

곡관 연결 조건에 따른 디젤엔진 매연여과장치 입구 유속 분포의 CFD 해석

A CFD Analysis of Flow Velocity at Inlet of a Diesel Particulate Filter according to the Curved Duct Connection Conditions

이수룡[†] · 고영남* · 이충훈**

Su-Ryong Lee · Young-Nam Ko · Choong-Hoon Lee

Abstract The flow velocity distribution at inlet of diesel particulate filter (DPF) which is connected to each curved duct was simulated using STAR-CD[®]. Three kinds of models which describe the shapes of the curved duct were used for the CFD simulation. The simulation results were compared with the experimental data of velocity distribution which was obtained using a Pitot tube and 2-D positioning machine. At the 90° curved connecting condition, the CFD simulation results of flow velocity distribution at inlet of the DPF showed a horse hoop shape shifted from the axial center line of the DPF. The CFD simulation results agree reasonably with those of the experiments.

Keywords : CFD analysis, Diesel Particulate Filter, Curved Duct, Diesel Engine, Flow Velocity Distribution

요 지 디젤 엔진 매연 필터의 입구부와 배출 가스 배출을 위한 배기관 연결을 직선 또는 곡선으로 형태로 연결하였을 때의 DPF 입구 유속 분포를 STAR-CD[®] 전산해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션하였다. 곡관의 형상을 나타내는 3 종류의 수치해석 용 격자 모델을 사용하여 DPF 입구에서의 유속 분포를 시뮬레이션 하였다. 피토크관을 2차원 이송 장치에 탑재하고 위치를 이동시키며 측정된 유속 분포와 동일한 조건에서 시뮬레이션한 결과와 비교하였다. DPF 입구와 90°의 곡관이 연결된 조건에서 CFD 해석을 수행한 결과 입구 단면에서의 유속 분포가 말발굽 형태를 나타내었으며 최대 유속값이 DPF 중심축에서 약간 벗어난 위치에서 나타나고 있다. 이러한 CFD 해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.

주 요 어 : CFD 해석, 디젤매연필터, 곡관, 디젤엔진, 유속분포

1. 서 론

최근 전자 제어 기술이 발달하면서 커먼레일을 탑재한 전자제어 방식의 디젤 엔진 보급이 일반화 되고 있다. 커먼 레일 시스템은 주로 소형 디젤 엔진에 적용되어 왔으며 점차 대형 디젤 엔진에도 장착되고 있다. 커먼 레일 전자 제어 기술을 디젤 엔진에 적용함으로써 디젤매연필터(DPF)를 부착하는 것이 일반화 되고 있다. DPF 장착 차량의 경우 일정 시간 동안 차량을 운행하면 DPF 내에 축적된 매연을 제거하는 과정 즉, DPF의 재생(regeneration)이 매우 중

요한데 전자 제어 커먼 레일 기술을 적용함으로써 DPF의 효율적 재생이 가능하게 되었다.[1]

국내에서는 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법을 개정하여 자동차에서 배출되는 매연에 대한 규제를 강화함으로써 디젤 차량의 DPF 장착을 유도하고 있다.[2,3] 미국에서는 철도 차량에도 DPF 장착을 하도록 규제를 강화하고 있으며[4,5] 국내 철도 차량에도 DPF 장착을 검토하는 연구가 일부 이루어지고 있다.[6,7]

DPF의 핵심 기술은 축적된 매연을 주행 중 적절한 시점에 제거하는 재생 기술이다. 일반적으로 DPF 장착 차량의 배기압이 기준값 이상이 되면 DPF 재생이 시작되며 DPF 내에 축적된 매연이 제거 되면 배압이 떨어지게 되고 재생을 중단하게 된다. 이러한 과정을 차량 운행 중에 반복적으로 실시하게 된다. 재생 과정에서 세라믹 필터의 국부적인 과열은 필터의 손상을 가져올 수 있는데 이것이 DPF 보급

[†] 책임저자 : 서울산업대학교 자동차공학과
^{*} 서울산업대학교 산업대학원 자동차공학과
^{**} 교신저자 : 정희원, 서울산업대학교 자동차공학과
E-mail : chlee5@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6393 FAX : (02)979-7032

에 가장 큰 장애 요인이었다. DPF의 국부적인 과열은 매연의 DPF 내의 축적이 균일하게 이루어지지 못하는 것이 그 원인 중의 하나로 알려져 있다.[8] 따라서 세라믹 필터 내의 매연 축적 특성을 파악하기 위해 DPF 입·출구에서의 속도 분포 특성을 파악 것이 매우 중요한데, 속도 분포를 측정함으로써 필터 내의 매연 축적이 한 곳으로 치우치지 않고 균등하게 분포하는지 여부를 예측할 수 있다.[9]

DPF 입구에서의 속도 분포 측정과 관련된 기존의 연구는 매우 부족한 편이다. DPF 입·출구에서의 유속 측정과 관련된 연구는 Lee 등[10]에 의해 이루어진 바가 있는데, DPF의 입구와 연결되는 커넥터 형상이 디퓨저(diffuser)형인 경우에 대해서 속도 분포를 측정하였으며 Lee 등[11]은 입구 DPF 입구 연결부 형상이 L-형인 경우의 DPF 입·출구 유속 분포를 측정하였다. Lee 등[10]이 측정한 곡관의 형상은 90°로 꺾여서 DPF 입구와 연결되는 모양을 하고 있다.

