

원추 환형링이 촉매변환기내의 유동분포에 미치는 영향

An Effect of Cone Type Circular Ring on the Flow Distribution in Catalytic Converter

이 철 구*, 이 은 호*, 유 재 석**, 목 재 균***, 황 석 렬****
Chulku Lee, Eunho Lee, Jaisuk Yoo, Jaikyun Mok, Sukryul Hwang

ABSTRACT

An experimental investigation has been performed on the steady flow in exhaust system. When individual flow coming from exhaust manifold entered UCC, the inlet conditions at entry to the diffuser in UCC were affected by the upstream pipe and manifold works. But those effects of the inlet condition on flow through monolith are negligible because the flows are concentrated on the center of monolith regardless of inlet flow distribution. To improve the flow distribution, we installed the cone type circular ring in diffuser of UCC. This led to increasement of flow uniformity, but there was minor increment of pressure drop.

주요기술용어 : Catalytic converter(촉매변환기), Flow uniformity(유동균일도), Monolith(담체), Pressure drop(압력손실), Flow distribution(유동분포)

1. 서 론

배기가스의 공해물질 규제를 만족시키기 위하여 폭넓게 사용되고 있는 모노리스형 촉매변환기를 설계하는데 있어서 가장 주안점을 두어야 하는 사항은 압력손실을 최소화하고 모노리스 전면의 유동 분포를 균일하게 하는 것이다. 촉매변환기에 의한 압력손실은 엔진의 출력에 직접적인 영향을 미치며 모노리스 전면 유동의 균일화는

반응의 신뢰성과 열응력에 대한 모노리스의 수명을 향상시키므로 유입관의 형상 및 모노리스 담체의 형상 등에 대하여 그 개선 방안을 다양하게 모색하고 있다.

기존의 연구^{1,2)}에서는 주로 촉매변환기 확대부와 수축부의 형상을 변화시켜서 모노리스 전면의 유동분포를 개선하고 압력손실을 줄이고자 하였다. 하지만 이러한 연구에서는 압력손실을 어느 정도 감소시킬 수 있었지만 유동분포는 크게 향상되지 않았다. 그리고 대부분 촉매변환기 확대부의 길이나 유입관의 지름을 변화시켰기 때문에 실제 적용하는데는 많은 제약이 따른다.

실제 엔진에서 촉매변환기로 유입되는 유동은 비정상 상태이지만 Bressler 등³⁾이 제시한 결과

* 회원, 아주대학교 대학원
** 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부
*** 회원, 철도기술연구원
**** 회원, 경문대학 기계과

에 따르면 최대 질량유량에서 정상상태의 유동분포와 비정상상태의 유동분포가 거의 비슷하게 나타남을 입증하였다.

따라서 본 연구에서는 정상상태 실험을 통하여 각각의 실린더에서 배출된 유동이 촉매변환기내의 유동분포에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 그리고 촉매 변환기의 형상을 변화시키지 않고 확대부에 원추 환형링을 설치하여 유동 분포의 변화를 기존 촉매변환기와 비교하였으며, 모노리스 전면 유동을 균일화시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

각 실린더로부터 배출된 배기가스가 매니폴드를 거치면서 촉매변환기 내의 유동에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다.

그림에서 나타낸 바와 같이 인버터로 제어되는 송풍기와 풍동으로 유동을 균일하게 만든 후 풍동 출구에 설치한 피토포관으로 유속을 측정하여 촉매변환기로 유입되는 유량을 조절하였다. 실험에 사용한 매니폴드와 배기관은 4기통 엔진에 사용되는 상용제품을 사용했으며 확대부의 길이는 45 mm이고, 직경 93 mm의 원형 모노리스가 부착된 촉매변환기를 사용하였다.

촉매변환기로 공급되는 유동은 풍동 출구에 어큐뮬레이터를 설치하여 유동을 안정화시킨 후 4개의 직관을 통해 매니폴드에 수직한 유동을 공급하였다. 각 직관에는 어큐뮬레이터 출구로부터 직관의 지름, D, 만큼 떨어진 위치에 니들밸브를 설치하여 유량을 조절하였으며 니들밸브로부터 후류방향으로 1D 떨어진 곳에 2개의 스크린과 약 25D의 직관부를 설치하여 확립된 유동을 만들어 균일한 유동을 공급하였다. 또한 각각의 실린더로부터 유출된 유동이 충분히 혼합되었을 때의 현상을 모사하기 위하여 밸브로부터 20D 정도 떨어진 위치에 피토포관을 설치하여 각각의 관

에 공급되는 유량을 측정함으로써 동일한 유동을 공급하였다.

