

## 입·출구 형상변화에 따른 촉매변환기 내의 유동특성에 관한 연구

### A Study on the Fluid Flow Characteristic in Catalytic Converter for Various Inlet and Outlet Header Shapes

이 은 호\*, 이 철 구\*, 유 재 석\*\*, 이 종 화\*\*  
Eunho Lee, Chulku Lee, Jaisuk Yoo, Jonghwa Lee

#### ABSTRACT

In the design of catalytic converter, velocity distribution is more important than pressure drop because monolith pressure drop is about 80% of overall pressure drop. For the catalytic converter with single diffuser, pressure drop is decreased as the angle of diffuser decrease, but when the angle is below  $18^\circ$ , the effect is almost negligible. For the catalytic converter with double diffuser, variation of the angle of the first diffuser shows the same trend as the catalytic converter with single diffuser. The angle of diffuser gives significant influence on the pressure drop while the shape of diffuser gives little influence on that. The outlet shape gives negligible effect on the pressure drop and velocity distribution. Results show that recirculation region of commercial model is about 30% of the total area in the front of monolith. For the catalytic converter with Model 11 that was presented in the study, recirculation region was not detected, more uniform velocity distribution was obtained, and pressure drop was also decreased.

주요기술용어 : Catalytic Converter(촉매변환기), Recirculation Region(재순환 영역), Pressure Drop(압력손실), Velocity Distribution(속도분포)

#### 1. 서 론

최근 산업 발전에 따른 산업체, 자동차 등에서 배출되는 환경오염 물질이 급격히 증가하여 지구

생태계와 인간의 건강에 심각한 문제를 일으키고 있다. 세계 각국은 환경보호를 위한 노력으로 환경오염 물질의 배출에 대한 규제를 강화하고 있는 실정이다. 예로서 미국의 캘리포니아를 비롯한 주정부에서 강력한 대기오염 배출 허용기준과 회박연소 엔지장착을 요구하고 있다. 캘리포니아에서 체결된 자동차 배기가스 배출 허용기준은 현재 수준에서 2000년까지 탄화수소(HC)를

\* 정회원, 아주대학교 대학원

\*\* 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

90%, 일산화탄소(CO)를 50%, 질소산화물(NOx) 80%로 줄이도록 요구하는 강력한 규제 이어서 이 규제를 극복할 수 있는 촉매 변환기 개발을 서두르고 있는 실정이다.

유체역학적 관점에서 불 때 촉매 변환기 입구와 출구 형상의 최적설계를 통하여 압력강하를 줄일 수 있고, 속도분포를 균일하게 만들 수 있으며, 이에 따른 열응력에 대한 수명과 반응의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한 유동에 관련된 문제에서 압력손실의 크기는 엔진의 출력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유입관의 형상, 모노리스 담체의 형상 및 길이 등을 포함한 다양한 조건에 대하여 그 개선방안을 모색하고 있다. 그러나 영향을 주는 인자가 다양한 만큼 이미 발표된 연구의 실험조건도 다양하므로 모든 조건에 대하여 상대적 크기를 선정하여 실험을 하거나 그 실험 결과를 실제 문제에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다.

기존의 촉매변환기내의 유체유동에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. 기존의 연구는 크게 수치적 연구와 실험적 연구로 나누어진다. 수치적 연구에서는 주로 촉매변환기의 입구형상과 출구의 형상을 변화시켜가며 촉매변환기내의 속도분포나 압력강하 등에 대하여 연구하였다.<sup>1~5)</sup> 실험적인 연구에 대하여 간단히 정리하면 다음과 같다. Howitt와 Sekella<sup>6)</sup>는 원추형 확대 입구 및 축소 출구를 가지는 원형단면의 모노리스형 촉매변환기내의 유동에 대하여 실험을 하였다. 속도의 측정은 열선유속계를 사용하였고 모노리스 촉매변환기내의 온도는 작동 유체와 같게 놓고 실험을 행하였다. 이 연구결과에 의하면 모노리스 전면부에서의 유동은 중심에서 멀어질수록 속도가 감소하였다. Wendland와 Mattes<sup>7)</sup>는 물을 이용한 유동가시화 실험에서 유동이 확대부를 통하여 유입될 때 부드럽지 않다는 것을 보여 주었다. 또한 유입되는 제트의 팽창은 확대부(Inlet Diffuser)에 의해서가 아니라 모노리스 면과의 충돌에 기인하고 제트의 팽창정도는 모노리스의 벽면효과와 관련된 것임을 밝혔다. 특정 레이놀

