

산화촉매를 장착한 대형 CNG 엔진의 나노입자 배출특성 Nanoparticles Emission Characteristics of Heavy-Duty CNG Engine with Oxidation Catalyst

김태준 · 김화남 · 최병철
T. J. Kim, H. N. Kim and B. C. Choi

(접수일 : 2008년 7월 21일, 수정일 : 2008년 9월 29일, 채택확정 : 2008년 10월 21일)

Key Words : Compressed Natural Gas Engine (압축천연가스 엔진), Oxidation Catalyst (산화촉매), Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), Particulate Matters (입자상물질), Particle Size Distribution (입자수분포)

Abstract : Natural gas has been considered one of the most promising alternative fuels for transportation because of its abundance as well as its ability to reduce regulated pollutants. We measured emission characteristics of nanoparticles from lean burn H/D(Heavy-Duty) CNG (Compressed Natural Gas) engine equipped with oxidation catalysts. The experiments were carried out to measure the emission and engine performance according to the ESC test cycle. The CO and THC conversion efficiencies on the best catalyst in the ESC test cycle achieved about 91 % and 83 %, respectively. From the measurement by the SMPS, the number of nanoparticles emitted from H/D CNG engine is reduced by about 99 % which is more than that of 2.5 L diesel engine. The particle number concentrations of H/D CNG engine were almost nanoparticles. Nanoparticles smaller than 30 nm emitted from the H/D CNG engine and diesel engine equipped with a CDPF(Catalyzed Diesel Particulate Filter) were quite similar. However, the particles bigger than 30nm from the CNG engine were smaller than the particles from diesel engine equipped with a CDPF. The higher the CNG engine load, the lower the particle number from engine-out, but it increased slightly at full load.

1. 서 론

자동차 배기가 지구 환경오염에 차지하는 비중은 자동차의 보급이 증가함에 따라 점차 커져가고 있다. 한편 수송분야의 에너지 소비율도 지속적으로 증가하고 있다. 그리고 최근의 유가는 신흥국가에서의 에너지 수요 증가 등으로 급격하게 상승하고 있다. 이에 따라 석유계 대체연료 개발의 필요성이 급부상하고 있고, 자동차 선진국에서는 배출가스와 연비 규제를 강화하고 있어, 엔진의 연소 개선과 배출가스 정화를 위한 고성능의 촉매개발이 필요하다^{1,2)}.

자동차용으로 사용하는 석유계 대체연료에는 천연가스, 알코올, DME(dimethylether), 바이오디젤³⁻⁵⁾, 수소 등을 들 수 있다. 이중 압축천연가스

(Compressed natural gas, CNG)는 메탄(CH₄)을 주성분으로 하는 C1 탄화수소계 연료이며, 소량의 에탄(C₂H₆), 프로판(C₃H₈) 및 부탄(C₄H₁₀) 등이 함유되어 있다. 천연가스는 매장지역이 석유계 연료처럼 중동지역에 편중되어 있지 않고 세계 각지에 분포되어 있으며, 매장량도 풍부하여 장기적인 공급이 가능하여 자동차연료로서 청정성과 경제성을 모두 갖춘 현실성 있는 대체연료이다. CNG 연료의 물성은 옥탄가가 높고(RON : 120-136) 세탄가는 낮아 전기불꽃점화의 오토사이클 연소에 적합하며, 탄소성분이 적어 기존의 가솔린 및 디젤연료에 비해서 HC와 CO는 30-50 %, CO₂는 20-30 % 정도 적게 배출되는 것으로 알려져 있다. 연료가 기상이므로 공기와 혼합하기 쉽고 국부적으로 산소결핍 영역을 형성하지 않아 매연과 입자상물질의 배출이 적다^{6,7)}.

국내의 경우, 입자상물질 저감과 지구온난화에 대한 정책대안으로 전국 주요 도시지역 시내버스를

최병철(책임저자) : 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : bcchoi@chonnam.ac.kr, Tel : 062-530-1681
김태준, 김화남 : 전남대학교 대학원 기계공학과

