

입자상물질과 Ash양이 디젤매연여과장치 내의 배압 및 유동균일도에 미치는 영향

김윤지¹, 한단비¹, 서태원^{1,3}, 오광철², 백영순^{1,*}

¹수원대학교 환경에너지공학과
18323 경기도 화성시 봉담읍 와우안길 17, 환경에너지공학과
²한국자동차연구원
31214 충남 천안시 동남구 풍세면 풍세로 303
³한국환경공단 환경기술연구소
22689 인천시 서구 정서진로 410 환경산업연구단지

(2019년 12월 5일 접수; 2019년 12월 13일 수정본 접수; 2019년 12월 20일 채택)

Effect of Particulate Matter and Ash Amount on Pressure Drop and Flow Uniformity of Diesel Particulate Filter Reduction System

YunJi Kim¹, DanBee Han¹, TaeWon Seo^{1,3}, KwangChul Oh², and YoungSoon Baek^{1,*}

¹Department of Environment-Energy Engineering, The University of Suwon
17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong-si 18323, Korea
²Korea automotive technology institute
303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea
³Korea Environment Corporation, Environment Technology Research Institute
410 Jeongseojin-ro, Seo-gu, Incheon-si 22689, Korea

(Received for review December 5, 2019; Revision received December 13, 2019; Accepted December 20, 2019)

요 약

최근 미세먼지 증가로 인하여 디젤엔진의 배출 규제가 강화됨에 따라 디젤 매연여과장치에 관심이 급증하게 되었으며, 특히 디젤 배기가스 후처리 장치의 고효율화에 대한 기술개발이 더욱 요구되고 있다. 이에 대한 일환으로서 디젤매연여과장치(diesel particulate filter, DPF) 내 배기가스의 유동 균일도를 향상시키고 배압을 낮추어서 배기가스처리 효율을 높이는 연구가 많이 되고 있다. 본 연구에서는 ANSYS Fluent를 이용하여 직경 12"의 DPF와 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst, DOC)를 장착한 디젤 매연여과장치에서의 배기가스의 유속과 온도, DPF IO ratio, Ash와 PM양에 따른 배압에 미치는 영향을 시뮬레이션 하여 배압을 낮추는 최적화 연구를 하였다. 결과로서 배기가스의 온도와 유속이 낮을수록 배압이 낮아졌으며, PM양이 Ash양보다 배압에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 비대칭 DPF가 대칭 DPF에 비해 배압이 더 낮게 나타났으나, 유동 균일도의 경우는 다양한 변수에 관계없이 일정하게 나타났다. european stationary cycle (ESC), european transient cycle (ETC) 조건에서 PM의 정화효율은 비대칭, 대칭 DPF 관계없이 유사하나, particle number (PN)의 정화효율에서는 비대칭 DPF가 대칭 DPF에 비해 높게 나타났다.

주제어 : 디젤매연여과장치, 전산유체역학, 유동 균일도, 압력분포

Abstract : Recently, as the fine dust is increased and the emission regulations of diesel engines have been tightened, interest in diesel soot filtration devices has rapidly increased. There is specifically a demand for the technological development of higher diesel exhaust gas after-treatment device efficiency. As part of this, many studies were conducted to increase exhaust gas treatment efficiency by improving the flow uniformity of the exhaust gas in the diesel particulate filter (DPF) and reducing the pressure drop between the inlet and the outlet of DPF. In this study, the effects of pressure drop by the flow rate and temperature

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ysbaek@suwon.ac.kr; Tel: +82-10-6252-6109; Fax: +82-31-220-2533

doi: 10.7464/ksct.2020.26.1.22 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

of exhaust gas, DPF I/O ratio, Ash, and PM amount in diesel reduction device were simulated via a 12" diameter DPF and diesel oxidation catalyst (DOC) using ANSYS Fluent. As the flow rate and temperature decreased, the pressure drop decreased, whereas the PM amount affected the pressure drop more than the ash amount and the pressure drop was lower in anisotropic DPF than isotropic DPF. In the case of DPF flow uniformity, it was constant regardless of the various variables of DPF. In ESC and ETC conditions, the filtration efficiency for PM was similar regardless of anisotropic and isotropic DPF, but the filtration efficiency for PN (particle number) was higher in anisotropic DPF than isotropic DPF.

Keywords : DPF (diesel particulate filter), Computational Fluid Dynamics, Flow Uniformity, Pressure Distribution, Pressure Drop

1. 서론

최근 미세먼지 증가로 인해 디젤엔진의 배기가스 규제가 강화됨에 따라 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst, DOC), 디젤매연여과장치(diesel particulate filter, DPF), 선택적 환원 촉매(selective reduction catalyst, SCR) 등 각종 디젤 배기 후 처리 장치의 기술개발이 요구된다[1]. 디젤 후처리 장치는 대부분 촉매를 사용하여 유해물질을 처리하는데, 배기가스가 촉매 담체에 균일하게 유입되면 높은 촉매 활성으로 인해 배기가스 처리효율이 향상되기 때문에 배기가스의 균일한 유입은 매우 중요하다. 배기가스의 흐름이 처리장치에서 균일하지 않으면 포집된 물질이 국부적인 누적으로 재생과정에서 높은 열이 발생하여 DPF 크랙의 원인이 되며, DOC의 경우에는 촉매의 성능에 영향을 줌으로 인해 NOx의 처리 효율의 감소로 이어진다. 따라서 배기가스의 균일한 유입은 후처리 장치 성능에 크게 영향을 미치기 때문에 배기가스의 유동 균일도를 향상시켜 효율을 증대 시킬 필요가 있다[2].