버스와 철도 차량과 같이 대형 디젤엔진을 사용하는 경우, 공간이 협소하여 DPF를 설치하는데 많은 제약이 따른다. 즉 DPF의 입구관이 매연을 가장 효율적으로 포집할 수 있는 형상으로 DPF를 장착할 수 없고, 공간적 제약 때문에 입구관이 곡관의 형상을 갖는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 입구관 형상에 따른 DPF 입구에서의 유속 분포 특성을 연구하였다. Lee 등[10]에 의해 이루어진 선행 연구 결과와 동일한 조건에서 CFD 시뮬레이션을 실시하였고 얻어진 DPF 입구에서의 유속 분포를 측정 결과와 비교하는 연구를 수행하였다. 아울러, DPF 입구와 연결되는 곡관의 형상 모델 2개를 추가하여 총 3종류 형상에 대해 격자를 생성하였다. 사용한 상용 CFD 소프트웨어는 STAR-CD[®] 이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험은 Lee 등[10]의 선행 연구 실험 장치와 동일한 것을 사용하였다. 실험 장치는 피토관, 피토관의 위치 제어를 위한 2차원 이송 장치, 블로어, 전체 공급 공기유량 계측을 위한 ISA 1932 플로우 노즐, 피토관을 매연 필터 입구에 접근할 수 있도록 하는 어댑터, 유량 제어를 위한 바이패스 밸브, 이들 구성품의 통합 제어 및 계측을 위한 DAQ 시스템, 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 이차원 이송 장치의 위치 제어를 자동화함으로써 유속 측정의 자동화가 가능하였다. 피토관의 직경은 3mm이고 길이는 300mm이며 1개의 전압부(total pressure)와 6개의 동압부(dynamic pressure) 구멍이 뚫려 있으며 그 차압을 측정하면 속도를 계산할 수 있다. 유동 속도가 비교적 크지 않으며 직경이 작은 것을

사용하여 피토관에 의한 유동에의 교란을 최소화 하였다. DAQ 시스템은 내쇼날인스트루먼트사의 PCI 6014 보드를 사용하여 구성하였다. 블로어는 정격 조건에서 최대 초당 0.15 kg 정도를 흡입할 수 있으며 3상 220V의 전원을 사용하였다. 이송 장치는 두개의 스텝 모터와 볼스크류-LM 가이드로 구성되어 있으며 컴퓨터에 DAQ 보드를 장착하고 DAQ 보드의 디지털 I/O 포트를 통해 모터 드라이브에 제어 신호를 보내어 2차원 이송이 가능하도록 하였다.[10]

Fig. 1에 DPF 입구에서의 유동 속도 분포를 측정하는 시스템을 나타내었다. 리듀서와 디퓨저 사이의 원통 안에 세라믹 필터 코어가 조립되어 있으며 직경과 길이는 각각 230, 305mm이며 200cpi(cells per square inch)의 셀밀도를 가지는 하니컴 구조의 모노리스 타입 필터로 매연에 노출시키지 않은 신제품이다. DPF를 유동이 흘러오는 방향에 대해 수직 방향으로 90° 꺾어 조립하였는데 이는 실제 디젤 차량에서의 장착 조건에 맞추기 위함이다. Fig. 1(b)에 자세히 나타낸 것과 같이 LM 가이드가 포함된 어댑터를 설치함으로써 피토관이 DPF 입구 안쪽으로 접근할 수 있다. DPF 필터 입구에서의 수평 X-Y의 위치 변화에 따른 속도 분포를 측정하기 위해 피토관을 X-Y 이송 장치에 마운트한 상태에서 위치 제어를 하였다.[10]

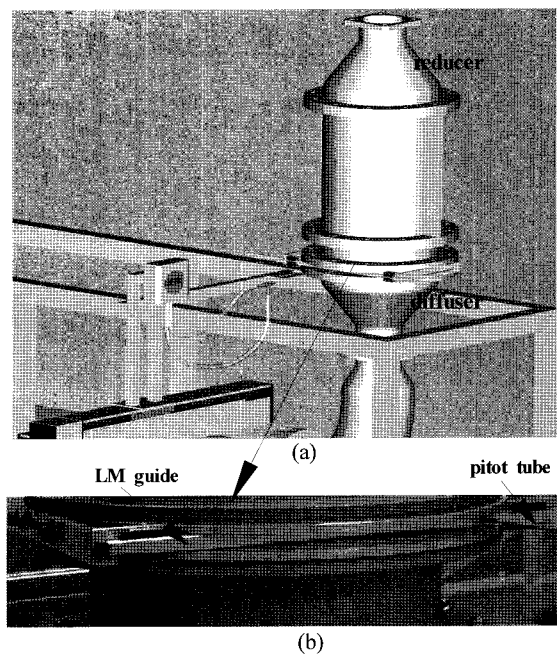


Fig. 1. (a) Experimental setup for measuring velocity distribution of gas flow in DPF entrance and (b) Pitot tube adaptor guide in detail [10]

Fig. 1과 같은 측정 조건에서 총 325개 수평 (X,Y) 위치 조합의 측정 점에서 유속을 자동으로 측정하였으며 총 3~4

시간 정도가 소요 되었다. 이차원 자동이송 장치를 이용하여 각각의 유속 측정 점으로 피토폴을 이송한 후 피토폴에서의 차압을 측정하였다. 항상 정상 상태(steady state)에서 이루어졌기 때문에 측정 차압은 시간에 따라 거의 변동이 없었으며 DAQ 시스템에 의해 1회 측정을 실시하였다. 에러 값을 알기 위해서는 반복 측정이 필요하나 전술한 바와 같이 차압의 변동이 거의 없기 때문에 측정 시간 절약을 1회 측정을 하였다.

