

포집량에 따른 p-DPF의 정확효율 및 BPT 특성에 관한 실험적 연구

김 태 권¹⁾ · 김 영 조²⁾ · 하 지 수³⁾ · 이 춘 범⁴⁾ · 오 광 철⁴⁾

계명대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 계명대학교 대학원 기계공학과²⁾ · 계명대학교 에너지환경과학과³⁾ ·
자동차부품연구원 친환경디젤하이브리드센터⁴⁾

An Experimental Study on Filtration Efficiency and BPT Characteristics by Soot Loading in Partial-diesel Particulate Filter

Tae Kwon Kim¹⁾ · Young-jo Kim²⁾ · Ji Soo Ha³⁾ · Chun-beom Lee⁴⁾ · Kwang-chul Oh⁴⁾

¹⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

³⁾Department of Energy and Environmental Science, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

⁴⁾Diesel Hybrid R&D, KATECH, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 30 June 2010 / Accepted 21 June 2011)

Abstract : Diesel particulate filter is being recognized that it is the most effective technologies to reduce particulate matter. In this study, to determine the characteristics of the cell-open-type pDPF, we employed p-DPF to exhaust gas tunnel of diesel engine and surveyed filtration efficiency and BPT on the basis of PM which is exhausted from engine. In this paper the soot loading mass in DPF can be predicted from increase of differential pressure of DPF so that we can measure filtration efficiency and Balance Point Temperature (BPT) by soot loading mass. The result of the research showed that the filtration efficiency is 65% in ESC mode with 0.7mm hole diameter. For the results of the characteristics of filtration efficiency and BPT according to mass_exh, we found that if mass_exh increases, filtration efficiency increases and BPT decreases.

Key words : p-DPF(부분유량 매연여과장치), PM(입자상 물질), Filtration efficiency(정확효율), BPT(균형점 온도), Pressure drop(압력손실)

Nomenclature

cpsi : cells per square Inch, cell/in²
ΔP : differential pressure, mbar
BPT : balance point temperature, °C

1. 서 론

디젤엔진은 확산 연소 형태의 특성 때문에 질소 산화물(NOx) 생성뿐만 아니라 부분적 과농 지역에서는 매연이 다량 생성되는 문제를 근본적으로 안

고 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 후처리기술의 개발은 필수적이다.

그 중 입자상물질의 제거를 위한 DPF(Diesel Particulate Filter)는 입자상물질 제거기술 중에 가장 효과적인 기술^{1,2)}로 인식되고 있다. 따라서 최근에는 운행차 보급(Retrofit)시장 뿐만 아니라 대부분의 제작사에서도 필수적인 시스템으로 고려되고 있고 이러한 시스템의 최적화에 많은 시간을 할애하고

*Corresponding author, E-mail: tkkim@kmu.ac.kr

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(BPT이상 온도의 비율)의 한계 때문에 적용범위가 제한적이었다. 그리고 자연재생방식은 근본적으로 DPF시스템의 재생을 조절할 수 없기 때문에 재생효율의 감소나 배기온도 조건의 감소에 의해 PM이 정상적으로 재생되지 못하면 배압에 의한 연비 손실이 클 뿐 아니라 비정상적인 재생에 의한 필터의 파손의 원인⁸⁾이 된다.

한편, 최근 들어 이러한 단점들을 해결하고 약 50% 정도의 PM을 정화할 수 있는 개방단 형식의 Corrugation Structured Foil과 Metal Flat Fleece 가 층층히 겹쳐진 형태의 금속형 Partial DPF가 개발되어 높은 수준의 PM 정화성능을 요구하지 않는 EURO-4 수준의 대형차량 등에 적용되고 있다. 이와 같은 Partial 필터는 매연이 다공성의 금속 소결관에 일정량 쌓이면 더 이상 매연이 쌓이지 않고 배출되어 필터가 막히지 않는다는 장점이 있으나 배출가스 온도가 낮아 자연재생이 안 되는 조건에서는 매연정화효율이 급감하고 필터에 쌓였던 매연이 고유량 조건에서 순간적으로 Blow-off될 가능성이 있다. 그리고 Partial 타입의 필터는 필터 상태에 따라 매우 다른 특성을 보이기 때문에 한상태의 성능으로 그 특성을 규정짓기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 Cell Open Type의 Partial DPF의 특성을 파악하기 위해 필터의 상태에 따라 정화 효율의 변화와 BPT 특성의 변화를 고찰하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 COT(Cell Open Type) p-DPF을 특성을 파악하기 위해 PM Loading 따른 ESC Mode

