

촉매 변환기 내부 유동의 실험적 해석

유성출[†]

Experimental Analysis on the Catalytic Converter Internal Flow

S. C. Yoo

Abstract. Increasing the active catalyst surface area is important in improving a converter's efficiency. In addition, uniform flow is advantageous in that it produces more efficient catalytic conversion. This results in the ability to use a smaller catalytic converter with uniform flow as opposed to a larger converter requirement for non-uniform flow. Therefore, it is important to characterize the internal flow of the catalytic converter. To characterize the system's flow patterns, velocity measurements were taken at the mid and exit planes of a ceramic honeycomb catalytic converter at flow rates of 37.8 l/s and 94.4 l/s. Measurements were conducted using LDV. The profiles were measured along both the major and minor axis of the planes. Primary flow direction velocities measured along the minor axis, at both flow rates, varied greatly at the mid plane and somewhat at the exit plane. The areas of greatest air flow were seen near the edges of the walls and on the side of the converter opposite the flow's entrance region. It also appears that the high velocities opposite the intake are due to the design of the entrance region. The entrance region is possibly too small to properly redirect the vertically entering fluid into an evenly distributed flow in the primary flow direction.

Key Words: Ceramic Honeycomb Catalytic Converter(세라믹 하니콤 촉매 변환기), LDV(레이저 유속계), Primary Flow Direction(주 유동방향), Major Axis(장축), Minor Axis(단축), Ensemble Averaged Velocity(앙상블 평균 속도)

1. 서 론

자동차에서 발생하는 유해 배기가스는 환경을 오염시키고 지구 온난화와 산성비, 스모그 그리고 건강상의 문제들을 일으킴에 따라 각국은 배기가스에 대한 규제를 더욱 강화하고 있다. 이들 배기가스 배출은 내연기관의 연소과정과 밀접한 관계가 있으며, 공기와 연료에 함유된 불순물도 영향을 미친다. 유해 배기가스의 배출을 줄이는 이상적인 방법으로는 연소효율이 좋은 내연기관을 만들고, 연료를 잘 개발하여 유해 배기가스의 발생을 극소량으로 줄이는 것이지만, 현재의 기술로는 이것이 불가능한 상황이다⁽¹⁾. 따라서 유해 배기가스를 줄이기 위한 방법으로 촉매 변환기(catalytic

converter)를 이용한 배기가스 후처리 법은 대단히 중요하며, 이에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

촉매 변환기는 내연기관의 배기관을 따라 장착된다. 본 연구에 사용된 촉매 변환기 내부는 배기유동의 통기저항이 우수한 다공성의 세라믹 하니콤 브릭(ceramic honeycomb brick) 구조로 되어있으며, 세라믹 통로의 표면은 촉매 물질이 포함되어 있다. 촉매는 화학반응에 필요한 에너지를 줄여 화학반응을 가속시키며 유해 배기가스의 산화를 촉진시킨다. 그러므로 촉매 변환기 내 하니콤 브릭 입구에서의 균일한 유동장 분포는 더욱 효율적인 촉매전환(catalytic conversion)을 위해 매우 중요하다. 하니콤 브릭 표면의 불균일한 유동장 분포는 촉매의 활성화를 지체시키고 정화효율을 떨어트리며, 열·화학적 노화의 원인이 된다^(2,3). 최근에는 냉각시동 후 촉매가 활성화 온도에 이르는 시간을 단축시켜 배기가스에 대한 규제를 충족시킬 수 있도록 촉

[†]한라대학교 기계자동차공학부
E-mail : scyoo@halla.ac.kr

매 변환기의 장착위치가 배기포트에 가까워지고 있는 추세이다. 하니콤 브릭 표면의 유동장 분포를 균일하게 하는 것은 정화효율과 촉매수명을 향상시킬 뿐만 아니라 불균일한 유동장 분포를 갖는 촉매 변환기에 비해 크기를 줄일 수 있어 고가의 희토류(rare earth metals)를 사용하는 촉매 변환기 제작비용 면에서도 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 촉매 변환기의 입구(inlet)와 출구(outlet)가 90°를 이루는 경우 변환기 내의 유동장 특성을 레이저 유속계(LDV)를 사용하여 37.8 //s와 94.4 //s 유동영역에서 분석하였으며, 배기유량 변화가 유동장에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구를 통해 변환기 입구와 출구가 90° 꺾이는 경우 변환기 내의 유동장 분포에 대한 실험적인 자료를 시각적 관점에서 보여주고, 정량적인 면에서 유동특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