즈 수의 변화와는 상관없이 충격 제트의 모양은 일정한 형태임을 관측하였으며, 주된 제트의 팽창위치는 모노리스의 전면에서부터 약 20mm 떨어진 상류임을 보였다. Wendland 등<sup>8)</sup>은 물을 이용한 가시화 실험을 수행하여 균일한 속도분포를 만들 목적으로 제작한 확대부가 원래의 목적과는 달리 재순환(Recirculation)에 의해 속도가 균일하게 되지 못하였으며, 이로 인하여 확대부에서 압력강하가 발생하므로, 확대부의 길이는 25mm 정도로 기존의 길이보다 작아야 한다고 주장하였다. Wendland와 Anderson<sup>9)</sup>의 연구에서 배기 시스템 압력손실의 중요한 부분이 촉매 변환기임을 알아냈다. 실제로 유동이 파이프와 담체로 들어가는 경사진 부분에서 박리가 발생하기 때문에 이로 인해 압력손실이 발생하고 유동이 불균일하게 되었다. 따라서 담체 횡단면에서 점진적으로 확대되는 1차 디퓨저와 2차 디퓨저를 조합시킨 EDH(Enhanced Diffusion Header)와 같은 개선된 입구형상을 개발하여 촉매변환기 내의 압력손실을 줄이고 정압을 증가시켜 속도를 균일화하여 출구 배기 유동을 확산시켰다.

본 연구에서는 다양한 입·출구 형상에 따른 압력손실과 유속측정 실험을 통하여 촉매변환기 입구에서의 유동 확산에 의하여 유동을 균일화시킬 수 있는 디퓨저 각도를 제시하고자 한다. 이러한 결과를 토대로 엔진 출력에 최소 영향을 주는 촉매변환기 입·출구 형상을 제시하고, 여러 가지 형상에 대한 압력손실의 관계를 제시하여 촉매변환기 설계의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

촉매변환기의 속도 및 압력을 측정하기 위하여 Fig.1에서 보인 바와 같이 실험장치 구성하였다. 그림에서 나타낸 바와 같이 인버터에 의하여 제어되는 송풍기와 풍동을 이용하여 유동을 균일하게 만든 후 피토크관을 설치하여 유속을 측정하였다. 풍동 출구에서 촉매변환기 입구까지는 약

20D 정도의 직관부를 연결하였다. 압력손실을 측정하기 위하여 촉매변환기 입구에서 상류쪽으로 0.2D 떨어진 위치와 촉매변환기 출구로부터 하류쪽으로 10D 떨어진 위치에 ISO 규격에 의해 제작한 압력공을 설치하였다. 촉매변환기 내의 속도 측정은 5공 피토판을 이용하여 모노리스의 횡방향 중앙단면에서 측정하였다.

