

경유분사를 이용한 강제재생방식 DPF 시스템 연비 손실 최소화를 위한 재생시점 고찰

나 승 우^{1,2)} · 정 연 규²⁾ · 오 광 철^{*3)}

현대모비스 기술연구소¹⁾ · 연세대학교 사회환경시스템공학부²⁾ · 자동차부품연구원 환경시스템연구센터³⁾

An Experimental Study on Active Regeneration Timing for the Minimization of Fuel Penalty in Active Regeneration DPF System Using Diesel Injection

Seung-Woo Rah^{1,2)} · Youn-Kyoo Choung²⁾ · Kwang-chul Oh^{*3)}

¹⁾Technical Research Institute, HYUNDAI MOBIS, Gyeonggi 446-912, Korea

²⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

³⁾Environmental system R&D Center, KATECH, 74 Yongjung-ri, Pungse-my eon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 11 February 2009 / Accepted 15 April 2009)

Abstract : The number of vehicles applied diesel engine are rapidly rising for fuel economy. Accompanying this trend, application of an after-treatment system is strictly required as a result of reinforced emission regulation. The Diesel Particulate Filter (DPF) system is considered as the most efficient method to reduce particulate matter by car makers but also in retrofit market. In this paper we discussed the optimization of active regeneration timing by comparing the fuel consumption from back pressure caused by PM loading and from active regeneration. The effects of back pressure of DPFs during PM loading, active regeneration condition and engine emission(PM) on additional fuel consumption are experimentally investigated and the proper regeneration timings according to DPF systems and fuel loss for 160,000km are determined.

Key words : Regeneration timing(재생 시기), Back pressure(배압), Diesel injection(경유분사), Active regeneration(강제 재생), Fuel penalty(연비 손실), PM emission(입자상물질 배출량)

Nomenclature

X : PM Loading, g/l
BP : Back Pressure, bar
X_{regen} : PM loading at Regeneration, g/l
BPT : Balance Point Temperature, °C

1. 서 론

디젤엔진은 확산 연소 형태의 특성 때문에 질소산화물(NOx) 생성뿐만 아니라 부분적 과농 지역에

서는 매연이 다량 생성되는 문제를 근본적으로 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고압분사 등과 같은 분사 전략의 향상과 유동에 의한 혼합 조절 등으로 많은 배출 가스의 저감을 이루었지만 현재 강화되는 배출 규제를 만족시키기 위해서는 후처리 장치의 개발은 필수적이다.

그중 입자상물질의 제거를 위한 DPF(Diesel Particulate Filter)는 입자상물질 제거기술중에 가장 효과적인 기술^{1,2)}로 인식되고 있다. 따라서 최근에는 운행차 보급(Retrofit)시장 뿐만 아니라 대부분의 제작사에서도 필수적인 시스템으로 고려되고 있고

*Corresponding author, E-mail: kcoh@katech.re.kr

이러한 시스템의 최적화에 많은 시간을 할애하고 있다. DPF는 입자상물질인 PM을 필터방식으로 포집하고 재생하는 기술이다. 재생방식은 촉매에 의한 자연재생식³⁾과 전열장치나 버너^{4,5)}에 의한 강제 재생방식이 있으며, 최근에는 저온에서의 재생효율을 증대시키기 위해 자연재생방식과 강제재생방식이 복합된 복합재생방식이 활발히 연구되어 적용^{6,7)}되고 있다. 그 중에 발열 DOC를 이용하여 엔진에서 후분사된 미연연료를 이용한 재생방식은 현재 (Euro-4) 차량에 적용되고 있다.

운행차 보급시장(Retrofit Market)에서도 초기에는 자연재생방식의 DPF 시스템을 많이 적용하였으나 적절한 운행 정보의 분석을 통한 차량 선정(BPT 이상온도의 비율)의 한계 때문에 적용 범위가 제한적이었다. 그리고 자연재생방식은 근본적으로 DPF 시스템의 재생을 조절할 수 없기 때문에 재생효율의 감소나 배기온도 조건의 감소에 의해 PM이 정상적으로 재생되지 못하면 배압에 의해 연비 손실이 클 뿐 아니라 비정상적인 재생에 의한 필터의 파손의 원인⁸⁾이 된다.

