

ELPI를 이용한 산화촉매 장착 고속 직접분사식 디젤엔진의 입자상물질 계측

최 병 철[†], 장 세 현^{*}

Measurements of Particulate Matters for the HSDI Diesel Engine with DOC using the ELPI

Byung-chul Choi, Se-hyun Jang

Key Words: HSDI Diesel engine(고속직접분사식 디젤엔진), Particulate Matter(입자상 물질), DOC(디젤산화촉매), Emission(배출가스), D-13 mode(D-13운전모드), ELPI

Abstract

Particulate matters(PM) have bad effect on the health. We carried out measurements of diesel PM under $10\mu\text{m}$ diameter from a HSDI diesel engine with a diesel oxidation catalyst(DOC) by using the ELPI. This paper compares the two results of the smoke level and the PM level of masses and numbers. We also investigated the effect of the DOC. Under high speed and load, HSDI diesel engine exhausts much masses of particulate matters over 100nm diameter, and a number of PM from 7 to 100nm diameters at the same condition. DOC could reduce the total mass of the PM. However, the DOC could increase the number of ultra fine PM. Before light-off of the soot, the DOC absorb the PM and the DOC oxidize the PM after light-off temperature. The fine PM could be made during the oxidation. Therefore, the advanced DOC is needed to reduce the number of the fine PM.

1. 서 론

디젤엔진은 직접분사기술을 적용하여 높은 출력과 연비를 얻을 수 있었다. 최근 커먼레일 시스템의 등장으로 고압분사를 하게 되어 보다 높은 출력 및 연비는 물론이고 진동, 소음문제 및 배출가스문제도 일부 개선하고 있다. 고압분사방식이 디젤엔진의 문제점으로 지적되어왔던 입자상물질이나 NO_x의 저감에 기여할 것이라는 기대를 가지고 있다. 유럽에서는 디젤승용차중 직접분사식 자동차의 시장점유율이 약50%이다¹⁾. 직접

분사식이나 커먼레일 시스템의 적용이 디젤엔진의 과제인 입자상물질이나 NO_x 저감에 효과가 있다고 하나 고압분사를 통해 더욱 미립화된 연료가 연소되면서 인체에 폐해를 미칠 수 있는 나노입자를 생성할 것이라는 우려 또한 낳고 있다²⁾. 디젤엔진에서 배출되는 미세 입자상물질은 체내에 흡입될 경우 폐 깊숙이 침투하여 장시간 체류하며 폐암의 핵이 될 수도 있다²⁾.

디젤엔진의 입자상물질은 경유의 연소 과정 중 생성된 매연(soot)에 여러 종류의 탄화수소가 흡착 또는 응축되고 아울러 여러 종류의 금속 수분 및 황산염이 부착되어 형성 된다³⁾. 현재로서는 입자상물질의 정확한 생성기구가 명백히 밝혀지지 않고 있기 때문에 입자상물질의 저감기술개발에 많은 제약이 있다. 입자상물질의 생성과 계측에 관한 연구¹⁾가 다각도로 진행되고 있으나 대부분이 저속, 대형 디젤엔진에 관련된 것이고 고속,

[†] 전남대학교 기계 시스템 공학부

E-mail : bcchoi@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1681 FAX : (062)530-1689

^{*} 전남대학교 기계공학과 대학원

소형 직분식 디젤엔진의 입자상 물질의 배출특성과 이의 저감을 위한 연구는 드물다.

본 연구에서는 ELPI를 이용하여 현재 국내보급률이 높은 레저 차량용 고속직접분사식 디젤엔진의 입자상물질을 측정하여 배출특성을 밝히고자 하였다. 또한 입자상물질 배출에 디젤산화촉매가 미치는 영향을 파악하였다. 더불어 스모크 측정기를 이용하여 ELPI의 측정결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 Electrical Low Pressure Impactor(ELPI)

에어로졸 내의 입자의 크기나 배출량을 분석하기 위한 방법에는 캐스케이드 임팩터를 사용한 측정법, 확산 튜브 법, 전기운동 분석기법 및 광자상호 분광기법 등과 같은 몇 가지 측정방법들이 제시된바 있다³⁾. ELPI(Dekati, EFS190)는 그중 캐스케이드 임팩터를 사용한 방법이다.

