

확대관 형상에 따른 DPF 내의 유동특성 해석

임동렬* · 이상업** · 김민정** · 김송기*** · 김성규***

Numerical study on the Air Flow Characteristics inside a DPF with Diffuser Shape

Dong-Ryul Rhim*, Sang-Up Lee**, Min-Jung Kim**, Soong-Kee Kim***,
Seong-Kyu Kim***

Key Words : Diesel Aftertreatment Systems(디젤후처리장치), Diesel Particle Filter(매연여과장치), 확대관(Diffuser), Flow Uniformity(유동균일도), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

ABSTRACT

Numerical analysis has been conducted for improving air flow characteristics in the exhaust aftertreatment system of diesel-fueled passenger cars by changing axial length and cone shape of a DPF diffuser. The results of air velocity and static pressure distributions along with air flow uniformity results suggest that a diffuser shape with 2D or 3D function type is better for air flow patterns in front of a DPF.

1. 서론

통계청의 자료를 보면 2000년 우리나라의 총 가구는 1400만 가구, 자동차 등록대수는 1200만대로(2005년 1500만대) 1가구당 1차량 보유에 근접하고 있다.¹⁾ 기존 차량의 경우, 출력과 소음에서 유리한 가솔린 엔진을 사용하는 것이 일반적이었으나, 최근 기술의 발전으로 인하여 디젤엔진의 단점(소음, 배기가스)이 상당수 극복되면서 연소효율이 좋은 디젤엔진이 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 환경부의 경유차환경위원회에서는 디젤승용차의 판매를 허용하는 한편, 배출가스의 배출 허용기준을 강화하면서 매연 후처리장치(DPF, DOC 등)의 부착을 의무화하도록 규정함에 따라, 국내에서도 이에 따른 연구가 활발히 진행 중이다.

디젤 엔진의 경우 엔진시동 후 촉매가 활성화되기 이전까지 짧은 시간 이내에 배출가스의 80%이상이 정화되지 않고 바로 배출되기 때문에 촉매변환기 내의 배기유동 및 활성화시간(Light-off time) 예측은 매우 중요하며, 매연여과장치(Diesel Particle Filter, 이하 DPF) 전면에서의 불균일한 배기가스 유동분포를 개선함으로써 촉매 활성화시간을 단축시키고 배기가스의 DPF 내 잔류시간을 증가시켜 촉매의 수명 및 효율을 증가시킬 수 있다. DPF 전면에서의 배기가스 유동분포에 영향을 주는 인자들은 DPF 입구관 지름, 확대관의 축방향 길이 및 형상, DPF 단면 지름, DPF 출구부 형상, 배기가스 유동속도 등으로 알려져 있다.²⁻³⁾ 이러한 다양한 설계 변수들로 인하여 실험적 방법을 통한 최적 설계 수행은 많은 제약이 수반되므로 최근에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)을 이용한 접근 방법 사용하여 시간과 비용을 절감하고 있다.

본 연구에서는 EURO-V 수준의 디젤 후처리시스템

* corresponding author, rhim@iae.re.kr

** 고등기술연구원

*** 지엠대우오토엔텍놀로지(주)

장착 승용 경유 자동차를 개발하기 위한 사업의 일환으로 DPF 내·외부에서의 유동분포 특성에 대하여 해석하였으며, 위에 언급한 인자들 중, DPF 전단에 위치한 확대관의 축방향 길이 및 확대관 콘 형상이 유동특성에 미치는 영향을 예측하여 DPF의 성능 향상에 유리한 확대관의 형상을 제시하였다. 본 연구의 해석을 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CD v3.15를 사용하였다.

2. 해석 방법

2.1. 해석 격자

해석 모델은 Fig. 1과 같이 DPF를 비롯하여 DPF 전단의 입구관, 확대관(입구콘) 및 후단의 출구관, 출구관으로 구성되어 있다.

