스크린 필터 구조 Partial Metal DPF의 PM 저감 특성

김 충 희¹⁾ · 김 현 철¹⁾ · 이 기 수¹⁾ · 최 정 황²⁾ · 전 문 수³⁾ · 신 석 신⁴⁾ · 서 현 규⁵⁾

자동차부품연구원 동력시스템연구센터¹⁾ · 씨엠씨(주) 연구소²⁾ · 한국교통대학교 에너지시스템공학과³⁾ ·
충남대학교 기계공학과⁴⁾ · 공주대학교 기계자동차공학부⁵⁾

PM Reduction Characteristics of Partial Metal DPF with Screen Mesh Filter Structure

Chunghui Kim¹⁾ · Hyunchul Kim¹⁾ · Geesoo Lee¹⁾ · Jeonghwang Choi²⁾ · Munsoo Chon³⁾ ·
Suk Shin Shin⁴⁾ · Hyun Kyu Suh⁵⁾

¹⁾Powertrain System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon,
Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾CMC R&D Center, CMC Co. Ltd, 355-29 Dokjeong-ri, Jangan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-944, Korea

³⁾Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation, Chungbuk 380-702, Korea

⁴⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

⁵⁾Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 331-717, Korea

(Received 6 August 2012 / Revised 29 October 2012 / Accepted 9 November 2012)

Abstract : In this work, the 1L grade integrated metal DOC/DPF filter that can install in engine manifold position was developed to investigate the effect of platinum-coating amount of filter on the improvement of filter activation temperature and reduction of particulate matter (PM). This filter was installed in 2.9L CI engine which meets the EURO-4 emission regulation. Tests for PM reduction efficiency of filter were conducted under ND-13 mode with full-load test condition. It was revealed that the time to reach the activation temperature of metal filter (280°C) was shorter as the amount of platinum-coating increased. This short activation time can be helpful for the reduction of CO and HC emissions during cold start condition. At the same time, PM reduced as the coating amount increased. The reduction percentage of DOC₄₀, DOC₂₀, and DOC₀ were 96.7% (2.34 mg/kW'h), 95.1% (3.47 mg/kW'h), and 94.5% (3.69 mg/kW'h) compared to previous result (71.4 mg/kW'h), respectively.

Key words : Balance point temperature(재생평형온도), Diesel oxidation catalyst(디젤산화촉매), Metal diesel particulate filter(금속매연저감장치), Particulate matter(입자상물질)

Nomenclature

P : pressure, mbar
T : temperature, °C

Subscript

exh : exhaust

1. 서론

디젤 자동차는 가솔린 자동차에 비하여 열효율이 높아 연비가 우수하고, CO₂의 배출량이 약 20% 이상 감소하는 장점이 있어, 국내외 시장에서 판매가 증가하는 추세이다. 그러나, 디젤 연료의 연소 특성상 배출되는 질소 산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)은 인체의 폐나 호흡기에 흡수되는 경우에 폐암 및 각종 질환을 유발하는 등 치명적인 것으로 알

*Corresponding author, E-mail: hksuh@kongju.ac.kr

려져 있다.

디젤 자동차의 배출가스 저감을 위한 방법은 엔진 연소시에 발생하는 배출가스를 감소하는 전처리 저공해 청정 엔진 기술과 엔진에서 배출된 가스를 필터를 통해 저감하는 후처리 필터 기술로 크게 분류된다. 대표적인 후처리 필터 기술은 디젤 산화촉매(DOC; Diesel Oxidation Catalyst)와 입자상 물질 저감장치(DPF; Diesel Particulate Filter)로 구성되며, 최근에는 2014년부터 적용되는 EURO-6 배출규제에서 NO_x 배출 규제치가 대폭 강화됨에 따라 후처리 필터에 SCR(Selective Catalytic Reduction) 기술을 접목하여 NO_x를 저감하는 시도가 진행되고 있다.

현재, 입자상 물질의 저감을 위한 필터는 체적의 15-95% 정도가 기공으로 이루어져 약 90% 이상의 입자상 물질(PM) 저감 효율을 보이는 다공질 재료의 세라믹 필터를 주로 사용하고 있다.^{1,2)} 그러나, 다공질 세라믹 필터는 일부 해외 기업에서 생산 및 판매를 독점하고 있으며, 필터의 주요 재질인 코디어라이트(Cordierite)는 가격이 비싸고, 원활한 재생이 이루어지지 못할 경우에는 배압이 상승하여, 연비 손실 및 엔진 성능에 악영향을 미치는 것으로 보고되었다. 또한, 비정상적인 재생시에는 필터가 파손되기도 하는 것으로 알려져 있다.^{3,4)} 따라서, 배기가스 온도 분포가 높은 대형 디젤 자동차에는 주로 세라믹 필터가 사용되나, 상대적으로 배기가스 온도 분포가 낮은 중소형 디젤 자동차는 세라믹 필터의 사용에 많은 제약이 있다. 이와 같은, 세라믹 필터의 단점을 해결하고자 내열성, 내식성 및 강도가 우수한 금속 소재의 필터 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 측면에서, Partial DPF 구조의 금속 소재 필터는 배기가스의 일정 유량만을 포집하는 특성이 있어, 낮은 배압 특성과 높은 열전도성 및 내구성이 뛰어난 대체 필터로 주목받고 있다.^{5,6)}

