

〈논 문〉 SAE NO. 97370045

## Electrically Heated Catalyst(EHC)의 실차 적용에 관한 이론적 연구

### Theoretical Study for Vehicle Applications of Electrically Heated Catalyst(EHC)

손 건 석\*, 이 용 래\*, 이 귀 영\*\*  
G. S. Son, Y. R. Lee, K. Y. Lee

#### ABSTRACT

In this study, the theoretical investigation of the electrically heated catalyst(EHC) for vehicel application has been carried out using the thermal equivalence of EHC system and the data of vehicle tests to meet ultra low emission vehicle(ULEV) standard. To improve the efficiency of EHC system, it is necessary to understand relation between the power, the operating time and the conversion efficiency of EHC system. The relation was found with thermal equivalence of EHC system which considers the power supply to EHC, heat loss, chemical exothermic energy generated by oxidation reaction and net energy coming in via the exhaust gas. From this relation, the limits of needful power and operating time to meet the ULEV standard can be suggested, when the conversion efficiency of catalyst was known.

주요기술용어 : EHC, LOC, Converter(변환기), ULEV Standard(초저공해 자동차 배기규제), Conversion Efficiency(정화율), Secondary Air(이차공기)

———— 기 호 설 명 —————

- A : 면적
- c : 비열
- $E_c$  : 산화반응에서 발생하는 전체 발열에너지
- $E_m$  : 배기내 미연 탄화수소 질량
- $E_{mi}$  : 화학종 i의 질량

- $E_{thi}$  : 화학종 i의 산화시 발생하는 에너지
- g : 중력가속도
- h : 열전달 계수
- k : 열전도 계수
- $M_i$  : 화학종 i의 mole 수
- $M_{wi}$  : 화학종 i의 몰 질량
- Nu : 평균 Nusselt 수
- Pr : Prandtl 수
- $q_{ci}$  : EHC 시스템에 들어가는 화학 에너지를
- $q_{co}$  : EHC 시스템에서 방출되는 화학 에너지를

\* 고등기술연구원 자동차기술연구소  
\*\* 정희원, 고등기술연구원 자동차기술연구소

$q_{ei}$	: EHC에 공급되는 전력
$q_{loss}$	: EHC 시스템 표면에서 손실되는 에너지를
$Q_{SEHC}$	: EHC에 저장된 에너지
$Q_{SLOC}$	: LOC에 저장된 에너지
$q_{thi}$	: EHC 시스템에 들어가는 열 에너지를
$q_{tho}$	: EHC 시스템에서 방출되는 열 에너지를
Re	: Reynolds 수
rpm	: 분당회전수
t	: 시간
$T_w$	: 표면 온도
$T_w$	: 주위 유체의 온도
$U_w$	: 주위 유체의 속도
$X_i$	: 화학종 i의 질량비
$\nu$	: 동점성계수

## 1. 서 론

자동차 배출 가스에 대한 규제가 미국 California의 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle) 기준을 중심으로 강화되고 있다. 현재 유해 성분을 저감하기 위해 사용하고 있는 삼원 촉매변환장치는 촉매가 활성화되는 시동 후 100초 이후에는 95% 이상의 유해 성분 정화 성능을 보이고 있으나, 촉매가 활성화되기 이전에 발생하는 미연 탄화수소 및 일산화탄소 성분 등은 그대로 대기 중으로 배출된다. 이렇게 촉매가 활성화 온도 영역에 도달하기 전에 배출되는 유해 성분의 양은 차량에 따라 다소 다르기는 하나 FTP75 배기 시험시 전체 유해 성분 배출량의 80% 이상을 상회하기도 한다. 따라서 강화되는 배기 규제를 만족하기 위하여 촉매를 단시간 내에 활성화 온도 영역으로 이르게 하는 기술들이 여러 방면에서 개발 중에 있다.<sup>1~5)</sup>

이러한 기술 중 상용화가 진행중인 기술로 EHC(Electrically Heated Catalyst)가 주목을 받고 있다.<sup>5,7)</sup> EHC는 자동차용 축전지 또는 발전기의 전기 에너지를 열에너지로 전환하여 촉매에 열을 공급하는 역할을 하며, 이때 발생한 열을 최대한 이용하기 위하여 EHC 직후에 LOC(Light-Off Catalyst)를 부착한다. EHC 전력 공급 시간은 일반적으로 10~100초로 EHC의

용량과 촉매의 정화율에 의해 결정된다. 전력 공급 시간이 짧을수록 전력량은 반비례적으로 증가하게 되며, 이때 소모되는 전력은 자동차용 축전지 및 발전기에서 공급되며, 현재의 자동차 전기 시스템에서는 1.5kW 이상의 전력공급은 불가능하며, 이 이상의 전력 공급은 별도의 축전지 또는 용량이 증대된 축전지 및 발전기가 필요하다.<sup>8)</sup> 따라서, EHC가 상용화될 경우 EHC 전력 소요량의 결정은 자동차 내 전기시스템의 설계 및 운영에 있어 큰 비중을 차지할 것이다.