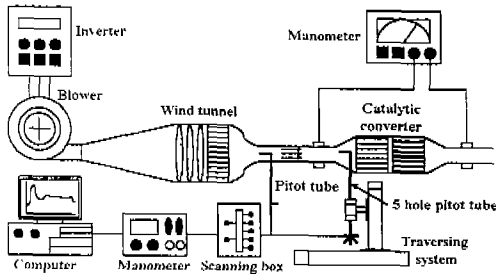


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

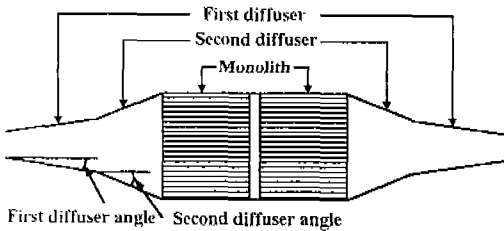


Fig. 2 Definition of diffuser angle

## 2.2 디퓨저 제작

촉매변환기의 형상제작은 상용제품(대우기전공업주식회사, 1P25127798L)과 Wendland와 Anderson<sup>9)</sup>이 제시한 형상 및 본 연구에서 설계한 형상들을 CAD/CAM 프로그램을 이용하여 보델링을 한 후 Machining Center로 각 틀을 가공하였으며, 이 틀과 유리섬유 강화 플라스틱(FRP)을 이용하여 각 디퓨저를 제작하였다. 본 연구에서 설계한 형상은 단일 디퓨저의 경우에는 디퓨저 각도를 13.6°, 18°, 30°로 변화시켰으며, 2단 디퓨저의 경우에는 2차 디퓨저 각도를 30°로 고정된 상태에서 1차 디퓨저 각도를 3°, 5°, 8.5°로 변화시키고 1차 디퓨저와 2차 디퓨저의 경계면에 라운드를 100mm, 200mm로 변

화시켜 설계하였다. 여기서 모노리스에서 가까운 쪽이 2차 디퓨저이다. 디퓨저 각도의 정의는 Fig.2에 나타냈으며, 각각의 자세한 사양은 Table 1에 나타냈다.

Table 1 The specifications of test models

Model	First diffuser angle/length (deg./mm)	Second diffuser angle/length (deg./mm)	Round (radius, mm)
1	-	30/68.4	-
2	-	18/122	-
3	8.5/70	30/52	-
4	8.5/70	30/52	100
5	8.5/70	30/52	200
6	-	13.6/163	-
7	5/111	30/52	-
8	5/111	30/52	100
9	5/111	30/52	200
10	3/152	30/52	-
11	3/152	30/52	100
12	3/152	30/52	200

## 2.3 실험방법

압력손실은 인버터를 제어하여 촉매변환기로 유입되는 공기의 평균속도를 조절한 후 유동이 안정된 상태에서 촉매변환기 입구와 촉매변환기 출구에 설치한 압력공을 이용하여 5회 이상 반복 측정한 결과를 평균하여 사용하였다. 촉매변환기로 유입되는 공기의 속도는 모노리스 전면의 속도를 기준으로 1m/s에서 10m/s까지 1m/s 간격으로 수행하였다.

모노리스 전면의 유속분포는 5공 피토판을 사용하여 측정하였다. 5공 피토판은 United Sensor사의 DA125를 사용하였으며, 피토판의 보정은 피치각(pitch angle)과 요각(yaw angle) 모두 ±40° 범위에서 각각 5° 간격으로 보정하여 사용하였다. 유속은 5공 피토판 형상의 제약으로 모노리스에서 상류측으로 10mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 유속측정 단면의 길이는 중

심에서 벽면까지 65mm이며, 5mm간격으로 측정하였다.

모노리스 자체의 압력손실은 참고문헌[10]에서 제시한 방법으로 풍동 출구에 모노리스만을 부착한 후 모노리스 앞·뒤에 정압공을 설치하였다. 실험은 모노리스 전면의 평균유속을 1m/s에서 10m/s까지 1m/s 간격으로 변화시키면서 수행하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 모노리스 자체의 압력손실

모노리스 자체의 압력손실을 측정한 결과는 Fig.3에 나타냈다. 여기서 속도는 모노리스 전면에서의 평균속도를 나타낸 것이다. 모든 실험 모델에서 전체 압력손실은 1450Pa~1550Pa 정도로 나타났다. 이 전체 압력손실과 모노리스 자체의 압력손실의 차가 하우징 손실이다. 전체 압력손실 중에 모노리스 자체의 압력손실이 대략 80% 정도로 나타난 것으로 보아 촉매변환기 설계시 하우징의 손실을 줄이는 것보다 모노리스 전면에서의 속도분포를 균일화시키는 것이 중요하다고 사료된다.

