

2륜 자동차 적용을 위한 촉매변환기 형상결정에 관한 연구

이 중 섭^{*1)} · 정 한 식²⁾ · 정 효 민²⁾ · 서 정 세²⁾ · 이 철 재³⁾

경상대학교 대학원¹⁾ · 경상대학교 기계항공공학부²⁾ · 동명대학교 자동차공학과³⁾

A Study on the Geometry Decision of Catalytic Converter for Motorcycle

Chungseub Yi^{*1)} · Hanshik Chung²⁾ · Hyomin Jeong²⁾ · Jeongse Suh²⁾ · Cheoljae Lee³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

²⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

³⁾Department of Automobile Engineering, Tongmyong University, Busan 608-740, Korea

(Received 10 April 2006 / Accepted 20 June 2006)

Abstract : This research represents the catalytic converter for application in the motorcycle. Present research model type is monolithic catalytic converter and this type have been widely used for satisfaction on and the regulations of pollutant emissions in automobiles. The flow characteristics in a single monolith automotive catalytic converter were investigated by using a computational simulation method without chemical reaction. So we limit the discussion to the effect of flow uniformity in the catalytic converter. Simulation result shows that the flow uniformity of megaphone type catalytic converter is higher than that of a base type. Therefore, the megaphone type is more suitable to motorcycle.

Key words : Catalytic converter (촉매변환기), Flow uniformity (유동균일도), Monolith (담체)

1. 서론

최근 선진국을 중심으로 환경문제에 대한 규제가 강화되고 있다. 특히, EC(European Community)등은 자국 내로 수입되는 모든 차량에 대한 촉매변환기의 설치가 의무화되어 있다. 따라서 과거와 같이 엔진의 출력 향상뿐만 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 있

다. 현재까지 국내의 생산되는 2륜 자동차의 배기량은 125cc 이하가 주를 이루고 있으며, 앞으로 고 배기량의 2륜 자동차 생산이 증가할 것으로 판단되고 있다. 따라서 배기량의 증가로 인해 배출되는 배기가스의 농도를 낮추기 위해 필연적으로 촉매변환기에 대한 인식 전환이 필요한 시점에 와 있다. 촉매변환기의 설치 적용은 생산 단가가 상승할 수밖에 없어 제조사의 부담일 수밖에 없다. 또한 비교적 저 배기량의 2륜 자동차일 경우 엔진 특성상 출력하락으로 이어지기 때문이다. 또한 기계식 기화기로 이론 공연비를 만족시키기는 매우 어려워 연료 분사식 또는 2차 공기분사기를 설치하여 강력한 환경규제로 인해 배출물 규제에 만족시켜야 되는 시점에 다다랐다. 그러나 환경규제의 측면에서 보면, 가장 능

*Corresponding author, E-mail: cs_yi@hanmail.net

동적으로 배출물을 저감시킬 수 있는 것은 현재까지 촉매변환기밖에 없다고 판단된다. 자동차 배출가스 규제 시행초기 업계의 주된 노력은 엔진의 연소 상태를 이른 공연비에 최대한 접근 시켜 연소함으로써 불완전 연소를 최소화 시키는 연소 개선에 초점을 맞추었으나 1970년대 중반으로 접어들면서 한층 강화된 배출가스 규제에 기술적인 대응을 하기 위해 처음으로 배기 후처리 방법이 소개되었다. 당시 가솔린 엔진에서 발생하는 미연 탄화수소(HC)와 일산화탄소(CO)를 산화반응 시킴으로 배출가스를 저감시키는 산화촉매(Oxidation)가 개발되었다. 그러나 대기 오존 경보의 주범인 질소산화물(NOx)의 저감을 위한 배기가스 재순환장치(EGR : exhaust gas recirculation)를 이용하게 되었다. 1980년대에 접어들면서 미연 탄화수소와 일산화탄소 그리고 질소산화물을 효과적으로 저감시키기 위해 삼원촉매장치(TWC : three way catalyst)가 개발되어 현재까지 사용되고 있으며, 보다 효과적인 배출가스 저감을 위한 여러 가지 방법들이 시도되고 있다.¹⁻⁴⁾ 또한 최근 전산유체역학(CFD)의 발달로 인해 촉매변환기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 촉매변환기의 입구와 출구의 형상에 대한 최적설계로 압력강하를 낮추고, 유동 분포를 개선하여, 촉매변환기의 수명과 효율을 높이는 데 선행연구자들의 노력이 있었다.⁵⁾ 특히, Weltens⁶⁾ 등에 의해 제안된 유동 균일도에 의한 촉매면 유동 균일도 정량화 방법이나, Park⁷⁾ 등 연구에 의해 촉매변환기의 cell 형상을 일반화하여 배압에 의한 영향이 잘 정리되어 있다. 또한 담체 내를 통과하는 배기가스의 유동 분포의 균일도는 급격한 온도 구배를 억제하여 수명연장에 많은 영향을 미치는 것이 확인되었다. 그러나 이 모든 것들은 자동차에 대한 연구 결과이며, 2륜 자동차 적용을 위한 촉매 변환기 연구는 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서 추구하고자 하는 목표는 기존 자동차용 촉매 변환기를 적용했을 때의 문제점을 보완하여 2륜 자동차에 적합한 촉매 변환기의 형상을 수치해석 결과를 통해 결정하고자 한다.