또한 DPF의 여과는 초기에 필터 벽 내부(deep bed filtration)에서 이루어지는데, 필터 내부에 존재하는 불규칙한 공극과 포집 요소(collector)들과 입자상물질들 사이에서 물리적 간섭에 의하여 포집되며, 그에 따라 급격한 압력강하를 야기한다. 필터 내부의 포집이 지속되면 더 이상 PM이 내부에 침투하지 못하고 필터 벽 상부에 층을 형성하며 스스로 필터의 기능(cake filtration)을 하게 되고, 이때 압력강하는 PM의 포집 양에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 따라서 많은 DPF의 연구자들은 PM의 포집된 양을 압력강하로 표현하여, DPF 기술개발 시 고려해야 하는 가장 중요한 인자이다.

Lemme et al. [3], Johnson et al. [4] and Bissett et al. [5]는 촉매변환기 내의 유속분포 실험을 통하여 보다 균일한 속도분포를 얻기 위해 연구를 수행했다. 이러한 실험연구는 PC 및 소프트웨어의 발달로 시뮬레이션의 정확성이 점차 높아지고, 시간과 실험비용 절감 등으로 CFD (computational fluid dynamics, 전산유체역학) 해석으로 대체하게 되었다. Kim et al. [6], Anthony et al. [7], Herman et al. [8] and Warren et al. [9]는 수치해석을 이용하여 촉매 변환기의 입구, 확대관의 각도 및 DOC, DPF의 셀 밀도, 입구 배기관의 곡률에 따른 유속분포 및 배압을 시뮬레이션으로 해석했으며, 많은 연구자들이 배기가스의 유동 균일도 및 배압 해석을 CFD를 이용하여 수행하고 있다. 이 외에도 동일한 면적에서 DPF의 포집효율을 높이기 위하여 Haralampous et al. [10], Ogyu et al. [11], Wurzenberger et al. [12], and Tang et al. [13]의 연구자들이

실험과 수치해석으로 연구를 수행했다. 이 연구들은 유량과 온도 및 압력 강하를 기초해서 필터에서 매연 질량을 계산하는 방법과 Ash loading양에 따른 DPF의 압력 강하, 비대칭 채널 구조를 갖는 필터에 대한 시뮬레이션 접근법을 제시하였다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 직경 12", 길이 3"의 DPF와 직경 12" DOC, 길이 1"의 DOC를 장착한 저감장치의 내부에 배기가스가 유입될 때, 시뮬레이션 하여 시뮬레이션 결과와 자동차부품연구원의 실험 결과와의 비교로 시뮬레이션의 신뢰성을 확인하였다. 이를 바탕으로 배기가스의 유속, 온도, DPF IO ratio, Ash와 PM양에 따른 배압에 미치는 영향을 시뮬레이션 하여 배압이 낮고 유동균일도가 높은 DPF의 최적조건 찾는 연구를 수행하였다.

2. 시뮬레이션 해석 및 방법

2.1. 지배방정식

본 시뮬레이션에서 배기가스 저감장치의 해석은 전산유체역학 상용코드인 ANSYS Fluent 19.2를 이용했다. 3차원 Navier-Stokes 방정식에 근거하여 배기가스 저감장치 내의 배기가스 압력, 유속, 유동 균일도의 해석을 시뮬레이션 했으며, 배기가스의 난류의 영향을 고려하기 위하여 K-ε Realized model, 온도분포를 위해 Energy equation, DOC, DPF의 세라믹구조는 Fluent 내의 다공성 물질모델을 이용하여 계산했다.

아래와 같이 연속방정식(Equation (1)), 모멘텀 방정식(Equation (2)), 에너지 방정식(Equation (3)), 다공성물질 모델식(Equation (4))으로 해석하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot (\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (3)$$

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (4)$$

여기서 p 는 압력(Pa), v 는 유속(m s⁻¹), ρ 는 유체의 밀도(kg m⁻³), $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서(stress tensor), D_{ij} 는 점성저항계수, C_{ij} 는 관성저항계수, $D_{ij} = \frac{1}{K_i}$ (DOC는 3.5×10^7 , DPF는 2.6×10^7), $C_{ij} = 2\beta$ (DOC는 20.4, DPF는 0)이다.

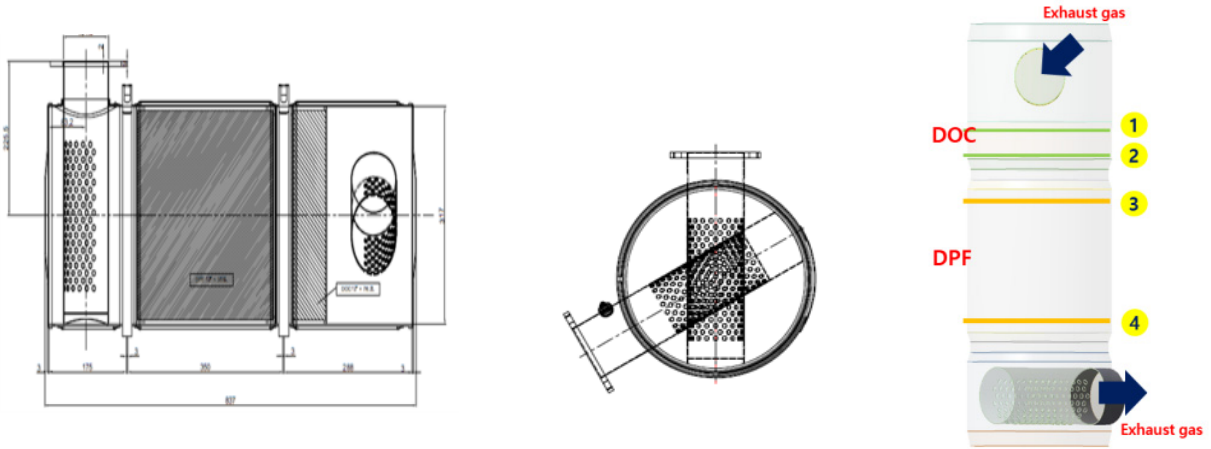


Figure 1. The schematic drawing of 12"DPF system for exhaust gas reduction. Front (L), Side (M) and Vertical (R).

