

< 논문 >

2륜 자동차 촉매변환기내 배기가스 온도균일도 특성과 Light-Off에 관한 연구

이중섭* · 정한식† · 정효민** · 이철재***
(2006년 11월 1일 접수, 2007년 5월 19일 심사완료)

A Study on Characteristics of Exhaust Gas Temperature Uniformity and Light-off in Motorcycle Catalytic Converter

Chungseub Yi, Hanshik Chung, Hyomin Jeong and Cheoljae Lee

Key Words: Motorcycle(2륜자동차), Catalytic Converter(촉매변환기), Exhaust Pressure(배기압력), Light-Off(활성화시기)

Abstract

This study represents the temperature uniformity in catalytic converter. Present research model type is a monolithic catalytic converter. This type was been widely used for complying the regulations of pollutant emissions from automobiles. The mean experimental parameters are engine speed and ceramics monolith in the catalytic converter. The experimental test engine model used was the 124.1cc motorcycle engine. The experimental study using thermal imaging method shows the megaphone type model has larger effective area than the basic model. The rate of effective area in the basic model is about 8.9 % and the megaphone type model are 41.52 %, 34.60 %, 33.43 %, 25.43 %, 17.82 % according to the diffuser angle 4° to 8°. In conclusion, the megaphone type monolithic converter has higher efficiency of reducing the pollution with less noise compared to the basic shape. We believe this will be very important as a design guide of the advanced motorcycle.

1. 서론

현재까지 일반 자동차에 대한 촉매변환기의 개발 및 연구는 급속도로 발전해왔다. 이에 반해 2륜 자동차의 경우 촉매변환기에 관한 연구는 아주 미흡한 실정이다. 최근 선진국을 중심으로 환경문제에 대한 규제가 강화되고 있다. 특히, EC(european community) 등은 자국 내로 수입되는 모든 차량에 대한 촉매변환기의 설치가 의무화

되어 있다. 따라서 과거와 같이 엔진의 출력향상 뿐만 아니라 배기가스 배출물 규제를 만족시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 유럽, 대만, 일본, 미국 등에서는 2륜 자동차에도 일반 자동차와 같이 공해저감장치를 부착하여 생산하고 있고, 단계적으로 배출허용기준 및 측정 방법을 강화하고 있으며, 구미와 대만은 배기량의 크기에 관계없이 동일한 허용기준을 적용하고 있다. 현재까지 국내에서 생산되는 2륜 자동차의 배기량은 125 cc 이하가 주를 이루고 있으며, 앞으로 큰 배기량의 2륜 자동차 생산이 증가할 것으로 판단되고 있다. 따라서 배기량의 증가로 인해 배출되는 배기가스의 농도를 낮추기 위해 필연적으로 촉매변환기에 대한 인식전환이 필요한

† 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

Email : hschung@gnu.ac.kr

TEL : (055)-640-3185 FAX : 055-640-3188

* 삼원기술(주) 기술연구소

** 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

*** 동명대학교 자동차공학과

시점에 와 있다. 촉매변환기의 설치적용은 생산 단가가 상승하므로 제조사의 부담일 수밖에 없다. 또한 비교적 적은 배기량의 2륜 자동차일 경우 엔진 특성상 출력하락으로 이어지기 때문이다. 또한 기계식 기화기로 이론공연비를 만족시키기는 매우 어려워 연료분사식 또는 2차 공기분사기를 설치하여 강력한 환경규제로 인해 배출물 규제에 만족시켜야 되는 시점에 이르렀다. 그러나 환경규제의 측면에서 보면, 가장 능동적으로 배출물을 저감시킬 수 있는 것은 현재까지 촉매변환기 밖에 없다고 판단된다. 그러나 앞서 설명한 촉매변환기에 대한 연구는 일반 자동차에 대한 연구결과이며, 2륜 자동차에 적용을 위한 촉매변환기 연구는 전무한 상태이다. 초기의 촉매변환기는 배출물의 저감을 위한 부가적인 형태의 장치로 개발되었으므로 배기시스템은 한정된 공간 내에 설치해야 한다. 또한 촉매변환기로 인해 배압을 최소화시키기 위해서 길이가 짧은 모델이 선호되다가 변환성을 향상시키기 위해서 배기가스의 체류시간을 증가시키기 위한 방법으로 적절한 크기의 부피가 보장되어야 한다. 따라서 촉매변환기 단면은 불가피하게 배기관 단면에 비해 크게 설계되어야 했고, 이로 인해 모노리스 전단부에 확대관(diffuser)이 설치되어야 했다.^(1,2) 또한 Fu⁽³⁾ 등과 Shuai⁽⁴⁾ 등은 실험 및 수치해석을 통하여 모노리스 확대부가 모노리스 중심선과 오프셋이 된 촉매변환기의 경우 최적 기울기각은 45°~60°임을 확인하였다.

