

모노리스 촉매담체내의 유체유동에 관한 실험적 연구

최희탁* · 목재균** · 이은호** · 유재석 · 이종화

아주대학교 기계공학과, *대우중공업, **아주대학교 대학원 기계공학과

An Experimental Study on the Fluid Flow in Monolithic Catalyst Supports

Hee Tak Choi*, Jae Kyun Mok**, Eun Ho Lee**, Jae Seock Yoo and Jong Wha Lee

Department of Mechanical Engineering Ajou University, *Daewoo Heavy Industry Co.

**Department of Mechanical Engineering graduate school, Ajou University

요 약

촉매변환기용 모노리스에서의 속도변화에 따른 압력강하를 알아보기 위하여 풍동을 제작하여 실험하였다. 200 cpsi, 300 cpsi와 400 cpsi의 모노리스 담체에 대한 압력강하를 측정하였고, 듀얼베드 형태에서의 압력강하를 알아보기 위하여 200 cpsi, 300 cpsi와 400 cpsi들 중 두개씩 조합하여 두 모노리스 담체의 사이 간격을 변화시켜가면서 압력강하를 측정하였다. 또한 많이 사용되고 있는 촉매가 담지된 400 cpsi의 모노리스를 이용하여 촉매 담지에 대한 유동의 영향을 살펴보았다. 모노리스 상·하류간의 압력강하는 공극율에 상관없이 공기와 유로벽과의 접촉면적에 따라 증가한다. 실험 결과로부터 제안된 상관관계를 사용하여 모노리스 형상에 따른 압력강하를 근사적으로 예측할 수 있다. 듀얼베드 형태에서의 압력강하는 상류부와 하류부의 개별적인 모노리스의 압력강하와 두 모노리스 사이에서의 압력강하의 합으로 볼 수 있는데, 두 모노리스 사이에서의 압력강하는 무시할 만 하였다. 따라서 듀얼베드 형태의 전체적인 압력강하는 상류부와 하류부의 개별적인 모노리스에서 생기는 압력강하만의 합으로 구할 수 있다. 촉매가 담지되지 않은 모노리스의 측정결과로부터 제안된 상관관계를 촉매가 담지된 모노리스의 압력강하를 예측하는데 사용하기 위해서는 모노리스 길이를 원래길이의 1.25배로 수정하여 사용하여야 한다.

Abstract—In this study, the fluid friction in the monolith was studied experimentally. The pressure drop was measured for various velocities and lengths in single-monoliths of 200 cpsi, 300 cpsi, and 400 cpsi. And to study the fluid friction in the dual bed type, combinations of three different kinds of equal length monoliths (200 cpsi, 300 cpsi, and 400 cpsi) were used and the spacing between two monoliths were varied from 12 mm to 32 mm. Finally the pressure drops in the widely used catalyst-loaded 400 cpsi monolith were measured and compared with the results of the unloaded one. The pressure drop between the upstream and the downstream in a monolith increased as the contact area of the air and the surrounding walls increases, but is independent of the porosity of the monolith. The pressure drop in the various scales of monolith can be predicted approximately by the proposed correlation from the above results. In a dual-bed type, the pressure drop is a sum of the pressure drop of two monoliths of the upstream and the downstream, and the pressure drop occurring in the space between the two monolith themselves. However the pressure drop occurring in the space between the two monoliths is negligible. The pressure drop in the catalyst-loaded monolith is larger than that of the unloaded one due to the catalyst layer. Therefore, for prediction of pressure drop in catalyst-loaded monolith from the proposed correlation, corrected length should be used. Corrected length is equal to 1.25 times of the actual length of the monolith.

1. 서 론

대도시에서의 교통량 급증으로 자동차 배기가스에 의한 대기의 오염은 날로 심각해지고 있다. 자동차가 대기 오염의 한 근원으로 주목 받기 시작한 것은 1940년초 미국 LA의 극심한 스모그발생의 원인을 찾기 시작하면서 부터이다. 이후 이는 자동차 배기가스 중의 미연탄화수소 및 질소산화물에 의한 광화학 스모그인 것이 밝혀지고 이에 따라 1966년 캘리포니아주에서 자동차 배기가스의 규제가 시작되었다. 국내에서도 1977년 환경 보호법이 제정되면서 자동차 배기가스의 규제가 시작되었고 1987년 7월부터 국내 자동차 배기가스의 규제가 크게 강화되었다.

이에따라 선진국에서는 배기가스의 공해대책에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 그 중에서도 후처리방식인 촉매반응 변환방식은 1977년 Volvo사에 의하여 처음으로 실용화된 이래 계속 사용되어 왔다. 자동차용 촉매변환기(catalytic converter)는 가솔린엔진의 미연소 배기가스의 성분중 유해한 CO, HC와 NO_x 등의 성분을 무해한 CO₂, H₂O와 N₂ 등으로 산화·환원 시키는 역할을 하는 것으로 담체의 모양에 따라 모노리스(monolith)형과 펠렛(pellet)형으로 나누어진다. 모노리스형은 촉매가 담지된 긴 유폴관을 배기가스가 지나가면서 화학반응이 일어나며, 펠렛형은 촉매가 묻혀진 알갱이사이로 배기가스가 지나가면서 반응이 일어나므로 펠렛형에서의 압력강하가 모노리스형에서 보다 크다.