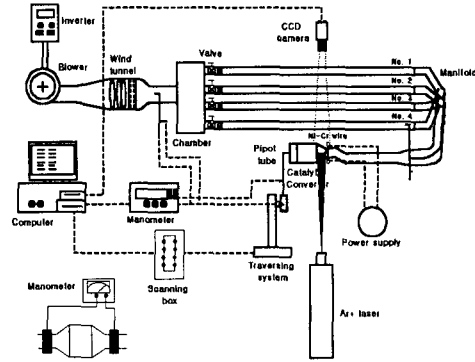


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

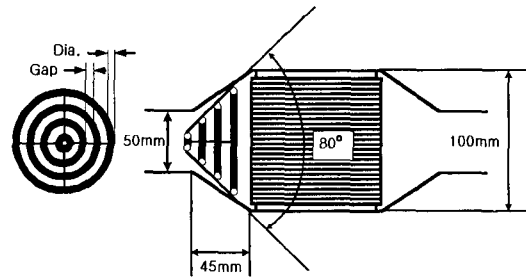


Fig. 2 Shape of cone type circular ring

Table 1 Specification of the cone type circular ring

Model	Diameter of ring (mm)	Ratio of gap between two ring and diameter of ring
1	4	0.5
2		1.0
3		1.5
4	5	0.5
5		1.0
6		1.5

각 실린더로부터 배출된 유동이 촉매변환기내의 유동분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 촉매변환기 입구에서 5공 피토포관을 이용하여 유속을 측정하였다. 또한 촉매변환기 내의 모노리스를 통과하는 유동의 균일도는 모노리스 후면 30 mm 지점에서 피토포관이 부착된 2축 자동이송장치를 사용하여 측정하였다.⁴⁾ 촉매변환기의 압력 손실은 압력공을 촉매변환기의 입구와 출구에 설

치하여 측정하였으며 Smoke wire기법⁵⁾을 이용하여 촉매변환기 확대부의 횡방향 중앙단면에 대하여 유동 분포를 가시화 하였다. 이때 광원은 알곤이온 레이저를 사용하였고 CCD 카메라와 컴퓨터를 통해 영상을 획득하여 처리하였다.

2.2 원추 환형링 제작

촉매변환기내에 설치한 원추 환형링은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 표면이 매끈한 플라스틱 환형링을 원추형으로 배열한 후 확대부에 고정하였다. 환형링은 지름 4 mm와 5 mm를 사용하였으며 전면에서 보았을 때 링과 링 사이의 간격을 환형링 지름의 0.5배, 1배 그리고 1.5배로 변화시켰다. 본 연구에서 사용한 원추 환형링의 제원은 Table 1에 나타냈다.

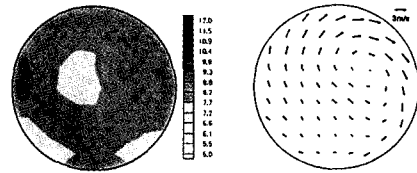
2.3 실험 방법

촉매변환기 입구에서의 유동 분포는 피치각과 요각 모두 $\pm 40^\circ$ 범위에서 각각 5° 간격으로 보정한 United Sensor사의 DC125 5공 피토포를 이용하여 촉매변환기에서 상류쪽으로 10 mm 떨어진 단면의 69개 측정점에서 3차원 유속을 측정하였다. 이때 유입되는 공기의 평균유속을 모노리스 전면의 유속을 기준으로 1.5 m/s, 3 m/s 그리고 4.5 m/s로 변화시키면서 각 유입관으로부터 촉매변환기로 유입되는 유동에 대하여 유속을 측정하였고, 네 개의 유입관에 유동이 동시에 유입될 때에는 1.5 m/s에서 7.5 m/s까지 1.5 m/s 간격으로 측정하였다. 이러한 속도범위는 1500cc 엔진에서 약 3000 rpm 까지를 포함한다.

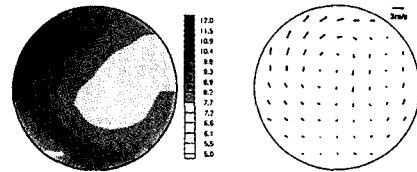
상용 촉매변환기와 Table 1에 나타난 원추 환형링을 부착한 촉매변환기의 유동특성을 파악하기 위하여 촉매변환기의 수축부 부분을 제거한 상태에서 모노리스 후면 30 mm 지점에서 피토포를 이용하여 137개의 측정점에서 유속을 측정하여 유동균일도를 비교하였다.