따라서 본 연구에서는 자연재생방식의 DPF 시스템의 단점들을 해결하기 위한 하나의 방법으로 경유를 분사하여 발열 DOC로 가열하여 재생⁹⁾시키는 강제방식에서 PM이 로딩에 따라 발생하는 배압에 의한 연비 손실과 재생에 의해 발생하는 연비 손실을 비교함으로써 추가적인 연료 소비를 최소화 하기 위한 재생 시기 설정에 대해 논의하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 보여준다. 엔진은 실린더 부피가 16,000cc인 8기통의 TCI 엔진을 이용하였고 배기 후단에 차래대로 경유 분사장치, 발열 DOC 그리고 DPF가 장착되었다. DOC 입구의 가스 온도 및 배기유량을 기준으로 경유 분사량을 조절하여 재생시의 DPF 입구 온도를 조절하였다. 재생시 DPF 입구 가스 온도는 충분한 재생을 위해 600°C 정도로 조절하였고 재생시간은 10분으로 고정하였다. 분사기는 미립화 특성이 우수한 2유체 방식(Fuel:2bar, Air:1bar)의 분사기를 사

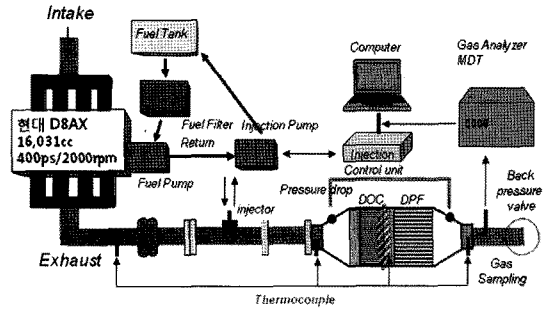


Fig. 1 Experimental setup

용하였고 분무 챔버 후단에 믹서를 장착함으로써 배기가스와의 혼합을 빠르게 하였다. 그리고 DPF 후단에는 경유 분사에 의한 슬립 평가를 위해 Fast FID가 설치되었고 그 뒤로 PM 로딩 모사를 위한 배압밸브가 설치되었다.

본 연구에 사용된 엔진 및 후처리 장치에 대한 사양은 Table 1에 표시하였다. 사용된 엔진은 PM 배출량이 커서 DPF의 재생 및 배압 변화에 따른 영향을 파악하기에 적합함을 알 수 있다.

Table 1 Specification of engine and DPF system

		D8AXTCI	
Engine	Displacement (cc)	16,031	
	Max. Power (ps/rpm)	400/2,000	
	Max. torque	166/1,200	
	combustion system	DI	
	NO _x (g/kwh)	9.79	
	PM (g/kwh)	0.281	
DOC	BSFC (g/kwh)	221.5	
	Dia. × L	11.25"×4.5"	
	Volume (liter)	7.33	
DPF	Cell size/Web thic.	400/7	
	Dia. × L	12"×12"	
	Volume (liter)	22.24	
	Cell size/Web thic.	200/16	

2.2 PM 로딩 방법 및 재생 간이내구

PM 로딩에 따른 재생시의 DPF의 내구성을 파악하기 위해 재생(비정상/정상재생) 반복 실험을 통하여 안전한 로딩 양을 확인하였다. PM 로딩(6g/l)은 DPF 시스템의 BPT이하의 영역에서 PM 배출이 많은 1000rpm, 800Nm에서 이루어졌고 PM 로딩 후

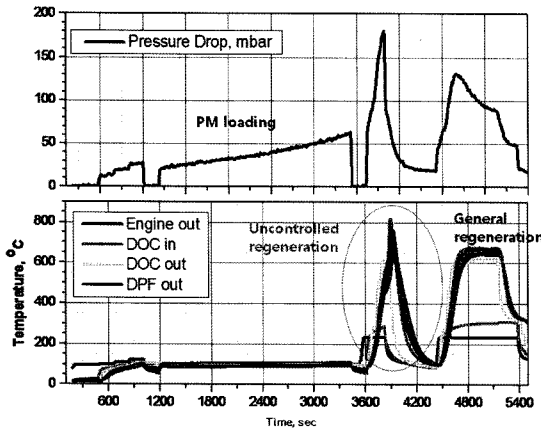


Fig. 2 PM loading and Regeneration procedure

1500rpm, 1000Nm에서 경유를 분사하여 DPF 출구 가스 온도가 550°C가 되었을 때 아이들로 떨어뜨렸다(Uncontrolled Regeneration). 그리고 나머지 PM을 1500rpm, 1000Nm에서 경유 분사를 하면서 완전히 재생시키고 다시 PM을 로딩 하여 15회 반복 수행되었다. 반복 재생 결과 이러한 로딩조건(6g/l 이하의 조건)에서는 필터의 파손이 일어나지 않음을 알 수 있었다. 이러한 과정은 Fig. 2에 나타냈다.

