

## 배기계 형상 개선을 통한 THC 저감에 관한 연구

김기성\* · 이용호\*\*

### THC Reduction through the Improvement of Exhaust System

K. S. Kim · Y. H. Lee

**Key words** : Unburned HC(미연 탄화수소), Exhaust emission(배기 오염), Exhaust manifold(배기 다기관), CCC(Close Coupled Catalyst, 근접촉매)

#### Abstract

Experimental studies were performed to understand the flow characteristics in the exhaust system and 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 systems with two types of exhaust manifolds(STD and New Type) were measured by using LDV technique under various engine conditions. It was found that the flow characteristics in the New Type exhaust manifold was more desirable in a view point of heat loss reduction from the exhaust gases. The vehicle emission tests showed that the THC emission in the New Type exhaust manifold was decreased by 12%.

#### 1. 서 론

최근 자동차용 엔진의 개발은 고출력, 저연비, 경량화를 추구하고 있으며, 이들 개발 목표보다 더 중요한 과제는 점차적으로 엄격해져 가는 자동차 배기가스 규제치를 만족할 수 있는 환경친화적인 엔진을 개발하는 것이다. 이로 인해 엔진에서의 유해 배기가스를 줄이는 문제에 대한 관심이 증대됨에 따라 배기 시스템에 대한 연구가 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 배기가스 저감을 위한 가장 중요한 요소 중의 하나로 인식되어져 왔다. 이러한 촉매 변환기 설계에서 가장 중요한 인자는 담체 내 유동속도의 분포와 담체 전후의 압력 강하이다<sup>(1,2)</sup>. 담체 입구에서의 유동

\* 여수대학교 기계공학과(원고접수일 : 2000년 6월)

\*\* 여수대학교 기계공학과

\*\*\* 여수공업대학 기계설계학과

속도 및 온도분포는 배기 가스와 촉매 장치간 열 및 질량 전달율을 좌우하고, 이것이 결국 촉매장치의 전체 정화효율을 결정한다<sup>13,14</sup>. 또, 높은 배압(back pressure)은 엔진의 성능을 제한하고, 연비를 악화시키는 주요 요인 중 하나인데, 이는 촉매 변환기를 포함한 배기 시스템 내의 압력 강하에 주로 기인한다. 이상적인 촉매 변환기에서는 담체 전부위를 골고루 이용하기 위해서 담체 전면에서의 배기 가스 유동이 균일한 분포를 가져야 한다<sup>15</sup>. 그렇게 함으로써 담체 전체를 배기가스 정화에 효과적으로 이용할 수 있고, 나아가 담체의 내구성을 증대시킬 수 있다. 그러나, 실 엔진의 배기 시스템에 장착된 촉매 변환기 내의 유동분포는 엔진의 운전조건에 따라 변하므로 엔진이 운전되는 전 영역에서 균일한 분포를 갖는 것은 불가능하며, 이와 같은 유동분포의 불균일성 때문에 담체의 국부적인 에이징 현상이 초래되어 담체의 효율 및 내구성을 저하시키는 주요 요인이 된다<sup>16</sup>. 실제로 배기 매니폴드 및 접합부, 담체의 형상과 같은 설계 인자들과 엔진의 운전조건, 차량 장착시의 레이아웃 제한 등은 모두 담체 내 유동분포에 직간접적인 영향을 미치는 인자로 알려져 있다.

배기가스 정화특성이 좋고 엔진 출력의 손실이 적은 이상적인 배기 매니폴드 및 CCC (Close Coupled Catalyst) 시스템의 설계를 위해서는 이들 내부의 유동특성을 정확히 이해하는 것과 이들 형상을 변화시켰을 때 배기특성과 출력에 미치는 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 상용의 특정 가솔린 엔진에 대해 배기 매니폴드 및 CCC 시스템 내의 유동특성을 규명하기 위해 유동장을 측정하였다. 그리고, 배기 매니폴드 및 CCC 시스템의 형상 변화에 대해 유동, 배기가스 특성(냉시동시 미연탄화수소 배출특성), 엔진 출력, O<sub>2</sub>센서의 감지도 등에 대한 영향을 측정하였다.