따라서, 본 연구에서는 엔진 장착이 가능한 1L급 금속 소재 DOC/DPF 일체형 필터를 제작하여 다양한 엔진 운전 조건에서 백금 코팅량에 따른 온도 분포 및 입자상 물질(PM) 저감 효율을 분석 검토하였다. 또한, 연구 결과를 비교 분석하여 개발된 필터의 중소형 디젤 자동차 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 주로 장시간 내구성 평가 실험에 사용되는 Water Brake Type 동력계 시스템에 인터쿨러와 터보 차저가 장착되어 있고, EURO-4 배출가스 규제를 만족하는 2.9L급 4기통 고압 직분사식 디젤 엔진을 적용하여 실험을 수행하였다. 자세한 동력계 및 엔진의 주요 제원은 Table 1과 2에 나타내었다.

금속 소재 일체형 필터의 평가를 위한 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 엔진에서 배출되는 배기가스 온도 및 배압 특성을 분석하기 위해 배기 매니폴드 후단에서 필터 후단까지 총 4개의 K-type 열전대를 설치하였으며, 필터 전·후단에 압력센서를 설치하여 배압 및 차압 특성을 분석하도록 하였다.

시험 조건에 따른 엔진 특성을 분석하기 위해 다양한 실험 조건에서의 엔진 회전수, 냉각수 온도, 오

Table 1 Specifications of water brake type dynamometer

Type	Water brake
Max. Torque [Nm/rpm]	2,416/1,400
Max. Power [HP/rpm]	500/1,700~6000
Throttle actuator [rpm]	± 25
Input shaft [mm]	38.1mm

Table 2 Specifications of test engine

Displacement [cc]	2,902
Number of cylinder	4
Fuel system	Common rail
Max. power [PS/rpm]	192/3,700
Max. Torque/ Rotational speed [kg·m/rpm]	36.5/2,000
Emission regulation	EURO 4

Fig. 1 Diesel engine and metal DPF for the tests

Fig. 2 Structure of screen mesh filter for test

일 온도, 흡입 공기량, 엔진 부하량 및 동력성능을 측정하였으며, 측정된 데이터는 데이터 수집 장치를 통해 실시간으로 모니터링 및 저장되도록 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 일체형 DOC/DPF를 나타낸 것으로, 선행 연구^{7,8)}에서 우수한 재생 평형 온도(Balance Point Temperature, BPT) 및 차압 성능을 보이는 것으로 확인된 S-Type 필터 구조의 DOC와 K-Type 필터 구조의 DPF로 제작하였다.

Metal DPF는 복잡한 유로의 기공을 배기가스가 통과하게 되고, 이때 입자상 물질은 스크린 구조의 Wire에 충돌, 확산 및 간섭의 효과로 포집되는 구조를 가지며, SiC필터와 연계형 구조로 제작하여 포집 효율을 향상시키고자 하였다. 촉매 코팅량의 증가는 필터내의 온도를 빠른 속도로 상승시키고, 온도 분포를 균일하게 하여, 재생시 필터의 Thermal Crack의 발생을 억제하는 효과가 있다.⁸⁾ 따라서, 백

Table 3 Specifications of screen mesh filter

Items	DOC	DPF
Type	S	K
Material	SUS310s	
Pitch [mm]	4	
Density [cps]	300	
Corrugation angle [deg, °]	18°	
Mesh	80	
Wire [mm]	0.14	
Coating amount [g/ft ³]	40 (DOC ₄₀) 20 (DOC ₂₀) 0 (DOC ₀)	15

금 코팅량에 따른 필터의 성능 비교 연구를 위해 본 연구에 사용된 필터의 백금 코팅량은 Table 3에 나타낸 바와 같이 DPF는 15g/ft³이고, DOC는 각각 40g/ft³, 20g/ft³, 0g/ft³으로 제작하였다. 또한, DOC 코팅량의 원활한 구분을 위하여 샘플 표기는 DOC₄₀ (40g/ft³), DOC₂₀ (20g/ft³), DOC₀ (0g/ft³)으로 표기하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 활성화 온도 평가

본 연구에서는 개발된 금속 필터를 기존 세라믹 필터의 장착 위치(Conventional Filter Position, CFP)와 엔진 근접 위치(Manifold Filter Position, MFP)에 각각 설치하여 각 경우에 따른 온도 활성화 시점 및 특성을 각각 비교하여 연구 평가 하였다. 평가 조건은 1,900rpm의 동일 엔진 회전수 조건에서, 엔진 부하율 8%에서 23%로 변경시 변화되는 온도 특성 및 필터 활성화 시간에 대하여 검토하였다.

