

측정자동화에 의한 입구연결부 형상이 L-형인 디젤매연필터 입·출구에서의 유속 분포에 관한 연구

이충훈*, 배상홍⁺, 최 응⁺, 이수룡⁺
(논문접수일 2007. 4. 26, 심사완료일 2007. 5. 29)

A Study on Flow Velocity Distribution at Inlet and Exit of Diesel Particulate Filter with L-Shape Inlet Connector Using Automatic Measurement

Choong Hoon Lee*, Sang Hong Bae⁺, Ung Choi⁺, Su-Ryong Lee⁺

Abstract

The flow velocity distribution at inlet and exit of Diesel Particulate Filter(DPF) by fabricating L-shape connector with the DPF was measured using a Pitot-tube and 2-D transverse machine. An adaptor designed for making the Pitot tube probe access to the inlet and exit of the DPF was connected with the inlet and exit flange of the DPF, respectively. The Pitot tube which was mounted in the 2-D positioning machine could access to the inlet and exit of the DPF through the rectangular window of the adaptor. The L-shape connector in the DPF inlet has a flow guide which is a perforated steel pipe. The flow velocity distribution at the inlet of the DPF showed a chaotic velocity distribution which is different from that with a diffuser type connector. The velocity distribution at the exit of the DPF showed a crown shape which is similar to that of the diffuser type connector. The velocity distribution at the exit of DPF showed different patterns according to the air flow rate.

Key Words : Diesel Particulate Filter(디젤매연여과장치), Flow Velocity Distribution(유속 분포), Pitot Tube(피토관), Automatic Measurement(자동 측정), ISA 1932 Flow Nozzle(ISA1932 플로우노즐)

1. 서론

환경 규제 강화로 인해 시판되는 디젤 차량에 매연 저감

필터(DPF)를 부착하는 것이 최근의 추세이다. DPF의 가장 핵심적인 부분은 DPF 재생 기술이다. 일반적으로 엔진의 배기압이 기준값 이상이 되면 DPF의 재생이 시작되며 보통

* 서울산업대학교 자동차학과 (chlee5@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
⁺ 서울산업대학교 자동차공학과

DPF 세라믹 필터에 축적된 매연을 태워 없애 배압이 일정 수준 이하로 떨어지면 재생을 중단하게 된다. 재생과정에서 세라믹 필터의 국부적인 과열은 필터의 손상을 가져올 수 있다. 국부적인 과열은 매연이 세라믹 필터 내에 균등하게 축적되지 못하고 특정 부분에 집중적으로 축적되어서 일어날 수 있다. 매연의 세라믹 필터 내의 균등한 축적은 이러한 국부적 과열을 피할 수 있다. 따라서 세라믹 필터 내의 매연 축적 특성을 파악하기 위해 DPF 입·출구에서의 속도 분포 특성을 파악 것이 매우 중요하며, 속도 분포를 측정함으로써 필터 내의 매연 축적이 한 곳으로 치우치지 않고 균등하게 분포하는지를 예측할 수 있다. 즉, DPF 내의 속도 분포가 매연 필터 단면에 걸쳐 균일하여야 매연이 필터 내에 고르게 축적되어 재생시 필터의 국소 과열에 의한 파손을 예방할 수 있다. DPF 유동 특성과 관련하여 DPF 내에서의 유동 분포를 균일하게 하기 위한 부가 장치 연구^(1,2), DPF 내의 매연 축적, 필터 재생, 가시화, 정상 유동 분포 등의 연구⁽³⁻⁹⁾가 진행되었다. DPF 입·출구에서의 유속 측정과 관련된 연구는 Choi 등⁽¹⁰⁾에 의해 이루어진 바가 있는데, DPF의 입구와 연결되는 커넥터 형상이 디퓨저(diffuser)형 경우에 대해서 속도 분포를 측정하였다. Choi 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 DPF 입구에서의 속도 분포는 중심부가 속도가 높고 반경 바깥 방향으로 갈수록 낮은 속도 분포를 나타내었고, DPF 출구에서는 필터 출구 외주부의 속도가 높게 측정되었고 중심부 속도는 상대적으로 낮게 나타났다. DPF 입구 연결부로 디퓨저형을 사용할 경우 매연 필터에서의 매연 축적이 불균일할 수 있고 이를 개선하기 위한 연구로 DPF 입구 연결부를 L-형으로 설계하고 실험 조건을 여러 가지 조건으로 변경하면서 DPF 입구 및 출구에

서의 속도 분포를 측정하고 그 특성을 파악하였으며 입·출구에서의 속도 분포 균일성이 개선되었는지를 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