ELPI의 측정가능한 입자상 물질의 입경은 7~10,000nm이다. Table 1은 ELPI의 사양이다.

Table 1 Specifications of the ELPI

Nominal Air Flow		10 lpm
Particle Size Range		7 ~ nm
Number of Channels		12
Time Resolution		< 5 s
Operation Condition	Ambient Temp.	0 ~ 0℃
	Ambient Humidity	0 ~ 0%
	Gas Temp.	< 60℃
Dimensions of Impactor		φ 5 × 300 (mm)

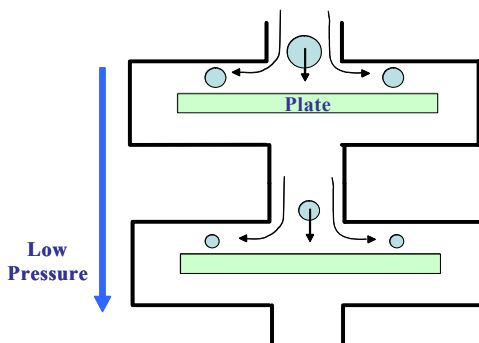


Fig. 1 Measurement principle of the ELPI

Fig. 1에 ELPI 측정원리를 도시하였다. ELPI는 진공펌프를 이용하여 외부로부터 측정할 가스를 흡입하고 흡입된 가스는 ELPI의 코로나 방전극을 통과하며 개개의 입자들이 충전된다. 이때 충전된 전류 값은 입자들의 입경에 따라서 각각 차이

가 있다. 충전된 입자들은 캐스케이드 임팩터의 노즐을 통과한다. 캐스케이드 임팩터는 각 단계별로 점점 직경이 좁아지는 노즐로 구성되어 있다. 각 집진 판에 축적된 입자들은 집진 판 별로 유사한 질량의 입자들이 축적된다. 집진판에 축적된 입자들은 코로나 방전극을 통과하며 충전되었던 전류를 집진판에서 방전하게 되고 ELPI는 방전된 전류량을 환산하여 입자수별 입경분포, 입자질량별 입경분포 등을 검출한다.

2.2 엔진 실험장치

ELPI를 이용하여 HSDI디젤엔진에서의 입자상물질을 계측하기 위한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었고 실험엔진의 제원은 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용한 엔진동력계는 440kW급 와전류식 동력계(Fuchino, ESP-600)를 사용하였다. ELPI로 유입되는 샘플 가스의 희석률 계산을 위하여 HORIBA사의 MEXA-9100DEGR을 사용하여 NOx와 CO₂의 농도를 측정하였다.

배출가스를 희석하기 위해 사용된 희석터널은 총길이 2600mm의 강관으로 제작하였다. 희석터널 내에서 가스들의 충분한 희석을 위해 난류 발생기를 장착하였고 샘플가스의 유입을 위해서 웨이크 디스크를 사용하였다⁴⁾. 희석터널내로 공기를 유입하기 위해 사용한 송풍기는 송풍 유량조절을 위해 인버터를 사용하였다. 배출가스의 희석을 위해 배기관과 희석터널을 1/2" SUS관을 사용하여 연결하였다. 샘플 튜브의 온도는 히터를 사용하여 300℃를 유지하였다. 매연농도는 보쉬방식 여과지 샘플링 광반사율 측정기 (월드환경, AFT-2000)를 사용하였다.

연료는 S사의 황 함유량이 0.05% 미만의 상용 경유를 사용하였다.

