

# 메탈 DPF 시스템 유동특성 연구

한 철 희<sup>1)</sup> · 전 문 수<sup>2)</sup>

한국교통대학교 항공·기계설계학과<sup>1)</sup> · 한국교통대학교 에너지시스템공학과<sup>2)</sup>\*

## Study on the Flow Characteristics Inside a Metal DPF System

Cheolheui Han<sup>1)</sup> · Munsoo Chon<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Aeronautical and Mechanical Design, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk-do, 380-702, Korea

<sup>2)</sup>Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk-do, 380-702, Korea

(Received 2013. 03. 08 / Accepted 2013. 04. 22)

**Abstract :** Unsteady fluid dynamics analysis of flow characteristics inside a Metal DPF system is done using a commercial CAE software, CFD-ACE+. The time profiles of both temperature and pressure of exhaust gas are given as initial conditions. It was found that the position of connecting pipes and the numbering of exhaust gases did not affect the flow uniformity. The presence of a DPF resulted in the significant flow nonuniformity effect on the flow characteristics at the inlet of the DPF. Present results can be applied to the selection of optimal geometry that produces uniform flow characteristics inside a DPF system.

**Key words :** Medal DPF, Computational Fluid Dynamics, Diesel Engine, Unsteady Fluid Flow, Flow Uniformity

### 1. 서 론

최근 강화되고 있는 배기규제 기준을 만족시키기 위해서 배기가스에 대한 특별한 후처리 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 디젤엔진용 후처리 장치는 재생능력을 향상시키기 위해 가급적 배기 매니폴드에 가까이 위치시켜 장착한다.

배기매니폴드에서 곧바로 유입되는 불균일한 고온 가스는 열응력에 기인한 크랙 발생으로 수명이 짧아지는 문제가 발생한다. 따라서, 후처리 장치의 신뢰성을 높이기 위해서는 균일한 배기가스 유동특성을 가지도록 배기매니폴드와 DPF 연결 파이프 형상 설계가 매우 중요하다.<sup>1)</sup> 그러나, 국내외에서 연구중인 다양한 개념의

후처리 기술들은 엔진출력저하를 일으키지 않는 범위 내에서 우수한 포집 및 재생능력을 가진 필터 개발에 집중되어 있다.<sup>2-5)</sup> 따라서, 디젤엔진용 후처리 장치의 신뢰성 향상을 위해서는, 후처리장치 입구 유속균일도 및 유속편심도를 줄일 수 있는 형상설계연구가 중요하다.

일반적으로 필터 수명 향상에 필요한 균일한 유동 분포에 영향을 주는 인자는 필터입구 전단현상, 필터 입구부 지름, 확대관 형상 및 길이, 유속크기 등으로 알려져 있다.<sup>6,7)</sup> 다양한 인자들을 실험으로 연구하기에는 너무 많은 시간과 비용이 필요하다. 컴퓨터를 이용한 3차원 전산유동해석 평가기술을<sup>8,9)</sup> 확보할 경우, 개발하고자 하는 후처리 장치를 비교적 빠른 시간과 적은 비용으로 형상설계 및 성능인증이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 디젤엔진용 후처리 장치의 신뢰성 향상을 위하여, 배기 매니폴드와 후처리 장치로 구성된 메탈 DPF 시스템내의 유동특성에 관한 전산해석 연구를 수행했다.