DPF 입·출구에서의 유속 측정 시스템은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 블로어, 바이패스밸브, ISA-1932 플로우노즐, 피토펠 2차원 이송장치, 측정 자동화를 위한 피토펠 마운트 어댑터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 DPF는 재생 방식이 전기히터를 사용하는 강제 재생 방식을 취하고 있다. 블로어는 초당 최대 0.16kg 정도의 공기를 공급할 수 있다. 이송 장치는 두개의 스텝모터와 볼스크류-LM 가이드를 결합하여 2차원 이송이 가능하도록 하였으며 컴퓨터에 DAQ 보드를 장착하고 DAQ 보드의 디지털 입출력 포트를 통해 모터드라이브에 제어신호를 보내 제어 하였다. 이차원 이송 장치의 위치 제어를 자동화함으로써 유속 측정의 자동화가 가능하였다. 블로어로부터 DPF에 공급되는 공기 유량을 측정하기 위해서 ISA 1932 플로우 노즐을 제작하여 사용하였으며 플로우 노즐 전후의 차압을 측정하기 위해 차압센서를 검정하여 사용하였다. 또한 플로우 노즐 입구에서의 압력을 측정하여 압력 보정에 사용하였다. 온도 보정을 위해 플로우 노즐에 흐르는 공기의 온도를 동시에 측정하였다. 측정된 차압, 온도, 공기의 물성치 등을 이용하여 플로우 노즐을 지나는 공기유량을 계산할 수 있다. 흡입공기질량은 한국 공업 규격 조임 기구에 의한 유량 측정 방법 KSA 0612⁽¹¹⁾에 의거 식 (1)로 계산하였다.

$$G_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho_1} \quad (1)$$

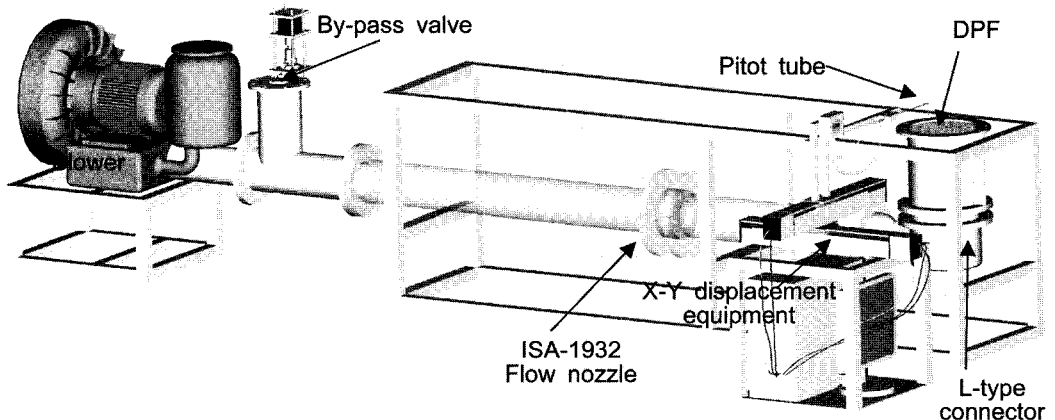


Fig. 1 Experimental setup

$$C = 0.99 - 0.2262\beta^{4.1} - (0.00175\beta^2 - 0.033\beta^{4.15}) \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{1.15}$$

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{K\tau^{\frac{2}{K}}}{K-1} \right) \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{\frac{2}{K}}} \right) \left(\frac{1-\tau^{\frac{K-1}{K}}}{1-\tau} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서,

- C : 유출계수
- β : 노즐 직경비 d/D
- ε : 기체 팽창 보정 계수
- K : 비열비
- ρ_1 : 플로우 노즐 상류쪽 밀도
- τ : 노즐 하류/상류 압력비 P_2/P_1 이다.

X-Y 이송 장치 제어, 온도 측정, ISA-1932 플로우 노즐 차압 측정, 피토관에서의 차압 측정, 플로우 노즐 입구에서의 압력 측정 등을 위해 DAQ보드와 컴퓨터를 사용하였다.

3. 결과 및 검토

Fig. 2는 L-형 연결부, 피토관 액세스 어댑터, DPF 등이 조립된 상태를 보여주고 있다. L-형 연결부는 블로어로부터 공급되는 공기를 DPF 입구로 보내는 역할을 하며 좌측 상단의 사진은 L-형 연결부 내부 구조를 보여 주고 있다. L-형 연결부 내부 구조를 보면 사진의 좌측으로부터 공기가 공급되며 구멍이 뚫린 유동가이드 파이프를 통해 공기가 제트 형태로 DPF 필터 입구로 공급된다. 피토관 액세스 어댑터는 피토관을 DPF 장치 안쪽까지 접근이 가능하도록 하며 LM-가이드와 피토관을 결합한 상태에서 X-Y 이송장치에 의해

