

디젤차량 배기가스의 PM 제거에 관한 매연여과장치 전산해석

염규인¹, 한단비¹, 남승하², 백영순^{1,*}

¹수원대학교 환경에너지공학과
18323 경기 화성시 봉담읍 와우안길 17

²(주) 세라컴
31532 충남 아산시 온천대로 1122번길 46-5

(2018년 8월 9일 접수; 2018년 8월 31일 수정본 접수; 2018년 9월 6일 채택)

A CFD Analysis on DPF for the Removal of PM from the Emission of Diesel Vehicle

Gyuin Yeom¹, Danbee Han¹, Seungha Nam², and Youngsoon Baek^{1,*}

¹Department of Environment-Energy, The University of Suwon
17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong 18323, Korea

²Corporation Ceracomb
46-5 Onchen-daero 1122beon-gil, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea

(Received for review August 9, 2018; Revision received August 31, 2018; Accepted September 6, 2018)

요 약

최근 미세먼지의 증가로 인해 디젤 자동차로부터 발생하는 PM에 대한 규제가 강화되고 있다. 디젤 자동차의 배기가스를 제거하는 후처리 장치인 매연여과장치(diesel particulate filter, DPF)에 대한 관심이 급증하고 있다. 따라서 DPF 효율 향상의 하나로 DPF 내의 압력강하를 줄여서 필터 및 재생(Regeneration)의 효율을 증가시키고 있다. 본 연구에서는 ANSYS FLUENT를 이용하여 5.66" SiC와 Cordierite DPF의 셀 밀도, 채널 형상, 벽두께, 입-출구 채널 비에 따른 압력강하 영향을 시뮬레이션했다. 실험결과로서 200 CPSI보다 300 CPSI에서 압력강하가 작게 나타났으며, Anisotropy과 O/S 셀이 Isotropy보다 약 1,301 Pa 작은 압력강하를 나타냈다. 공극률은 10% 증가할 때 마다 압력강하가 약 300 Pa씩 작아졌고, 벽 두께에 따른 영향은 0.05 mm 두꺼워질수록 약 500 Pa 씩 커지는 경향을 나타냈다.

주제어 : 디젤매연여과장치, 전산유체역학, 압력강하, 비등방성, 등방성

Abstract : Recently, due to the increase in the fine dust, regulations on PM generated from diesel cars are strengthened. There is a growing interest in diesel particulate filters (DPFs), a post-treatment device that removes exhaust gases from diesel vehicles. Therefore, one of the enhancements of the DPF efficiency is to reduce the pressure drop in the DPF, thereby increasing the efficiency of the filter and regeneration. In this study, the effect of cell density, channel shape, wall thickness, and inlet channel ratio of 5.66" SiC and Cordierite DPF on the pressure drop in DPF was investigated using ANSYS FLUENT simulator. As a result of the experiment, the pressure drop was smaller at 300 CPSI than 200 CPSI, and the anisotropy and O / S cell showed less than Isotropy by pressure drop of about 1,000 Pa. As the porosity increased by 10% the pressure drop was reduced by about 300 Pa and as the wall thickness increased by 0.05 mm, the pressure drop was increased by about 500 Pa.

Keywords : Diesel particulate filter, Computational fluid dynamics, Pressure drop, Anisotropy, Isotropy

1. 서 론

최근 디젤 엔진의 입자상 물질인 PM (Particulate matter, 이하 PM)은 대기환경 공해 발생으로 인체에 해롭기 때문에 정부의

규제가 점점 강화되고 있다. 현재 디젤엔진의 배기가스 중 PM 제거를 위하여 DPF가 사용되고 있다[1]. DPF는 디젤 엔진의 배기 후처리 장치로서 세라믹(Cordierite, SiC)을 사용하여, 입구와 출구채널이 교대로 막혀있는 구조로 되어있다. 따라서

* 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.2018.24.4.301 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.

