

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.499

3L급 디젤엔진의 배압이용 DPF 매연포집량 예측에 대한 연구

김 흥 석* · 이 진 욱**†

* 한국기계연구원 그린동력연구실, ** 송실대학교 기계공학과

Study on Estimation of PM Mass in DPF from Pressure Drop in 3L Diesel Engine

Hong Suk Kim* and Jin Wook Lee**†

* Dept of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials

** Dept of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.

(Received December 21, 2009 ; Revised February 23, 2010 ; Accepted February 23, 2010)

Key Words: DPF(Diesel Particulate Filter-trap, 매연여과장치), Diesel Engine(디젤엔진), Pressure Drop(압력강하), PM(Particulate matter, 입자상물질), SI(Soot index, 매연지수)

초록: 디젤 매연여과장치내 포집된 입자상물질의 재생 시기를 제어하기 위해서는 매연 포집량을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 필터내 축적된 매연 포집량은 필터 전·후의 압력차와 배기유량에 의해 예측될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저, 디젤산화촉매와 디젤매연여과장치 전·후의 각각 압력차의 비로써 정의한 매연지수의 산출을 위해 효과적인 신호처리방법을 제시하였다. 이를 3L급 승용 디젤엔진에서 정상운전조건과 과도운전조건에서 비교한 결과, 매연지수와 매연 포집량에 있어서 일정 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

Abstract: It is important to determine the exact soot mass in a DPF system in order to control the timing of PM regeneration. The soot mass accumulated in a filter can be estimated from the pressure drop in the filter and the exhaust gas flow rates. In this study, the soot index is defined as the pressure drop in the DPF divided by the pressure drop in a DOC. An effective signal processing method for determining the soot index is proposed; the results yielded by this method indicate good correlation between the soot index and the amount of soot loaded into the filter for both steady-state and transient-state operating conditions in a 3L diesel engine for passenger vehicles.

- 기호설명 -

- SI : 매연지수(Soot index)
- ΔP : 차압(Differential pressures)

1. 서 론

열효율이 상대적으로 우수한 디젤엔진에 있어서, 연소시 연료가 연소실에 고압으로 분사되어 압축공기와 혼합되지만, 이 기간이 아주 짧기 때문에 혼합비가 일정하지 않아 농후한 혼합비 영역에서 매연(Soot)이 다량 발생하게 된다.

매연을 포함하는 입자상물질은 약 75% 이상이

직경 $1 \mu m$ 이하의 미세입자이기 때문에, 인체 기관지 등에 침투하여 장기간 잠재하며, 특히 폐암의 원인으로 판명되고 있어 인체 위해성에 대한 논란이 가중되고 있다.

매연여과장치(이하, DPF)는 디젤엔진에서 배출되는 이러한 입자상물질(PM)을 포집하여서 태우는 친환경적인 시스템으로써, PM을 80% 이상 저감할 수 있어 매연저감 성능 면에서는 아주 우수하나, 가격이 높고 내구성이 아직은 부족한 것이 실용화에 장애요인이 되고 있다. 또한 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진에 배압이 걸리며, 이것에 의하여 출력과 연료소비율이 다소 희생된다.^(1~4)

DPF 기술은 크게 PM 포집(Trapping)기술과 재생(Regeneration)기술로 나누어지며, 시스템은 기본적으로 필터, 재생장치, 제어장치의 3부분으로

† Corresponding Author, immanuel@ssu.ac.kr

구성되어진다. 필터에 포집된 PM은 가능하면 빠른 시간 내에 태워서 필터가 다시 PM을 포집할 수 있도록 하는 과정을 재생이라고 하며, 재생과정은 light-off 온도, 공급되는 산소농도, 산소유량, PM의 포집량에 따라 적절하게 조절하여야 한다.

재생은 크게 두 가지 방법으로 나누어진다. 첫째, 포집된 PM을 점화온도범위인 550-600도까지 외부에서 강제적으로 가열하는 방법(Active regeneration, 1세대 DPF 기술)으로 이를 위해서는 전기히터, 버너 등이 사용된다. 둘째, 촉매나 첨가제를 이용하여 매연 점화온도를 원래보다 250도 정도까지 낮추고 엔진배출가스 온도로 재생시키는 방법(Passive regeneration, 2세대 DPF 기술)으로, 필터 트랩내 촉매코팅, 연료에 첨가제 공급 또는 트랩 전방에 HC 분사방법 등이 사용된다. 외부열원을 사용하는 강제재생방식 매연여과장치의 경우, 재생시 필터가 과열되어 파손되지 않도록 하는 정확한 재생제어가 중요하다. 재생제어가 잘못되어 필터내에 많은 양의 매연이 존재하는 상태에서 재생하게 되면 필터내 국부적으로 온도가 상승하여, 촉매 손상 또는 필터의 파손을 초래할 수 있다.