현재 진행되고 있는 연구는 배기 후처리 효율 향상, 희박연소 및 층상급기, 배기 재순환량 최소화 및 정밀한 연료량 제어 등을 통하여 배기규제치를 만족시키기 위한 연구가 그 주종을 이루고 있으나 배기 배출성분 중 일산화탄소와 미연탄화수소는 자동차 배기시험(FTP-75)인 냉시동 mode의 주행 초기에서 담체 활성화온도(light-off temperature)에 도달하기 전인 냉시동 구간에서 총규제치의 50~80%가 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 냉시동 이후 가능한 빠른 시간내에 촉매가 작동온도에 이를 수 있도록 하는 기술 연구가 소개되고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾

본 연구는 아직 확대되지 않은 2륜 자동차에 적용하기 위한 촉매변환기 최적형상을 검토하기 위해 세라믹 촉매담체를 사용하였고, 기존의 일반 자동차 촉매변환기 형상과 2륜 자동차에 적합

하게 개선된 모델에 대한 온도분포의 균일성과 light-off가 시작되는 시점을 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

촉매담체의 온도분포를 측정하기 위해 K-type의 열전대를 사용하였으며, 실험 데이터를 얻기 위해 데이터 기록계를 열전대와 연결하고, 컴퓨터를 사용하여 Fig. 1과 같이 데이터를 저장하였다. 모델의 열전대 설치는 Fig. 2와 같으며, 실험에 사용된 엔진제원은 Table-1과 같다. 실험 엔진의 적열상태를 확보하기 위해 2분간 예열 후 실험변수인 3000 rpm, 4000 rpm, 5000 rpm에 대하여 Fig. 3과 같은 기하학적 모델변수를 설정하여 온도분포를 측정하였으며, 정상상태에 도달 할 때까지의 온도분포를 측정하였다. 이 때 실험환경은 실내온도 13 °C~17 °C, 대기압은 755 mmHg~770 mmHg, 습도는 평균 42 %의 조건에서 실험을 수행하였다.

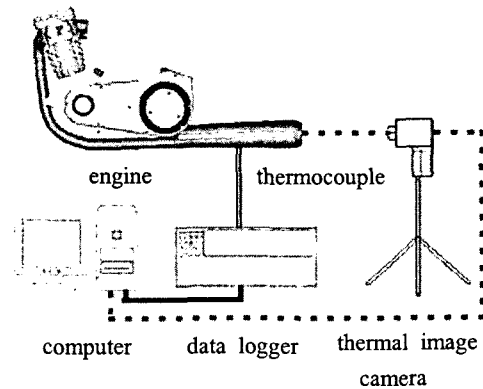


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

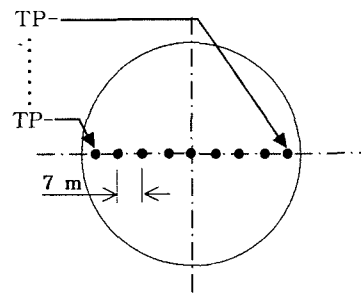
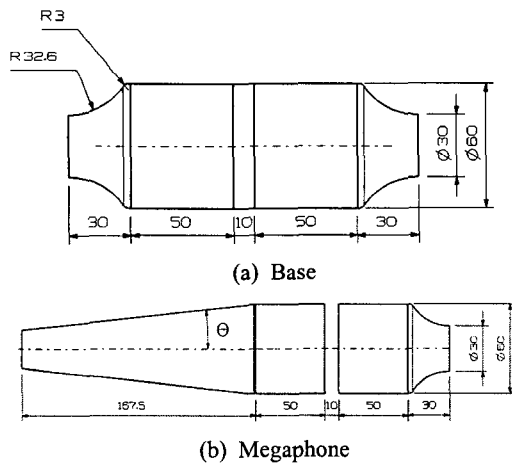