촉매변환기의 주된 역할은 촉매에 의한 화학적 반응이지만, 이 화학적 반응은 유체의 유동상태에 따라 크게 영향을 받는다. 즉, 화학적 현상과 유체역학적 현상은 매우 복잡하고 상호 영향을 미친다. 유체역학적 관점에서는 촉매변환기의 열응력에 대한 수명과 반응에 대한 신뢰성의 향상을 위하여 모노리스 내부 유동에서의 압력강하, 모노리스로 배기가스가 유입될 때의 유동상태 그리고 유입관(canister)에서의 유동 균일화에 중점을 두고 있으며, 다른 한편으로 냉시동 및 급가속에 따른 모노리스 입구에서의 비정상적인 유체유동과 성분농도상태에 기인하는 국부적 과열문제를 해결하려는 것에 중점을 두고 있다. 특히 유동에 관련된 문제에서 압력강하의 크기는 엔진의 출력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유입관 형상, 모노리스 담체의 형상 및 길이 등을 포함하는 다양한 조건에 대하여 그 개선방안을 모색하고 있다. 그러나 영향을 주는 인자가 다양한 만큼 이미 발표된 연구의 실험조건도 다양하므로 모든 조건에 대하여 상대적 크기를 산정하여 실험을 하거나 그 실험결과를 실제문제에 그대로 적용하는 데는 어려움이 따른다.

기존의 촉매변환기내의 유체유동에 대한 연구는 수치

적 연구와 실험적 연구로 나누어 볼 수 있다. 수치적 연구에서는 주로 변환기의 입구형상과 출구의 형상을 변화시켜가며 유체역학적인 속도분포나 압력강하 등에 대하여 연구하였다¹⁻⁶. 한편 실험적인 연구로서 Howitt와 Sekella⁸는 원추형 확대 입구 및 축소 출구를 가지는 원형단면의 모노리스형 담체의 유입관 내부유동을 열선유속계를 사용하여 측정하였다. 여기에서는 유입관 중심에서 멀어질수록 속도가 감소하는 것을 보여주었다. Lemme와 Given⁷은 유입관과 유출관의 단면을 원추형, 반구형 또는 사각으로 바꾸어 가면서 단일 모노리스(single-brick)를 사용한 촉매변환기의 속도분포를 피토(pitot)관을 이용하여 측정하였다. 이 논문의 결과에 따르면 속도분포는 입구 및 출구의 단면모양에 대하여 변화가 없으며, 원추형 유입관(diffuser cone)의 확대(divergence)되는 점에서 박리가 일어나고 박리된 지역에서의 깃털모양의 유동과 주유동이 모노리스의 면에서 만나게 된다. 박리로 인한 2차유동의 영향으로 중심에서부터 먼 곳과 중심 부근에서의 속도 및 압력강하에 대한 차이가 매우 크다는 것을 보여 주었다. 이를 억제하기 위하여 중앙부에 확대깃(diffuser)을 설치하였으나 오히려 확대깃에 의한 후류때문에 압력강하 및 속도분포가 더 불균일해지는 것을 보여 주었다. Wendland와 Matthes⁹는 물을 이용한 유동가시화(flow visualization) 실험에서 물이 확대부를 통하여 유입될때 부드럽지(smooth) 않다는 것을 보여 주었다. 또한 유입되는 제트의 팽창은 확대부(inlet diffuser)에 의해서가 아니라 모노리스면과의 충돌에 기인하고 제트의 팽창정도는 모노리스의 벽면효과와 관련된 것임을 밝혔다. 또한 일정한 레이놀즈수 이상에서는 레이놀즈수의 변화와는 관계없이 충격제트의 모양이 일정한 형태가 되는 것을 관측하였으며, 주된 제트의 팽창위치는 모노리스의 전면에서부터 약 20 mm 떨어진 상류임을 보여 주었다. Wendland et al.⁹도 물을 이용한 가시화 실험을 하였다. 실제 크기의 촉매변환기를 이용하여 입구관을 유입확대관 내부에서 모노리스쪽으로 0%에서 시작하여 50%, 75%, 90%로 넓어가며 실험을 하였다. 이 실험에 따르면 균일한 속도분포를 목적으로 만든 확대부가 원래의 목적과는 달리 재순환(recirculation)에 의해 속도를 균일하지 못하게 만들며, 이로인한 확대부에서의 압력강하가 발생하므로, 확대부의 길이는 25 mm정도로 기존의 길이보다 작아야 한다고 주장하였다.

기존의 연구에서는 모노리스 자체가 아닌 촉매변환기 외부의 형상을 바꾸어가면서 유동상태를 실험적으로 알아본 것이므로 자동차 뿐만 아니라 일반적인 공해방지 장치에 사용되는 모노리스에 적용시킬 수 있는 객관적인 자료가 되지 못한다. 그러므로 본 논문에서는 모노리

스형 촉매담체내의 유동특성을 측정할 목적으로 제작된 풍동¹⁰⁾에서 상온의 공기를 이용하여 공기의 유입속도, 모노리스의 길이 및 단위면적당 셀의 수(cpsi: cells per square inch) 등을 변화시켜 가면서 이에 따른 압력강하를 측정하므로써 유체유동에 미치는 각각의 인자들에 대한 영향을 알아보려고 하였다. 그리고 듀얼베드(dual bed) 촉매변환기의 유동상태를 예측하기 위하여, 같은 길이의 각각 다른 cpsi의 모노리스를 두개씩 일렬로 놓고 사이의 간격을 바꾸어가며 압력강하를 측정하였다. 또한 촉매가 담지(loading)된 400 cpsi의 모노리스에 관한 압력강하를 측정하여 촉매층에 관한 영향을 알아보려고 하였다. 여기서 측정된 실험자료들은 자동차 뿐만 아니라 산업체에서도 그 적용이 확대되고 있는 후처리 장치를 이용한 공해제어장치의 설계에 있어서 기본자료로 적절하게 이용될 수 있을 것이다.

2. 실험

2-1. 실험장치

풍동의 시험부는 내경 82 mm의 원형단면을 가지고 있으며, 최고속도는 시험부에서 14.85 m/s이고 난류강도는 0.3%이하가 되도록 블로우형(blow type)으로 설계

· 제작하였다^{11,12)}. 그 개략도는 Fig. 1에 표시하였다. 제작된 풍동의 유동특성을 측정하기 위하여 열선유속계

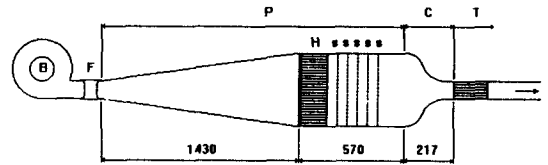


Fig. 1. The overview of blow type wind tunnel (B: scirroco fan, C: contraction, F: flexible, H: honeycomb, P: plenum chamber, S: screen, T: test section).