2. 실험 및 수치해석

2.1 실험장치

촉매변환기 내의 속도와 압력강하 값을 측정하기 위해서 KS-B 6311의 규정을 따라 실험 장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 또한 촉매변환기에서 사용되는 담체는 원형으로 하였고, 그 단면적은 22 cm²이며, 길이는 10 cm로 하였다. 담체의 전 후면에 피토관을 설치하여 유속과 압력을 측정하였다.

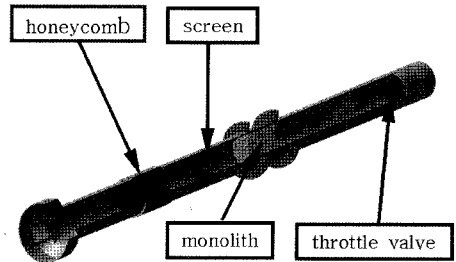


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for pressure drop in monolith

2.2 담체의 수학적 모델

본 연구에서는 담체(monolith)형 촉매변환기가 사용되었고, 이 촉매변환기는 다공성 물질로 상사되어 모델링되고 있으며, 담체에 의한 배압의 증가를 구현하기 위해서 일반적으로 다음과 같은 압력 증가 항이 사용되고 있다.⁸⁾

$$-K_i u_i = \frac{\partial p}{\partial \xi_i} \quad (1)$$

여기서 $\xi_i (i=1,2,3)$ 는 유동 방향, K_i 는 투과율을 나타내고 있으며 u_i 는 ξ_i 에서의 면적속도를 나타내고 있다. 투과율 K_i 는 식 (2)와 같이 면적속도 크기의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K_i = \alpha_i |\bar{v}| + \beta \quad (2)$$

담체 내부에서의 유동은 길이방향에 대하여 작용하고 나머지 방향에 대해서는 작용하지 않는다. 따라서 ξ_i 는 배기가스 배출방향인 x_i 로 나타낼 수 있다. 따라서 위의 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 담체 내에서의 압력강하를 나타낼 수 있다.

$$\frac{dp}{dx_i} = -(\alpha_i |\bar{v}| + \beta) u_i \quad (3)$$

위의 식 (3)은 촉매장치에 의한 배압의 증가가 유속에 비례하는 항과, 유속의 제곱에 비례하는 항으로 나누어지게 된다. 따라서 실험을 통해 α 와 β 의 값을 구할 수 있다. 자동차용 촉매변환기의 규격을 나타내는 단위로서 cpsi (cell per square inch)로 많이 사용되며, 본 연구에 사용된 cpsi는 400이다.

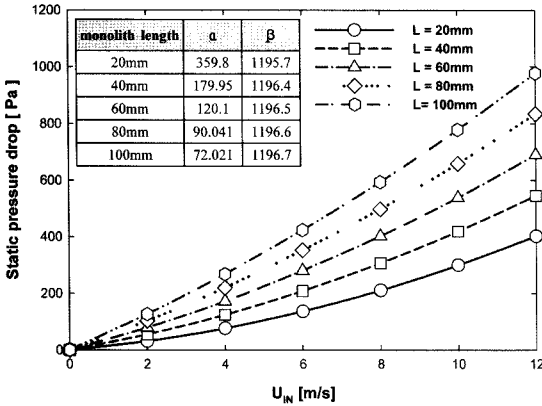


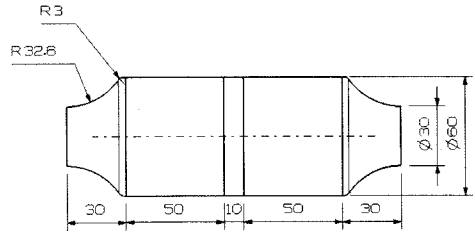
Fig. 2 Distribution of static pressure drop