배기가스의 PM이 DPF 다공성 벽면을 통과하면서 세라믹 공극 내부에 PM이 여과되고, 필터에 포집된 PM은 고온에서의 산화반응으로 산소(O₂), 이산화탄소(CO₂)로 되어 제거된다.

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 개발 시 고려해야 하는 가장 중요한 척도로 사용한다.

이러한 필터의 여과 및 압력강하 현상을 모사하기 위하여 수학적 모델에 관한 연구가 수행되어 왔으며, 최근 전산유체역학(CFD)을 이용하여 내부의 유동균일도, 압력강하, 온도분포 등 다양한 방법으로 연구에 적용하고 있다. 기존의 연구인 bissett [2]에 의하여 Wall-Flow형태의 DPF에서 배기가스 유동 및 재생반응의 수학적 모델링 기초를 처음 확립했고, Konstandipoulos [3]에 의하여 가장 대표적으로 전산유체해석이 이루어졌다. 이 연구들에서는 매연 입자가 필터 내부로 들어와 Unit Collector에 쌓이는 개념을 도입하여 모델링하였고, 매연입자가 쌓여 층을 이루는 메커니즘을 실험적, 해석적으로 접근하여 매연 층의 Porosity와 Permeability를 추정하였다. 이 외에도 동일한 면적에서 DPF의 포집효율을 높이기 위하여 Haralampous [4], Ogyu [5], Wurzenberger 등[6], Tang [7]의 연구자들이 실험과 수치해석으로 연구를 수행했다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 직경 5.66", 길이 6", 셀 밀도 200 CPSI (Cell Per Square Inch)인 DPF의 성능을 개선하고자, 유량 130 kg h⁻¹, 온도 310 °C의 디젤엔진의 배기가스가 유입될 때, DPF의 셀 밀도와 벽면의 두께, 입·출구 채널비율, 채널 형상에 따른 압력강하의 영향에 대하여 수행하였고, 시뮬레이션과 실험의 결과를 비교하여 시뮬레이션의 정확성을 확인하였다.

2. DPF 포집 및 압력강하 이론

DPF에서 압력강하에 영향을 주는 요소는 Figure 1과 같이 매연 층을 통한 압력강하, 필터 벽면을 통한 압력강하, 채널 내부에서의 마찰에 의한 압력강하 그리고 DPF의 형상학적인 요소인 입구에서의 수축과 출구에서의 확장에 의해 발생하는 압력강하가 있다[8].

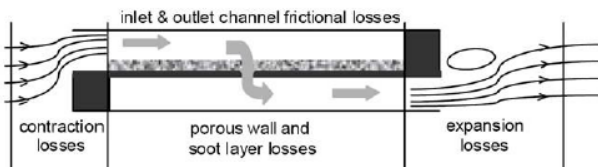


Figure 1. Schematic of DPF about pressure drop component.

위와 같이 DPF에서 발생하는 다양한 압력강하를 수식으로 표현하면 아래의 Equation (1)과 같다.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{soot} + \Delta P_{wall} + \Delta P_{channel} + \Delta P_{contraction} + \Delta P_{expansion} \quad (1)$$

DPF의 전체 압력강하는 채널의 입·출구 형상에 의한 수축과 팽창에 관련된 압력손실을 포함해야한다. 하지만 수치해석에서는 DPF의 채널 내부만 모델링하여 실험을 수행하였기 때문에 배기가스의 채널유입에 따른 수축과 팽창의 압력강하는 고려되지 않는다. 또한 배기가스와 채널에서 마찰에 따른 압력강하는 매연이 쌓임에 따라 그 영향이 매우 적어져 해석 시 고려되지 않는다. 따라서 매연의 포집에 따른 압력강하 식은 다음 Equation (2)와 같이 표현된다.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{soot} + \Delta P_{wall} \quad (2)$$