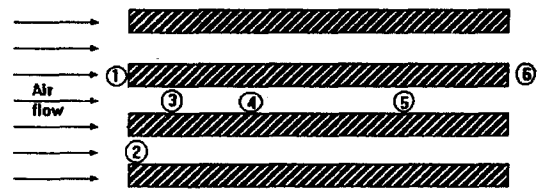


Fig. 2. Factors on pressure drop in monolithic honeycomb (Factors of pressure drop, 1: Effect of wall front, 2: Contraction, 3: Separation, 4: Wall friction in developing flow, 5: Wall friction in developed flow, 6: Diffuser).

Table 1. Specifications of various monoliths*.

Monolith Type (cps)	Hydraulic Diameter (mm)	Wall Thicknecc (mm)	Porosity	Length (mm)	L/D _h
400	1.118	0.152	0.775	86.5	77.37
				68.7	61.27
				49.1	43.92
				35.0	31.31
				16.1	14.40
				61.0	54.56
300	1.300	0.200	0.751	101.6	78.15
				70.0	53.85
				49.2	37.85
				38.4	29.54
200	1.500	0.270	0.718	28.0	21.54
				76.5	51.00
				61.0	40.67
400**	1.118	0.152	0.775	49.6	33.07
				12.3	8.20
				61.6	55.10

* 미국 Corning사 제품.

** Coated Monolith(D_h, Wall Thickness, 공극율과 L/D_h는 촉매가 담지된 두께가 고려되지 않은 것임).

(KANOMAX, 7221)를 사용하여 실험부의 난류강도를 측정하였다¹³⁾. 또한 실험부의 전·후에서 속도와 압력을 측정하기 위하여 피토크(Furness, FC065-225)과 디지털 마이크로 마노미터(Furness, FC012-3)를 사용하였다.

2-2. 실험방법

2-2-1. 풍동성능의 실험

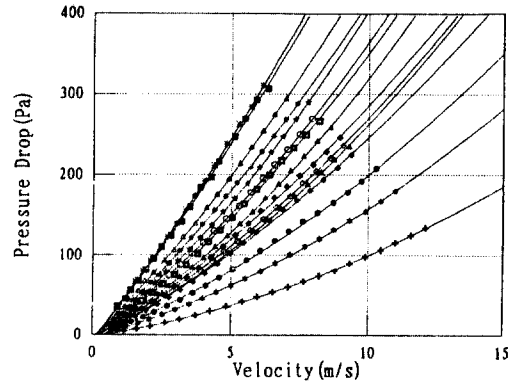
풍동의 시험부에서 반경방향 속도분포는 풍동의 축소부에서부터 하류로 225 mm 떨어진 지점에서 피토크를 사용하여 측정 하였다. 난류강도는 최고유속 14.85 m/s 일때 0.3%로 측정되었다. 측정에 사용된 열선 프르브(probe)는 지름이 5 μm인 상류형 I형 프르브(KANOMAX, 0248R-T5)이다. 이 I형 프르브를 사용하여 주방향의 난류강도만을 측정하였다. 그 이유는 코어 부분에서 주방향의 난류강도가 가장 크며, 난류강도는 전체적으로 등방성(isotropic)인 성질을 갖기 때문이다.

2-2-2. 모노리스상류의 속도와 압력강하 측정

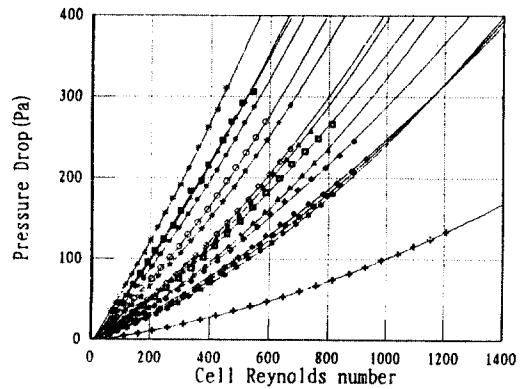
속도를 측정하기 위하여 피토크를 이용하였으며 모노리스의 앞면에서 상류쪽으로 35 mm 떨어진(풍동의 축소부에서 후류쪽으로 225 mm 떨어진 지점)곳의 중앙에서 측정하였다. 이 위치는 7자 형태로된 피토크의 개구부 길이(20 mm)에 의하여 제한되며, 또한 모노리스의 벽면영향이 미치지 않는 최소거리이다. 이 위치에서 반경방향의 속도분포는 거의 일정하다. 중심에서의 속도는 유로단면에서의 평균속도와 2% 미만의 차이를 보였다. 이것은 실험오차 범위안의 차이이기 때문에 중앙위치에서 측정된 속도를 그 단면에서의 평균속도로 간주하였다.

압력강하는 속도를 측정된 위치(모노리스의 앞면에서 상류쪽으로 35 mm 떨어진 위치)와 모노리스의 뒷면에서 하류방향으로 22 mm 떨어진 지점의 중앙에서 정압(static pressure)의 차이를 측정하였다. 이 위치에서 측정된 압력강하는 모노리스 내부 유로에서의 압력 강하만이 아니고 모노리스 입·출구의 축소·확대부로 인한 압력강하가 포함된 것이다. 모노리스를 지나면서 생길 수 있는 압력강하의 요인들은 Fig. 2에 나타내었다. 모노리스의 상류에서는 속도분포가 일정하기 때문에 반경방향으로 압력차이가 없었다. 하류에서는 속도분포가 상류에 비하여 일정하지는 않았지만 반경방향으로의 압력차이는 미소하여 측정하기 어려웠다.