전량 천연가스 버스로 대체해 나가고 있다. 2007년 6월 현재 천연가스 버스는 약 15,000대 보급되어 도시 대기 오염원을 개선하고 있다⁷⁾. 천연가스 자동차는 가솔린 엔진에 비하여 적은 배출가스 배출특성을 나타내지만, 린번 CNG 엔진에서 소량으로 배출되는 acetaldehyde, formaldehyde의⁸⁾ 저감이 필요하다. 그리고 미연탄화수소 대부분이 메탄으로 가솔린이나 디젤 엔진에서 배출되는 고분자 탄화수소보다 촉매에서 산화하기가 힘든 단점이 있으므로, 천연가스 자동차 전용 산화촉매(oxidation catalyst)가 필요하다⁹⁾. CNG 엔진에서 배출되는 PM량은 DPF(Diesel Particulate Filter)를 장착한 디젤엔진과 비슷한 배출특성을 나타내며, CNG 엔진에서 배출되는 입자의 크기는 매우 작은 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 입자의 크기가 작을수록 표면적의 증가로 인하여 인체에 유해도가 증가하기 때문에 CNG 엔진에서 배출되는 나노입자에 대한 입자수농도 분포 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 산화촉매를 장착한 8 L 터보차저 인터쿨러 린번 CNG 엔진의 배출가스 배출특성 그리고 산화촉매 후단에서 배출되는 배출가스 및 입자수농도 분포와 이들의 정화효율을 파악한다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 배출가스 배출특성과 입자상물질의 입자수농도 분포 특성을 파악하기 위한 배기계통의 실험장치 구성도이다. 실험에 사용한 CNG연료는 130 L, 4개의 고압 용기에 약 20 MPa로 충전한 후 엔진에 공급압력은 0.8 MPa로 감압하여 공급한다.

Table 1은 실험에 사용한 CNG 엔진의 제원을 나타내고 있다. CNG 엔진실험에 사용한 엔진동력계는 와전류(EC) 방식의 440 kW급 엔진동력계(Fuchino, ESF-600)이며, 배출가스 분석에는 가스분석기(Horiba, MEXA-9100DEGR), 입자상물질(particulate matter, PM) 측정기 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, TSI, L-DMA 3081, 3025 CPC) 등이 있다. 배출가스 농도 측정에서 CO와 CO₂분석은 NDIR 방식, THC분석은 FID 방식, 그리고 NO_x 분석은 CLD 방식을 채용하고 있다.

엔진 출구(산화촉매 전단)와 산화촉매 후단에서 각각의 샘플링 관을 통하여 배출가스 분석기를 이용하여 배출가스 농도를 측정하였으며, 각 산화촉매 전단과 후단의 입자수농도 분포는 SMPS를 이용하

여 측정하였다. 또한, 엔진에서 배출되는 가스가 산화촉매에서 산화할 때 반응열에 의한 온도 상승을 측정하기 위하여 산화촉매 전단과 후단에 열전대(K-type, 직경 1 mm)를 설치하여 배출가스 온도를 측정하였다. 엔진에서 배출되는 입자수와 배출가스 온도를 낮추기 위하여 희석장치를 이용하였다. 희석장치 전까지의 샘플링 관에서 입자의 응축을 막기 위하여 관의 온도를 150 ± 5 °C로 가열하였다. 배출가스는 HEPA filter로 고체상 입자가 제거된 정화된 공기로 12 배 희석 후, CPC(Condensational Particle Counter)에서 입자수농도를 측정하였다. 입자수농도 분포 측정값은 엔진이 안정화된 이후 5번을 측정하여 평균값을 제시하였다. 입자의 직경 측정범위는 10.6-385 nm이다. 실험에 사용한 SMPS 및 희석장치의 제원은 Table 2에 나타내고 있다.

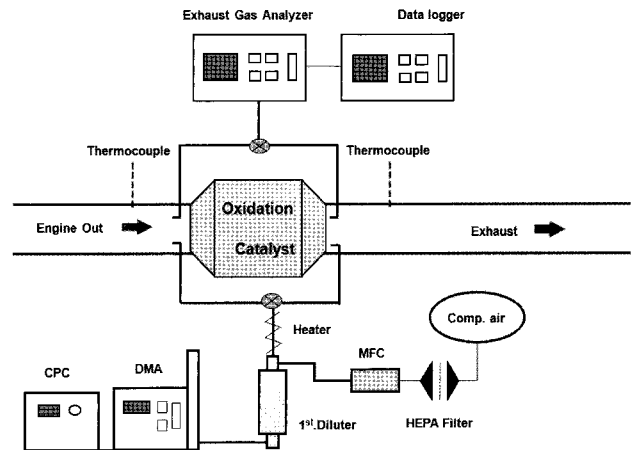


Fig. 1 Exhaust sampling and dilution system used in measurements

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specifications
Engine Type	CNG 6 cylinder
Bore × Stroke (mm)	111 × 139
Displacement (L)	8.071
Compression ratio	10.5 : 1
Aspiration	T/C & Intercooler
Engine model	DOOSAN GE08TI
Valves per cylinder	2(intake, exhaust valve)

실험에 사용한 엔진의 실험모드는 ESC cycle로 13개의 test mode로 구성되어 있으며, 엔진의 전부하 성능실험에서 획득한 출력선도로부터 3 개의 rpm 운전영역을 선정하였으며(A : 1450, B : 1800,

C : 2150 rpm) 각 모드에 따른 부하조건(25, 50, 75, 100 %)으로 구성되어 있다.

