

배기계 형상 개선을 통한 THC 저감에 관한 연구

김기성*

THC Reduction through the Improvement of Exhaust System

K. S. Kim

Keyword: Exhaust emission(배기 오염), Exhaust manifold(배기 다기관), CCC(Close Coupled Catalyst, 근접촉매), LDV(Laser Doppler Velocitometry)

Abstract

Experimental studies were performed to improve the THC emission characteristics by optimizing the flow in the exhaust manifold and CCC in a SI engine. For this purpose, the flow characteristics in the exhaust manifold and CCC were measured by using LDV technique under various engine conditions. Referring to these data, a new type exhaust manifold was designed to improve the cold-start emission characteristics and the response characteristics of O₂ sensor by optimizing the flow pattern and reducing the thermal inertia of the exhaust manifold system. It was found through the vehicle emission tests that the emission characteristics of THC of the new type exhaust manifold was improved by 12% through the optimizing the flow pattern in the exhaust manifold.

1. 서론

최근 자동차용 엔진의 개발 방향은 고효율, 저연비, 경량화를 추구하고 있으며, 이들 개발 목표보다 더 중요한 과제는 환경 오염에 대비하여 엄격해지고 있는 자동차 배기가스 규제치를 만족할 수 있는 환경친화적인 엔진을 개발하는 것이다. 이러한 필요성으로 인해 엔진에서 규제 대상인 유해 배기가스를 줄이는 문제에 대한 관심이 증대됨에 따라 배기 시스템에 대한 연구

가 엔진 개발의 중요 과제가 되고 있다. 실제로 현재의 배기가스 규제치 뿐만 아니라 향후 적용될 배기가스 규제치를 만족시키기 위해서는 넓은 영역의 엔진 작동 조건에서도 배기 가스를 효과적으로 처리할 수 있는 자동차용 촉매 변환기(Catalytic Converter)가 필수적이다.

따라서, 효율적인 촉매 변환기를 설계하는 일은 배기 가스 저감을 위한 가장 중요한 요소 중의 하나로 인식되어져 왔다.

이러한 촉매 변환기 설계에서 가장 중요한 인자는 담체 내 유동속도의 분포와 담체 전후의

* 여수대학교 기계공학과

Table 1 The detailed specifications of LDV system.

LDV	Power	5W
	Laser Type	Ar-ion Laser
	Method	Back Scattering
	Wave Length	514.5, 488nm
Particle Seeding		Gasoline+Titanium Isopropoxide(3~7%)
Signal Processing		BSA (Burst Spectrum Analyzer)
Traversing System		3-Dimensional

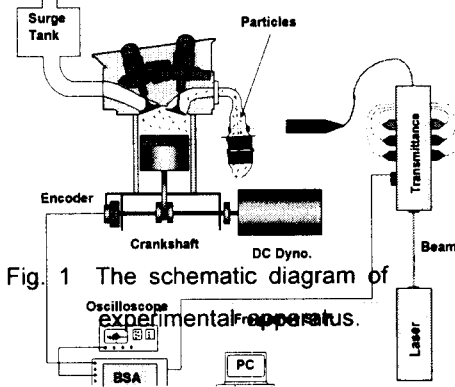


Fig. 1 The schematic diagram of experimental apparatus.

압력 강하이다. 담체 입구에서의 유동 속도 및 온도 분포는 배기 가스와 촉매 장치간 열 및 질량 전달율을 좌우하고 이것이 결국 촉매 장치의 전체 정화 효율을 결정한다. 또, 높은 배압(back pressure)은 엔진의 최고 성능을 제한하고, 연비를 악화시키는 주요 요인 중 하나인데, 이는 촉매 변환기를 포함한 배기 시스템 내의 압력 강하에 주로 기인한다. 이상적인 촉매 변환기에서는 담체 전 부위를 골고루 이용하기 위해서 담체 전면에서의 배기 가스 유동이 균일한 분포를 가져야 한다. 그렇게 함으로써 담체 전체를 배기 가스 정화에 효과적으로 이용할 수 있고, 나아가 담체의 내구성을 증대시킬 수 있다.