이러한 재생제어의 핵심은 필터내 매연포집량을 정확하게 산출하는 것으로서, 통상적으로 매연여과장치의 배압을 측정하여 매연포집량을 예측할 수 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

그러나 매연여과장치의 배압은 필터내에 쌓인 매연포집량에 따라 비례하여 증가하지만, 운전조건에 따라서도 변하므로 필터의 배압을 배출가스유량으로 나눈 값으로 매연포집량을 예측하고 있다.⁽⁸⁾ 또한 일정량의 촉매가 코팅된 필터를 대상으로, 필터내 포집된 매연입자들의 자연 재생정도를 필터 전후의 차압 또는 배기온도를 사용하여 해석하고 있으나,⁽⁹⁻¹⁰⁾ 본 연구에서는 DOC의 배압과 DPF의 배압으로 산출된 SI값으로 매연포집량을 예측하는 점이 기존 연구와의 가장 큰 차이점이다.

따라서 본 연구에서는 운행 중인 3L급 승용 경유차용 매연여과장치를 대상으로 해서, 디젤산화촉매(DOC, Diesel Oxidation Catalyst)와 매연여과장치의 배압을 이용하여 필터내의 매연포집량을 효과적으로 예측하는 방법을 제시하고자 수행하였다.

2. 실험장치

본 연구에서는 98년식 RV차량용 디젤엔진을 사용하였으며, 이의 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of test diesel engine

Turbo charger and intercooler equipped Diesel engine	
Model description	J3-TDI
No. of cylinder	4
Displacement volume(cc)	2,902
Bore×stroke(mm)	97×98
Compression ratio	19.3
Max. power(ps/rpm)	135/3,800
Max. torque(kgf-m/rpm)	31.5/2,000

Table 2 Specifications of after-treatment system

Type	DOC (coated by Pt-base)	DPF
Diameter(mm)	133	133
Length(mm)	124.5	279.4
Material	Cordierite	SiC
Cell density, cpi	400	300

Table 3 Specifications of pressure sensor

Model	PSC
Maker	Sensys
Rated pressure (bar)	2.5
Accuracy	± 0.3% full scale
Proof pressure	300% Full scale

Table 4 Test parameters for signal processing

Sampling rate(Hz)	2, 10, 50
Time average	on, off
Low pass filter	on, off
Engine operating conditions	Idle, Full load(3800rpm)

그리고 본 연구에서는 전단 머플러 대신에, DOC와 non-coated DPF를 장착하여 실험하였는데, Table 2는 이 DOC와 DPF의 제원을 나타낸 것이다. 특히 DOC에는 PM재생기간 동안 우수한 발열 성능(산화반응)을 확보하기 위하여, 백금(2g/l)이 코팅되어져 있는 것이 특징이다. 이러한 DOC와 DPF의 각각 전·후단 압력과 온도를 측정하기 위해서, 절대압 측정용 압력센서와 k-type 열전대를 설치하였다. 매연포집량은 DOC의 배압과 매연여과장치의 배압으로 예측되므로, 압력센서의 선정은 매우 중요하다.

Table 3은 본 연구에서 사용한 압력센서의 제원을 나타낸 것이다. 필터내 매연포집량의 측정이 필요한 경우에는 매연여과장치를 탈거한 후, 0.1g의 측정범위를 갖는 전자저울을 이용하여 측정하였다.

Table 4 Test parameters for signal processing

Sampling rate(Hz)	2, 10, 50
Time average	on, off
Low pass filter	on, off
Engine operating conditions	Idle, Full load(3800rpm)

3. 실험결과

3.1 Signal processing

압력센서로부터 얻어지는 신호는 여러 종류의 노이즈가 있어 별도의 신호처리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Table 4와 같이 sampling rate와 시간 평균, low pass filter에 관한 변수를 바꾸어가면서 최적의 signal processing 방법을 찾고자 하였다. 시험은 배출가스유량이 가장 적은 idle 조건과 배출가스유량이 가장 많은 엔진회전속도 3800rpm 전부하 조건에서 실시하였다.