3. CFD 해석 모델 및 방법

3.1 CFD 해석 모델

DPF 내부의 유동 분포는 필터의 성능을 좌우하는 주요한 설계인자 중의 하나이다. 만약 유동이 한 부분에 집중되어 매연이 쌓이게 되면 재생하는 과정에서 열응력이 집중되어 필터가 파손될 가능성이 높다. 따라서 배기가스가 필터 내부로 유입될 때 필터 전면부에 균질하게 분배되어 필터의 전 부분을 고르게 사용하는 것이 중요하다. 여기에서는 여러 가지 입구 곡관 형상에 따라 수치 해석을 통하여 DPF 내부의 유동분포를 비교하였다. 6.0L 디젤 엔진에서 사용하는 DPF를 모델로 하였다. 입구관이 직선인 형상과 곡관 형상 등 3가지 형상을 선정하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 곡관 형상을 갖는 Model 2의 경우 실험에서 사용한 모델로서 수치해석의 결과와 실험결과를 비교하기 위해 선정하였다. 그러나 실제 차량에 장착할 때는 Model 2처럼 축소관을 사용하지 않기 때문에 직경이 일정한 곡관 모델 즉 Model 3에 대하여서도 해석하였다.

3.2 수치해석 방법 및 경계조건

CFD 시뮬레이션을 위해 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD[®]를 이용하였다. 난류모델은 k-ε 모델을 채택하였고, 지배방정식의 차분화는 이차정도(second order upwind)의 선형 상류차분법을 사용하였으며, 압력과 속도의 연결은 SIMPLE 알고리즘(algorithm)을 사용하였다.[12] 해의 수렴 판정 조건은 각 격자점의 변수들의 잔류량의 합을 입구면의 유속으로 나눈 값이 식 (1)을 만족하면 수렴하는 것으로 하였다.

$$R_{\phi}^k = \frac{\sum |r_{\phi}^k|}{M_{\phi}} < 10^{-3} \quad (1)$$

배기가스 유입 배기관 입구에서는 전 유입단면에 걸쳐 균일한 속도분포를 경계 조건으로 주었으며, 입구에서의 난류 운동 에너지는 평균 입구 유속의 3%로 가정하였다. 출구에서의 경계 조건은 실험 조건과 맞추기 위하여 압력

을 대기압으로 처리하였다.

배기가스의 질량유량 및 압력 등에 대한 조건은 실험결과와 비교하기 위하여 실험에서 사용된 조건을 사용하였으며, Table 1에 나타내었다.

Table 1. Inlet boundary condition

Material property	Property value
Mass flow rate (kg/s)	0.1109
Air density (kg/m ³)	1.205
Initial gauge pressure (Pa)	960

3.3 격자 생성 및 다공성 매질 모델링

본 연구에 적용된 DPF는 전체 형상을 Pro-Engineer[®]를 이용해 모델링 하였으며, 설계된 CAD data를 IGES 파일로 변환하여 격자를 생성하였다.

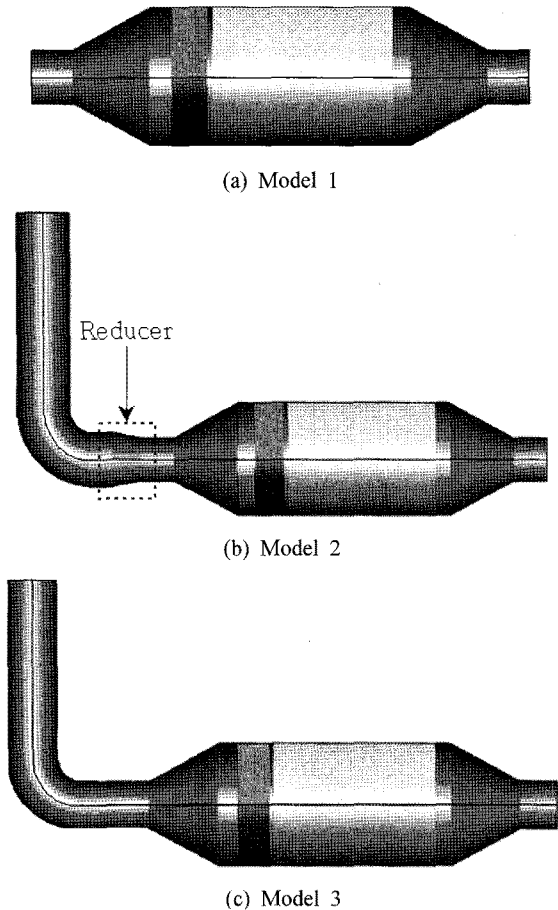


Fig. 2. The computational models of a diesel particulate filter

격자는 격자 생성프로그램인 ICEM-CFD[®]와 Hyper-Mesh[®]를 사용하였으며, 수치 해석을 위한 격자는 사면체 격자로 구성하여 Model 1은 약 20만여 개, Model 2와 3은

약 30만여 개의 격자를 생성하였다. Fig. 3에 DPF의 완성된 3차원 계산격자를 나타내었다.

