

DPF 재생이 경유자동차 배출특성에 미치는 영향

문태영* · 손지환* · 윤현진* · 홍희경* · 최광호** · 김정수* · 김정화†

Effect of DPF Regeneration on Emission Characteristics in Diesel Engines

Taeyoung Moon, Jihwan Son, Hyunjin Yun, Heekyoung Hong, Kwangho Choi,
Jeongsoo Kim and Heekyoung Kim

Key Words: AMS(에어로졸 질량분광계), DPF(배기가스 후처리장치), PTR-MS(양자전이 분석기), Regeneration(재생), VOCs(휘발성유기화합물)

Abstract

In this study, characteristics of gaseous pollutants and particulate matter were investigated on the condition of DPF regeneration and normal DPF condition. THC, CO, CO₂, NO_x, and CH₄ were analyzed by MEXA-7200H and CVS-7100 respectively. Particulate Matter (PM) was measured by difference in weight of Membrane filter. Particle Number (PN) was measured by CPC analyzer. And Sulfate, Nitrate, Organic were measured by Aerosol Mass Spectrometer (AMS). As a result, gaseous pollutants and particulate matter were detected in higher concentration during DPF regeneration than normal DPF condition. And the PN increased by 94%, the fuel consumption was reduced by 29% on DPF generation process. Sulfate, Nitrate and Organic were undetectable level during normal DPF condition. But the highest concentration of Sulfate, Nitrate and Organic were measured as 100 µg/m³, 20 µg/m³ and 15 µg/m³ respectively on DPF regeneration condition. VOCs concentrations (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) were analyzed by using PTR-MS. Benzene and Toluene emission have little or no change depending on DPF regeneration. But the Ethylbenzene and Xylene have comparatively low emissions on DPF regeneration.

1. 서 론

국내 대기 오염물질의 발생량은 점차 감소하는 추세이나 주요 오염원인 자동차의 등록대수는 매년 증가하고 있어 자동차에서 발생하는 오염물질 저감에 대한 관심과 중요성이 높아지고 있다. 이에 국내에서는 제작차 배출허용기준 강화, 운행자동차 정밀검사시행, 배출가

스 저감기술에 대한 인센티브제도, 수도권 대기환경규제 지역에서의 저공해 자동차 보급 등 다양한 저감정책이 추진되고 있다.

2011년 대기오염물질 배출량(국립환경과학원)에 따르면 국내 대기오염 배출량에서 이동오염원으로부터 발생하는 배출량은 전체의 34.6%이며, 이 중 자동차가 차지하는 비율은 이동오염원의 69.5%에 해당된다⁽¹⁾. 특히 경유자동차는 도로이동오염원의 질소산화물과 입자상물질의 배출기여도가 높으므로 그 중요도가 높다고 할 수 있다. 현재 경유자동차에서 배출되는 입자상물질을 저감하기 위해 필터를 활용해서 입자상물질을 포집하는 저감장치인 DPF(Diesel Particulate Filter)가 적용되고 있다. DPF에 입자상물질의 포집량이 증가하여 필터 양단의 차압이 상승하게 되면 엔진 배압도 상승하는 동시에

Received: 12 Sep 2014, Received in revised form: 17 Sep 2014, Accepted: 18 Sep 2014