촉매 변환기 내의 유동장을 분석하기 위하여 레이저 유속계 측정을 정상상태 실험조건에서 수행하였다. 실험장치는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 촉매 변환기와 정상상태 유동장을 만들기 위한 장치로 구성된다. 촉매 변환기에 필요한 유량을 공급하는 장치는 4단 원심 송풍기로서, 유량조절은 송풍기 하류에 설치된 트로틀플레이트(throttle plate)의 각도변환으로 하였다. 촉매 변환기에 공급되는 유량을 측정하기 위해 Meriam Laminar Air Flow Meter(Model 50MCZ-4)를 설치하였고, 송풍기에서 생성된 유량은 유량계를 통과하여 촉매 변환기로 공급되도록 하였다, 실험장치 구동 시 온도가 일정해지는 정상상태가 될 때까지 약20분 동안 장치를 구동시켜 온도변화에 따른 실험의 부정확성을 배제하였다.

촉매 변환기 내의 속도를 측정하기 위해서는 프로브가 유동장에 영향을 미치지 않는 비접촉(non-intrusive) 측정기술 선택이 매우 중요하다. 본 실험에서 속도분포를 측정하기 위해 사용한 장치는 비접촉 측정방식인 레이저 유속계이다.

레이저 유속계를 이용한 촉매 변환기 내부의 중간부분(between honeycomb bricks)과 출구부분(near the exhaust after the second brick)의 주 유동방향(primary

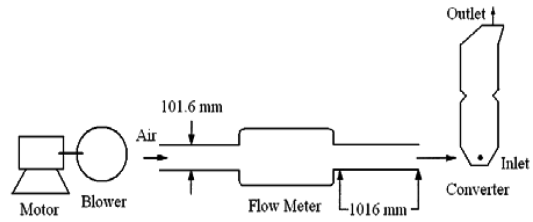


Fig. 1. Block diagram of flow system for catalytic converter.

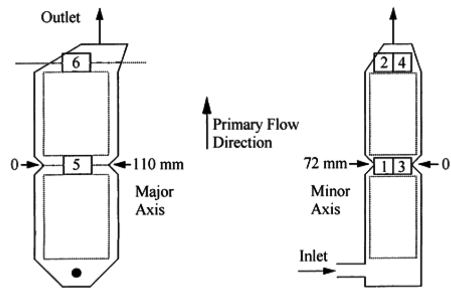


Fig. 2. Axes description and window locations for catalytic converter.

flow direction) 유동장 측정은 광학적으로 투명한 플렉시글래스(plexiglas)로 제작·설치된 정면 관측창과 측면 관측창을 통하여 가능하였다. 관측창은 양산되는 승용차용 촉매 변환기를 부분적으로 가공한 후 각각 설치하였다. 정면 관측창은 촉매 변환기의 중간부분과 출구부분의 장축(major axis)에 평행한 2측에서 주 유동방향 유동장 측정을 위하여 사용하였으며, 측면 관측창은 중간부분과 출구부분의 단축(minor axis)에서 주 유동방향 유동장 측정을 위하여 사용하였다. Fig. 2는 관측창의 위치와 배기가스의 주 유동방향을 나타낸다. 관측창 내부 표면은 촉매 변환기 형상과 동일하게 정밀가공하여 관측창의 설치가 내부유동에 영향을 미치지 않도록 하였다.

2.2 레이저 유속계

레이저 유속계는 Coherent사 제품의 4와트 Ar-Ion 레이저와 TSI 제품의 렌즈, 신호 처리장치(digital burst correlator, IFA750), Bragg-cell frequency shifter, 이송장치 그리고 데이터 취득을 위한 컴퓨터 등으로 구성하였다.

레이저 유속계는 유동장 내에 존재하는 입자의 속도를 측정해야 하므로 입자의 선택은 매우 중요하다. 즉, 입자는 유체유동을 정확하게 따라가야 하며 속도측정

에 사용되는 파장에서 높은 굴절률(large refractive index)을 가져야 한다. 위와 같은 목적을 위하여 분무(atomize)된 propylene glycol과 물의 혼합물을 산란입자로 사용하였다. 혼합물의 분무는 six-jet atomizer(TSI, Model: 9306)를 사용하였으며 분무된 입자 크기의 범위는 0.6-1.5 μm 이었다.

2.3 레이저 유속계 측정과 데이터 처리

촉매 변환기 내부 난류 유동의 중요한 특성은 난류 자체의 불규칙성(irregularity)과 무작위 변동(randomness)이다. 이러한 변동은 모든 방향으로 일어나며, 난류 유동장을 정의하는 데는 측정 데이터의 통계적 기술을 이용하고 있다. 레이저 유속계 측정에 의한 촉매 변환기 내부 유동의 정량적 해석에는 앙상블 평균 속도(ensemble averaged velocity)를 사용하였다.