3. 실험 결과 및 고찰

강제 재생방법의 DPF 시스템의 재생 시기 결정은 크게 연비 측면과 DPF 담체의 내구성 측면에 대한 고려가 필요하다. 재생시기를 빠르게 설정할 경우 재생주기가 짧기 때문에 재생을 위해 추가적인 연료 분사가 증가하여 연비가 악화될 우려가 있다. 반대로 재생시기를 늦출 경우, 즉 PM 로딩양을 크게 잡을 경우 배압 증가에 의한 연비손실이 증가하게 되고 또한 재생시점의 PM 로딩이 큰 경우(6g/l 이상의 경우) DPF의 파손의 우려가 있다. 따라서 이에 대한 적정점을 잡는 것이 중요한 요소이다.

3.1 DPF 배압에 따른 연비 영향

DPF 배압에 따른 연비의 영향을 살펴보았다. 사용된 시험 모드는 ESC 운전 모드를 사용하였고 PM 로딩은 배압밸브로 모사하였다.

Fig. 3은 ESC 모드에서 DPF 및 배압 밸브 장착에 따른 배압 특성을 보여 준다. 그리고 Fig. 4는 Fig. 3

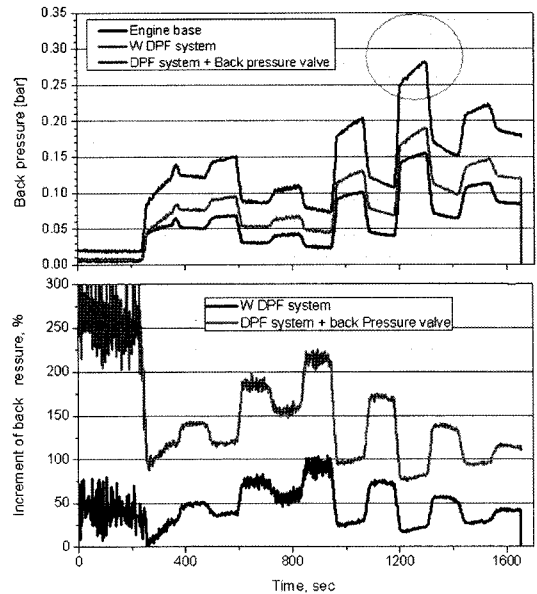


Fig. 3 Increment of back pressure according to DPF and back pressure valve system

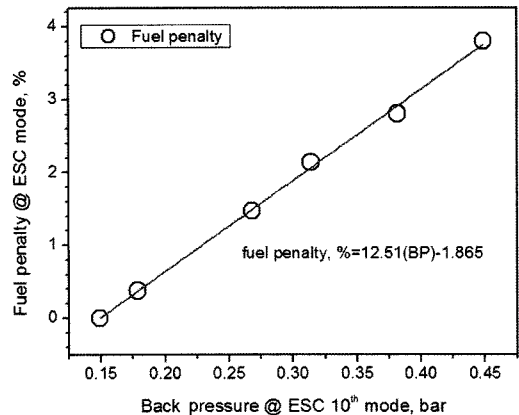


Fig. 4 Fuel penalty according to back pressure (ESC mode)

의 조건에서의 연비 변화이다.

배압이 증가함에 따라 ESC 모드에서의 연비 손실이 선형적으로 증가하는 모습을 보인다. ESC 모드의 10번째 모드에서 배압이 400mbar 정도이면 연비 손실이 3%정도 발생함을 볼 수 있다. 그러나 복합 재생방식을 채택한 실제 DPF 시스템에서는 모드 사이에 자연 재생에 의한 배압 감소가 있어서 연비 손실이 Fig. 4에서 보이는 결과 보다는 작을 것으로 예측되지만 대부분의 차량(시내 운행차)에서 BPT 이상의 온도가 5%이하임을 고려하면 위와 같이 배

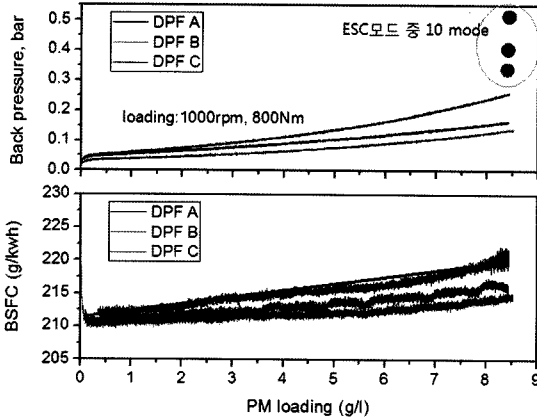


Fig. 5 Back pressure and BSFC during PM loading

압 변화에 따른 연비손실을 가정할 수 있다.

