCR 차량 대비 CO가 79% 낮게 HC(EGR+pDPF: 0.193 g/km, SCR: 0.038 g/km)는 높게 배출되었으며 SCR 차량은 EGR+pDPF 차량 대비 NOx는 36% 낮게 PM은 미미한 배출 수준으로 다소 높게 배출되었다. 엔진 냉간시 EGR+pDPF 및 SCR 차량은 열간시 보다 배출량이 증가하였다.

(2) 저감장치에 따른 휘발성유기화합물을 분석한 결과, SCR 차량이 EGR+pDPF 차량 대비 Alkanes 59%, Alkenes 56%, Cycloalkanes 34%, Aromatics 49% 낮게 배출되었다. EGR+pDPF 및 SCR 차량의 NMVOC 구성 성분은 Alkanes 계열의 구성비율이 높게 나타났다.

(3) 엔진 열간 및 냉간 조건에 따른 휘발성유기화합물을 분석한 결과, 두 차량은 그룹별 냉간시 열간시보다 Alkanes 1.1~1.3배, Alkenes 1.0~1.1배, Cycloalkanes 1.1~1.2배, Aromatics 1.3~1.6배 높게 배출 되었다.

(4) 본 연구를 통하여 국내 도로이동오염원에 대한 HAPs 인벤토리 구축의 기초자료로 활용하고자 하며 현재 VOCs의 규제기준은 없으나 인체에 유해하고 위해성이 높기 때문에 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2017-01-01-078).

참고문헌

- (1) NIER, “교통분야 오염물질 관리 자료집”, 2013.
- (2) H. K. Hong, S. W. Jung, J. H. Son, T. Y. Moon, S. E. Lee, S. H. Moon, H. J. Yoon, J. S. Kim and J. H. Kim, “Speed-dependent Emission Characteristics of the Hazardous Air Pollutants from Diesel Medium-duty Trucks according to Emission Standards”, Journal of ILASS-Korea, Vol. 20, No. 2, 2015, pp. 121~129.
- (3) IARC, “Diesel engine exhaust carcinogenic”, Press Release N213, 2012, pp. 1~4.
- (4) NIER, “2014 National AIR POLLUTANTS EMISSION”, 2016.
- (5) Zhiliang Yao, Xianbao Shen, Yu Ye, Xinyue Cao, Xi Jiang, Yingzhi Zhang and Kebin He, “On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China”, Atmospheric Environment, Vol. 103, 2015, pp. 87~93.
- (6) J. H. Son, J. H. Kim, S. W. Jung, H. M. Yoo, H. K. Hong, S. H. Mun, K. H. Choi, J. T. Lee, J. S. Kim, “Characteristics of Air Pollutants Emission from Medium-duty Trucks Equipped EGR and SCR in Korea”, Journal of ILASS-Korea, Vol. 21, No. 3, 2016, pp. 130~136.
- (7) KOTI, “2016년 톤급별 연비 및 운행속도 자료”, <http://roft.koti.re.kr>, 2016.
- (8) U.S. EPA, “Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) In Ambient Air Using Specially Prepared Canisters With Subsequent Analysis By Gas Chromatography”, 1999, Method TO-14A.
- (9) S. Y. Lee, J. H. Jang, Y. G. Lee, S. M. Oh, Y. R. Kim and D. S. Kim, “Effect of Intake Pressure on Emissions and Performance in Low Temperature Combustion Operation of a Diesel Engine”, Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 20, No. 1, 2012, pp. 88~94.
- (10) C. H. Cho, K. C. Oh and C. B. Lee, “Characteristics of low Temperature Combustion in single Cylinder Engine by High EGR Rate”, Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 17, No. 4, 2009, pp. 79~85.
- (11) NIER, “The emission Characteristics of mobile source air toxics and management strategy(III)”, 2016.
- (12) M. Antonietta Costagliola, Fabio Murena and M. Vittoria Prati, “Exhaust emissions of volatile organic compounds of powered two-wheelers: Effect of cold start and vehicle speed. Contribution to greenhouse effect and tropospheric ozone formation”, Science of the Total Environment, Vols. 468-469, 2014, pp. 1043~1049.
- (13) Y. S. Lyu, J. H. Ryu, J. S. Han, S. M. Kim, C. S. Lim, D. W. Kim, D. M. Lee, J. K. Lee, M. D. Eom, J. C. Kim, “Exhaust VOCs Emission Characteristics from Motor Vehicles”, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 24, No. 3, 2008, pp. 275~283.
- (14) S. H. Mun, H. M. Yoo, J. H. Son, C. W. Yun, G. T. Park, J. S. Kim and J. T. Lee, “Comparison on Exhaust Gas of Heavy Duty Diesel Trucks; THC and CO Emission Affected by NOx Control Devices (EGR, SCR)”, Journal of ILASS-Korea, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 149~155.
- (15) J. T. Lee, H. M. Yoo, J. H. Son, C. W. Yun, S. H. Mun, G. T. Park and J. S. Kim, “A Study on Emission Characteristics of VOCs During Cold Start Test Mode for Motoreycles”, Journal of ILASS-Korea, Vol. 20, No. 1, 2015, pp. 28~34.