먼저 Table 1과 같이 여러종류의 모노리스를 이용하여 상류에서의 속도를 바꾸어가면서 압력강하를 측정하였다. 한편 듀얼베드(dual bed) 촉매변환기의 유동상태를 예측하기 위하여 400 cpsi, 300 cpsi과 200 cpsi의 모노리스를 동일한 길이 49 mm로 가공하였으며 이들 중 2개씩 선택하여 직렬로 연결하여 각각의 경우마다 두



(a) Δp vs. velocity



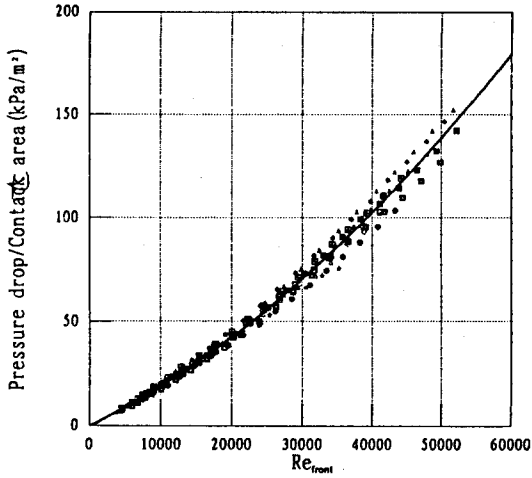
(b) Δp vs. Re_{cell}

Fig. 3. Pressure drop for various monolith dimension. (+, 200 cpsi 12.3 mm; ◇, 200 cpsi 49.6 mm; ◆, 200 cpsi 61.9 mm; □, 200 cpsi 76.5 mm; ■, 300 cpsi 28.0 mm; ●, 300 cpsi 28.0 mm; △, 300 cpsi 38.4 mm; ▲, 300 cpsi 49.2 mm; ★, 300 cpsi 70.0 mm; *, 400 cpsi 16.1 mm; ◇, 400 cpsi 35.0 mm; ○, 400 cpsi 49.1 mm; *, 400 cpsi 61.0 mm; △, 400 cpsi 68.5 mm; *, 400 cpsi 86.5 mm)

담체사이의 간격을 32 mm와 12 mm로 변화시켜가면서 유입속도에 따른 압력강하를 측정하였다. 마지막으로 촉매층이 압력강하에 미치는 영향을 알아보기 위하여 현재 널리 사용되는 400 cpsi의 경우에 대하여 촉매가 담지된 것(길이 61.6 mm)과 담지되지 않은 것(길이 61.0 mm)을 비교 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

모든 실험은 같은 조건에서 4회 이상 반복 측정하였으며 측정된 값들은 표준편차가 2% 미만이었다. 모든



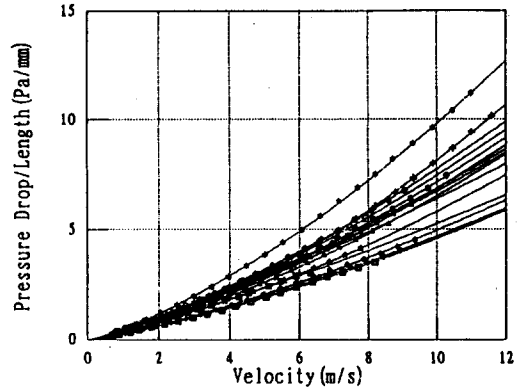
$$\frac{\Delta p}{A} = 2.13 \times 10^{-2} (Re_{front} \times 10^{-3})^2 + 1.71 (Re_{front} \times 10^{-3})$$

Fig. 4. Pressure drop per unit contact area.
 (□, 200 cpsi 49.6 mm; ■, 200 cpsi 61.0 mm; ●, 200 cpsi 76.5 mm; △, 300 cpsi 101.6 mm; ▲, 300 cpsi 38.4 mm; ☆, 300 cpsi 49.2 mm; △, 300 cpsi 49.2 mm; ◇, 400 cpsi 49.1 mm; ☒, 400 cpsi 61.0 mm; ☒, 400 cpsi 68.5 mm; ♣, 400 cpsi 86.5 mm)

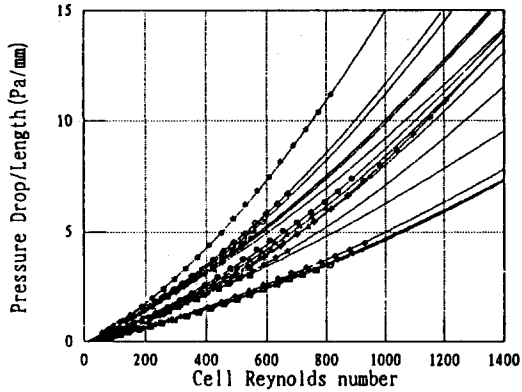
결과에 대한 고찰은 측정값들의 평균값을 이용하였다.

3-1. 단일 모노리스의 속도 변화에 따른 압력강하

Fig. 3은 모노리스의 상류에서의 속도 및 셀레이놀즈 (cell Reynolds)수에 따른 압력강하를 나타낸다. 셀레이놀즈수는 셀하나에서의 수력반경(D_h)과 셀내에서의 속도(U_{front}/ε)를 기준으로한 무차원 수이다. 속도의 측정 위치는 실험방법에서 설명한 바와 같이 모노리스 앞면의 상류부쪽으로 35 mm지점의 중앙이다. 이 지점에서의 최고속도와 평균속도는 2% 미만의 차이를 갖는다. 여기서 측정된 압력강하는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 모노리스 내부에서의 압력강하만이 아니고 모노리스 입·출구의 축소·확대부에 의한 압력강하도 포함된 것이다. 동일한 길이(200 cpsi, 300 cpsi, 400 cpsi, : 49 mm, 200 cpsi, 400 cpsi, : 61.0 mm)의 모노리스의 압력강하를 비교해보면 cpsi가 커지면 압력강하가 커짐을 알 수 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 공극율(porosity)은 cpsi에 비례하며, 일반적으로 공극율이 커지면 저항이 감소하므로 압력강하가 작아질 것으로 예상되나, 실험 결과에 의하면 cpsi가 증가함에 따라 압력강하도 증가하였다. 그 이유는 공기가 모노리스내의 유로를 지나면서 접촉하는 면적이 증가하기 때문으로 생각된다. 즉 모노리스에서의 압력강하는 공극율에 의한 영향보다 유체가 벽과 접촉하여 생기는 전단력과 더 많은 관계가 있다고



