

DPF 재생이 경유승용차의 미세입자 배출에 미치는 영향 연구

권 상 일^{*1)} · 박 용 희²⁾ · 김 종 춘²⁾ · 이 창 식¹⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 국립환경과학원 교통환경연구소²⁾

Effect of DPF Regeneration on the Nano Particle Emission of Diesel Passenger Vehicle

Sangil Kwon^{*1)} · Yonghee Park²⁾ · Jongchoon Kim²⁾ · Changsik Lee¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeongseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-170, Korea

(Received 17 October 2006 / Accepted 14 November 2006)

Abstract : Nano-Particles are influenced on the environmental protection and human health. The relationships between transient vehicle operation and nano-particle emissions are not well-known, especially for diesel passenger vehicles with DPF. In this study, a diesel passenger vehicle was measured on condition of DPF regeneration and no regeneration on a chassis dynamometer test bench. The particulate matter (PM) emission from this vehicle was measured by its number, size and mass measurement. The mass of the total PM was evaluated with the standard gravimetric measurement method while the total number and size concentrations were measured on a NEDC driving cycle using Condensation Particle Counter (CPC) and EEPS. Total number concentration by CPC was 1.5×10^{11} N/km, which was 20% of result by EEPS. This means about 80% of total particle emission is consist of volatile and small-sized particles (<22nm). During regeneration, particle emission was 6.2×10^{12} N/km, was emitted 400 times compared with the emission before regeneration. As for the particle size of 22 ~ 100nm was emitted mainly, showing peak value of near 40nm in size. This means regeneration decreased the mean size of particles. Regarding regeneration, PM showed no change while the particle number showed about 6 times difference between before and after regeneration. It seems that the regeneration influences on particle number emissions are related to DPF-fill state and filtration efficiency.

Key words : Nano particle(미세입자), DPF(매연저감장치), PM(입자상물질), Condensation particle counter(입자개수측정장치), EEPS(입경측정장치), Regeneration(재생)

1. 서 론

현재 경유차에서 배출되는 입자상물질에 대한 국제기준은 입자크기에 관계없이 전체 입자상물질에 대한 중량단위규제를 사용하고 있으나, 향후 DPF 장착 자동차에 대한 중량측정의 한계 및 인체 위해성에 대한 중요성이 강조되어 미세입자 규제방법에

대한 연구가 전 세계적으로 광범위하게 연구되고 있으며,¹⁻³⁾ UNECE-GRPE 미세입자 측정 프로그램(PMP:Particulate Measurement Program)에서는 향후 디젤자동차의 미세입자 규제 설정을 위한 공동연구를 수행하고 있다.⁴⁾ 이 프로그램의 주요 목표는 자동차로부터의 미세입자 배출 억제를 위한 인증제도의 설정이다.

UNECE-GRPE 미세입자 측정 프로그램(PMP:

*Corresponding author, E-mail: heatksi@me.go.kr

Particulate Measurement Program)에서는 이미 모든 미세입자 측정장치에 대한 법규 적용성 검토를 통하여 규제에 적합한 장치 선정 및 시험방법을 설정하였고, 이에 대한 검증시험을 실시하였다.

본 연구에서는 PMP에서 추천하고 있는 시험방법에 따라 정용량 시료채취장치로부터 채취한 배출가스를 회석장치와 CPC(Condensation Particle Counter)를 이용하여 디젤자동차로부터 배출되는 순수탄소입자를 측정하였고 규제대상에서 제외된 휘발성입자 및 22nm 이하의 미세입자 거동을 파악하기 위하여 EEPS(Engine Exhaust Particle Sizer)에 측정된 미세입자 개수 및 입경 결과와 비교·분석하였다.

또한 매연여과장치(DPF) 장착 경유승용차의 미세입자 배출특성에 가장 영향을 미치는 재생의 영향을 파악하기 위하여 재생조건에서의 미세입자 개수 및 입경 특성을 조사하였다. 이러한 연구는 향후 저공해기술 평가 기준 및 경유차 미세입자 규제기준 마련의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 시험장치 및 방법

2.1 시험차량 및 방법

시험은 DPF 장착된 1대의 디젤승용차를 사용하였으며, 시험차량의 제원은 표 1과 같다.