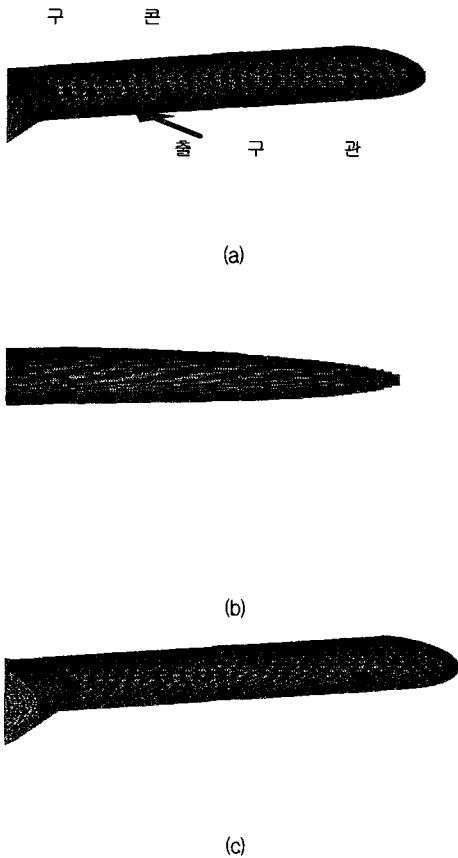


Fig. 1 (a) Linear shape (b) 2D function (c) 3D function
Computational grids for $L = D_p$

확대관 콘 형상에 따른 유동특성의 변화를 예측하기 위하여 Fig. 1과 같은 해석모델을 구성하였으며, Fig. 1은 확대관의 축방향 길이(L)가 입구관의 지름(D_p)과 동일한 경우의 해석모델을 나타내고 있다. 또한 Fig. 1 (a)-(c)는 각각 확대관의 축방향 콘 형상이 직선(Case 1), 2차원 함수(Case 2), 3차원 함수(Case 3)인 해석 모델을 보여주고 있다(Table 2의 Case 1-3). 또한 확대관 축방향 길이가 입구관 지름의 2배인 해석 모델을 구성하여 DPF 입구부의 길이변화에 따른 유동특성을 관찰하였다($L = 2D_p$, Table 2의 Case 4-6). 해석모델의 각 구성 부분에 대한 형상수치와 각 Case 별 조건은 아래의 Table 1과 2에 나타내었으며, 격자에 따른 영향을 줄이기 위하여 각 해석 모델은 동일한 조밀도를 갖는 20만개 이상의 육면체 요소(hexahedral element)를 사용하였다.

Table 1 Fixed parameters

입구관 직경	D_p
입구관 길이	$5D_p$
DPF 직경	D_{dpf}
Mat 두께	$D_p/6$
출구관 길이	D_p
출구관 직경	D_p
출구관 길이	$3D_p$

Table 2 Analytic cases

	확대관 길이(L)	확대관 형상
Case 1	D_p	직선
Case 2	D_p	2차원 함수
Case 3	D_p	3차원 함수
Case 4	$2D_p$	직선
Case 5	$2D_p$	2차원 함수
Case 6	$2D_p$	3차원 함수

2.2 경계 조건 및 계산 방법

2.2.1 경계 조건

해석 시스템 내의 유체는 해석의 용이성을 위하여 압축성 정상유동을 하는 상온 상태의 공기(25 °C, 1.205 kg/m³, 1.81×10⁻⁵ Ns/m²)로 가정하였고, 입구에서 17.3 m/s(질량유량 106 kg/h을 속도로 환산)를 축방향 속도를 갖는 조건을 선택하였다.

2.2.2 수치 해석

유동해석에 사용된 Star-CD는 여러 분야에 걸쳐 사용되고 있는 범용 CFD 코드로서, 본 해석에서는 유한 체적법(Finite Volume Method), 비정렬 격자계(Unstructured Grid)와 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘이 기본으로 적용되었다. 대류항차분법(Convective differencing scheme)으로는 2차 정확도를 갖는 MARS(Monotone advection and reconstruction scheme)을 사용하였고, 난류모델로는 벽함수를 사용하는 표준 고레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, DPF 부분에는 압력과 속도에 의한 저항힘이 균형을 이루는 단순모델⁴⁾을 이용하였다.