Equation (2)와 같이 DPF 채널에서 압력강하는 벽면마찰과 매연여과에 따른 압력강하만을 고려하게 된다. 이러한 매연 여과와 필터 벽면을 통한 압력강하는 다음의 다공성 매질에서 Forchheimer's modification 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{\mu\nu(y)}{K} + \beta\rho(y)\nu^2(y) \quad (3)$$

Equation (3)의 우변의 첫 번째 항은 다공성 매질 내에서의 Darcy 효과, 두 번째 항은 관성 효과를 의미한다. 여기서 μ 는 유체의 밀도, ν 는 유체 속도, ρ 는 유체의 밀도, K 는 투수계수 (Permeability) 그리고 β 는 Forchheimer Coefficient를 나타낸다.

매연 여과에 따른 압력강하는 Figure 2와 같이 채널 위에 쌓인 매연의 두께에 대하여 Equation (3)을 적분함으로써 Equation (4)와 같이 나타낸다.

$$\Delta P_{soot} = \frac{R_w T}{M_g P} \left[\frac{\mu\alpha p_w \nu_w}{2K_p} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 2w}\right) + \frac{\beta_p \alpha w (p_w \nu_w)^2}{\alpha - 2w} \right] \quad (4)$$

α 는 수력학적 직경, ω 는 벽면의 두께, v_w 는 벽면통과 속도,

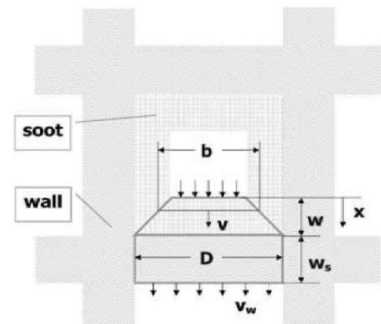


Figure 2. DPF channel pressure drop component on the wall and PM layer.

p_w 는 매연 층의 두께, K_p 는 매연 층의 투수계수 그리고 β_p 는 Forchheimer 계수를 나타낸다. β_p 는 Equation (5)와 같이 표현되며, 매연 층의 Permeability와 Porosity로부터 모델링된다[9].

$$\beta_p = \frac{C_\beta}{\varepsilon_p^{1.5} \sqrt{K_p}} \quad (5)$$

입자들을 고려한 Packed bed 시스템에서의 $C_\beta = 0.143$ 을 갖는다고 보고하고 있으며, 이 값은 구형입자의 모형 및 조성에 따라 달라진다. 전형적인 필터의 작동조건에서 필터 벽면을 통한 압력강하는 매연 층을 통한 압력강하에 비해 상당히 작다. 이는 필터 벽면을 통한 유동속도는 일정하다는 가정을 할 수 있게 한다. 따라서 벽면을 통한 Forchheimer의 영향은 무시되어 표현이 가능하다[10]. 이러한 가정 하에 필터 벽면에서의 압력강하는 Equation (6)과 같이 Darcy 법칙으로 사용된다.

$$\Delta P_{wall} = \frac{\mu w_s}{K_w} \nu_w w_s \quad (6)$$

3. 시뮬레이션 해석 및 실험방법

3.1. 시뮬레이션 해석

본 연구에서는 DPF내 압력강하 특성과 유동현상의 변화를 알기 위해 다공성물질 모델(Porous media model)을 포함하는 상용 CFD 코드인 Fluent (V18.2)와 Axisuite 시뮬레이터를 사용하였으며, 시뮬레이션 해석에 사용한 지배 방정식으로는 연속방정식, 모멘텀 방정식, 다공성 물질모델의 방정식은 아래와 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i) = 0 \quad (7)$$

모멘텀 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(p u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i + S_i \quad (8)$$

다공성물질모델

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (9)$$

D_{ij} 는 점성저항계수, C_{ij} 는 관성저항계수, $D_{ij} = \frac{1}{K_i}$, $C_{ij} = 2\beta$ 이다.