시험은 규제시험방법에 따라 시험차량을 온도 20~30°C 및 습도 50%로 제어된 시험실에서 6시간 이상 소킹후 한국과 유럽에서 규제모드로 사용하는 NEDC(ECE15+EUDC) 모드에 의해 주행하면서 측정하였고, 그림 1에 NEDC 주행모드를 나타내었다.

모든 시험은 차대동력계를 사용하여 자동차로부

터 배출되는 배기가스를 측정하였고, 정확한 총입자상물질(PM) 측정을 위하여 시료채취 온도는 회석공기에 의해 52°C이하로 제어하였다. 총입자상물질은 자동차가 주행하면서 배출되는 배기가스를 불소탄화로 코팅된 유리섬유필터에 통과시켜 채취하고 이를 온습도가 제어된 챔버에서 8시간 웨이팅후 전자저울을 사용하여 전후 필터 무게로 측정하였다.

DPF의 포집상태에 따른 영향을 파악하기 위하여 시험차량은 재생전, 재생 및 재생후 각 DPF 조건에서 연속으로 매일 1회씩 시험을 진행하였다. 또한 DPF의 자동 재생 조건에 도달시키기 위해 매일 50km/h 이하의 저속주행후 시험하였으며 재생시에는 가스상물질이 급격히 증가하므로 주행시 DPF 재생 확인을 위하여 CO, NOx, CO₂ 등의 가스상물질을 측정하였다. 각 조건에서의 입자 배출 측정은 규제대상인 약 23nm 이상의 탄소 성분 입자를 측정하는 CPC와 탄소 성분 입자, 22nm 이하의 극미세입자 및 휘발성입자를 모두 측정 가능한 EEPS를 이용하여 비교·분석하였다.

Table 1 Specification of test vehicle

Model	NF Sonata 2.0 Diesel
Engine type	D4EA
Engine displacement	1991cc
Max. power	143/4000(ps/rpm)
Transmission	A4
Aftertreatment equipment	DOC+DPF
Injection type	DI

2.2 미세입자 측정장치

미세입자를 측정하기 위한 장치 구성도를 그림 2에 나타내었고, 싸이클론, 1, 2차 회석터널, 증발튜브 및 CPC(Condensation Particle Counter, TSI 3010D)로 구성되어 있는 입자 개수 측정장치와 입자 개수 및 입경을 동시에 측정할 수 있는 EEPS(Engine Exhaust Particle Sizer, TSI)를 이용하여 실시간으로 동시에 측정하였다. CPC를 이용한 입자 개수 측정은 PMP의 추천에 따라 시료를 회석터널내의 총입자상물질 측정 프로브 근처에서 채취하였고, 2.5 μ m 이상 크기의 입자를 제거하기 위해 싸이클론이 사용되었다. 1차 회석터널은 입자의 응축을 피하기 위