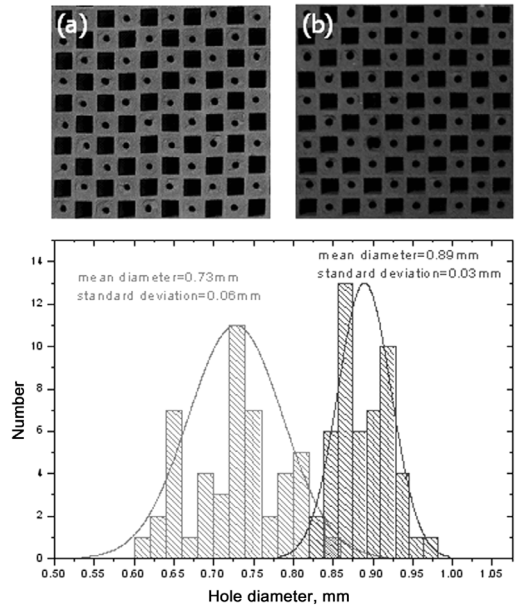


Fig. 1 Hole diameter of COT filter (a) Hole size=0.7mm, (b) Hole size=0.9mm

(ND-13)에서의 정화 효율과 BPT test를 수행할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 COT 필터의 후단 모습을 보여준다. 기존의 모노리스 타입의 플러깅된 부분을 부분으로 작은 Hole을 넣으로써 배기가스의 경로를 만들었다. 또한, 필터는 Hole의 평균직경이 0.7mm와 0.9mm인 COT 필터로써 각 필터 Hole의 오차는 각각 ± 0.06 과 0.03 mm이다.

2.1 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험 장치 사진을 보여준다. 엔진은 실린더 부피가 3,907cc인 4기통의 TCI 엔진을 이용하였고 배기 후단에 차례대로 DOC, p-DPF가 장착되었다. DOC 전단의 배기가스 온도를 측정하기 위한 온도 센서와 DOC+p-DPF시스템의 차압을 측정하기 위한 차압계가 설치되었고 DPF 시스템 후단에 PM의 Blow-off 특성 파악을 위한 광투과 방식의 Opacimeter를 설치하였다. 정화 효율 측정을 위해서 MDT(Micro Dilution Tunnel)를 이용하였고 여지에 쌓인 무게를 비교하여 정화 효율을 측정하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 엔진 및 DPF 시스템의 사양을 보여준다.

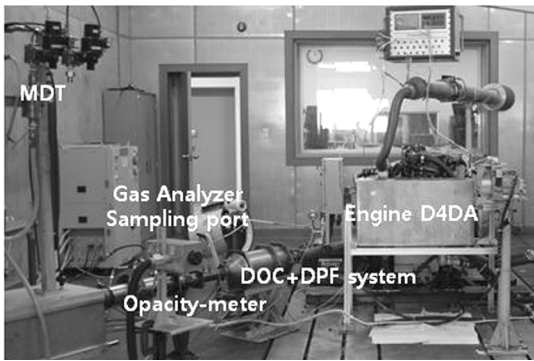


Fig. 2 Picture of experimental setup

Table 1 Specification of engine and DPF system

Engine	D4DA TCI	
	Displacement (cc)	3,907
	Max power (ps/rpm)	155/3,200
	Max torque (kgm/rpm)	38/1,800
	Combustion System	DI
	NO _x (g/kwh, ESC)	5.76
	PM (g/kwh, ESC)	0.25
	BSFC (g/kwh, ESC)	236
DOC	Dia. x L	7.5" x 4.0"
	Volume (liter)	2.9
	Cell size (cpsi)	400
DPF	Dia. x L	7.5" x 9"
	Volume (liter)	6.5
	Cell size (cpsi)	100

본 연구의 BPT(Balance Point Temperature)측정은 p-DPF Filter에 PM을 포집하기 위해 1500rpm에서 수행이 되었다. BPT에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 DOC 촉매의 NO₂ 전환 효율이다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 온도에 대한 전환 효율 특성을 갖는 DOC 촉매를 사용하였다.