Fig. 2 Measurement points of thermocouples in the catalytic converter

Table 1 Specifications of experimental engine model

Engine type	4-stroke, 1-cylinder
Engine displacement (cc)	124.1
Bore(mm)/Stroke(mm)	56.5 / 49.5
Cooling type	Air cooling
Intake valve open(°)	BTDC 10
Intake valve close(°)	ABDC 30
Exhaust valve open(°)	BBDC 41
Exhaust valve close(°)	ATDC 1
Compression ratio	9.5 : 1
Max. torque	1.0 kg-m/7000 rpm
Max. power	11 Ps/9000 rpm

**Fig. 3** Geometry of present research model

열전대의 설치위치는 촉매담체의 중심을 기준으로 가장자리에서 2 mm 떨어진 지점부터 7 mm 씩 등 간격으로 열전대를 설치하였고, 촉매담체 입구면에서 2 mm 떨어진 지점에서 배기가스를 측정하였다. 실제엔진을 사용하기 때문에 균일한 배기가스가 유입될 수 없는 구조적 한계를 가지고 있어 촉매변환기로 유입되는 배기관의 직선이 될 수 있도록 하였다.

촉매담체의 온도분포를 보다 정성적으로 확인하기 위해 열화상 카메라를 이용하여 촉매변환기

내의 배기가스 온도분포를 촬영하였으며, 실험에 사용된 변수는 기본모델과 메가폰모델 중 확대관의 각도가 4° ~ 8°일 경우에 대해서만 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 열화상 카메라는 영국의 IRISYS(infrared integrated systems)사의 IRISYS 1001E를 사용하였다. 본 실험에 사용된 열화상 카메라의 측정 정확도는 ± 2 °C 이며, 분해능은 0.1 °C이며, 측정범위는 -10.0 °C~300.0 °C이다. 측정은 실시간으로 측정하였으며, 촉매담체의 온도가 300 °C에 도달할 때 이미지를 캡처(capture) 하는 방법으로 실험을 수행하였다. 이러한 이유는 본 계측장비의 최대 측정 온도범위를 넘기 때문에 엔진회전수 2,000 rpm을 유지시키면서 촉매담체의 온도를 상승시켰다. 이 때 측정 최대온도에 도달하는 시간은 약 30분 정도 소요되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 기본모델과 메가폰모델에 대한 촉매담체 입구면의 활성화 온도분포를 나타내고 있다. 평균온도는 Fig. 2와 같이 설치된 열전대의 온도값을 평균한 값으로 하였다. 엔진회전수는 3000 rpm과 4000 rpm 그리고 5000 rpm에 대한 결과이다. 2분간 예열 후 엔진회전수를 상승시켜 고정하는 방법으로 실험이 진행되었고, 각각의 엔진회전수에서 10분간 온도를 측정하였다. 엔진회전수가 증가할수록 전반적으로 light-off 시기가 단축되는 것을 확인할 수 있었고 특히, 기본모델의 경우 메가폰모델에 비해 빠르게 light-off됨을 알 수 있었다. 반면 메가폰모델의 경우 3000 rpm에서 700초가 지나도 light-off의 조짐이 보이지 않았다. 이는 배기가스가 촉매담체에 고루 분포되어 유입되기 때문에 촉매담체에 많은 열전도 에너지가 증가하지 못하였기 때문으로 판단된다. 기본모델의 경우 촉매담체 중심부에 집중되기 때문에 촉매담체가 받는 에너지는 그만큼 증가하게 되고, 열전도 에너지가 증가하여 촉매담체 전체에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 모델별 촉매담체 면에 대한 온도분포를 Fig. 5와 같이 엔진회전수를 증가하였을 때 720초 경과지점에서의 온도분포를 확인하면, 엔진회전수가 3000 rpm에서는 확연하게 기본모델과 메가폰모델의 온도차가 크게 발생하였으며, 이 때 온도차는