*국립환경과학원 교통환경연구소

**남서울대학교 교양과정부

†국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : moon84@korea.kr

TEL : (032)560-7614 FAX : (032)561-7013

배기 장애가 발생하게 되는데 이러한 장애를 제거해주는 과정을 재생이라 한다. 재생은 600~650°C의 고온에서 미연탄소분으로 구성된 입자상 물질을 태우는 과정을 말한다⁽²⁾. 이때 고온 상승으로 배출되는 가스상물질과 입자상물질의 농도가 증가하고 연비는 감소한다. 따라서 DPF 재생 시 발생하는 대기오염물질 발생특성과 정량적인 오염물질 증가에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 후처리 저감장치(DPF)가 장착된 경유자동차 1종을 선정하고 경유자동차 인증모드인 ECE15 + EUDC(NEDC)를 이용하여 DPF 재생에 따라 발생하는 가스상 오염물질과 입자상 오염물질을 조사하였다. DPF 재생 유무의 시점을 확인하기 위한 지속적인 연구를 수행하였고, 자연 재생주기 파악을 위해 주행거리 측정, 발생하는 대기 오염물질 실시간 분석 등으로 재생 유무의 시점을 확인할 수 있었다. 가스상 물질은 MEXA-7200H, CVS-7100 분석기를 이용하여 CO, CO₂, HC, NO_x, CH₄을 분석하였고, PTR-MS 분석기를 이용하여 VOCs 분석하였다. 입자상물질은 불소탄화물 코팅된 유리섬유 재질 필터의 무게 전후차를 이용하여 측정하였고, 입자개수(PN)를 측정하기 위해 CPC를 사용하였다. AMS 분석기를 사용하여 Sulfate, Nitrate, Organic을 측정하였다.

2. 시험장치 및 방법

2.1 시험 구성

본 시험은 차대 동력계를 이용하여 경유자동차 인증 모드인 ECE15 (Elementary urban cycle) + EUDC (Extra urban cycle)로 시험하였다. Fig. 1의 구성도는 Phase1과 Phase2로 구분되며, Phase1의 ECE15는 시내 주행패턴을 모사, Phase2의 EUDC는 고속 주행패턴을 모사한 모드이고, 총 모드의 평균차속은 33.6 km/h, 주행거리는 11.007 km이다⁽³⁾. 시험 횟수는 DPF 재생 전·후 각 2회 및 1회 시험 하였다.

2.2 시험차량

시험차량의 제원은 Table 1에 제시한 바와 같이 DPF

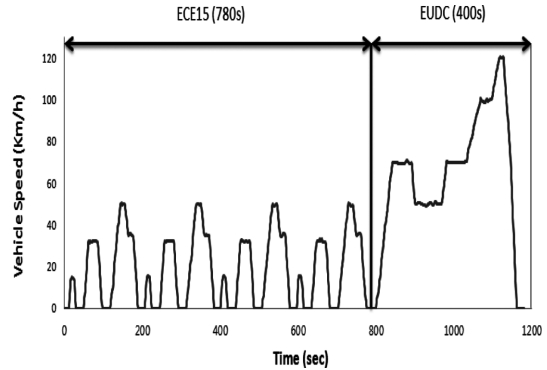


Fig. 1 Driving pattern for ECE15+EUDC mode

와 DOC가 장착된 RV 소형 경유차로 배기량 1995 cc의 2010년식 차량이다.

2.3 시험장치

2.3.1 차대 동력계 배출가스 측정 시스템

차대동력계 배출가스 측정 장비는 차대동력계, 시료채취 장치, 보조 운전 장치, 희석터널, 입자상물질 측정 장치 및 배출가스 분석기 등으로 구성되어 있다. Fig. 2와 같은 구성으로 시험을 하였고, 시험자동차가 차대 동력계의 롤러위에서 시험모드를 주행할 때 배기관으로부터 배출되는 가스를 정용량 시료채취방법(Constant Volume Sampler:CVS)으로 일정량 공기로 희석한 후,



Fig. 2 Chassis dynamometer for vehicle emission test

Table 1 Test vehicle specification

Model	Fuel type	Model year	Engine displacement	Mileage	Curb weight	Aftertreatment equipment
Light duty RV	diesel	2010	1995 cc	11562 km	1700 kg	DOC + DPF

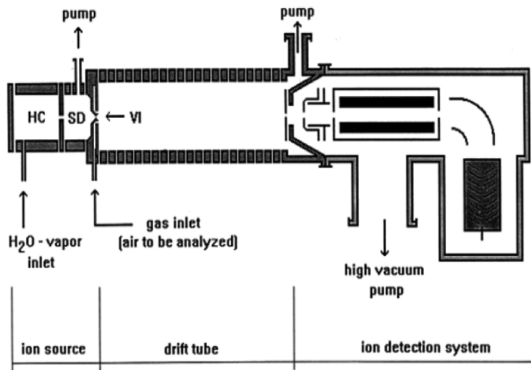


Fig. 3 Schematic diagram of the PTR-MS

시료 채취 백에 채취하여 배출가스 분석하였다. 또한 CVS는 자동차 배출가스를 공기와 희석하여 채취할 수 있고 희석터널은 고온에 의한 입자상물질의 변화를 배제시키고 대기조건으로 제어하기 위해 시료채취온도가 항상 52°C 이내로 유지되도록 외부공기와 배기가스를 희석시키는 기능을 한다.