2.2 실험 방법

Hole 크기가 다른 COT 필터의 PM Loading 양에 따른 정화효율을 측정하기 위하여 PM Loading 시간을 증가시키면서 PM을 쌓고 ESC Mode(ND-13)에서 정화효율을 측정하였다. 필터 내의 PM을 모두 태워 주기 위해서 기관회전수 3,000rpm, 토크 300Nm(배기가스 온도 450°C)에서 1시간 동안 유지시키고 차

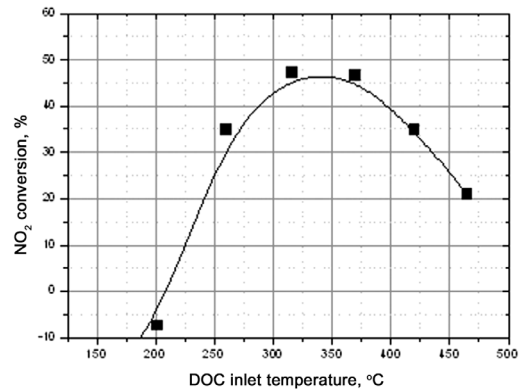


Fig. 3 NO₂ conversion of DOC (1500rpm)

압(PM Loading=0에서의 차압, 기준차압)을 기록하였다. 그런 다음 PM Loading을 위해 배기가스의 온도가 255°C인 기관회전수 1,500rpm, 토크 150Nm인 조건에서 시간을 증가시키면서 PM Loading 양을 조절하였다.

Partial 필터이기 때문에 시간에 따른 정화 효율이 변화한다. 따라서 정확한 PM Loading 양을 구하기 위해서 1시간 마다 10분 동안의 포집시간을 두어 PM Loading 사이에 정화 효율을 측정하였다. Fig. 4는 그런 과정을 보여준다.

이러한 Soot Loading Condition에서의 DPF 시스템의 차압의 변화를 측정한 결과가 아래의 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 두 p-DPF 모두 Soot Loading 시간 8시간까지는 차압이 선형적으로

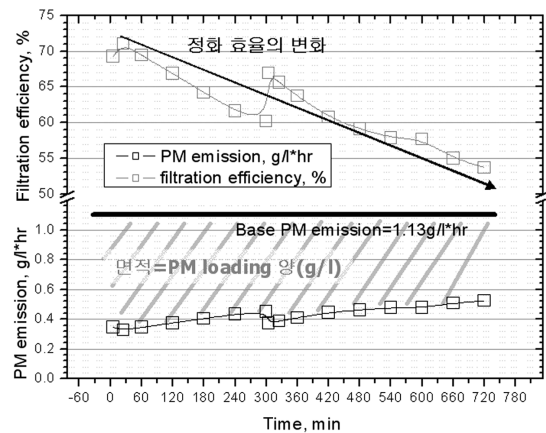


Fig. 4 PM loading in p-DPF according to elapsed time (PM Loading: 1500rpm, 150Nm, base PM emission=1.13g/(liter×hr))

Table 2 Differential pressure by soot loading time
(unit : mbar)

DPF_DP	0 hour	4 hour	8 hour
Hole size=0.7mm	24.5	36.7	46.1
Hole size=0.9mm	22.3	29.2	34.8

증가하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 PM이 순차적으로 포집되는 것을 알 수 있다.

필터 내의 PM Loading이 없을 경우 engine에서의 PM 배출량을 5회 측정하여 평균을 얻었고 DPF에 의한 정화 효율의 측정은 p-DPF를 장착하여 25회 (ESC 모드) 수행하여 정화효율의 평균과 변화 정도를 측정하였다. 그리고 PM Loading 시간을 증가시키면서 정화효율의 변화와 BPT를 1500rpm에서 T_exh를 10°C씩 증가하여 주면서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정화효율