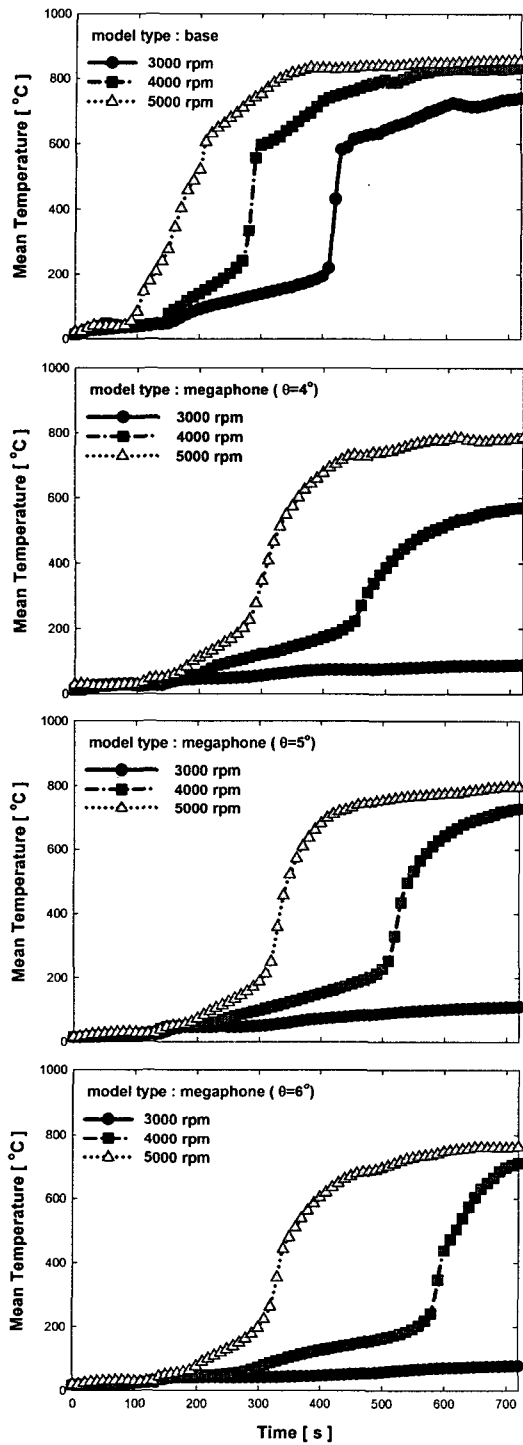


Fig. 4 Light-off temperature comparisons in the monolith inlet

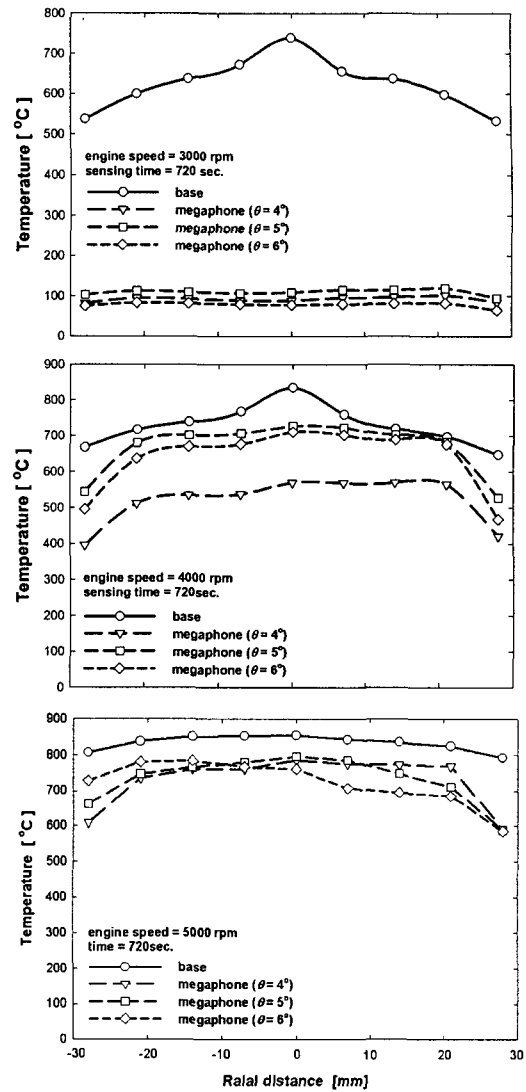


Fig. 5 Temperature comparisons in the monolith inlet of base and megaphone models at t=720sec