위의 결과는 배압 밸브를 이용한 결과로 PM loading 양으로 변환할 필요가 있다. Fig. 5는 PM 을 로딩하면서 측정된 배압 및 연비 변화를 보여준다. PM 로딩은 PM 산화의 영향을 제거하기 위해 BPT 이하의 온도에서 실시하였다.

PM이 로딩되면서 배압이 증가하고 그에 따라 연비 손실이 선형적으로 발생한다. PM을 8.4g/l 로딩 후 ESC 모드 중 10번째 모드에서 배압을 계속하고 그로부터 연비 손실량을 유추할 수 있다. Table 2는 위의 결과로부터 계산된 연비 손실을 보여준다.

Table 2 Fuel penalty when PM loading (ESC mode)

DPF	Fuel penalty at PM loading= 8.4g/l	X g/l (fuel penalty for PM loading=x g/l)
DPF A	3.139 %	$x/4.2 \times 3.139 \%$
DPF B	2.388 %	$x/4.2 \times 2.388 \%$
DPF C	4.640%	$x/4.2 \times 4.640 \%$

3.2 PM 재생에 따른 연료 소비

전술하였듯이 본 연구에서의 재생 방식은 경유 분사를 통한 재생방법을 채택하였다. 따라서 재생 시점에서의 경유 분사는 연비에 영향을 미치게 되고 재생 조건에 따라 분사량이 조절된다.

재생조건은 Lee⁹⁾ 등의 이전 연구를 통해 슬립을 최소화하기 위한 DOC 입구조건에서 DOC 후단 온도가 600°C, 10분 정도 유지 했을 때 재생이 80% 정

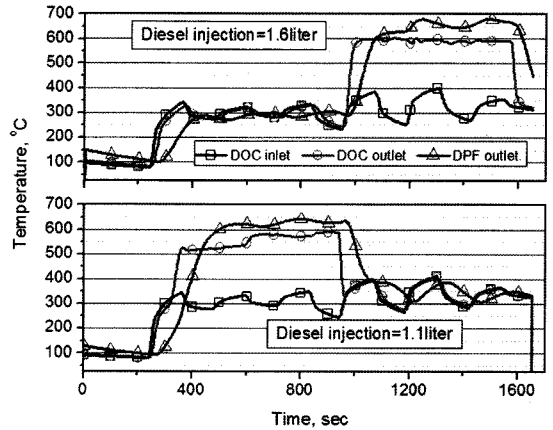


Fig. 6 Active regeneration during 10min in ESC mode (8th mode start, 2nd mode start)

도 이루어짐을 확인할 수 있었다. 이러한 조건에서 Fig. 6에서와 같이 ESC 모드 중간에 10분의 재생 시간을 들이므로 연비 변화를 확인하였다.

8번째 모드에서 분사를 시작한 경우에는 배기유량이 커서 600°C로 유지하기 위해선 2번 모드에서 시작한 경우 보다 0.5 liter의 연료를 더 소모함을 알 수 있다. 따라서 발열 DOC의 사양이 동일한 경우 한 번 재생시 연료 소비량은 위의 두 가지 경우의 평균값(~1.35liter/1generation)으로 결정하였다.

3.3 적정 재생 시기 결정

자연재생에 의한 PM 산화가 없다고 가정했을 때 ESC 모드 동안의 PM 배출량을 계산하면 15.91g (0.281g/kwh * 56.63 kwh) 정도임을 알 수 있다. 이로부터 ESC 모드 1사이클 당 PM loading은 0.715g/l이다. 그리고 ESC 모드동안의 경유 사용량을 측정해보면 14.76liter이고 운행차 보증기간 즉, 3년 160,000km를 고려하고 차량연비가 4km/l라고 가정할 때 보증기간(160,000km) 동안 사용되는 연료량은 40,000liter이고, ESC모드의 횡수로 환산하면 2710회 정도임을 알 수 있다.