\*Corresponding author, E-mail: mschon@ut.ac.kr

## 2. 전산해석

다공질 물질을 통과하는 유동에 관한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_k \rho_k) + \nabla \cdot (\epsilon_k \rho_k \vec{V}_k) = S_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_k \rho_k \vec{V}_k) + \nabla \cdot (\epsilon_k (\rho_k \vec{V}_k \vec{V}_k - \mu_k \nabla \vec{V}_k)) \\ = \epsilon_k (-\nabla P + \rho_k \vec{g}) + \vec{I}_k + \vec{B}_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\vec{I}_k = \vec{I}_{k,s} + \vec{I}_{k,m} \quad (3)$$

$$\vec{I}_{k,m} = -K_{km} (\vec{V}_k - \vec{V}_m) \quad (4)$$

배기 매니폴드로부터 DPF로 유입되는 난류 유동특성을 모사하기 위하여 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 표준 k-ε 모델은 난류운동에너지인 k와 소산율을 나타내는 ε에 관한 두 개의 방정식 (5) 및 (6)을 계산하여 eddy viscosity를 모델링하는 two-equation model중 가장 널리 사용되는 난류모델이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 모델상수는  $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 의 값을 가진다. 또한 난류운동에너지 k의 생성항은 다음과 같이 정의한다.

$$P_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \mu_t S^2 \quad S = \sqrt{(2S_{ij}S_{ij})} \quad (7)$$

또한 eddy viscosity는 식 (5) 및 식 (6)에서 구한 k와 ε 값을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

또한 난류 Prandtl 수는 다음과 같이 정의되며 일반적으로 0.85의 값을 사용한다.

$$Pr_r = \frac{\mu C_p}{k} \quad (9)$$

입구온도는 직렬 4기통 2.0-L급 HSDI 디젤엔진에서 NEDC 4 사이클에 대한 배기가수 온도 측정값을 기준으로 600°C로 선정하였다. 또한 배기가스의 물성치는 디젤엔진 특성상 20:1이상의 높은 공연비와 배기가스 함유량의 70%이상이 N<sub>2</sub>라는 점을 고려하여 공기의 물성치로 근사시켜 사용하였다. 이때 배기가스의 점성계수는 Sutherland's Law<sup>10</sup>를 사용하였으며 다음과 같다.

$$\mu = \mu_{ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_{ref} + S}{T + S} = C_1 \frac{T^{3/2}}{T + S} \quad (10)$$

여기서  $\mu_{ref}, T_{ref}$ 는 기준 점성계수 및 온도 값을 나타내며 S는 공기의 경우 110.4K의 값을 가진다.  $C_1 = \mu_{ref} (T_{ref} + S) / T_{ref}^{3/2}$ 로 정의되며 그 값은  $1.458 \times 10^{-6}$ 이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 배기 매니폴드 및 연결 파이프 체결위치 영향

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연결파이프가 배기 매니폴드 중앙에 부착된 경우(CASE I)와 측면에 부착된 경우(CASE II) 두 가지 경우로 나누어 배기 매니폴드로부터 후처리 장치로 유입되는 비정상 유동특성을 해석하였다. CASE I 및 CASE II 두 경우 모두 15만개의 격자를 사용하여 계산을 수행했다. 또한, 기하학적 곡률이 크게 변하는 부분에는 가능한 많은 수의 격자를 밀집시켜 유속이 급변하는 부분에서의 물리량 보존이 이루어지도록 하였다.