EHC의 전력 소요량은 LOC와 UCC(Underbody Catalyst Converter)의 Light-Off Time에 의해 결정적인 영향을 받게 된다. 즉, 촉매가 활성화되는 온도가 낮을수록, 촉매가 활성화되는 시간이 짧을수록 미연 탄화수소 성분 및 일산화탄소가 빨리 산화하게 되며, 이때 발생하는 반응열이 촉매의 온도를 상승시켜, 촉매의 정화 성능이 더욱 빠르게 된다. 또한, 유해 성분의 활성화 촉매상에서의 산화는 산소를 포함하는 2차공기의 공급과도 밀접한 관계를 가지고 있다. 이외에 EHC 운전 이후 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화효율도 EHC의 운전조건에 상당한 영향을 미치나, 현재까지 이들에 대한 체계적인 연구는 발표된 바가 없으며, Socha 등이 EHC 시스템의 열적평형을 고려하여 EHC 시스템의 정화 효율을 예측한 것이 전부이다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 배출 가스의 ULEV 규제 만족을 위해 EHC 시스템을 채택하는 경우, EHC 시스템의 열적 평형을 고려하고 1.5 DOHC 차량의 실차 결과를 이용하여, 1.5 DOHC 차량의 경우에 대하여 EHC 적정 소요 전력량을 EHC 운전 후 전체 후처리 시스템(EHC+UCC+LOC)의 정화율과 EHC 시스템의 정화율과의 관계에서 계산, 예측하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 EHC 시스템의 열적 평형

Fig.1은 본 연구에서 고려한 EHC 시스템(EHC+LOC)의 열적 평형도이다. 그림의 열적 평형을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

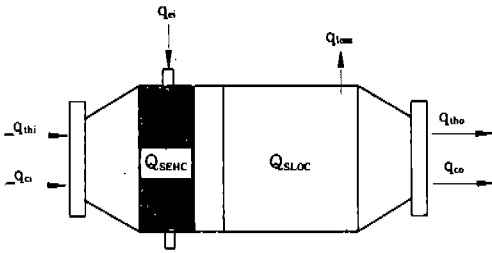


Fig.1 Thermal Equivalence of EHC System

$$Q_{SEHC} + Q_{SLOC} = \int_0^t q_{ei} dt + \int_0^t (q_{ci} - q_{co}) dt \quad (1)$$

$$+ \int_0^t (q_{li} - q_{lo}) dt - \int_0^t q_{loss} dt$$

여기서, 좌변의  $Q_{SEHC}$ 는 시간  $t$  동안 EHC에 저장된 에너지를,  $Q_{SLOC}$ 는 시간  $t$  동안 LOC에 저장된 에너지를 의미하며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_{SEHC} = m_{EHC} c_{pEHC} (T_{EHC} - T_{EHC(t=0)}) \quad (2)$$

$$Q_{SLOC} = m_{LOC} c_{pLOC} (T_{LOC} - T_{LOC(t=0)}) \quad (3)$$

여기서,

$m_{EHC}$  = mass of the EHC

$c_{pEHC}$  = constant

– pressure specific heat of EHC

$T_{EHC}$  = average temperature of EHC during time  $t$

$m_{LOC}$  = mass of the LOC

$c_{pLOC}$  = constant

– pressure specific heat of LOC

$T_{LOC}$  = average temperature of LOC during time  $t$

이다. 식 (1)에서 우변의 정의는 다음과 같다.

$q_{ei}$  = rate of electrical energy addition to the system via the EHC

$q_{li}$  = rate of thermal energy addition to the system via the incoming exhaust gas

$q_{lo}$  = rate of thermal energy removal at the exit of the system

$q_{ci}$  = rate of chemical energy addition to the system via the incoming exhaust gas

$q_{co}$  = rate of chemical energy removal at the exit of the system

$q_{loss}$  = rate of heat loss via the surface of the system

즉,  $q_{ei}$ 는 EHC에 공급되는 전력(Electric Power Supplied to the EHC)을 의미하며,  $q_{ci}$ ,  $q_{co}$ 의 차이는 EHC 시스템의 전과 후에서 배출 가스 내 여러 화학종이 보유하고 있는 에너지 차이로, 이는 활성화된 촉매 상에서 배기 성분 중의 유해 물질이 산화되어 정화된 양과 비례하며, 이는 열에너지로 환산될 수 있다. 따라서, 식 (1)의 열평형 관계에서 우변의 두 번째 항은 촉매에서 반응되기 전과 후의 유해 물질 농도 차에 의한 에너지 변화를 의미한다.

엔진에서 배출된 고온의 가스가 Fig.1의 EHC 시스템으로 흘러가므로 EHC의 가열 과정 없이도 EHC와 LOC의 온도는 상승하게 되며, 이때의 온도 상승 분은 배기 가스의 고온에서 전달된 에너지와, 전달된 에너지에 의해 활성화된 촉매의 정화 작용에서 발생한 산화 에너지의 일부분일 것이다. 즉, 배출 가스의 고온이 모두 촉매로 전달되는 것은 아니며, 활성화된 촉매의 정화 반응에서 발생한 열도 모두 촉매로 전달되는 것은 아니므로 전달되고 남은 여분의 열은 배출 가스와 함께 흘러나가게 된다. 따라서, 식 (1) 우변

의 세 번째 항은 유해 물질의 정화 반응에서 생긴 에너지 중 촉매에 흡수되고 난 나머지 에너지 (결국 배출 가스로 전달된 에너지)와 본래 고온의 가스에 포함된 에너지 중 촉매에 흡수되고 난 나머지 에너지의 합을 의미한다. 이는 EHC 시스템 전과 후에서의 배출 가스 온도차로 나타나며, 이때 EHC 시스템에 흡수된 에너지는 다음과 같다.

$$q_{thi} - q_{tho} = \dot{m}_{emi} C_{pemi} (T_{iemi} - T_{oemi}) \quad (4)$$

여기서,

$\dot{m}_{emi}$  = mass flow rate of exhaust gas

$C_{pemi}$  = constant pressure specific heat of exhaust gas

$T_{iemi}$  = inlet exhaust gas temperature

$T_{oemi}$  = outlet exhaust gas temperature

이다.