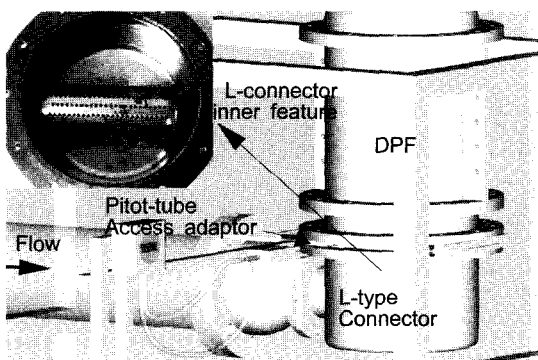


Fig. 2 Experimental Setup for measuring velocity distribution of gas flow at the DPF entrance(L-type)

피토관이 자동으로 이송되면서 DPF 입구 내부의 공기의 유속 측정이 가능하도록 하였다. Fig. 2와 같은 위치에 피토관 액세스 어댑터가 조립되면 피토관의 끝단부가 L-형 연결부 상단 위치에서의 유속 분포를 측정하게 된다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 실험 장치를 구성하고 DPF 입구에서의 X-Y 위치를 바꾸어 가면서 측정한 유속 분포를 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는, 각각 바이패스밸브 개폐량을 제어하면서 공기 질량 유량이 각각 0.09, 0.12, 0.16kg/s로 유지한 경우에 대해서, 이송 장치로 측정 위치를 바꾸어 가면서 측정한 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 유속 분포 특성은 유사한 경향을 보이고 있으며 단지 공급 공기 유량의 점점 증가함으로 인해 유속이 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 차례로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 속도 분포를 나타낸 것은 L-형 연결부의 내부 구조(Fig. 2 사진 참조)와 관련이 있다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 L-형 연결부 내부에 유동 가이드 파이프가 있고 파이프 외주면에 작은 구멍이 여러 개 뚫은 형태를 취하고 있어 가이드 파이프 주변부를 따라 유속이 높게 나타났고 특히, 유동 가이드 파이프 끝단부 근처에서 유속이 높게 나타났는데 이는 주 유동(main stream)의 방향이 x- 방향이고 x-방향 유동 관성으로 인해 상대적으로 유속이 가장 크게 나타났으며 이러한 결과는 기존의 일반

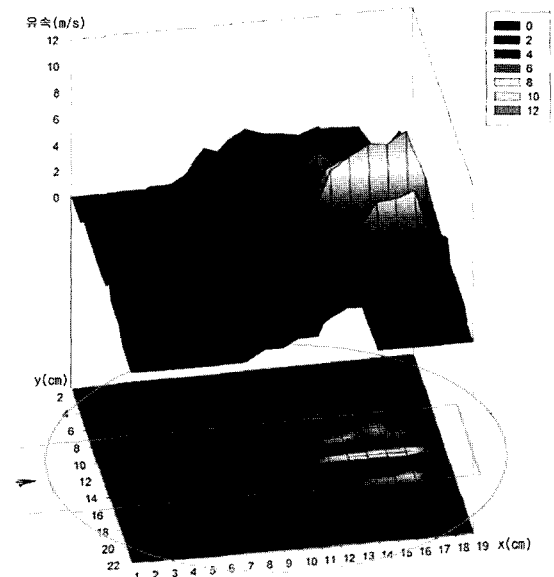


Fig. 3 Velocity distribution at the inlet of DPF with mass flow rate of 0.09kg/s

적인 DPF 입구 연결부를 조립하였을 때의 속도 분포와는 다른 형태를 보이고 있다. 일반적인 DPF 필터 입구 연결부 형상은 디퓨저형(diffuser)을 많이 사용하고 있으며 디퓨저형 연

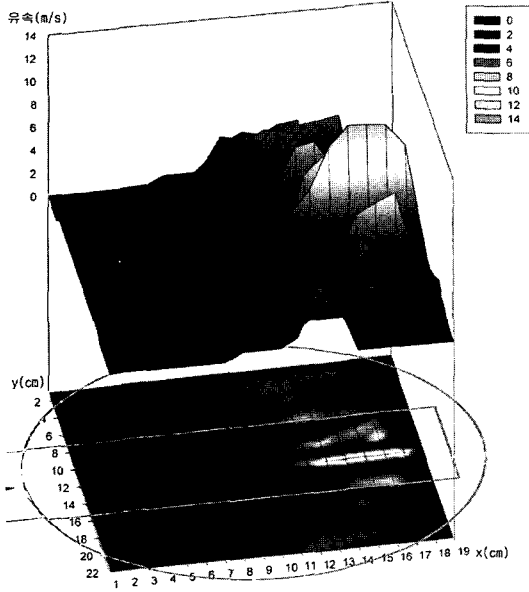


Fig. 4 Velocity distribution at the inlet of DPF with mass flow rate of 0.12 kg/s

