

## 가솔린 엔진의 배기 열교환기가 촉매 온도에 미치는 영향에 관한 연구

이 석 환 · 배 충 식\*

KAIST 기계공학과

### Effect of Exhaust Heat Exchanger on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine

Seokhwan Lee · Choongsik Bae\*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 25 October 2003 / Accepted 13 February 2004)

**Abstract** : Close-coupled catalyst (CCC) can reduce the engine cold-start emissions by utilizing the energy in the exhaust gas. However, in case the engine is operated at high engine speed and load condition, the catalytic converter may be damaged and eventually deactivated by thermal aging. Excess fuel is sometimes supplied intentionally to lower the exhaust gas temperature avoiding the thermal aging. This sacrifices the fuel economy and exhaust emissions. This paper describes the results of an exhaust heat exchanger to lower the exhaust gas temperature mainly under high load conditions. The heat exchanger was installed between the exhaust manifold and the inlet of close-coupled catalytic converter. The exhaust heat exchanger successfully decreased the exhaust gas temperature, which eliminated the requirement of fuel enrichment under high load conditions. However, the cooling of the exhaust gas through the heat exchanger may cause the deterioration of exhaust emissions at cold start due to the increment of catalyst light-off time.

**Key words** : Heat exchanger(열교환기), Close-coupled catalyst(근접장착촉매), Cold start(냉간시동), Light-off time(활성화 시간), Fuel enrichment(연료증량), Fuel economy(연료경제성)

#### 1. 서론

배기 규제가 강화됨에 따라 엔진 내부에서의 유해가스 저감 기술만으로는 규제를 만족시키기에는 한계가 있어 후처리 기술(Aftertreatment technology) 적용이 불가피해 짐으로써 가솔린 엔진에서는 배기 정화 촉매가 널리 사용되어지고 있다. 일반적으로 촉매는 보통의 활성화 온도 (light-off temperature) 인 300°C에 이르지 않으면 작동을 하지 않는다.<sup>1)</sup> 이러한 이유에서 근접장착 촉매(Close-coupled catalyst ; CCC), Electrically heated catalyst (EHC), Hydrocarbon

absorber, By-pass catalyst 같이 촉매의 저온 시동성을 향상시키는 방법들이 연구되고 있다.<sup>2)</sup> 이중 귀금속 팔라듐(Pd)을 포함한 근접장착 촉매는 배출가스 저감에 매우 효과적이라고 알려져 있기 때문에 현재 대부분의 자동차 생산 업체들이 적용하고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

한편 촉매는 1050°C가 넘는 고온에 장시간 노출 되면 성능이 감소하는 열열화(thermal aging) 현상이 발생되어 정화 효율이 감소할 뿐만 아니라 고온으로 인해 촉매 담체가 녹아버리는 현상이 생기기도 한다.<sup>4)</sup> 이와 같은 현상은 배기량에 비해 큰 차체를 가진 차량이나 배출가스의 온도가 특히 높은 터보 차량에서 심하게 나타난다. 이런 경우에는 엔진에

\*To whom correspondence should be addressed.  
csbae@kaist.ac.kr

연료를 농후하게 공급해서 증발 잠열을 이용하여 배출가스의 온도를 낮추는 방법이 많이 사용되는데, 차량의 연료 경제성이 악화되고 촉매의 정화효율의 감소로 인해 유해 배출 물질도 많이 배출하게 되는 현상이 발생한다.<sup>5)</sup> 이와 같이 배출가스 온도의 과상승은 차량의 연료 경제성과 촉매의 열적 파손에 악영향을 미친다. 이전 연구에서는 이미 정상운전 상태에서의 배출가스 온도 측정 실험을 통하여 연료량 변화, 점화 시기 지연 운전 및 실화조건 등 비정상적인 운전조건에서 배출가스 온도 과상승을 살펴보았다. 이로부터 배출가스 온도 상승으로 인한 촉매의 열화 현상을 유발하는 주요 인자를 도출하였다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 열교환기를 배기관에 삽입하여 배출가스의 온도를 저감시키고자 하였다.<sup>7)</sup> 열교환기의 성능을 최대화하기 위하여 내부 표면에 핀을 장착하였으며,<sup>8)</sup> 네 가지 타입의 핀을 가지는 열교환기를 설계하고 그 중에서 효과가 가장 좋은 열교환기를 선정하였다. 열교환기를 장착하는 경우에는 고속, 고부하 운전 영역에서의 인위적인 연료증량 현상을 제거할 수 있어 연료 경제성도 개선할 수 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 대상엔진