### 2.2 배출 가스 성분

엔진에서 연료가 연소되고 난 후에 배출되는 가스 성분은 연료의 성분과 비교하여 많은 차이가 있으며, 연료에 존재하던 MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether) 성분은 연소되거나 고온에서 다른 화합물로 변화하여 배출 가스에서는 발견되지 않으나, Methane과 Aldehydes 성분은 연소 과정에서 새롭게 생성된다. Fig.2는 일반적으로 가솔린 승용차에 사용하고 있는 연료와 배출 가스 내에 존재하는 탄화수소 화합물의 질량비를 나타낸다.<sup>10)</sup> 연료 상태에서는 탄화수소 성분의 주가 Alkanes 계열과 Aromatics 계열이나, 배출 가스에서는 Alkenes, Alkynes 성분과 Aromatics, Alkanes 성분이 주가 된다.

Fig.3은 Fig.2의 배출 가스 내 미연 탄화수소 계열 중 주를 이루는 화학종들에 대한 총 질량비를 나타낸다.<sup>10)</sup> 배출가스 중에는 이들 화학종 외

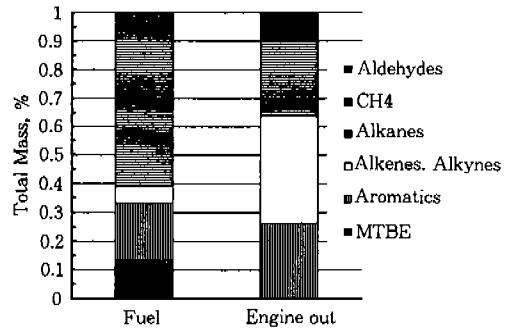


Fig.2 Hydrocarbon Components in Gasoline Fuel and Exhaust Emission

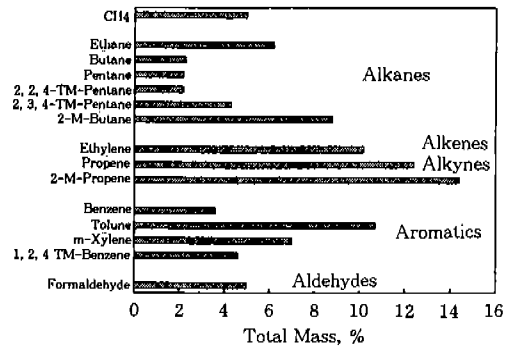


Fig.3 Total Mass Ratio of Unburned Hydrocarbon

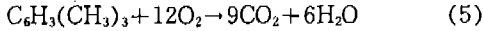
에도 수많은 화학종이 있으나 총질량비가 2% 이하인 화학종에 대하여는 화학 반응의 단순화를 위하여 생략하였다.

### 2.3 미연 탄화수소 및 일산화탄소 성분의 산화 반응

미연 탄화수소 성분의 산화 반응에서 생성되는 에너지의 계산을 위하여 몇 가지 가정을 하였다. 배출 가스 내의 미연 탄화수소 성분은 Fig.3에 표시된 화학종만이 존재하며, 이들의 산화 반응 속도는 모두 동일하여 임의의 촉매 상에서 정화가 일어날 경우 모든 화학종이 같은 비율로 정화가 일어난다. 미연 탄화수소 성분이 산화될 때 오직 산소만이 관여하여 반응의 최종 성분은 이산화탄소와 수증기이며, 산화 반응시 발열되는 에너지의 양은 반응 개시물과 반응 종료물 간의 결합

에너지(Bond Energy)와 공명에너지(Resonance Energy)의 차이이다.<sup>11)</sup>

1, 2, 4-TM-Benzene의 경우를 예로 들면 다음과 같다.



이 반응에서 발열되는 에너지의 양은 Hess의 법칙을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (5)의 좌변에 포함되어 있는 에너지는

$$\begin{aligned} L.H. &= 3(C=C) + 6(C-C) + 12(C-H) \\ &\quad + 12(O=O) + (C_6H_6 - \text{res}) \\ &= 3(143) + 6(85.5) + 12(98.1) \\ &\quad + 12(118.86) + 48.9 = 3594.42 \text{ kcal} \end{aligned}$$

이며, 우변에 포함되어 있는 에너지는

$$\begin{aligned} R.H. &= 18(C=O) + 12(O-H) + 9(CO_2 - \text{res}) \\ &= 18(167) + 12(109) + 9(33) \\ &= 4611.0 \text{ kcal} \end{aligned}$$

이다. 따라서 좌변과 우변의 결합에너지 차이인 1,016.58kcal의 에너지가 1mole의 1, 2, 4-TM-Benzene의 산화 반응시 방출되게 된다. Fig.3의 화합물들과 이들 산화물 계산에 사용된 결합에너지와 공명에너지는 Table 1에 나타내었다.<sup>11)</sup> Table 2는 상기 방법으로 계산한 화합물들의 산화 반응시 방출되는 각 에너지를 나타낸다.

Table 2의 각 화학종이 Fig.3의 비율로 배출될 때 이들이 산화되면서 방출하는 에너지는 다음과 같다.

$$E_c = \sum E_{hi} M_i \quad (6)$$

여기서,  $E_{hi}$ 는 Table 2의 1mole당 각 화학종  $i$ 의 발열에너지이며,  $M_i$ 는 화학종의 mole 값이며,

$$M_i = \frac{E_{mi}}{M_{wi}} = \frac{E_m X_i}{M_{wi}} \quad (7)$$

이다. 여기서,

Table 1 Some Bond and Resonance Energies

Bond	Energy, kcal/mole
C-C	85.5
C-H	98.1
O-H	109.
C=C	143.
C=O	167
O=O	118.86
Compound	Resonance Energy, kcal/mole
Benzene	48.9
CO <sub>2</sub>	33.