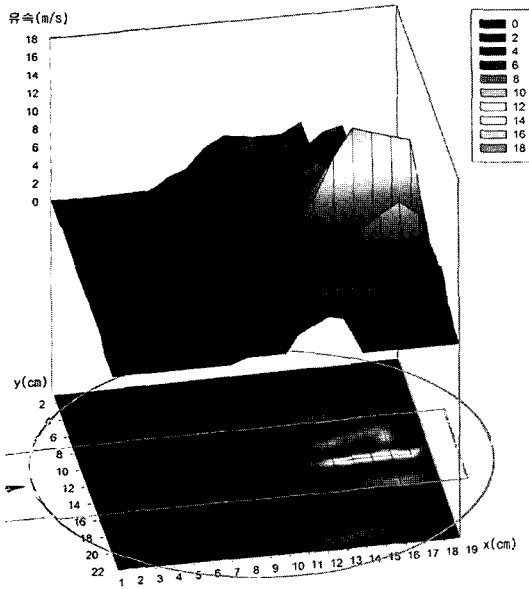
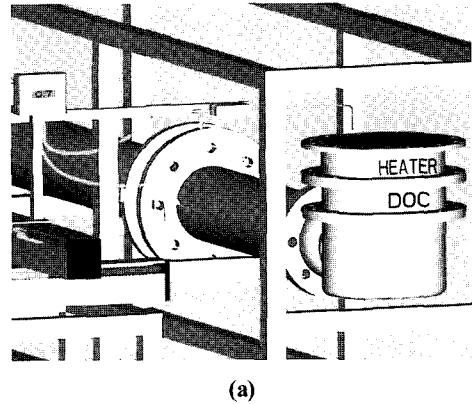


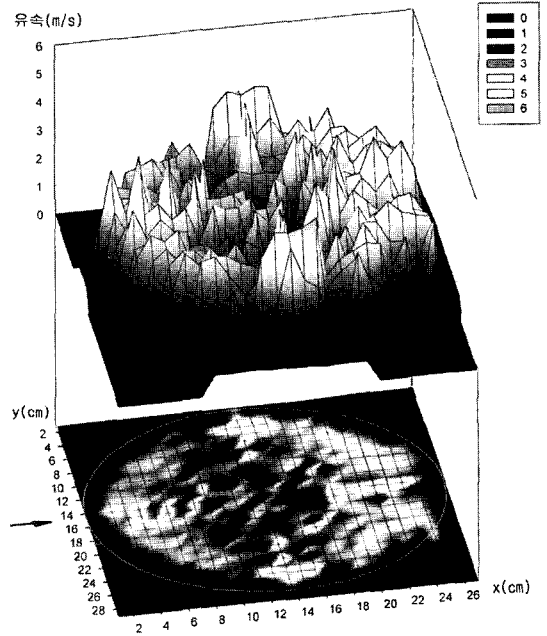
Fig. 5 Velocity distribution at the inlet of DPF with mass flow rate of 0.16kg/s

결부를 사용하였을 때의 DPF 필터 입구 속도 분포는 유동 단면의 중심부에서는 속도가 크고 반경 방향으로 갈수록 속도가 줄어들어 포물선 형태의 속도 분포를 나타낸다⁽¹⁰⁾.

Fig. 6 (a)에 나타낸 것과 같이 디젤배기가스의 NOx를 제거하기 위한 디젤산화촉매장치(DOC: diesel oxidation catalyst)와 전기히터부를 L-형 연결부에 탑재하고 DPF는 탈거한 조건에서, 피토크를 X-Y 자동 이송을 하면서 측정한다



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Measurement setup and (b) result of the velocity distribution at the heater exit(mass flow rate=0.16kg/s)

속도 분포를 Fig. 6 (b)에 나타내었다. 이 때 공기 유량은 0.16 kg/s로 제어하였다. DPF를 탈거한 조건에서 피토관 어댑터가 없이 피토관을 X-Y 이송 장치에 직접 연결하여 이송하였기 때문에 보다 더 넓은 X-Y 측정 범위를 포함하고 있다. Fig. 6 (b)의 속도 분포가 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 결과에 비해 유속이 분포가 균일하게 나타났는데 이는 DOC와 전기히터의 구조와 관련이 있는데 DOC의 경우 하니컴 구조를 하고 있고 전기히터는 전열판이 주름 형태(wrinkled)로 말려 있기 때문에 유동의 균일화에 도움이 된다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 유속 분포와 비교하면 상당히 균일화 되었으나 유동 단면 중심부의 속도 분포는 원주 주변부에 여전히 상대적으로 작은 값을 가지고 있다. 또한 x-방향 끝단부(유동 가이드 끝부분)는 여전히 다른 위치에 비해 속도가 상대적으로 높게 측정되었으며 이는 앞서 설명한 x-방향 유동의 관성효과가 여전히 작용함을 의미한다.