Fig. 2는 담체의 길이에 대한 변수를 20~100 mm 까지 20 mm씩 증가시킨 압력강하 값을 나타내고 있다. 담체의 길이가 증가할수록 압력강하가 높게 발생함을 알 수 있었고, 정압강하 값이 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 담체의 길이가 길어질수록 투과계수인 α 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 즉, α 값이 감소할수록 유체가 담체를 통과하는데 많은 저항이 발생하는 것을 의미한다. 또한 촉매변환기로 통과하는 배기가스의 유동에 대한 균일성은 정화효율에 많은 영향을 미치게 되는 중요한 지표로서 일반적으로 균일도(uniformity)가 사용된다.

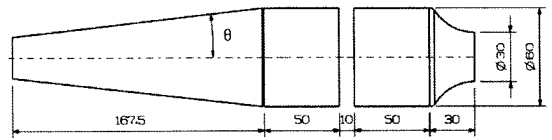
본 연구에서는 Weltens⁵⁾이 제안한 식 (4)를 이용하여 균일도 지표를 설정하였다.

$$\gamma = 1 - \sum_{i=0}^N \frac{|v_i - \bar{v}| 2\bar{v} S}{S_i} \quad (4)$$

여기서, S 는 담체의 단면적, S_i 와 v_i 는 담체격자 i 에서의 단면적과 국부유속을 나타내며, \bar{v} 는 평균 유속이다. 따라서 균일도가 1(100%)에 가까울수록 효과적으로 배기가스를 통과시킬 수 있게 된다.



(a) Base type



(b) Megaphone type

Fig. 3 Geometry of base and megaphone model of catalytic converter

본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 현재 가장 일반적으로 자동차에 적용되고 있는 촉매변환기의 형상을 기본 모델로 선정하였고, 2륜 자동차의 머플러의 구조를 최대한 활용한 megaphone 모델을 선정하였다. 또한 확대관의 각도를 4°~6° 까지 증가시켜 총 4가지 모델에 대한 해석을 수행하였다.

2.3 수치해석 방법 및 경계조건

촉매변환기에서의 속도분포 및 압력을 계산하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이 사용되었으며, 열전달 문제는 고려하지 않았기 때문에 에너지 방정식을 계산하지 않았다. 수치해석 기법으로는 SIMPLE 알고리즘과, 대류항의 차분은 2차 정확도를 가지는 MARS 기법을 사용하였다. 난류모델은 벽함수 조건과 함께 RNG/k- ϵ 모델을 사용하였으며, 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산시 종속변수들의 수렴 판정의 잔차 값이 10^{-4} 이하에 도달하면 수렴한 것으로 간주하였다. 또한 입구측에는 유입 조건을 사용하였으며 입구 난류강도는 5%로 하고 혼합거리는 입구수력 반경의 10%로 설정하여 전체 유동에 대한 계산을 정상상태, 압축성 유동으로 가정하였다. 그리고 출구측에는 대기압 조건을 적용하였다. 해석에 대한 변수는 입구속도를 2~20 m/s까지 2 m/s씩 증가시켜 관찰하였으며, 계산에 사용된 Solver는 STAR-CD ver.3.22를 사용하였다.