3.2. 실험조건 및 방법

앞서 언급한 것처럼 사용된 DPF는 직경 5.66", 길이 6"의 Cordierite와 SiC 재질로 제작되었으며, 자세한 DPF의 사양과

Table 1. Specification of 5.66" SiC and Cordierite DPF

Specification	Value	
	Cordierite	SiC
Wall thickness (mm)	0.3	
Channel size (mm)	1.431	
Porosity (%)	55.89	47.29
Median pore diameter (μm)	12.24	15.44
Apparent density (g cc ⁻¹)	1.11	3.04

Table 2. 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}

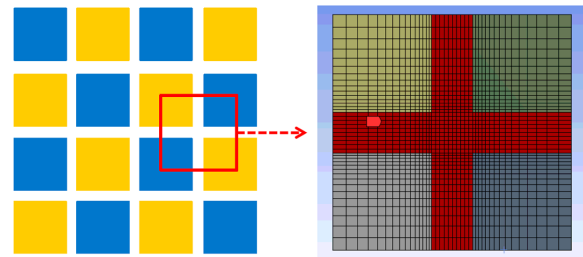


Figure 3. Modeling of DPF Channel.

배기가스의 조성은 Table 1, 2에 나타냈다. DPF 시뮬레이션 모델은 Design modeler를 사용하여 DPF 입구와 출구를 1/4로 나누고 형상의 상·하·좌·우 4개의 면을 Symmetry로 modeling하여 Figure 3과 같이 나타냈다.

위 실험조건에서 시뮬레이션과 배기가스 실험을 수행하였으며, Table 3과 같이 우선 셀 밀도에 따른 압력강하의 영향을 위해 200, 300 CPSI에서 시뮬레이션을 수행하고 채널의 벽면두께에 따른 압력강하 실험을 위해 벽면을 0.25, 0.3, 0.35 mm로 변경하여 수행하였다. 또한 채널의 형상의 변경에 따른 압력강하의 영향은 Figure 4와 같이 정사각형의 Isotropy(등방성) 형상에서 입·출구 비율 1.0과 Anisotropy(비등방성)형상인 1.2, 채널 모형이 입구 팔각형, 출구 사각형인 O/S (Octagon/Square) 셀에서 입·출구 비율 1.2일 때의 시뮬레이션을 하여 비교했다. 그리고 입·출구 채널 비에 따른 압력강하를 비교하

Table 3. Simulation Parameter for CFD analysis

Parameter	Value
Cell density (CPSI)	200, 300
Wall thickness (mm)	0.25, 0.3, 0.35
Shape of channel	Isotropy, Anisotropy, O/S cell
Inlet/outlet ratio	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5
Porosity (%)	40, 50, 60, 70

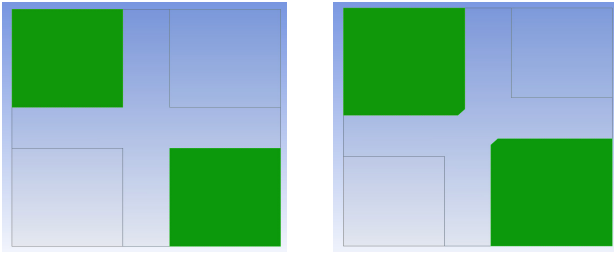


Figure 4. Geometry of Isotropy (L) and O/S (R) cell structure.

기 위해 정사각형인 DPF의 입·출구를 비율 1~1.5까지 변경해 시뮬레이션 했으며, 마지막으로 공극률을 40~70%까지 변경하여 시뮬레이션을 수행했다.

4. 시뮬레이션 결과 및 토론

4.1. SiC, Cordierite DPF의 시뮬레이션의 검증

5.66" SiC과 Cordierite DPF를 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 Figure 5에 나타냈다. 그림에서 보듯이 SiC과 Cordierite DPF에서 시뮬레이션 결과가 실험과 잘 일치하여 시뮬레이션 결과에 대한 확보하였다.