2.3.2 배출가스 VOCs 분석기(PTR-MS)

배출가스에서 나오는 VOCs 물질을 분석하기 위해 Fig. 3의 양자 전이 분석기(Porton Transfer Reaction Mass Spectrometry : PTR-MS)를 이용하였다^(4,5). 측정방법은 화학적 이온화방법(soft chemical ionization)으로 발생한 H₃O⁺ 이온이 VOCs와 친화력이 높은 점을 이용하여 VOCs에 수소 이온을 전이시키는 방법으로 측정위치는 정용량 시료채취장치(CVS) Full Tunnel내에서 배기가스와 희석공기를 혼합하여 일정 유량으로 형성되는 지점을 선택하여 측정하였다.

2.3.3 배출가스 입자성분 분포분석기(AMS)

배출가스에서 나오는 입자상 물질을 실시간으로 분석하기 위해 Fig. 4에 제시한 에어로졸 질량 분광계 Aerosol Mass Spectrometry(AMS)를 이용하였다. AMS는 경유 자동차에서 배출되는 PM₁ 이하의 입자상 물질을 실시간으로 측정하였다. 에어로졸 입자는 공기와 함께 100 μm 임계오리피스를 통해 1.5 cm³/s 유량으로 유입되며, Aerodyne 공기역학적 렌즈로 유입된다. 렌즈를 통과하면서 입자들은 좁은 빔의 형태로 집중되고, 진공 챔버로 진행되면서 함께 유입된 가스상 물질은 대부분 제거된다. 입자상물질은 분석실로 유입 후 공기역학적 렌즈에서 60~600 nm 범위인 구형 입자들은 100%의 통과

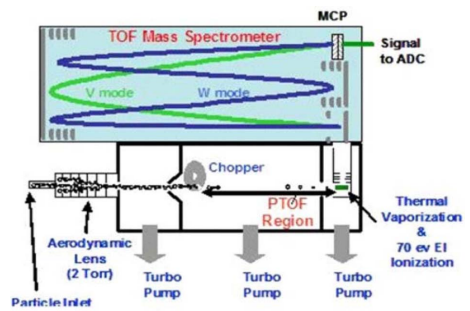


Fig. 4 Schematic diagram of the aerodyne aerosol mass spectrometer

효율을 가진다. 진공 챔버로 유입된 입자는 가속 및 팽창되면서 직경에 따른 고유한 진공중말속도로 이동하게 되고 빔(beam)과 같이 연속적인 형태를 유지한다. 입자의 빔이 150 Hz로 회전하며, 2%의 통과 Slit을 가진 초퍼(chopper)를 통과하면서 일정하게 단락된다. 진공 챔버를 통과한 입자들은 600°C에 가열된 표면의 접촉 또는 충돌하여 기화된다. 기화된 물질은 전자충격(70 eV)을 통해 이온화되고, 생성된 양이온은 비행 시간챔버 질량분석기를 통과한 후 MCP(Multi-Channel Plate)를 통해 검출된 후, 자료획득 장치로 전송되어 디지털(digital) 신호로 변환되어 측정한다^(6,7).