2.2.3 DPF(Channel) 내 압력강하

공기가 통과하는 DPF 채널(Channel)의 단면적은 일반적으로 작아서 채널 내부의 유동은 레이놀즈수(Re)가 1000보다 작은 층류이다.⁵⁾ 수치해석 시에는 보통 유량과 압력저하의 관계를 실험을 통해 측정된 결과를 이용하며, 실험을 하지 않는 경우 적용 가능한 표현으로 식 (1)과 같은 관계를 사용하기도 한다.

$$f = C_1 Re^n \left(1 + \frac{C_2}{Re} \right) = \frac{\tau}{1/2 \rho V'^2} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho V' D_h}{\mu}$$

C_1, C_2, n : 유동에 따른 상수

τ : 벽에서의 마찰력

V' : DPF에서의 가상속도 ($= V/\epsilon$)

D_h, ϵ : 각각 채널의 수력반경, 기공률

단위 길이 당 압력강하는 다음과 같다.

$$\frac{dP}{L} = -\tau \frac{P}{A'} \quad (2)$$

P : 들레길이(wetted perimeter)

A' : 채널의 단면적 ($= \epsilon A$)

A : DPF 전체 단면적

식 (1)과 (2)에서

$$\begin{aligned} \frac{dP}{L} &= -\frac{PC_1 \rho V'^2 Re^n}{2\epsilon^3 A} - \frac{PC_1 C_2 \mu V Re^n}{2\epsilon^2 A D_h} \\ &= -\alpha V'^2 - \beta V \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)과 같은 관계식을 이용하면 수치해석 시 필요한 투과율 계수(permeability) α, β 를 구할 수 있고 DPF 내에서 운동량 방정식을 대신하여 계산된다. 위의 식들은 일반적으로 DPF 내에서 마찰로 인한 저항이 DPF에서의 유동압력(dynamic pressure)보다 충분히 큰 경우에 적용 가능하므로 수치해석에 적용 시 아래와 같은 조건을 만족해야한다.

$$\left| \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V'^2} \right| \gg 1 \equiv \left| -\frac{(\alpha V + \beta) VL}{\frac{1}{2} \rho V'^2} \right| \gg 1 \quad (4)$$

이를 다시 쓰면 아래의 식(5)와 같다.

$$\frac{\alpha L}{\rho} , \frac{\beta L}{\rho V} \gg 1 \quad (5)$$

식 (5)와 같은 관계가 만족하지 않는 경우에는 일반적인 운동량 방정식을 수정하여 적용한다.

본 연구에서는 담체기공률은 0.5, DPF 내의 압력강하는 약 0.15 kPa이 되도록 처리하기 위해 축방향 투과율 계수는 $\alpha_j = 96.4$, $\beta_j = 72.4$, 나머지방향 투과율계수는 1.0×10^5 으로 하였다.

3. 해석 결과

확대관의 형상 및 축방향 길이의 변화에 따른 해석 시스템 내에서의 유동 특성 변화를 예측하기 위하여, 각 해석 Case의 축방향 속도 분포 및 DPF 전면, 내부에서의 압력 분포를 비교, 평가하였다.