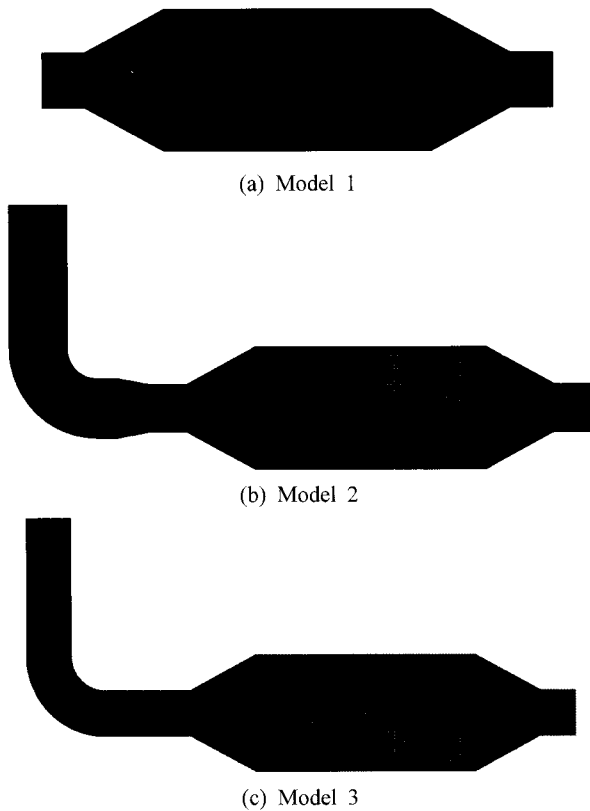


Fig. 3 Meshes for computational models

DPF의 전체 유동장을 해석할 때, 필터 내의 수많은 채널(channel) 유동을 고려하여 계산하는 것은 거의 불가능하기 때문에 필터를 압력 손실이 큰 다공성 물질로 가정하여 해석하는 것이 일반적이다.[13] STAR-CD[®]에서는 다공성 물질의 압력 손실 ΔP 을 처리하기 위하여 Darcy의 법칙을 이용하고 있으며 관계된 식은 다음과 같다.[14]

$$\frac{\Delta P}{L} = (\alpha U + \beta) U \quad (2)$$

여기에서 α 는 유속의 제곱에 비례하는 투과 계수이며 β 는 유속에 비례하는 계수로서 실험 혹은 이론적으로 구한다. 본 연구에서는 Konstandopoulos 등이 [15]가 제안한 식 (3)과 (4)의 이론식을 이용하였다.

$$\Delta P_{clean} = \frac{\mu Q}{2V_{trap}}(a+w_s)^2 \left[\frac{w_s}{ka} + \frac{8FL^2}{3a^4} \right] + \frac{b\rho Q^2(a+w_s)^4 w_s}{4V_{trap}^2 a^2} \quad (3)$$

$$U = \frac{8Q}{\pi D^2 \sigma a^2}, \quad V_{trap} = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad (4)$$

여기에서 a 는 채널넓이, w_s 는 벽두께, k 는 벽투과성, V_{trap} 은 필터 전체 체적, Q 는 유량, U 는 평균 속도, L 은 필터 길이, F 는 28.454, $\sigma = (a+w_s)^{-2}$ 이다. 식 (2)를 식 (1)의 형태로 바꾸면 식 (2)에 있는 계수 α 와 β 를 구할 수 있으며, 각각 0.78과 300 이다.

4. 결과 및 검토

수치해석의 결과를 검증하기 위하여 Model 2의 해석값과 실험값을 비교하였다. 필터 전면부를 기준으로 전방 100mm 위치에서 수평 중심선의 축방향의 속도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 속도 분포 중 실험 결과는 Fig. 5에 나타낸 단면에서의 속도 측정 결과 중 유동 방향을 나타내는 화살표 방향을 따라 축 방향 속도를 추출한 것이다. 실험은 계측상의 제약 때문에 일정부분만 측정된 결과를 나타내었고, 수치해석은 반경방향전체의 결과를 나타내었다. 수치해석의 결과는 Model 2는 입구의 곡관 영향 때문에 원심력에 의하여 필터 입구에서 속도분포가 한쪽 방향으로 치우쳐 필터 중심에서 약 100mm 떨어진 위치에서 최고속도 약 18.43m/s를 나타내고 있다. 이러한 결과는 전체 속도 분포와 크기에서 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

수평중심선 뿐만 아니라 단면 전체에서 수치해석의 결과와 실험결과를 비교하기 위하여 Fig. 4와 같은 위치의 단면에서 수치해석의 결과와 실험결과를 Fig. 5에 각각 나타내었다. 전술한 바와 같이 곡관에 의한 원심력의 영향으로 곡관의 아래쪽으로 중심에서 약 30mm 벗어난 지점에서 최고속도를 보이고 있다.