Fig. 7은 Fig. 6 (a) 실험 조건에 추가로 DPF와 피토관 액세스 어댑터를 조립한 조건에서 피토관을 이송하면서 유속 분포를 측정할 수 있도록 한 실험 장치 구성을 나타낸 것이다. Fig. 7과 같이 실험 조건을 구성하고 공급 공기량을 제어하면서 유속 분포를 측정된 결과를 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 나타내었으며 바이패스 밸브 개폐를 제어하면서 블로어로부터 공급되는 공기량을 각각 0.09kg/s, 0.12kg/s, 0.16kg/s로 조절한 조건에서 유속 분포 측정 결과를 나타낸 것이다. 유속 분포가 불균일한 특성을 보이고 있으나 공기질량 유량이 0.09, 0.12, 0.16kg/s와 같이 점점 증가할수록 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 하단면에 나타난 유속의 분포를 보면 알 수 있듯이

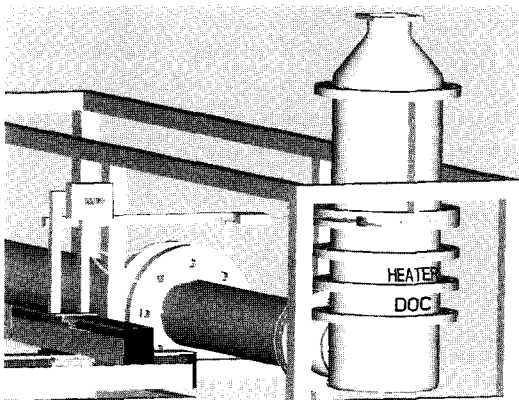


Fig. 7 Experimental Setup for measuring velocity distribution of gas flow at the heater exit(mass flow rate=0.1588kg/s)

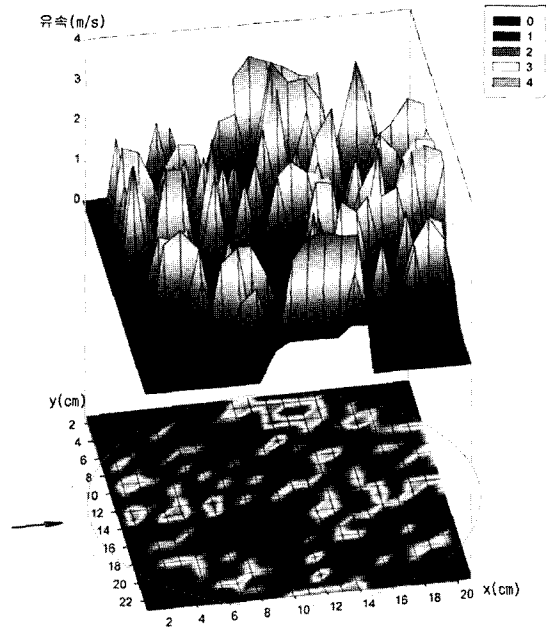


Fig. 8 Velocity distribution at the heater exit of DPF with mounting DPF on the electric heater at mass flow rate of 0.09 kg/s

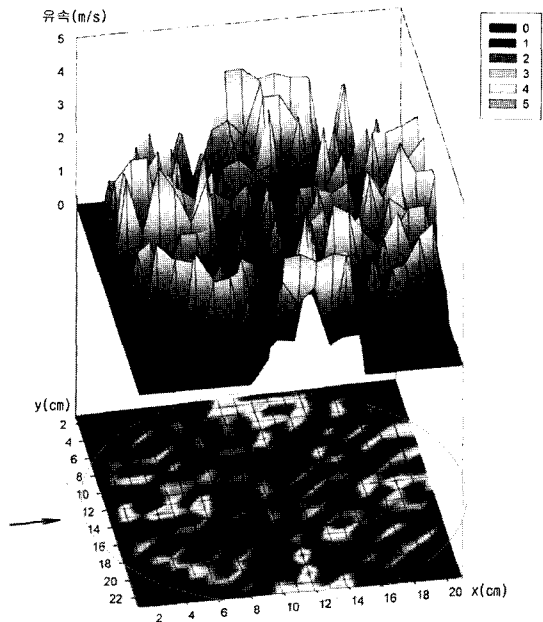


Fig. 9 Velocity distribution at the heater exit of DPF with mounting DPF on the electric heater at mass flow rate of 0.12kg/s