촉매변환기 확대부의 가시화는 촉매변환기 입구에서 상류쪽으로 약 5 mm 떨어진 지점에 점도

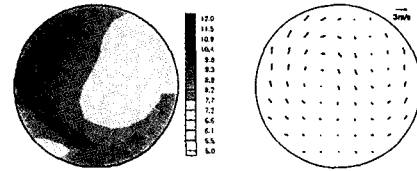
를 증가시킨 파라핀 오일을 도포한 직경 0.5 mm의 니크롬선에 약 20V 전원을 0.5초 동안 공급하여 smoke를 발생시켜 1.5 m/s, 3 m/s 그리고 4.5 m/s의 유속에서 수행하였다. 촉매변환기의 압력손실은 촉매변환기 입구와 출구에 설치한 압력공을 이용하여 모노리스 전면의 유속을 기준으로 1 m/s에서 4.5 m/s까지 0.5 m/s 간격으로 측정하였다.



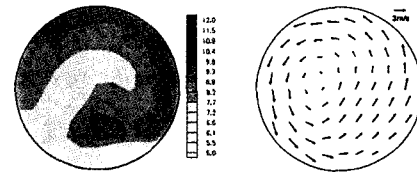
(a) No. 1 open



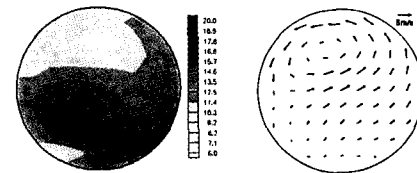
(b) No. 2 open



(c) No. 3 open



(d) No. 4 open



(e) No. 1,2,3,4 open at the same time

Fig. 3 Inlet flow distribution of catalytic converter

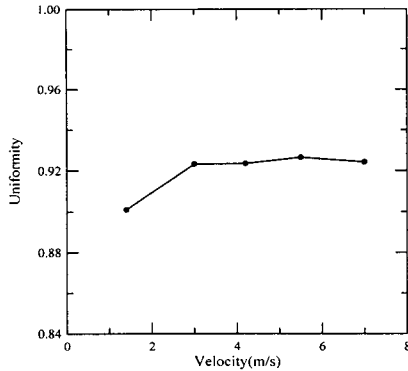


Fig. 4 Inlet flow uniformity as velocity increases

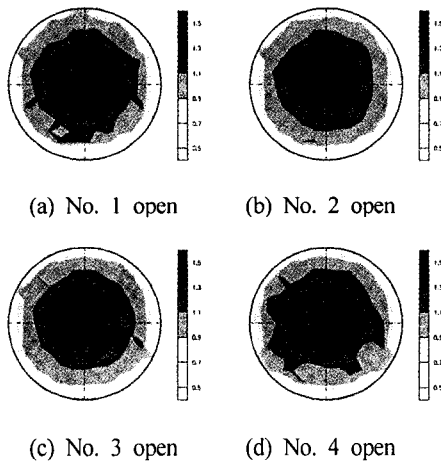


Fig. 5 Normalized flow distribution in the rear of monolith at 3 m/s

3. 결과 및 검토

3.1 촉매변환기 입구의 유동 특성

매니폴드의 각 유로로부터 유입된 유동이 곡관을 거치면서 촉매변환기내로 유입되었을 입구의 유동 분포를 Fig. 3에 나타냈다. 왼쪽의 그림은 주방향 속도성분을 나타낸 것이고 오른쪽의 그림은 주방향 성분을 제외한 속도의 2차 유동을 나타낸 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 촉매변환기로 유입되는 유동은 회전하는 특성을 보이며

각 매니폴드 유로별로 서로 다른 유동분포가 나타남을 알 수 있다. 이러한 유동현상은 매니폴드와 배기관 유로의 형상에 따라 변화되는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 4개의 매니폴드 유로를 통하여 동시에 유동이 공급될 때 모노리스 상류에서 다음과 같이 정의한 유동의 균일도, γ ⁶⁾를 유량에 따라 나타낸 것이다.

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - w_{mean})^2}}{w_{mean}} \quad (1)$$

여기서 w_i 는 국부적인 유속이며 w_{mean} 은 평균유속이다.