(a) Δ p vs. velocity



(b) Δ p vs. Re_{cell}

Fig. 5. Pressure drop per unit length for various monolith dimension.

(+, 200 cpsi 12.3 mm; ◇, 200 cpsi 49.6 mm; ◆, 200 cpsi 61.0 mm; □, 200 cpsi 76.5 mm; ■, 300 cpsi 101.6 mm; △, 300 cpsi 28.0 mm; ▲, 300 cpsi 49.2 mm; ★, 300 cpsi 70.0 mm; ♣, 400 cpsi 16.1 mm; ◇, 400 cpsi 35.1 mm; ○, 400 cpsi 49.1 mm; ♣, 400 cpsi 61.0 mm; △, 400 cpsi 68.5 mm; ♣, 400 cpsi 86.5 mm)

보여진다.

Fig. 4는 모노리스 상류의 레이놀즈수에 대한 공기의 단위 접촉면적당 압력강하의 그래프이다. 모노리스 형상에 대한 단위 접촉면적당 압력강하는 7% 미만의 오차내에서 다음의 상관관계를 갖는다. 따라서 이 상관관계에 의하여 모노리스 형상에 따른 압력강하의 근사적인 예측이 가능하다.

$$\frac{\Delta p}{A} = 2.13 \times 10^{-2} (Re_{front} \times 10^{-3})^2 + 1.71 (Re_{front} \times 10^{-3}) \quad (1)$$

여기서 Re_{front}는 모노리스 상류부에서의 평균속도

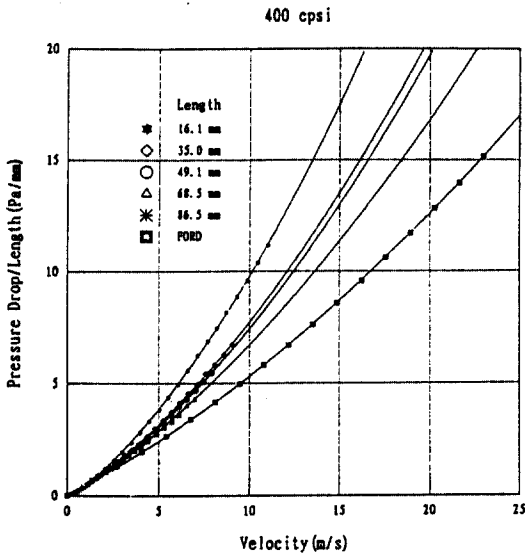


Fig. 6. Comparison of pressure drop with frod data.

(Ufront)와 시험부의 직경을 이용한 레이놀즈수이고, Δp (kPa)는 모노리스 상하류의 압력차이 그리고 A (m²)는 전체 유로에서 공기와 벽과의 접촉면적을 나타낸다. 이 상관관계는 L/D_h 가 20이하인 200 cpsi의 길이 12.3 mm와 400 cpsi의 길이 16.1 mm의 모노리스를 제외한 나머지의 실험 결과들을 최소자승법을 이용하여 2차 다항식으로 나타낸 것이다. 위에서 제외된 것들과 같이 L/D_h 가 20이하인 짧은 모노리스의 경우에는 동일한 레이놀즈수에 대하여 단위 접촉면적당 압력강하가 2배이상 크게 나타났다. 그 이유는 수력반경에 비하여 유로길이가 짧기 때문이다. 수력반경에 비하여 길이가 짧으면 모노리스 유로보다 입·출구에서의 축소·확대로 인한 압력강하에 대한 영향이 상대적으로 크게 나타나기 때문이다. 또한 길이가 짧기때문에 상대적으로 압력강하가 적은 완전확립유동상태에 도달하지 못하여 입구영역의 큰 압력강하에 대한 영향만이 나타난다^{14,15}. 모노리스는 정사각의 덕트를 모아놓은 다중유로(multi channel)라고 볼 수 있으나 L/D_h 가 20 이하일 때에는 다중유로가 아닌, 스크린(screen)이라 보는 것이 더 적절할 것이다.

Fig. 5는 모노리스 상류에서의 속도 및 셀레이놀즈수에 대한 단위길이당 압력강하를 나타낸 것이다. 단위길이당 압력강하는 동일한 cpsi에서 길이가 짧을수록 커진다. 그 이유는 셀 내의 유동상태는 입구에서부터 점차 발달되기 때문이다. 위에서 설명한 바와 같이 동일 길이에 대하여 발달되는 상태에서의 압력강하는 확립유동일 때 보다 훨씬 크다. 또한 압력강하는 모노리스의 앞면에

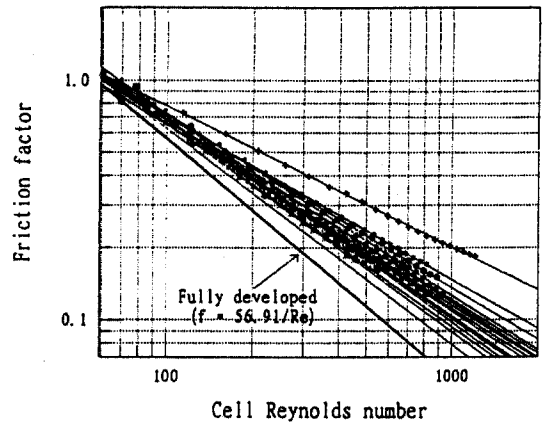


Fig. 7. Friction factors compared with that for fully developed flow in a square duct.

