

촉매 코팅 DPF의 soot loading과 유량 변화에 따른 압력강하 및 열전달에 관한 실험적 연구

조 용 석^{*1)} · 노 영 창²⁾ · 박 영 준²⁾ · 김 득 상²⁾

국민대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 국민대학교 자동차공학전문대학원²⁾

An Experimental Study on Effects of Soot Loading and Mass Flow Rate on Pressure Drop and Heat Transfer in Catalyzed Diesel Particulate Filter

Yong-Seok Cho^{*1)} · Young-chang Noh²⁾ · Young-Joon Park²⁾ · Duk-Sang Kim²⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 24 August 2006 / Accepted 10 November 2006)

Abstract : A diesel particulate filter causes progressive increase in back pressure of an exhaust system due to the loading of soot particles. To maintain the pressure drop caused by DPF under proper level, a regeneration process is mandatory when excessive loading of soot is detected in the filter. It is a major reason why the relation between the amount of soot and the pressure drop in a DPF becomes crucial. On the other hand, pressure drop varies with not only the soot loading but also conditions of exhaust gas such as mass flow rate. Therefore, the relation among them becomes complicated. Furthermore, the characteristics of heat transfer in a DPF is another crucial parameter in order for the filter to avoid thermal crack during regeneration period. This study presents characteristics of pressure drop under various conditions of soot loading and mass flow rate in catalyzed diesel particulate filter. This study also shows characteristics of heat transfer in DPF when high temperature gas flows into the filter. Experiments reveal that the soot loading and mass flow rate affect characteristics pressure drop independently. Experiments also indicate that the amount of coating material has little influence on pressure drop with changes in soot loading and mass flow rate. However, increased catalyst coating may lead to the improved heat transfer which is efficiency to reduce thermal stress of the filter.

Key words : CDPF(촉매코팅 매연 여과 장치), DPF(매연여과장치), PM(입자상물질), Pressure drop(압력강하), Heat transfer(열전달)

1. 서론

우수한 연비와 토크를 갖는 디젤엔진은 다량의 입자상물질(PM: Particulate Matter)을 배기 생성물로 배출한다. 이는 인체 및 환경에 치명적인 영향을 미치기 때문에 전 세계적으로 규제가 더욱 강화되고 있는 추세이다.¹⁾ 이를 줄이기 위한 장치로, 현재

DPF(Diesel Particulate Filter)가 가장 효율적인 PM 저감 장치로 각광받고 있다. 초기의 DPF는 필터에 PM을 포집하고, 추가적인 에너지를 공급하여 포집된 PM을 연소시키는 방법을 사용하였다. 그러나 이는 잦은 재생과 높은 에너지의 필요로 인해 연비의 악화를 초래하며, 이를 보완하기 위해 CDPF (Catalyzed Diesel Particulate Filter)와 같은 방안이 제안되었다.²⁾ CDPF는 필터 내부에 촉매를 코팅하여 보다

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

낮은 온도에서 재생하는 것이 가능하고, 추가적인 에너지의 낭비를 막는 효과를 가져 올 수 있다.^{3,4)} 그러나 도시주행과 같은 저부하 조건에서는 배기가스의 온도가 재생에 필요한 온도보다 낮아 재생이 연속적으로 일어나지 못하는 현상이 문제시되고 있다. 이러한 현상이 반복되면 PM은 필터에 계속 축적되고 배압이 점차 증가하여 기관성능의 악화를 초래하게 된다. 따라서 필터 내에 축적된 PM을 후분사(post-injection) 등을 통하여 강제적으로 연소시켜 DPF를 재생시킬 필요가 있다. 그러나 강제적인 DPF의 재생은 연비 및 필터의 내구성에 악영향을 미칠 수 있어, 필터 내에 축적된 PM의 양을 정확히 예측하여 재생시점을 결정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.^{5,6)}

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 DPF 평가용 rig를 제작하여 수행하였으며 test rig의 간단한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 장치는 DPF, PM generator, 압력 및 온도 측정 장치 등으로 이루어져 있다.