본 실험에서 사용한 엔진은 1.0L 상용 가솔린 엔진으로 유럽의 EURO-3 Mode 배기규제에 대응하기 위하여 근접장착 촉매가 부착된 엔진이다. 엔진 운전 변수들을 파악하고 ECU의 연료 매핑값을 변화시키기 위해 프로그래밍이 가능한 ECU(Engine Management System ; NTK + ETAS MAC2)를 사용하였으며, 엔진의 주요 제원은 Table 1과 같다.

실차 실험시에는 대상 엔진과 동일한 엔진을 장

Table 1 Engine specifications

Specification	Resources
Number of cylinders	4
Bore(mm)	66
Stroke(mm)	73
Bore pitch(mm)	72.5
Displacement(cc)	999
Compression ratio	9.8

착한 차량을 이용하였으며, 차량의 누적 주행거리는 12,000km이다.

### 2.2 열교환기(Heat exchanger)

배출가스의 온도를 저감시켜 촉매의 온도를 감소시키기 위한 새로운 형태의 열교환기를 설계하였다. 이 열교환기 장치는 배기 매니폴드와 근접장착 촉매 사이에 위치하여 열교환기로 냉각수를 유입시켜 배출가스 온도를 저감한다. Fig. 1은 열교환기에 의해서 일어나는 열교환 효과를 도식적으로 나타낸 그림이다. 배출가스와 열교환기 사이에서 일어나는 대류 효과와 배기 매니폴드와 열교환기 벽 사이의 접촉에 인해서 일어나는 전도 효과가 냉각효과에 주원인이 된다. 본 실험에서는 4가지 종류의 열교환기를 설계하여 각각의 냉각성능을 파악하였다.

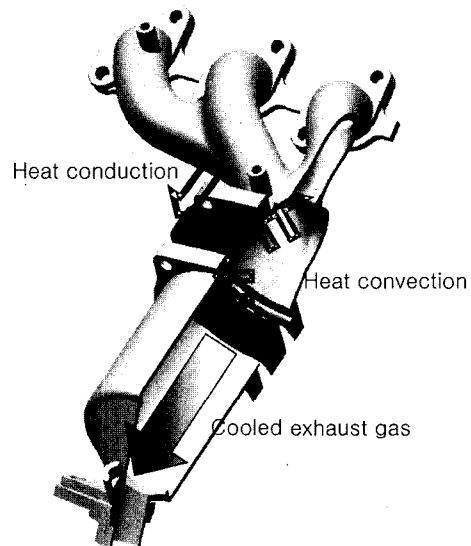


Fig. 1 Schematic diagram of heat exchanger and heat exchange phenomena

### 2.3 열교환기로 흐르는 냉각수 순환 방법

엔진 내부에 설치되어 있는 냉각수 순환 펌프를 이용하여 열교환기 쪽으로 냉각수를 순환시키고자 하였다. 냉각수로는 물 50% + Ethylene Glycol 50%의 혼합물을 사용하였다. Fig. 2는 냉각수 순환 방식을 나타내고 있는데, 엔진 내부의 냉각수 순환 펌프를 이용하기 위하여 Heat core 쪽으로 흐르는 냉각 라

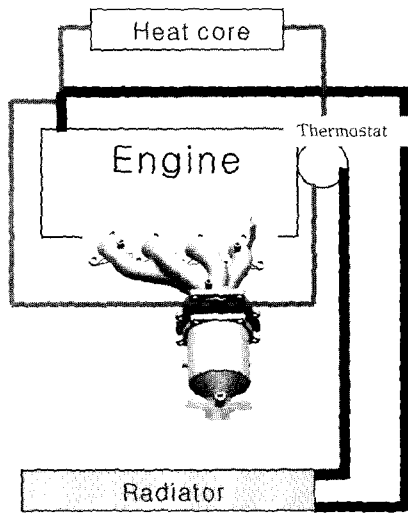


Fig. 2 Schematic diagram of coolant circulation

인을 열교환기 쪽으로 연결해 주었다. 엔진 내부의 순환 펌프를 이용하기 때문에 엔진 회전수의 증가에 따라서 냉각수 유량이 증가하게 된다.