그러나, 실제 엔진 배기 시스템에 장착된 촉매 변환기 내의 유동 분포는 엔진 작동시의 서로 다른 입구 및 출구 조건에 따라 민감하게 변하므로 근본적으로 균일한 분포를 갖는 것은 불가능하며, 이와 같은 유동분포의 불균일성 때문에 담체 전면 중 국부적인 aging 현상이 초래되어 담체의 효율 및 내구성을 저하시키는 주요 요인이 된다. 실제로, 배기 매니폴드 및 접합부, 담체의 형상과 같은 설계 인자들과 엔진의 작동 조건, 차량 장착시의 레이아웃 제한 등은 모두 담체 내 불균일 유동 분포에 직접적인 영향을 미치는 인자로 알려져 있다.

따라서, 본 연구에서는 특정 가솔린 엔진의 배기 매니폴드 및 CCC(Close Coupled Catalyst) 시스템 내의 유동 특성을 명확히 이

해하여 배기 유동분포 개선을 구현하고자 엔진이 연소를 행하는 상태에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용한 배기 유동속도 측정을 행하였다. 또, 이와 같은 배기 유동 특성에 대한 이해를 바탕으로 배기 매니폴드 형상을 변경하여 형상 변경이 배기 유동 변화와 담체 전면에서의 유동 균일화 정도에 미치는 영향을 분석하였고, 담체의 배기 가스 정화효율과 배압 상승에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고, 성능 및 차량 배기 시험을 통해 그 효과 즉, 초기 미연탄화수소(HC)의 저감 및 담체의 L.O.T (Light-Off Time) 단축 효과를 조사하였다.

2. 측정 장치, 시험 방법 및 조건

2.1 유속 측정 장치 및 시험 조건

시험 대상 엔진의 매기 매니폴드 및 CCC 입구부 유속 측정을 위한 LDV 시험 장치를 Fig.1에 나타내었고, 시험 장치 제원을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 배기 매니폴드 및 CCC 입구부 유속 측정은 Table 2와 같은 조건으로 정규 사양(STD Type) 및 신 사양(New Type)에 대해 LDV를 이용한 유속 측정 시험을 진행하였다.

Fig.2는 배기 매니폴드 입구부 및 CCC 입

구부(O₂ 센서가 위치한 단면)에서의 유속 측정 위치를 나타낸 것이다. 배기 매니폴드 입구부에서의 유속 측정은 입구부에서 30mm 정도 떨어진 위치에 측정 단면을 설정하였고, 이 단면상의 대칭 중심선을 따라 설정된 11개의 측정점에서 측방향(유동의 진행 방향) 속도를 측정하였다. CCC 입구부에서의 유속 측정 위치는 Top view에 표시된 것과 같이 담체 윗면으로 70mm 인 곳에 측정 단면(단면 A-A)을 형성하고 이 단면 위의 중심선을 따라 총 12개의 측정점에서 담체로 들어가는 측방향 속도를 측정하였다.

2.2 정규 사양 및 신규 사양 배기 매니폴드의 비교

Fig.3에서는 정규 사양과 유동 측면을 고려

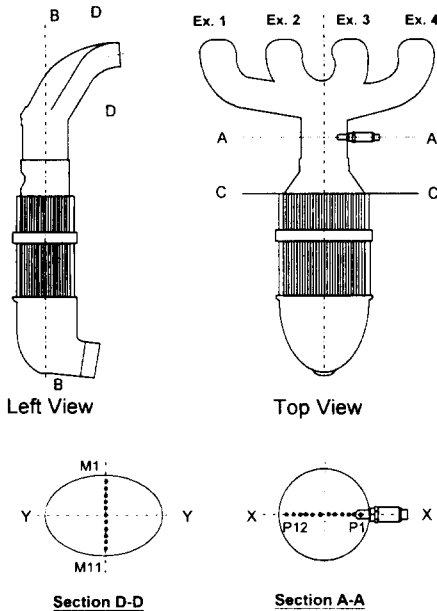


Fig. 2 : Measuring points of exhaust manifold and mixing zone

하여 성능이 나올 것으로 기대하고 형상을 달리 하여 제작한 신규 사양 배기 매니폴드의 형상을 나타낸 것이다. 신규 사양은 다음 4가지 사항을 고려하여 설계되었다.