그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가함에 따라 유동균일도는 증가하다가 일정해지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 고속의 경우에는 운동량이 크기 때문에 벽면과의 충돌이나 각 스트림과의 충돌이 활발하게 일어나기 때문에 저속에 비하여 잘 혼합되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 유동 균일도가 가장 낮게 나타난 유속 1.5m/s는 Re수로는 3800 정도로 천이구역이며 유속 3m/s는 Re수로는 7600 정도로 완전한 난류 구간이다. 매니폴드에서 나오는 유동은 약 관지름의 20배 이상의 길이를 가지는 원관을 통과하기 때문에 촉매변환기로 유입되는 유동은 거의 완전 확립된 유동이라고 볼 수 있다. 따라서 층류나 천이구역보다는 완전한 난류의 경우에 유속의 분포가 균일하기 때문에 고속의 경우에 유동균일도가 좋게 나타난다.

3.2 모노리스 후면에서의 유동 분포

Fig. 5는 매니폴드를 통하여 촉매변환기로 공급되는 공기의 유속을 모노리스 전면 유속을 기준으로 3 m/s로 설정하였을 때 모노리스 후면의 국부적인 유속을 평균유속으로 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 모노리스를 통과한 유동은 Fig. 3에 나타낸 촉매변환기 입구의 유동분포와는 다르게 매니폴드의 유로에 관계없이 모노리스 전면적 중 배기관 직경의 면적에 상응하는 부분에 유동

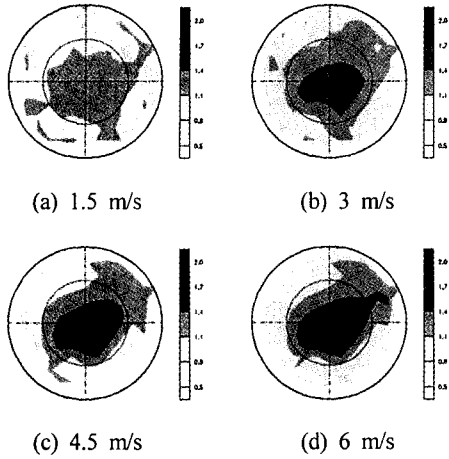


Fig. 6 Normalized flow distribution in the rear of monolith for various velocity

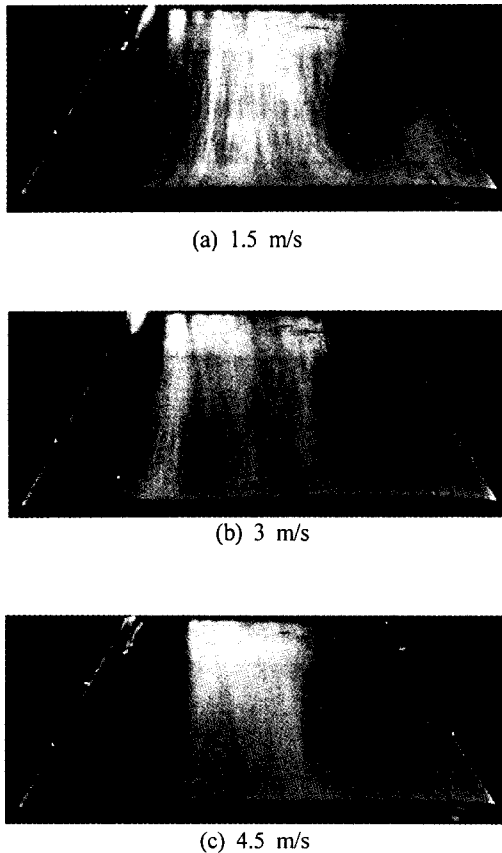


Fig. 7 Flow visualization for commercial model

이 국부적으로 편중됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 촉매변환기의 확대부에 의하여 유동이 거의 확산되지 않기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과로 볼 때, 촉매변환기 상류의 유동은 모노리스를 통과하는 유동에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6은 4개의 매니폴드 유로를 통하여 동시에 유량이 공급되었을 때 유속에 따른 모노리스 후면의 유동분포를 평균유속으로 나누어 나타낸 것이다. 촉매변환기로 유입되는 유동의 유속이 증가할수록 유동이 모노리스의 중심으로 치우치는 경향이 뚜렷하게 나타났으며 이로 인하여 유동균일도는 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 유속에 따른 상용 촉매변환기의 확대부를 Smoke wire 기법을 이용하여 가시화한 결과를 나타낸 것이다. 촉매변환기 확대부의 주된 역할은 유속을 감소시켜 정압력을 회복시키고 모노리스 전면의 유동분포를 균일화하는 것이다. 하지만 그림에서 알 수 있듯이 상용 모델의 경우에는 촉매변환기로 유입되는 유동이 모노리스의 중심으로 치우치며 모노리스에 부딪친 유동이 전면으로 확산되어 유입되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 확대부의 각도를 줄임으로써 개선할 수 있으나 배기시스템 형상의 변화가 클 경우 실제 차량의 구조적인 또는 공간적인 문제로 인하여 차량 장착의 문제가 발생하게 된다. 따라서 주어진 촉매변환기의 형상내에서 유동을 균일화하는 기술이 요구된다.