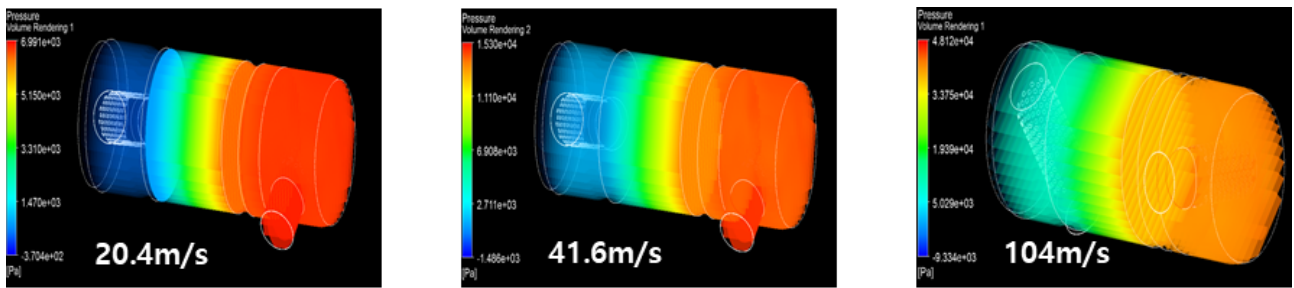


Figure 2. Pressure distribution at DPF and DOC with various velocities of exhaust gas.

Table 1. Properties of exhaust gas

| Properties | Flow rate (kg h ⁻¹) | Density (kg m ⁻³) | Viscosity (kg m ⁻¹ s ⁻¹) |
|------------|---------------------------------|-------------------------------|---|
| Value | 130 | 0.605 | 2.9 × 10 ⁻⁵ |

2.2. 유동 균일도 해석방법

유동 균일도는 배기가스 저감장치의 정화효율과 수명에 많은 영향을 미치며, 일반적인 자동차의 배기계통은 배기가스의 유로가 복잡하게 구성되어 있어, 배기가스가 정화장치의 입구부에 불규칙하게 유입되거나, 빠른 속도에 의해 배기가스가 촉매 전면에 국부적으로 집중되는 현상이 나타난다.

이와 같은 경우, 촉매의 일정부분에서만 배기가스가 정화되는 현상이 심해지므로, 촉매의 정화효율이 떨어진다. 또한, 촉매의 일정부분에서 배기가스가 정화되는 경우, 배기가스의 촉매 반응열이 배기가스 정화되는 특정부분에서만 발생되어, 배기가스가 정화되지 않는 부분과 배기가스가 정화되는 부분사이의 온도 차이에 커져 온도차에 의한 촉매파손 현상이 나타난다.

따라서, 고가인 촉매의 활용성이 저하되어 배기가스 정화장치의 수명을 단축시키는 주요인으로 작용하였다. 이에 따라 촉매 앞면에 구조체를 설치하여 촉매 앞면에서의 유동의 균일도를 개선하기 위한 많은 노력이 있었다. 본 연구에서는 Weltens et al. [8]가 제안한 Equation (5)을 이용하여 유동 균일도를 나타냈다.

$$\Upsilon = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - \bar{w})^2}}{w_i} \quad (5)$$

여기서, w_i 는 Local Velocity, \bar{w} 는 Average Velocity를 나타낸다. 유동 균일도가 1(100%)이면 완전히 균일한 유동분포를 나타내며, 0(0%)에 근접하면 극히 일부분에 유동이 집중됨을 의미한다. 일반적으로 배기가스정화장치 설계에 있어서 0.9(90%) 이상의 유동 균일도가 요구된다[14].

2.3. 12"DPF 저감장치 및 시뮬레이션 조건

Figure 1과 같은 12" DPF 저감장치를 바탕으로 Design Modeler를 사용하여 배기가스는 공기와 유사하다고 판단하여 Table 1과 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. DPF 동시 저감장치의 입·출구의 지점에 대해서 Figure 1와 같이 배기가스의 유속, 온도와 DPF IO ratio, Ash, PM loading양 변화에 따른 입·출구 압력 및 유동 균일도를 구하여 비교하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 토론

3.1. 배기가스의 유속 변화에 따른 배압에 미치는 영향

대형 DPF 내에 배기가스 온도 310 °C 하에서 배기가스 유속을 20.8, 41.6, 104 m s⁻¹로 증가시키면서 시뮬레이션 하여 얻은 DPF 입·출구의 압력분포 및 유동 균일도 결과를 Figure

Table 2. Flow uniformity at DPF and DOC with various velocities of exhaust gas (temperature: 583 K)

| Velocity (m s ⁻¹) | Pressure (mbar) | | | | Flow uniformity (%) | | | |
|-------------------------------|-----------------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|-------|
| | DOC | | DPF | | DOC | | DPF | |
| | ① | ② | ③ | ④ | ① | ② | ③ | ④ |
| 20.8 | 6.52 | 6.34 | 6.34 | 0.33 | 97.28 | 97.29 | 99.98 | 99.98 |
| 41.6 | 14 | 13.6 | 13.6 | 1.33 | 94.95 | 94.97 | 99.97 | 99.97 |
| 104 | 40.06 | 39.09 | 39.08 | 8.33 | 89.71 | 89.71 | 99.89 | 99.89 |

Table 3. Flow uniformity at DPF and DOC with various temperatures of exhaust gas (DPF I/O ratio = 1.0)

| Temperature (K) Velocity (m s ⁻¹) | Pressure (mbar) | | | | Flow uniformity (%) | | | |
|--|-----------------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|-------|
| | DOC | | DPF | | DOC | | DPF | |
| | ① | ② | ③ | ④ | ① | ② | ③ | ④ |
| 29825 | 11.09 | 10.87 | 10.87 | 0.56 | 96.77 | 96.39 | 98.96 | 99.94 |
| 55346.4 | 16.05 | 15.63 | 15.63 | 1.93 | 94.45 | 94.14 | 98.88 | 99.92 |
| 58349.7 | 23.16 | 22.71 | 22.71 | 2.22 | 94.13 | 93.82 | 98.84 | 99.91 |