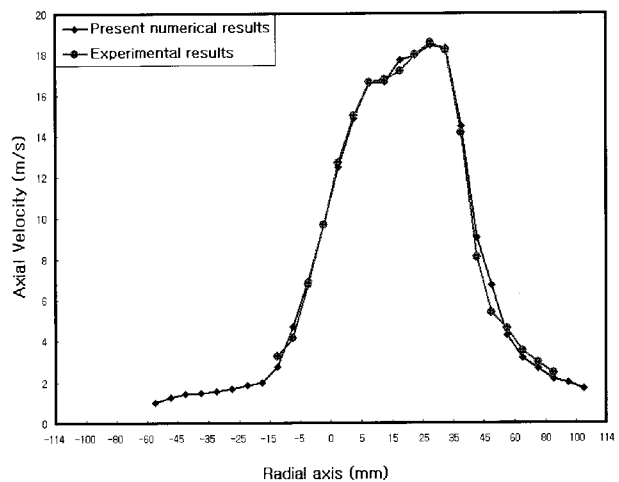


Fig. 4. Axial velocity profiles along the radial direction

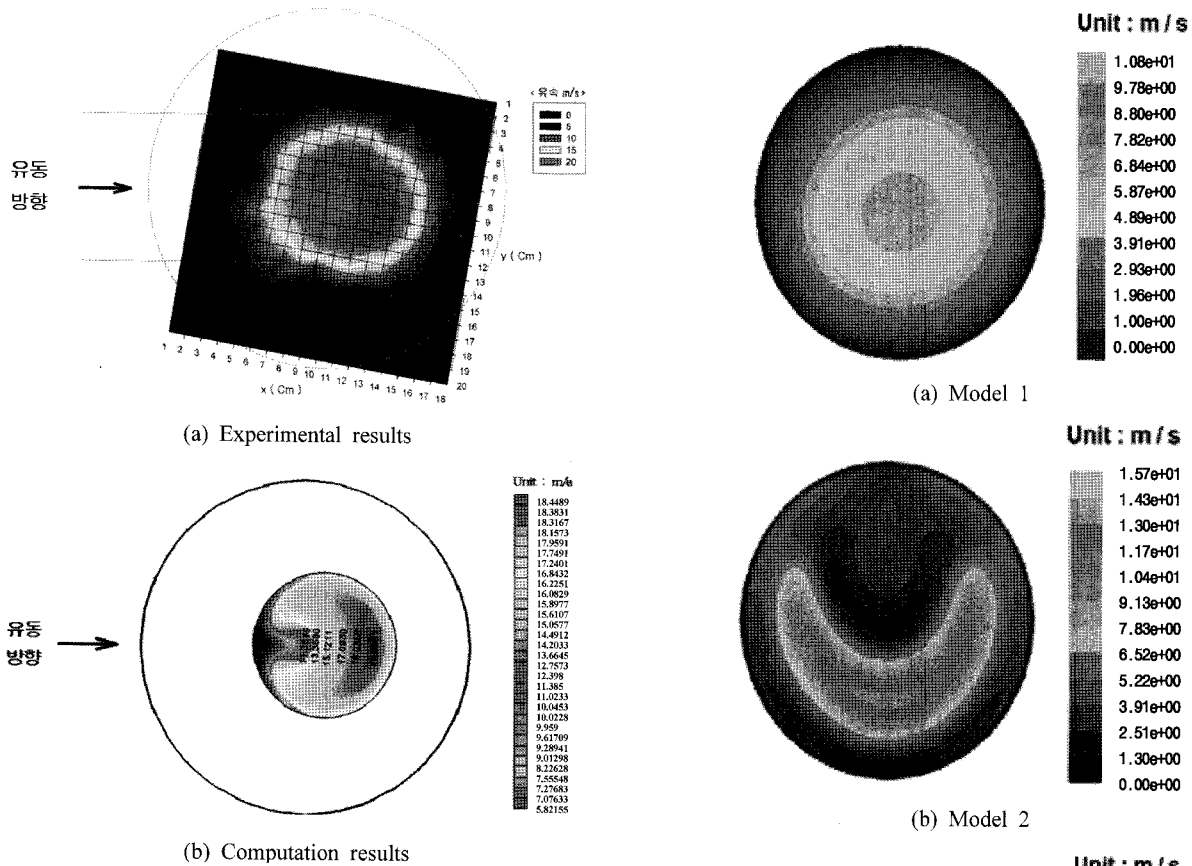


Fig. 5. Axial velocity distributions on the cross-section of 100mm ahead the monolith

수치해석의 결과는 단면 전체에서 실험 결과와 속도 분포 및 크기에서 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, Fig. 5a의 실험 결과를 보면 뚜렷하지 않지만 말발굽 형태의 속도 분포를 보이고 있다. 이것은 Fig. 4에 나타난 반경 방향으로의 속도 분포를 보면 알 수 있다. 비록 Fig. 5b의 시뮬레이션 결과처럼 뚜렷한 말발굽 형태는 아니지만 정성적으로 일치함을 확인할 수 있다. 이로부터 본 연구의 수치 해석 방법은 DPF의 필터 전면부의 유동장을 매우 잘 예측할 수 있으며, 이를 이용하여 여러 가지 형상에 대하여 입구 유동분포를 해석하였다.