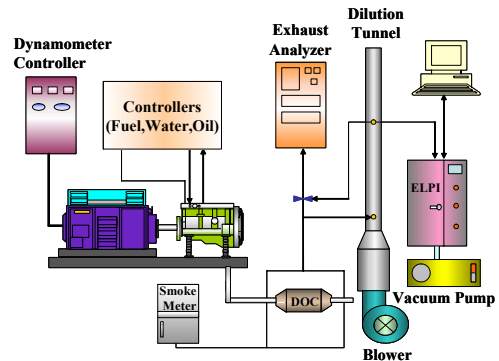


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Specification of HSDI diesel engine

Item	Specification
Engine Type	4-Stroke
Rated Speed(rpm)	3800
Power Output(ps/rpm)	120/3800
Torque(kg · /rpm)	34/1800
Air Charging	Turbo-Aftercooled
Bore×Stroke(mm)	97.1×98
Displacement(cc)	2903

실험에 사용된 디젤 산화촉매는 Ordeg사에서 제조된 백금촉매이다. 촉매는 400psi 밀도의 허니컴 모노리스형 담체에 백금(Pt)을 코팅하고 스테인리스 강관으로 캐닝한 것이다.

2.3 실험방법

엔진실험에 사용된 운전모드는 D-13모드이다. 샘플 튜브를 거쳐 희석터널로 유입된 배출 가스는 송풍기를 통해 희석터널로 공급되고 있는 공기와 섞여 희석된 후 다시 ELPI로 유입되게 된다. ELPI로 유입되는 가스의 온도는 50℃가 넘지 않도록 충분한 양의 공기를 송풍기로 공급하여 희석하였다.

본 실험에서는 희석률 계산을 위해 NOx와 CO2의 농도를 측정하였다. 두 종류의 가스를 동시에 측정한 이유는 ELPI로 유입될 가스의 희석률을 계산할 표준가스가 명확히 규정돼 있지 않기 때문에 엔진에서 배출되는 주요 배출가스 중에서 선택하여 농도를 측정한 후 희석률을 계산하였다. 측정된 가스의 농도는 다음의 식(1)에 의해서 희석률을 계산한다.

$$Dilution\ Ratio = \frac{C_{Undiluted} - C_{Air}}{C_{Diluted} - C_{Air}} \quad (1)$$

상기 식의 C_{Undiluted}는 희석 전 배기가스의 농도, C_{Diluted}는 희석 후 배기가스의 농도, C_{Air}는 공기 중 가스의 농도를 의미 한다⁴⁾.

식(1)에 의해 희석률을 계산한 결과 CO₂로 계산한 희석률이 NOx로 계산한 희석률보다 20%정도 더 높게 나오거나 비슷한 수준이었다. 본 실험에서는 NOx 농도로 계산한 희석률을 입자수와 질량분포계산에 적용하였다. 입자상물질의 입자수나 질량이 희석률에 비례하는 점을 고려하면 ELPI 계측에서는 희석률 계산에 사용할 표준가스를 선정해야 할 필요성이 있다.

ELPI의 모든 실험은 재현성 확보를 위해 동일

조건에서 3회 실시하여 적정 데이터를 평균하여 표시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스모크 측정

현재 국내 디젤엔진 매연측정 표준으로 사용되고 있는 여과지 샘플링 광반사율 측정법에 의한 매연 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 매연 포집용 여과지는 KS M 7602에 명시된 5종 A 큰 입자용 여과지로서 약3μm입경이상의 입자만을 포집한다.

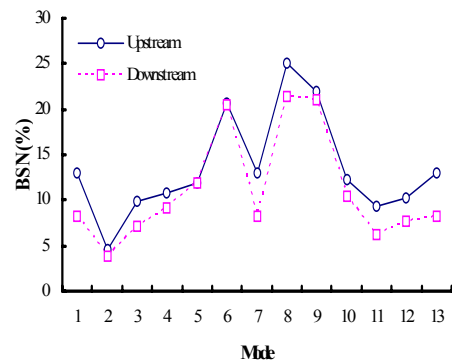


Fig. 3 Smoke level by the Bosch smoke meter

촉매전단에서는 저회전수(2400rpm) 영역인 2~6모드가 고회전수(3200rpm) 영역인 8~12모드보다 매연이 적게 측정되었다. 2400rpm에서는 부하가 증가하면서 매연의 배출량도 많아지다가 전부하 운전 시에는 배출농도가 22%로 크게 증가하였다. 3200rpm 운전 시에는 전부하(8모드)에서 스모크가 26%정도로 최고치를 나타내고 부하가 감소할수록 매연의 배출량은 감소하고 있다.