- ①담체 전면에서의 유동 균일화 정도 개선
- ②O₂ 센서의 효율적 장착 위치 선정
- ③배압 증가 억제
- ④초기 시동시 담체의 L.O.T. 개선

신규 사양의 배기 매니폴드의 형상면에서의 특징을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 신규 사양의 경우 정규 사양과는 달리 담체 전면을 향하는 측 방향 운동량과 배기 가스 열량 손실을 줄이기 위해 No.1과 No.4 runner의 단면 형상을 원형에 가깝게 하여 배기 매니폴드의 체적은 거의 같게 유지하면서도 표면적은 감소된 형태로 설계하였다. 또한, 배기 매니폴드와 CCC

Table 2 Engine operating conditions

Engine Parameter	Operating Conditions
Engine Speed(rpm)	1800, 2500 rpm
Engine Load(bar)	2bar, 5bar, WOT

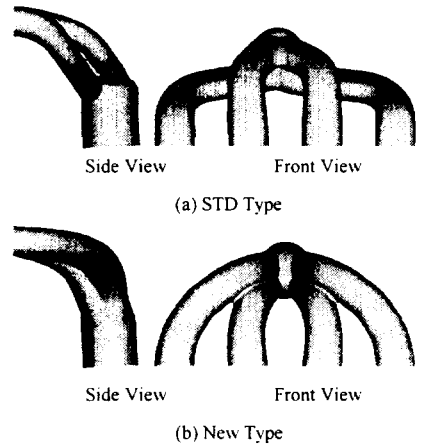


Fig. 3 The geometric configurations for two kinds of exhaust manifolds.

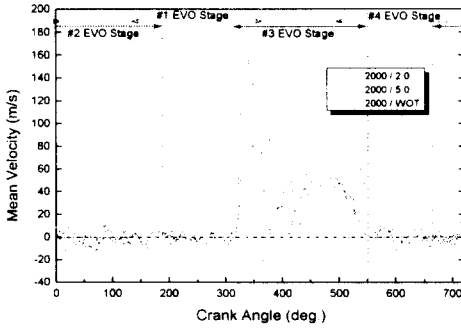


Fig. 4 Ensemble averaged velocity profile at the entrance of STD Type exhaust manifold with different engine load.

의 중심축을 일치시켜, O₂ 센서가 각 실린더에서 배출되는 배기가스를 균일하게 감지할 수 있도록 장착 위치를 선정하였다. 그리고, 배기 매니폴드의 형상 변경에 의한 효과를 정확히 확인하기 위하여 CCC 이후는 정규 사양과 동일하게 유지하였다.

2.3. O₂ 센서를 이용한 A/F(공연비) 감지도 측정법

광역 O₂ 센서는 배기 가스 내 O₂ 농도에 따라 DC 전압으로 출력이 나타나게 되어 있는 센서이다. O₂ 센서 반응 시간은 약 300ms로 배기 유동 변화에 비하면 느리지만, 인위적으로 실린더간 공연비 값을 변화시킬 경우 이에 대한 출력의 변화가 발생한다. O₂ 센서의 출력 시간을 시간 단위가 아닌 크랭크각에 동기하여 측정할 경우 실린더간 공연비 변화에 대해 일정한 경향을 갖는 신호를 측정할 수 있다. 특히, 특정 실린더의 공연비 값을 10% 변화시킬 경우 사이클에 동기하여 약 180° (폭발 간격)의 위상차를 가진 신호(sinusoidal 형태)가 발생한다. 만약 O₂ 센서가 각 실린더별 배기 가스의 영향을 동

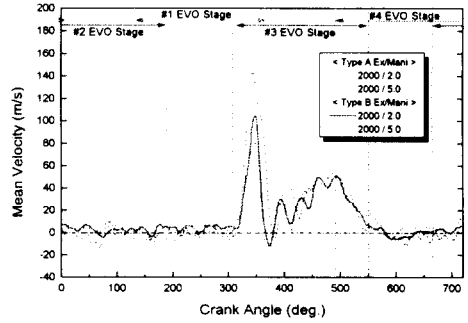


Fig. 5 Ensemble averaged velocity profile at the entrance of exhaust manifold (STD, New Type) with engine load.

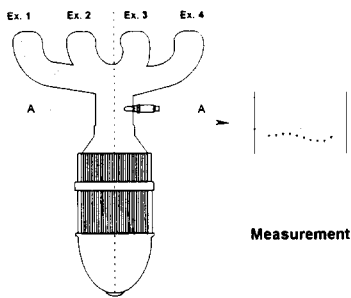
일하게 받는다면 이 신호는 위상차만 달라질 뿐 그 형태는 일정하게 나타나야 한다. 또, 역으로 신호의 변화 폭은 실린더별 감지도에 따라 변화하게 된다. 따라서 실린더별로 공연비 값을 10%씩 변화시키면서 출력 신호의 진폭 크기를 비교하면 각 실린더간 A/F 감지도를 측정할 수 있다.