필터 전면부를 기준으로 전방 50mm 위치의 단면에서 여러 입구관 형상에 따른 축방향 유동속도를 Fig. 6에 나타내었다. 입구가 직관인 Model 1의 경우, 필터 중심부에서 직관의 지름 정도의 영역에서 최고 속도를 나타내며 필터의 가장자리로 감에 따라 속도가 감소하여 양끝 25mm 정도에서 거의 속도가 0이 된다. 이처럼 직관의 경우 필터 중심부에 속도 분포가 집중되어 필터를 전체적으로 균일하게 사용하지 못한다.

Model 2와 3의 경우 입구가 곡관의 경우에는 원심력 영향 때문에 입구에서 유동이 아래쪽으로 치우치고 축 방향

Fig. 6. Axial velocity distributions on the cross-section of 50 mm ahead the monolith

으로 이동하면서 필터의 압력손실 때문에 원주 방향의 가장 자리를 따라 위쪽으로 유동이 생기게 된다. 이러한 영향으로 최고 속도는 필터의 아랫 부분의 양쪽 가장자리에서 나타난다. 따라서 단면 속도 분포는 Fig. 6(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 마치 말발굽 모양을 하고 있다. 그러나 같은 곡관의 경우에도 축소관의 유무에 따라 속도 분포에서 조금 차이가 있다. 지름이 일정한 곡관인 Model 3경우가 축소관이 있는 Model 2의 경우에 비하여 최고 속도의 위치가 가장자리로 더 치우쳐 있으며 중심 속도분포가 크다. 이는 축소관이 곡관의 원심력을 약화시키기 때문으로 판단되며, 축방향의 단면의 속도 분포를 보면 잘 파악할 수 있다.

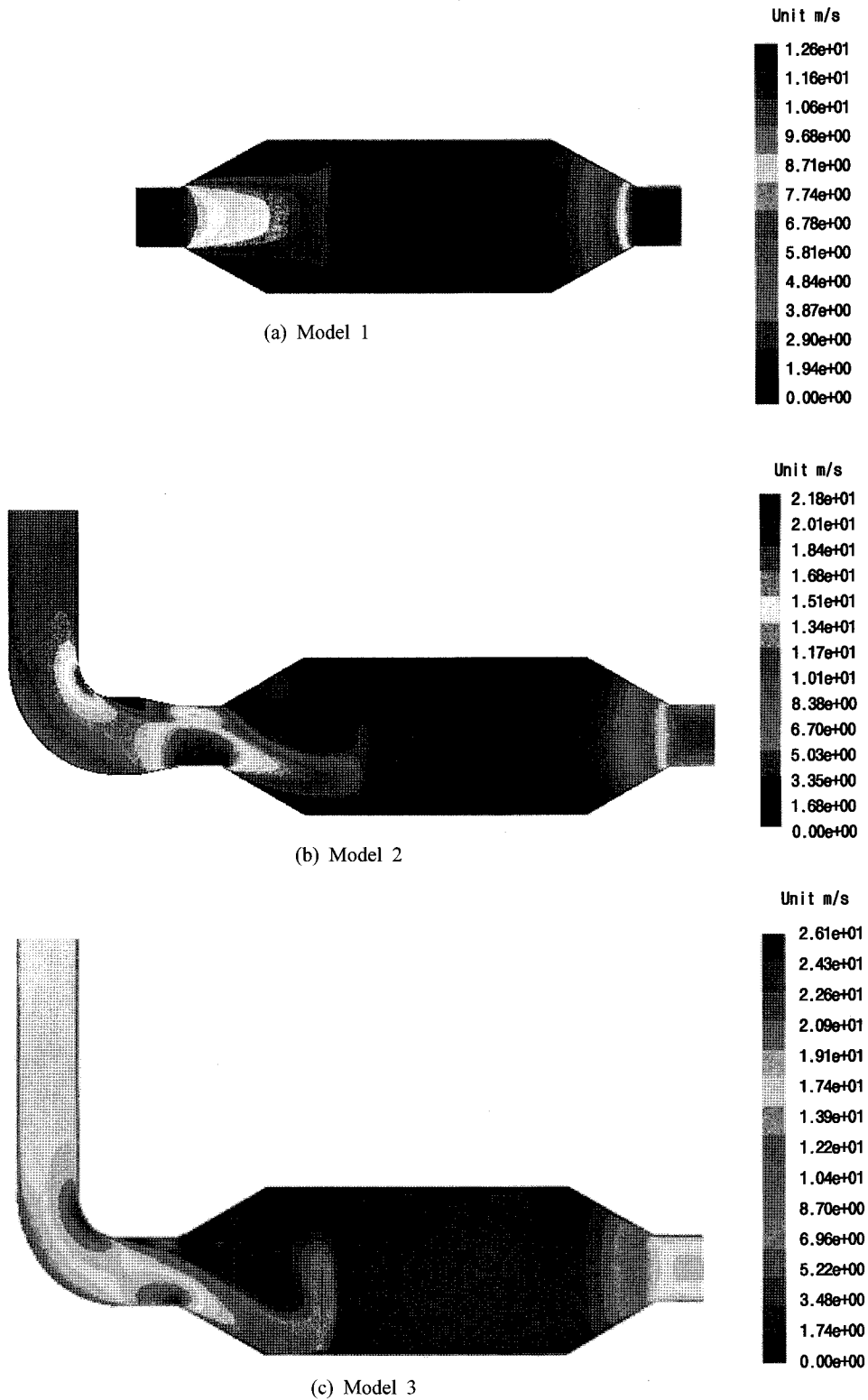
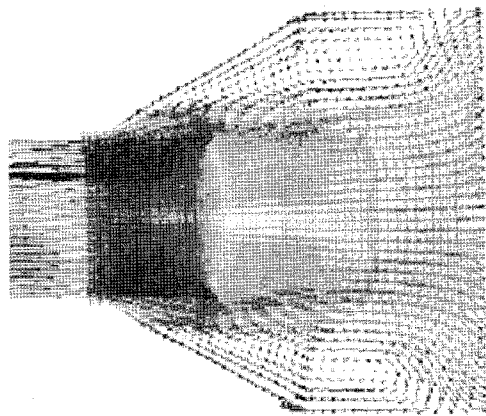