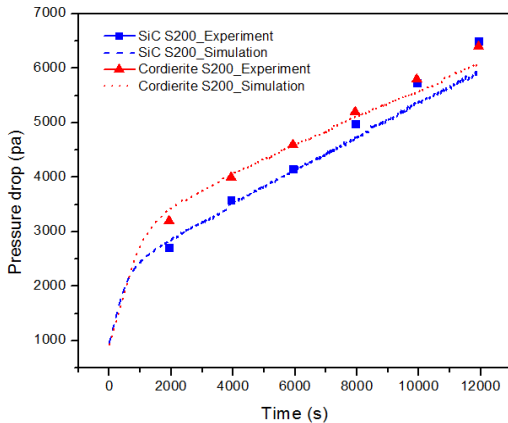


Figure 5. Comparison of pressure drop on the simulation and experiments for the SiC and Cordierite DPF.

4.2. 셀 밀도에 따른 압력강하 영향

셀 밀도에 따른 압력강하 실험을 위해 SiC 재질의 200 CPSI와 300 CPSI DPF를 비교했다. Figure 6과 같이 초기 벽면마찰에 의한 압력강하는 300 CPSI에서 약 100 Pa 높았지만, 매연이 여과됨에 따라 셀 밀도가 높은 300 CPSI에서 압력강하가 약 2500 Pa의 낮은 압력강하를 나타냈다. 셀 밀도가 높을수록 초기에는 벽면의 마찰력과 입·출구 면적의 축소와 확장에 의한 압력강하의 영향이 크지만, 그 이후엔 매연에 의하여 Deep bed filtration의 영향이 크기 때문에 압력강하가 적게 나타난다. 또한 Cake filtration에 의한 선형적인 압력강하 기울기도 300 CPSI가 200 CPSI에 비하여 낮은 증가율을 나타냈다. 이는 셀 밀도가 높아지면서 채널의 수가 증가하여, 매연이 여과

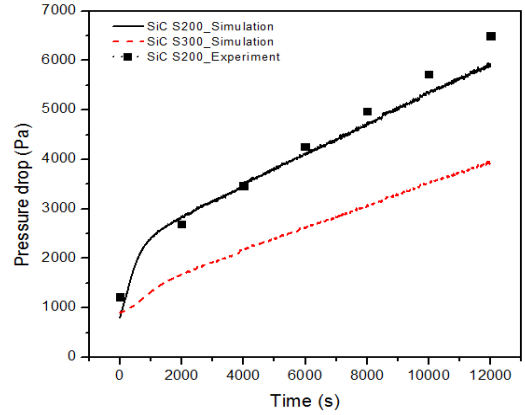


Figure 6. Effect of isotropy cell density of DPF on pressure drop.

될수록 1개의 채널당 매연의 누적부하가 적어져 선형적 압력강하가 낮게 발생하는 것을 확인했다. Yamaguchi et al. [11]에 의한 셀 밀도에 따른 실험결과도 이와 같은 경향을 나타냈다.

4.3. 벽면 두께에 따른 압력강하 영향

매연이 여과되는 DPF의 벽면의 두께(0.3 mm)를 기준으로 0.05 mm씩 증감함에 따른 압력강하를 Figure 7에 나타냈다. 벽면의 두께가 0.25, 0.3, 0.35 mm로 두꺼워질수록 초기의 벽면 내부와 매연의 누적에 따른 압력강하 모두 높아지는 경향을 나타내었다. 특히 매연이 필터 벽면의 공극을 막아 발생하는 급격한 압력강하가 벽면이 두꺼워질수록 높아짐을 보였고, 0.05 mm마다 약 500 Pa의 압력강하의 차이를 나타냈다. Paul Day J. and Socha Jr. Louis S. [6] 실험에서도 압력강하는 벽면의 두께가 두꺼워질수록 채널의 표면적이 줄어들어 매연 저장능력이 낮아져 압력이 상승하는 비슷한 결과를 얻었다.