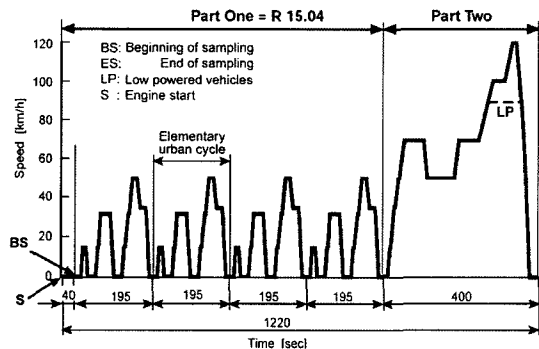


Fig. 1 Driving patten of NEDC(ECE15+EUDC) mode

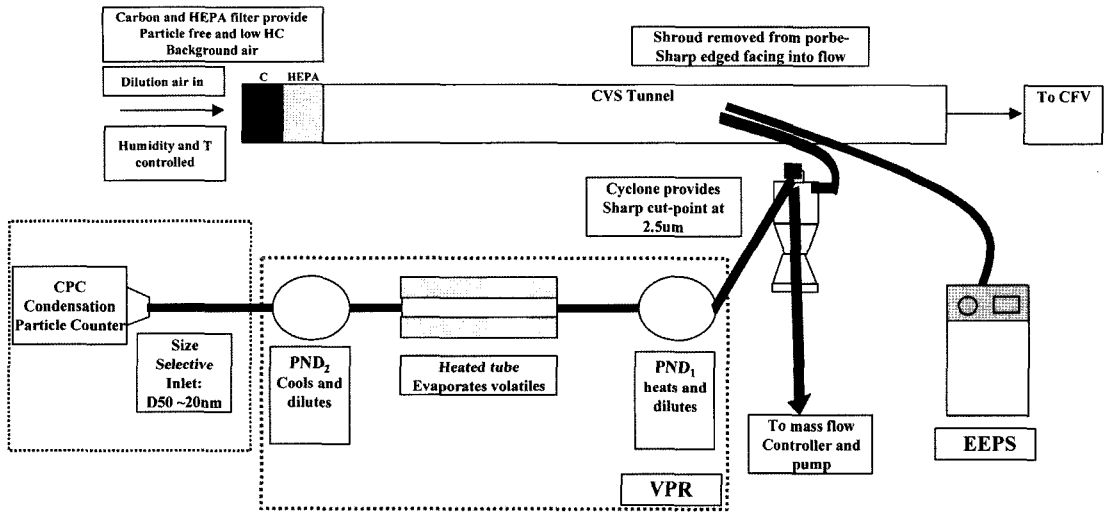


Fig. 2 Schematic diagram of particle measurement system

하여 채취된 시료를 $150 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 가열시키면서 회석 하였으며, 휘발성 입자를 제거하기 위하여 300°C 로 가열하는 증발튜브를 사용하였다.⁵⁾ 휘발성 입자의 경우 회석온도에 따라 측정되는 농도 변화가 커서 규제대상에 적합하지 않다는 판단하에 PMP 규제 시험방법에서는 측정대상에서 제외되었다.⁶⁾

마지막으로 CPC로 들어가는 시료가 온도 35°C 이하 및 개수농도가 $104(\text{N}/\text{cm}^3)$ 이 되도록 2차 회석터널에 회석한후 측정효율이 D10(10% 효율) $16 \pm 1\text{nm}$, D25(25% 효율) $18 \pm 2\text{nm}$, D50(50% 효율) $23 \pm 3\text{nm}$, D90(효율) $37 \pm 4\text{nm}$ 가 되는 CPC(TSI 3010D)를 사용하여 입자 개수농도를 연속으로 측정하였다.

그러나 EEPS의 경우 회석터널에서 직접 시료를 채취하여 측정하여 순수 탄소 입자 외에 휘발성 입자를 포함하여 측정하였다.

미세입자를 측정하는 CPC의 원리는 입자를 하나씩 레이저 빔에 통과시켜 일정한 각도에서 반사되는 빛을 분석하는 것이다. 단 이러한 방법은 300nm 이상의 입자만 측정가능하므로 입자에 액체를 농축함으로써 측정 가능한 크기로 성장시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 CPC의 경우 미세입자를 부탄올 포화증기로 덮혀 있는 가열챔버를 통과시킴으로서 입자와 부탄올증기를 혼합하고 이 혼합기를 급속히 냉각시킴으로서 성장시킨다. 위와 같은 CPC의 측정원리를 그림 3에 나타내었다.

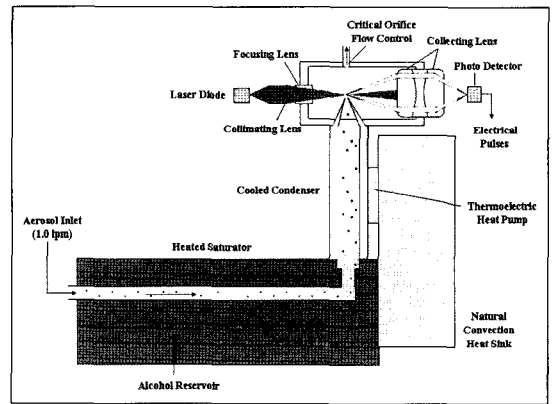


Fig. 3 Schematic diagram of CPC

3. 연구결과 및 고찰

3.1 입자 개수 농도

CPC를 이용하여 NEDC 모드를 주행하면서 배출되는 입자 개수농도를 측정하여 DPF 재생전과 재생시 비교한 결과를 그림 4에 나타내었다. 굵은선은 차량 속도/시간 궤적을 나타낸다. DPF 재생전에는 엔진이 냉간시동 상태인 초기 400초 이내에서 대부분 배출되었고, 엔진이 충분히 예열된 이후에는 최고속도 $120\text{km}/\text{h}$ 구간을 제외하고는 거의 배출되지 않았다. 이는 엔진이 예열된 이후에는 DPF에 의해 입자가 대부분 저감됨을 보여주었고 초기 엔진 냉간상태 구간에서는 가속시 입자가 많이 배출되는 경향을 보였다. 그러나 DPF 재생시에는 600초 부근