Table 2 Specifications of SMPS and dilutor

SMPS(Model : 3080, TSI)	
Particle size range (L-DMA 3081)	Adjustable : 10 to 1000nm
Upper concentration limit (3025A CPC)	10 ⁵ (particles/cm ³)
Scanning time	30 to 300 sec
Dilutor (Ejector type, CNU)	
Dilutor	1st dilutor
Dilution ratio	1:12

Table 3 Specifications of catalysts

Catalyst name	PGM (g/L, ratio)	Additive
CNG-A	2 g/L, 2Pd/1Pt	-
CNG-B		C, L, Z
CNG-C		C, L, N, Z

Table 3는 실험에 사용한 3 종류의 촉매 사양을 나타내고 있다. 3종의 산화촉매는 (주)오텍에서 제조하였다. 각 촉매의 귀금속 함량은 동일하나 조촉매의 조성 및 함량이 각각 다르며 촉매의 크기는 직경 241 mm×길이 152 mm 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CNG 엔진 배출특성

Fig. 2는 ESC 13 모드 운전 조건에서 엔진출구의 CO 배출 농도 및 촉매정화효율을 나타내고 있다. 아이들 모드인 1 모드를 제외한 각 모드의 CO 배출 농도는 500 ppm 미만으로 낮다. CO의 배출은 당량비가 높은 1 모드(당량비 0.9)의 아이들링 시 560-570 ppm으로 가장 높으며, 당량비가 낮은 10 모드에서 가장 낮은 424-444 ppm의 배출농도를 나타내고 있다. CO는 각 rpm 운전영역의 25 % 부하조건(당량비 0.7-0.73)에서 비교적 높게 배출되고 있다. 산화촉매 후단에 배출되는 CO 농도는 3종류의 촉매 모두 50 ppm 미만 이었다.

ESC 13 모드 운전영역에서의 CO 정화효율은 약 90 %로 높다. 배출가스 온도가 약 200 °C로 낮은 1 모드에서도 90 % 이상의 높은 정화효율을 나타내

고 있다. 운전영역 중에 10 모드의 정화효율이 가장 낮는데, 이는 엔진에서 배출되는 CO의 농도가 다른 운전모드에 비하여 낮았으며, 전체 운전조건 중 가장 높은 SV(Space velocity)을 가지는 구간이기 때문에 상대적으로 낮은 정화효율을 나타냈다. 실험에 사용한 3종류의 산화촉매 모두 ESC 13 모드 운전 조건에서의 정화효율은 약 90 % 정도로 큰 차이는 없었다.