#### 3.2 입구형상 변화에 따른 영향

출구에는 상용 모델을 부착한 상태에서 입구형상을 단일 디퓨저로 구성된 모델, 2단 디퓨저로 구성된 모델 그리고 2단 디퓨저의 첫 번째 디퓨저와 두 번째 디퓨저가 만나는 지점에 곡면처리를 한 모델에 대하여 압력손실과 모노리스 전면에서 속도분포를 측정하여 입구형상 변화에 따른 영향에 대하여 연구하였다.

Fig.4는 단일 디퓨저의 각도에 따른 하우징 압력손실을 나타낸 것이다. 그림에서 모델1은 상용 제품으로 디퓨저의 각도가 30°, 모델2는 18° 그리고 모델3은 13.6°이다. 그림에서 알 수 있듯이 디퓨저 각도가 작아지면 압력손실도 작아진다. 특히 디퓨저 각도가 30°인 모델1과 18°인 모델2의 압력손실은 모델2의 경우가 20%정도 감

소하였지만 모델2와 모델3은 거의 차이가 없었다. 따라서 단일 디퓨저로 구성된 모델의 경우에는 디퓨저 각도가 18° 이하가 되면 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

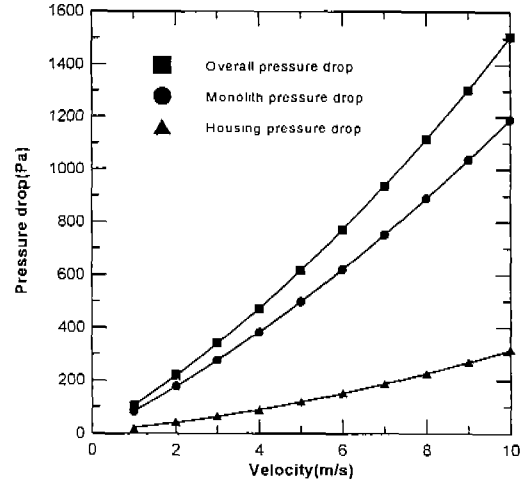


Fig. 3 Overall, monolith and housing pressure drop

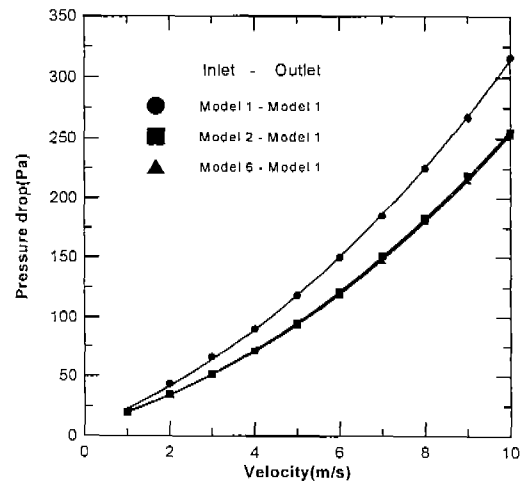


Fig. 4 Housing pressure drop for various models with single inlet diffuser

두 번째 디퓨저의 각도는 30°로 일정하고 첫 번째 디퓨저의 각도가 8.5°, 5° 그리고 3°로 변하는 2단 디퓨저의 하우징 압력손실은 Fig.5에 나타냈다. 그림에서 첫 번째 디퓨저의 각도가 작아지면 압력손실은 줄어드는 것을 알 수 있다. 이

섯은 디퓨저의 각도가 작으면 확산이 서서히 일어나기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