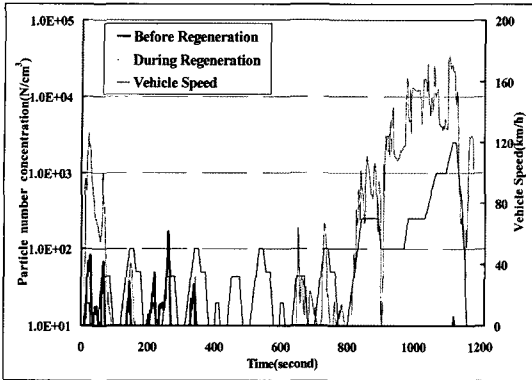


Fig. 4 Comparison of real time particle number concentration between before and during DPF regeneration according to ECE15+EUDC mode driving

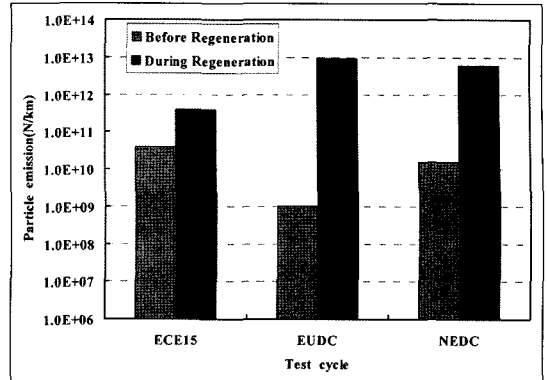


Fig. 6 Comparison of particle emission between before and during DPF regeneration according to test cycle

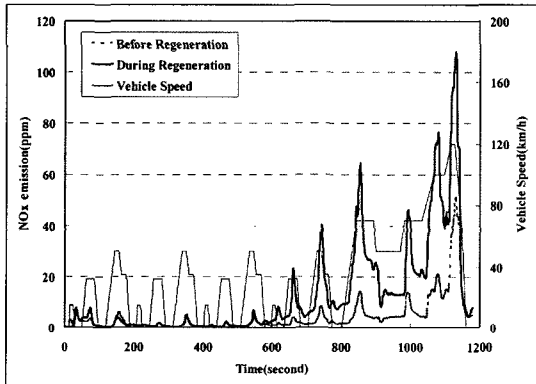


Fig. 5 Comparison of real time NOx emission between before and during DPF regeneration according to ECE15+EUDC mode driving

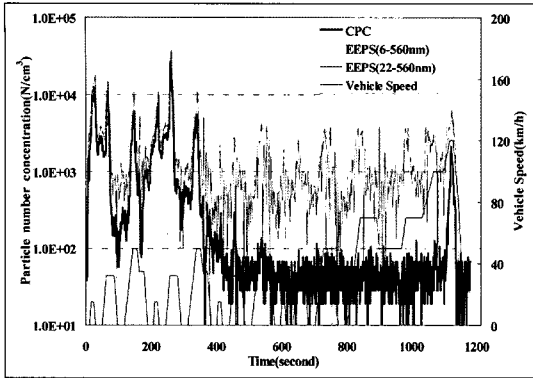
에서 재생이 시작되어 그 이전 구간에서는 재생전과 비슷한 결과를 보였으나 재생이 발생한 이후 구간에서는 급격히 입자 발생이 증가하였다.

NEDC 모드는 195초로 구성되어 있는 4개의 기초 도시주행모드(ECE)와 추가도시주행모드(EUDC)로 구성되어 있고, 추가도시주행모드는 고속주행 구간을 대표한다. 그림 6은 각 모드구간별 DPF 재생전·후에서의 입자 배출 비교결과를 보여준다. DPF 재생시의 입자배출은 6.2×10^{12} N/km개로 재생전 1.5×10^{10} N/km보다 400배 이상 높게 배출되었고, 모드별 배출특성에 있어서는 재생전에는 ECE 구간에서 대부분의 입자가 배출되었으나 재생시 결과에서는 그림 4, 및 5에서와 같이 NOx 및 입자의 급격한 증가 결과에서 볼 수 있듯이 재생이 600초 부근에서 시작