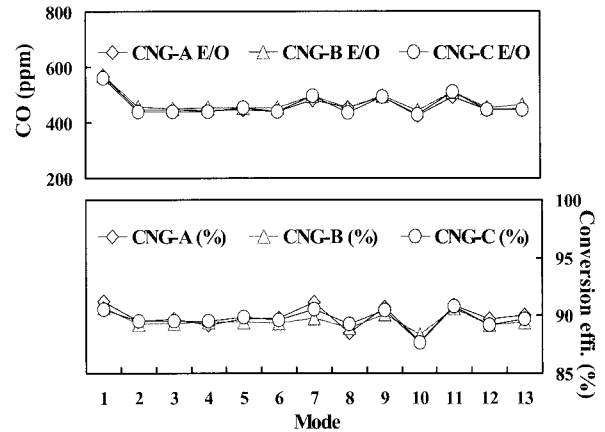


Fig. 2 CO concentrations and conversion efficiency at the ESC 13 modes

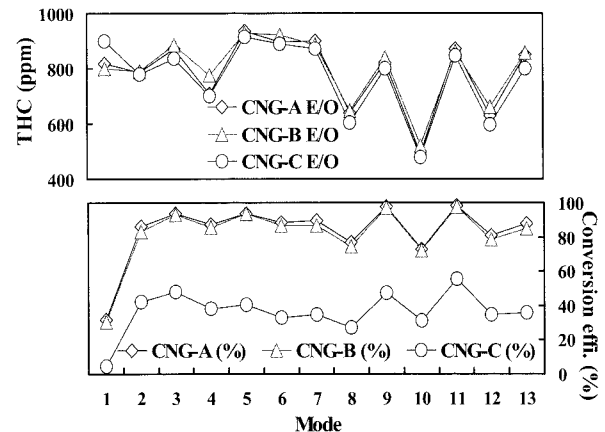


Fig. 3 THC concentrations and conversion efficiency at the ESC 13 modes

Fig. 3은 ESC 13 모드 운전 조건에서 엔진출구의 THC 배출 농도 및 촉매정화효율을 나타내고 있다. THC 배출특성은 혼합기의 농도가 상대적으로 높고 배출가스 온도가 낮은 1 모드에서 높은 농도의 THC 배출특성을 보이며, 엔진의 부하율이 25, 50 % 조건인 3, 5, 7, 9, 11, 13 모드에서 높게 배출되고 있다. THC 농도는 1450 rpm, 50 % 부하조건인 5 모드에서 916-936 ppm 으로 가장 높으며, 2150

rpm, 100 % 부하조건인 10 모드에서 477-520 ppm 으로 가장 낮게 배출된다.

THC의 정화효율은 CNG-A촉매와 CNG-B촉매는 비슷하지만, CNG-C촉매 정화효율은 다른 촉매들에 비하여 약 50 % 정도 낮은 정화효율을 나타내고 있다. 모든 산화촉매에서 아이들링 운전모드의 경우 약 30 % 정도의 낮은 정화효율을 나타내고 있는데, 이는 산화촉매가 THC를 산화시킬 수 있는 활성화 온도에 도달하지 못하였기 때문이다. 아이들링 모드인 1 모드를 제외한 모드에서 CNG-A촉매와 CNG-B촉매의 THC 정화효율은 약 72 % 이상이며, 특히 9, 11 모드에서 정화효율이 높는데, 이는 부하조건이 100 %인 8, 10 모드에서 부하율이 25 % 조건인 9, 11 모드로 전환되면서 산화촉매 내부의 높은 온도와 25 %로 부하가 낮아짐에 따라 SV가 낮아져 산화촉매에서 산화반응 시간이 길어져 촉매정화효율이 높아졌기 때문이다. CNG-C촉매의 경우 약 50 % 이하의 낮은 정화효율을 나타내고 있는데 이는 산화촉매의 구성성분에 따른 영향으로 판단한다. ESC 13 모드에서 3 종류의 산화촉매 정화효율은 CNG-A, CNG-B, CNG-C가 각각 약 83, 82, 36 %로, CNG-A촉매의 정화효율이 가장 높다.

Fig. 4는 CNG-A촉매와 CNG-C촉매의 전단에서의 NOx의 배출 농도 및 촉매의 전단과 후단에서 측정된 NO와 NOx의 값으로부터 구한 NO₂의 비율을 나타낸 결과이다. NOx 배출특성은 엔진의 부하율이 100 %인 2, 8, 10 모드에서 배출농도는 높게 배출되며, 부하율이 낮을수록 NOx의 배출은 낮아진다. NOx의 배출농도는 1800 rpm, 100 % 부하조건인 8 모드에서 974 ppm으로 가장 높는데, 이는 8 모드의 당량비가 다른 운전모드에 비하여 낮으나, 터보차저에 의한 흡입공기량의 증가에 따라 분사된 연료량이 다른 운전 조건보다 많기 때문에 연소온도의 상승과 혼합기의 불균일성에 따른 국부적인 고온 연소영역의 확대 때문인 것으로 판단한다.

NOx중 NO₂가 차지하는 비율은 엔진 부하율이 25 % 조건인 7, 9, 11 모드에서 높게 나타났다. 2, 8, 10 모드를 제외하면 NO₂ 비율은 산화촉매 전단보다 산화촉매 후단에서 더 낮는데, 이는 디젤산화촉매의 특성과는 반대의 현상이다. 엔진에서 배출되는 NO는 대부분 산화촉매에서 산화하여 NO₂의 비율이 높아져야 하는데, 본 실험에서는 NO₂의 비율이 감소되고 있다. 이는 산화촉매 상에서 저감된 NO₂가 PM 혹은 탄화수소의 산화에 사용되었을 것으로 추측한다.