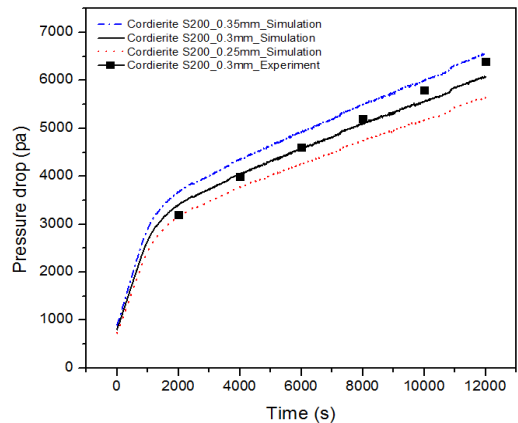


Figure 7. Effect of wall thickness of isotropy cell on pressure drop.

4.4. 셀 형상에 따른 압력강하 영향

Cordierite DPF 셀 형상에 따른 압력강하 영향을 알기 위해서 Isotropy, O/S (Octagon/Square), Anisotropy (Ratio = 1.2)의

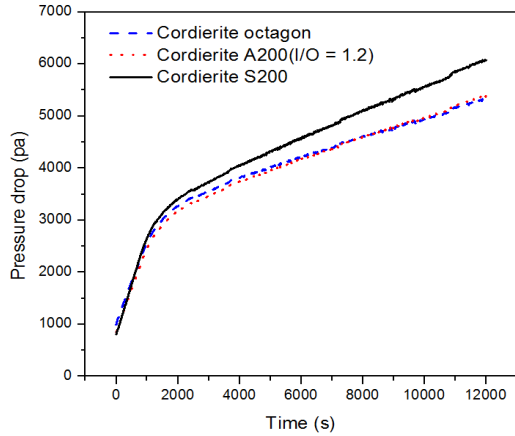


Figure 8. Comparison of pressure drop on the isotropy, anisotropy and O/S cell of DPF.

형상에 대한 시뮬레이션 결과를 시간에 따른 압력강하로 Figure 8에 나타냈다. 그림에서 보듯이 압력강하는 Isotropy > Anisotropy ≥ O/S 셀 형상 순으로 작게 나타났다. 이는 DPF 형상에 따라 입구채널이 넓어질수록 매연을 포용할 수 있는 능력이 커져서 여과될 때 선형적으로 압력강하가 작아지기 때문이다. 따라서 O/S셀 형상의 압력강하가 정사각형인 Isotropy 보다 채널 면적이 크고, Anisotropy 보다는 약간 크기 때문에 매연 포용능력이 높아서 작게 나타난 것으로 사료된다. Ogyu et al. [5]에 의한 채널 비에 따른 실험결과에서도 O/S셀이 가장 작은 압력강하를 나타내는 결과를 얻었다.

4.5. 입·출구 채널 비에 따른 압력강하 영향

입·출구의 채널 비의 영향을 보기 위해서 채널 비를 1.0~1.5로 변화시킨 시뮬레이션 결과를 Figure 9에 나타냈다. 그림에서 보는바와 같이 매연 여과 초기엔 채널비가 증가해도 압력강하의 차이는 없었지만, 시간에 따라 매연 누적량이 증가되면서 채널비가 증가하면서 압력강하는 낮아지는 결과를 얻었다. 이는 Lee and Baek [12]에 의한 비대칭 형상 비율에 따른

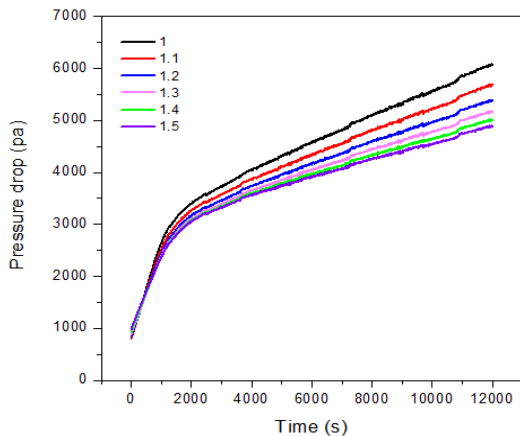


Figure 9. Effect of inlet/outlet channel ratio of cell on pressure drop.