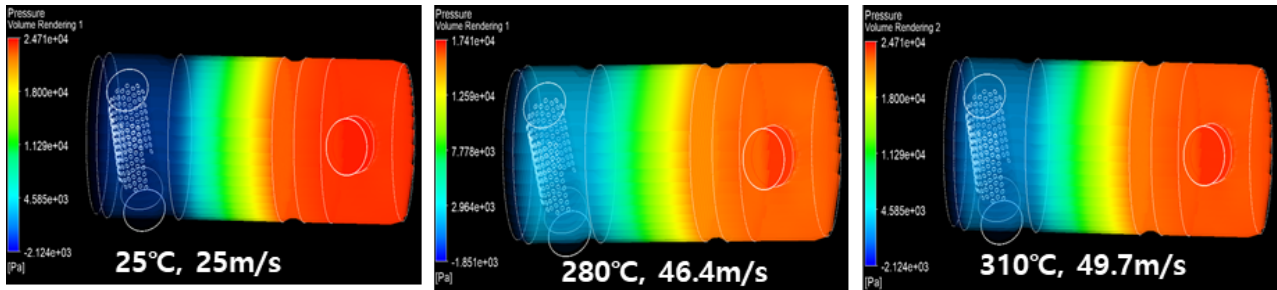


Figure 3. Pressure distribution at DPF and DOC with various temperatures of exhaust gas.

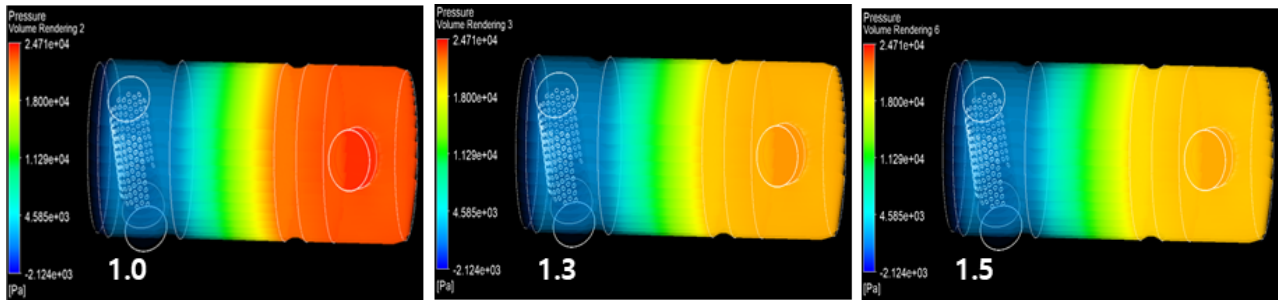


Figure 4. Pressure distribution at DPF and DOC with various DPF IO ratios of exhaust gas.

2과 Table 2에 각각 나타냈다. 그림에서 보듯이 유속이 20.8 m s⁻¹에서 104 m s⁻¹로 증가할수록 압력은 약 6배 증가하여 입출구의 배압도 약 5.5배 차이로 나타냈다. 한편 DPF의 유동 균일도는 거의 99.9%로 아주 양호하게 나타냈으나, DOC의 경우 유속이 증가할수록 최대 약 8%까지 낮아지는 경향으로 나타냈다.

3.2. 배기가스의 온도 변화에 따른 배압에 미치는 영향

대칭 DPF 내의 배기가스 온도(유속)를 298, 553, 583 K으로 증가시키면서 시뮬레이션 하여 얻은 DPF의 입·출구의 압력 변화를 Figure 3과 Table 3에 각각 나타냈다. Figure 3에서

보듯이 온도가 298 K(25 °C)에서 583 K(310 °C)로 2배 증가하였을 때, 배압 차이는 약 2배 크게 나타냈으며, Table 3과 같이 유동 균일도는 DPF는 98~99%로 매우 양호한 값으로 나왔으나, DOC의 경우 약 2.5% 낮아지는 값을 나타내고 있다.

3.3. DPF IO ratio 변화에 따른 배압에 미치는 영향

배기가스 온도 310 °C, 유속 49.7 m s⁻¹에서 DPF IO ratio를 1.0, 1.3, 1.5으로 증가시키면서 시뮬레이션 하여 얻은 DPF의 입·출구의 압력 및 유동 균일도를 Figure 4와 Table 4에 각각 나타냈다. Figure 4에서 보듯이 DPF IO ratio가 증가함에 따라 DPF 내의 압력은 감소하나 배압 차이는 일정하게 나타냈다.

Table 4. Pressure and flow uniformity at various DPF IO ratio (velocity: 49.7 m s⁻¹)

| DPF IO ratio | Pressure (mbar) | | | | Flow uniformity (%) | | | |
|--------------|-----------------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|-------|
| | DOC | | DPF | | DOC | | DPF | |
| | ① | ② | ③ | ④ | ① | ② | ③ | ④ |
| 1.0 | 23.16 | 22.71 | 22.71 | 2.22 | 94.13 | 93.82 | 98.84 | 99.91 |
| 1.3 | 20.65 | 20.2 | 20.2 | 2.22 | " | " | " | " |
| 1.5 | 20.07 | 19.63 | 19.63 | 2.22 | " | " | " | " |

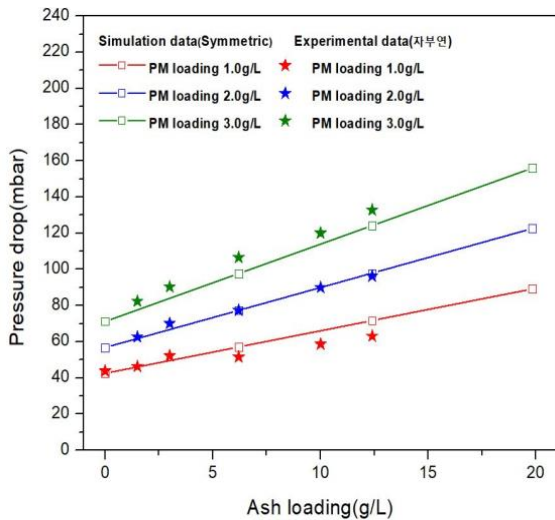


Figure 5. Effect of ash amounts on pressure drop in the symmetric DPF.