앞 절에 배압에 의한 연비 손실과 PM 재생시의 연비손실을 재생시점에서의 PM 로딩양을 기준으로 정리한 그림은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7은 160,000km 운행했을 때 재생시의 PM 로딩양에 대해 배압에 의한 연료 소모량과 재생 횡수

Table 3 Summary of calculation parameters for decision proper regeneration timing

	Fuel economy 4km/l	Fuel economy 5km/l
Fuel consumption during ESC mode	14.76 liter	
Mileage for ESC mode (fuel economy*fuel consumption)	59.04km	73.8km
Number of ESC mode for 160,000km	2710	2168
Total fuel consumption During 160,000km	40,000liter	32,000liter

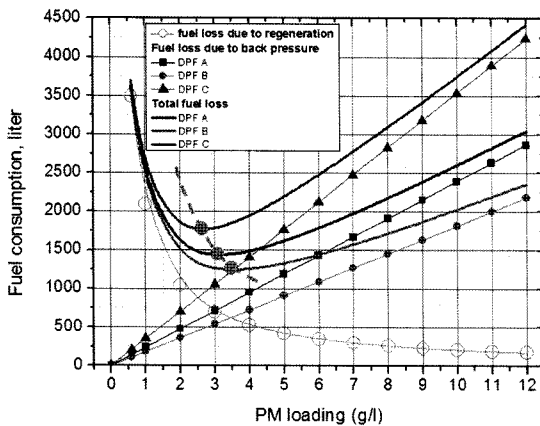


Fig. 7 Fuel consumption due to back pressure and active regeneration (160,000km, fuel economy=5km/l)

에 의한 연료 소모량을 보여준다. 예로 DPF B의 경우 재생시점을 PM이 4g/l 로딩 되었을 때를 잡았다면 배압의 증가에 의해 160,000km 동안 발생하는 연료 손실은 750liter 정도이고, 강제 재생시 사용된 연료 소비량은 500liter 정도임을 의미하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 재생시점을 PM 로딩량이 큰 부분에서 잡게 되면 배압에 의한 손실량이 증가하고 너무 작게 잡으면 강제재생에 의한 손실량이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 연비 손실을 최소화하기 위해서는 이 두 그래프의 합의 최소점의 위치에서 재생시점을 선정해야하고, 따라서 DPF B의 경우 3.5g/l에서 재생시점을 정하면 160,000km 동안 발생한 배압 및 강제 재생시에 손실된 연료량이 1,250liter 이고 연비 손실은 3.9% 정도이다. DPF A와 C의 경우는 PM 로딩시의 배압 증가가 커서 배압에 의한 연비 손실이 크게 되고 그림에서 알 수 있듯이 DPF B에 비해 각각 14.8%, 41.6% 정도 증가함을 알 수 있다.

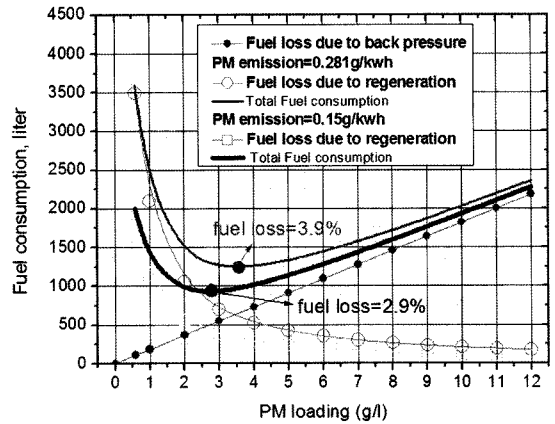


Fig. 8 Fuel consumption in case of decrease PM emission from Engine

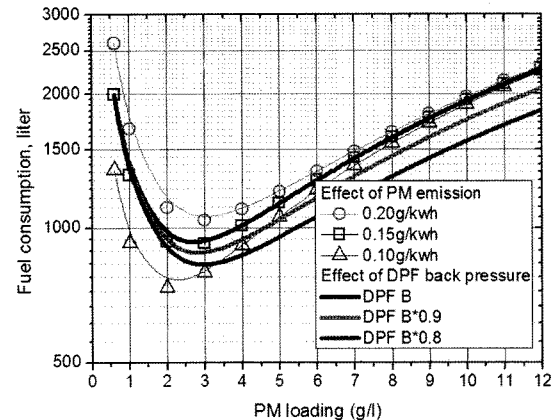


Fig. 9 The effect of PM emission and back pressure of DPF on fuel consumption (fuel economy=5km/l, 160,000km)