점점 균일한 경향을 보이고 있다. 이러한 L-형 연결부의 DPF 입구에서의 속도 분포는 디퓨저형⁽⁹⁾보다 균일한 속도 분포를 나타내고 있다. 또한 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 DPF를 탈거한 조건에서 측정된 결과와 비교하여 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 유속 분포는 상대적으로 불규칙한(random) 경향을 보이고 있다. Fig. 6을 보면 유동 단면 외주부 근처에서 유속이 높게 나타나 상대적으로 유속의 불균일성이 크게 나타났다. 이는 DPF를 덮음(Fig. 7의 조건)으로 인해 유동 저항이 증대되고 이로 인해 유동의 균일화가 촉진되는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 DPF를 조립하고 DPF 출구부의 리듀서(reducer)를 탈거한 상태에서 유속 분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 DPF 입구의 랜덤한 속도 분포와 비교해 DPF를 통과한 공기의 유속 분포는 상대적으로 균일화되었음을 알 수 있으며 이때의 공급 공기량은 0.16kg/s를 유지하였다. Fig. 11을 보면 유동 단면중심부 속도 분포가 원주부의 속도 분포에 비해 상대적으로 작은 값을 보이고 있으며 이는 디퓨저형을 입구 연결부를 결합하여 측정된 DPF 출구 분포와 유사한 결과⁽⁹⁾를 보이고 있다. 이와 같이 L-형과 디퓨저형 연결부를 각각 조립하였을 때 DPF

출구 유속 분포가 유사한 것은 주목할 만하다. 즉, DPF 입구 연결부 디퓨저형, L형을 연결하였을 때 각각의 DPF 입구 유속 분포가 다르게 나타났으나 DPF 출구에서의 유속 분포는 유사한 패턴을 보이고 있다. 이것은 DPF 입구 유속 분포보다는 DPF 매연 필터의 내부 유동에 의한 압력 손실이 DPF 출구에서의 유속 분포에 더 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. DPF 필터 내부 구조에 의한 압력 손실과 관련하여서는 Konstandopoulos⁽⁸⁾가 연구를 수행하였다. 즉, Darcy 항과 Forchheimer 항으로 표현되는 필터 벽면에서의 압력손실, 층류 유동으로 모사할 수 있는 사각형 채널 단면의 축방향 유동에 의한 압력손실, 필터 입출구 각각에서의 축소 및 팽창에

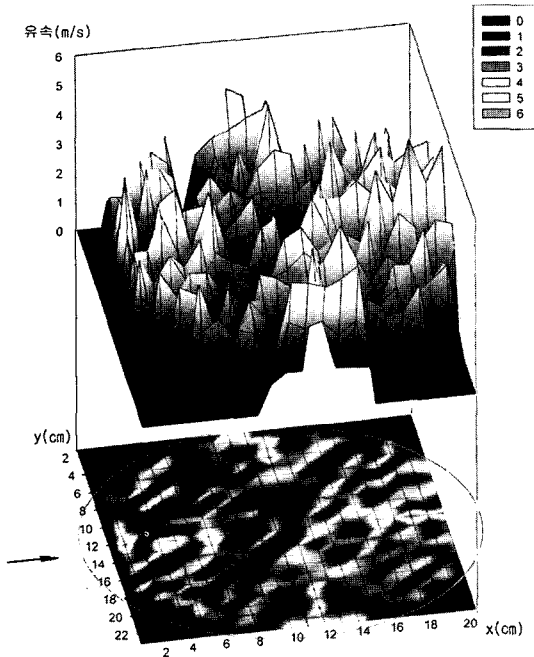


Fig. 10 Velocity distribution at the heater exit of DPF with mounting DPF on the electric heater at mass flow rate of 0.16kg/s

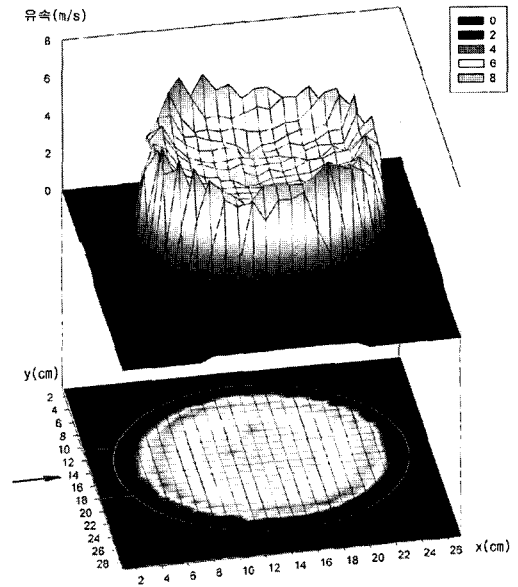
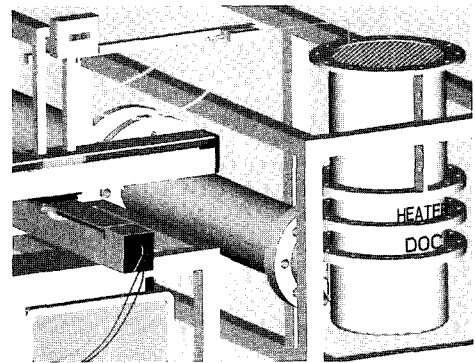


Fig. 11 Experimental setup for measuring velocity distribution of gas flow at the filter exit with mass flow rate of 0.16kg/s