Table 2 Combustion Energies of Unburned Hydrocarbon

Compounds	Exothermic Energy, kcal/mole
Formaldehyde	126.94
1, 2, 4-TM-Benzene	1016.58
M-Xylene	891.57
Toluene	766.56
Benzene	1533.
2-M-Propene	528.04
Propene	403.03
Ethylene	278.02
2, 2, 4-TM-Pentane	1047.95
2, 3, 4-TM-Pentane	1047.95
2-M-Butane	672.92
Pentane	672.92
Butane	547.91
Ethane	297.89
CH <sub>4</sub>	77.88
CO	221.57

$E_{mi}$  = weight of chemical compound  $i$

$M_{wi}$  = mole weight of chemical compound  $i$

$E_m$  = total emission weight

$X_i$  = mass ratio of chemical compound  $i$

이다.

## 2.4 열손실

고온의 연소 가스와 EHC의 발열로 인해 Fig.1의 EHC 시스템은 엔진 시동 즉시 주위의 온도보다 고온으로 되며, 여기서 주위 공기로의 열손실이 발생하게 된다. Fig.4는 FTP75 Mode 평가시 시동 후 200초 간의 엔진 회전수와 차량 속도를 나타낸다. 그림에서와 같이 실차 평가시 FTP 75 Mode는 시동 후 20초까지는 아이들링(Idleing) 상태를 유지하고 20초 후부터 주행을 하는 단계를 갖는다. 차량이 도로에서 주행을 할 경우에는 시동 20초 후부터 후처리 장치 주위로 공기 유속이 생겨 강제 대류 열손실이 발생하나, FTP75 평가에서는 시험 차량을 Dynamometer 위에 준비하고, 시험 시작 전에 차량 앞쪽에서 정속 fan으로 150m<sup>3</sup>/min의 공기를 불어준다.<sup>15)</sup> 따라서, FTP75 평가에서는 차량의 속도와는 무관하게 강제 대류 열손실이 발생하며, 그 양은 다음과 같다.

$$q_{loss} = \bar{h}A(T_w - T_\infty) \quad (8)$$

본 EHC 시스템이 장착된 위치에서 주위 공기의 속도는 10.5m/sec이었으며, 열전달 계수  $h$ 는 다음과 같다.

$$Re = U_\infty \frac{L}{\nu} \quad (9)$$

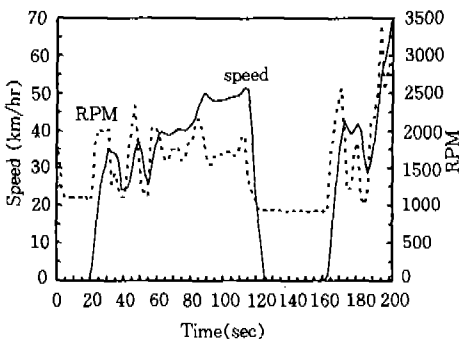


Fig.4 Engine Revolution & Vehicle Speed at FTP75 Mode Test

$$Nu_x = 0.332 Pr^{\frac{1}{3}} Re_x^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$h_L = Nu_x \frac{k}{L} \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{\int_0^L h_x dx}{\int_0^L dx} = 2 h_{x=L} \quad (12)$$

## 3. 연소조건 및 해석

### 3.1 연소조건

EHC 시스템에서 배출 가스 내의 유해 성분 연소 조건을 설정하기 위하여 배기 다기관으로부터 60cm 위치에 EHC 시스템을 장착하여 1kW의 전력과 2차공기를 EHC 직전에서 53L/min로 각각 공급하며, FTP75 Mode 실차 평가를 수행하였다.<sup>14)</sup> 2차공기를 공급한 경우 A/F는 15.9이었다. FTP 실차 평가시 HC, CO 및 NOx 세 성분의 Engine Out Emission과 Tail Pipe Emission 측정 결과와 EHC 시스템 각 부위의 온도를 1초 간격으로 Data Logger에 저장하였다. 여기서, Engine Out Emission은 후처리 장치를 통과하기 전의, 엔진에서 배출된 상태의 결과를 의미하며, Tail Pipe Emission은 후처리 장치를 통과한 후의 배기 결과를 의미한다. EHC 시스템 각 부위의 온도와 EHC 시스템 전후에서의 산소 농도 및 배기 가스의 농도를 측정하였다. Fig.5는 실험에 사용한 EHC 시스템의 개략도로 산소 농도, 유해 성분 농도, 온도의 측정 위치를 나타내고 있다. 차량의 ECU에 공연비 제어용 입력 신호로 들어가는 산소 센서는 배기 다기관 직후에 위치하였으며, Data 기록용 산소 농도는 그림에서와 같이 EHC 전과 후에서 별도로 측정하였다. 따라서, 2차공기를 공급하는 경우에도 차량의 엔진 운전 조건은 2차공기 공급 전과 동일하다. 또한 2차공기에 의해 희석되지 않은 차량의 Engine Out Emission 측정을 위해 2차공기 공급 밸브 위치보다 상류에서 배출 가스를 취하여 HORIBA 배기 분석 장비에서 측정하

였다. EHC 반응 후의 배출 가스 농도는 EHC 직후에서 배출 가스를 취하여 측정하였다. 실차 평가시 UCC는 동일 차종에 장착되어 도로 주행에서 80,000km 열화한 촉매를 사용하였으며, 평가에 사용한 차량 및 촉매의 제원은 Table 3에 나타내었다. EHC 시스템의 EHC는 Corning사 제품으로 금속제 압출 Honeycomb Monolith이다. 일반적으로, EHC에 전력을 일정하게 공급하므로  $q_{in}$ 는 상수이며, 식 (1) 우변의 첫 항은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^t q_{ei} dt = t q_{ei} \quad (13)$$