압력강하 실험결과에서도 채널 비율이 높을수록 벽면 마찰이 크기 때문에 초기압력이 높지만, 매연 저장능력이 높아 매연층의 두께가 얇아져 선형적 압력강하 상승이 낮아지는 결과와 일치하였다. 채널 비가 증가하면서 선형적 압력강하는 낮아지나 차이는 점점 줄어드는 경향을 보인다. DPF 채널 비는 실험조건, DPF의 용량 등에 따라 비율이 달라지기 때문에 각 조건에 따른 최적 값을 선정하는 것이 필요하다.

4.6. 공극률(Porosity)에 따른 DPF의 압력강하 영향

DPF의 공극률을 40~70%로 변화시키면서 DPF 내의 압력강하의 영향을 Figure 10에 나타냈다. 그림에서 보듯이 공극률이 높아질수록 압력강하는 낮게 나타나는 일반적인 경향을 보이고 있으며, 공극률 10% 증가함에 따라 약 300 Pa의 압력강하가 줄어든다. 그림에서 보듯이 공극률이 낮을수록 초기 Deep bed filtration의 영향이 크게 나타나며, DPF 내부 벽면의 매연 저장능력이 낮아져서 압력강하가 크게 나타난 것으로 사료된다. S. Hashimoto et al. [13] 실험에 의하면 공극률이 커질수록 내부의 공극 크기가 커져 시간에 따라 PM이 여과되며 벽면에 PM 누적량이 적어지기 때문에 압력강하가 낮아지는 결과를 발표하였다. 따라서 DPF의 담체종류 및 촉매코팅 방법에 따라 공극률을 선택하여 DPF 형상에서 압력강하를 줄여야 한다.

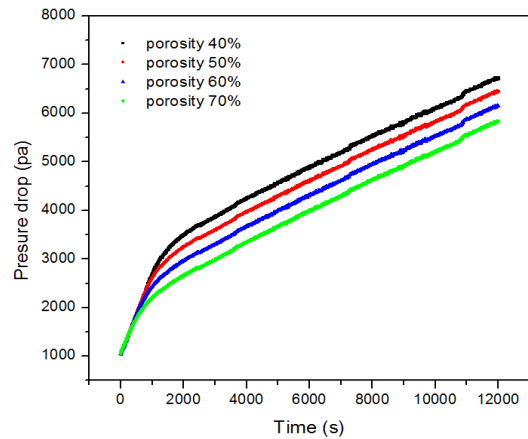


Figure 10. Effect of porosity of isotropy cell on pressure drop.

5. 결론

직경 5.66", 길이 6" SiC와 Cordierite DPF에 310 °C 디젤 배기가스가 130 kg h⁻¹의 유속으로 유입될 때, 셀 형상의 다양한 변수에 따른 압력강하에 대해서 CFD 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다.

5.66" SiC와 Cordierite DPF의 시뮬레이션 결과는 동일한 조건하에서 실험한 결과와 비교했을 때, 시간에 따른 압력강하는 유사한 결과를 얻어서 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하였다.

셀 밀도에 따른 압력강하 시뮬레이션은 셀 밀도에 따라 벽면 마찰의 영향은 없었으나, 시간이 지남에 따라 200 CPSI에 비하여 300 CPSI가 약 2500 Pa 작게 나타났다.

벽면의 두께에 따른 압력강하의 영향 실험 결과는 동일한 셀 밀도에서 0.25, 0.3, 0.35 mm로 벽면이 두꺼워질수록 압력강하가 약 500 Pa씩 증가하는 것으로 나타났다.