#### 2.4 실험방법

엔진의 회전수와 부하의 변화에 따른 촉매 온도, 촉매 후단부 지점에서의 배출가스 온도 변화를 측정하였다. 2000~5000rpm의 엔진 회전수 조건에서 10~55 N·m의 부하 조건에서 온도 측정을 하였다. 실차 실험에서는 EC 모드 주행 조건에서 열교환기의 냉각 성능과 유해 배출물질의 배출량을 측정하였으며, 새시 동력계를 이용하여 열교환기의 적용 시 개선된 연료 경제성을 파악하였다. EC 모드란 배출가스 측정을 위한 시험모드로 ECE(Economic Commission for Europe) 모드와 EUDC(Extra Urban Driving Cycle)로 구성되어 있다. ECE 사이클의 총거리는 4.052km이며, 평균 속도는 18.7km/h, 최대속도는 50.0km/h로 아이들이 차지하는 비율은 전체의 31%이며, EUDC 사이클의 총거리는 11km, 평균속도 32.5km/h, 최고속도 120.0km/h이다.

배출가스, 촉매장치 및 냉각수의 온도를 파악하기 위해서 K 타입의 열전대식 온도측정 장치를 사용하였으며, 촉매의 경우는 담체로부터 40mm의 깊이에 장착하였다. 지름이 3.2mm가 되는 열전대를 사용하였으므로, 촉매 담체의 Bulk 온도라고 간주

할 수 있다. 유해가스 배출량을 측정하기 위하여 Horiba사의 Exhaust gas analyzer(MEXA-1500D)를 사용하였다. 연료 경제성을 측정하기 위하여 실제 차량에 직접 연비 측정 기록계를 장착하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 내부 표면에 장착되는 핀 형상에 따른 열교환기의 냉각성능

열교환기 내부 표면에 장착되는 핀 형상에 따른 열교환기의 냉각성능을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 우선 4가지 종류의 열교환기를 설계하였다. 1번 타입은 핀을 장착하지 않은 경우이고, 2번 타입은 일반적인 격자 타입의 핀이 장착되었으며, 3번 타입은 열교환기 중심을 통과하는 배출가스를 중점적으로 냉각시키기 위하여 마차 바퀴 형태의 핀을 장착한 것이다. 4번 타입은 30개의 짧고 굵은 핀들이 장착되어서 냉각효과를 극대화하고자 하였다. 4000rpm의 엔진 회전수 조건에서 부하의 변화에 따른 촉매 온도와 촉매 후단에서의 배출가스의 온도 변화를 살펴보았다. 먼저 열교환기가 없는 경우의 온도 값을 기준으로 열교환기로 인해 생긴 온도 변화량을 열교환기의 냉각 성능을 대표하는 값으로 선정하였다. 온도 변화량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

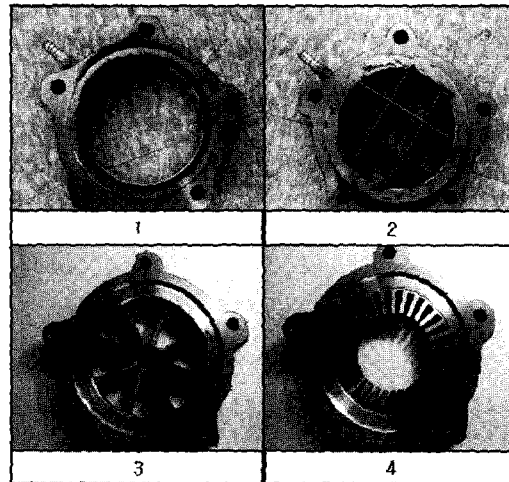


Fig. 3 A photograph of the four different heat exchangers(Type1, Type2, Type3, Type4)