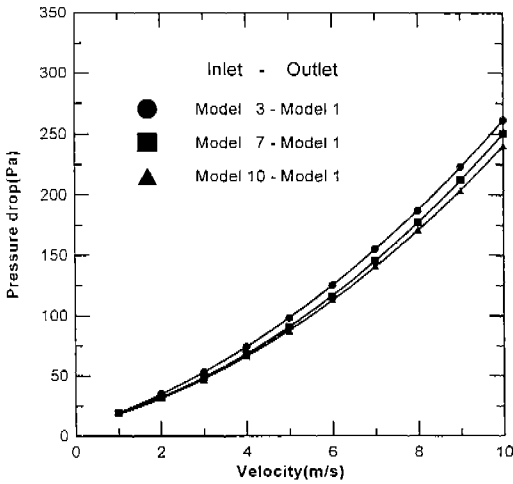


Fig. 5 Housing pressure drop for various models with double inlet diffuser

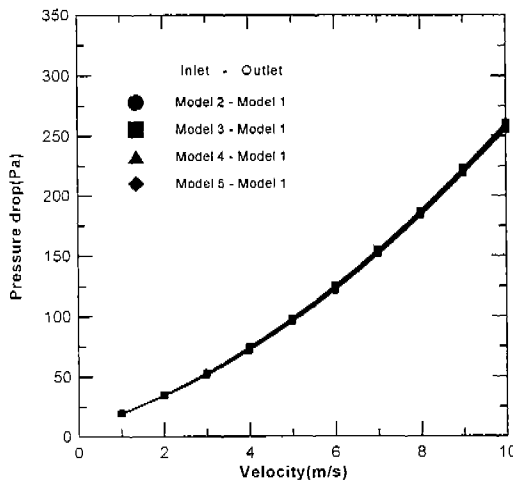


Fig. 6 Housing pressure drop for various models with inlet diffuser equal in length

Fig.6은 디퓨저의 전체 길이는 일정하지만 첫 번째 디퓨저의 길이가 다르고 곡면처리를 한 4가지 모델에 대한 압력손실을 나타낸 결과이다. 그 림에서 알 수 있듯이 단일 디퓨저로 구성된 축매 변환기의 압력강하가 작게 나타났지만 그 차이는 작음을 알 수 있다. 따라서 축매변환기의 압력강

하는 디퓨저의 형상보다 각도에 많은 영향을 받는다.

상용모델의 모노리스 전면 평균유속을 각각 3m/s, 6m/s 그리고 10m/s로 변화시켰을 때의 속도분포는 Fig.7에 나타났다. 속도분포는 속도의 변화에 따라 유동방향은 변하지 않고 그 크기만이 변화하는 것으로 나타났으며, 전체 영역의 약 30% 정도 재순환 영역이 존재함을 알 수 있었다. 단일 디퓨저로 길이를 증가시킨 모델2의 경우에는 Fig.8(a)에 나타난 바와 같이 재순환 영역이 대략 20% 정도로 감소함을 볼 수 있었다. 그리고 Fig.8(b), Fig.8(c) 그리고 Fig.8(d)에 나타난 바와 같이 2단 디퓨저로 구성된 모델3, 모델 7 그리고 모델10에서는 재순환 영역이 없었으며, 특히 모델10을 부착하였을 때 가장 좋은 속도분포가 얻어짐을 알 수 있었다.

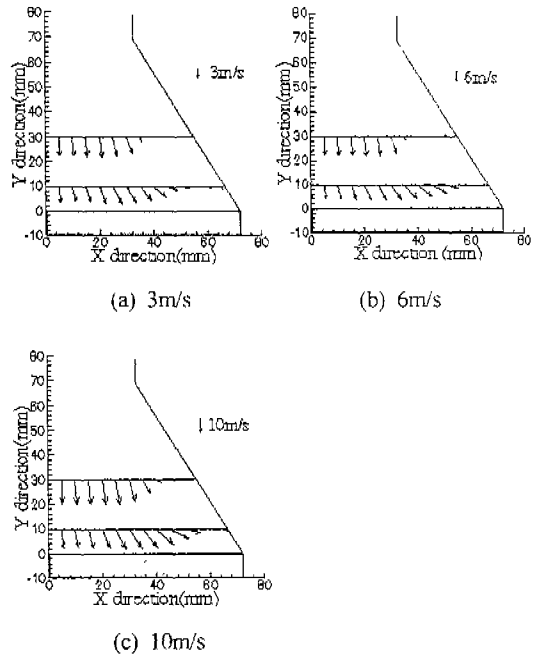


Fig. 7 Velocity distribution of commercial model (Model 1)

### 3.3 출구형상 변화에 따른 영향

입구형상을 동일하게 하고 출구를 단일 디퓨

저, 2단 디퓨저 그리고 2단 디퓨저에 곡면처리를 한 모델을 부착하여 출구형상의 변화에 따른 영향을 알아보았다.