(+, 200 cpsi 12.3 mm; \diamond , 200 cpsi 49.6 mm; \blacklozenge , 200 cpsi 61.0 mm; \square , 200 cpsi 76.5 mm; \blacksquare , 300 cpsi 101.6 mm; \bullet , 300 cpsi 28.0 mm; \triangle , 300 cpsi 38.4 mm; \blacktriangle , 300 cpsi 49.2 mm; \star , 300 cpsi 70.0 mm; \ast , 300 cpsi 16.1 mm; \diamond , 400 cpsi 35.0 mm; \circ , 400 cpsi 49.1 mm; \triangle , 400 cpsi 68.5 mm; \ast , 400 cpsi 86.5 mm; —, Ford data 400 cpsi 152.4 mm; —, $56.91/Re$)

서 상류쪽으로 35 mm떨어진 곳과 뒷면에서 하류쪽으로 22 mm떨어진 곳에서의 정압의 차이를 측정하였지만 단위길이당 압력강하를 계산할 때에는 모노리스의 자체 길이만으로 나누어서 계산하였다. 이로 인하여 모노리스의 길이가 짧아 질수록 모노리스 입·출구면에서의 축소·확대에 의한 압력강하가 전체적인 길이에 대한 압력강하에 대하여 큰 비율로 영향을 주기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 Lai *et al.*(1)에 나와있는 Ford data와 비교해 보았다. Ford data는 모노리스 전후의 압력강하에 대한 영향을 제외한 모노리스 내의 유로에 대한 압력강하만을 나타낸다. 이 그림에 의하면 측정값들이 Ford data보다 단위길이당 압력강하가 더 큰것을 알 수 있다. 이 차이는 모노리스 앞면에서의 축소, 유로 입구에서 초기의 박리현상과 모노리스 출구에서의 확대등으로 인한 압력강하의 영향인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 단일 사각 덕트내 완전확립유동에서의 레이놀즈수의 변화에 따른 마찰계수(friction factor)를 본 실험의 결과와 비교한 것이다. 본 실험에서 구한 마찰계수값들은 전체의 레이놀즈수 범위에서 확립유동상태의 마찰계수값인 $f=56.91/Re$ ¹⁶ 보다 큰 값을 보여주고 있다. 그 이유는 입구영역에서 발달되고 있는 유동에 의한 압력강하와 모노리스 입구의 축소부와 출구의 확대부에 의한 압력강하 때문일 것이다. 모노리스 입구와 출구에서의 압력강하의 영향의 크기를 알아보기 위하여 Fig.

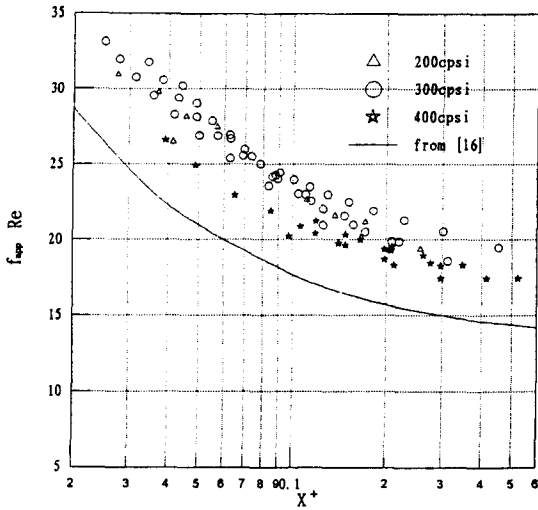
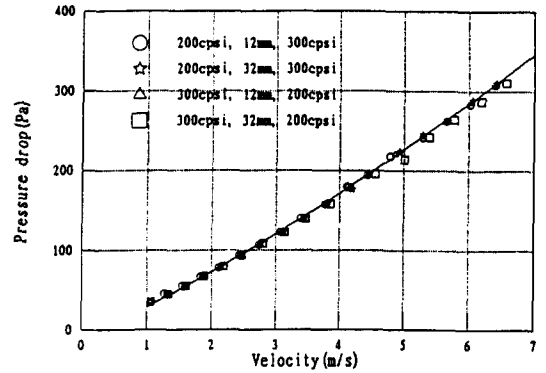


Fig. 8. Friction factors compared with that for developing flow in a square duct.

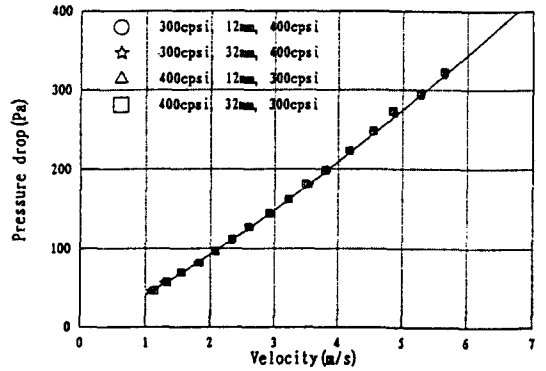
8과 같이 단일 사각덕트의 입구영역에서 길이, 속도에 대한 압력강하의 그래프와 비교하여 보았다. 이 그래프는 $x \rightarrow \infty$ 일때 $f_w Re$ 는 $(f Re)/4$ 에 수렴한다. 이 실선의 그래프와 측정값과의 차이는 관내에서의 압력강하 이외의 요인에 의한 압력강하의 차이를 나타낸다. 단일 사각덕트에 대한 압력강하의 값보다 측정치들의 평균 $f_w Re$ 값이 5정도 더 크다. 여기서 측정값들은 평균값과 10%미만의 차이를 보인다. 이 결과로부터 모노리스의 입구와 출구의 축소·확대부의 영향에 의한 압력강하는 cps에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다.