2.3.3 배출가스 입자 개수 측정기(CPC)

배출가스에서 나오는 입자상물질의 개수(Particle Number:PN)는 Fig. 5의 극미세입자측정기(Condensation Particle Counter:CPC)를 사용하였다. CVS Tunnel에 설치된 시료채취선에서 직경이 2.5 μm 이상의 입자상 물질이 제거되고 직경 2.5 μm 이하 입자상 물질은 1차 희

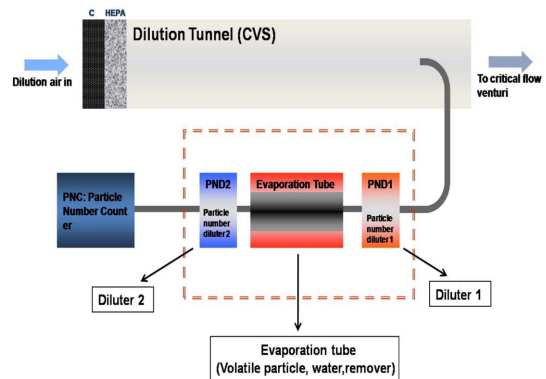


Fig. 5 Schematic diagram of the CPC apparatus

석장치(PND1)에서 회석시킨 후 evaporation tube의 300~400°C 온도 조건에서 휘발성물질과 수분을 제거한다⁸⁾. 이후 2차 회석장치(PND2)에서 35°C이하의 온도로 회석된 후 부탄올을 이용하여 크기를 크게 보여준다. 레이저빔에 통과되는 입자는 일정한 각도에서 반사되는 빛을 이용하여 측정한다.

3. 시험결과

실험차량의 후처리장치 DPF 재생은 필터에 soot이 가득 쌓여 필터 활용 능력이 떨어질 때 연료분사로 고온을 만들어 soot를 태워 제거하는 방식이다. ECE15+ EUDC 모드를 이용한 실험차량의 재생 전과 재생 시에 발생하는 대기 오염물질을 가스상물질과 입자상 물질로 구분하여 비교하였고 DPF 재생 시 가스상물질과 입자상물질이 모두 높게 배출되는 것으로 확인되었다.

3.1 가스상 물질

3.1.1 규제 물질

Table 2에 DPF 재생 전·후의 가스상 오염물질 배출량을 제시하였고, 재생 시 모든 시험모드 조건에서 오염물질의 배출량이 증가하는 것을 확인 하였다. 이는 재생 시 필터에 쌓인 soot를 태우기 위해 고온연소가 필요하고, 그로인해 많은 연료분사에 따른 결과로 판단된다.

ECE15 모드구간에서 THC 배출량은 0.055 g/km에서 0.229 g/km로 약 76% 증가하였고, CO 배출량은 0.318 g/km에서 0.339 g/km로 약 6% 증가하였다. CO₂ 배출량은 240 g/km에서 365 g/km로 약 35% 증가하였고, NO_x 배출량은 0.220 g/km에서 0.767 g/km로 약 71% 증가하였다. CH₄ 배출량은 0.011 g/km에서 0.150 g/km로 약 93% 증가하여, DPF 재생 시 THC와 CH₄ 배출량의 증가량이 가장 많은 것으로 확인되었다.

Table 2 Comparison of gaseous air pollutants emission

Test mode	Pollutants	Pollutants emission(g/km)	
		Normal DPF condition	DPF Regeneration
ECE15	THC	0.055±0.008	0.229±0.003
	CO	0.318±0.020	0.339±0.066
	CO ₂	240±3	365±12
	NO _x	0.220±0.010	0.767±0.004
	CH ₄	0.011±0.001	0.150±0.013
EUDC	THC	0.008±0.001	0.075±0.036
	CO	0.004±0	0.029±0.024
	CO ₂	158±1	203±20
	NO _x	0.171±0.027	0.621±0.080
	CH ₄	0.003±0	0.067±0.029
ECE15+ EUDC	THC	0.025±0.001	0.133±0.025
	CO	0.119±0.007	0.144±0.040
	CO ₂	188±1	263±8
	NO _x	0.189±0.001	0.676±0.217
	CH ₄	0.006±0.001	0.098±0.024

EUDC 모드구간에서 THC 배출량은 0.008 g/km에서 0.075 g/km로 약 89% 증가하였고, CO 배출량은 0.004 g/km에서 0.029 g/km로 약 66% 증가하였다. CO₂ 배출량은 158 g/km에서 203 g/km로 약 22% 증가하였고, NO_x 배출량은 0.171 g/km에서 0.676 g/km로 약 72% 증가하였고, CH₄ 배출량은 0.003 g/km에서 0.067 g/km로 약 95% 증가하였다.