3.3 원추 환형링을 부착한 촉매변환기의 유동 분포

모노리스의 전면유속이 4.5 m/s일 때 6가지 원추 환형링을 부착한 모노리스 후면의 유동균일도를 Fig. 8에 나타냈다. 현재 사용되고 있는 촉매변환기의 경우에는 유동균일도가 약 0.84 정도로 나타났는데 본 실험에서 제시한 Model 2와 Model 5를 부착한 촉매변환기는 그 값이 거의 0.88 정도까지 증가하였다. 그리고 그림에서 일

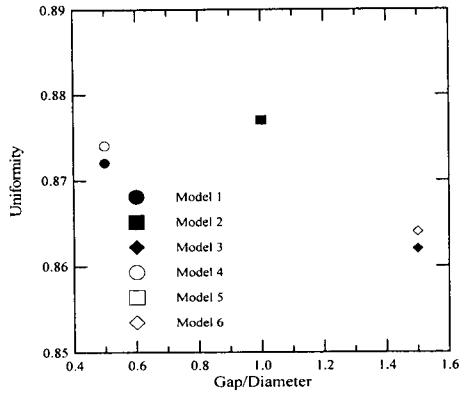


Fig. 8 Comparison of flow uniformity

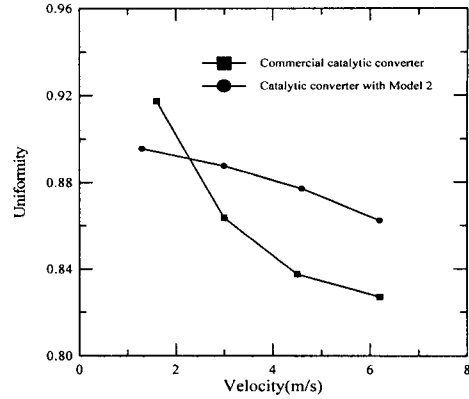


Fig. 10 Flow uniformity for various velocity

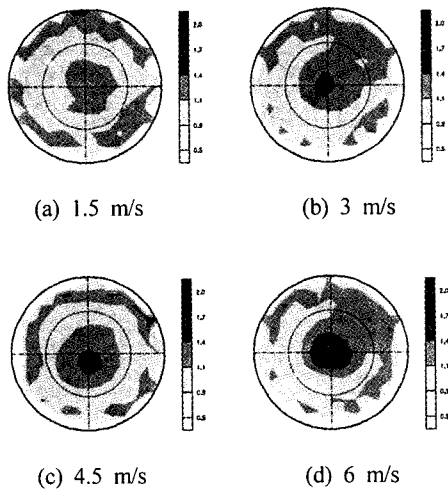


Fig. 9 Normalized flow distribution in the catalytic converter with Model 2 for various velocity

수 있듯이 환형링의 지름과 간격의 비가 동일한 경우에는 거의 비슷한 유동균일도를 보였으며, 특히 그 비가 1인 경우에 유동의 균일도가 가장 좋은 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 Model 2를 장착한 촉매변환기에 대하여 모노리스 전면의 평균유속 변화에 따른 모노리스 후면의 유동분포는 Fig. 9에 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 6에 나타난 상용 촉매변환기에 비하여 원추 환형링을 장착한 촉매변환기의 유동분포가 현저하게 향상되는 것

을 볼 수 있다. 이러한 현상은 모노리스 전면의 평균유속이 증가하여도 마찬가지로 나타났다.

유동의 균일도는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 촉매변환기로 유입되는 유속이 증가할수록 감소하였지만 현재 사용되고 있는 상용 촉매변환기와 비교해 보았을 때 2m/s 이상에서는 유동균일도가 향상되는 것으로 나타났다.