배기 매니폴드 및 CCC 시스템의 유동장 측정은 엔진이 연소를 행하는 상태에서 LDV (Laser Doppler Velocitometry)를 이용해서 행했으며, 배기 매니폴드의 형상변화에 대한 영향은 기존의 정규사양 배기 매니폴드(STD Type)의 형상을 직관적인 엔지니어링에 의해 관벽으로 열손실이 적도

록 수정한 신규사양 배기 매니폴드(New Type)를 제작해서 이들 두 개의 배기 시스템에 대해 시험을 행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 측정장치 및 시험 조건

시험 대상 엔진은 승용차용 2리터급 가솔린 엔진이다. 이 엔진의 배기 매니폴드 및 CCC 입구부 유속측정을 위한 LDV 시험장치를 Fig.1에 나타냈고, 시험장치 제원을 Table 1에 정리하여 나타냈다. 배기 매니폴드 및 CCC 입구부 유속측정은 Table 2와 같은 조건으로 정규사양(STD Type) 및 신규사양(New Type)에 대해 LDV를 이용한 유속 측정 시험을 진행하였다.

Fig.2는 배기 매니폴드 입구부 및 CCC 입구부(O<sub>2</sub> 센서가 위치한 단면)에서의 유속 측정 위치를 나타낸 것이다. 배기 매니폴드 입구부에서의 유속 측정은 입구부에서 30mm 정도 떨어진 위치에서 행하였으며, 이 단면상의 대칭 중심선을 따라 설정된 11개의 측정점에서 측방향(유동의 진행 방향) 속도를 측정하였다.

CCC 입구부에서의 유속 측정은 Top view에 표시된 것과 같이 담체 윗면으로부터 70mm 인 곳에 측정 단면(단면 A-A)을 형성하고, 이 단면의 중심선을 따라 총 12개의 측정점에서 담체로 들어가는

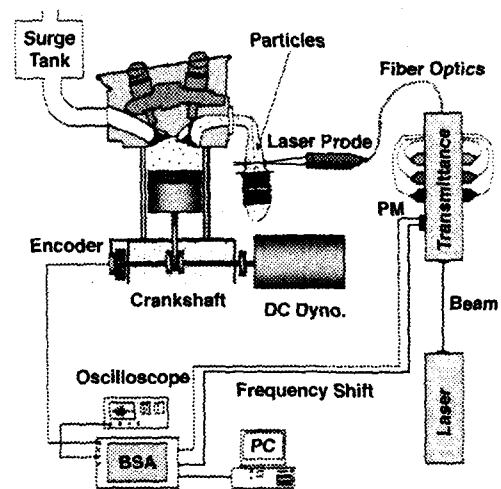


Fig. 1 The layout of experimental apparatus.

Table 1 The 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
Signal Processing		BSA (Burst Spectrum Analyzer)

Table 2 Engine operating conditions

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

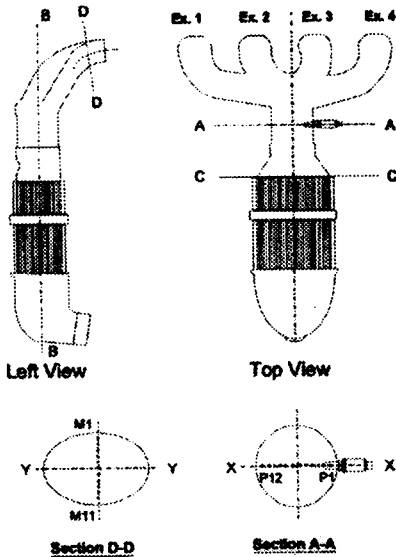


Fig. 2 Measuring points in the exhaust manifold and mixing zone.

측방향 속도를 측정하였다. 속도측정은 배기 매니폴드의 입구부의 경우와 CCC 입구부의 경우 직경이 각각 10mm와 20mm인 수정창을 장착해 이를 통해서 행하였다.

엔진의 출력측정과 THC측정을 위한 차량 배기 시험은 DC동력계와 샤시동력계 및 Horiba사의 MEXA 배기가스 측정장치를 이용하였다.

### 2.2 정규 사양 및 신규 사양 배기 매니폴드의 비교

Fig.3에서는 정규사양과 신규사양 배기 매니폴

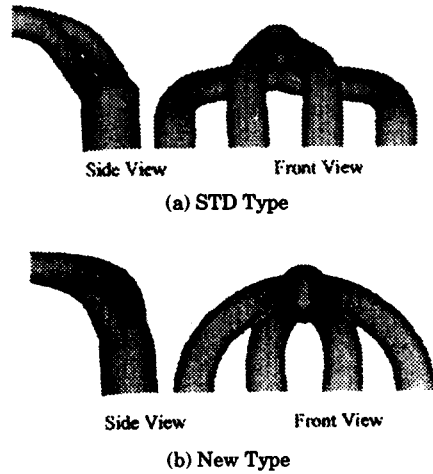


Fig. 3 The geometric configurations of STD and New Type exhaust manifolds.