레이저 유속계 측정은 중간부분과 출구부분에서 3개의 서로 다른 각각의 축을 따라 실시하였다. 관측창1과 2는 각각 중간부분과 출구부분에서 하니콤 브릭 장축에 평행하고 입구 쪽으로 15 mm 떨어진 축에서의 주 유동방향 속도 측정을 위해 사용하였다. 관측창3과 4는 각각 중간부분과 출구부분에서 하니콤 브릭 장축에 평행하고 입구 반대쪽으로 15 mm 떨어진 축에서의 주 유동방향 속도 측정을 위해 사용하였다. 관측창5와 6은 각각 중간부분과 출구부분에서 하니콤 브릭 단축의 주 유동방향 속도 측정을 위해 사용하였다. 하니콤 브릭 장축에 평행한 축을 따라서는 측정지점간 거리를 5 mm로 하여 측정을 하였으며, 하니콤 브릭 단축을 따라서는 측정지점간 거리를 3 mm로 하여 측정을 하였다.

촉매 변환기 내 유동장의 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 중간부분과 출구부분 각각 60곳에서 측정을 하였으며 데이터 율(data rate)은 1지점 당 1 kHz 이었다. 각 측정지점의 정량적인 값은 유동패턴을 연구하는데 매우 귀중한 자료를 제공하며 특히, 효율적인 촉매 변환기 설계에 매우 유용하게 사용할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

촉매 변환기의 부적절한 설계는 유동저항의 증대, 정체유동 발생 및 유동의 비균일성을 발생시키므로 촉매의 성능저하를 유발한다. 촉매의 성능저하는 촉매 변환기의 크기를 증가시키고 내구성을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 촉매 변환기의 내부 유동장 특성에

대하여 정확하게 이해하는 것은 매우 중요하다. 속도 분포는 3개의 서로 다른 축에서 각각 측정하여 비교하였다. 장축에 평행한 축과 단축에서의 속도분포는 변환기 벽에 가까워질수록 높은 값을 보이는 서로 비슷한 유동패턴을 나타내었다.

Fig. 3은 37.8 l/s의 유량에서 하니콤 브릭 사이 중간부분의 유동분포를 측정한 것이다. 유동장은 전체적으로 균일하지 않은 것을 보여준다. 변환기 입구와 평행한 단축을 따라서 주 유동방향 속도는 입구 반대쪽 벽으로부터 9 mm 떨어진 위치에서 최대값 11.5 m/s를 나타내며, 축을 따라 입구 쪽으로 가면서 감소하여 최소값 2.5 m/s에 이른 후 입구 쪽 벽 15 mm 부근부터 다시 급격히 상승하는 것을 보여주지만 벽 쪽에 근접한 부분에서의 최대값 7 m/s는 입구 반대쪽 벽 부근의 최대값에 비하여 낮은 값을 보여준다. 단축을 따라 형성되는 속도분포는 벽 근처의 값이 중심부분에 비하여 높게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 변환기의 입구 위치와 관련이 있는 것으로 판단된다. 유동이 변환기로 들어오면서 입구 반대쪽 벽과 충돌한 후 벽을 따라 흐르다가 하니콤 브릭과 부딪치는 영역에서 높은 속도분포가 관찰된다. 충돌유동은 짧은 쪽 유동과 긴 쪽 유동으로 분리된다. 짧은 쪽 유동은 입구를 통하여 유입된 유동이 입구 반대쪽 벽과 부딪친 후 벽면을 따라 하니콤 브릭으로 향한다. 긴 쪽 유동은 입구 반대쪽 벽을 따라 하니콤 브릭 반대방향으로 이동하여 입구 쪽으로 방향을 전환한 후 입구 쪽 벽을 따라 하니콤 브릭으로 향한다. 이런 현상이 입구 쪽과 입구 반대쪽에 높은 속도를 형성하는 것으로 사료된다. 이러한 구조적 특징은 유동장의 불균일한 분포를 갖게 하며,

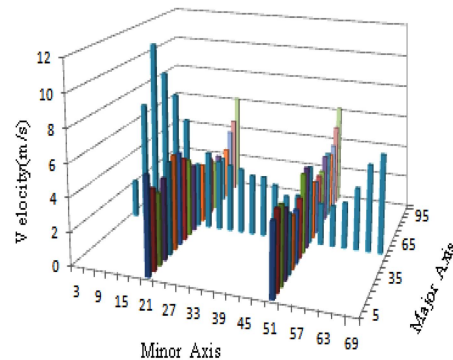


Fig. 3. Velocity measured at mid-plane between honeycomb bricks(37.8 l/s).