DPF와 두 p-DPF를 장착하였을 때의 ESC 모드에서의 PM 정화효율결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 dpf의 경우 91%정도의 정화효율을, Hole 크기가 0.7mm와 0.9mm의 경우 각각 78%와 65%의 정화효율을 나타내고 있다. dpf의 경우는 초기 Burning 후의 포어 플라깅이 된 후(PM emission에 따라 다르지만 본 실험의 경우 ESC 처음 초기 해당)에는 정화 효율이 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 그러나 p-DPF의 경우 정화 효율 변동이 dpf에 비해 크게 나타났다. 그리고 Hole 크기가 0.7mm의 경우에는 정화 효율 변동이 75%~79%사이로 주기적인 변동 특성을 보인다. 이는 Hole 크기의 Deviation의 결과로 유추할 수 있다. 상대적으로 작은 Hole이 초기에 PM 정화 효율에 기여가 크다가 어느 정도 쌓이면 다른 사이즈로 옮겨가서 정화 효율이 낮아지다가 어느 이상 쌓이면 재생이 되면서 다시 작은 사이즈 Hole로 돌아오는 순환을 보여준다. 반면에

Table 3 Filtration efficiency (ESC mode, w/o PM Loading)
(unit : %)

Filtration efficiency	min	max
dpf	91	
Hole size=0.7mm	75	79
Hole size=0.9mm	64	67

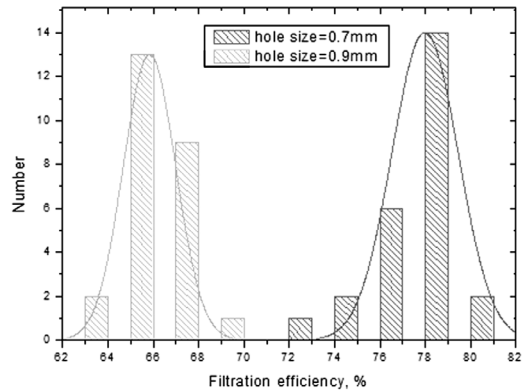


Fig. 5 Filtration efficiency (ESC mode, w/o PM Loading)

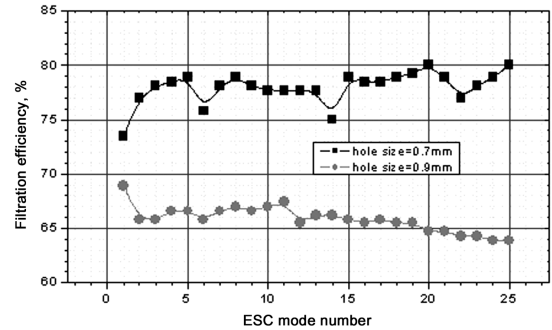


Fig. 6 Trend of filtration efficiency according to the number of ESC mode

0.9mm의 경우는 정화 효율이 낮아서 이러한 순환이 보다 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 PM을 Loading하면서 시간 마다 측정된 정화 효율을 보여준다. Loading 조건은 전술했듯이 1500rpm, 150Nm에서 수행되었고 정화 효율은 이 조건에서 10분간 PM을 샘플링하여 DPF시스템이 없는 PM 배출량과 비교를 통하여 측정되었다.

두 실험 샘플 모두 PM이 Loading되면서 정화 효율이 감소하는 모습을 보이고 있고 이는 ESC 모드에서의 정화 효율 유지하는 결과와 다른 결과를 보인다. 그 원인으로는 PM Loading 시 배기가스 온도가 250°C정도로 낮기 때문에 촉매가 제 역할을 못하는데 기인한다. 따라서 p-DPF는 사용 온도 변화에 따라 정화효율의 변화가 생김을 알 수 있고 Hole 사이즈가 작을수록 정화 효율의 감소가 두드러짐을 알 수 있다. 향후 ESC 모드의 rpm에서 Torque 감소를 통한 온도 변화에 따른 정화효율의 변화를 수행하

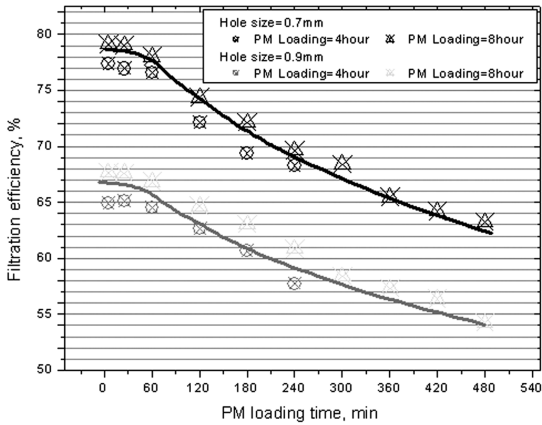


Fig. 7 Change of filtration efficiency for PM loading (1500rpm, 150Nm, Exhaust gas T=255°C)

고 이를 명확히 규명할 예정이다.