3-2. 동일 길이, 다른 cps의 모노리스 2개를 직렬로 연결한 경우

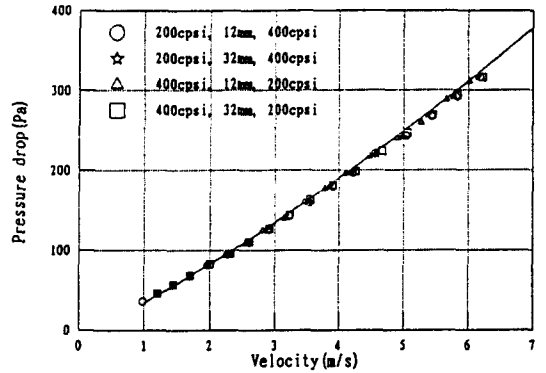
49 mm의 동일한 길이를 가진 200 cps, 300 cps, 400 cps의 3가지 종류의 모노리스 중 2개를 선택하여 일직선상에 놓은 상태에서 그 사이의 간격을 12 mm와 32 mm로 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 이 실험을 한 이유는 듀얼베드(dual bed) 촉매변환기에서 유체역학적으로 더 좋은 효율을 갖는 상태를 찾아보기 위해서였는데, 실험결과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 모노리스를 조합한 경우 사이의 간격을 달리하였을 때 속도의 변화에 대한 압력강하는 같은 속도에서 거의 동일하였다. 여러가지의 조합과 사이간격의 변화에 대한 압력강하와, 단일 모노리스의 경우에서 구한 압력강하의 합과의 차이는 2% 미만이었다. 이 차이는 측정시 오차율에 해당하므로 동일한 값이라고 간주 할 수 있다. 즉, 듀얼베드 형태에서의 압력강하는 상류부와 하류부의 모노리스 자체



(a) 200cps & 300cps



(b) 300cps & 400cps



(c) 200cps & 400cps

Fig. 9. Effects of inter-space on pressure drop for dual bed.

에서의 압력강하와 두 모노리스 사이에서의 압력강하의 합으로 볼 수 있는데, 이때 두 모노리스간의 사이에서의 압력강하는 무시할 만 하다.

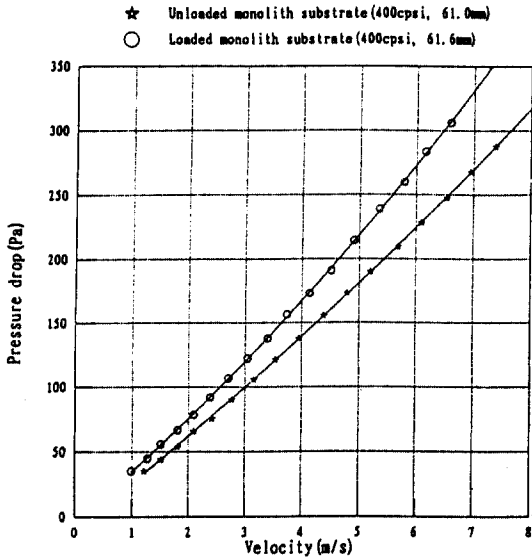


Fig. 10. Comparison of pressure drop of loaded monolith and unloaded monolith.

3-3. 촉매가 담지된 모노리스와 담지 되지 않은 모노리스의 압력강하 비교

위에서 측정한 모노리스들은 촉매가 담지되지 않은 모노리스 담체에 대한 것이다. 그러나 실제로 공해방지를 위하여 사용되는 것은 촉매금속이 담지된 모노리스이다. 촉매가 담지된 모노리스의 촉매층 두께에 의한 압력강하의 영향은 잘 알려져 있지 않다. 본 실험에서는 현재 가장 많이 쓰이고 있는 촉매가 담지된 400 cps의 모노리스에 대하여 촉매가 담지되지 않은 모노리스와 조건을 동일하게 하여 압력강하를 측정·비교하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 촉매가 담지된 경우의 압력강하가 촉매가 담지되지 않은 경우에 비하여 크게 나타났다. 일례로 모노리스 상류에서의 속도가 7 m/s일때의 압력강하는 담지된 것은 331.69 Pa, 담지되지 않은 것은 269.97 Pa로써 담지된 것이 담지되지 않은 것 보다 22.9% 더 크다.

Fig. 11은 모노리스의 압력강하를 나타내는 상관관계와 촉매가 담지된 모노리스의 압력강하를 비교한 것이다. 모노리스의 압력강하를 나타내는 상관관계에 1.25배의 수정길이를 사용하면 두 곡선은 일치하게 된다. 따라서 촉매가 담지되지 않은 모노리스의 실험값으로부터 구한 모노리스의 압력강하를 나타내는 상관관계를 촉매가 담지된 모노리스에 적용하기 위하여는 촉매층의 영향을 고려하여 원래 길이의 1.25배의 수정길이를 사용하여야 한다. 그러나 촉매가 담지된 모노리스와의

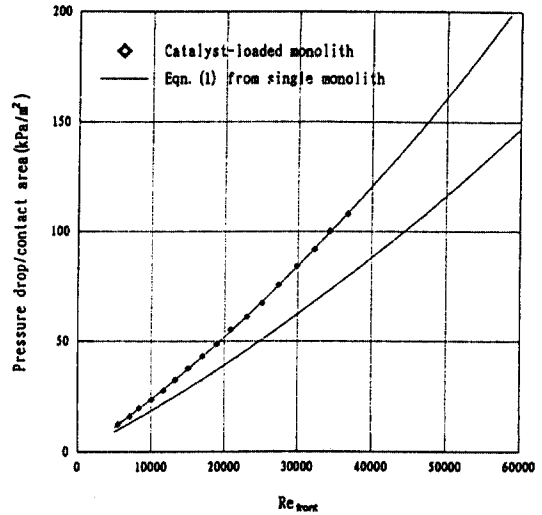


Fig. 11. Comparison of pressure drop per unit contact area of loaded monolith and unloaded monolith.