유동이 촉매변환기의 확대부에 설치한 환형링을 통과하면서 Fig. 11에 나타난 바와 같이 약간의 압력손실을 유발하는데 모노리스 전면 유속이 3 m/s에서 그 양은 대략 상용 촉매변환기의 압력손실과 비교하여 12% 정도 증가하였다. 하지만 전체 배기시스템의 압력손실에서 촉매변환기에 의한 압력손실은 차종에 따라서 차이가 있지만 참고문헌 [7]에 따르면 대략 10% 정도로 제시되어 있다. 따라서 원추 환형링에 의한 압력손실 증가량은 전체 배기시스템에서 약 1% 정도이므로 전체 배기시스템의 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 사료된다.

Fig. 12는 본 연구에서 제시한 원추 환형링을 부착한 상태에서 모노리스의 전면유속을 변화시키면서 Smoke wire 기법을 이용하여 가시화를 수행한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 확대부로 유입되는 유동이 환형링의 영향에 의하여 모노리스의 전면으로 확산되는 것을 알 수 있다. 이

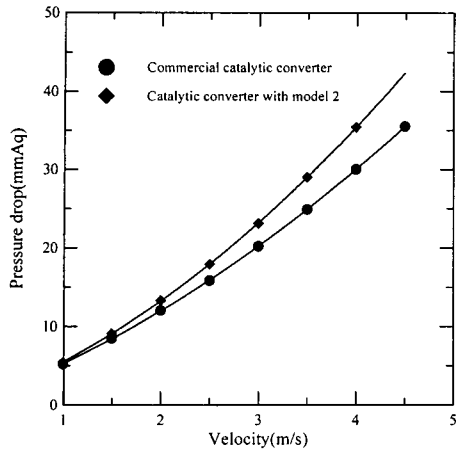


Fig. 11 The comparison of pressure drop



(a) 1.5 m/s



(b) 3 m/s



(c) 4.5 m/s

Fig. 12 Visualization of flow for Model 2

러한 현상은 모노리스 통과하는 유동의 균일도를 향상시켜 반응의 신뢰성과 모노리스의 수명 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 매니폴드로부터 배기관을 통하여 배출되는 유동이 촉매변환기내의 유동에 미치는 영향을 정상상태 유속측정과 가시화를 이용하여 파악하였고 주어진 촉매변환기의 형상을 유지한 상태에서 유동의 균일도를 향상시킬 수 있는 방안으로 원추 환형링을 확대부에 부착한 후 유동 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 매니폴드로부터 배기관을 통하여 촉매변환기로 유입되는 유동의 형태는 매니폴드의 각 유로에 따라 서로 다르게 나타나지만 모노리스를 통과한 후에는 배기관 직경만큼의 면적에 유동이 편중되기 때문에 매니폴드의 형상이나 배기관의 형상은 모노리스를 통과하는 유동의 균일도에 비교적 적은 영향을 준다.

2) 촉매변환기의 확대부에 원추 환형링을 설치한 결과 현재 사용되고 있는 촉매변환기에 비하여 압력손실은 약간 증가하였지만 유동균일도는 향상되었다.

3) 원추 환형링의 지름과 간격의 비가 동일한 경우에는 거의 비슷한 유동균일도를 보였으며, 특히 그 비가 1인 경우에 유동의 균일도가 가장 좋은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) D. W. Wendland & W. R. Mattes, "Visualization of Automotive Catalytic Converter Internal Flow", SAE 861554, 1986.
- 2) D. W. Wendland W. R. Mattes & P. L. Sorrell, "Effect of Header Truncation on Monolith Converter Emission-Control Performance", SAE 922340, 1992.

- 3) H. Bressler et al., "Experimental and Predictive Investigation of a Close Coupled Catalytic Converter with Pulsating Flow", SAE 960564, 1996.
- 4) S. F. Benjamin et al., "An Experimental and Predictive Study of the Flow Field in Axisymmetric Automotive Exhaust Catalyst Systems", SAE 961208, 1996.
- 5) 손명환, 백동기, 임기철, 박민우, "Smoke-Wire 기법을 사용한 3차원 날개의 소용돌이 후류 흐름 가시화", 한국항공우주학회지 제18권 1호, 1990.
- 6) H. Weltens et al., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction", SAE 920780, 1992.
- 7) 유재석, 이은호, 이철구, "배기가스 후처리 시스템 최적화를 위한 시험분석기술개발에 관한 연구보고서", 아주대학교, 2000.