먼저, compressor와 heating tape을 사용하여 특정한 유량의 공기를 가열하여 PM generator로 공급하고, PM generator를 거친 공기는 일정량의 PM을 포함한 상태로 DPF에 공급된다. 이때 공급된 PM은 DPF 시편에 포집되고, PM이 점차 포집됨에 따라 변화하는 차압을 DPF 양단에 있는 압력센서를 사용하

여 측정할 수 있다. 또한 실제 차량에 DPF가 적용되었을 시에는 엔진의 부하조건이나 엔진회전속도에 따라 입구조건이 변화하게 된다.⁷⁾ 따라서 입구유량의 변화에 따른 압력강하 특성을 파악하는 것은 재생시점을 결정할 때 중요한 변수로 작용한다. 이를 측정하기 위해 다양한 유량 조건에 따른 압력강하 실험을 수행하였다. 또한 DPF 내부에 열전대를 장착하여 DPF 내부 측정점의 온도를 측정할 수 있게 하였다.

2.1.1 DPF

실험에 사용된 DPF의 제원을 Table 1에 나타냈으며, 시편은 실제 크기의 DPF에서 28 mm × 28 mm × 256 mm로 가공하여 실험하였다. Photo. 1은 실제 크기의 DPF 형상을 나타내며, Photo. 2는 가공한 DPF 시편의 형상이다. 압력강하 특성 실험에서는 자연 재생 방식 DPF 시스템용 DOC와 촉매 코팅량이 18 g/ft³, 30 g/ft³ 인 CDPF를 조합하여 수행하였다.

2.1.2 PM generator

Compressor에서 압축된 공기는 레귤레이터에 의해 압력이 조절되고, by pass 밸브를 이용하여 유량을 조절할 수 있다. 또한 압축공기의 수분을 제거하

Table 1 Specifications of DPF

Property	Specifications
Material	100% Re-SiC
Cell density(cell/in ²)	169
Cell size(mm×mm)	1.5×1.5
Wall thickness(mm)	0.4
Pore size(nm)	12~15
Porosity	45%

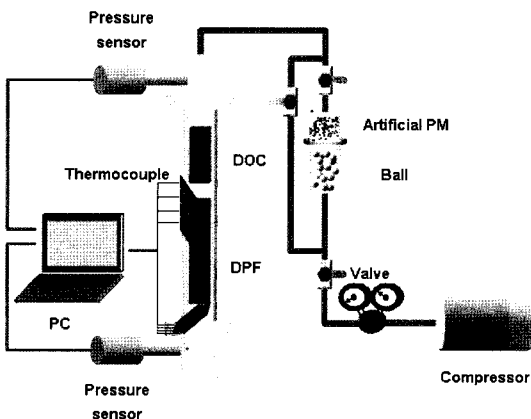


Fig. 1 Schematic diagram of test-rig

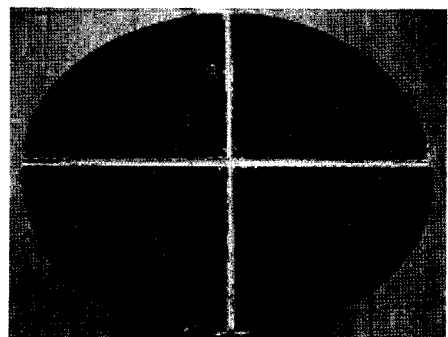


Photo. 1 Configuration of DPF

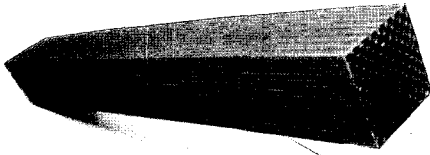


Photo. 2 Configuration of DPF modified for rig tests

기 위해서 compressor에 수분 분리기를 설치하고 PM이 공급된 이후의 모든 라인에는 heating tape를 사용하여 가열하였다. 가열된 공기는 PM generator의 입구부에서 작고 균일한 크기의 구슬과 충돌하여 운동량을 분산하여 PM을 공기 중에 띄우는 힘을 균일하게 한다. 균일하게 부양된 PM은 출구부로 향하게 되고 DPF에 포집된다.