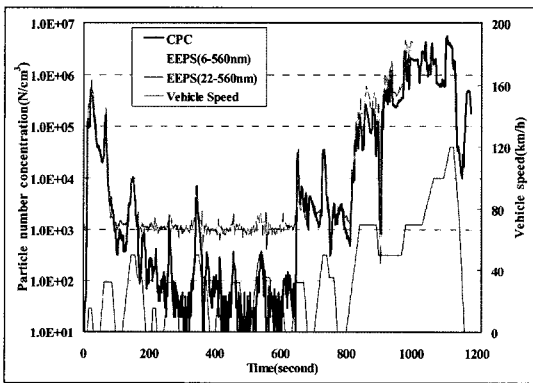
되어 전체 구간에서 활발히 재생이 발생한 780초 이후의 EUDC 구간에서 전체 입자의 약 98%가 배출되었다. 이는 Lim⁷⁾의 연구결과에서와 같이 엔진조건에 관계없이 DPF 장착시 입자 저감 효율이 99% 이상임을 고려할 때 재생이 활발히 발생한 EUDC 구간에서는 그림 4와 같이 입자의 저감이 적어 엔진 연소에 의한 배출보다 재생에 의한 입자 배출이 주를 이루는 것으로 나타났다.

그림 7은 입경별 입자성분별 배출특성을 알아보기 위하여 재생전·후에서 CPC 및 EEPS에 의해 측정된 결과이다. 재생전에는 대부분의 탄소 성분의 입자가 발생하는 시동 초기에는 CPC와 EEPS(22-560nm)에 의해 측정된 결과가 유사한 값을 보였으나 그 이후 구간에서는 EEPS에 의해서만 입자가 측정되어 23nm 이상의 탄소성분의 입자보다 휘발성 입자와 22nm 이하의 입자가 전구간에서 가속시 많이 배출되는 것으로 확인되었다. 그러나 재생시에는 시동 초기와 급격한 재생이 발생한 600초 이후구간에서 CPC와 EEPS(6-560nm)의 결과가 유사한 값을 보였다. 이는 재생시 입자는 휘발성 입자와 22nm 이하의 입자보다 23nm 이상의 탄소성분의 입자가 주를 이루는 것으로 보인다.

또한 그림 8에서와 같이 CPC에 의해 측정된 입자 개수는 1.5×10^{10} N/km로 EEPS에 의해 측정된 전체 입자 개수 7.6×10^{10} N/km의 20% 수준으로 이는 중량 측정방법에 의해 측정된 PM의 약 80%는 PMP 측정에서 제외된 휘발성 입자 및 22nm 이하의 입자로 구성되어 있음을 보여준다. 각 모드별 특성에 있어서



(a) Before DPF regeneration



(b) During DPF regeneration

Fig. 7 Comparison of real time particle number concentration between before and during DPF regeneration according to measurement system

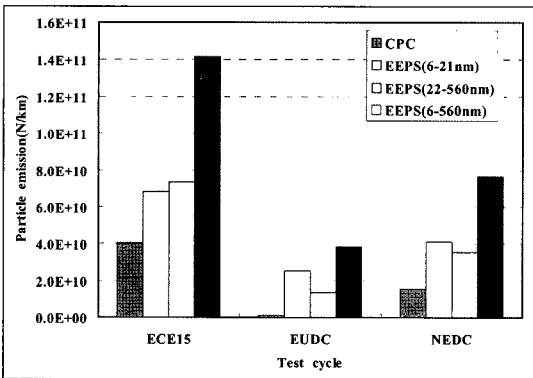


Fig. 8 Particle emission of before DPF regeneration according to test cycle

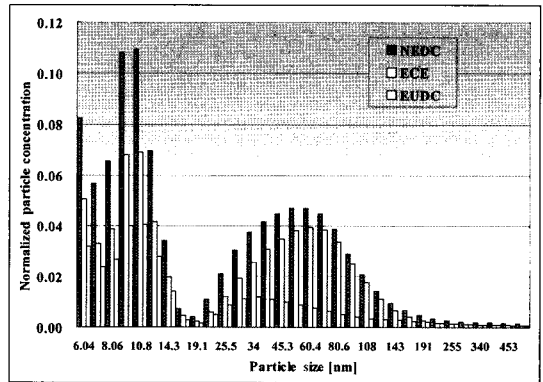
는 전체 배출 입자중 23nm 이상의 탄소 성분의 입자는 ECE 구간에서는 약 28%인데 반해 EUDC 구간에서는 2%로 고속구간에서는 대부분 휘발성입자가

많이 배출되는 것으로 판단된다.