3. 수치해석 결과 및 토의

Fig. 4는 촉매담체에서의 유동균일도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적인 자동차에서 주로 사용되는 촉매변환기 형상인 기본 모델이 대체적으로 낮은 유동 균일도를 나타냄을 확인할 수 있었고, 기본 모델의 경우 입구 유속이 증가 할수록 유동균일도는 감소되는 경향을 보여주었으나 2륜 자동차에 적합하도록 설계 변경된 megaphone 모델에서는 모두 90 % 이상의 균일한 유동 균일도를 확보할 수 있었다. 또한 확대관의 각도가 작을수록 전체적인 촉매변환기의 길이는 길어지나 95 % 이상의 유동균일도를 확보할 수 있었다. 또한 입구유속 변화에 따라 일정한 유동균일도를 나타냄으로 주기적인 압력변화가 발생하는 실제 2륜 자동차의 배기가스에 능동적으로 대처할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 전반적으로 기본 모델과 비교할 때 4°일 경

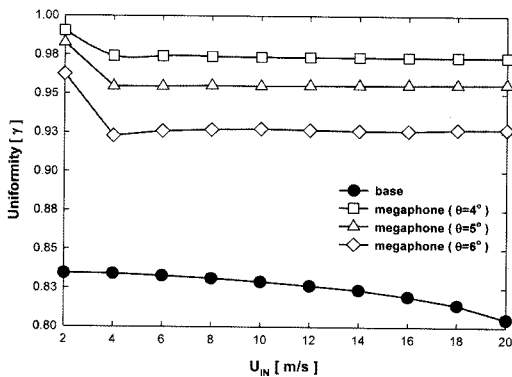


Fig. 4 Comparisons of uniformity for the present models

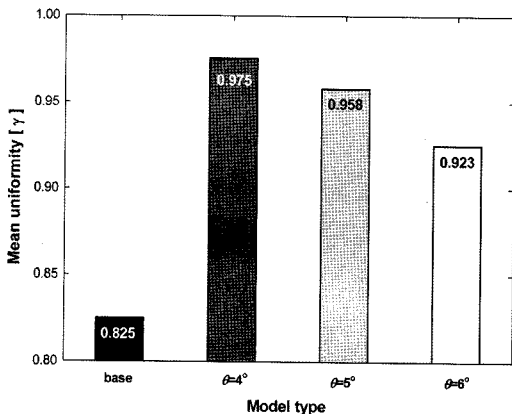


Fig. 5 Comparisons of mean uniformity for the present models

우는 약 15%, 5°일 경우는 약 13% 그리고 6°일 경우에는 약 10%의 유동균일도 상승효과가 나타났으며, Fig. 5와 같이 평균 유동균일도를 나타낼 수 있었다.

Fig. 6은 입구유속이 20 m/s일 때의 촉매담체 입구면의 속도크기를 나타내고 있다. 기본 모델에서 속도가 가장 높았고 중심부와 가장자리와의 속도차가 크게 발생하여 유동균일도가 가장 나쁘게 나타남을 확인할 수 있었다.

그러나 megaphone 모델로 변경됨에 따라 촉매담체로 유입되는 속도가 현저히 낮아지고, 중심부와 가장자리의 속도편차가 줄어들면서 유동균일도가 상승되는 결과를 획득할 수 있었다. 이는 유입 관에서 촉매담체까지의 확대부 길이가 증가함에 따라 유동이 벽면 부근에서 재순환 영역이 제거되고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 7은 난류운동에너지에 대한 결과이며, Fig. 6과 같이 기본 모델의 경우 벽면 가장자리에서 난류운동에너지가 증가함에 따라 유동이 재순환하고 있음을 확인할 수 있었고, megaphone 모델의 경우 각도가 감소할수록 난류운동에너지가 감소하였다.

Fig. 8은 촉매담체 유입면의 정압분포를 나타내고 있다. 기본 모델이 전반적으로 megaphone 모델

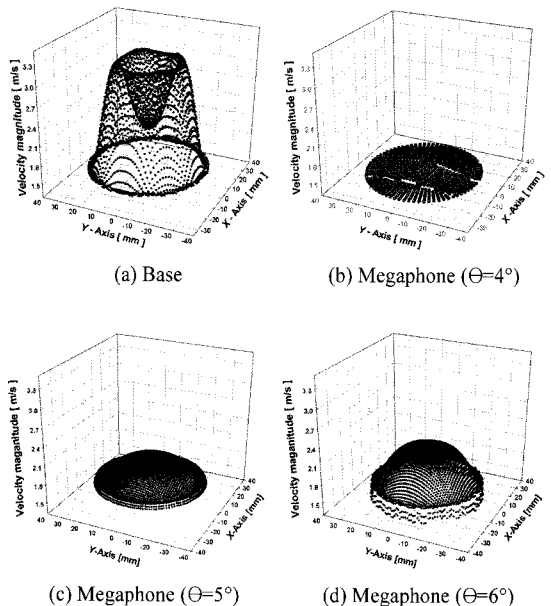


Fig. 6 Distributions of velocity magnitude for present models at monolith face (U_{in}=20m/s)