Table 3 Geometric specifications of STD and New type exhaust manifolds

Specifications	Types	STD Type	New Type
Patterns of Runner Junction		1-4, 2-3	1-2, 3-4
Center Line Length of Each Runner [mm]	No.1	243	232
	No.2	196	166
	No.3	187	166
	No.4	224	232
Mass[kg]		4.8	3.8
Sectional Shape of Mixing Zone		Round	Round
Diameter of Junction[mm]		64	64
Total Volume[cc]		971	951
Inner Surface Area[mm <sup>2</sup> ]		100,724	92,552
Offset between CCC and Mixing Chamber[mm]		9.5 to No.3 side	0

드의 형상을 나타낸 것이다. 신규사양은 다음 4가지 사항을 고려하여 설계되었다.

- ①담체 전면에서의 유동 균일화 정도 개선
- ②O<sub>2</sub> 센서의 효율적 장착 위치 선정
- ③배압 증가 억제

④시동시 담체의 L.O.T.(Light Off Time) 개선  
신규사양 배기 매니폴드의 형상면에서의 특징을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 신규사양의 경우 정규사양과는 달리 담체 전면을 향하는 측방향 운동량과 배기가스 열량 손실을 줄이기 위해 No.1과 No.4 러너(runner)의 단면 형상을 원형에 가깝게 하여 배기 매니폴드의 체적은 거의 같게 유

지하면서도 표면적은 감소된 형태로 설계하였다. 또한, 배기 매니폴드와 CCC의 중심축을 일치시켜, O<sub>2</sub> 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. O<sub>2</sub>센서 공연비 감지도 측정법

광역 O<sub>2</sub> 센서는 배기가스 내 O<sub>2</sub> 농도에 따라 DC 전압으로 출력이 나타나게 되어 있는 센서이다. O<sub>2</sub> 센서의 출력을 크랭크각에 동기하여 측정할 경우 실린더간 공연비 변화에 대해 일정한 경향을 갖는 신호를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 특정 실린더의 공연비를 10% 연료가 희박하도록 변화시켜서 출력신호의 진폭크기를 측정해 각 실린더간 공연비 감지도를 측정하였다. 공연비 감지도는 영향계수(IC, influence coefficient)를 다음과 같이 정의하여 상대적인 비교를 행하였다.

$$IC = 100 \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^4 (V_{ki} - \bar{V})^2 / (4N - 1)}{\bar{V}}$$

여기서  $N$ 은 사이클 수,  $V_{ki}$ 는 실린더  $k$ 의 공연비를 10% 희박하게 했을 때  $i$ 번째 사이클 센서 출력값의 최대진폭,  $\bar{V}$ 는  $V_{ki}$ 의 평균값이다. 이와 같이 영향계수를 정의하였을 때, 영향계수값이 작을수록 O<sub>2</sub> 센서가 각 실린더의 공연비를 끌고루 반영한다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 정규 및 신규사양 배기 매니폴드의 정규 O<sub>2</sub> 센서 위치에서 실린더간 공연비 감지도를 비교하였다. 각 러너에 설치된 O<sub>2</sub> 센서의 출력을 기준으로 하여 실린더별 연료량을 변화시켜 실린더간 공연비가 차이가 나게끔 하였다. 시험시 엔진의 운전 조건은 엔진 회전속도를 1800, 2500rpm으로 하였고, 엔진의 부하는 BMEP (Brake Mean Effective Pressure)로 2, 5 및 8 bar 조건으로 하였다. O<sub>2</sub> 센서의 공연비 감지도는 그 절대량보다는 상대적인 값의 분포만을 주로 비교하였다.

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 유동측정 시험

배기 매니폴드 및 CCC 시스템 내의 유동특성을 파악하기 위해 배기 매니폴드의 입구부와 CCC상류부인 혼합구간(mixing zone)에서의 유동을 LDV로 측정하였다. 실 엔진에서와 같이 연소가 이루어지는 조건에서 시험을 행하였고, 측정을 위한 관측창도 작기 때문에 실제의 유동과 비슷할 것으로 사료된다.