Rig 실험에 적용된 인공 PM으로는 Degussa AG의 Printex-U를 사용하였다. Printex-U의 BET surface area는 $95 \text{ m}^2/\text{g}$ 이며 입자직경은 40~45 nm이다. Printex-U는 압력강하와 재생실험에서 차량 배기 가스의 PM과 매우 유사한 특성을 가지고 있음이 검증된 바 있다.⁸⁾ 인공 PM 입자를 압축공기에 균일하게 혼합하여 DPF로 공급할 수 있도록 설계하여 PM generator에 적용하였다.

2.1.3 압력 측정장치

DPF의 압력강하 특성을 측정하기 위해서 DPF 전 후단에 압력센서를 설치하였다. 압력센서로부터의 압력신호는 DAQ를 통하여 PC로 저장되고, 전·후단의 압력차를 통하여 압력강하량을 측정하게 된다. 실험에 사용된 압력센서의 측정범위는 최대 2 bar이다.

2.1.4 온도 측정장치

DPF 내의 열전달특성을 측정하기 위해서 DPF에 총 8개의 1mm의 지름을 갖는 k-type 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 설치한 열전대의 위치는 Fig. 2에 나타내었으며 4개소는 필터단면 중앙에서

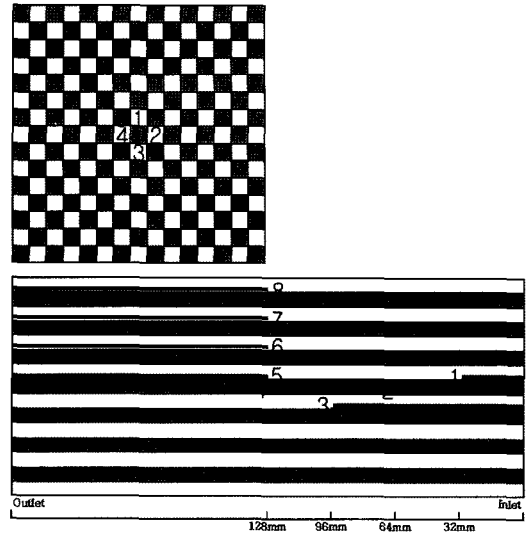


Fig. 2 Location of thermocouples in DPF

깊이 방향으로 필터 입구에서 열전대를 삽입하였으며, 나머지 4개소는 필터 출구에서 열전대를 삽입하여 필터 벽의 온도분포를 측정하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 Soot loading에 의한 압력강하

PM을 시편에 축적시키기 위해서 먼저 PM generator를 이용하여 압축공기와 혼합하여 공급하였다. 가열한 압축공기는 인공 PM과 섞여 DPF로 흐르게 하여 PM 축적을 재현하였다. 또한 압축공기는 일정하게 흐르게 하여 PM이 DPF에 균일하게 쌓일 수 있도록 하였다. 실험이 진행됨에 따라 DPF에서의 배압이 증가한 것이 확인되면 반응기에서 DPF를 분리하여 질량을 측정하였다. 이 과정에서 DPF 시편의 온도 변화 등에 의한 수분 응축을 가능한 억제하기 위해 최대한 빠른 시간 내에 저울의 밀폐공간으로 이송하였다. 또한 정밀한 무게의 측정이 실험에 매우 중요한 변수로 작용할 수 있으므로 분해능이 0.1 mg인 A&D사의 HN-202를 사용하였다.

2.2.2 유량 변화에 따른 압력강하

필터 내의 유량의 변화에 따른 압력강하 특성을 파악하기 위해서 clean 상태 조건에서의 압력강하 측정 후 PM을 압축공기와 함께 흐르게 하여 80 ℓ/m 의 유량을 기준으로 압력강하가 측정되는 범위까

지 PM을 축적시키고 그 시점에서 유량의 변화를 주어 압력강하를 측정하였다.