본 연구에서는 정규 및 신규 사양 배기 매니폴드의 정규 O₂ 센서 위치에서 실린더간 A/F 감지도를 비교하였다. 각 러너(runner)에 설치된 O₂ 센서의 출력을 기준으로 하여 실린더별 연료량을 변화시켜 실린더간 공연비가 차이가 나게끔 하였다. 시험시 엔진의 운전 조건은 엔진 회전속도를 1800, 2500rpm으로 하였고, 엔진의 부하는 BMEP를 2, 5, 8 bar 조건으로 하였다. O₂ 센서의 A/F 감지도는 그 절대량보다는 상대적인 값의 분포만을 주로 비교하였다.

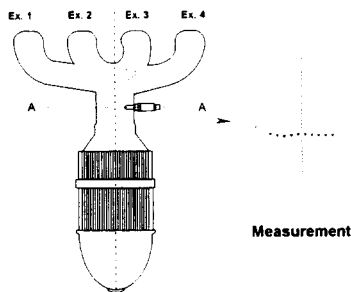
3. 시험 결과

3.1 유동 시험 결과

초기 시동 시 배출되는 배기 가스에서 벽



(a) The EVO stage of No.1 cylinder



(b) The EVO stage of No.3 cylinder

Fig.6 Comparisons of velocity distribution along X axis of section A-A for STD Type exhaust manifold.

면으로의 열손실을 최소로 유지하고, 보다 균일한 담체 내의 유동 분포 특성을 갖는 배기 매니폴드 및 혼합 구간(mixing zone)의 최적 설계를 위해서는 기본적으로 실린더로부터 배출되는 배기 가스의 유동 구조를 정확히 파악하는 것이 중요하다.

Fig.4는 2000rpm, BMEP가 2, 5bar 및 WOT(full load)인 조건에서의 No.3 배기 매니폴드 러너 입구에서 측정된 유속 분포를 나타낸 것이다. 실린더 내에서 배출되는 배기 유동은 담체의 존재로 인하여 극심한 맥동 유동 특성을 보여주고 있다. 이와 같은 유동 형태는 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 실린더 내의 높은 압

력에 의해 배기 가스가 배출되는 과정인 블로우다운(blow-down) 과정에서 발생하는 주유동과 피스톤의 상승(piston displacement process)에 의해 배출되는 2차 유동으로 구분할 수 있다. 부하의 증가에 따라 주유동 속도는 커지나, 배기 밸브에서 초우킹(choking)이 발생하는 한계 속도에 이르면 더 이상 커지지는 않는다. 주유동이 담체 윗면에 강하게 충돌한 후 압력과의 반사와 실린더 내 압력 감소의 영향으로 배기 시스템 내에는 순간적인 역압력 구배가 발생하여 역류(Fig.4에서 first deep)가 생성되고, 역류된 배기 가스는 연소실 내부까지 영향을 미친다. 또, 엔진 부하가 커질수록 first deep의 생성 시기는 지연되며, 그 크기는 점점 작아지는 경향을 알 수 있다.

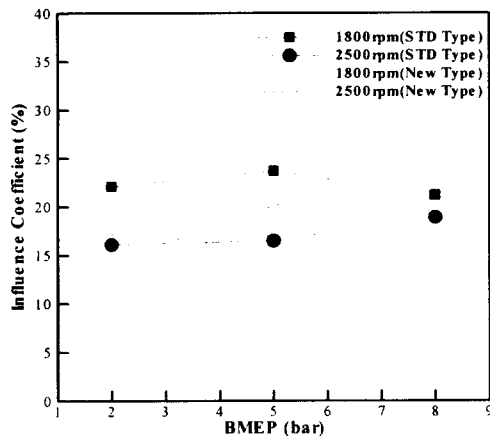


Fig. 7 The variation of influence coefficient according to engine loads.