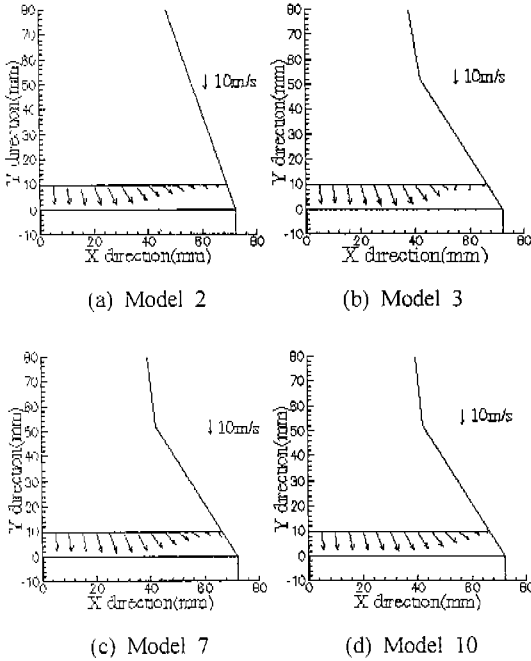


Fig. 8 Velocity distribution for inlet diffuser angle

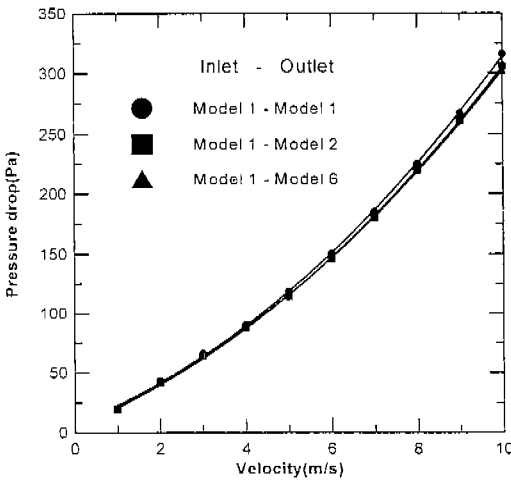


Fig. 9 Housing pressure drop for various models with single outlet diffuser

Fig.9는 단일 디퓨저의 각도에 따른 하우징 압

력손실을 나타낸 것이다. 입구형상 변화와 마찬가지로 디퓨저의 각도가 작아지면 압력손실도 역시 감소하지만 그 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 모노리스 앞부분의 디퓨저에서 이미 유동의 특성이 결정되었기 때문에 뒷부분의 형상 변화는 전체 유동특성에 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다.

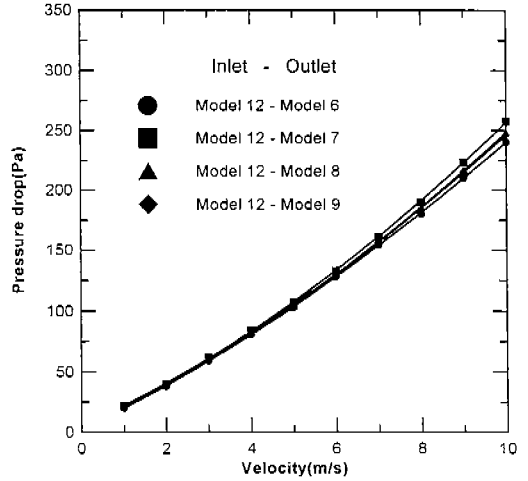


Fig. 10 Housing pressure drop for various models with outlet diffuser equal in length

2단 디퓨저의 첫 번째 디퓨저의 각도가 다른 경우의 결과는 Fig.10에 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 첫 번째 디퓨저의 각도가 작아짐에 따라 압력손실이 감소하였지만 단일 디퓨저의 경우와 마찬가지로 그 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