중심부의 경우 약 600 °C였으며, 가장자리의 경우 약 500 °C의 온도차가 발생하였다. 따라서 3000 rpm의 경우 기본모델이 가장 빠른 시간 내에 활성화시기에 도달함을 알 수 있었다. 그러나 4000 rpm 이상에서는 온도차가 많이 줄어들었지만 여전히 기본모델이 가장 높은 온도분포를 나타내고 있었다. 그러나 5000 rpm에서 기본모델이 가장 균일한 온도분포를 나타내고 있었는데 이러한 원인은 앞서 설명된 바와 같이 메가폰 모델에

비해 체적이 월등히 작고, 배기가스가 원활하게 빠져나가기 어려운 모델이다. 따라서 엔진회전수가 상승함에 따라 촉매담체 확대부에 압력이 증가하게 되고 이로 인해 고온의 배기가스 배출이 지연됨에 따라 온도가 상승한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 각 모델별 활성화 온도시기를 비교한 것이다. 엔진회전수가 증가할수록 활성화 시간이 감소하였고, 기본모델의 경우 가장 빠른 시간에 활성화시기에 도달하였다. 따라서 배기가스 배출물을 제어하기 위해서는 기본모델이 가장 적합할 수 있다는 결론이 될 수 있는데 기본모델의 경우 유동균일도가 가장 나쁘기 때문에 장시간 사용할 경우 촉매담체 중심부에서의 열화가 가장 빠르게 발생할 것으로 예견된다. 또한 일반 자동차와 달리 2륜 자동차의 경우 정기검사 제도가 없기 때문에 내구성이 우수해야 되기 때문에 내구성과 직결되는 유동균일도가 가장 우수한 4°인 모델이 2륜 자동차에 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

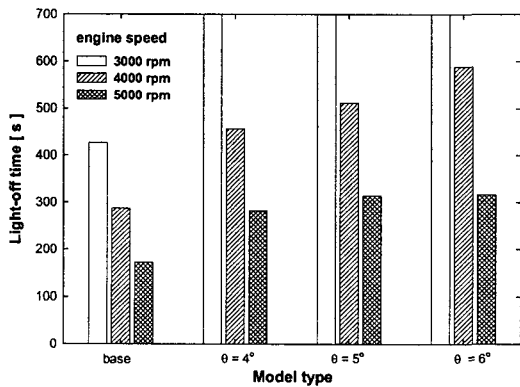


Fig. 6 Light-off time comparison in the monolith inlet of base and megaphone models

Fig. 7은 열화상 카메라로 촬영한 촉매담체 출구부분의 온도분포를 나타내고 있다. 열전대를 사용하여 촉매담체의 온도분포를 측정하였을 때와 마찬가지로 기본모델에서 온도가 중심부에 집중되는 것을 확인할 수 있었고, 메가폰모델일 경우 온도분포가 다소 넓게 분포함을 알 수 있었다. 특히 확대관의 각도가 감소할수록 더욱 넓은 온도분포를 나타냄으로서 촉매담체의 유효 단면적이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 열화상 카메라를 이용한 실험에서도 기본모델 보다 메가폰모델의 유동균일도가 높기 때문에 유동이 중심에 집중되지 않아 결국, 촉매담체를 효과적으로 활용하고 있음을 확인하였다.

Fig. 8은 열화상 카메라로 촬영한 온도분포를 정량적인 값으로 취득하기 위해 그림과 같은 방법으로 90° 간격으로 총 4군데의 길이를 촉매담체 가장자리에서 300 °C 부근의 온도영역까지 거리를 측정하여 그 유효면적을 계산하는 방법을 사용하였다.