위의 경우는 엔진에서의 PM 배출량이 큰 경우이고 PM 배출량이 0.15g/kwh 정도로 작은 경우에는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 재생 횟수의 감소에 의해 재생시점이 작은 쪽(3.5g/l→2.8g/l)으로 이동하고 연비 손실은 2.9% 정도로 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 엔진에서의 PM 배출 및 DPF 배압감소에 의한 연료 소비량의 변화를 보여준다. PM 배출량은 Euro-2 정도의 배기수준에서 그보다 많이 배출되는 경우와 Euro-3 정도의 배기수준인 경우에 대해 비교하였고 연료 손실은 160,000km 동안 재생에 의해 연료 소비량의 감소로 각각 3.2%(0.2g/kwh), 2.9%(0.15g/kwh), 2.3%(0.1g/kwh)로 감소한다. 그리고 PM 배출이 많은 경우 X_{regen} 이 커짐을 알 수 있다.

DPF 부피의 증가와 DPF 사양(porosity, wall structure)에 의한 배압감소 그리고 자연재생에 의한 효과를 비교하기 위해 DPF B에서 배압이 10%감소한 경우와 20%감소한 경우에는 배압에 의한 연료 소비량의 감소에 의해 각각 2.9%(DPF B), 2.7%(10% 배압저감), 2.5%(20% 배압저감)의 결과를 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 경유 강제재생방식의 DPF 시스템의 최적화를 위한 재생 시기 설정위해 재생에 의한 연료소비량과 배압에 의한 연료 소비량을 비교함으로써 최소 연료소비가 이루어지는 재생시점을 결정하였다.

- 1) ESC 모드를 바탕으로 PM 로딩에 따른 배압, 연비 손실 그리고 재생시의 연료 소비량을 실험적으로 구하였다. DPF 배압에 따른 연비 손실은 배압에 선형적인 변화를 보임을 알 수 있었고, 재생시(DOC 출구온도 기준:600°C)의 연료 소비는 배기 유량 및 배기가스온도에 영향은 있지만 ESC 모드에서 평균적으로 1.3liter정도 소비되었다.
- 2) 배압에 의한 연료 손실 및 재생에 의한 손실의 합으로 최적의 재생시점을 정할 수 있었다.
- 3) 실험에 사용된 대형디젤엔진의 경우 DPF B의 경우가 배압이 상대적으로 낮아서 연료 소비량이 제일 작았고 재생시점은 3.5g/l 정도 로딩된 시점이 적절하였다.
- 4) 엔진에서 배출되는 PM 양 및 배압 변화 연비에 대한 효과에 의해 재생시점의 변화 및 연비 손실 양을 구할 수 있었다.

References

- 1) M. W. Vincent, P. J. Richards and T. J. Rogers, "Effective Particulates Reduction in Diesel Engines through the Use of Fuel Catalyzed

particulate Filter," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.3, No.1, pp.1-8, 2002.

- 2) A. G. Konstandopoulos and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filter," *Combustion and Flame*, Vol.121, pp.488-500, 2000.
- 3) H. Zheng and J. M. Keith, "Ignition Analysis of Wall-flow Monolith Diesel Particulate Filters," *Catalysis Today*, Vol.98, pp.403-412, 2004.
- 4) S. K. Oh, D. S. Baik and Y. C. Han, "Performance and Exhaust Gas Characteristics on Diesel Particulate Filter Trap," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.3, No.3, pp.111-115, 2002.
- 5) Y. Kong, T. Kozakiewicz, R. Johnson, C. Huffmeyer, J. Huckaby, J. Abel, J. Baurley and K. Duffield, "Active DPF Regeneration for 2007 Diesel Engines," *SAE 2005-01-3509*, 2005.
- 6) Y. Ham, D. Kim and K. Kim, "A Study on the PM Oxidation Characteristics of Electrical Heater DPF System," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.1, pp.183-190, 2006.
- 7) J. Lee, G. Cho, H. Kim and Y. Jeong, "A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System," *T. KSME B*, Vol.31, No.2, pp.188-194, 2007.
- 8) K. C. Oh, C. Lee and T. Cho, "Uncontrolled Regeneration Characteristics of SiC DPFs using DPF Test Rig," *Transactions of KSAE*, Vol.16, No.2, pp.80-86, 2008.
- 9) C.-H. Lee, K.-C. Oh, C.-B. Lee, D.-J. Kim, J.-D. Jo and T.-D. Cho, "Injection Strategy of Diesel Fuel for an Active Regeneration DPF System," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.8, No.1, pp.27-31, 2007.