### 3.4 입 · 출구형상 변화에 따른 영향

입구와 출구형상이 동일한 축매변환기의 압력손실과 속도분포 결과는 Fig.11~Fig.14에 나타났다. Fig.11은 단일 디퓨저를 가지고 각도가 서로 다른 모델1, 모델2 그리고 모델6의 하우징 압력손실을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 디퓨저의 각도가 작아지면 압력손실도 역시 감소하였다. 2단 디퓨저로 구성된 모델3, 모델7 그리고 모델10의 압력손실은 Fig.12에 나타낸 바와

같이 첫 번째 디퓨저의 각도가 작아질수록 압력 손실이 감소하였다. Fig.13은 동일한 길이를 가지는 2단 디퓨저에서 곡면처리에 따른 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 곡면처리를 하지 않은 모델10보다 곡면처리를 한 모델11과 모델12가 압력손실이 현저히 감소함을 알 수 있다. 하지만 곡면의 곡률 반경은 거의 영향이 없었다.

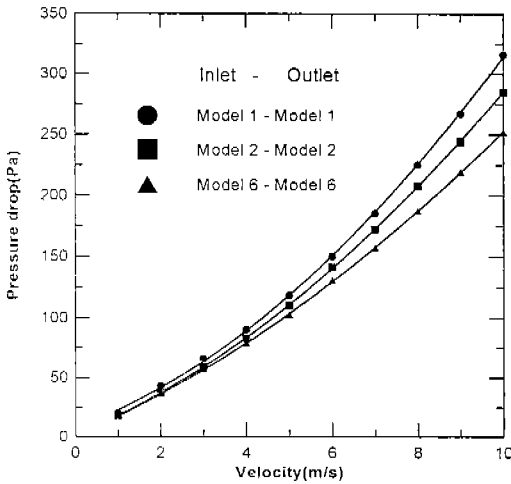


Fig. 11 Housing pressure drop for various models with same single diffuser at inlet and outlet

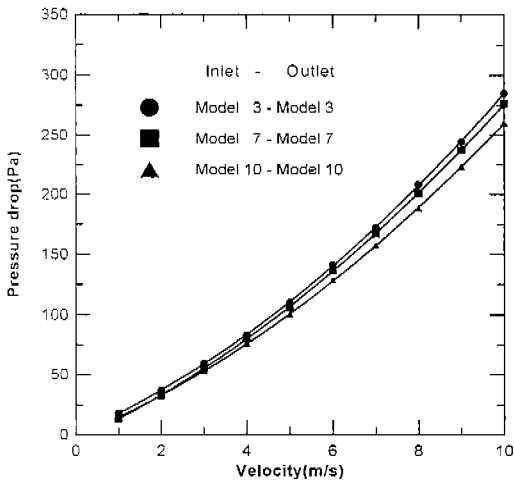


Fig. 12 Housing pressure drop for various models with same double diffuser at inlet and outlet

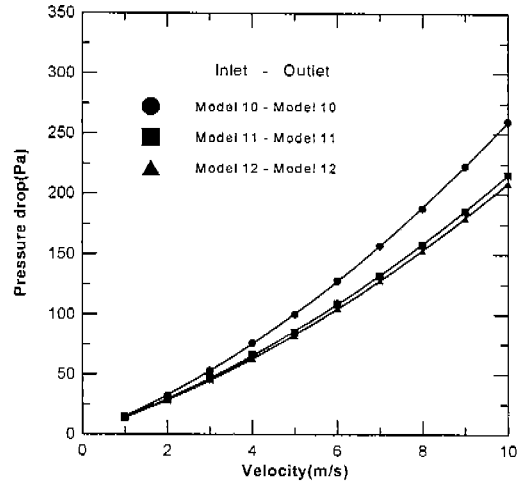


Fig. 13 Housing pressure drop for various models with double diffuser equal in length at inlet and outlet

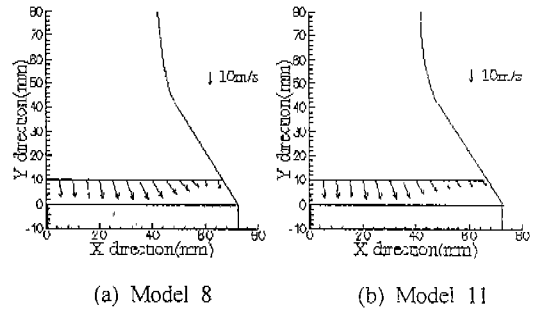


Fig. 14 Velocity distribution for different models with same double diffuser equal in length at inlet and outlet