Fig. 9는 열화상 카메라로 촬영된 사진을 분석하기 위해서 약 300 °C의 온도를 유효면적으로 설정하고, 이를 90° 간격으로 눈금자를 버니어캘리퍼스를 이용하여 길이를 측정한 후 이를 단면적으로 환산하는 방식을 취하였다. 이러한 방법을 토대로 정량적인 결과 나타낼 수 있었다. 그 결과 기본모델의 경우 약 2.54 cm² 이었으며, 메가폰모델의 경우 확대관의 증가에 따라 11.73 cm², 9.78 cm², 7.19 cm², 5.04 cm² 로 확인되었다. 즉, 300 °C부근을 기준으로 촉매담체의 활용도를 확인해보면, 기본모델의 경우 8.97 %이고, 메가폰모델 중 확대관의 각도가 4°~8°까지 각각 41.52 %, 34.60 %, 33.43 %, 25.43 % 그리고 17.8 2 % 면적 점유율을 나타내고 있었다. 이를 메가폰모델의 경우만 최소자승법을 이용하여 평균하여 보

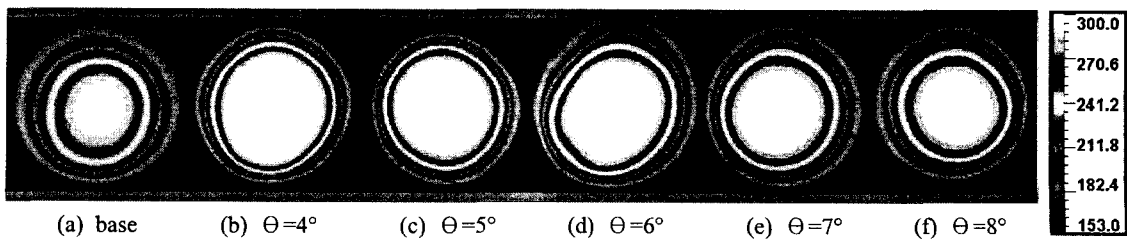


Fig. 7 Thermal image comparison in the monolith of base and megaphone models.

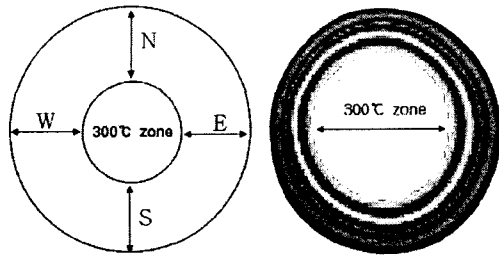


Fig. 8 Measurement method of effective area.

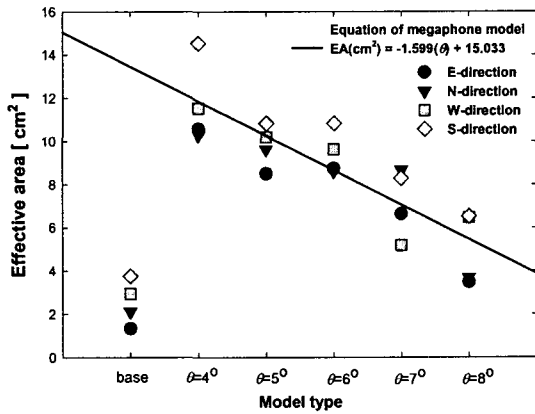


Fig. 9 Effective area comparison in the monolith of base and megaphone models.

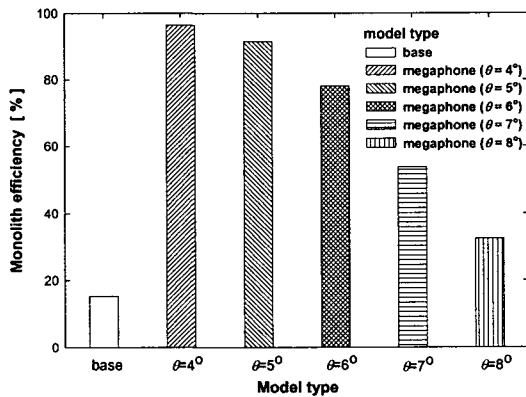


Fig. 10 Efficiency comparison in the monolith of base and megaphone models.