입구와 입구 반대쪽 촉매체적(catalytic volume)의 과도한 사용을 초래하여 국부적 과열에 의한 열응력 집중으로 촉매 변환기의 내구성에도 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 문제는 유동이 제한된 공간에서 급격히 선회하는 경우 피할 수 없는 상황으로 판단된다.

Fig. 4는 37.8 l/s의 유량에서 출구부분의 유동분포를 측정된 것이다. 단축을 따라 형성되는 주 유동방향의 속도분포는 중간부분과 비교하였을 경우 유동변화가 약하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 입구 반대쪽 벽의 최대값(7 m/s)은 벽으로 부터 12 mm 떨어진 곳에 위치하며 중간부분에 비하여 더욱 완만하게 감소하면서 최소값(4.8 m/s)에 이른 후 입구 쪽 벽 9 mm 위치에서 다시 완만하게 상승하며 벽으로부터 3 mm 떨어진 위치에서 최대값 6 m/s에 이른다. 단축을 따라서 형성되는 유동장 분포는 중간부분과 출구부분이 유사함을 보여주고 있으나 출구부분에서 더욱 고른 속도분포가 넓게 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 중간부분(표준편차: 3)과 출구부분(표준편차: 2)의 표준편차를 비교하여도 출구부분이 더욱 고른 속도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

장축을 따라 형성되는 유동장 특징은 출구 위치의 영향을 많이 받는 것이다. 속도측정은 장축으로부터 입구 쪽과 입구 반대쪽으로 각각 15 mm 떨어진 평행한 축에서 하였다. 중간부분에서 입구 반대쪽으로 15 mm 떨어진 위치의 측정값은 입구 쪽으로 15 mm 떨어진 곳의 값보다 크게 나타났다. 이 현상은 단축에서와 마찬가지로 유동 입구의 반대쪽에서 높은 값을 갖는 것과 같다. 입구 반대쪽으로 15 mm 떨어진 축에서의 속도분포는 5 mm 위치에서 5.9 m/s의 값을 나타내며 감

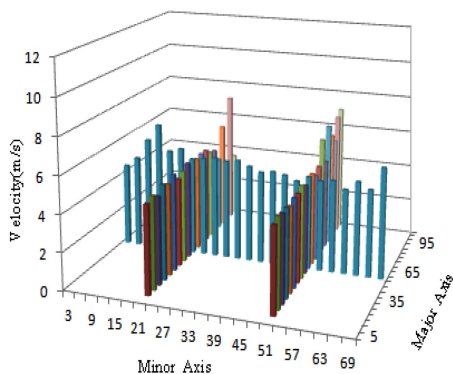


Fig. 4. Velocity measured at exit plane(37.8 l/s).

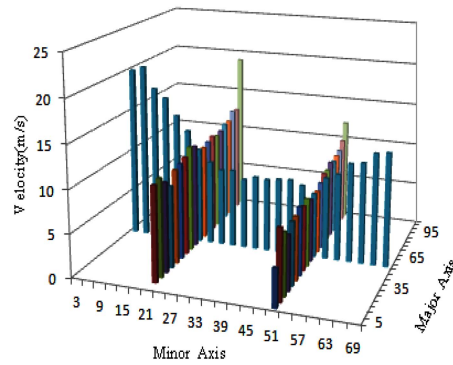


Fig. 5. Velocity measured at mid-plane between honeycomb bricks(94.4 l/s).