산화촉매 후단은 전단보다 매연의 농도가 약간 작게 측정되었다. 이는 장착된 디젤산화촉매가 매연의 저감에 영향을 미치는 것을 의미 한다⁵⁾. 중속(2400rpm) 저 부하에서 매연의 정화율을 보이는 것은 촉매의 산화반응 보다는 흡착에 의한 영향으로 여겨진다. 부하의 증가와 더불어 매연 농도도 증가하지만 동시에 산화촉매 전 후단에서 매연농도의 차이가 줄어들었다.

3.2 입경별 질량분포

Fig. 4는 ELPI를 이용하여 촉매 전 후단에서 각 모드별로 입자상물질의 총배출질량을 나타낸 그림이다.

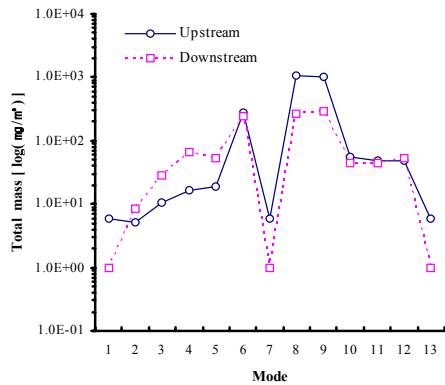


Fig. 4 Mass of particulate matters of D-13mode

산화촉매 전단의 6,8,9모드에서는 입자상물질들의 배출량이 다른 운전모드에 비해 크게 증가하였다. 6모드는 2400rpm의 전부하 이고 8,9모드는 각각 3200rpm의 전부하와 75%부하이다. 회전수가 큰 운전 영역에서 회전수가 작은 운전영역보다 입자상 물질의 배출량이 많다. 이는 Fig. 3의 매연 측정결과와 일치한다. 2400rpm에서는 부하가 증가함에 따라 측정된 입자의 배출량은 점진적으로 증가하였다. 3200rpm에서도 부하의 증가와 더불어 입자상 물질의 배출량이 증가하였다.

디젤산화촉매의 후단에서 각 운전모드별로 배출된 입자상물질의 배출경향도 촉매의 전단과 유사하다. 2400rpm(2~6모드)에서는 촉매후단에서 배출량이 전단보다 많으며 촉매전후단의 배출량의 차이는 최대 48mg/m³이었다. 3200rpm(8~12모드)에서는 촉매전단과 후단의 차이가 820mg/m³로 전단의 배출량이 훨씬 높았다. 이는 아이들 상태에서 촉매에 흡착되었던 미세입자가 부하 및 엔진 회전수의 증가로 인해 배출가스의 유량이 증가하고 산화촉매의 온도가 상승하여 탈착되어 나오기 때문으로 추측한다. 최고속도, 고부하(8,9,10모드)영역에서 촉매후단의 입자상 물질의 배출량이 낮아지는 것도 산화촉매의 온도가 580~590℃로 높아 산화반응이 일어나기 때문이다.

Fig.5는 D-13모드에서 촉매전단에서의 입경별 입자상물질 배출량을 도시하였다. 이후 입경을 표시한 그래프에서는 7~10000nm의 측정 가능한 입경범위를 12구간으로 나누어 표시하였다. 또한 그래프전상의 각종 표식은 각 구간의 최소입경을 나타내고 있다.