Fig.4는 2000rpm, BMEP가 2, 5bar 및 WOT (full load)인 조건에서의 No.3 배기 매니폴드 러너 입구에서 측정된 유속의 시간적 변동을 나타낸다. 실린더 내에서 배출되는 배기 유동은 담체의 존재로 인하여 극심한 맥동유동 특성을 보여주고 있다.

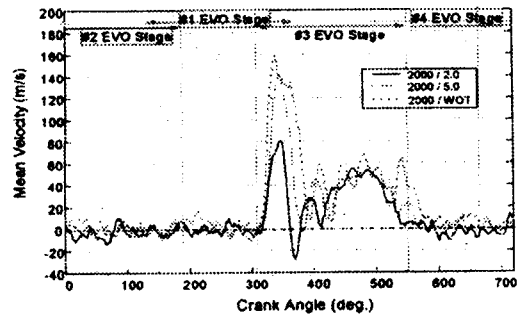


Fig.4 Ensemble averaged velocities at the entrance of STD Type exhaust manifold with different engine loads.

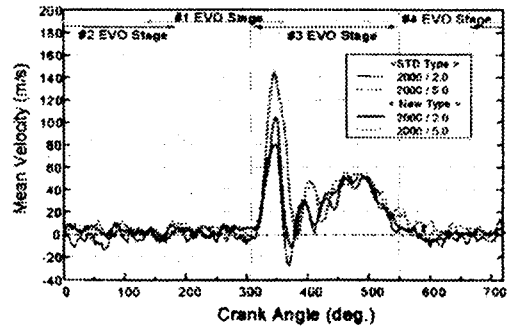


Fig.5 Comparisons of Ensemble averaged velocities at the entrance of STD and New Type exhaust manifolds with different engine loads.

이와 같은 유동 형태는 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 실린더 내의 높은 압력에 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 압력파의 반사와 실린더 내 압력 감소의 영향으로 배기 시스템 내에는 순간적인 역압력 구배가 발생하여 역류(Fig.4에서 first deep)가 형성된다. 또, 엔진 부하가 커질수록 first deep의 생성 시기는 지연되며, 그 크기는 점점 작아지는 경향을 알 수 있다.

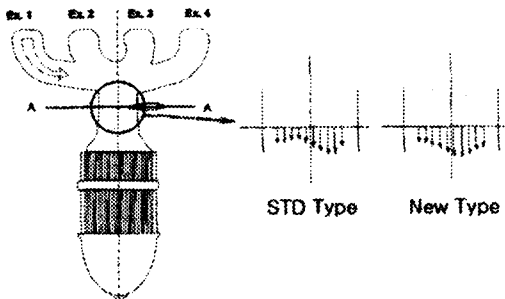
Fig.5는 정규사양과 신규사양의 배기 매니폴드 입구부에서의 유속을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 저부하 조건에서 주유동을 보면 신규사양의 경우가 정규사양에 비해 크게 나타나다가 엔진 부하

가 커짐에 따라 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 정규사양의 배기 매니폴드의 단면이 타원형임에 반해, 신규사양의 배기 매니폴드는 원형에 가깝기 때문에 나타나는 것으로 사료된다.

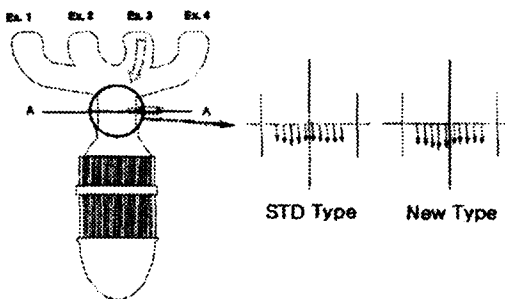
Fig.6은 2000rpm, bmep 5 bar 조건에서 정규사양과 신규사양에 대해 CCC 입구부 단면 A-A에서의 유속측정 결과를 나타낸 것이다. 엔진의 블로우다운시 생성되는 주유동이 배기 시스템 내의 유동 형태에 가장 큰 영향을 미치므로 Fig.6에서는 유동 측정 데이터 중 No.1과 No.3 실린더에서 배출되는 배기 가스의 주유동이 측정점을 통과할 때를 각각 나타내었다. 정규사양의 결과를 보면, No.1 실린더에서 블로우다운이 일어나는 경우 No.1 실린더의 배기 매니폴드 유로방향 쪽이 속도가 크게 나타남을 볼 수 있다. No.3 실린더의 경우도 마찬가지로 No.3 실린더의 배기 매니폴드 유로방향 쪽이 속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나, No.1 실린더의 경우가 유동의 치우침이 심하게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 No.1 배기 매니폴드의 중심축과 CCC 중심축이 이루는 각이 크기 때문이다. 이러한 상황에서는 주유동이 부딪히는 맞은 편 벽면으로의 열손실이 클 것으로 여겨지며 따라서, CCC가 활성화되는 시간이 지체될 것으로 사료된다. 신규사양의 경우도 배기 매니폴드의 유로 방향에 따라 유동의 치우침 현상이 나타나나, No.1 실린더의 경우 유속이 최대가 되는 지점이 A-A단면의 중심쪽으로 가까워졌는데 이는 신규사양의 경우가 No.1 실린더 배기 매니폴드의 중심축과 CCC 중심축이 이루는 각이 정규사양에 비해 크게 줄어들었기 때문이다. 따라서, 유동데이터를 고려할 때 신규사양의 경우가 벽면으로의 열손실을 보다 줄이는데 효과적일 것으로 사료된다.