이렇게 Loading시킨 다음 ESC 모드에서 정화 효율의 변화를 살펴보았다. PM Loading을 4시간했을 때 Hole 크기가 0.7mm의 경우 ESC 모드 첫 번째에서 65%의 정화 효율을 얻을 수 있었다. 이는 Loading이 없을 때에 비해서 13% 정도의 정화 효율의 감소가 일어난 결과이다. 그러나 ESC 모드를 반복 수행한 경우 5회 이후 다시 PM Loading이 안 된 정화 효율로 회복함을 알 수 있다. 첫 회 ESC 모드에서는 PM Loading 유량에 비해 늘어난 배기유량(ESC 2번 모드)에 의해 Blow-off이 영향이 배기가스 온도의 증가 보다 지배적이어서 정화 효율이 많이 감소하는 결과를 보이거나 이후 배기가스의 온도 증가의 효과가 커지면서 초기의 효율을 회복하는 결과를 보인다. 8시간 Loading한 결과도 전체적인 경향은 4시간의 결과와 같고 초기의 정화 효율이 4시간에 비해 7%감소된 모습(정화 효율:58%)을 보인다. Hole size가 0.9mm인 경우에는 4시간, 8시간 PM Loading시 10%, 20%의 정화 효율의 감소를 보이고 회복이 0.7mm에 비해 빠름을 알 수 있다. 이는 ESC 모드 첫 회에 Blow-off가 0.7mm에 비해 크게 일어났다고 유추해 볼 수 있다.

3.2 BPT 특성

앞 절에서는 정화 효율 측면에서 p-DPF의 특성을 살펴보았다. 정화 효율의 결과에서 알 수 있듯이 p-DPF는 PM Loading 양 및 배기가스 온도에 따라서

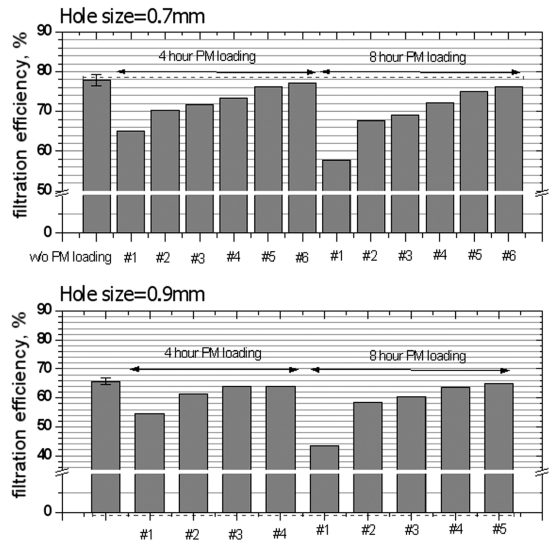


Fig. 8 Filtration efficiency in ESC mode with PM loading

정화 효율의 민감도가 변화하기 때문에 PM Loading 양의 조절이 필수적이다. 따라서 배기가스 온도에 따른 PM Loading과 산화의 균형 온도는 DPF에서 보다 더 중요하게 작용될 가능성이 있다. 본 절에서는 PM loading에 따른 BPT 온도의 변화를 Open된 Hole 크기에 따라 비교하였다.

Fig. 8은 PM Loading에 따른 BPT 온도의 경향을 보여준다. PM Loading 시간이 길어지면 길어질수록 BPT가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 정화 효율의 감소와 유동의 경로의 변화로 설명이 될 수 있다. PM Loading이 증가하면서 쌓이는 율이 감소하기 때문에 1차적으로 BPT 온도가 감소할 수 있다. 그러나 이것만 가지고 설명하기에는 정화 효율의 변화에 비해 BPT 온도의 변화가 크다는 것이다. 이는 PM이 Loading되면서 Open된 Hole로의 유량과 다공성의 Wall로의 유량이 비가 변화하여 생긴 변화임을 유추할 수 있다. 이에 대해서는 향후 많은 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

Table 5는 Hole size를 증가하면서 BPT를 측정한

Table 4 BPT according to PM loading

Hole size=0.7mm			
PM Loading time (min)	90	450	750
BPT (°C)	370	325	278
PM Loading mass (g/liter)	1.38	6.45	10.67