3.1.2 VOCs 물질

PTR-MS 분석기를 이용하여 DPF 재생 전·후에 따른 자동차 배기가스 중 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 농도를 측정하여 배출량을 산정하였다. Table 3에 제시한 바와 같이 DPF 재생에 따른 배기가스 중 VOCs 농도증가는 확인되지 않아 DPF 재생에 따른

Table 3 Comparison of VOCs concentration

Test condition Pollutants	Normal DPF condition (mg/km)			DPF Regeneration (mg/km)		
	ECE15	EUDC	ECE15+EUDC	ECE15	EUDC	ECE15+EUDC
Benzene	2.829	0.534	0.897	2.241	0.387	0.682
Toluene	3.704	0.945	1.382	3.340	0.969	1.371
Ethylbenzene	1.238	0.449	0.573	1.200	0.431	0.548
Xylene	2.222	0.593	0.851	0.960	0.207	0.403

VOCs 추가 배출은 확인되지 않았으며 오히려 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 DPF 재생 시 고온으로 입자상물질을 태워 제거하는 과정에서 휘발성 오염물질에 대한 연소효율이 높아진 결과로 사료 된다.

3.2 입자상 물질

3.2.1 PM

Figure 6에 ECE15, EUDC, ECE15+EUDC모드 세 구간으로 분류하여 재생 전·후에 따른 PM의 배출량을 나타내었다. DPF 재생 전·후에 따른 PM의 배출량은 재생 시 높았다. 각 2회 측정결과의 모드 구간별 평균 값 비교 시 ECE15구간 0 g/km에서 0.0020 g/km로 증가하였고, EUDC구간 0.0001 g/km에서 0.0412 g/km로 증가하였고, ECE15+EUDC 0.0001 g/km에서 0.0045 g/km로 증가하였다. 이는 재생 시 DPF 필터에 쌓인 Soot가 태워져 배출되는 입자상 물질로 DPF 재생 시 고속구간인 EUDC 모드에서 많이 배출되는 것으로 확인 되었다.

3.2.2 PN

Figure 7과 같이 PN의 배출량도 재생 시 높게 배출되는 것을 확인 하였고, 각 2회 측정결과의 모드 구간별 평균 값 비교 시 ECE15구간 $2.2 \times 10^{11} \#/\text{km}$ 에서 $5.6 \times 10^{11} \#/\text{km}$ 로 증가하였다. EUDC구간 $4.3 \times 10^{10} \#/\text{km}$ 에서 $7.8 \times 10^{12} \#/\text{km}$ 로 증가하였고, ECE15+EUDC구간 $4.1 \times 10^{11} \#/\text{km}$

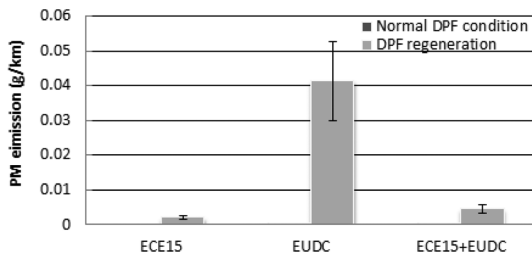


Fig. 6 PM emission

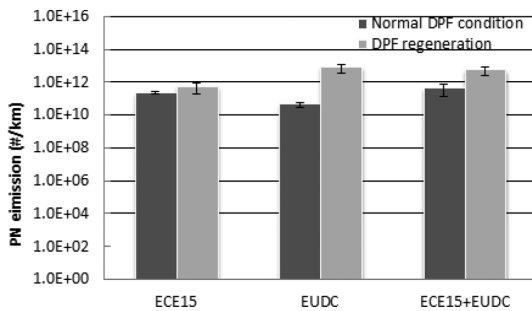


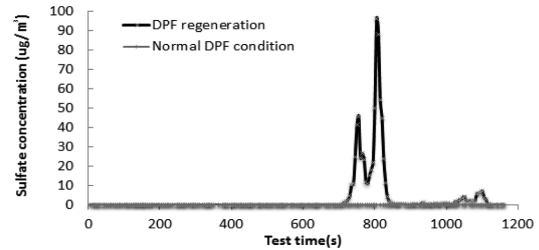
Fig. 7 PN emission

에서 $5.2 \times 10^{12} \#/\text{km}$ 로 증가하였다. PN은 DPF 정상가동 상태에서는 도시운전구간인 ECE15 구간에서 가장 높았으나 DPF 재생시에는 DPF 재생이 활발하게 진행되는 고속구간인 EUDC 모드에서 높은 것으로 확인 되었다.