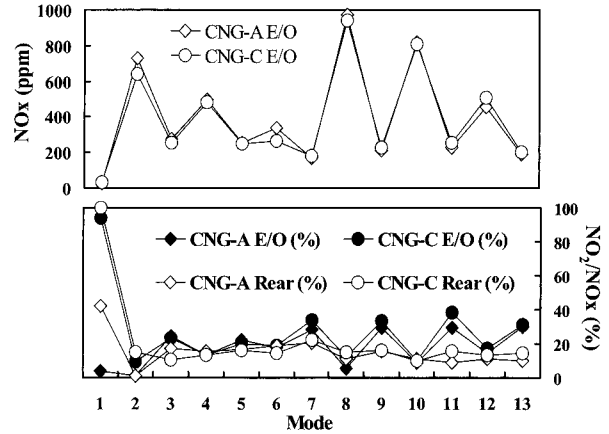


Fig. 4 NOx concentrations and NO₂ conversion ratio at the ESC 13 modes

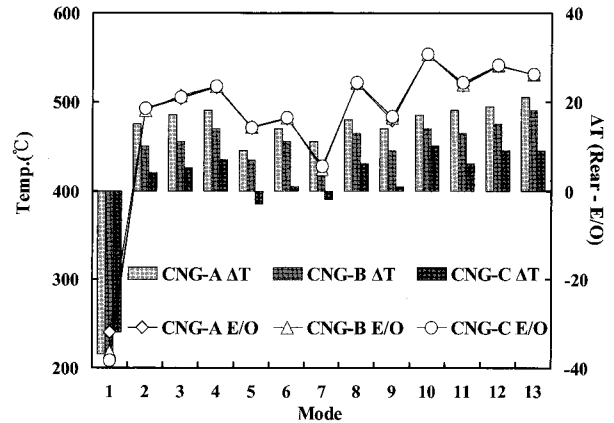


Fig. 5 Exhaust gas temperature of the engine out and temperature differentials between the front and the rear of the catalyts

Fig. 5는 각 산화촉매 전·후단에서 측정된 배출가스 온도와 촉매 전·후단의 온도차를 나타내고 있다. 엔진에서 배출되는 CO, THC 등 불완전 연소 생성물과 중간생성물은 산화촉매 상에서 산화 반응할 때 반응열을 내놓는다. 따라서 산화촉매 전단과 후단의 온도차가 산화촉매에서의 정화효율을 나타낼 척도가 될 수 있다. 산화 촉매 전·후단의 온도차는 다른 촉매들에 비해 THC 정화효율이 낮은 CNG-C 촉매의 온도차가 가장 낮았으며, CNG-A 촉매가 가장 높은 온도차를 나타냈다.

3.2 입자상물질의 배출특성

Fig. 6은 앞선 실험에서 DOC(diesel oxidation catalyst)와 CDPF(catalyzed diesel particulate filter)을 장착한 2.5 L CRDI(common-rail direct injection) 디젤엔진의 PM 배출결과와³⁾ 본 실험의 8

L 린번 CNG 엔진의 입자농도 분포를 비교한 그림이다. CDPF를 장착한 디젤엔진에서 배출되는 가장 높은 입자농도의 최대 정점은 55-65 nm 사이에 있으며, DOC에 의한 입자농도 저감률은 약 11%이다. 그리고 CDPF에 의한 입자의 저감률은 98.3%로 매우 높았다. 이에 비하여 CNG 엔진에서 배출되는 입자농도 분포를 보면 가장 높은 입자농도는 20-30 nm이며, 산화촉매에서의 입자농도 저감률은 약 49.8%로 디젤엔진의 DOC에 의한 저감률보다 높았다. 이는 CNG 연료와 엔진오일에 의해 생성된 SOF 입자 산화와 높은 배출가스온도와 NO₂에 의하여 입자가 산화한 것으로 판단한다. 디젤엔진에서 배출되는 입자의 대부분은 accumulation mode 입자이며, CNG 엔진에서 배출되는 입자의 대부분은 입자상물질의 무게에 영향이 적은 nuclei mode 입자임을 알 수 있다. 20 nm 이하의 입자들은 디젤엔진의 DPF 후단보다 CNG 엔진의 산화촉매 후단에서 더욱 많이 배출되고 있다. 2.5 L 디젤엔진과 본 실험의 CNG 엔진에서 배출되는 입자농도를 비교해보면 CNG 엔진의 입자농도는 디젤엔진에 비해 0.5% 수준으로 배출된다.

량비가 높고 배출가스 온도가 낮아 입자상물질이 더욱 많이 생성된 것으로 판단한다.