$$\Delta T = T_{HX} - T_0$$

Fig. 4, 5는 열교환기에 의해 발생하는 근접장착 촉매와 촉매 후단에서의 배출가스의 온도 저감량을 네 가지 형태의 열교환기에 따라 각각 측정한 그래프이다. 4000rpm의 엔진 회전수에서 부하의 증가에 따른 온도 저감량을 나타내고 있다. 촉매 온도 저감량 그래프를 살펴보면 4번 타입, 즉 사각형 핀이 장착된 형태의 열교환기가 70~90°C 정도의 온도 저감량을 보이면서 냉각 성능이 가장 좋은 것으로 판단이 되었다.

촉매 후단에서의 배출가스 온도를 측정한 그래프에서도 4번 교환기가 80~90°C의 온도 저감을 보이

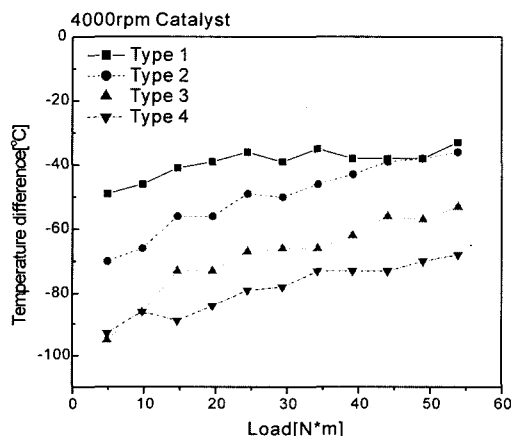


Fig. 4 Catalyst temperature reduction according to four heat exchanger

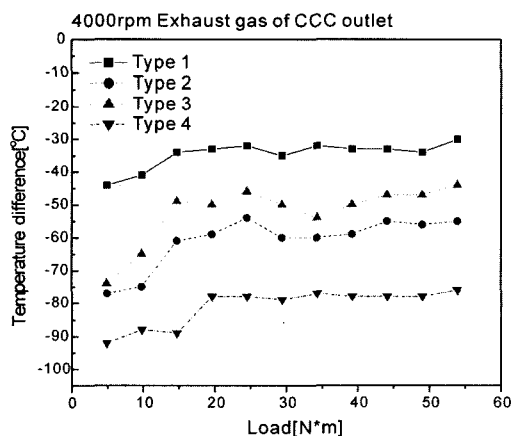


Fig. 5 Exhaust gas temperature at the outlet of CCC under different heat exchanger

면서 냉각 성능이 가장 좋게 나타났다. 열교환기에 핀을 장착한 경우에는 핀이 없는 경우에 비해서 40~50°C 추가적인 냉각 효과를 얻을 수 있다. 이후의 모든 실험에서는 냉각 성능이 가장 좋은 4번 열교환기를 사용하였다.

### 3.2 열교환기 장착에 따른 엔진 배압 특성

열교환기에 핀이 장착되면 엔진에서 배압(back pressure)이 증가할 가능성이 있으며, 배압의 증가는 전부하 운전조건에서 엔진 출력의 감소로 이어질 수 있다.<sup>9)</sup> 사각 핀을 장착한 열교환기가 엔진의 배압과 엔진출력에 미치는 영향을 살펴보았다. 2500~5000rpm의 엔진 회전수 조건에서 WOT (Wide Open Throttle) 영역을 상대로 엔진 출력과 배압을 측정하였다. 배압 측정 센서로는 최대 10bar의 압력까지 측정할 수 있는 Kistler사의 Piezoresistive Transducer 타입의 압력 센서(4045A)를 사용하였으며, 엔진 흡구부 지점에서 배압 측정을 하였다.