속도분포의 경우에는 Fig.14에 나타난 바와 같이 2단 디퓨저에서 곡면 처리를 한 모델8과 모델 11의 경우에는 재순환 영역이 나타나지 않았다. 따라서 2단 디퓨저를 가지는 촉매변환기 설계시 두 디퓨저가 교차하는 지점을 곡면으로 만들면 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 모델11과 모델12의 압력손실이 본 연구에서 수행한 모든 경우에서 가장 압력손실이 작게 나타난 것으로 보아 속도분포가 균일해지면 압력손실도 감소하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 촉매변환기의 입구와 출구형상 변화에 따른 유동특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 촉매변환기의 전체 압력손실에서 모노리스의 압력손실은 약 80%정도를 차지하기 때문에 촉매변환기의 하우징 설계시 하우징 손실보다는 속도분포를 균일화시켜야 한다.

2. 입구형상변화에서 단일 디퓨저의 경우에는 디퓨저 각도가 작을수록 압력손실은 감소하지만 디퓨저 각도가 18° 이하에서는 거의 영향이 없다. 2단 디퓨저의 경우에도 1차 디퓨저의 각도가 작을수록 압력강하는 감소하였으며 디퓨저의 형상보다는 각도에 많은 영향을 받는다.

3. 출구형상 변화는 입구형상 변화에 비하여 촉매변환기의 전체 압력손실과 속도분포에 거의 영향이 없었다.

4. 입구와 출구의 형상이 동일한 경우에는 디퓨저의 각도가 작아짐에 따라 압력손실도 감소하였으나 곡률의 영향은 거의 없었다.

5. 속도분포는 상용모델의 경우에는 대략 30% 정도 재순환 영역이 존재하였지만 본 연구에서 제시한 모델 11을 앞뒤에 부착한 경우에는 재순환 영역이 나타나지 않았고 비교적 균일한 속도 분포를 얻을 수 있었으며 압력강하도 작게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. Wendland, D.W., Sorrell, P.L., & Kreucher, J.E., "Sources of Monolith Catalytic Converter Pressure Losses", SAE 912372, 1991.
2. A. Cricq et, al., "Catalysis and Automotive Pollution Control" CAPOCI, Brussels, September 8-11, 1986.
3. G. Bell, V. Rocco, M. Maggiore, "A Study of Inlet Flow Distortion Effects on Automotive Catalytic Converter", ASME Vol.113, pp. 419~426, 1991.
4. David K. S. Chen, Edward J. Bisselt, Se H. oh, David L. & Van Qstrom, "A Three-Dimension Model for the Analysis of Transient Thermal and Conversion Characteristics of Monolithic Catalytic Converters", SAE 880282, 1988.
5. Micheal J. Ryan, E. Robert Becker, Kyiacos Zygourakis, "Light-Off Performance of Catalytic Converters : The Effect of Heat/Mass Transfer Characteristics", SAE 910610, 1991.
6. J. S. Howitt & T. C. Sekella, "Flow Through Catalytic Converter - An Analytical and Experimental Treatment", SAE 740244, 1974.
7. D. W. Wendland & W. R. Mattes, "visualization of Automotive Catalytic Converter Internal Flow", SAE 861554, 1986.
8. D. W. Wendland W. R. Mattes & P. L. Sorrell, "Effect of Header Truncation on Monolith Converter Emission-Control Performance", SAE 922340, 1992.
9. Daniel W. Wendland, John Kreucher, & Eric Andersen, "Reducing Catalytic Converter Pressure Loss with Enhanced Inlet-Header Diffusion" SAE 952398, 1995.
10. 최희탁, 목재균, 이은호, 유재석, 이종화, "모노리스 촉매담체내의 유체유동에 관한 실험적 연구", 한국에너지학회, Vol.4, No.2, pp. 288~298, 1995.