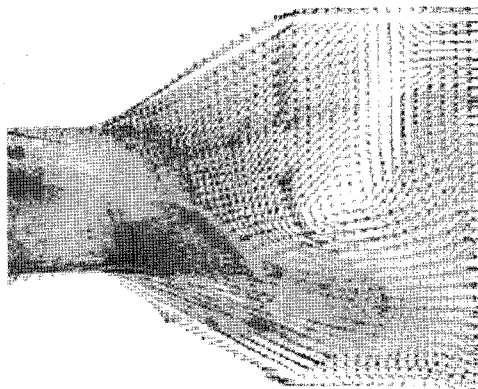
Fig. 7. Velocity distributions on the cross-section of side view

Fig. 7에는 각 모델에 대하여 축방향으로 자른 단면에서 속도 분포를 나타내었다. Model 1에서 직관에서 유입된 입구유동이 필터 내부로 제트 형상으로 발달하다가 다공성

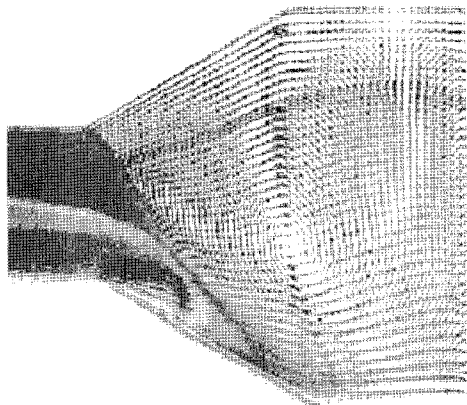
필터 내로 바로 들어가지 못하고 필터 전면에서 중심에서 가장자리로 유동이 퍼져나간다. Model 2는 곡관에서 유입된 유동이 원심력에 의해 입구에서 아래쪽으로 치우쳐서



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

Fig. 8. Vector plots of velocities on the cross-section of side view

들어온다. 그러나 축소관 때문에 원심력의 영향은 조금 줄어들었음을 알 수 있다. 이와 달리 Model 3에서는 곡관에 의한 원심력의 영향이 커서 아래 입구 벽면을 따라 Model 2보다 빠른 속도로 유입되어 아래쪽 필터 전면부에 부딪히면서 위쪽으로 유동이 발달된다. 이 때문에 Fig. 6을 보면 Model 3의 경우 속도 분포가 단면 바깥 가장 자리 근처에서 큰 값을 가지고 있으며 Model 2의 경우에는 속도가 큰 값을 가지는 단면상의 위치가 Model 3에 비해 상대

적으로 단면 중심축 방향으로 약간 안쪽으로 치우친 영역에 걸쳐 있음을 알 수 있다.

각 모델의 입구 유동을 자세히 보기 위하여 축방향으로 수직으로 자른 단면에서의 속도벡터를 Fig. 8에 나타내었다. Model 1의 경우 직관에서 유입된 배기가스가 필터 전면부에서 부딪혀 필터 가장자리로 밀려가는 것을 볼 수 있다. 필터 내부로 유입되는 배기 가스의 양은 축방향의 속도가 지배한다. 축방향 속도는 중심에서 매우 큰 반면에 필터의 가장자리에서는 축방향 속도 보다 반경방향 속도가 커서, 필터 내부로 유입되는 배기 가스의 양은 중심이 가장자리에 비해 훨씬 큼을 예측할 수 있다. Model 2와 3의 경우 곡관에서 유입된 배기 가스가 원심력의 영향으로 아래로 치우쳐서 유입되면서 아래쪽 필터 전면부에 부딪히면서 필터 입구 부분에 큰 와류를 형성한다. Model 2에 비하여 Model 3이 원심력 영향이 커서 훨씬 강한 와류를 형성하면서 유동이 아래쪽에서 위쪽으로 퍼져나간다. 필터 전면부의 축방향 유동 분포 측면에서도 원심력이 클수록 아래쪽 가장자리 부분으로 유동이 치우쳐서 균일한 유동 분포를 얻기 힘들 것이다. 또한 Model 2와 3은 Model 1에 비하여 강한 와류를 형성하기 때문에 압력 손실이 더 클 것으로 예측할 수 있다. 따라서 필터 전면부의 유동 분포를 균일하게 하기 위해서는 입구관의 형상을 좀 더 최적 할 필요가 있다.