2.2.3 필터내의 열전달

DPF 내의 열전달 특성을 관찰하기 위해서 고온의 압축공기를 DPF로 공급하였다. 반복실험에서 DPF 전단의 초기 온도는 30°C, 압축공기의 온도는 130°C로 설정하였고 650초간 공급을 지속하는 실험을 통해 각부의 온도변화를 측정하였다. 같은 방법으로 촉매 코팅량이 다른 DPF에서 실험이 이루어졌으며 그 결과 값을 비교, 분석 하였다. 또한 DPF 내에 soot을 0.65 g/l 을 축적시킨 후 같은 방법으로 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Soot loading에 의한 압력강하

Fig. 3와 Fig. 4는 DOC를 DPF(18 g/ft³)와 조합하였을 때와 DPF(30 g/ft³)를 조합하였을 시의 soot loading에 의한 압력강하 특성을 나타낸다. 각 시편들의 실험값들은 평균값과 편차로 표시하였다.

Soot loading의 초기에는 필터 벽면과 벽 내의 pore에 soot이 쌓이면서 급격한 배압 증가가 발생한다. 이 구간을 wall filtration 구간이라 하고 pore에 soot이 포화되면 soot이 벽면에 쌓여 좀 더 완만한 배압이 발생하게 된다. 이 구간을 cake filtration 구간이라 한다.⁹⁾

본 실험에서는 wall filtration 구간과 cake filtration 구간을 구분하는 기준을 특성 그래프의 미분값의 변화가 거의 발생하지 않게 되는 시점으로 정의하

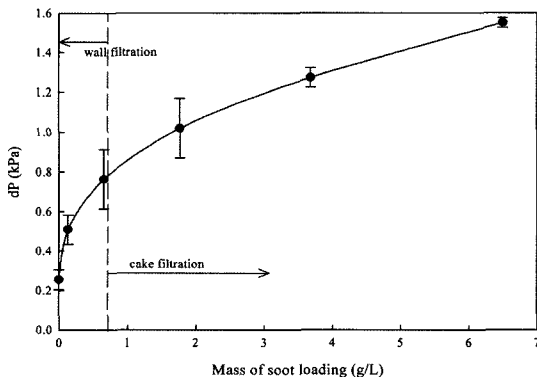


Fig. 3 Pressure drop @ DPF(18 g/ft³)

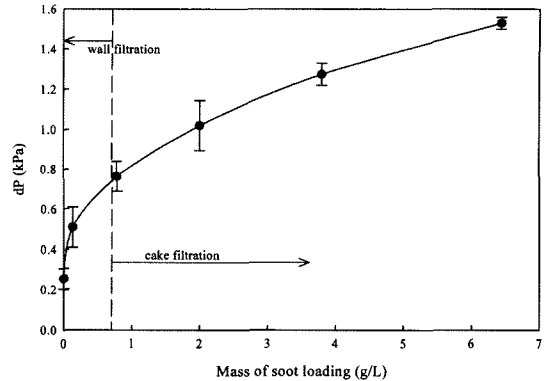


Fig. 4 Pressure drop @ DPF(30 g/ft³)

였다. 본 실험에서 soot loading이 전혀 없는 clean 상태에서 배압은 약 260 Pa 수준을 형성하였다. 재생시, 필터의 내구성에 영향을 미치지 않는 최대 허용 soot loading 량인 6.5 g/l 에서 최대 배압은 1.6 kPa로 나타났다. 시편마다 약간의 차이가 있었지만 시편들의 형상이 다소 상이하어 생긴 차이로 판단된다. 실험 결과에서 wall filtration 구간과 cake filtration 구간은 확연히 구분되었다. 평균적으로 cake filtration 구간의 시작은 soot loading 양이 약 0.6 g/l 인 것으로 확인되었다.