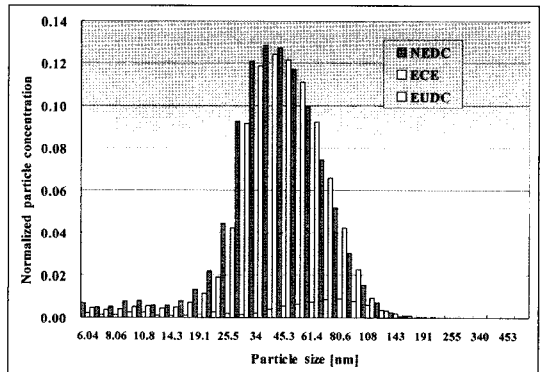
3.2 입경 분포

NEDC 모드를 주행하면서 EEPS에 의해 측정된 입자의 각 입경별 특성을 그림 9에 나타내었다. 재생전에는 22nm 이하의 작은 입자가 많이 배출되었고 그 이상 크기의 입자에서는 대부분 23~100nm 이하의 입자가 ECE 구간에서 배출되었고 60nm 부근에서 최고값을 나타내었다. 반면 EUDC 구간에서는 입경이 작은 휘발성입자들로 구성되어 있어 그보다 작은 34nm에서 최고값을 보였다.

그러나 재생시에는 시동초기 탄소 성분의 입자가 배출되는 ECE 구간에서는 80nm 부근에서 최고값을 보였으나 재생에 의한 탄소 성분 입자가 발생한 EUDC 구간에서는 45nm 부근에서 최고값을 보여 재생에 의해 발생된 입자크기는 재생전 엔진연소에 의해 발생하는 입자보다 작음을 알 수 있었다. 또한,



(a) Before DPF regeneration



(b) During DPF regeneration

Fig. 9 Particle size distribution according to test cycle

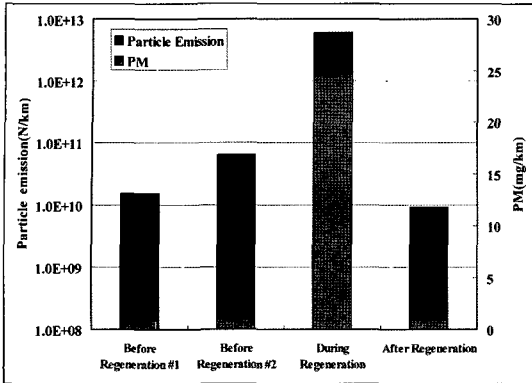


Fig. 10 Particle number and mass variability affected by regeneration

재생전에는 ECE 구간이 전체 입경특성을 대표하는데 반해 재생시에는 EUDC 구간이 전체 입경특성을 대표하는 것으로 나타났다.

3.3 입자 개수 및 PM 비교

그림 10에서와 같이 DPF 재생전·후에서 매일 1회씩 측정된 입자개수 및 PM 배출특성은 재생전에 비해 재생시 PM은 약 25배 입자는 약 400배 높게 배출되었고, 특히 재생전·후에서 PM은 변화가 거의 없었으나 입자개수는 약 6배까지 차이가 발생하였다. 이는 DPF의 포집상태와 필터효율에 의한 영향으로 판단되며 향후 미세입자의 규제기준 설정에 중요한 변수가 될 것으로 판단된다.

4. 결론

DPF 재생 전·후에서의 ECE15+EUDC 모드 주행시 배출되는 미세입자 개수농도, 입자크기 및 PM 중량농도를 측정하였고 그 결과는 다음과 같다.