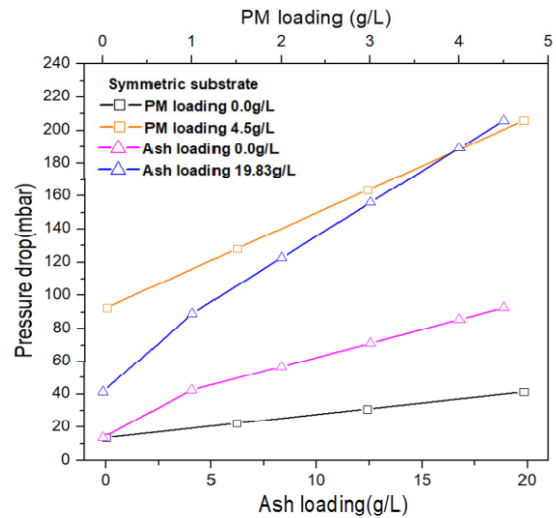


Figure 6. Effect of Ash and PM amounts on pressure drop in the symmetric DPF.

Table 5. Effect of various PM and ash amounts on flow uniformity in symmetric DPF

| Ash amount (g L ⁻¹) | Flow uniformity (%) | | | |
|---------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| | DOC | | DPF | |
| | ① | ② | ③ | ④ |
| 0 ~ 19.83 | 94.45 | 94.13 | 98.83 | 99.57 |

바뀌 말해서 비대칭 DPF의 배압이 낮게 나타내며, Table 4에서 보는 바와 같이 입·출구의 유동 균일도는 DPF IO ratio에 따라 DPF는 약 99%로 매우 양호한 일정한 값을, DOC의 경우 약 94%로 큰 차이가 없이 유지하고 있다.

3.4. 대칭 DPF에서 Ash와 PM양에 따른 배압에 미치는 영향

배기가스 온도 280 °C, 유속 46.4 m s⁻¹에서 대칭 DPF에 1, 2, 3 g L⁻¹ PM 부하에서 Ash양 증가에 따른 배압 변화에 대해 시뮬레이션 결과와 동일한 조건에서 실험한 데이터(자동차부품연구원 실시)를 Figure 5에 비교하여 나타냈다. Figure 5에서 보는 바와 같이 시뮬레이션의 결과는 실험결과와 약 1~23 mbar 오차로 시뮬레이션의 신뢰성을 얻을 수 있었다. 또한 실험한 PM 부하양에서 Ash양이 증가할수록 배압이 비례적으로 약간 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

PM의 유무에 따른 DPF 배압에 미치는 효과는 PM양 0 g L⁻¹와 4.5 g L⁻¹에 대해 시뮬레이션 하여 얻은 결과를 Figure

6에 나타냈다. PM양 0 g L⁻¹에서 Ash양이 1 g L⁻¹ 증가에 배압이 약 1.5 mbar 증가하지만, PM양 4.5 g L⁻¹에서는 배압이 약 6 mbar 증가하여서 PM양이 많을수록 배압 증가가 더 크게 나타났다. 또한 Ash의 유무에 따른 DPF 배압에 미치는 효과는 Ash양이 0 g L⁻¹와 19.83 g L⁻¹에서 시뮬레이션 결과를 Figure 6에 나타냈다. Ash양 0 g L⁻¹에서 PM양 1 g L⁻¹ 증가할수록 압력이 약 14.5 mbar씩 증가하는 반면 Ash양이 19.83 g L⁻¹에서 배압이 약 33.5 mbar씩 증가하여서 PM양과 같이 Ash양에서도 많을수록 배압 증가가 더 큰 효과로 나타났다. 또한 PM양이 Ash양에 비해 배압에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, PM양 4.5 g L⁻¹와 Ash양 19.83 g L⁻¹에서 배압차이는 약 200 mbar를 나타냈다.

Ash양과 PM양이 증가함에 따라 압력이 높아지는 것은 DPF 내부에 쌓이는 두께가 두꺼워지면서 채널의 입구가 좁아져 압력에 영향을 미쳐 증가하는 것으로 사료된다. 또한 Ash양과 PM양을 증가시켰을 때의 유동 균일도는 Table 5에 나타난 것처럼 DPF와 DOC의 입·출구 유동 균일도는 Ash와

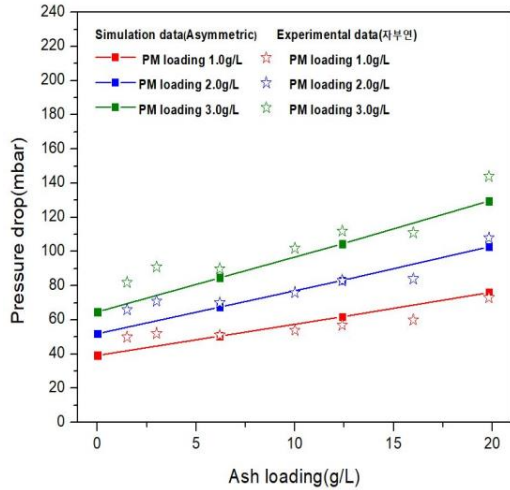


Figure 7. Effect of ash amounts on pressure drop in the asymmetric DPF.