촉매 코팅량 변화가 압력강하 특성에 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과가 있었으나¹⁰⁾, 촉매 코팅량, 코팅 방법, 워시코트의 재질 등 다양한 변수가 복합적으로 작용할 수 있으므로 촉매 코팅량의 변화가 압력강하의 변화로 직결된다고 하기 어려운 것으로 판단된다. 본 실험에 사용된 DPF는 촉매 코팅량이 다른 두 필터에서 모두 동일한 압력강하 특성을 보이는 것으로 확인되어, 촉매 코팅량 변화가 압력강하 특성에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

3.2 유량 변화에 따른 압력강하

Fig. 5와 Fig. 6은 촉매 코팅량이 18 g/ft³인 필터와 30 g/ft³인 필터의 입구 유량을 변화시켰을 때의 압력강하 특성을 보여준다. 실험 결과 유량 증가에 따라 배압이 증가하는 것을 볼 수 있다. Wall filtration 구간에서는 유량변화에 따른 압력강하 특성 변화가 매우 복잡하게 나타나지만, cake filtration 구간에서의 압력강하 특성은 유량증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. Wall filtration 구간 즉,

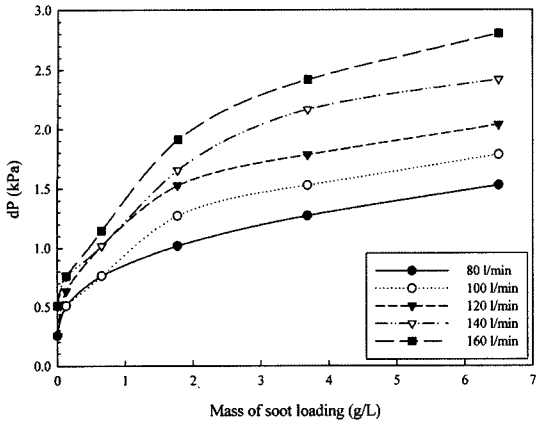


Fig. 5 Pressure drop according to variable mass flow rate @ DPF(18 g/ft³)

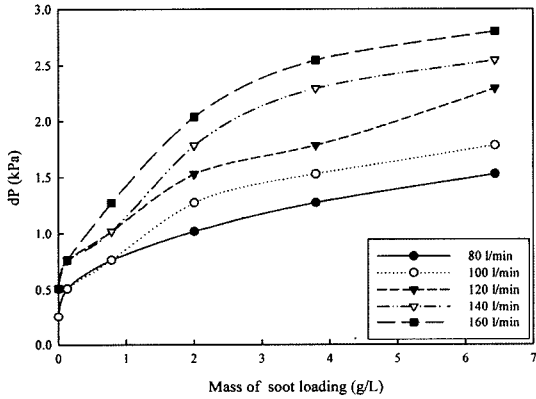


Fig. 6 Pressure drop according to variable mass flow rate @ DPF(30 g/ft³)

soot이 pore를 막는 과정에서 DPF에 축적된 soot의 분포는 가스의 유동 경로에 매우 복잡한 영향을 미치지만, cake filtration과 같이 soot이 필터 벽면에 쌓이게 되면 유동할 수 있는 유효면적의 감소만을 가져오게 되어 유량 증가에 따라 압력강하 특성이 선형적으로 증가하는 것으로 판단한다. 따라서, 재생 시점의 판단에 있어서는 wall filtration 구간의 불안정한 압력강하를 고려하지 않고, cake filtration 영역에서 선형적으로 발생하는 soot loading 및 유량의 상관관계를 이용하는 것이 효과적이라 볼 수 있다.