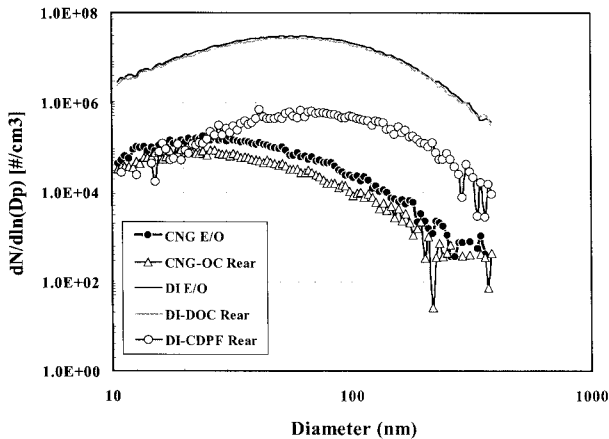


Fig. 6 Comparison of particle size distribution from CNG engine and diesel engine

Fig. 7은 아이들링 모드와 1450 rpm에서 엔진의 부하 변동에 따라 엔진에서 배출되는 입자농도 분포를 나타내고 있다. 입자농도는 아이들링 모드에서 때 가장 높고, 엔진의 부하율이 높을수록 감소하며 75% 부하일 때 가장 낮지만, 100% 부하조건에서 다시 증가한다. CNG 엔진의 당량비는 아이들링을 제외하고 0.6-0.7 수준으로 산소가 풍부한 조건으로 운전하기 때문에 입자의 생성이 적다. 25% 부하의 경우 다른 부하에 비하여 상대적으로 당

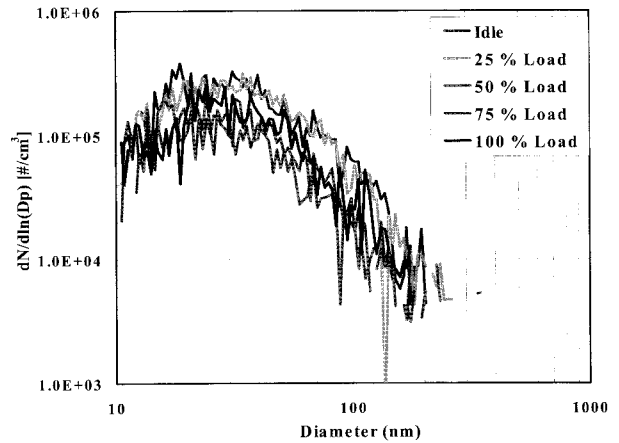


Fig. 7 Particle size distribution from CNG engine out at idle and 1450rpm

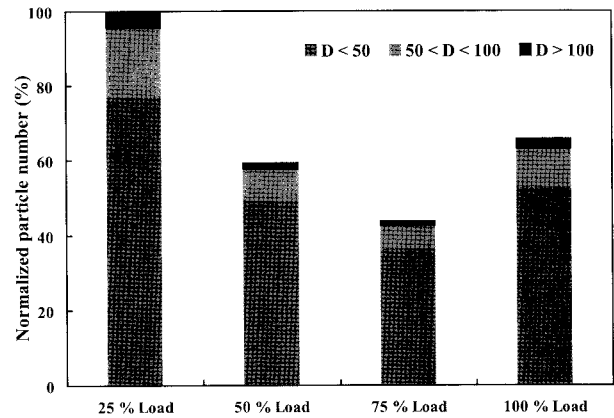


Fig. 8 Normalized particle number from CNG engine out at 1450rpm

Fig. 8은 1450 rpm, 25% 부하조건에서 배출되는 입자수를 100%로 하여 엔진의 부하율에 따라 엔진 출구에서 배출되는 입자농도 비율과 입자크기별 비율을 나타내고 있다. 디젤엔진에서 배출되는 50 nm 이하의 입자수 비율은 약 45% 이하로 배출되었으나³⁾, CNG 엔진에서는 77% 이상으로 배출되는 입자수의 대부분을 차지하고 있다. 25% 부하조건에서 D < 50 nm가 차지하는 비율은 77%, 50 nm < D < 100 nm 사이의 비율은 18.5%, 그리고 입자의 질량에 큰 영향을 미치는 100 nm < D 이상 입자비율은 4.5% 수준으로 적게 배출된다. 부하율 변화에 따른 입자농도는 큰 차이가 나지만 부하율 변화에 따른 50 nm 이하의 입자수의 비는 77-83%, 50 nm와 100 nm 사이는 14-18.5%, 그리고 100

nm 이상의 입자수는 3-4.5 % 수준으로 큰 차이는 없었다.