3.1 L=D_p 조건

3.1.1 확대관 형상변화에 따른 속도분포

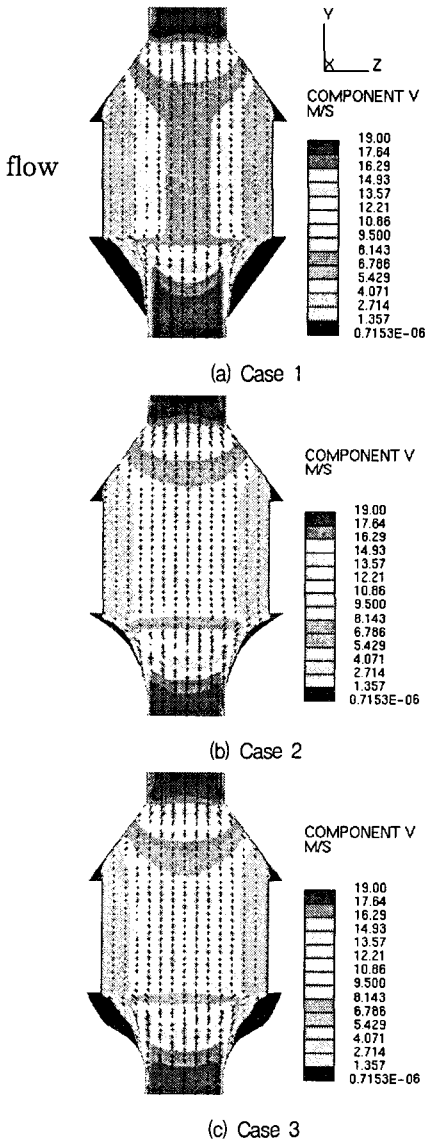


Fig. 2 Axial velocity inside a DPF with diffuser shape

Fig. 2는 L=D_p인 경우 확대관 형상변화에 따라 해

석한 축방향의 속도분포(component v)이다. 각 그림에서 확대관 우측과 좌측으로 속도가 0에 가까운 영역(청색 영역)이 생기는 것을 볼 수 있다. 이 영역은 확대관 입구 단면과 DPF 전면의 면적차이로 인한 제트 유동이 일어나 전체적인 축방향 유동의 반대방향으로 속도가 생겨났기 때문이다. 또한 확대관 내 속도분포를 비교해보면, DPF입구부의 관에서 확대관으로 연결되는 부분의 확장각이 작아짐에 따라 이런 재순환영역도 감소되는 것을 볼 수 있다.