3.3 필터내의 열전달

Fig. 7,8은 촉매 코팅량이 다른 두 필터에 고온의 가스를 유입했을 때의 DPF 내의 열전달 특성을 보

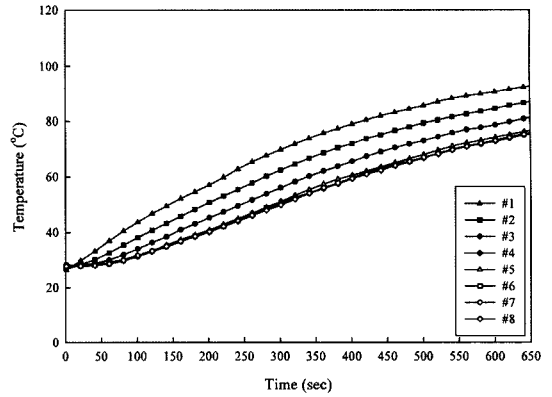


Fig. 7 Characteristics of thermal distribution @ DPF(18 g/ft³)

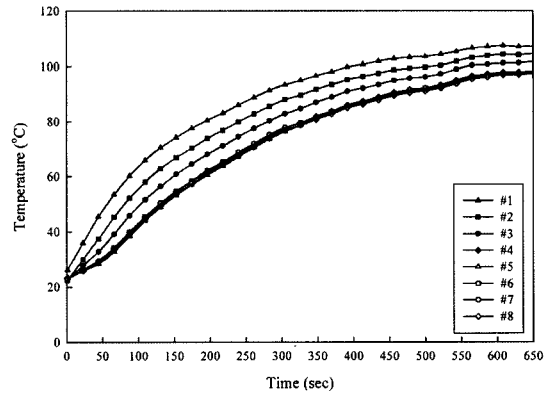


Fig. 8 Characteristics of thermal distribution @ DPF(30 g/ft³)

여준다. 가스 온도는 약 130°C이고 DPF 내의 초기 온도는 약 30°C이다.

측정 결과 DPF의 입구에서 가까울수록 온도 상승이 급격히 일어남을 쉽게 알 수 있다. 또한 종방향으로 열전대를 삽입한 깊이에 거의 비례하여 온도 상승이 느려지는 것을 알 수 있다.

또한, 촉매 코팅량이 30 g/ft³의 필터가 모든 구역에서 온도 상승이 더 빠르게 나타났으며, 모든 지점에서 거의 동일하게 약 20°C 이상 온도가 높았으며, 평균적으로 약 36%의 온도 상승이 발생하였다. 또한 각 측정부위의 온도 분포도 상대적으로 균일한 것으로 나타났다.

Fig 9,10은 DPF 내에 soot이 0.65 g/l 축적되었을 시에 필터의 열전달 특성을 보여준다. 촉매 코팅량이 30 g/ft³인 DPF에서는 촉매 코팅량이 18 g/ft³인 DPF에 비해서 온도가 빠르게 상승한다. 또한 필터

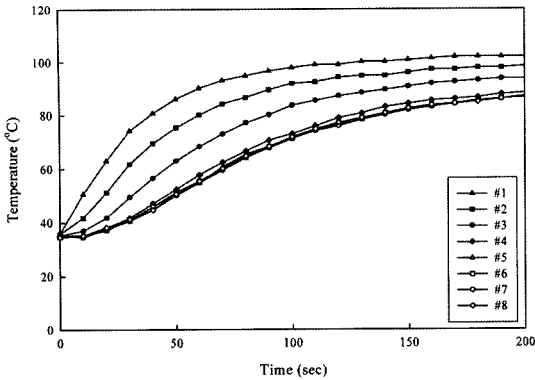


Fig. 9 Characteristics of thermal distribution when soot particles are loaded in filter @ DPF(18 g/ft³)

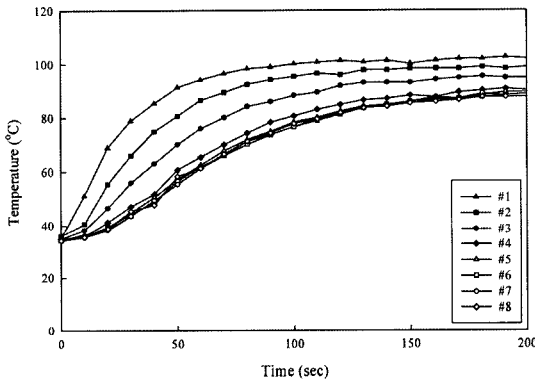


Fig. 10 Characteristics of thermal distribution when soot particles are loaded in filter @ DPF(30 g/ft³)