Fig. 1은 idle조건에서 signal processing으로 얻어진 SI(Soot index)를 나타낸 것이다. 본 연구에서 SI는 식 (1)로 계산하였다.

$$SI = \frac{\Delta P_{DPF}}{\Delta P_{DOC}} \quad (1)$$

Fig. 1(a)는 raw signal을 이용하여 SI를 계산한 결과로써 최대 편차가 약 1.5에 이른다. 그리고 정확한 SI를 얻기 위해 sampling rate이 클수록 좋으나, ECU에서 사용되는 CPU의 능력을 고려하여 50Hz이면 충분할 것으로 판단된다. Fig. 1(b)는 10Hz로 샘플링한 후, 1초 동안의 데이터들을 평균하여 SI를 계산한 결과와 50Hz로 샘플링한 후 1초 동안의 데이터들을 평균하여 SI를 계산한 결과, 그리고 50Hz로 샘플링한 후 30Hz의 Low pass filtering하고 1초 동안의 데이터들을 평균하여 SI를 계산한 결과를 보여준다. 시간 평균된 신호를 이용하여 계산한 SI의 경우 최대 편차가 약 0.3으로 줄어들게 되며, 시간평균 전에 low pass filtering을 하면 보다 효과적인 SI가 얻어진다.

Fig. 2는 배출가스유량이 가장 많은 3800rpm 전부하 조건에서의 signal processing의 결과이다. Fig. 2(a)는 raw signal을 이용하여 SI를 계산한 결과로써, SI최대 편차는 약 0.5이며, idle조건보다

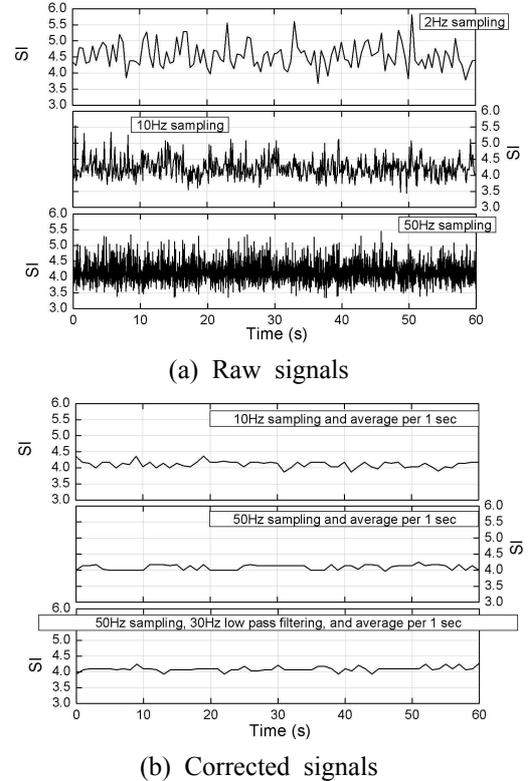


Fig. 1 Signal processing for SI calculation(Engine speed : Idle)

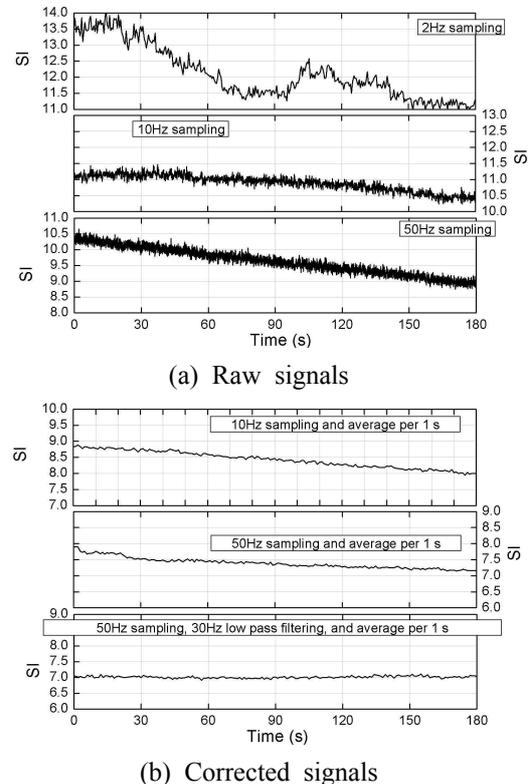


Fig. 2 Signal processing for SI calculation(Engine speed : 3800rpm with full load)

작음을 알 수 있었다. Fig. 2(b)는 데이터들을 시간평균 또는 Low pass filtering하고 SI를 계산한 결과로써, 최대 편차가 약 0.1 정도로 작아짐을 알 수 있었다. 이와 같은 일련의 연구를 통해서 본 연구에서는 압력센서의 신호를 50Hz로 샘플링하고, 30Hz의 Low pass filtering 후 1초 동안의 데이터를 시간 평균하여 SI를 계산하는 것이 데이터의 신뢰성 및 CPU의 계산능력 등을 고려할 때 가장 효과적이라고 판단하여, 이후 이와 동일한 방법으로 signal processing을 수행하였다.