Fig.6에 FTP75 평가에서 구한 엔진 회전수와 질량 유속을 초기 100초에 대하여 나타내었다. EHC 가열 시간과 밀접한 관계가 있는 초기 20초간의 엔진 회전수 평균은 약 1200rpm이며, 20초 이후 Cycle 1의 평균 엔진 회전수는 1500rpm이었다. 또한, 20초 이후 Cycle 1에서의 차량 평

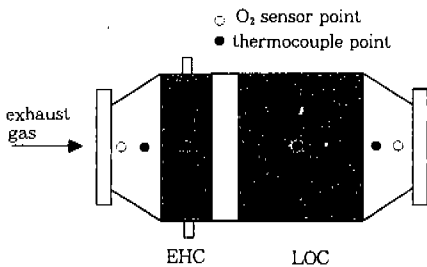


Fig.5 Measuring Point of Temperature & O<sub>2</sub> Concentration in EHC System

Table 3 Vehicle & Catalysts Specification

Specification	Contents
Vehicle	Espero, DOHC
Transmission	4-speed Automatic
Cylinder	4-cyl. in Line
Displacement	1500cc
UCC	1.8L, 50,000 mile Field Aged
EHC	0.52L, Fresh

균 속도는 38.5m/s이었다.(참조 Fig.4)

Fig.7은 FTP75 Mode 평가시 2차공기를 53L/min로, EHC의 전력은 1kW로 120초 동안 공급한 경우 EHC 시스템 직전, 직후에서 측정된 배출 가스의 온도차( $T_{emi} - T_{oemi}$ )를 시동 후 200초까지에 대하여 나타낸다. 여기서 식 (4)의  $\int_0^t (q_{in} - q_{tho}) dt$ 를 계산하였다. 이때 배출 가스의 질량 유속  $\dot{m}_{emi}$ 는 Fig.6에서 구하였으며, 정압 비열  $C_{p,emi}$ 는 Krieger와 Borman<sup>12)</sup>이 C<sub>2</sub>H<sub>2n</sub>의 연료를 사용하여 제안한 값 중 온도 1000K에서의 값, 1.3032 kJ/kgK를 사용하였다. 실제로  $\int_0^t (q_{in} - q_{tho}) dt$ 의 계산에 필요한 온도차 ( $T_{emi} - T_{oemi}$ )는 EHC의 작동 및 2차공기의 공급 양 등 시험 조건에 따라 변화하는 미지수이나, 문제 해결의 편의상 일정한 조건에서 측정된 Fig.7의 값으로 대체하였다.

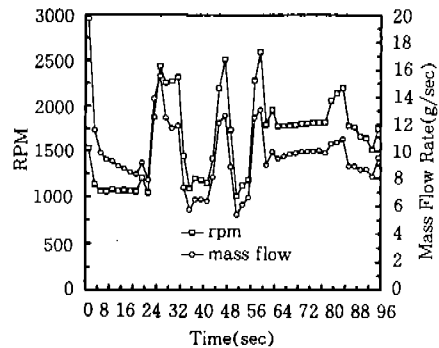


Fig.6 Engine Speed & Mass Flow Rate of a Vehicle in FTP75 Emission Test

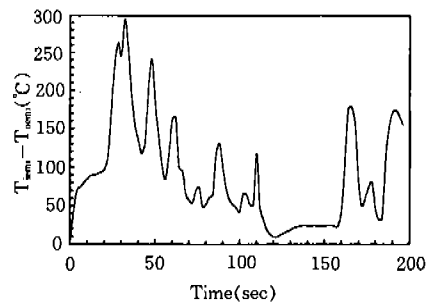


Fig.7 Temperature Difference of Emission Between Before EHC and After EHC

Fig.8과 9는 EHC 시스템을 장착하기 전, Base 차량의 FTP75 평가시 Phase 1에서의 HC와 CO의 Engine Out Emission과 Tail Pipe Emission을 각각 나타낸다. UCC만을 장착한 Base 차량의 경우, HC는 130초 경부터, CO의 경우는 150초 경부터 정화 반응이 일어나기 시작함을 알 수 있다. Fig.10과 11은 EHC 시스템을 장착하고 1kW의 전력과 53L/min의 2차공기를 EHC 시스템에 120초간 공급한 경우의 HC와 CO의 Engine Out Emission과 Tail Pipe Emission을 각각 나타낸다. HC와 CO 모두 EHC를 장착하기 전보다 정화반응이 빨리 시작함을 알 수 있다.

미연 탄화수소와 일산화탄소 산화 반응 에너지 계산시 계산의 편의성을 위하여 Fig.12와 같은 가정을 하였다. 그림에서 곡선 A는 Fig.10의

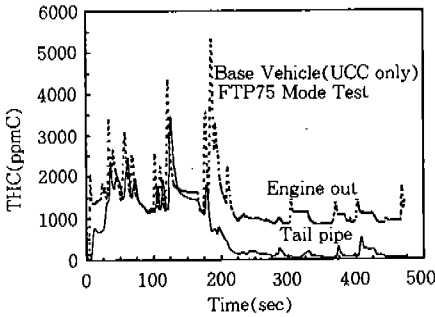


Fig.8 THC Concentration of Base Vehicle (Unequipped EHC) during Phase 1 of FTP75 Mode Test

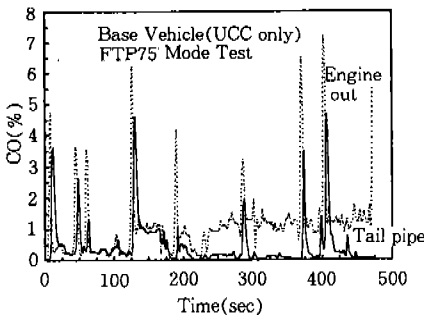


Fig.9 CO Concentration of Base Vehicle (Unequipped EHC) during Phase 1 of FTP75 Mode Test

HC 정화율을 시간에 대하여 부드러운 곡선으로 단위 없이 표현한 것이며, 정화율은 다음의 식에서 구하였다.