의한 관성 압력손실 등의 3개항이며, 첫 번째항 두 번째 항은 필터 내의 압력 손실과 관련된 항이다. Fig. 11에서 필터출구 외주부 속도가 중심부에 비해 상대적으로 크게 나타난 것은 Darcy와 Forchheimer항과 관련된 반경 방향 압력 손실이 크지 않아 필터 반경 방향으로 유동이 잘 흐르고 필터 외주면은 막혀 있으므로 필터 외주면 약간 안쪽의 유속 분포가 상대적

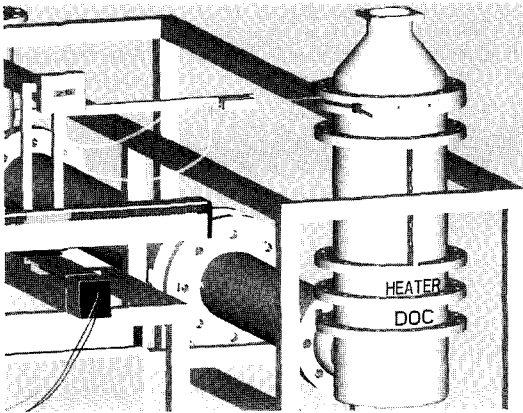


Fig. 12 Experimental setup for measuring velocity distribution of gas flow at the filter exit

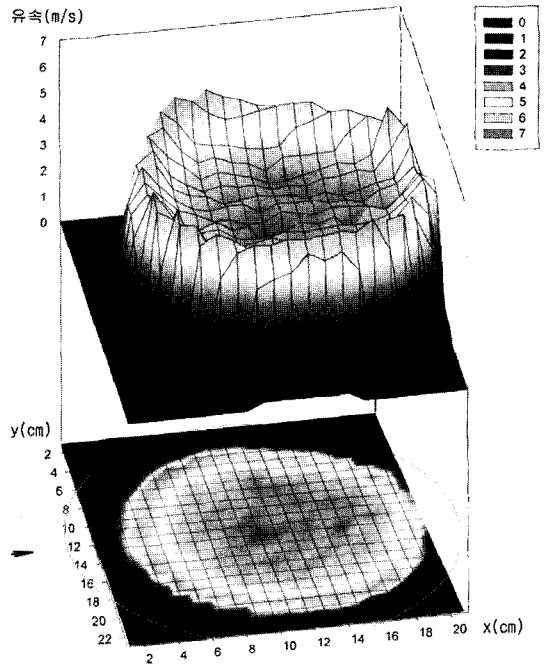


Fig. 14 Velocity distribution at the filter exit of DPF with mass flow rate of 0.12kg/s

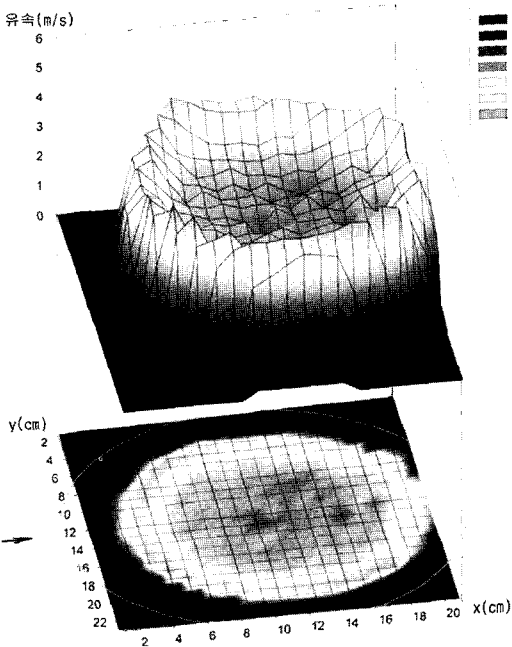


Fig. 13 Velocity distribution at the filter exit of DPF with mass flow rate of 0.09kg/s

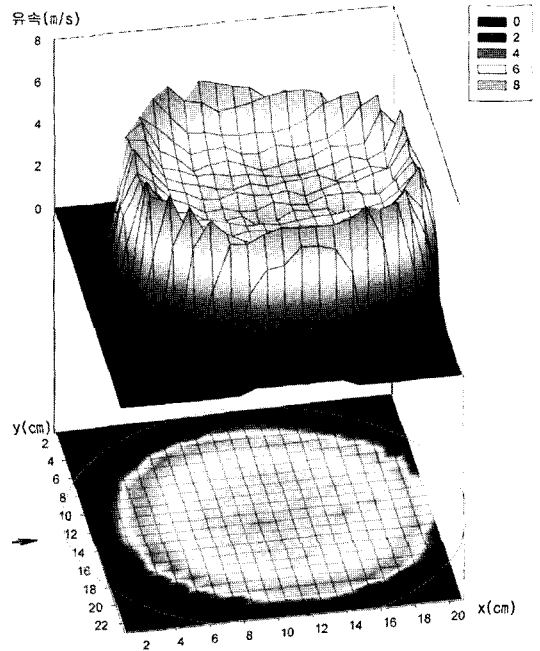


Fig. 15 Velocity distribution at the filter exit of DPF with mass flow rate of 0.16kg/s