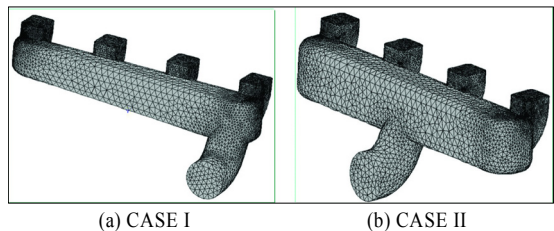


Fig. 1 Unstructured meshes for the present calculation

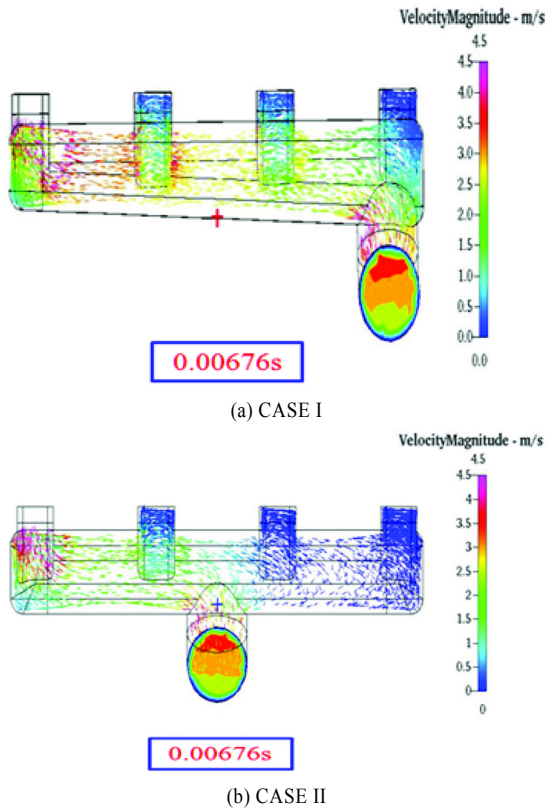


Fig. 2 Comparison of velocity distributions at the inlet of a metal DPF.

Fig. 2는 CASE I 과 CASE II 두 경우에 대한 후처리 장치 입구부분의 유속분포를 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 잘 나타나 있듯이, 매니폴드와 DPF를 연결하는 곡관의 부착위치가 단면의 유속분포에 미치는 영향은 크지 않았다. 오히려 배기 매니폴드와 곡관사이의 곡률에 영향으로 후처리장치 입구단면에서 상부의 유속이 큰 속도를 가지고 있다.

Fig. 3에 엔진으로 부터 유출되는 배기가스의 시간에 따른 위치 변화가 유속균일도에 미치는 영향을 나타내었다. 후처리장치 입구 단면으로 유입되는 유속 분포가 Fig. 2의 결과와 유사한 속도분포를 나타내었다. 따라서, 배기 매니폴드에서 배기가스가 유입되는 순서가 후처리 장치에 유입되는 유속균일도에 미치는 영향은 미미했다.

### 3.2 후처리 장치가 미치는 영향

Fig. 4에 후처리 장치를 포함한 전체 시스템을 나타

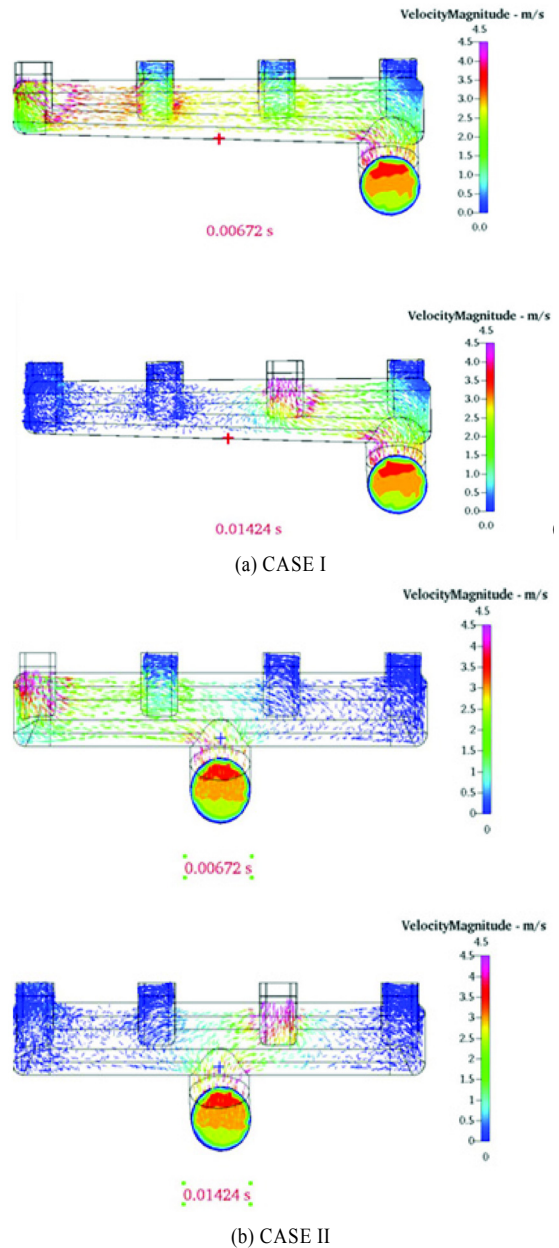


Fig. 3 Comparison of velocity distributions in front of a metal DPF for different valve openings.