내에 soot이 축적되어 있을 시에는 soot이 축적되어 있지 않은 경우와 비교하여 모든 구역에서 빠르게 온도가 상승하여 짧은 시간 내에 온도가 안정화 한다. 이는 필터 내에 축적되어 있는 soot이 필터의 재질인 SiC 보다 열전달률이 높기 때문으로 판단된다.

이로써, soot의 축적 및 촉매 코팅량의 증가는 필터 내의 열전달을 증가시킴을 확인할 수 있었다. 또한 열전달의 증가는 필터 내의 온도 분포를 균일하게 하여 재생 시에 thermal crack의 발생을 억제하는데 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 soot loading 및 유량 변화에 따른 압력강하 특성을 파악하기 위하여 실험을 해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험에 사용한 필터는 흡입유량 80 l/m 조건에서, soot loading이 없는 clean 상태에서의 압력강하량이 약 260 Pa이며, 최대 배압은 1.6 kPa이다.
- 2) DPF로 유입되는 유량 증가에 따라 배압이 상승하였으며, cake filtration 구간에서는 유량 증가에 따라 선형적인 증가를 가져왔다.
- 3) 본 실험에 사용된 DPF에서 촉매 코팅량의 변화는 압력강하 특성 변화에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
- 4) 촉매 코팅량의 증가와 soot의 축적은 필터 내의 열전달을 증가시켜 빠른 온도 상승과 균일한 온도 분포를 형성하는데 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차사업단) 및 2006년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구로, 연구지원에 감사드립니다.

References

- 1) S.-H. Cho, S.-S. Park, Y.-J. Lee, S.-G. Ryi, C.-B. Lee and S.-H. Choi, "The Application of Reforming Reaction of Diesel Fuel on Regeneration System for DPF," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.416-421, 2005.
- 2) Y.-G. 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.
- 3) P. Richards, B Terry, M. W. Vincent and J. Chadderton, "Combining Fuel Borne Catalyst, Catalytic Wash Coat and Diesel Particulate Filter," SAE 2001-01-0902, 2001.
- 4) P. Zelenka, S. Schmidt and G. Elfinger, "An Active Regeneration Aid as a Key Element for Safe Particulate Trap Use," SAE 2001-01-3199, 2001.
- 5) A. Schafer-Sindlinger, C. D. Vogt, J. Okumura, T. Toyoshima and S. Hashimoto, "Engine

- Bench and Vehicle Durability Tests of Si Bonded SiC Particulate Filter,” SAE 2004-01-0952, 2004.
- 6) G. A. Merkel, W. A. Cutler and C. J. Warren, “Thermal Durability of Wall-Flow Ceramic Diesel Particulate Filter,” SAE 2001-01-0190, 2001.
 - 7) R. Locker, C. Sawyer, S. Menon, P. Floerchinger and A. Craig, “Diesel Particulate Filter Operational Characterization,” SAE 2004-01-0958, 2004.
 - 8) R. J. Locker, N. Gunasekaran and C. Sawyer, “Diesel Particulate Filter Test Methods,” SAE 2002-01-1009, 2002.
 - 9) S.-C. Jung, J.-S. Park and W.-S. Yoon, “Rigorous Modeling of Pressure Drop for Single Channel DPF Filtration,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.247-252, 2005.
 - 10) P. Flörchinger, M. Anderson, Z. Hou, T. Taubert, E. Steinbrueck and T. Angelo, “Prediction and Validation of Pressure Drop for Catalyzed Diesel Particulate Filters,” SAE 2003-01-0843, 2003.