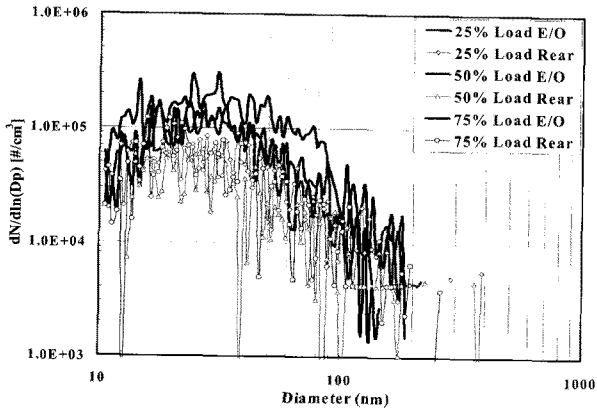


Fig. 9 Particle size distribution of CNG-A catalyst between engine out and rear at 1800rpm

Fig. 9는 1800 rpm에서 부하의 변동에 따른 CNG-A촉매의 전단과 후단에서 배출되는 입자수농도 분포를 나타내고 있다. 산화촉매 전단과 후단의 입자수농도 분포를 보면, 부하 75 %인 경우 산화촉매 전단과 후단의 입자수농도 분포는 큰 차이를 보이지 않지만 엔진 부하조건이 25 %인 경우 산화촉매 전단과 후단의 입자수농도는 큰 차이를 보이고 있다. 디젤엔진의 DPF 촉매에서는 엔진에서 배출되는 PM과 NO_x의 비율(NO_x/PM)이 8 이상이고, 배출가스 온도가 275 °C 이상이면 산화하는데, CNG용 산화촉매 후단에서 입자수농도의 저감은 CNG 연료와 엔진오일에 의해 생성된 50 nm 이하의 SOF 산화와 NO₂에 의하여 입자가 산화된 것으로 추측한다. 특히 THC 정화율과 동일하게 25 % 부하에 입자수농도의 저감 폭이 가장 좋았다.

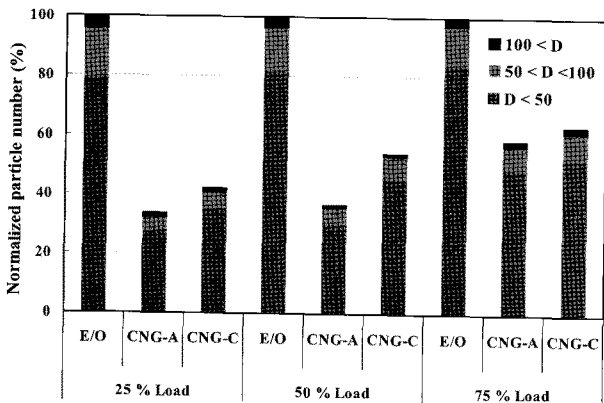
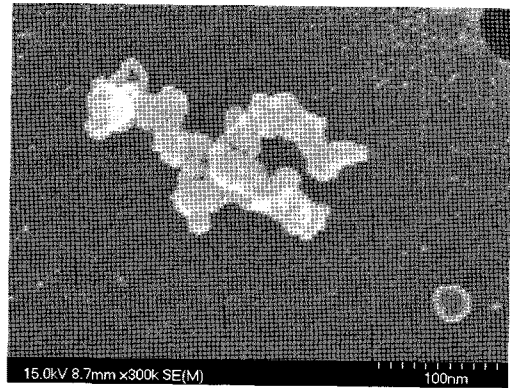
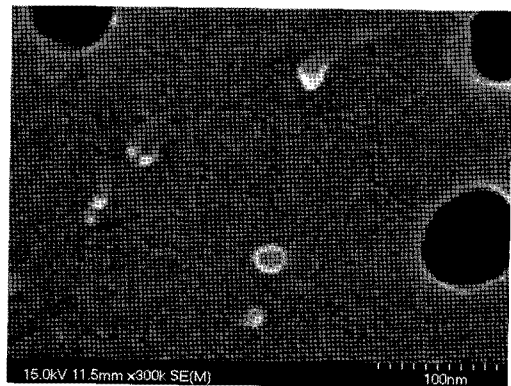


Fig. 10 Total particle number on the effect of catalysts at 1800rpm

Fig. 10은 1800 rpm의 엔진출구에서 배출되는 입자수를 100 %로 하여 엔진의 부하율에 따라 CNG-A촉매와 CNG-C촉매 후단에서 배출되는 입자수농도 비율과 크기별 비율을 나타내고 있다. 입자수 저감률은 엔진 부하율이 25 %인 조건에서 가장 높았으며 부하가 증가할수록 감소하였다. 이는 1800 rpm 운전조건에서 높은 배출가스 온도로 산화촉매 내부의 온도가 충분히 높으며 부하조건이 낮은 25 % 부하조건에서 SV가 낮아 산화촉매에서 산화반응 시간이 늘어나 입자수 저감률이 높아졌으며 부하율이 높아질수록 SV가 빨라져 촉매에서 반응할 수 있는 시간이 짧아지므로 저감률이 감소한 것으로 판단한다. 산화촉매에서 저감되는 입자수의 대부분은 엔진에서 가장 많이 배출되는 50 nm 이하의 입자들이며, 입자수 저감률은 THC 정화율이 CNG-C촉매보다 높은 CNG-A촉매에서 더 높음을 알 수 있다.