2.2.2 PM 저감 평가

금속 필터의 PM 저감 평가는 ND-13 모드⁹⁾로 평가하였으며, 평가 전에 약 400°C 이상의 온도에서 20여 분간 필터를 재생하여 필터 내부에 기포집된 입자상 물질(PM)을 완전히 제거하고, 필터의 초기 무게를 확인한 후에 실험을 수행하였다.

입자상 물질(PM)의 측정은 항온·항습기에서 최초 온도 22±3°C 범위에서, 상대습도 48±8% 범위에서 24시간동안 항온, 항습 시킨 여과지를 ND-13 모드⁹⁾ 조건 하에서 실험 전·후 무게를 측정하여 산출하도록 하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 활성화 온도 평가

Fig. 3은 Metal DPF를 엔진 근접 위치(MFP)에 장착한 경우, 동일 운전 조건에서 백금 코팅량에 따른 필터 전·후단 온도 결과를 나타낸 것이다.

연구 결과, 필터 입구 온도는 코팅량과 상관없이 유사하게 나타났으나, 필터 후단 온도는 필터의 활성화 온도인 280°C까지 도달하는 시간이 DOC₀ (0g/ft³)에 비해 DOC₄₀ (40g/ft³)이 14초 줄어드는 결과를 나타내었다. 즉, 필터의 백금 코팅량이 증가할수록 필터 활성화가 빨리 진행되는 것으로 판단된다. 실제 차량의 배출가스 및 연비 시험에서 CO와 HC 발생이 초기 냉간 시동시에 90% 이상 배출되는 점을 고려할 때, 이와 같이 촉매 활성화 시점이 빠를수록 높은 배출가스 저감 효과를 보일 것으로 판단된다.

Fig. 4는 DOC₂₀ 필터를 엔진 근접 위치(MFP)와 기존 세라믹 필터 위치(CFP)에 각각 장착한 후, 동

Fig. 3 The effect of coating amount on the exhaust temperature

Fig. 4 The effect of filter position on the exhaust temperature

일한 실험 조건에서의 활성화 온도 시험 결과를 나타낸 내용이다. 연구 결과, 동일 측정 시간에서 기존의 세라믹 필터 위치(CFP)에 장착한 경우보다, 엔진 근접 위치(MFP)에 장착한 경우의 필터 온도가 약 30°C 높게 나타났으며, 필터 활성화 온도까지 도달하는 시간은 약 40초정도 빨라지는 결과를 나타내었다. 기존 세라믹 필터의 경우에는 낮은 열전도율 및 내구성과 같은 단점으로 엔진 근접 장착에 어려움이 있었으나, 본 연구에서 개발한 금속 필터의 경우 엔진 근접 장착이 가능하여 전술한 바와 같이 필터의 활성화 시간 단축을 통한 초기 배출가스 저감 효과가 있을 것으로 판단된다.

3.2 PM 저감 평가

ND-13모드⁹⁾에서 DOC₄₀ 샘플에 대한 온도, 배압 및 차압의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분석 결과, 본 연구에서 개발한 일체형 금속 필터의 원활한 재생 과정에 따른 배압 및 차압의 결과가 모두 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 입자상 물질(PM)의 총 배출량은 2.34mg/kWh이었다. 본 실험의 선행 연구 결과, 엔진 입자상 물질(PM)의 총 배출량이 5mg/kWh 이하인 경우에는 실제 차량의 배출가스 측정 모드인 NEDC(New European Driving Cycle) 평가시의 PM 배출량은 3mg/km이하로 나타났다. 결과적으로 DOC₄₀ 필터는 EURO-6 배출가스 규제인 입자상 물질(PM) 배출 5mg/km 이하를 만족하는 결과를 나타내었다.