내었다. 본 연구에서 사용한 좌표축은 배기 매니폴드와 평행선 선을 X 축으로, DPF에서 배기 매니폴드방향의 선을 Z축으로 그리고 X 및 Z축과 수직인 축을 Y 축으로 선정했다.

Fig. 5는 후처리 장치에 유입되는 유속의 축방향 성

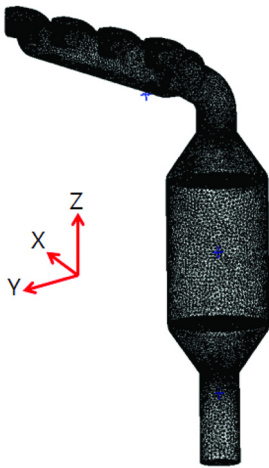


Fig. 4 Nomenclature of the present analysis

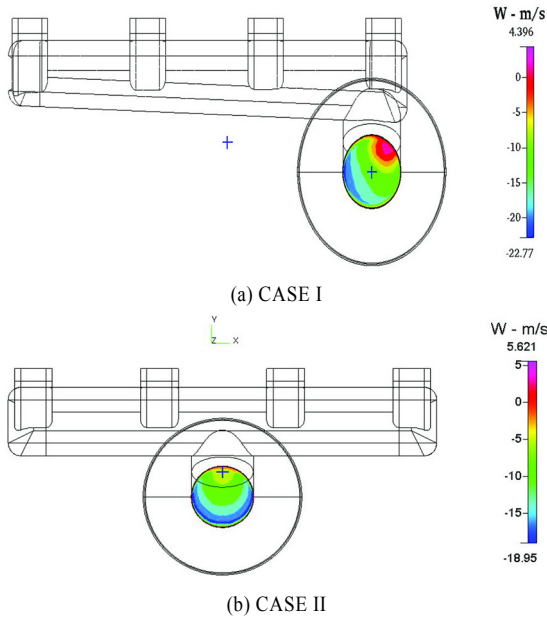


Fig. 5 Axial velocity component(w) distributions when  $V_{in}=5\text{m/s}$ ,  $T_{in}=600^\circ\text{C}$

경우 모두 후처리 장치로부터 배기 매니폴드 쪽으로 역류하는 유동성분이 발생하는 것을 볼 수 있다. CASE I의 경우 유속분포가 불균일하여 유속편심도 뿐만 아니라 유속 균일도 값이 크다. 또한 CASE I의 경우 선회유동 성분이 발생하여 역류도 발생하고 있다. CASE II에서는 곡률반경이 큰 곳에서 최대유속이 발생하여 유속편심도가 크기는 하나 좌우 대칭적인 속도분포를

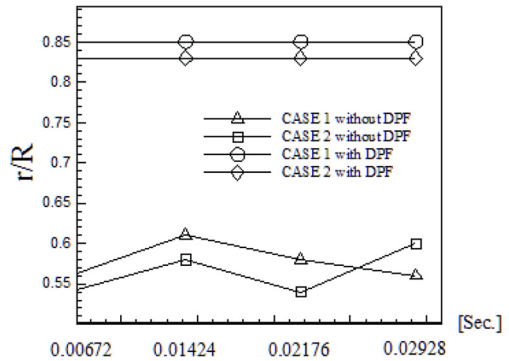


Fig. 6 Comparison of velocity indices when  $V_{in}=5\text{m/s}$ ,  $T_{in}=600^\circ\text{C}$