3.1.2 확대관 형상변화에 따른 DPF 내 압력분포

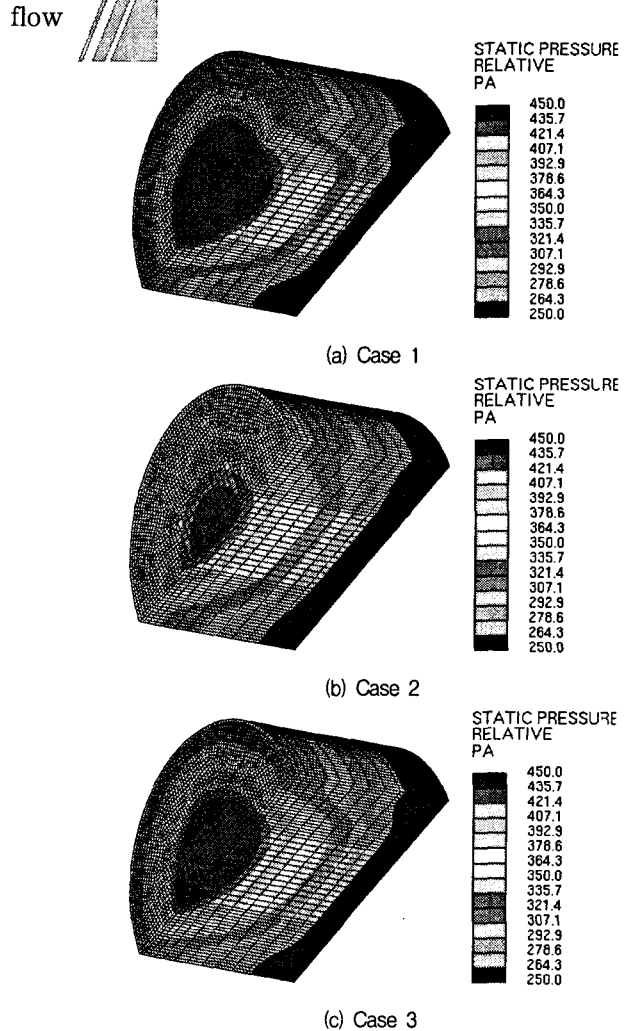


Fig. 3 Static pressure inside a DPF with diffuser shape

Fig. 3은 L=D_p인 경우 확대관 형상변화에 따라 해석한 DPF 내 압력분포이다. DPF는 유체의 흐름이 대

한 저항으로 작용하므로 각 해석 모델의 DPF 전, 후 면에서는 대략 150~200 Pa의 압력차가 발생한다. 입구관으로 부터의 원활한 유동흐름이 DPF에 부딪혀 그곳에서 상대적으로 큰 부하가 발생하면서 전면 중앙부의 높은 압력집중을 관찰할 수 있다. 2차원 함수형상의 확대관을 가진 DPF(Case 2)의 전면 압력분포가 가장 완만한 기울기로 분포되어 있어 유동 분산에 가장 유리할 것으로 판단된다.

3.2 L=2D_p 조건

3.2.1 확대관 형상변화에 따른 속도분포

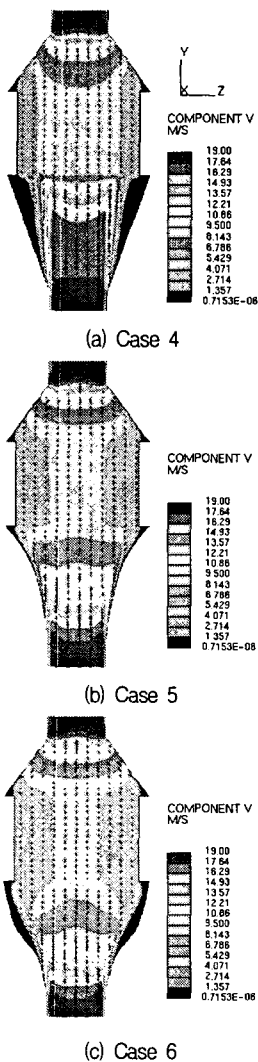
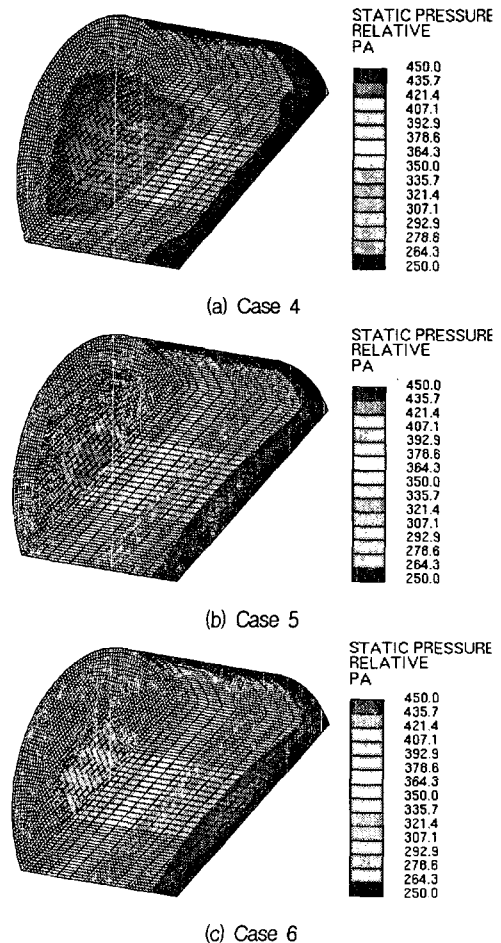