촉매 전단의 아이들 상태에서는 170~270nm 입

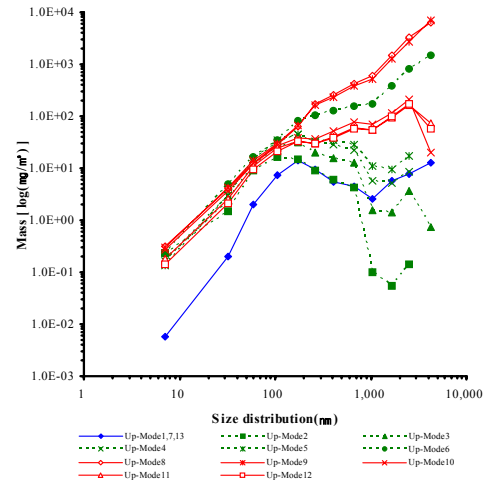


Fig. 5 Upstream mass distribution of the DOC by the D-13 mode

경범위에서 입자상물질의 배출량이 가장 많으며 270nm보다 입경이 큰 범위에서는 배출량이 점차 감소하는 경향을 가지고 있다. 아이들 운전상태를 제외한 나머지 운전조건에서 산화촉매 전단의 전운전 조건에서 100nm까지 유사한 배출 농도를 나타내다가 그 이상에서 배출량 차이가 나타난다. 고속운전(3200rpm)조건에서 8,9모드와 11,12모드는 100nm이상의 입경범위에서도 각각 유사한 배출 경향을 보여주고 있다. 이들 조건에서는 입경이 큰 영역에서 배출량도 증가한다. 회전수가 낮더라도 전부하로 운전을 하게 되면 입경이 큰 입자상물질의 배출량이 많아졌다. 고속, 고부하일수록 100nm이상의 입경이 큰 입자상물질의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig.6은 D-13모드에서 촉매후단의 입경별 입자상물질 배출량을 도시하였고, Fig.7은 6,8,9모드의 촉매 후단에서의 입자질량 감소율을 나타내었다.

아이들 상태의 촉매후단에서 입자상 물질의 배출량은 대단히 낮아졌다. 측정된 입경 또한 32nm 이상의 입경부터 측정되어 전단에 비해 측정된 최소 입경이 증가 하였다.그리고 2,3,4 모드와 같은 중속, 중부하 이하의 조건에서는 전반적으로 입자상물질의 배출량이 저감하고 있다. 이는 산화촉매에서의 산화반응이라기 보다는 흡착특성이 지배적인 것으로 생각된다. 고속, 고부하의 8,9모드의 경우 촉매후단의 270nm이상의 입자상 물질은 촉매전단보다 낮아지고 있으나, 32~270nm 영역에서는 촉매후단의 입자상 물질 배출량이 증가하고 있다. 이를 입자질량의 감소율로 나타내면

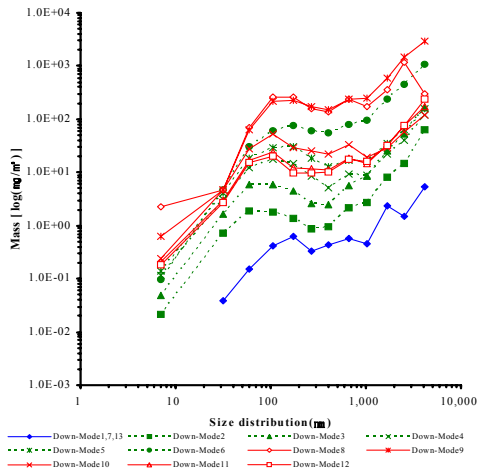


Fig. 6 Downstream mass distribution of the DOC by the D-13 mode

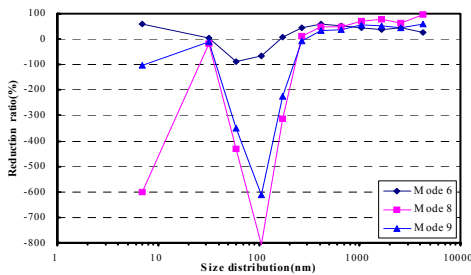


Fig. 7 Mass reduction ratio of the size distribution on the mode of 6,8,9

Fig.7과 같이 32 ~ 270 nm사이에서 최고 -800%의 감소율이 나타났다. 8, 9모드는 산화촉매의 온도가 입자상물질을 산화하기에 충분한 온도 조건(580~590℃)이므로 산화과정에서 일부 큰 입자상물질이 미립화되는 현상으로 볼 수 있다. 전체 배출량은 저감되지만 산화촉매에서 미세한 입자가 더욱 생성되고 있음을 알 수 있다. 즉 직접분사식 디젤엔진의 경우 산화촉매를 장착함으로써 고속, 고부하에서 270nm 이하의 초미세입경의 입자상 물질 배출량이 증가하여 인체에 악영향을 미칠 수 있다.