분을 나타낸 그림이다. 그림에서 CASE I 및 Case II 두 보이고 있다. 따라서, CASE II가 CASE I 보다 우수한 유속균일도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에 후처리 장치를 해석모델에 고려하지 않고 배기 매니폴드만을 계산한 경우와 후처리 장치를 포함하여 계산한 두 개의 모델에 대하여 파이프의 반지름(R)과 최고 유속이 나타나는 지점까지의 반경(r)사이의 비로 정의되는 속도지수(velocity index)값을 도시하였다. VI(r/R)의 값이 0에 가까워 질수록 유속편심도가 적으며 VI값이 클수록 유속편심도가 큰 것을 의미한다. Fig. 6에 볼 수 있듯이 배기 매니폴드에 후처리 장치와 같이 유동저항을 증가시키는 물체가 부착되어 있지 않은 경우에는 VI값이 0.55에서 0.65사이의 값을 유지하나 후처리 장치를 부착시킬 경우 VI값이 0.80에서 0.85사이의 값을 가진다. 따라서, 후처리 장치를 부착할 경우 유속편심도가 매우 커짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 디젤엔진으로부터 발생한 배기가스가 후처리 장치에 유입되는 유속분포에 후처리 장치의 장착 위치 및 후처리 장치의 존재여부가 미치는 영향을 연구했다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 후처리 장치와 배기 매니폴드 사이의 장착 위치가 유속균일도에 미치는 영향은 미미했다.
- 2) 엔진 실린더 불력에서 배기가스가 배출되는 순서가 유속균일도에 미치는 영향은 거의 없다.
- 3) 후처리 장치의 존재로 인하여 배기 매니폴드에서

후처리 장치로 유입되는 유속에는 역류가 발생하며, 속도지수가 0.8이상의 값을 가지며 유속 균일도가 매우 나쁘다.

향후, 후처리 장치와 배기 매니폴드를 연결하는 곡관의 곡률반경이 미치는 영향을 연구할 계획이다.

## References

- 1) 진봉용, 백경욱, 조남효, “촉매변환기내 유동분포 개선을 위한 형상 최적화”, 한국자동차 공학회 1999년도 추계학술대회 No.99380139, 1999.
- 2) Konstandopoulos, A.G., Kostoglou, M., Skaperdas, E., Papaioannou, E., Zaravalis, D., and Kladopoulou, E., “Fundamental Studies of Diesel Particulate Filter : Transient Loading, Regeneration and Aging”, SAE 2000-01-1016, 2000.
- 3) Weltens, H., Bressler, H., Teres, F., Neumaier, H., and Rammoser, D., “Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Predictions Predictions”, Technical Paper No. 930780, 1993.
- 4) Cunningham, P. and Meckl, P., “1-D Dynamic Diesel Particulate Filter Model for Unsteady Pulsating Flow”, SAE 2007-01-1140, 2007.
- 5) Opris, C.N. and Johnson, J.H., “A 2-D Computational Model Describing the Flow and Filtration Characteristics of a Ceramic Diesel Particulate Trap”, Technical Paper No. 980545, 1998.
- 6) 신동원, 윤천석, “DPF 유동특성에 관한 과도해석 연구”, 대한자동차학회 논문집, 제18권 제1호, pp. 131-138, 2010.
- 7) Herman, W., Harald, B., Frank, T., Hubert, N., and Detlev, R., “Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction”, SAE Technical Paper No. 930780, 1993.
- 8) Daniel, W.W., John, E.K., “Reducing Catalytic Converter Pressure with Enhanced Inlet-Heater”, SAE Technical Paper No. 952398, 1995.
- 9) Zhang, X. and Romzek, M., “Computational Fluid Dynamics (CFD) Applications in Vehicle Exhaust System”, SAE 2008-01-0612, 2008.
- 10) CFD-ACE+ Theory Manual, 2010, ESI-CFD.