### 3.2 O<sub>2</sub> 센서의 공연비 감지도 측정

Fig.7은 엔진의 운전조건에 따른 실린더별 공연비 감지도를 정량화한 영향계수를 나타낸 것이다. 1800rpm에서는 BMEP 2bar일 때 신규 사양 배기 매니폴드의 영향계수가 작게 나타나지만 부하가 큰 영역에서는 정규사양 배기 매니폴드와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 2500 rpm에서는 두 사양 간 서로 비슷한 경향을 나타낸다. 실제로 차량 운



(a) The EVO stage of No.1 cylinder



(b) The EVO stage of No.3 cylinder

**Fig. 6 Comparisons of velocity distributions along X axis of section A-A for STD and New Type exhaust manifolds.**

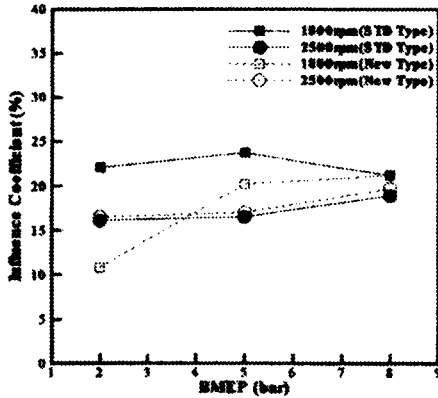


Fig. 7 The variation of influence coefficients according to engine loads.

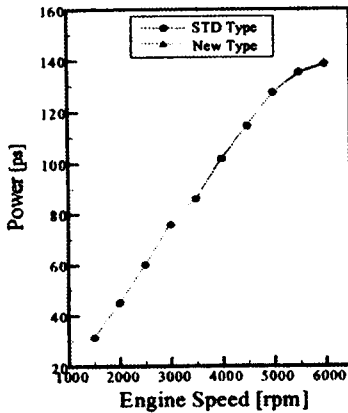


Fig. 8 Comparisons of engine power with STD and New Type exhaust manifolds.

전상태 및 O<sub>2</sub> 센서의 피이드백 제어영역을 고려할 경우 신규사양 배기 매니폴드의 O<sub>2</sub> 센서 위치가 실린더별 영향을 보다 균일하게 받을 것으로 예측된다.

### 3.3 성능 시험

정규사양과 신규사양 매니폴드가 엔진의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 엔진 동력시험을 행했으며, 전부하 성능시험 결과를 Fig.8에 도시하였다. 저속에서 고속 전영역에 대해서 정규사양 및 신규사양 간의 출력 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 Table 3에 나타난 바와 같이 정규사양의 배기 매니폴드의 접합방식인 1-4, 2-3과 달리 신규사양의 경우 1-2, 3-4의 접합방

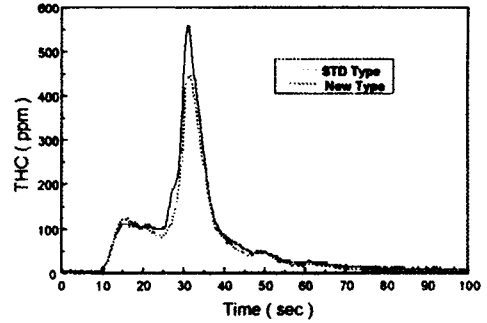


Fig. 9 THC emission level of STD Type New Type during the Phase 1 of LA-4 Mode.