간식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있었다.

$$EA(cm^2) = -1.599(\theta) + 15.033 \quad (1)$$

여기서 EA 는 유효면적을 나타내고 있고, θ 는 메가폰모델의 확대판 각도를 나타내고 있다. 또한 활성화 온도인 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 을 기준으로 분석하면 기본모델의 경우 15.36 %이고, 메가폰모델 중 확대판의 각도가 $4^\circ \sim 8^\circ$ 까지 각각 96.46 %, 91.51 %, 78.03 %, 53.75 % 그리고 32.55 %의 촉매를 활용을 하고 있음을 Fig. 10과 같이 확인할 수 있었다. 따라서 촉매담체를 충분히 활용하기 위해서는 메가폰모델로 선정되어야 하며, 특히 확대판의 각도가 4° 일 경우에 가장 효과적인 촉매담체의 활용과 내구성 향상에 기여할 것으로 사료된다. 이러한 결과는 일반 자동차의 구조적인 문제를 극복할 수 있는 2륜 자동차만의 특징이며, 이러한 장점을 최대한 활용한다면, 기존의 연구에서 확인되었던 촉매변환기 형상에 대한 설계가 보다 유연성을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

2륜 자동차용 촉매변환기가 가지는 여러가지 설계변수 중 light-off 시기에 대한 실험과 배기가스 온도균일도를 통한 연구를 수행하여 2륜 자동차 배기계에 대한 기초적인 설계자료를 확보할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기본모델은 배기가스 온도가 촉매담체 중심에 집중되는 현상이 발생하지만 메가폰모델의 경우 촉매담체에 넓게 분포하는 것을 열화상 카메라를 통하여 재확인할 수 있었다. 또한 촉매담체의 온도분포를 확인한 결과 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 를 기준으로 기본모델의 경우 8.97 % 이고, 메가폰모델 중 확대판의 각도가 $4^\circ \sim 8^\circ$ 까지 각각 41.52 %, 34.60 %, 33.43 %, 25.43 %, 17.82 %의 유효면적을 확인할 수 있었다. 따라서 2륜 자동차의 구조적인 측면과 유동균일도에 따른 내구성 및 정화효율을 감안한다면 초기 활성화 온도에 도달하는 시간은 다소 지연되지만 기본모델 보다는 메가폰모델이 유용함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업과 2단계 BK21지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ronald, M., Heck and Robert. J. Farrauto, 2001, "Automobile Exhaust Catalysts, Applied Catalysis A," *General* 221, pp. 443~457.
- (2) Chakravarthy, V. K., Conklin, J. C., Daw, C. S. and D'Azevedo, E. F., 2003, "Multi-Dimensional Simulations of Cold-Start Transients in a Catalytic Converter Under Steady Inflow Conditions, Applied Catalysis, A:General 241, pp. 289~306.
- (3) Fu, X., Lambert, D. W., McLaren, G. S., Treacy, D. R. and Then, P. M., 1998, "3D Computational and Experimental Fluid Dynamics Analysis for the Automotive Catalytic Converter," *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division, FED-Vol. 247*.
- (4) Shijin, S., Wang, J. and Zhuang, R., 2000, Numeical Simulation and Optimum Design of Automotive Catalytic Converters, FISITA Congress, Paper No. F2000H205.
- (5) Holmgren, A., Grontedt, T. and Andersson, B., 1997, Improvement Flow Distribution in Andersson Monolithic Converters, *React. Linet. Catal. Lett.*, Vol. 60, No. 2, pp. 363~371.
- (6) Wollin, J. and Benjamin, F., 1999, A Study of the Flow Performance of Ceramic Contoured Substrates for Automotive Exhaust Catalysts Systems, SAE Paper No. 1999-01-3626.
- (7) Jeong, S. J. and Kim, W. S., 2000, Numerical Design of Light-off Auto-Catalyst for Reducing Cold-Start Emissions, *Journal of KSME B*, Vol. 24, No. 9, pp. 1264~1276
- (8) Chungseub Yi, Jeongse Suh, Hanshik Chung, Hyomin Jeong, Taeyoul Bae and Jaeyoung Bae, 2005, Numerical Analysis on the Flow Uniformity in Catalytic Converter of Motorcycle, Conference Proceedings of KSME Fall Annual Meeting, pp. 2262~2267
- (9) Chungseub Yi, Jeongse Suh, Hanshik Chung, Hyomin Jeong and Jaeyoung Bae, 2006, Exhaust Gas Temperature Characteristics of Catalytic Converter shape for Motorcycle, *Journal of KSAE*, Vol. 14, No. 5, pp. 138~144.