- 1) DPF 재생전에는 엔진이 냉간시동 상태인 초기 400초 이내에서 대부분 배출되었고, 엔진이 충분히 예열된 이후에는 최고속도 120km/h 구간을 제외하고는 거의 배출되지 않았다. 그러나 DPF 재생시에는 600초 부근에서 재생이 시작되어 그 이전 구간에서는 재생전과 비슷한 결과를 보였으나 재생이 발생한 이후 구간에서는 급격히 입자 발생이 증가하였다.
- 2) 각 모드 구간별 DPF 재생전·후에서의 입자 배

출 비교 결과 DPF 재생시의 입자배출은 6.2×10^{12} N/km개로 재생전 1.5×10^{10} N/km 보다 400배 이상 높게 배출되었고, 모드별 배출특성에 있어서는 재생전에는 ECE 구간에서 대부분의 입자가 배출되었으나 재생시 결과에서는 NOx 및 입자의 급격한 증가 결과에서 볼 수 있듯이 재생이 600초 부근에서 시작되어 전체 구간에서 활발히 재생이 발생한 780초 이후의 EUDC 구간에서 약 98%의 입자가 배출되었다. 이는 DPF 장착시 입자 저감 효율이 99% 이상임을 고려할 때 재생이 활발히 발생한 EUDC 구간에서는 입자의 저감이 적어 엔진 연소에 의한 배출보다 재생에 의한 입자 배출이 주를 이루는 것으로 나타났다.

- 3) 재생전 입경별, 입자성분별 측정결과 대부분의 탄소입자가 발생하는 시동 초기에는 CPC와 EEPS(22-560nm)에 의해 측정된 결과가 유사한 값을 보였으나 그 이후 구간에서는 EEPS에 의해서만 입자가 측정되었다. 그러나 재생시에는 시동 초기와 급격한 재생이 발생한 600초 이후구간에서 CPC와 EEPS(6-560nm)의 결과가 유사한 값을 보였고 이는 재생시 입자는 휘발성입자와 22nm 이하의 입자보다 23nm 이상의 탄소성분의 입자가 주를 이루는 것으로 보인다.
- 4) 입경별 입자 특성에 있어서는 재생전에는 22nm 이상의 입자들중 대부분 23~100nm 이하의 입자가 ECE 구간에서 배출되었고 60nm 부근에서 최고값을 나타내었다. 반면 EUDC 구간에서는 입경이 작은 휘발성입자들로 구성되어 있어 그보다 작은 34nm에서 최고값을 보였다.

그러나 재생시에는 시동초기 탄소 성분의 입자가 배출되는 ECE구간에서는 80nm 부근에서 최고값을 보였으나 재생에 의한 탄소 성분 입자가 발생한 EUDC 구간에서는 45nm 부근에서 최고값을 보여 재생에 의해 발생된 입자크기는 재생전 엔진연소에 의해 발생하는 입자보다 작음을 알 수 있었다.

References

- 1) Z. Samaras, "Overview of the EU DG TREN Particulate Project," 7th Proc. ETH Zurich Conference on Combustion Generated Nano-

- particles, 2003.
- 2) A. G. Konstandopoulos, "The Diesel Exhaust Aftertreatment(DEXA) Cluster of the EU Growth Programme," 7th Proc. ETH Zurich Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 2003.
 - 3) Y. Kumagai, "Studies on Retrofit of CR-DPF and Diesel Particle Size Measurements," 5th Proc. ETH Zurich Workshop on Combustion Generated Nanoparticles, JCAP, 2001.
 - 4) J. M. Dunne, "The GRPE Particulate Measurement Programme: Phase 2 Conclusions and Outlook," 7th Proc. ETH Zurich Workshop on Combustion Generated Nanoparticles, 2003.
 - 5) Markus KASPER, "The Number Concentration of Non-Volatile Particles Design Study for an Instrument According to the PMP Recommendation," SAE 2004-01-0960, 2004.
 - 6) GRPE, "Conclusion on Improving Particulate Mass Measurement Procedures and New Particle Number Measurement Procedures Relative to the Requirements of The 05 Series of Amendments to Regulation No. 83," 48th GRPE Agenda Item 2, 2004.
 - 7) M. S. Lim, J. H. Yoo, M. D. Eom, J. W. Hwang and Y. E. Kim, "Characteristics of Nanoparticles Exhausted from Heavy-duty Diesel Vehicles with Low Emission Technology," Transactions of KSAE, Vol.20, No.2, pp.225-236, 2004.
 - 8) H. Kim, S. Lee, J. Kim, G. Cho and N. Sung and Y. Jeong, "Measurement of Size Distribution of Diesel Particles: Effects of Instruments, Dilution Methods, and Measuring Positions," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.2, pp.119-124, 2005.