Fig. 4 Axial velocity inside a DPF with diffuser shape

Fig. 4는 $L=2D_p$ 인 경우 확대관 형상변화에 따라 해석한 축방향의 속도분포이다. Fig. 2와 비교해보면 Fig. 4에서 전체적으로 확대관 우측과 좌측으로 속도가 0이 되는 영역이 감소한 것을 볼 수 있다. 이 영역은 DPF입구관의 직경과 DPF 전면직경의 차이로 유동 박리가 생기는 구역으로 Fig. 2의 확대관보다 확대관 축방향 길이가 2배로 증가함에 따라 확대관의 기울기가 작아지면서 이런 재순환 영역이 감소하게 된다. 확대관의 기울기가 작을수록 급격한 유동의 확산이 줄어들기 때문이다. 따라서 확대관의 길이가 길어질수록 재순환 영역을 감소시키고 유동의 편중을 줄일 수 있지만, 공간적·비용적인 한계가 있으므로 상관관계에 있는 인자들을 조절하여 최적의 형상을 얻어야한다.

3.2.2 확대관 형상변화에 따른 DPF 내 압력분포



(c) Case 6

Fig. 5 Pressure inside a DPF with diffuser shape

Fig. 5는 $L=2D_p$ 인 경우 확대관 형상변화에 따라 해석한 DPF 내 압력분포이다. 직선의 확대관을 가진 DPF 전면에서보다 2차원 및 3차원 함수의 확대관을 가진 DPF 전면에서 균일한 압력분포를 보여, 상대적으로 적은 부하가 걸리고 있음을 알 수 있다.

3.3 DPF전면에서의 유동균일도 및 유동분포

DPF 전면에서의 균일한 유동의 분포를 유도할 수 있다면 전체 DPF의 성능을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 내구성을 증가시키는 데에도 매우 유리하다. DPF 전면에서 유동의 균일도를 나타내는 지수로서 일반적으로 균일도(Uniformity, γ)가 사용되는데, 아래의 식 (6)과 같이 정의된다. 본 해석모델의 유동 균일도를 구하기 위하여 실제 DPF격자(Channel) 대신 DPF 단면을 이루는 격자요소(Grid)를 이용하여 계산하였다.

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|v_i - \bar{v}|}{2\sqrt{S}} S_i}{\quad} \quad (6)$$

- S : DPF 전면 단면적
- v_i : 셀 i 에서의 국부속도
- \bar{v} : 평균속도
- S_i : 셀 i 의 단면적

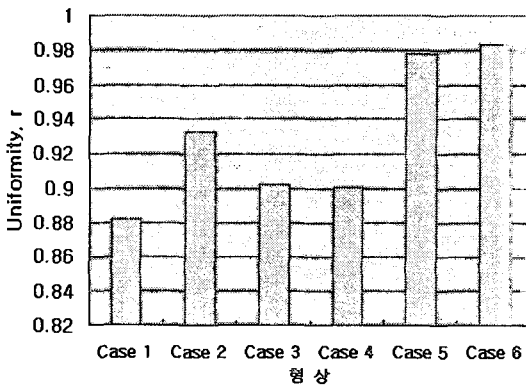


Fig. 6 Air flow uniformity

Fig. 6은 확대관 축방향 길이 및 콘 형상 변화에 따

른 DPF 전면에서의 유동균일도를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 $2D_p$ 길이의 확대관 축방향 길이를 가진 DPF 전면에서 높은 유동균일도를 나타내었고, 확대관 길이변화에 상관없이 직선형상의 확대관을 가진 DPF 전면에서 가장 낮은 유동균일도를 보였다.