3.2 정속운전 조건에서의 매연포집량 예측

SI를 계산하기 위해서는 배출가스유량이 반드시 필요하지만, 본 연구의 대상 차량의 경우 배출가스유량을 모니터링 할 수 있는 센서가 장착되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 먼저 DOC 배압과 흡입공기유량과의 관계를 알아봄으로써 DOC배압이 배출가스유량을 모사할 수 있는지 여부를 파악하고자 수행하였다. Fig. 3은 DOC 배압과 흡입공기량의 관계를 보여준다. 본 시험을 위해서 흡기관에 공기유량센서를 추가로 설치하였다. 배출가스유량은 흡입공기량과 연료량의 합이지만, 흡입공기량에 비해 연료량은 매우 적으므로 DOC 배압과 흡입공기량의 관계를 고찰하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 DOC 배압과 흡입공기량은 선형적인 관계를 갖는데, 이는 DOC 배압을 이용하여 배출가스유량을 효과적으로 예측할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4(a)는 40 km/h의 차속을 모사하는 1500rpm-90Nm의 엔진운전조건에서 시간에 따른 필터내 매연포집량과 DOC 및 DPF 배압의 변화를 나타낸 것이다.

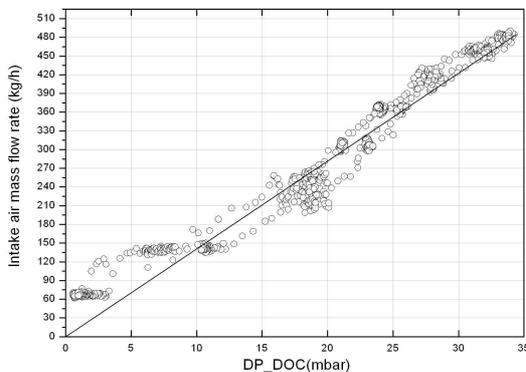
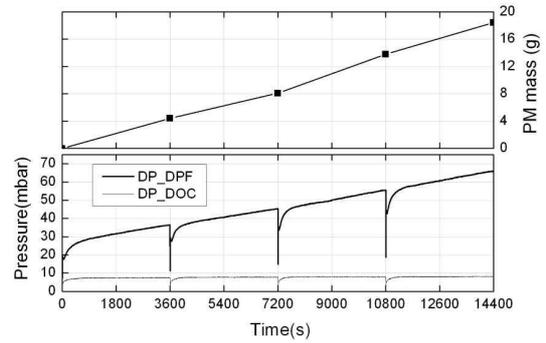
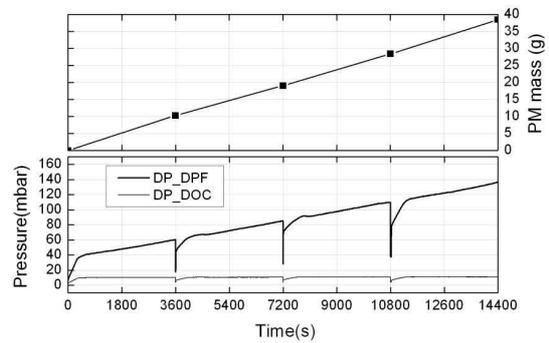


Fig. 3 Correlation between DP_{DOC} and intake air mass flow rate



(a) 1500rpm_90Nm



(b) 2300rpm_75Nm

Fig. 4 Variation of PM mass and ΔP according to PM loading at steady-state engine conditions