5. 결론

1. 입구관 형상이 직관인 형상과 곡관 형상 2종류 등 3가지 형상을 모델로 하여 CFD 시뮬레이션을 하였다. 곡관 형상을 갖는 Model 2의 경우 실험 조건과 동일한 형상을 하고 있으며 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다. CFD 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하기 위하여 필터 입구로부터 축방향으로 100mm 떨어진 위치에서의 특정 반경 방향 속도 분포를 측정하였고 Model 2를 사용한 CFD 시뮬레이션 예측 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있으며 이는 본 연구에서 사용한 시뮬레이션을 위한 난류 모델 및 지배방정식의 차분법 선정이 적절함을 보여주고 있다.
2. DPF입구와 연결이 90° 곡관으로 되어 있는 Model 2와 3의 경우 곡관에서 유입된 배기 가스가 원심력의 영향으로 아래로 치우쳐서 유입되면서 아래쪽 필터 전면부에 부딪히면서 필터 입구부분에 큰 와류를 형성하며 Model 2에 비하여 Model 3이 원심력 영향이 커서 훨씬 강한 와류를 형성하면서 유동이 아래쪽에서 위쪽으로 퍼져나가는 시뮬레이션 결과를 얻었다.
3. 필터 전면부의 축방향 유동 분포 측면에서도 원심력이

클 수록 아래쪽 가장자리 부분으로 유동이 치우쳐서 균일한 유동 분포를 얻기 힘들 것으로 예측되었으며 Model 2와 3은 Model 1에 비하여 강한 와류를 형성하기 때문에 압력손실이 더 클 것으로 예측할 수 있다. 따라서 필터 전면부의 유동 분포를 균일하게 하기 위해서는 입구관의 형상의 최적화가 반드시 요구된다.

참고 문헌

1. Robert Bosch GmbH, Diesel-Engine Management(2005), 4th Ed., BENTLEY Publishers, Cambridge, USA.
2. 수도권 대기환경개선에 관한 특별법(2003), 법률제7041호.
3. 김주철, 이충훈(2007), "차대 동력계에서의 디젤 차량의 매연 측정을 위한 여지 반사식 및 광투과식 측정법의 비교 연구," 한국안전학회지, Vol. 22, No. 6, pp. 13-19.
4. U.S. Environmental Protection Agency, Summary and Analysis of Comments : Control of Emissions of Air Pollution from Locomotive Engines and Marine Compression Ignition Engines Less than 30 Liters Per Cylinder(2008), EPA420-R-08-006.
5. Tom Balon(2006), Locomotive and Marine Emission Reduction Technology Progress, Northeast Diesel Collaborative Steering Committee Meeting, MJ Bradley & Associates.
6. 조영민, 권순박, 박덕신, 정우성, 박은영, 정미영, 김세영, 임인권(2008), "SMPS와 MOUDI를 이용한 DPF가 적용된 디젤기관차의 매연배출 저감효과 분석 연구," 한국철도학회 2008년도 추계 학술대회논문집, pp. 1646-1651.
7. 조영민, 권순박, 박덕신, 정우성, 박은영, 정미영, 임인권(2007), "DPF를 이용한 디젤기관차의 입자상물질 배출저감 연구," 한국 대기환경학회 2007년 추계학술대회논문집, pp. 471-472.
8. Oesterle, J., Gaiser, G., and Zacke, P.J.(2004), "Homogeneous Loading and Regeneration of Diesel Particulate Filters using Progressive Spin Elements," SAE paper 2004-01-1424.
9. Gaiser, G., Oesterle, J., Braun, J., and Zacke, P.J.(2003), "The Progressive Spin Inlet-Homogeneous Flow Distributions Under Stringent Conditions," SAE paper 2003-01-0840.
10. 이충훈, 최웅, 배상홍, 이수룡(2007), "디젤 엔진 매연여과장치 입출구에서의 유속 분포 측정," 한국철도학회 논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 343-349.
11. 이충훈, 배상홍, 최웅, 이수룡(2007), "측정자동화에 의한 입구 연결부 형상이 L-형인 디젤매연필터 입-출구에서의 유속 분포에 관한 연구," 한국공작기계학회논문집, Vol. 16, No. 4, pp. 93-100.
12. Suhas V. Patankar(1980), "Numerical heat transfer and fluid flow."
13. Konstandopoulous, A.G. et al.(1999), "Optimized filter design and selection criteria for continuously regenerating diesel particulate trap," SAE paper 1999-01-0468.
14. STAR-CD Ver. 3.22 User guide (2006).
15. Konstandopoulos, A.G., Skaperdas, E., and Masou, M.(2001), "Inertial contributions to the pressure drop of diesel particulate filters," SAE paper 2001-01-0909.

접수일(2008년 12월 22일), 수정일(2009년 3월 23일),
 게재확정일(2009년 8월 3일)