Fig.5는 정규 사양과 신규 사양의 배기 매니폴드 입구부에서의 유동 속도를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 저부하 조건에서 주유동을 보면 신규 사양의 경우가 정규 사양에 비해 크게 나타나는데, 엔진 부하가 커짐에 따라 비슷

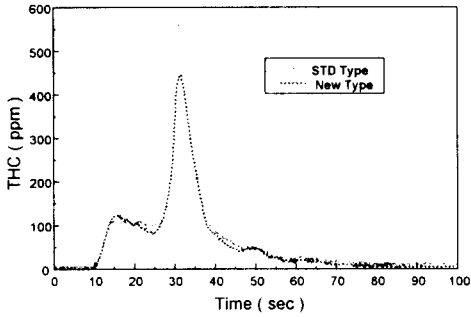


Fig. 8 THC emission level of STD Type New Type during the Phase 1 of LA-4 Mode.

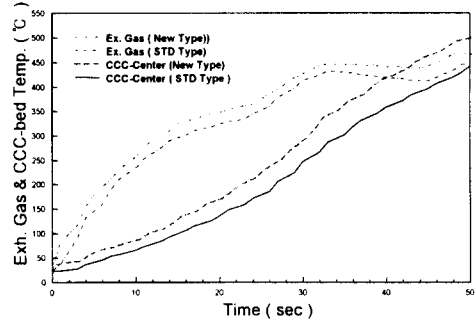


Fig. 9 Temperature profile of exhaust gas and CCC-bed during the first 50s for STD Type and New Type.

하게 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 정규 사양의 배기 매니폴드의 단면이 타원형임에 반해, 신규 사양의 배기 매니폴드는 원형에 가깝기 때문에 나타나는 것으로 사료된다.

Fig.6은 2000rpm, bmep 5 bar 조건에서 정규 사양 배기 매니폴드 및 CCC의 단면 A-A에서의 유속 측정 결과를 나타낸 것이다. 엔진 작동 조건에서는 주유동이 배기 시스템 내의 유동 형태에 가장 큰 영향을 미치므로 각각의 실린더에서 배출되는 배기 가스의 주유동이 측정점을 통과할 때를 나타내었다. No.1 실린더에서 블로우 다운이 일어나는 경우 No.1 실린더의 배기 매니폴드 유로 방향 쪽이 속도가 크게 나타남을 볼 수 있다. No.3 실린더의 경우도 마찬가지로 No.3 실린더의 배기 매니폴드 유로 방향 쪽이 속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 블로우 다운될 때 가스의 운동량이 크기 때문에 매니폴드의 유로 방향에 따라 혼합 영역에서의 유동이 크게 좌우됨을 알 수 있다.

3.2 O₂ 센서의 A/F 감지도 측정

Fig.7은 각 엔진 운전 조건에 따른 실린더별 A/F 감지도 분포값을 나타낸 것이다. 이 값은 실린더별 A/F 감지도 차이를 표시하며 크기가

작을수록 실린더별 A/F 영향을 균일하게 받음을 나타낸다. 1800rpm에서는 BMEP 2bar일 때 신규 사양 배기 매니폴드의 A/F 감지도 분포가 작게 나타나지만 부하가 큰 영역에서는 정규 사양 배기 매니폴드와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 2500rpm에서는 두 사양간 서로 비슷한 경향을 나타낸다. 실제로 차량 운전 상태 및 O₂ 센서의 피이드백 제어 영역을 고려할 경우 개선 배기 매니폴드의 O₂ 센서 위치가 실린더별 영향을 보다 균일하게 받을 것으로 예측된다.

3.3 성능 시험 결과

개선 배기 매니폴드의 경우 배출되는 배기 가스가 배기 매니폴드와 CCC 접합면에 직접적으로 부딪히지 않고 담체로 유입되도록 설계되었으므로 정규 사양에 비해 배기 저항 측면에서 불리하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 전부하 성능 시험 결과 최대출력 회전속도에서 배압, 출력 및 토오르가 동등 수준을 유지하였다. 또한, 각 실린더에서 배출되는 배기가스 간의 간섭은 거의 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

3.4 차량 배기 시험 결과

Fig.8은 LA4 모우드의 phase 1에서의 차량 시험 결과를 나타낸 것이다. 신규 사양 배기 매니폴드가 정규 사양에 비해 약 12% 정도 THC가 적게 배출되는 것을 알 수 있다. Fig.9는 담체 각 부분의 온도가 350°C에 도달하는 시간(L.O.T)을 보여준 것이다. 시험 결과, 개선 배기 매니폴드가 정규사양 배기 매니폴드에 비해 CCC 중심에서의 L.O.T.가 약 5초 단축되었기 때문에 초기 시동 시 배기 가스 저감에 효과적임을 나타낸다. 이와 같은 신규 사양 배기 매니폴드의 THC 저감과 L.O.T. 단축은 다음 3가지 요인으로 설명할 수 있다.