Table 5 BPT according to open hole size

PM Loading time=750min			
Hole size (mm)	0.7	0.8	0.9
BPT (°C)	291	310	318
PM Loading mass (g/liter)	10.67	-	9.26

결과이다. 동일한 촉매 시스템에서 Hole size가 증가할수록 BPT 온도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급했듯이 유량 비율의 변화에 기인한다고 볼 수 있다. Wall로의 유량이 증가한 경우(Hole size가 작은 경우) BPT가 증가하는 모습을 보인다. 이에 대한 정량적인 결과는 진행 중이고 향후 다른 논문을 통하여 발표 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 DPF 평가 방법을 통하여 새로운 타입의 p-DPF의 특성을 이해하고 PM Loading 양에 따라 변화하는 특성들에 대한 실험을 통하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 기존의 모노리스 타입의 DPF의 후단에 지름 0.7mm와 0.9mm로 Hole을 내어 각각 Sample1과 Sample2로 정의하고 ESC 모드를 25회 반복하여 정화효율을 실험적으로 구하였다. Sample1은 78%, Sample2는 65.8%의 정화효율을 가졌다.
- 2) PM Loading 양에 따른 정화효율을 확인하기 위하여 ESC모드로 Soot Loading 시간 4시간과 8시간 후의 정화효율을 각각의 Sample을 이용하여 수행하였다. 그 결과, PM Loading 양이 많을수록 정화효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었고, 모드를 반복할 때 PM이 Loading되지 않을 때의 정화효율로 회복한다. 이는 p-DPF의 정화 효율은 DPF에 비해 PM Loading 및 배기 온도에 영향을 많이 받음을 알 수 있다.
- 3) PM Loading 양에 따른 BPT 테스트를 수행한 결과 PM Loading 양이 많을수록 BPT가 낮아지는 것을 알 수 있었고, 이는 정화 효율의 변화와 필터 내의 PM으로 인한 차압의 증가 및 포집형상의 변화에 따른 Hole로의 유량과 wall로의 유량비가 원인으로 판단된다.
- 4) 본 연구로 인해 DPF의 후단에 단순히 Hole을 가공하였을 경우 정화효율적인 측면에서 기존

DPF에 비해 취약하고, 예측하기 어려운 현상(다공성의 벽면으로의 유량비 변화, PM Loading mass의 정량적인 값 등)이 발생하여 추후 많은 고찰이 필요할 것으로 생각된다. 강화되어지는 환경규제를 만족시키면서 엔진의 배압과, 연비 측면에서 이익이 되는 p-DPF의 개발이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 전자화자동차부품지역혁신센터와 자동차부품연구원의 지원에 의한 것입니다.

References

- 1) K.-C. Oh, K.-B. Lee, C. Lee and C. Lee, "Discussion about the Optimization of Active Regeneration DPF System Using Diesel Injection," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.737-742, 2008.
- 2) J. S. Park, C. S. Yoon, H.-S. Lee and K. M. Chun, "A Study on the between PM Loading and Pressure Drop Using Single Channel DPF," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.247-252, 2005.
- 3) T. Jacobs, S. C. R. Conway and A. Walker, "Development of Filter Technology for HDD Retrofit," 2005 SAE International, pp.1-3, 2005.
- 4) 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.
- 5) Y. Park, Y. Choi, H. Jung, N. Kim and J. Lee, "A Study on Emission Reduction Performance of a Partial Flow Diesel Particulate Filter," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.248-253, 2006.
- 6) Y.-S. Cho, S.-W. Lee, J.-S. Lee, Y.-B. Yoon and Y.-J. Park, "An Experimental Study on Regeneration Characteristics by Variation of Exhaust Gas Temperature, HC and O₂ Concentrations on DOC-CDPF System," Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.43-49, 2009.

- 7) J. S. Park, C. S. Yoon, H.-S. Lee and K. M. Chun, "A Study on the Relation between PM Loading and Pressure Drop Using Single Channel DPF," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.247-252, 2005.
- 8) C. S. Yoon, S. H. Song and K. M. Chun, "A Study on the Relation PM Mass and Pressure Drop Using Single Channel DPF," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp. 514-519, 2006.