Fig. 6은 열교환기의 장착 유무에 따른 배압과 엔진 출력 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 배압의 시간변동 영향을 줄이기 위하여 각각의 엔진 회전수 조건에서 WOT 조건을 만들어준 후에 10초 동안 10,000개의 데이터를 받아서 시간 평균을 한 평균값을 사용하였다. 결과를 살펴보면 엔진의 출력과 배압이 열교환기의 장착 유무에 크게 영향을 받지 않는다. 엔진 출력의 경우는 그래프가 역전 현상을 보이는데 그 차이는 최대 오차가 1.1% 정도로 매우 작

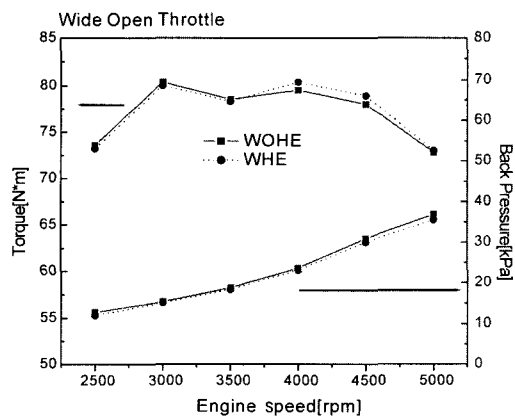


Fig. 6 Effect of heat exchanger on engine power and exhaust back pressure at wide open throttle condition

은 것으로 보아 측정 오차라고 생각할 수 있다. 결국 열교환기가 엔진 성능에는 별 영향을 주지 않는다고 판단이 된다.

### 3.3 실 주행 조건(EC 모드)에서의 열교환기 냉각성능

열교환기가 실차 운행 조건에서 배출가스 온도와 촉매 온도의 감소에 미치는 영향을 EC mode에서 차량을 운행하면서 살펴보았다.

열교환기를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 온도 변화를 서로 비교하였다. Fig. 7과 8은 EC 모드에서 실제 차량 운행 시 배출가스와 촉매 온도의 변화를 나타내고 있다. 그래프를 살펴보면 EC 모드 전체에서 열교환기에 의하여 배출가스와 촉매의 온도가 감소하였음을 알 수 있다. 특히 촉매 온도는 시동 초기부터 온도 감소의 효과를 명확하게 볼 수 있다. EC 모드 전체에서 배출가스는 전체 평균으로는

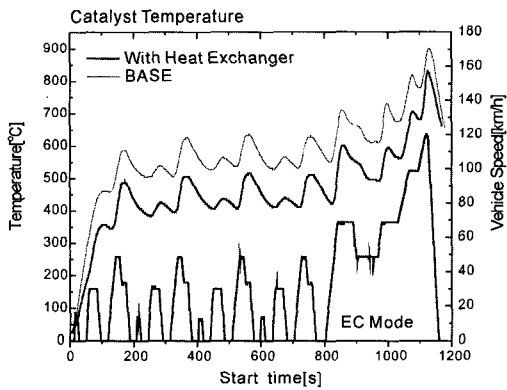


Fig. 7 Variation of exhaust gas temperature at EC mode

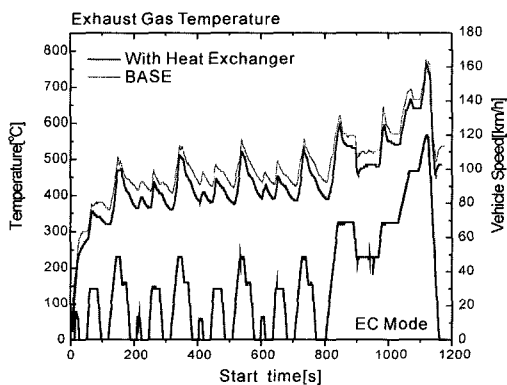


Fig. 8 Variation of catalyst temperature at EC mode

39°C, 최고점 온도는 10°C가 감소하였으며 촉매의 경우에는 전체 평균으로는 92°C, 최고점 온도는 70°C나 감소하였다. 이는 결국 연료 증량이 일어나는 촉매 보호 영역을 감소시킬 수 있어서 고속 주행 시 연비의 향상으로 이어질 수 있을 것이다. 하지만 촉매 온도 변화그래프에도 보이듯이 초기에서부터 촉매의 온도가 저감 되므로 냉시동시 촉매 활성화 특성에는 나쁜 영향을 미치리라 예상된다.