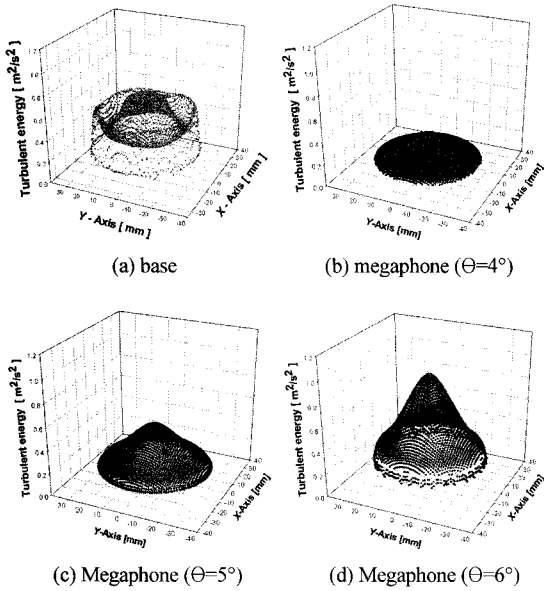


Fig. 7 Distributions of turbulent energy for present models at monolith face ($U_{in}=20\text{m/s}$)

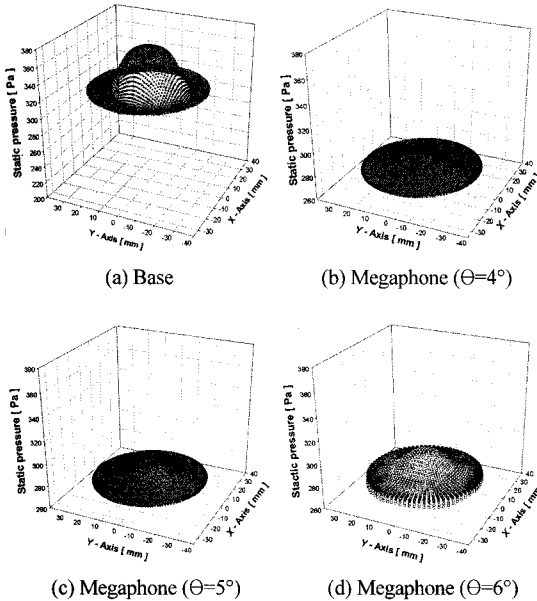


Fig. 8 Distributions of pressure for present models at monolith face ($U_{in}=20\text{m/s}$)

보다 높게 분포함을 확인할 수 있었다. 또한 촉매 담체 중심부와 가장자리와의 압력 구배가 크게 발생하여 속도차를 유발함에 기인하여 촉매 담체 입구 부분에서 유동 균일도가 낮게 나타났었다. 그러나 megaphone 모델의 경우 중심부에서 다소 높은 압력

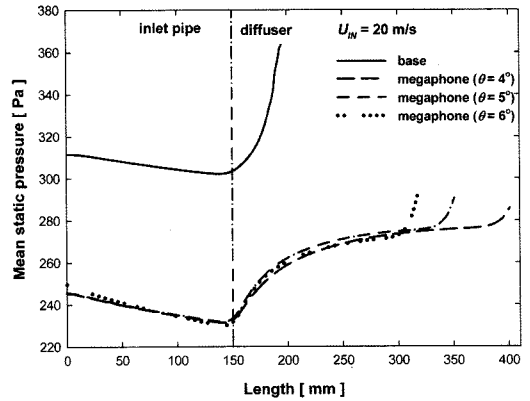


Fig. 9 Distribution of the mean static pressure for present models at catalytic convert diffuser

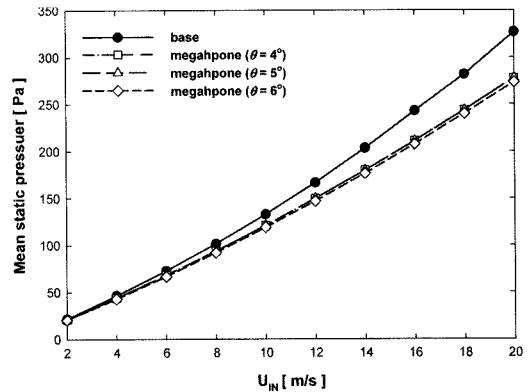


Fig. 10 Comparison of the mean static pressure for present models at monolith inlet