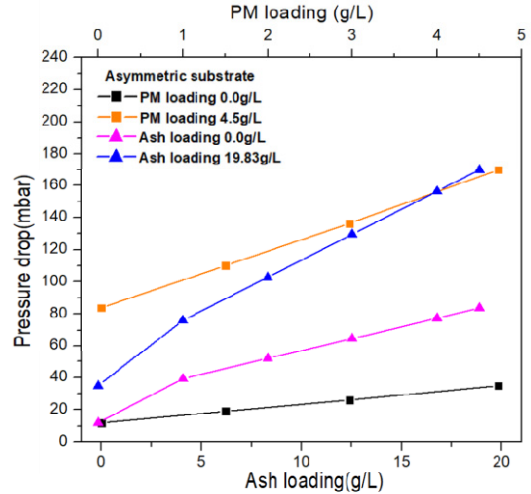


Figure 8. Effect of Ash and PM amounts on pressure drop in the asymmetric DPF (I/O ratio = 1.2).

Table 6. Effect of various PM and ash amounts on flow uniformity in asymmetric DPF (I/O ratio = 1.2)

| Ash amount (g L ⁻¹) | Flow uniformity (%) | | | |
|------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|
| | DOC | | DPF | |
| | ① | ② | ③ | ④ |
| 0 ~ 19.83 | 94.45 | 94.13 | 98.83 | 99.57 |

PM양에 관계없이 DPF 99%와 DOC 94%로 일정한 값을 유지하고 있다.

3.5. 비대칭 DPF에서 Ash와 PM양에 따른 배압에 미치는 영향

배기가스 온도 280 °C, 유속 46.4 m s⁻¹에서 비대칭 DPF에 1, 2, 3 g L⁻¹ PM 부하에서 Ash양 증가에 따른 배압 변화에 대해 시뮬레이션 결과와 동일한 조건에서 실험한 데이터(자동차부품연구원 실시)를 Figure 7에 나타냈다. Figure 7과 같이 시뮬레이션의 결과는 실험결과와 1~14 mbar 오차로 유사한 값으로 시뮬레이션의 신뢰성을 얻을 수 있었다. 이는 대칭 DPF의 배압에 비해 약 1/2 수준으로 더 정확한 값을 얻었으며, PM양과 Ash양이 배압에 미치는 효과는 비대칭 DPF의 경향과 유사하게 나타났다.

비대칭 DPF에서 PM의 유무에 따른 DPF 배압은 PM양이 0 g L⁻¹와 4.5 g L⁻¹에 대해 시뮬레이션 하여 얻은 결과를 Figure 8에 나타냈다. 그림에서 보듯이 PM양 0 g L⁻¹에서 Ash양이 1 g L⁻¹ 증가에 따른 배압이 약 1.2 mbar 증가하지만, PM양 4.5 g L⁻¹에서는 배압이 약 4.4 mbar 증가하여 PM양이 있으므로 인해 배압이 증가가 더 크게 나타났다. 또한 Ash의 유무에 따른 DPF 배압에 미치는 효과는 Ash양 0 g L⁻¹에서 PM양 1 g L⁻¹ 증가할수록 약 12.8 mbar씩 증가하는 반면 Ash양 19.83 g L⁻¹에서는 약 26.8 mbar씩 증가하여 Ash양이 많을수록 배압 증가가 더 크게 나타났다. 이는 대칭 DPF의 경우에 비해 배압 증가는 작지만 PM양이 Ash양에 비해 배압에 더 큰 영향을 미치는 것은 비슷한 경향으로 나타났으며, PM

양 4.5 g L⁻¹와 Ash양 19.83 g L⁻¹에서 배압이 약 170 mbar으로 대칭 DPF에 비해 약 15% 낮게 나타내고 있다.

또한 Ash양과 PM양을 증가시켰을 때의 유동 균일도를 Table 6에 나타냈으며, DOC와 DPF의 입·출구 유동 균일도는 Ash와 PM양에 관계없이 DPF 99%, DOC 94%로 일정한 값을 유지하고 있다.

대칭과 비대칭 DPF에 따른 배압에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션은 PM양 2, 4 g L⁻¹에서 DPF I/O ratio 1.0과 1.2일 때, Ash양에 따른 배압 결과를 Figure 9에 나타냈다. 비대칭

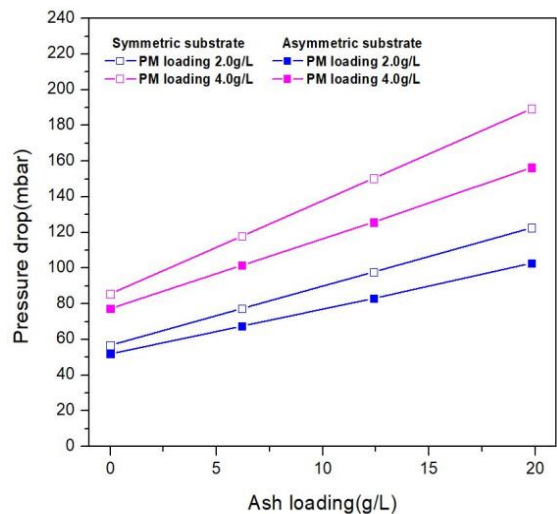


Figure 9. Effect of symmetric and asymmetric DPF on pressure drop at the PM and Ash loading amount of 2.0 and 4.0 g L⁻¹ respectively.

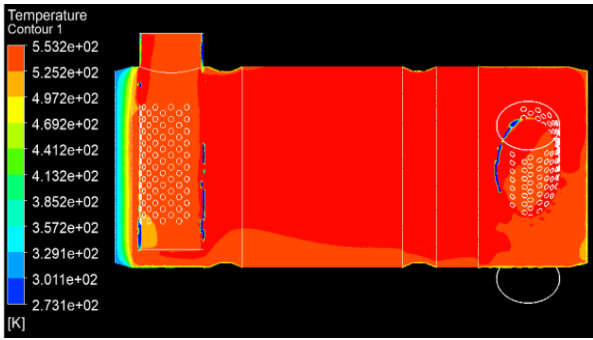


Figure 10. Temperature distribution in 12" Canning (Z = 0) at DPF I/O ratio 1.2.