Conversion Efficiency

$$= \frac{[HC]_{engine\ out} - [HC]_{tail\ pipe}}{[HC]_{engine\ out}} \quad (14)$$

여기서,  $[HC]_{engine\ out}$ 는 후처리 시스템을 통과하기 전 HC의 농도를,  $[HC]_{tail\ pipe}$ 는 후처리 시스템을 통과한 후의 HC 농도를 나타낸다. 그림에서와 같이 유해 성분이 촉매 상에서 정화가 개시되는 것은 엔진 시동 후 일정 시간이 흐른 후이며, 정화율은 이때부터 급속히 증가하여 EHC 전력공급을 차단하는 시간까지 (Fig.12에서 가로축 종단) 어느 수준을 유지하게 된다. 따라서,

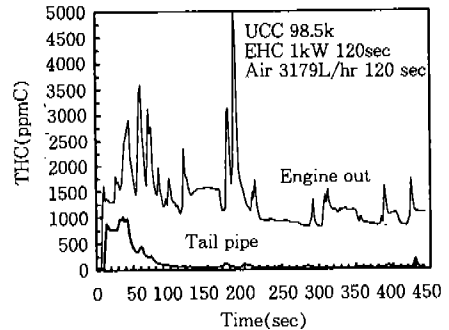


Fig.10 THC Concentration of EHC Equipped Vehicle during Phase 1 of FTP75 Mode Test

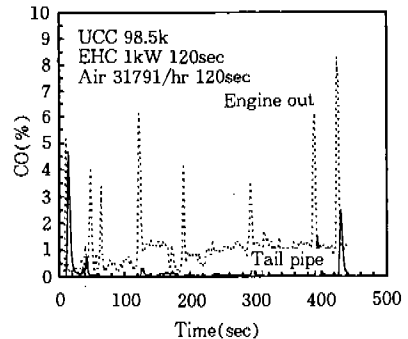


Fig.11 CO Concentration of EHC Equipped Vehicle during Phase 1 of FTP75 Model Test



이때 발생한 산화 에너지는 Fig.12의 A 곡선을 적분한 양이 될 것이나, 이를 식 (1)의 계산에서 실질적으로 고려하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 산화 반응시 발생하는 에너지의 계산을 A 곡선 적분과 동일한 면적을 갖는 직선 B를 가정하여 이 곡선으로부터 식 (1)의 산화 반응 에너지를 계산하였으며, CO의 경우도 이와 같은 방법을 이용하였다. 계산에 필요한 EHC와 LOC의 물성(질량, Specific Heat 등)은 제작사인 Corning사의 자료를 참고로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

EHC를 적용한 차량의 후처리 시스템에서, 엔진 종류, 배기량, 운전 조건 등 차량의 사양이 결정되면 FTP75 평가시 배출되는 각 유해 성분의 Engine Out Emission량은 결정된다. 따라서, ULEV 규제의 만족 여부는 EHC 작동 시간 내의 정화율과 EHC 작동 시간 이후의 FTP75 평가 잔여 시간에서 전체 후처리 시스템의 정화율에 의존한다. 즉, EHC 작동 시간까지 엔진에서 배출된 양에서 정화되고 남은 잔여량과 EHC 작동 이후에 발생된 양 중에서 정화되고 남은 잔여량의 합이 ULEV 규제를 만족하여야 하며, 이를 만족하는 정화율이 EHC 작동 전, 후 각 단계에서 존재할 것이다. 일반적으로 EHC의 적용은 UCC가 처리하지 못하는 유해 성분을 정화하기 위해 사용하므로 UCC의 정화율에 따라 EHC의

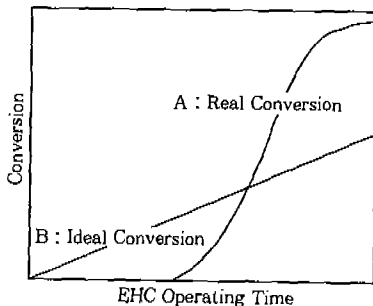


Fig.12 Idealization of Conversion during the Operating Time of EHC System

성능이 결정되고 이를 만족하기 위한 EHC 작동 시간과 전력량이 결정된다.

Fig.13은 본 연구에서 사용한 EHC 시스템 및 차량의 배기 결과를 바탕으로 미연 탄화수소 성분이 ULEV 규제치 80% 수준( $0.04 \times 0.8g/mile$ )을 만족할 수 있는 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화율(CE, Conversion Efficiency)과 EHC 시스템의 정화율 한계 값을 EHC 전력 공급시간에 대하여 나타낸다. 여기서, 세로 축의 EHC의 정화율은 EHC에 전력을 공급하는 동안의 후처리 시스템의 정화율을, 그림

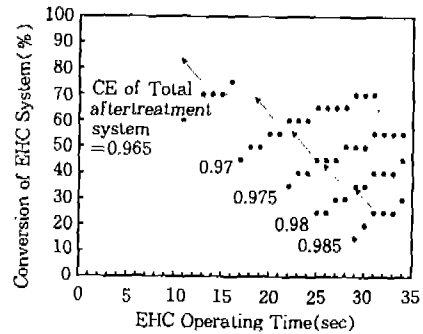


Fig.13 Relation of Conversion Efficiency of EHC System & Limit of EHC Operating Time to Meet ULEV Standard According to Conversion Efficiency of Total Aftertreatment System (EHC+LOC+UCC)