탄소 입자만의 연소온도는 500℃부근이지만, 탄소입자와 귀금속 촉매의 혼합체의 연소 개시온도는 300℃이다³⁾. 따라서 산화촉매의 300℃보다 저온에서 흡착에 의한 입자상 물질 저감효과를 완전 연소로 바꿀 수 있는 산화촉매의 개발이 필요하다.

3.3 입경별 입자수분포

ELPI에서 측정된 7~10,000nm 입경범위의 각 모

드별 전체입자수를 Fig.8에 도시하였다.

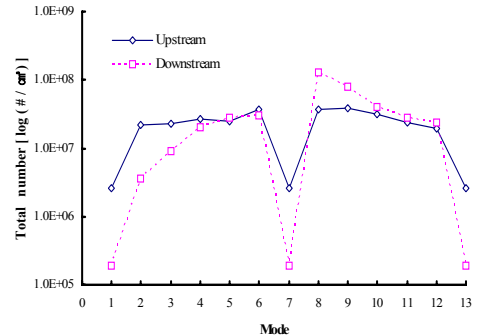


Fig. 8 Number of particulate matters of D-13 mode 회전수가 2400rpm인 2~6모드까지는 산화촉매 후단에서 입자수가 감소하였으나, 3200rpm으로 회전수가 증가한 영역 8~12모드에서는 촉매후단에서 입자수가 오히려 증가하였다. 2,3,4모드에서 입자수의 감소는 촉매의 흡착현상이 지배적일 것으로 예측된다. Fig.4에 의하면 8,9,10모드의 경우 산화촉매 후단의 입자질량이 감소하였으나, Fig.8에서 입자수는 8,9,10모드가 오히려 많다. 이는 270nm이상의 입경이 큰 입자가 줄어들고 그 이하의 작은 입자가 늘어났기 때문이다.

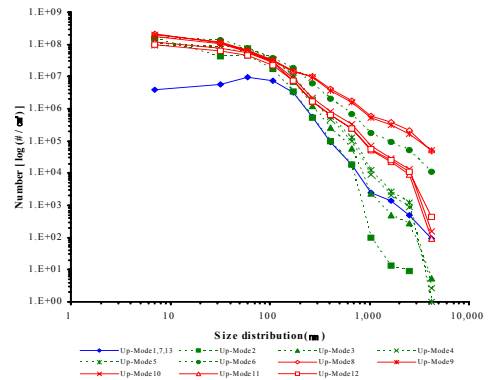


Fig. 9 Upstream number distribution of the DOC on the D-13 mode

Fig.9에서는 촉매전단의 입경별 입자수를 도시하였다. 입경분포는 거의 모든 모드에서 7nm에서 100nm까지의 미세 입경수가 10⁸개/cm³의 오더로 가장 많고 100nm이상 입경이 커질수록 입자수가 감소하는 특성을 가지고 있다. 100nm 이상에서는 8, 9모드의 입자 배출수가 많고, 그 다음이 6모드의 순이다. 또한 아이들 운전상태와 2,3,4모드에서는 낮은 수의 배출 특성을 보이고 있다.

이와 같이 촉매전단에서 입자수는 고속회전수나 고부하에서 입자수가 증가하는 경향이 있다.

또한 고속직접분사식 디젤엔진의 입자상물질 배출특성은 100nm이하의 미세 입경수가 많이 배출되는 것을 알 수 있다.