비교는 이 하나의 실험치만으로는 부족하므로 계속적인 실험이 요구된다.

4. 결 론

촉매변환기용 모노리스에서의 규격과 속도에 따른 압력강하를 알아보기 위하여 풍동을 제작하여 실험을 수행하였다. 200 cps, 300 cps와 400 cps의 단일 모노리스에서 길이별 속도변화에 따른 압력강하를 측정하였고 듀얼베드(dual bed) 형태에서의 압력강하를 알아보기 위하여 일정한 길이(49 mm)의 200 cps, 300 cps와 400 cps들 중 두개씩 조합하여 사이 간격을 12 mm와 32 mm로 변화시켜가면서 압력강하를 측정하였다. 또한 현재 가장 많이 쓰이는 400 cps의 모노리스중 촉매를 담지한 것과 담지하지 않은 것의 압력강하를 같은 길이(61 mm) 동일한 조건으로 측정하였다. 위와 같은 실험으로 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

1) 압력강하는 속도가 동일할 때 공극율에 상관없이 길이가 길어질수록, cps가 커질수록 증가하는 것을 확인하였다. 또한 단일 모노리스 상·하류간의 압력강하는 모노리스 입·출구에 의한 영향으로 단일 사각덕트내의 압력강하보다 크다. 동일한 실험조건에 대하여 압력강하는 공기와 모노리스 유로벽과의 접촉면적과 관련된다. 아래의 상관관계에 의하여 모노리스 형상에 따른 압력강하를 근사적으로 예측 가능하다.

$$\frac{\Delta p}{A} = 2.13 \times 10^{-2} (Re_{front} \times 10^{-3})^2 + 1.71 (Re_{front} \times 10^{-3})$$

2) 듀얼베드 형태에서는 모노리스의 상류부와 하류부의 압력강하와 모노리스 사이에서의 압력강하의 합으로 볼 수 있는데, 이때 모노리스와 모노리스 사이의 유로에서 발생하는 압력강하는 무시할 만 하다.

3) 촉매가 담지되지 않은 모노리스의 측정결과로부터 제안된 상관관계를 촉매가 담지된 모노리스의 압력강하를 예측하는데 사용하기 위해서는 촉매의 영향을 고려하여 모노리스 길이를 수정하여 사용하여야 한다. 수정길이는 원래길이의 1.25배로 할 것을 제안하며, 담지된 촉매의 종류와 양에 따른 수정계수의 확인을 위한 보다 광범위한 실험이 요구된다.

사용기호

A	: 면적
D_h	: 셀 하나의 수력직경
f_{app}	: 무차원 Fanning 마찰계수, $\Delta p^*/(x/r_h)$
g	: 중력가속도
L	: 모노리스 길이
Δp	: 모노리스 앞뒤의 정 압력차이
ΔP^*	: 무차원 압력, $\Delta p/(\rho u_{cell}^2/2g_c)$
R	: 파이프의 반경
Re	: Reynolds 수
Re_{cell}	: 셀 Reynolds 수, U_{cell} 와 D_h 기준
Re_{front}	: U_{front} 과 파이프 직경을 기준으로한 Reynolds 수
r	: 파이프의 한단면에서 벽부터 중심으로의 거리
r_h	: 수력반경
\bar{r}	: 무차원 거리, r/R
U	: 속도
U_{front}	: 모노리스 상류에서의 속도
U_{max}	: 단면에서의 최고속도
\bar{U}	: 무차원 속도, U/U_{max}
u_{cell}	: 셀 내부에서의 속도, U_{front}/ϵ
x	: x방향 거리
x'	: 무차원화된 입구영역 거리, $x/D_h Re$
y	: y방향 거리

희랍문자

ϵ : 모노리스의 공극율(porosity)

감 사

본 연구는 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. M. -C. Lai, J. -Y. Kim, C. -Y. Cheng, P. Li, G. Chui & J. D. Pakko, : Cham. 4th International Phoenix User Conference, 189 (1990).
2. 김명호, 조경민, 박심수와 허남진: 한국자동차공학회추계학술대회 논문집, 170 (1992).
3. David K. S. Chen, Edward J. Bisselt, Se H. Oh, David L. & Van Qstrom, : SAE 880282 (1988).
4. Micheal J. Ryan, E. Robert Becker, Kyiacos Zy-gourakis: SAE 910610 (1991).
5. J. Paul Day & Louis S. Socha, : SAE 881590 (1988).
6. J. S. Howitt & T. C. Sekella, : SAE 740244 (1974).
7. C. D. Lemme & W. R. Givens, : SAE 740243 (1974).
8. D. W. Wendland & W. R. Matthes, : SAE 861554 (1986).
9. D. W. Wendland, W. R. Matthes & P. L. Sorrell, : SAE 922340 (1992).
10. W. H. Rae, Jr & Alan Pope, "Low-Speed Wind Tunnel Testing" 2nd ed. John Wiley & Sons, New York (1984).
11. H. Schlichting, "Boundary Layer Theory" 7th ed. McGraw-Hill, New York (1979).
12. J. O. Hinze, "Turbulence" 2nd ed. McGraw-Hill, New York (1975).
13. Robert D. Blevins, "Applied Fluid Dynamics Handbook" Van Nostrand Reinhold Company, New York (1984).
14. F. M. White, "Fluid Mechanics" 3rd ed. McGraw-Hill, New York (1994).
15. F. M. White, "Viscous Fluid Flow" 2nd ed. McGraw-Hill, New York (1991).
16. R. K. Shah & A. L. London, "Laminar Flow Forced Convection in Ducts" Academic Press, London, Supplement 1, Chapter 7 (1978).