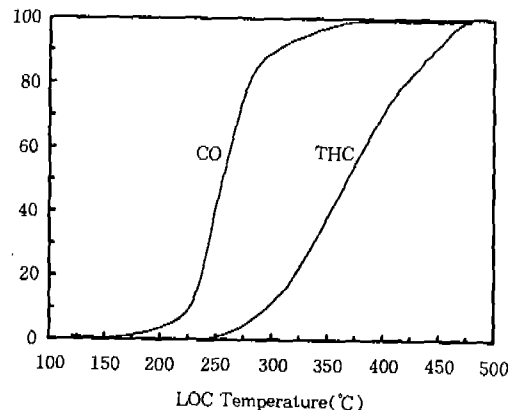


Fig.14 Conversion Efficiency of THC and CO According to Temperature of LOC

안의 전체 후처리 시스템의 정화율, CE는 EHC 작동 후의 FTP75 평가 잔여 시간에서의 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화율을 의미한다. 그림의 각 정화율에서 화살표 방향으로 ULEV 규제치를 만족할 수 있으며, 반대 방향으로로는 규제치를 만족할 수 없다. 예를 들어, EHC 작동 시간 후의 전체 후처리 시스템의 정화율이 98%라고 하면, ULEV 규제를 만족하기 위한 EHC 운전 시간 내의 정화율은 15% 이상이어야 하며, 이때 EHC 운전 시간은 23초 이상이어야 한다. 따라서, 이와 같은 경우에는 EHC 작동 후 23초 이내에 EHC 시스템의 정화율이 15%를 상회하면 ULEV 규제를 만족할 수 있다. 또한, EHC 작동 후 전체 후처리 시스템의 정화율이 낮을수록 빠른 시간 내에 EHC 시스템이 높은 정화율을 얻을 수 있어야만 ULEV 규제를 만족함을 알 수 있다.

촉매를 활성화하기 위해 전력을 공급하는 시간, 즉 UCC가 활성화 되지 않은 초기 시간에서는 정화의 거의 대부분이 EHC 시스템(EHC+LOC), 특히 LOC에 일어난다.<sup>14)</sup> 따라서, EHC 시스템의 온도에 따른 각 성분의 정화율을 알면 Fig.13과 14의 관계에서 ULEV 규제 만족을 위한 EHC 시스템의 작동 조건을 결정할 수 있다. Fig.14는 배기 중에 산소가 1.48% 포함되었을 때 LOC의 중심부 온도에 따른 THC와 CO의 정화율을 나타낸다.<sup>14)</sup> 그림에서와 같이 산소가 충분히 포함되어 있는 경우 CO의 정화는 THC에 비해 빨리 일어난다. 따라서, 2차공기의 공급이 병행되는 EHC 후처리 시스템에서는 산소가 충분하므로, ULEV 규제 중 CO는 문제가 없으며, 탄화수소 성분이 주요 정화 대상이 된다. THC의 경우 EHC 작동 이후의 FTP75 평가 잔여 시간에서의 정화율이 98%라고 한다면, Fig. 13에서 EHC 시스템의 THC 정화율은 23초 이내에 15% 이상을 초과하면 ULEV 규제를 만족할 수 있다. Fig.14에서 촉매의 THC 정화율이 15% 이상을 만족하는 LOC의 온도는 310°C부터이며, 이때의 CO 정화율은 92%이다. 따라서, LOC의 중심 온도를 23초 내에 310°C 이상이 되도록 EHC에 전력을 공급하면 된다. 이때 공

급하는 전력은 식 (1)에 식 (13)을 대입하고 다시 정리한 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$q_{in} = \frac{-\int_0^t (q_{in} - q_{out}) dt - \int_0^t (Q_{th} - q_{tho}) dt + \int_0^t q_{res} dt + Q_{S,LOC} + Q_{EHC}}{t} \quad (15)$$

여기서, 우변의 분자 첫 번째 화학 반응 에너지 항은 Table 2에서 구할 수 있으며, 두 번째 가스의 온도에 의한 에너지 전달 항은 Fig.7에서 구할 수 있다. 우변의 분자 세 번째 열 손실 항은 식 (8)에서 구할 수 있으며, 마지막 LOC에 저장되는 에너지 항은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 이러한 방법으로, Fig.13의 전력 공급 시간 이후의 전체 후처리 시스템의 정화율에 따른 ULEV 규제치 만족을 위한 LOC의 THC 및 CO의 정화율, EHC 작동 시간 및 LOC의 온도, EHC 시스템의 온도차는 Table 4와 같으며, 전력 공급 량의 각 한계 값은 Fig.15와 같다. 그림에서와 같이 EHC 작동 이후에 전체 후처리 시스템의 정화율이 높으면, EHC의 부담이 줄어들어 저전력으로 비교적 천천히 가열하여 낮은 EHC 시스템의 정화율에서도 규제를 만족할 수 있으나, EHC 작동 시간 이후의 전체 후처리 시스템의 정화율이 낮은 경우, 즉 촉매의 성능이 우수

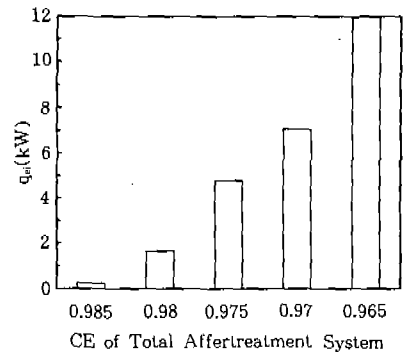


Fig.15 Low Limit Power Supplied to a EHC System to Meet ULEV Standard According to THC Conversion Efficiency of Total Aftertreatment System