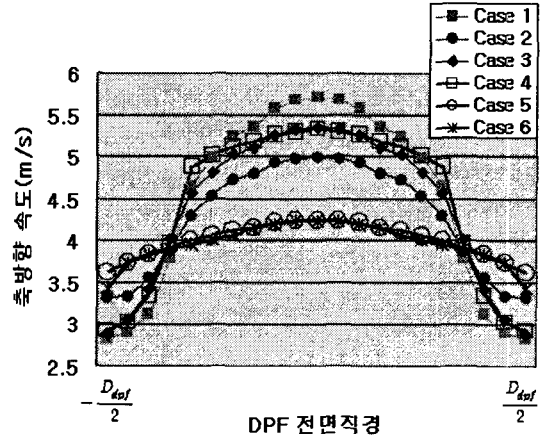


Fig. 7 Axial velocity distribution

Fig. 7은 확대관 축방향 길이 및 형상변화에 따른 DPF 전면에서의 축방향 속도분포를 나타낸 그래프이다. $2D_p$ 확대관 축방향 길이의 2차원 및 3차원 함수 형상을 가진 DPF의 전면 속도분포가 가장 완만한 기울기를 나타내고 있다. 또한 직선 형상의 확대관은 각 조건에서 가장 높은 유동의 편중현상을 보여 DPF 전면의 손상을 최소화해야 하는 최적 형상에는 적합하지 않음을 예측할 수 있다.

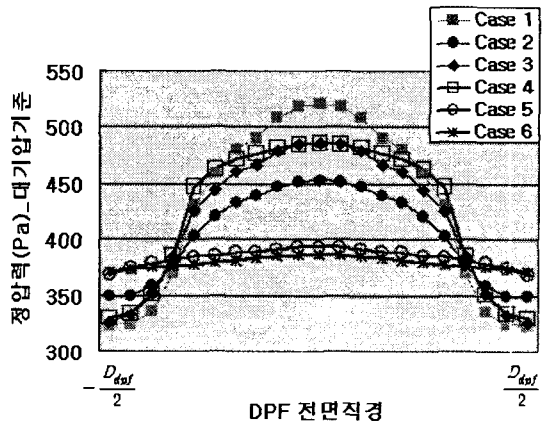


Fig. 8 Static pressure distribution

Fig. 8은 확대관 축방향 길이 및 형상변화에 따른 DPF 전면에서의 압력분포를 나타낸 그래프이며 Fig. 7의 속도분포와 유사한 경향을 나타내고 있다.

4. 결론

- 1) 확대관 축방향 길이가 $2D_p$ 인 경우가 D_p 인 경우 보다 DPF 전면에서 발생하는 부하(속도, 압력)의 집중 현상을 감소시켜 DPF 표면손상의 가능성을 줄일 수 있을 것을 사료된다.
- 2) 확대관 축방향 길이가 $2D_p$ 인 조건이 D_p 인 조건보다 유동 분산에 유리한 것으로 관찰되며, DPF 전면에 걸쳐 균일한 soot 공급을 함으로써 DPF의 성능 향상에 유리한 영향을 미칠 것으로 판단된다.
- 3) 확대관 축방향 길이가 $2D_p$ 인 조건에서 2차 및 3차 함수 형태의 확대관 콘 형상이 다른 조건에 비해 높은 유동 균일도(DPF 전면에서의 균일한 축방향 속도 및 압력분포)를 나타내었으며, 직선 형상의 확대관은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.
- 4) 확대관의 축방향 길이가 길어질수록 재순환 영역을 감소시키고 유동의 편중을 줄일 수 있지만, 공간적·제작 비용적인 한계가 있으므로 상관관계에 있는 인자들을 조절하여 최적의 형상을 선정하여야 한다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) <http://www.nso.go.kr>(통계청)
- (2) 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.
- (3) Daniel W. Wendland, John E. Kreucher, "Reducing Catalytic Converter Pressure With Enhanced Inlet-Header", SAE Technical Paper No. 952398, 1995.
- (4) Computational Dynamics, Star-CD Manuals Version 3.15, Chap. 8, 2001.
- (5) Benjamin, S. F., Clarkson, R. J., Haiman, N., and Girgis, N. S., "An Experimental and Predictive Study of the Flow Field in Axisymmetric Automotive Exhaust Catalyst Systems", SAE Technical Paper No. 961208, 1996.