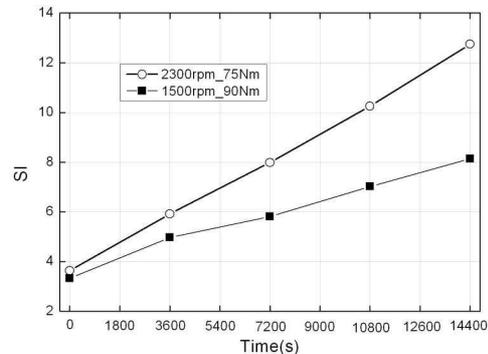


Fig. 5 Variation of soot index during the steady-state PM loading test

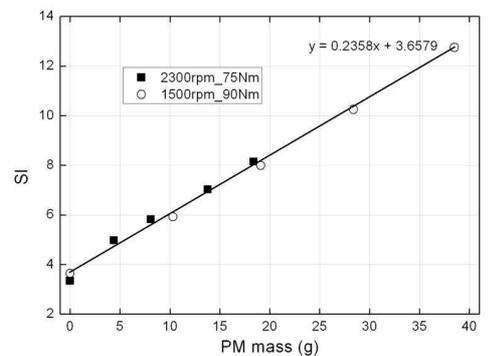


Fig. 6 Relationship between soot index and PM mass during steady-state PM loading test

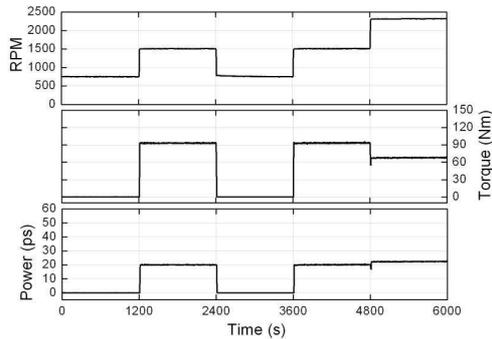


Fig. 7 Engine operating conditions for transient PM loading test

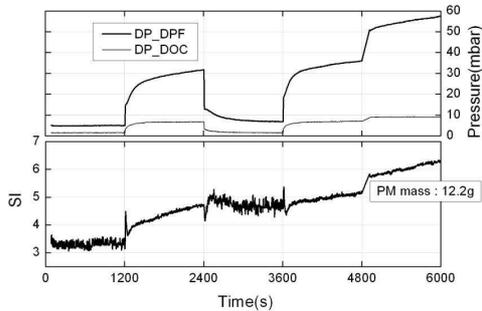


Fig. 8 Relationship between soot index and ΔP during transient PM loading test

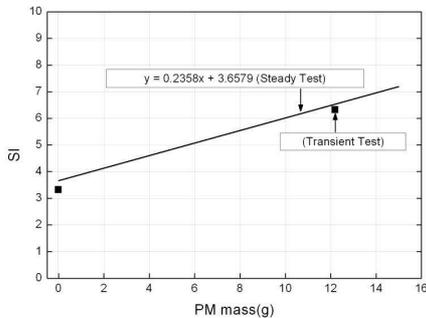


Fig. 9 Relationship between soot index and PM mass in the filter of the transient PM loading test

총 4시간 동안 필터에 PM은 약 18 g 포집되었으며, DPF 차압은 40 mbar 증가하였다. Fig. 4(b)는 80 km/h의 차속을 모사하는 2300rpm-75Nm의 운전조건의 결과이다. 총 4시간 동안 필터내 PM은 약 39 g 포집되었으며, DPF 차압은 120 mbar 증가하였다.

Fig. 5는 SI의 시간에 따른 변화를 보여준다. 필터내의 매연포집량을 의미하는 SI는 시간에 따라 선형적으로 증가하고 있으며, 1500rpm- 90Nm 조건보다 매연 배출량이 많은 2300rpm- 75Nm조

건에서 SI 증가율이 큼을 알 수 있었다.

Fig. 6은 필터내 매연포집량과 SI의 관계를 보여준다. 1500rpm-90Nm 조건의 시험으로부터 얻은 매연포집량과 SI의 관계와 2300rpm-75Nm조건의 시험으로부터 얻은 매연포집량과 SI의 관계가 서로 동일함을 알 수 있었다. 이는 운전조건에 관계없이 SI로 필터에 축적되는 PM의 질량을 효과적으로 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 매연포집량 (PMmass)과 SI는 『SI=0.2358×PMmass +3.6579』의 관계가 있음을 알 수 있었다.

3.3 천이조건에서의 매연포집량 예측

Fig. 7은 천이조건에서 운전되는 경우 식(1)로부터 산출된 SI로 매연포집량을 예측하기 위한 시험조건으로써, idle조건에서 2회, 1500rpm-90Nm 조건에서 2회 그리고 2300rpm-75Nm 조건에서 1회씩 5개 구간으로 구성하였다. 각 구간에서의 엔진 운전시간은 20분이었으며, 총 100분간 12.2g의 매연이 포집되었다.