### 3.4 EC 모드에서 열교환기 냉각수 수온 변화

본 실험에서는 실제 차량에서 사용되는 50% water + 50% ethylene glycol의 혼합물을 냉각수로 사용하였다. 이 혼합물은 끓는점이 108°C, 어는점이 -37°C 정도이다.

Fig. 9는 EC 모드에서 열교환기 내부의 냉각수 유로를 순환하고 있는 냉각수의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 냉각수는 시동 초기부터 점차 그 온도가 증가하여 고속 영역에서는 105~120°C 사이의 값을 가지면서 변하고 있다. 냉각수의 끓는점이 108°C 인 것을 감안하면 약간의 핵비등(Nuclear boiling)이 일어나면서 열전달이 잘 일어나고 있는 중이라 판단된다.

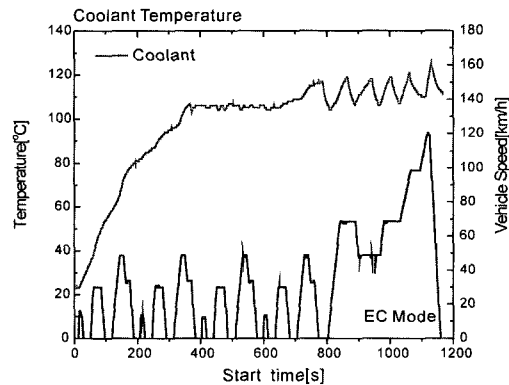


Fig. 9 Coolant temperature behavior at EC mode

### 3.5 열교환기가 활성화 시간에 미치는 영향

열교환기의 장착이 촉매의 활성화 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 촉매의 활성화 온도를 300°C로 정하고<sup>1)</sup> EC 모드에서 촉매 내부의 담체 온도가 활성화 온도에 도달하는 시간을 측정하였다. 열교환기를 장착하지 않은 상태, 열교환기를 장착하여 냉

각수 순환을 시킨 경우, 열교환기를 장착하였지만 냉각수는 순환 시키지 않는 세 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 냉각수 순환과 열교환기의 장착으로 인해 증가한 배기계 길이가 활성화 시간에 미치는 영향이 Fig. 10에 나타나 있다. 배기에 열교환기를 장착하지 않은 원상태에서는 활성화 시간이 54.5s였다가 열교환기만 장착했을 때는 활성화 시간이 65.7s로 증가하였고 열교환기를 장착하여 냉각수까지 순환을 시킨 결과 72.5s까지 늘어났다. 결국 열교환기의 장착으로 활성화 시간이 18초나 늘어난 것이다. 활성화 시간의 증가로 냉시동시 미연 탄화수소의 배출량도 증가했으리라 예상된다.

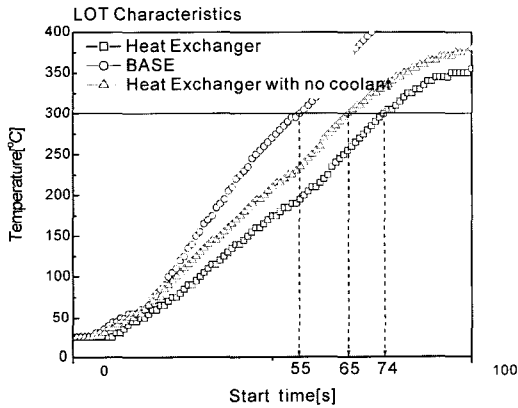


Fig. 10 Effect of the heat exchanger on the light off time increment at EC mode

### 3.6 열교환기가 배기 유해 물질에 미치는 영향 파악

열교환기가 없는 경우, 열교환기만 장착한 경우, 열교환기를 장착하고 냉각수까지 순환시킨 경우에 대해서 EC mode에서의 유해 배기물질 측정 실험을 하였다. 측정 결과에 대해서는 유럽의 배출가스 규제인 Euro-IV 규제치에 기준을 두어서 비교하였다. Table 2에서는 각 실험 조건에 대해서 배기 유해 물질인 미연 탄화수소와 질소 산화물, 일산화탄소의 배출량과 활성화 시간을 나타내고 있다. 미연 탄화수소는 열교환기를 장착하는 경우 0.021g/km가 증가하였으며, 이는 열교환기가 없는 경우에 비해 Euro-IV 규제 대비 21%가 증가한 값이지만 규제치를 만족하고 있다. 질소 산화물도 열교환기의 장착