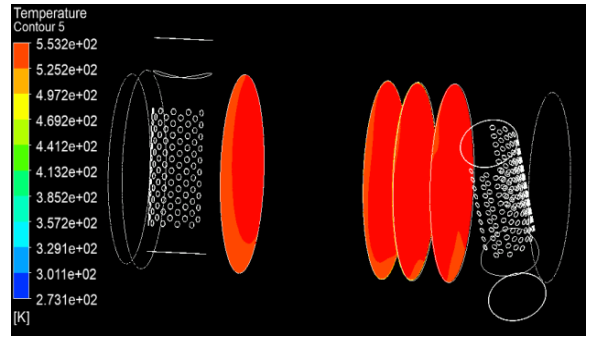


Figure 11. Temperature distribution in DOC, DPF I/O at DPF I/O ratio 1.2.

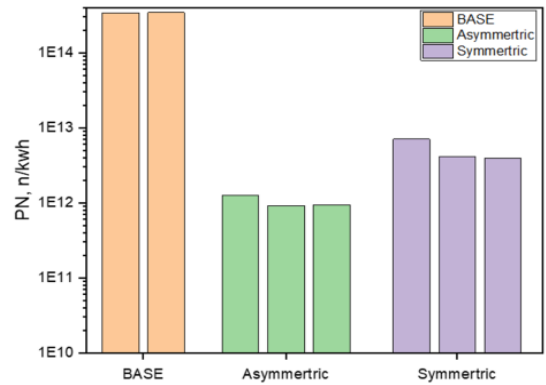
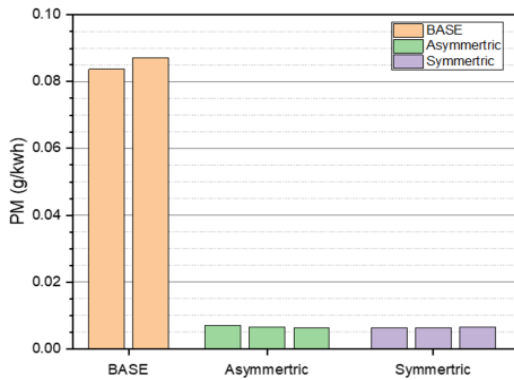


Figure 12. Filtration efficiency for PM and PN at ESC condition.

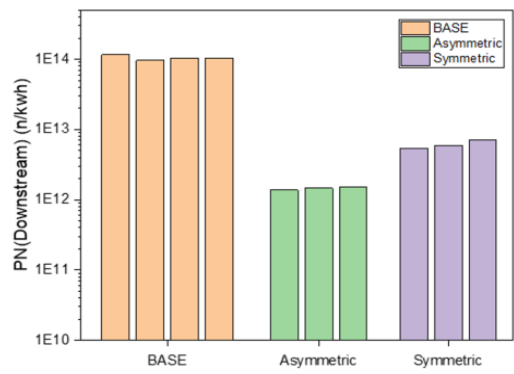
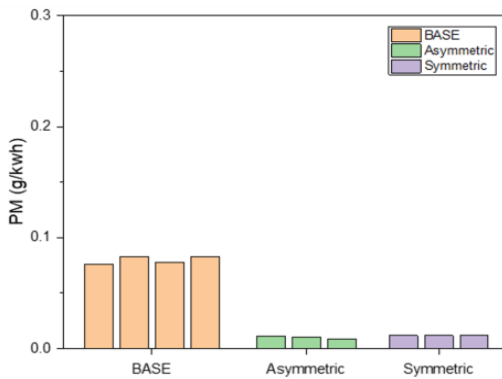


Figure 13. Filtration efficiency for PM and PN at ETC condition.

DPF (I/O ratio = 1.2)이 대칭 DPF에 비해 PM양 2, 4 g L⁻¹의 경우 배압이 약 9~17% 낮게 나타났다. 이는 채널의 I/O ratio가 1.2로 증가하여 입구에 PM과 Ash가 쌓이는 두께가 상대적으로 얇아지면서 비대칭 DPF의 내부 배압이 낮아지는 것으로 사료된다.

배기가스 온도 280 °C, 유속 41.6 m s⁻¹, DPF I/O ratio 1.2, PM loading양 4.5 g L⁻¹, Ash loading양 19.83 g L⁻¹에서 온도 분포를 Figure 10, 11와 같이 나타냈다. Canning의 전체부분 중 출구 부분에만 온도 변화가 나타나고 그림에서 보듯이 DOC, DPF의 입·출구 부분에서는 온도 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 Canning 내부의 열교환은 없고 외부 공기와 의 접촉만 있지만 Canning 직경이 크므로 내부까지 열 교환

이 이뤄지지 않아 전체적으로 온도변화가 크게 나타나지 않는 것으로 사료된다.

3.6. 비대칭과 대칭 DPF에서 PM과 PN 정화효율

자동차부품연구에서 비대칭과 대칭 DPF로부터 PM과 PN (particle number)의 정화율을 ESC (european stationary cycle)와 ETC (european transient cycle)에서 측정한 시험결과를 Figure 12, 13에 나타냈다. 시험결과에서 보듯이 ESC 조건에서 비대칭 DPF로부터 PM 정화효율은 92.4%, PN 정화율은 99.3%로 나타났으며, 대칭 DPF로부터 PM 정화효율은 92.9%, PN 정화율은 98.5%로 나타났다. 반면 ETC 조건에서는 비대칭 DPF로부터 PM 정화효율은 87.2%, PN 정화율은 98.6%

로 나타냈으며, 대칭 DPF로부터 PM 정화효율은 85.0%, PN 정화효율은 94.1%로 나타났다. 비대칭 DPF가 대칭 DPF에 비해 PM과 PN 정화효율(ETC 조건)이 각각 2%, 4% 좋게 나타났다.

4. 결론

대칭과 비대칭 DPF 저감장치에 의해 디젤 배기가스의 다양한 조건에 따른 DPF 내에서의 배압과 유동 균일도를 시뮬레이션 하여 얻은 결과는 다음과 같다.