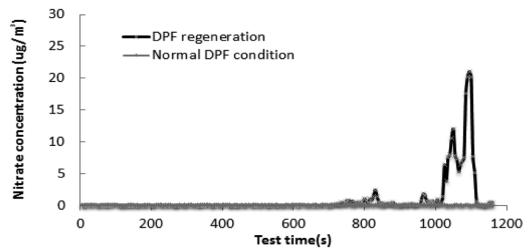
3.2.3 입자성분

AMS 분석기를 이용하여 DPF 재생 전·후에 따른 발생하는 입자성분을 실시간으로 나타낸 결과이다. 기존 연구에서는 재생 시 발생하는 입자상물질(PM), 입자개수(PN)의 발생량을 비교하는 경우가 많았지만, AMS 분석기를 이용하여 입자상물질의 성분을 세부적으로 알 수 있었다. 본 연구에서 측정된 AMS 분석물질은 Sulfate, Nitrate, Organic 이다.

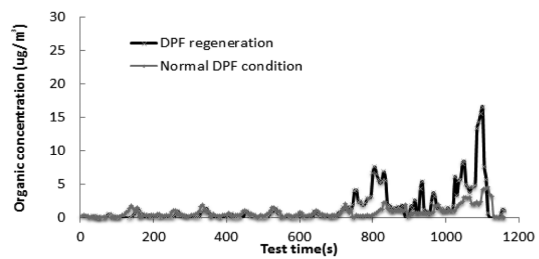
Figure 8에 배출가스 중 실시간 입자상 물질의 농도를 제시하였다. Sulfate 농도를 실시간으로 분석 한 결과 재생 전 약 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 재생 시 최고 농도는 약 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하며 분석물질 중 가장 많이 배출되는 것



(a) Sulfate



(b) Nitrate



(c) Organic

Fig. 8 Real time air pollutant concentration in vehicle emission gas

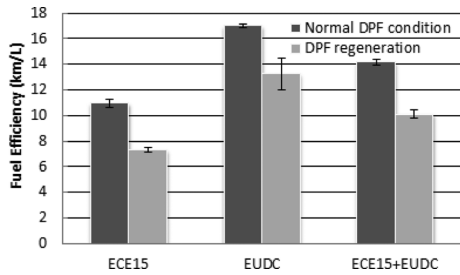


Fig. 9 Comparison of Fuel Efficiency

로 확인되었고, Sulfate가 증가하는 시점부터 DPF 재생이 시작된 것으로 판단된다. Nitrate는 재생 전 약 1 µg/m³에서 재생 시 최고 농도는 약 20 µg/m³로 증가하였고, Organic 성분은 재생 전 약 1.2 µg/m³에서 재생 시 약 15 µg/m³ 까지 증가하였다. 이로써 DPF 재생 시 입자상 유기물질 배출량이 급증하는 것을 확인하였고, 이는 DPF에 축적된 입자상 물질이 연소되는 과정에서 발생하는 생성물로 사료되며 DPF 재생 여부를 판단할 수 있는 지표물질로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 연비

DPF 재생에 따른 연비(Fule Efficiency)는 재생 시 연비가 감소하였다. 재생 시 엔진효율 저하와 배기가스를 고온으로 올리기 위해 연료분사가 증가 원인이라 예측된다. Fig. 9의 결과처럼 ECE15구간 10.9 km/L에서 7.3 km/L로 감소하였고, EUDC구간 17.0 km/L에서 13.3 km/L로 감소하였고, ECE15+EUDC 14.2 km/L에서 10.1 km/L로 감소하였다. ECE15 모드는 차량속도 저속구간으로 가속, 정속, 감속, 공회전을 반복하는 특성상 EUDC모드 대비 연비가 다소 낮은 것으로 확인 되었고 DPF 재생 시에도 유사한 경향을 보였다.