(a) Diesel engine



(b) CNG engine

Fig. 11 SEM image of the particulate matters

Fig. 11는 엔진에서 배출되는 입자상물질의 입자 형태를 비교하기 위한 SEM 이미지이다. 필터는 0.1 μm VCTP로 membrane에 포어가 100 nm 크기로 구멍이 뚫려 있는 타입이다. 입자의 이미지 분포를

비교하기 위하여 디젤엔진 샘플은 2단 희석 후 7분간 샘플링 한 것이며, CNG 엔진 샘플은 10분간 0.04 LPM으로 샘플링하여 입자를 필터위에 포집하였다. 디젤엔진과 CNG 엔진의 가장 큰 특징은 디젤엔진에서 취득한 입자의 영상 (a)는 20-30 nm의 입자들이 선형형태로 연결되어 있는 반면, 영상 (b)는 CNG 엔진에서 다량 배출되는 20-30 nm의 크기의 독립적인 입자들로 분포되어 있다.

4. 결 론

산화촉매를 장착한 대형 CNG 엔진의 배출가스 배출특성 및 입자상물질 배출특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ESC test cycle 실험조건에서 각 운전모드에 따른 3종류 산화촉매의 CO 정화효율은 89 % 이상으로 촉매간의 정화효율의 큰 차이는 없었으며, THC 정화효율은 CNG-A, CNG-B, CNG-C가 각각 약 83, 82, 36 %로, CNG-A촉매의 정화효율이 가장 높았다.

2. CNG 엔진에서 배출되는 입자수농도(10-385 nm)는 2.5L CRDI 디젤엔진에 비하여 0.5 % 수준으로 배출되며, 입자크기의 대부분은 50 nm 미만의 나노입자이다.

3. CNG 엔진에서 배출되는 입자수농도는 엔진 부하조건이 증가할수록 감소하지만, 100 % 부하조건에서는 다시 증가하였으며, 산화촉매에 의한 입자수농도 저감률은 SV가 낮고 NO₂ 농도가 가장 높은 25 % 부하에서 약 60 %로 가장 높았으며, 특히 50 nm 미만의 입자의 감소율이 높았다.

후 기

본 연구는 (주) 오텍의 현장맞춤형 기술개발사업 “천연가스버스용 촉매개발” 과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. C. H. Chang, et al., 1993, “Development of Hyundai MPI CNG Engine”, KSAE 933867, pp. 546~554.

2. T. H. Cho, B. H. Min and C. H. Kim, 1997, “A Development of a Heavy-Duty Turbocharged and Intercooled for CNG Engine for Urban Bus”, KSAE 9738028, pp. 482~487.

3. H. N. Kim et al., 2008, “Characteristics of Exhaust Emissions and Particle Size Distribution using Biofuel Blended Diesel Fuel in CRDI Diesel Engine with CPF”, Trans. of the KSPSE, Vol. 12, No. 1, pp. 5~12.

4. S. H. Choi and Y. T. Oh, 2005, “Experimental Study on Emission Characteristics and Analysis by Various Oxygenated Fuels in a DI Diesel Engine”, IJAT, Vol. 6, No. 3, pp. 197~203.

5. H. N. Kim et al., 2006, “Reaction Characteristics on Oxidation Catalyst of Particulate Matters According to Diesel Fuel with Various Sulfur Concentrations”, Proceeding of KSAE, No. 1, pp. 310~315.

6. Y. C. Han, Y. S. Oh and H. I. Kang, 2000, “An Experimental Study on Performance & Exhaust Emission by Boost Pressure Change in Compressed Natural Gas Engine”, Trans. of the KSME, Vol. 9, No. 1, pp. 53~59.

7. Y. W. Lim, et al., 2005, “Risk Reduction Analysis upon Replacement of Diesel Bus with CNG Bus”, KSAE 05-F0124, pp. 788~797.

8. A. Ayala, et al., 2003, “Oxidation Catalyst Effect on CNG Transit Bus Emission”, SAE 2003-01-1900.

9. B. C. Choi, S. S. Yoon and J. W. Jeong, 2003, “Conversion and Aging Characteristics of Oxidation Catalyst for Natural Gas Vehicle with Lean-burn System”, Trans. of the KSAE, Vol. 11, No. 2, pp. 134~139.

10. L. Morawska, et al., 1998, “Submicron and Supermicron Particulates from Diesel Vehicle Emissions”, Environ. Sci. Tech., Vol. 32, pp. 2033~2042.

11. J. B. Heywood, 1988, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Book Company.