Fig. 6은 DOC₂₀ 샘플에 대한 입자상 물질(PM) 저감 평가 결과를 나타낸 내용이다. 연구결과, DOC₄₀

Fig. 5 Exhaust pressure and temperature results of DOC₄₀ (40g/ft³) filter test

Fig. 6 Exhaust pressure and temperature results of DOC₂₀ (20g/ft³) filter test

Fig. 7 Exhaust pressure and temperature results of DOC₀ (0g/ft³) filter test

샘플과 유사한 배압 및 차압 결과를 나타내었다. PM 배출량은 3.47mg/kW'h로 DOC₄₀ 샘플에 비해 코팅량 감소로 약 48% 증가했으나 EURO-6 배출가스 규제(5mg/km 이하)는 만족하는 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 DOC₀ 샘플에 대한 입자상 물질(PM)의 저감 평가 결과이다. 비교 결과, DOC₄₀과 DOC₂₀ 샘플에 비해 DPF 차압이 최대 50mbar 상승한 결과를 나타내었다. 이러한 이유는 백금 코팅시 PM 산화 온도는 약 280°C~320°C에서 산화가 시작하나, DOC₀ 샘플의 경우 백금 코팅이 되지 않아 일반적인 PM 산화 온도인 550°C 이상의 조건을 만족하지 못하여, 배압 및 온도가 상승한 것으로 판단된다. PM 배출량은 3.96mg/kW'h의 결과로 DOC₄₀에 비해 69% 증가한 결과를 나타내었고, EURO-6 배출가스 규제(5mg/km 이하)를 역시 만족하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 엔진 근접 장착이 가능한 1L 급 급

속 소재 DOC/DPF 일체형 구조 필터를 제작하고, 실험용 엔진에 장착하여 백금 코팅량에 따른 활성화 온도 및 PM 저감 효율 평가를 수행하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 금속 소재 DOC/DPF 일체형 필터의 백금 코팅량에 따른 필터의 활성화 온도(280°C 이상) 도달 시간은 DOC₄₀ (40g/ft³) 필터가 DOC₀ (0g/ft³) 필터에 비하여 14초 정도 빨리 도달하는 것으로 나타났다. 또한, PM 저감 특성은 기초 결과(71.4 mg/kW'h)에 대비하여, DOC₄₀은 96.7% (2.34 mg/kW'h), DOC₂₀은 95.1% (3.47 mg/kW'h), DOC₀은 94.5% (3.69 mg/kW'h)의 저감 효율을 보여, 코팅량이 증가할수록 저감효율이 증가하는 결과를 보였다.
- 2) 금속 소재 DOC/DPF 일체형 필터의 장착 위치에 따른 활성화 온도의 변화를 연구한 결과, 엔진 근접 장착 경우(Manifold Filter Position, MFP)가 동일 시간에서 기존 세라믹 필터 장착 경우(Conventional Filter Position, CFP)보다 활성화 온도가 30°C 가량 높게 나타났으며, 활성화 온도까지 도달 하는 시간도 40초 정도 빨라지는 결과를 보였다.
- 3) 금속 소재 DOC/DPF 일체형 필터의 백금 코팅량이 증가하고, 엔진에 근접(MFP)하여 장착을 할 경우, 필터의 활성화 온도까지의 도달 시간이 단축되고, 높은 PM 저감특성을 보였다. 이러한 특성 활성화 시간의 단축은, 냉간 시동시 CO 및 HC가 약 90% 이상 배출되는 점을 고려할 때 높은 배출가스 저감 결과를 나타낼 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구에서 개발한 금속 소재 DOC/DPF 일체형 구조 필터의 PM 저감 효율은 금속 필터와 SiC 연계형 구조로 되어 있다. 따라서, PM 저감 효율은 금속 필터에 의한 저감 효율과 SiC에 의한 저감 효율에 대한 추가적인 연구를 통하여, 각각의 저감효율 특성을 명확히 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 부품소재기술 개발사업의 일환으로 수행되었으며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사하는 바이다.

References

- 1) A. G. Konstandopoulos and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filter," *Combustion and Flame*, Vol.121, Issue 3, pp.488-500, 2000.
- 2) 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.
- 3) J. H. Kim, G. B. Cho, H. O. Cha and Y. G. Jeong, "The Characteristics of Pressure-drop and Trapping for Diesel Particulate Filter System Using Pellet Filters," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.280-286, 2004.
- 4) 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, 2006.
- 5) S. S. Lee, G. B. Cho, J. H. Kim, H. S. Kim, E. S. Lee, K. H. Oh, S. H. Han, K. J. Kim and Y. I. Jung, "A Study on the Performance of Radial Type Metal Foam DPF," *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.414-419, 2006.
- 6) K. H. Kim, J. K. Kim and H. Y. Song, "Characteristics of Metal Foam DPF," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.619-623, 2009.
- 7) C. H. Kim, H. C. Kim, G. S. Lee, J. H. Choi and M. S. Chon, "A Study on Balance Point Temperature Characteristics of Metal DPF for a Diesel Engine," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.928-933, 2010.
- 8) S. H. Yoo, Y. C. Noh, Y. J. Park, D. S. Kim and Y. S. Cho, "An Experimental Study on Pressure Drop by Soot Loading and Heat Transfer in Catalyzed Diesel Particulate Filter," *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.317-376, 2006.
- 9) Regulation for Certification Way and Process of the Exhaust Emissions Reduction System/ Low Emissions Engine in Diesel Vehicle, Ministry of Environment, 2005-16, 2005.