Table 4 Limit Conditions to meet ULEV Standard for a EHC Aftertreatment System

C. E. of THC at total cat. system	0.985	0.980	0.975	0.970	0.965
C. E. of THC at LOC	0.15	0.25	0.37	0.45	0.60
C. E. of CO at LOC	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
operating time of EHC, sec	29	25	22	17	11
temperature of LOC, °C	310	330	350	360	380
$T_{\text{icmi}} - T_{\text{ocmi}}$ K	260	229	120	93	88
mass rate, g/sec	12	12	8.7	8.7	8.7

\* CE : conversion efficiency

하지 못한 경우에는 EHC의 부담이 커져 빠른 시간 내에 고온으로 가열하여야 하며, 이때 EHC 시스템의 정화율도 높아야 한다. EHC 작동 시간 이후의 전체 후처리 시스템의 정화율이 96.5%인 경우에는 EHC에 전력을 11초동안 무려 11kW이상 공급하여야 하며, 이때 LOC의 탄화수소 정화율이 60%를 상회하여야만 한다. 따라서, 본 실험에서 고려한 차량(1.5DOHC)의 경우, 자동차용 축전지 1개만을 사용하고 차량의 다른 전기 시스템에 지장을 주지 않는 범위<sup>8)</sup> (1.5kW 미만)에서 ULEV 규제를 만족하도록 EHC를 작동하려면, EHC 작동 시간 이후의 전체 후처리 시스템의 정화율이 최소한 98% 이상이어야 한다.

## 5. 결 론

EHC 시스템의 열적 평형을 고려하고, 1.5 DOHC 차량에 장착한 EHC 시스템의 실차 평가 자료를 이용하여 촉매의 정화율에 따른 EHC 소요 전력량과 공급 시간의 관계를 EHC의 적절한 설계와 운영을 위하여 구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) EHC를 장착한 자동차의 ULEV 규제치 만족을 위하여 탄화수소 성분(NMOG)이 ULEV 규제치의 80% 수준으로 저감될 때의 EHC 소요 전력량과 공급 시간의 관계를 EHC 작동 시간 내의 EHC 시스템(EHC+LOC)의 정화율과 FTP75 평가 잔여 시간에서의 전체 후처리 시스템

(EHC+LOC+UCC)의 정화율에 따라 제시하였다. 따라서, 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화율과 EHC 시스템의 정화율이 결정되면 ULEV규제를 만족할 수 있는 EHC 운전조건(공급 전력량, 시간 등)을 구할 수 있다.

- 2) 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화율이 98% 이상으로 높은 경우에는 비교적 낮은 정화율의 EHC 시스템으로도 ULEV 규제를 만족할 수 있으나, 98% 이하인 경우에는 높은 정화율을 갖는 EHC 시스템이 필요하다.
- 3) 전체 후처리 시스템(EHC+LOC+UCC)의 정화율이 98% 이상으로 높은 경우에는 EHC 가열 시간에 여유가 있어 저전력으로도 규제 만족이 가능하나, 98% 이하일 경우에는 빠른 시간 내에 가열되어야 하며, 이를 위해 고전력이 필요하다.

## 후 기

촉매상에서 유해물질의 산화반응시 발열에너지를 계산에 많은 도움을 주신 최병철 교수님과 이지연씨에게 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. J. Williams, M. Patil and Hertl, "Bypass Hydrocarbon Trap system for Meeting ULEV Standard", SAE 960343, 1996.

2. Y. Kanada, M. Hayasi, M. Akaki and S. Tsuchikawa, "Htdrogen added After-Burner System", SAE 960346, 1996.
3. W. Hertl, M. Patil and J. Williams, "In-Line Hydrocarbon Trap for reducing Cold Start Emissions", SAE 960347, 1996.
4. W. Hertl, M. Patil and J. Williams, "In-Line Hydrocarbon Trap for Meeting ULEV Standards", SAE 960348, 1996.
5. F. Kaiser, P. Hirth, R. Bruck and C. Kruse, "Electrically Heated Catalyst for Future U. S. and European Emission Legislation", SAE 960339, 1996.
6. S. Hasimoto, F. Abe, M. Katsu, "An Extruded Electrically-Heated Catalyst : From Design Concept through Proven Durability", SAE 960340, 1996.
7. H. Kato, Y. Shimasaki and H. Muramatsu, "Study on Confirmity Technology with ULEV Using EHC System", SAE 960342, 1996.
8. T. Yaegashi, K. Yoshizaki, T. Yoshinaga and K. Ohsawa, "New Technology for Reducing the Power consumption of Electrically heated Catalysts", SAE 940464, 1994.
9. L. Socha, Jr. D. Thompson, D. Smith and P. Weber, "Emissions Performance of Extruded Electrically Heated Catalysts in Several Vehicle Applications", SAE 950405, 1995.
10. Y. Iwakiri, H. Oogane, H. Tsuchida and K. Ishihara, "Study on Parameters Affecting NMOG Measurements and a Method to Improve its Accuracy", SAE 930387, 1993.
11. K. Kuo, "Principles of Combustion", John Wiley & Sons, p. 42~65, 1986.
12. R. B. Krieger and G. L. Borman, "The Computation of Apparent Heat Release for Internal Combustion engines", in Proc. Diesel Gas Power, ASME paper 66-WA/DGP-4, 1966.
13. H. Tanaka, H. Fujikawa and I. Takahashi, "Perovskite-Pd Three-Way Catalysts for Automotive Applications", SAE 930251, 1993.
14. G. S. Son, B. C. Choi, and K. Y. Lee, "Electrically Heated Catalyst System for Low Emission Vehicle", ASME ICE-Vol 26-1, pp. 9~18, 1996.
15. "Instrumentation and Techniques for Exhaust Gas Emissions measurement", SAE J254, SAE Handbook, Vol. 3, pp.25. 103-25. 116, 1993.