분포를 나타내고 있지만 전반적으로 기본 모델에 비해 압력분포가 고루 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 전체적인 압력결과를 분석한 결과 2륜 자동차에 적용하기 위한 촉매 변환기의 형상이 megaphone 모델로 설계하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Fig. 9는 유입관에서 확대관까지 평균정압분포를 나타내고 있다. 기본 모델과 megaphone 모델은 다소 큰 차이의 압력 값을 보이고 있다. 이러한 원인은 확대관의 길이가 짧기 때문에 촉매담체에서의 압력이 증가하기 때문이다. 이러한 큰 압력차로 인해 속도차가 발생하게 되고, 결국 유동균일도에 악영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 첫 번째 촉매담체 단면적에서의 평균정압분포를 나타낸 것이다. 이 때 사용된 압력은 촉매

담체의 면적 평균을 취한 값으로 계산하였다. 그 이유는 각각의 격자마다 압력 값이 조금씩 다를 수 있다. 따라서 촉매담체 입구의 단면에서 면적을 곱한 압력 값을 대표 값으로 하였다. 그 결과 입구 유속이 증가할수록 평균압력은 상승하였으며, 특히 기본 모델인 경우 megaphone 모델 보다 높게 나타났다.

4. 결론

2륜 자동차에 적용하기 위한 촉매변환기의 최적 형상을 설정할 경우 촉매 담체의 정화효율을 나타내는 지표 중에 하나인 유동균일도 향상에 초점을 맞추어 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기본 모델에 비해 megaphone 모델의 경우 확대관의 각도에 따라 최대 15%의 높은 유동 균일도를 나타내었다.
- 2) megaphone 모델 중에서 확대관의 각도가 4°에서 가장 높은 유동균일도를 나타냄으로 확대관 각도가 주요 설계 변수임을 확인할 수 있었다.
- 3) megaphone 모델은 기본 모델에 비해 입구 유속에 따른 유동균일도가 안정적이었다.
- 4) 각 모델별 촉매담체 중심부에 작용하는 최대 압력 분포가 기본 모델에 비해 2 m/s, 10 m/s 그리고 20 m/s에서 약 5.36%, 13.79% 그리고 21.62%의 압력 저감 효과가 megaphone 모델에서 나타났다.
- 5) 촉매담체 입구에서의 정압분포에서 기본 모델의 경우 중심부와 가장자리와의 압력 불균형이 megaphone 모델에 비해 많이 발생하여 촉매담체 중심부에서의 소손이 발생 우려가 높음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업, 2단계 BK21과 대림자동차공업(주) 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

References

- 1) R. M. Heck and R. J. Farrauto, "Automobile Exhaust Catalysts," Applied Catalysis A, General 221, pp.443-457, 2001.
- 2) D. S. Kim and Y. S. Cho, "Effects of Cam Phase and Spark Retard to Increase Exhaust Gas Temperature in Cold Start Period of an SI Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.6, pp.591-598, 2005.
- 3) S. J. Jeong and W. S. Kim, "Three Dimensional Unsteady Flow Characteristics Inside the Catalytic Converter of 6 Cylinder Gasoline Engine," Transactions of KSAE, Vol.6, No.4, pp.108-120, 1998.
- 4) S. J. Jeong and W. S. Kim, "Numerical Study on the Effect of Volume Change of Light-off Catalyst on Light-off Performance," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.87-100, 2000.
- 5) W. H. Bressler, H., Terres, F, Neumaier, H., Rammoser, D, "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE 930780, pp.131-150, 1993.
- 6) S. S. Park, H. Y. Kim, Y. J. Cho, S. Y. Lee and K. J. Yoon, "Flow Analysis and Catalytic Characteristics for the Various Catalyst Cell Shapes," SAE1999-01-1541, pp.1-12, 1999.
- 7) W. Lee and H. Lim, "A Parametric Study of Pressure Coefficient in Exhaust Gas System," Conference Proceedings of KSAE 03-S0021, pp.124-128, 2003.
- 8) Star-CD User Manual, 2005.