소하다가 15 mm 위치에서 4.3 m/s의 값을 보이고, 다시 상승하여 30 mm 위치에서 5.7 m/s의 값을 가지며 거의 직선적으로 감소하다가 65 mm 위치에서 최소값 2.8 m/s에 도달하고 거의 평형상태를 유지하다가 90 mm 위치부터 직선적으로 증가하여 105 위치에서 최대값 6.5 m/s의 값을 갖는다. 입구 쪽으로 15 mm 떨어진 장축에 평행한 축에서의 속도분포는 10 mm 위치에서 4.7 m/s 값을 갖고 직선적으로 감소하다가 30 위치에서 최소값 3.2 m/s 값을 가지며 직선적으로 증가하다가 50 mm 위치에서 5 m/s의 값을 나타내고, 그 후 감소와 증가를 하다가 105 mm 위치에서 6.6 m/s의 값을 갖는다. 장축에 평행한 축을 따라 나타나는 주 유동방향의 속도장 특징은 변환기 출구(outlet) 쪽에서 매우 높은 속도분포를 나타내는 것이다. 이것은 출구 쪽으로 유동이 흐르기 좋은 조건으로 압력저하가 작다는 것을 나타낸다. 또한, 출구 쪽 하니콤 브릭을 통한 유동율이 더욱 크다는 것을 의미한다. 출구부분에서 나타나는 속도분포 패턴도 거의 동일하지만 유동이 더욱 균일해지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 유량이 94.4 l/s일 경우 중간부분과 출구부분의 주 유동방향 속도분포를 나타낸다. 중간부분에서 단축을 따라 형성되는 속도분포는 최대값(20.5 m/s)이 입구 반대쪽 벽에 더욱 접근한 위치(6 mm)에서 관찰되고, 최소값(7.6 m/s)도 축의 중심부분(33 mm)으로 이동한 것 이외에는 전체적으로 낮은 유량에서 나타나는 특색을 보였다. 낮은 유량에서 속도분포의 최소값은 입구 쪽으로 치우친 54 mm 위치에서, 최대값은 입구 반대쪽 벽에서 9 mm 떨어진 위치에서 관찰되었다. 출구부분에서도 최대값(17.8 m/s)은 입구 반대쪽

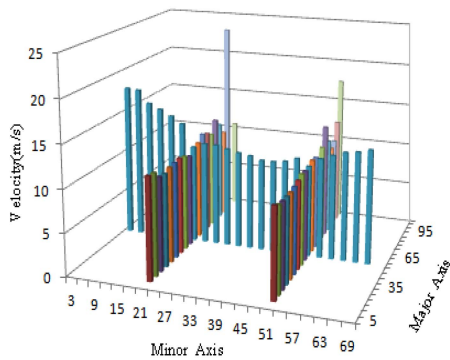


Fig. 6. Velocity measured at exit plane(94.4 l/s).

벽에서 3 mm 지점에 위치하며 낮은 유량에서 발생하는 벽에서 12 mm 떨어진 지점에 비하여 더욱 벽에 가까운 곳에 위치한다. 최소값(11.5 m/s)도 축 중심부분(39 mm)에 위치한다. 속도분포는 최대값과 최소값의 위치가 낮은 유량에 비하여 입구 반대쪽 벽으로 이동하지만, 서로 비슷한 유동장 특성을 보였다. 중간부분(표준편차: 3)과 출구부분(표준편차: 1.75)의 표준편차를 비교하면 출구부분이 더욱 고른 속도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 장축을 따라 나타나는 속도장 특징은 최대속도가 출구 쪽 벽 근처에 형성되고 축을 따라 중앙부분으로 가면서 감소하다가 축 중간부분에서 일정한 값을 유지하고 다시 감소하다가 반대쪽 벽에 접근하면서 다시 상승한다. 모든 데이터는 대체로 비슷한 속도분포 특징을 나타낸다. 출구 쪽 벽부터 축 중간부분까지 영역이 축 중간부분부터 출구 반대쪽 벽까지 영역에 비하여 높은 속도분포를 나타내며, 출구 부분에서 고른 속도분포가 넓게 형성되는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

축매 변환기의 입구와 출구가 90°를 이루는 경우 변환기 내 유동장의 특성을 실험적 해석 연구를 수행하

여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험에 사용된 축매 변환기의 경우, 두 가지 유동 영역에서 변환기 내 속도분포가 하니콤 브릭 테두리 쪽으로 높게 형성되는 것을 관찰할 수 있었다.
- 2) 두 가지 유동영역에서 출구부분의 측정 축을 따라 형성되는 속도분포는 중간부분에 비하여 더욱 고르게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 유동장 특성은 중간부분의 빈 공간이 주 유동방향 속도변동의 폭을 줄이는 것으로 판단된다.
- 3) 중간부분과 출구부분 모두에서 단축을 따라 형성되는 유동장 분포는 최대값과 최소값이 높은 유량에서 입구 반대쪽 벽으로 더욱 치우치는 경향을 관찰할 수 있었다.
- 4) 실험에 사용된 축매 변환기 구조에서는 출구의 위치가 장축에 평행한 축에 형성되는 속도분포에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 Schock 교수님과 이근철 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Pulkrabek, W. W., 1997, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", Prentice Hall, pp. 277~307.
- 2) Chris Burgess, Tony Collier, Mark Brogan and Alex Leong, 2005, "The Effect of Different Ageing Conditions on Spatial Variations in Emissions Across the Radius of a Closed-coupled After-treatment System", SAE Paper, No.2005-01-1095.
- 3) Michael Breuer and Christof Schemus, 2000, "Experimental Approach to Optimize Catalyst Flow Uniformity", SAE Paper, No.2000-01-0865.