셀 형상에 따른 압력강하는 Isotropy > Anisotropy ≥ O/S 셀 순서로 나타났다. 매연이 여과되는 시간에 따라 Anisotropy와 O/S셀의 압력강하는 거의 유사하게 나타났으나, Isotropy에 비해서는 약 1,000 Pa 작게 나타났다.

입·출구 채널 비 1.0~1.5까지 변화에 따른 압력강하는 초기에 채널 비 1.5에서 가장 큰 압력강하를 나타냈으나, 매연여과 시간이 증가함에 따라 채널 비 1.0에 비하여 약 1,200 Pa 작은 결과를 나타냈다.

공극률 40~70%로 변화에 따른 압력강하의 영향 결과는 공극률이 높아질수록 압력강하가 작아졌으며, 10%씩 높아질 때마다 약 300 Pa씩 작아지는 경향을 나타냈다.

감사

본 연구는 글로벌 탑 환경기술개발사업 중 친환경차 보급확산 기술개발(2016002080003)에서 지원받아 수행했습니다.

References

- Jung, S. C., and Yoon, W. S., "A Detailed Examination of Various Porous Media Flow Models for Collection Efficiency and Pressure Drop of Diesel Particulate Filter," *Trans. Korean Soc. Automotive Eng.*, **15**(1), 78-88 (2007).
- Bissett, E. J., "Mathematical Model of the Thermal Regeneration of a Wall-Flow Monolith Diesel Particulate Filter," *Chem. Eng. Sci.*, **39**, 1233-1244 (1984).
- Konstandopoulos, A. G., Skaperdas, E., Warren, J., and Allansson, R., Optimizes Filter Design and Selection Criteria for Continuously Regenerating Diesel Particulate Traps. SAE Paper 1999-01-0468 (1999).
- Haralampous, O. A., Kandylas, I. P., Koltsakis, G. C., and Samaras, Z. C., "Diesel Particulate Filter Pressure Drop Part 1: Modeling and Experimental Validation," *Inter. J. Engine Res.*, **5**(2), 149-162 (2004).
- Ogyu, K., Ohno, K., Hong, S., and Komori, T., Ash Storage Capacity Enhancement of Diesel Particulate Filter. SAE Paper 2004-01-0949 (2004).
- Wurzenberger J. C., and Kutsch S., Advanced Simulation Technologies for Diesel Particulate Filters, a Fundamental Study on Asymmetric Channel Geometries. SAE Paper 2007-01-1137 (2007).
- Paul Day, J., and Socha Jr. Louis, S., The design of Automotive Catalyst Supports for Improved Pressure Drop and Conversion Efficiency. SAE Paper 1991-02-01 (1991).
- Konstandopoulos, A. G., Skaperdas, E., and Masoudi, M., Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps. SAE Paper 2002-01-1015 (2002).
- Konstandopoulos, A. G., Kostoglou, M., Vlachos, N., and Kladooulou, E., Progress in diesel Particulate Filter Simulation. SAE Paper 2005-01-0946 (2005).
- Konstandopoulos A. G., Flow Resistance Descriptors for Diesel Particulate Filters: Definitions, Measurements and Testing. SAE Paper 2003-01-0846 (2003).
- Yamaguchi, S., Fujii, S., Kai, R., Miyazaki, M., Miyairi, Y., Miwa, S., and Busch, P., Design Optimization of Wall Flow Type Catalyzed Cordierite Particulate Filter for Heavy Duty Diesel, SAE Technical Paper 2005-01-0666 (2005).
- Lee, and Baek, A Modeling on the Diesel Emission Characteristics in CPF and LNT Kaist, xi, p. 109 (2012).
- Hashimoto, S., Miyairi, Y., Hamanaka, T., Matsubara, R., Harada, T., and Miwa, S., SiC and Cordierite Diesel Particulate Filters Designed for Low Pressure Drop and Catalyzed, Uncatalyzed Systems. SAE Special Publications 2002-01-0322 (2002).