Table 2 EC mode emission test results

CASE	Exhaust emission(g/km)			Light-off time
	HC	CO	NOx	
BASE	0.055 (55.2)	0.380 (38%)	0.012 (15.0%)	54.5 sec
H/E+COOLANT	0.076 (76.2%)	0.444 (44.4%)	0.030 (37.5%)	72.5 sec 18.0 sec
H/E ONLY	0.062 (62.4%)	0.400 (40%)	0.012 (15.0%)	65.7 sec 11.8sec
EURO-IV	0.10	1.00	0.08	
REMARK	( ) - Percentage of Euro-IV legislation D.F 1.2 applied.			

으로 유해가스 배출량이 증가하였지만 여전히 Euro-IV 규제치에는 적합한 양이다.

### 3.7 열교환기가 고속 주행시 차량의 연료경제성에 미치는 영향

고속 주행시 배기계의 온도를 저감시키기 위하여 인위적인 연료 증량을 하며, 심한 경우에는 공기과잉률이 0.806의 매우 농후한 영역에서 운전하게 된다. 이 영역에서 장시간 운행하게 되면 차량의 연료 경제성은 매우 나빠진다. 열교환기를 장착하게 되면 냉각수를 이용하여 촉매와 배출가스의 온도를 저감시킬 수 있으므로 더 이상 연료증량을 할 필요가 없으며, 이는 결국 연료경제성의 향상으로 이루어진다. 연료증량을 없애기 위하여 전체 운전 영역에 대해서 ECU 연료 매핑값을 모두 이론공연비인 공기과잉률 1.0으로 고정하였다.

Table 3은 새시 동력계에서 측정된 연료경제성 측정 결과를 나타낸 표이다. 실험은 2가지 경우 (115kph, max speed)의 차량 속도에 대해서 이루어졌으며, 실험 오차를 줄이기 위하여 5번의 실험을 통한 산술평균값을 사용하였다. 115kph의 차량 속도에서는 열교환기의 사용으로 2.1%의 연료경제성의 향상이 있었으며, 차량 최고속의 실험 조건에서는 연료 증량을 하는 경우에 비해서 7.64%의 연료경제성의 향상이 있었다.

Table 4는 두 경우의 시험 조건에서 열교환기의 적용 유,무에 따른 배출가스 온도, 촉매 온도, 공기과잉률 값을 비교한 것이다. 엔진회전수, 부하 조건을 두 경우에 대해서 동일하게 하여 열교환기 적용에 따른 배기계 온도 변화를 살펴보았다. 최고속 조건에서는 열교환기가 없는 경우 배기계의 온도 감

Table 3 Chassis dynamometer results of fuel economy (km/L)

Vehicle speed	BASE	Heat exchanger
115 kph	11.97	12.23 (2.10%↑)
135kph(Max)	7.05	7.59 (7.64%↑)

Table 4 Comparison of exhaust gas temperature, catalyst temperature, and lambda value

	115kph		135kph(Max)	
	BASE	H/E	BASE	H/E
rpm	3400	3400	5800	5760
Throttle angle(%)	28	28	75	78
Measured exh. gas temp(°C)	760	740	835	855
Measured cat. temp(°C)	875	805	895	885
Excess air ratio	0.990 (C/P)	1.000	0.869 (C/P)	0.928 (WOT)

소를 위해 연료증량(Fuel enrichment, Component protection ; C/P)을 하므로 공기과잉률이 0.869로 매우 농후하였다. 이에 비해서 열교환기를 장착하게 되면 연료증량이 필요 없으므로 최대 출력을 내는 0.928의 공기과잉률 영역(Power region)에서 운전된다. 이 영역은 촉매 보호를 위해서 농후하게 운전되는 것이 아니라 최대 출력을 얻기 위하여 농후한 영역에서 운전되는 것이다. 공기과잉률의 차이가 열교환기의 장착시 생기는 연료경제성 향상의 직접적인 원인이다. 온도 결과들을 살펴보면 최고속 조건에서는 열교환기 장착 시 연료증량을 하지 않아도 촉매 온도가 885°C로 유지할 수 있었지만, 열교환기를 적용하지 않는 경우에는 매우 농후한 영역에서 운전되고 있지만 촉매의 온도는 오히려 10°C가 높은 895°C로 유지되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