4. 결 론

후처리 저감장치 DPF가 장착된 경유자동차 1종을 선정하여 경유자동차 인증모드인 ECE15+EUDC모드로 재생 전·후에 따라 발생하는 대기오염물질의 대해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 가스상 물질 THC, CO, CO₂, NO_x, CH₄ 의 결과 재생 후 THC 약 81%, CO 약 17%, CO₂ 약 28%, NO_x 약 69%, CH₄ 약 94% 증가하였다. 재생 시 DPF 쌓인 soot를 태우기 위해 고온연소가 필요하고, 그로 인해 추

가적인 연료분사에 기인한 결과로 사료된다.

반면 VOCs 물질은 DPF 재생에 따른 추가적인 배출량이 확인되지 않았으며, 오히려 재생 전 대비 재생 후에 낮게 배출되었다. 이는 DPF 재생 시 고온으로 입자상물질을 태워 제거하는 과정에서 휘발성 오염물질의 연소도 함께 진행된 결과로 판단된다.

2) 배출가스 중 입자상 물질을 대상으로 PM, PN, Sulfate, Nitrate, Organic을 측정된 결과 DPF 재생 시 PN이 약 94% 증가하였고, Sulfate, Nitrate, Organic은 재생 전 거의 배출되지 않았지만 DPF 재생 시 배출농도가 Sulfate 100 µg/m³, Nitrate 20 µg/m³, Organic 15 µg/m³으로 추가적인 배출량이 확인되었다. 이 결과로 미루어 보면 재생이 발생될 때 Sulfate, Nitrate, Organic의 최고 농도가 측정되는 지점부터 재생이 이루어짐을 예측할 수 있으며 입자상물질 중 Sulfate가 가장 많은 비중을 차지하였다.

3) 연비는 DPF 재생 후 감소하는 것을 알 수 있었다. 재생 전 14.2 km/L에서 재생 후 10.1 km/L로 약 29% 감소하였다. 이는 재생 시 엔진효율 저하와 필터내 입자상 물질 연소를 위하여 추가적인 연료가 분사된 결과로 판단된다.

참고문헌

- (1) 국립환경과학원, “국가 대기오염물질 배출량 산정자료- CAPSS”, (2013).
- (2) 심성훈, 정상현, “DPF 재생을 위한 버너-산화촉매 복합 적용”, 한국연소학회지, 제15권, 제3호, pp. 25-31(2010).
- (3) 국립환경과학원, “교통환경법령집”, (2005).
- (4) W. Lindinger, A. Hansel and A. Jordan, “On-line monitoring of volatile organic compounds at pptv levels by means of Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometer (PTR-MS) Medical applications, food control and environmental research”, International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes, Vol. 173, pp. 191-241 (1998).
- (5) 윤관훈, “양성자전이 질량분석법 고찰”, 한국대기 환경학회, 추계학술대회논문집, pp. 204-208 (2006).
- (6) John T. Jayne, Danna C. Leard, Xuefeng Zhang, Paul Davidovits, Kenneth A. Smith, Charles E. Kolb, and Douglas R. Worsnop, “Development of an Aerosol Mass Spectrometer for size and composition analysis of submicron particles”, Aerosol Science and Technol-

ogy 33:49-70 (2000).

- (7) Jose L. Jimenez, Roya Bahreini, David R. Cocker III, Hong Zhuang, Varuntida Varutbangkul, Richard C. Flagan, John H. Seinfeld, Colin D. O'Dowd, and Thorsten Hoffmann, "New particle formation from photooxida-

tion of Diiodomethane (CH₂I₂)", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 108(D10): 4318 (2003).

- (8) 이진욱, 정민원, 정용일, 차경옥, "디젤 승용차량 시험 모드별 극미세입자 배출 특성 해석", 한국 자동차공학회, 제16권, 제1호, pp. 114-120 (2008).