1) 배기 매니폴드 접합부 및 담체 전면에서의 유동 구조가 개선되었기 때문이다. 정규 사양의 경우 배기 가스가 혼합 영역의 반대편 벽면을 향해 충돌하는 반면, 개선 사양의 경우 혼합 영역의 벽면에 부딪히지 않고 바로 담체를 향해 진행하므로 벽면으로의 열량 손실이 상대적으로 줄어들게 된다.

2) 각 배기 매니폴드의 러너 길이가 줄어들었기 때문이다. 개선 사양은 1, 2, 3번 러너의 중심선 길이가 정규 사양에 비해 5~15% 감소하였으므로 배기 가스가 CCC 담체 전면에서 빠르게 도달하여 L.O.T는 단축된다.

3) 배기 매니폴드의 중량 감소로 인하여 열용량이 줄었다. 배기 매니폴드의 중량이 정규 사양 대비 약 20%, 표면적이 약 8% 줄었기 때문에 초기 시동시 배기 매니폴드 및 접합부 벽면으로의 열손실이 감소하고 담체로의 열전달률이 상승하게 된다. 그렇지만, 배기 가스와 직접 접촉하는 배기 매니폴드 표면의 두께는 두 사양이 거의 같으므로 열용량의 감소는 절대적 비중을 차지하지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

가솔린 엔진의 배기 매니폴드 및 CCC 개

발을 위하여 행한 배기 시스템 내 유동 측정, A/F 감지도 측정, LA4 mode 배기가스 시험 등의 연구를 수행하여 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) LDV를 이용한 유속 측정 시험을 통하여 배기 매니폴드의 유동 구조를 정량적으로 파악하였다.
- 2) O₂ 센서의 A/F 감지도를 측정된 결과, 신규 사양 배기 매니폴드가 정규 사양 배기 매니폴드에 비해 실린더별 영향을 균일하게 받는 것으로 확인되었다.
- 3) 유동을 고려하여 설계, 제작한 신규 사양 배기 매니폴드의 경우 정규 사양 대비 L.O.T. 가 약 5초 단축됨으로써 냉시동시 THC 배출량을 12% 저감하는 효과를 얻었으며, 엔진 성능은 전부하에서도 동등 수준을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 순천대학교 "자동차부품 및 소재 연구·개발센터"의 지원에 의한 것이며, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] Bressler, H., Rammoser, H., Neumaier, H., and Terres, F., 1996, Experimental and Predictive Investigation of a Close Coupled Catalyst Converter with Pulsating Flow, SAE Technical Paper No. 960564
- [2] Jeong, S. and Kim, T., 1997, CFD Investigation of the 3-Dimensional Unsteady Flow in the Catalytic Converter, SAE Technical Paper No. 971025
- [3] Kishi, H., Hashimoto, H., Fujimori, K., Ishii, K., and Komatsuda, T., 1998,

Development of the Ultra Low Heat Capacity and Highly Insulating (ULOC) Exhaust Manifold for ULEV, SAE Technical Paper No. 980937

- [4] Martin, A.P., Will, N.S., Bordet, A., Cornet, P., Gondoin, C., and Mouton, X., 1998, Effect of Flow Distribution on Emissions Performance of Catalytic Converters, SAE Technical Paper No. 980936
- [5] Welten, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H., and Rammoser, D., 1993, Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction, SAE Technical Paper No. 930780
- [6] Zhao, F.Q., Bai, L., Liu, Y., Chue, T.H., and Lai, M. C. , 1997, Transient Flow Characteristics Inside the Catalytic Converter of a Firing Gasoline Engine, SAE Technical Paper No. 971014

저 자 소 개



김기성(金基成)

1960년 6월생, 1987년 부산대학교 기계설계학과 졸업, 1994년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사), 1994~1998 현대자동차 중앙연구소, 1998~ 여수대학교 기계공학과 전임강사