배기 매니폴드와 근접 장착 촉매 사이에 열교환기를 장착한 후 엔진 동력계와 실차에서 배출가스 온도와 촉매 온도 저감량을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진의 출력과 배압은 열교환기의 장착 유무에 별 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 2) EC 모드에서 실차 주행을 통하여 열교환기의 냉

각 성능을 측정된 결과, EC 모드 전체에서 배출가스는 전체 평균으로 39°C, 최고점 온도로는 10°C가 감소하였으며 촉매의 경우에는 전체 평균온도 92°C, 최고점 온도는 70°C나 감소하였다. 이는 결국 연료 증량이 일어나는 촉매 보호 영역을 감소시킬 수 있어서 고속 주행 시 연비의 향상으로 이루어질 수 있다.

- 3) 배기계에 아무 장치도 추가하지 않은 원상태에서는 활성화 시간이 54.5s였다가 열교환기를 장착하여 냉각수 순환을 시킨 결과 72.5s까지 늘어났다. 결국 열교환기의 장착으로 활성화 시간이 18s나 늘어난 것이다. 활성화 시간의 증가로 냉시동시 미연 탄화수소의 배출량이 증가하였다.
- 4) EC 모드에서 배기 유해 물질인 미연 탄화수소와 질소 산화물의 배출량을 측정된 결과 열교환기를 장착하는 경우 미연 탄화수소와 질소 산화물의 배출량이 증가하였음을 알 수 있다. 유해가스 배출량이 증가하였지만 여전히 Euro-IV 규제치를 만족하는 수치이다.
- 5) 열교환기의 장착시에는 연료 증량을 할 필요가 없으므로 최고속 조건인 135kph 조건에서 7.6%의 연료경제성 향상 효과를 얻을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL), 현대자동차(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### References

- 1) M. E. Crane, R. H. Thring, D. J. Podnar, L. G. Dodge, "Reduced Cold-Start Emissions Using Rapid Exhaust Port Oxidation (REPO) in a Spark Engine," SAE 970264, 1997.
- 2) Z. Hu, R. M. Heck, "High Temperature Ultra Stable Close-Coupled Catalysts," SAE 950254, 1995.
- 3) R. J. Brisley, R. D. O'Sullivan, A. J. J. Willkins, "The Effect of High Temperature Aging on Platinum-Rhodium and Palladium-Rhodium Three Way Catalysts," SAE 910175,

- 1991.
- 4) R. D. O'Sullivan, N. S. Will, "The Effect of Intermittent Misfire and Air to Fuel Ratio Excursions on Exhaust Catalyst Temperature," SAE 940927, 1994.
  - 5) B. Grandin, H. S. Angstrom, "Replacing Fuel Enrichment in a Turbo Charged SI Engine : Lean Burn or Cooled EGR," SAE 1999-01-3505, 1999.
  - 6) S. H. Lee, C. S. Bae, Y. P. Lee, T. S. Han, "Effect of Engine Operating Conditions on the Catalyst Temperature," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.61-69, 2002.
  - 7) Ngy Srun AP, "Exhaust Heat Exchange Coefficient in a Pipe of an Internal Combustion Engine : EGR Cooler and Passenger Compartment Heating Applications," SAE 2000-01-0966, 2000.
  - 8) K. Sherwin, "The Effect of Fouling on the Performance of Finned Tube Heat Exchanger," SAE 971806, 1997.
  - 9) J. Y. Kim, M. L. Corsetti, L. Biundo, D. A. Dobson, R. E. Beason, "Modeling and Measuring Exhaust Back-pressure Resulting from Flow Restriction Through Aftertreatment System," SAE 2003-01-0939, 2003.