으로 크게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 DPF 출구부에 피토판 액세스 어댑터와 리듀서를 조립하고 DPF 출구에서의 속도 분포를 측정하는 조건을 나타낸 것이며, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15는 각각 공급 공기유량을 0.09kg/s, 0.12kg/s, 0.16kg/s 유지하였을 때의 유속 분포를 나타낸 것이다. Fig. 11의 DPF 리듀서를 탈거한 조건에서의 유속 패턴과 유사한 경향을 보이고 있으며 이러한 유속 분포를 보이는 이유도 Fig. 11의 결과 해석과 유사하게 설명할 수 있다. 공기 공급 질량을 0.09kg/s, 0.12kg/s, 0.16 kg/s와 같이 차례로 증가시키면서 나타난 유속 분포는 점점 균일화 되는 경향을 보이고 있다. 공급 공기유량이 증가함에 따라서 유동 단면의 중심부 속도가 점점 증가하여 전체적으로 유속 분포가 균일화 되는 경향을 보이고 있다. 이러한 DPF 출구에서의 유속 분포는 DPF를 지나가는 유량의 크기에 DPF 필터 내부에서의 유속 패턴이 달라질 수 있음을 의미하며, 실제 디젤엔진에 DPF를 장착하였을 때 필터 내의 매연 축적 패턴도 엔진 운전 조건에 의해 크게 영향을 받을 수 있음을 의미한다.

4. 결론

- (1) L-형 DPF 입구 연결부와 피토판 액세스 어댑터를 사용하여 DPF 입·출구 여러 조건에서 속도 분포를 자동 측정하였다. L-형 DPF 입구 연결부를 사용하였을 때의 DPF 입구 유동 단면에서의 속도 분포는 DOC와 전기히터를 통과하면서 균일화 되었다.
- (2) L-형 연결부를 사용하였을 때의 DPF 출구에서는 유동 단면의 중심부의 속도가 외주부의 속도보다 상대적으로 큰 속도 분포를 보였으며 공기 유량이 증가함에 따라 유동단면에서의 속도 분포의 균일화가 촉진되었다. 이러한 DPF 출구에서의 유속 분포는 DPF를 통과하는 유량의 크기에 DPF 필터 내부에서의 유속 패턴이 달라질 수 있음을 의미한다.

후 기

본 연구는 환경부에서 시행한 무·저공해자동차사업 연구 결과의 일부이며, 연구비 지원에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Nagata, M. and Banno, Y., 2002, "Observation of Soot Accumulation Conditions in Diesel Particulate

Filter and Gas Flow Analysis," *SAE paper* 2002-01-1013.

- (2) Bhatia, G. and Gunasekaran, N., 2003, "Heat-Up of Diesel Particulate Filters: 2D Continuum Modeling and Experimental Results," *SAE paper* 2003-01-0837.
- (3) Konstandopoulos, A. G. and Skaperdas, E., 2002, "Microstructural Properties of Soot Deposits in Diesel Particulate Traps Aerosol & Particle Technology Laboratory," *SAE paper* 2002-01-1015.
- (4) Millet, C. N, Mazzi, P. and Martin, B., 2002, "Modeling of Diesel Particulate Filter Regeneration: Effect of Fuel-Borne Catalyst," *SAE paper*, 2002-01-2786.
- (5) Gaiser, G. and Mucha, J. P., 2004, "Prediction of Pressure Drop in Diesel Particulate Filters Considering Ash Deposit and artrial Regenerations," *SAE paper* 2004-01-0158, 2004.
- (6) Masour, M. and Heibel A., 2000, "Predicting Pressure Drop of Wall-Flow Diesel Particulate Filters - Theory and Experiment," *SAE paper* 2000-01-0184.
- (7) Masoudi, M. R. and Klement, J., 2004, "Soot Distribution in DPF Systems. A Simple and Cost Effective Measurement Method for Series Development," *SAE paper* 2004-01-1432.
- (8) Konstandopoulos, A. G, 2004, "Flow Resistance Descriptors for Diesel Particulate Filters: Definitions, Measurements and Testing," *SAE paper* 2003-01-0846.
- (9) Choi, U., Lee, C. H., Bae, S. H. and Lee, S. R., 2006, "A Study on Measurement of Flow Velocity Distribution at Inlet and Exit of Diesel Particulate Filter," *Fall Conference Proceedings, Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 1, pp. 418-422.
- (10) Kim, D. Y., Han, Y. C. and Park, B. K., 2006, "A Study on the Steady Flow Characteristics by PDA and Tumble Control Valve in Combustion Chamber," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 74-82.
- (11) *Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full*, 1997, Korea Standard, A 0612.