Fig. 8은 시간에 따른 DOC 배압, DPF 배압 및 SI의 변화량을 알아본 것이다. 매연 배출량이 적은 idle에서는 SI가 거의 변화가 없으나, 1500rpm-90Nm 조건 및 2300rpm-75Nm 조건에서는 SI가 증가하였는데, 이 결과로부터 SI가 필터내 매연의 포집정도를 잘 예측하고 있다고 판단할 수 있었다.

Fig. 9에는 천이운전 시험의 시작시점과 종료시점의 매연포집량과 이때의 SI값을 나타내었으며, 정속조건 시험의 매연포집량과 SI 관계식과 비교하였다. 천이운전에서 얻은 SI와 정속조건에서 얻은 SI는 유사하였으며, 이는 천이운전조건에서도 DOC와 DPF의 배압으로 얻은 SI로 매연포집량을 효과적으로 예측할 수 있음을 의미한다.

4. 결론

본 연구는 3.0L급 승용디젤엔진용 DOC와 DPF 시스템의 배압을 이용하여 필터내 축적되는 매연의 포집량을 효과적으로 예측하기 위한 방법을 알고자 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 50Hz로 샘플링하고, 30Hz의 low pass filtering 한 후, 1초 동안의 데이터를 시간 평균한 압력센서 신호를 이용하여 노이즈가 적은 SI를 얻을 수 있었다.

(2) 정속 운전조건에서 PM포집 시험 결과, DOC와 DPF의 배압으로 얻은 SI로 매연포집량을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있었으며, 매연포집량(PMmass)과 SI는 『SI=0.2358×PMmass +3.6579』의 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 천이 운전조건에서도 DOC와 DPF의 배압으로 얻은 SI로 매연포집량을 효과적으로 예측할 수 있었다.

(3) 본 연구의 대상 차량과 같이 배출가스유량 측정용 센서가 없는 경우, DOC 전·후단의 배압을 이용하여 배출가스유량을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있었는데, 본 연구결과가 향후 다양한 엔진 배기량별로 활용될 수 있도록 상관관계를 밝힐 예정이다.

참고문헌

- (1) Gasse, S. B. and Johnson, J. H., 1999, "A Computational Model Describing the Performance of a Ceramic Diesel Particulate Trap in Steady-State Operation and Over a Transient Cycle," SAE paper No. 99010465.
- (2) Konstandopoulos, A.G., Skaperdas, E., Warren, J. and Allansson, R., 1999, "Optimized Filter Design and Selection Criteria for Continuously Regenerating Dieselparticulate Traps," SAE paper No. 1999-01-0468.
- (3) Ohno, K., Shimati, K., Taoka, N., Santae, H., Ninomiya, T., Komori, T. and Salvat, O., 2000, "Characterisation of SiC DPF for passenger car," SAE paper No. 2000-01-0185.
- (4) Kim, H. N., Sung, Y. H., Jung, K. S, Choi, B. C. and Lim, M. T., 2008, "Size Distributions and Number Concentrations of Particles from the DOC and CDPF," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 9, pp. 1793~1799.
- (5) Konstandopoulos, A. G., Johnson, J. H., 1989, "Wall-Flow Diesel Particulate Filters-Their Pressure Drop and Collection Efficiency," SAE Transaction. 98 sec. 3 (J. Engines) Paper No. 890405, p. 625.
- (6) Konstandopoulos A. G., Skaperdas E., Masoudi M., 2001, "Inertial Contributions to the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters," SAE paper No 2001-01FL-117.
- (7) Masoudi, M., Heibel, A. and Then, P. M., 1989, "Predicting Pressure Drop of Diesel Particulate Filters: Theory and Collection Efficiency," SAE Paper No. 890405.
- (8) Van Nieuwstadt, M. J. and Trudell, D. F., 2004, "Diagnostics for Diesel Particulate Filters," SAE paper No. 2004-01-1422.
- (9) Kim, C. D., 2005, "Continuous Soot Regeneration Technologies of a Catalyzed Particulate Filter for Diesel Passenger Car," The 13th International Pacific Conference on Automotive Engineering.
- (10) Lee, J. W., Cho, G. B., Kim, H. S. and Jeong, Y. I., 2007, "A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System," *Transaction of the KSME B*, Vol. 31, No. 2, pp. 188~194.