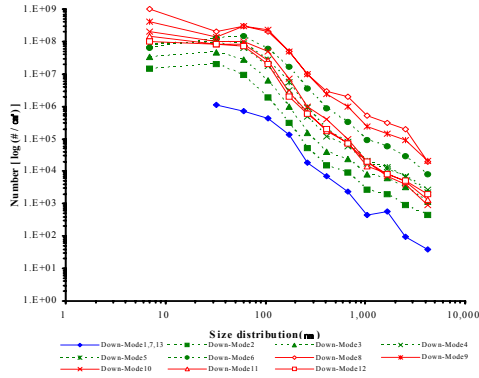


Fig. 10 Downstream number distribution of the DOC on the D-13 mode

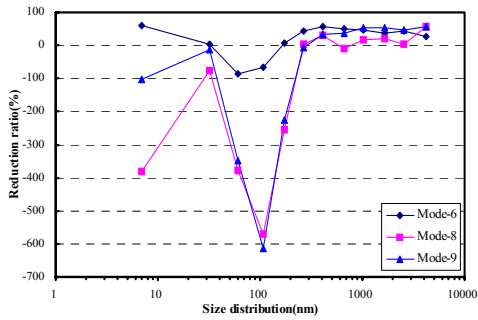


Fig. 11 Number reduction ratio of the size distribution on the mode of 6,8,9

Fig.11은 Fig.9와 Fig.10의 6,8,9모드에서 입자수 감소율을 나타낸 결과이다. Fig.10은 산화촉매 후단에서 모드별 입자상물질 배출특성을 나타내고 있다. 촉매전단 대부분 모드에서 입경이 100nm이하의 입자수가 10^8 개/cm³이던 것이 10^7 ~ 10^9 개/cm³ 범위로 변하고 있다. 2~5운전모드(2400rpm)에서는 후단이 전단에 비해 더 작은 입자수가 측정되었다. 8~9운전모드(3200rpm)에서는 산화촉매후단에서 100nm이하의 미세 입자수가 전단보다 더 많이 측정되었다.

Fig.11에서 6모드와 8, 9모드의 입자수의 감소율은 270nm 이상에서는 입자상물질의 입자수가 후단에서 감소하였다. 그러나 32~270nm 입경범위에서는 감소율이 -600%로 낮아 후단에서 입자수가 전단에서보다 훨씬 많다. 이러한 현상 역시 8, 9모드(580~590℃)에서 직경이 큰 입자상물질의 입자가 산화하면서 270nm 이하의 미세한 입자를 생성하고 있음을 의미한다.

디젤산화촉매가 저속, 저부하에서 산화나 흡착에 의해 입자상 물질 배출량은 저감하였으나, 고속, 고부하에서 미세 입자수는 오히려 증가하였다. 미세 입자는 배출 질량에 미치는 영향이 작으므로 기존의 질량측정 방식에서는 간과되어왔다. 그러나 미세입자가 인체에 미치는 영향을 고려한다면 배출 입자수 역시 신중한 관찰이 필요하다.

4. 결론

ELPI를 이용하여 산화촉매를 장착한 고속 직접 분사식 디젤엔진의 입자상물질 배출특성을 계속한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고속직접분사식 디젤엔진에서 고속, 고부하일수록 100nm이상의 입경이 큰 입자상 물질의 배출량이 증가하고 7~100nm의 최소 입경범위에서 입자수가 크게 증가한다.
- 2) 고속 직접분사식 디젤엔진에 산화촉매를 장착할 경우 총 배출량은 저감되었지만, 인체에 유해한 32~270nm의 입자상 물질 배출이 증가하였다.
- 3) 디젤산화촉매에서 입자의 산화과정 중에 7~270nm범위의 미세입자의 배출수가 크게 증가하였다. 이의 생성억제를 위해서는 현재보다 낮은 온도에서 활성이 되는 산화촉매의 개발이 필요하다.

참고문헌

- (1) D.Y.Lee, 2000, "Trend of Diesel Fuel Injection System", Journal of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 5, pp. 53~56.
- (2) Y.I.Jeong, M.K.Yoon, 2002, "Trend of Diesel Particulate Filter Trap Technology", Journal of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 24, No. 1, pp.39~43.
- (3) B.C.Choi, 2001, "Technologies for Emission Aftertreatment", Baro Publishing Co., p.300.
- (4) Qiang Wei, 2001, David B.Kittleston, Winthrop F.Watts, "Single-Stage Dilution Tunnel Design", SAE 2001-01-0207.
- (5) B.C.Choi, P.S.Jung, K.J.Myung, B.S.Kim, K.S.Park, C.G.Park, J.H.Lee, 2001, "A Study on Evaluation of Diesel Oxidation Catalyst for Automotive Heavy-Duty Diesel Engine", Journal of Korean Society for Power System Engineering, Vol. 5, No. 2, pp.13~21.