대칭 DPF 저감장치에서 동일한 온도에서 배기가스 유속이 증가함에 따라 압력이 증가하며, 배기가스의 온도(유속)를 298 K (25 m s⁻¹)에서 583 K (49.7 m s⁻¹)로 2배 증가함에 따라 배압차이는 약 2배 크게 증가하였다. 유동 균일도는 DPF는 99%로 일정하나, DOC의 경우 유속이 증가할수록 약 3~5% 정도 낮아지고, 온도가 증가할수록 약 2.5%정도 낮아지는 일반적인 경향으로 나타났다. 실제 배기가스 유속 49.7 m s⁻¹에서 DPF I/O ratio를 1.0, 1.3, 1.5으로 증가함에 따라 DPF의 입구 압력이 감소하였고 배압차이는 약 15% 감소하였다. 유동 균일도는 DPF는 약 99%로 매우 양호한 값이 일정하게 보이고, DOC의 경우 약 94%로 나타났다. DPF의 경우 모든 실험 변수에 대하여 유동 균일도가 98~99%로 나타났다. 이는 DOC 입구의 불균일한 유동이 DOC를 거쳐 균일하게 흐르고, 이후 DPF로 유입되기 때문에 사료된다[2].

배기가스 온도 280 °C, 유속 46.4 m s⁻¹에서 대칭과 비대칭 DPF에 1, 2, 3 g L⁻¹ PM 부하조건에서 Ash양 증가에 따른 배압 변화에 대해 시뮬레이션 결과와 동일한 조건에서 실험한 데이터 결과와의 약 1~23 mbar, 비대칭 DPF의 경우 약 1~14 mbar 오차로 인해 시뮬레이션의 신뢰성을 얻을 수 있었다. 대칭 DPF과 비대칭 DPF에서 PM양이 Ash양에 비해 압력에 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, PM양 2, 4 g L⁻¹에서는 DPF I/O ratio 1.2에서 1.0보다 배압이 약 9~17%정도 낮게 나타났다. 한편 PM양 4.5 g L⁻¹와 Ash양 19.83 g L⁻¹에서 배압 차이가 대칭 DPF에서는 약 200 mbar, 비대칭 DPF에서는 약 170 mbar으로 대칭 DPF에 비해 약 15% 낮게 나타내고 있다. 이는 채널의 I/O ratio가 1.2로 증가하여 입구에 PM과 Ash가 쌓이는 두께가 상대적으로 얇아지면서 비대칭 DPF의 내부 배압이 낮아지는 것으로 사료된다. 따라서 현재 대칭 DPF 기준 배기가스 온도 280 °C, 유속 46.4 m s⁻¹에서 DOC와 DPF의 유동균일도가 94%, 98% 이상으로 사용에는 문제가 없지만, PM과 Ash가 포함된 실제 배기가스에서 DPF 내부의 배압을 낮추고 PM과 PN 정화효율을 높이기 위해 비대칭 DPF로 변경하여 배압은 15% 낮추고, 정화효율을 2~4%로 향상시킬 수 있다.

감사

본 연구는 글로벌 탑 환경기술개발사업 중 친환경차 보급 확산 기술개발(E618-00208-0603-2)에서 지원받아 수행되었습니다.

References

1. Choi, B., and Cho, J., "Study on the Improvement of Uniformity of Inlet Velocity in Exhaust After-treatment System for System for Heavy Duty Engine," *KSAE*, 280-284 (2002).
2. Jeong, S., Lee, W., Lee, G., Kim, K., Bae, S., and Kim, H., "A Study on Flow Characteristics in Diesel Particle Filter for Heavy-duty Diesel Engine," *KSAE*, 280-284 (2006).
3. Givens, W. R., and Lemme, C. D., "Flow through Catalytic Converters An Analytical and Experimental Treatment," *SAE*, 740247 (1974).
4. Johnson, W. C., and Chang, J. C., "Analytical Investigation of the Performance of Catalytic Monoliths of Varying Channel Geometries Based on Mass Controlling Conditional," *SAE*, 740196 (1974).
5. Bissett, E. J., "Mathematical model of the thermal regeneration of a wall-flow monolith diesel Particulate filter," *Chem. Eng. Sci.*, **39**(7-8), 1233-1244 (1984).
6. Lai, M. C., and Kim, J. Y., "Three-dimensional Simulations of Automotive Catalytic Converter Internal Flow," *SAE*, 9100200 (1991).
7. Baxendale, A. J., "Computational Fluid Dynamics in Exhaust System Design and Development," 94 Interanional EG Design, Sterling Publication, Ltd., 126-130 (1994).
8. Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H., and Rammoser, D., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," *SAE*, 9300780 (1993).
9. Konstandopoulos, A. G., Skaperdas, E., Warren, J., Allansson, R., "Optimizes filter design and selection criteria for continuously regenerating diesel Particulate traps," *SAE*, 1999-01-0468 (1999).
10. Haralampous, O. A., Kandylas, I. P., Koltsakis, G. C., and Samaras, Z. C., "Diesel Particulate filter pressure drop Part 1: modeling and experimental validation," *Int. J. Engine Res.*, **5**(2), 149-162 (2004).
11. Ogyu, K., Ohno, K., Hong, S., and Komori, T., "Ash Storage Capacity Enhancement of Diesel Particulate Filter," *SAE*, 2004-01-0949 (2004).
12. Wurzenberger, J. C., and Kutschi, S., "Advanced simulation technologies for diesel Particulate filters, a fundamental study on asymmetric channel geometries," *SAE*, 2007-01-1137 (2007).
13. Paul Day, J., and Socha, L. S., "The design of Automotive Catalyst Supports for Improved Pressure Drop and Conversion Efficiency," *SAE*, 1991-02-01 (1991).
14. Ahn, J. Y., Ku, J. H., Park, J. K., and Kim, J. W., "A Study on the Pressure Drop and Flow Characteristics depending upon the inlet-outlet Ceometry of Catalytic Converter," *KSAE*, 81-86 (2007).