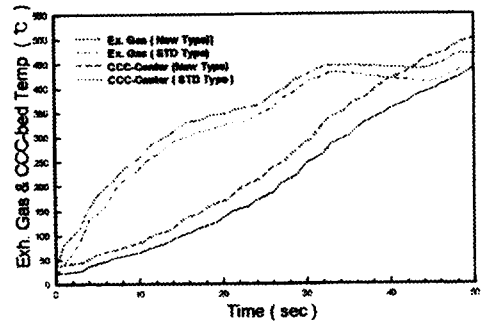


Fig. 10 Temperature profiles of exhaust gas and CCC-bed during the first 50s with STD and New Type exhaust manifolds.

식을 이용했음에도 배기간섭에 의한 출력저하는 나타나지 않음을 알 수 있다.

### 3.4 차량 배기 시험

Fig.9는 LA4 모드에서의 phase 1에서의 차량 시험 결과를 나타낸 것이다. 신규사양 배기 매니폴드가 정규사양에 비해 약 12% 정도 THC가 적게 배출되는 것을 알 수 있다. Fig.10은 담체 각 부분의 온도가 350℃에 도달하는 시간(L.O.T)을 보여준 것이다. 시험 결과 신규사양 배기 매니폴드가 정규사양 배기 매니폴드에 비해 CCC 중심에서의 L.O.T.가 약 5초 단축되었음을 알 수 있다. 이와 같은 신규사양 배기 매니폴드의 L.O.T. 단축과 THC 저감은 다음 3가지 요인으로 설명할 수 있다.

- 1) 배기 매니폴드 접합부 및 담체 전면에서의 유동구조가 개선되었기 때문이다. 신규사양의 경우 정규사양에 비해 배기가스가 혼합영역

의 반대편 벽면에 충돌하는 정도가 약해서 열량손실이 상대적으로 줄어들게 된다.

- 2) 각 배기 매니폴드의 러너 길이가 줄어들었기 때문이다. 신규사양은 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. 신규사양 배기 매니폴드의 중량이 정규사양 대비 약 20%, 표면적이 약 8% 줄었기 때문에 초기 시동시 배기 매니폴드 및 접합부 벽면으로의 열손실이 감소하고 담체로의 열전달률이 상승하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 배기계 형상개선을 통한 가솔린 엔진의 THC 저감 연구의 일환으로서 배기 매니폴드 및 CCC 어셈블리 내의 유동측정과 배기 매니폴드의 형상을 변경에 따른 그 효과를 측정하였다. 이를 통해 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 배기 매니폴드 입구의 유동은 극도의 맥동유동특성을 보이며, 블로우 다운시의 주유동과 배기 행정시 피스톤의 상승에 의한 2차유동으로 구분된다.
- 2) CCC 입구부의 유동은 배기 매니폴드에 가해지는 실린더별 주유동에 의해 변화가 크며, 러너의 중심축과 CCC 중심축이 이루는 각이 크면 러너 맞은편 벽면에서의 유동속도가 크게 나타난다.
- 3) O<sub>2</sub> 센서의 A/F 감지도를 측정한 결과, 신규 사양 배기 매니폴드가 정규사양 배기 매니폴드에 비해 실린더별 영향을 균일하게 받는 것으로 확인되었다.
- 4) 유동을 고려하여 설계, 제작한 신규사양 배기 매니폴드의 경우 정규사양 대비 L.O.T. 가 약 5초 단축됨으로써 냉시동시 THC 배출량을 12% 저감하는 효과를 얻었으며, 엔진 성능은 동등 수준을 나타냈다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 여수대학교 “설비자동화 및 정보시스템 연구·개발센터”의 지원에 의한 것이며, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

- 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. CFD Investigation of the 3-D Unsteady Flow in Catalytic Converter, SAE Paper No. 971025
- 3) Kishi, H., Hashimoto, H., Ishii, K., and Komatsuda, T., 1998, Development of the Ultra Low Heat Capacity and Highly Insulating (ULOC) Ex. Manifold for ULEV, SAE Paper No. 980937
- 4) Martin, A.P., Bordet, and Mouton, X., 1998, Effect of Flow Distribution on Emissions Performance of Catalytic Converters, SAE 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



### 이용호(李勇虎)

1962년 12월생, 1983년 조선대 기계공학과 졸업, 1985년 인하대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1999년 전남대 기계공학과 졸업(공학박사), 1994~여수공업대학 기계자동차계열 조교수