

# 냉시동시 촉매의 예열시간 단축에 관한 연구

조용석, 이윤석  
(국민대학교 자동차공학과)

## A Study for Fast Light-Off of a Catalyst During Cold Start

Y.S. Cho, Y.S. Lee  
(Kookmin Univ., Dept. of Automotive Engineering)

### ABSTRACT

In order to meet the stringent emission regulations, fast light-off of a catalyst is essential to reduce the HC and CO emissions during cold start. Cranking Exhaust Gas Ignition (CEGI) method developed in this study showed that the catalyst reaches the light-off temperature in a few seconds after cold start. The CEGI system cuts off the ignition signal for a few seconds during the cranking period, so the unburned fuel-air mixture bypasses the combustion chamber and flows through the exhaust manifold. When the unburned mixture reaches two glow plugs installed upstream of the catalyst, it burns and releases the thermal energy to heat up the catalyst. Results from the FTP-75 tests showed that the exhaust emissions with the CEGI reduced by 47.7% for THC and by 88.6% for CO in the cold-transient phase of the test.

### 1. 서론

자동차의 배기가스에 의한 환경오염 문제가 날로 심각해짐에 따라 전세계적으로 배기규제가 강화되고 있으며, 이에 대응하기 위해 자동차의 배기배출 물을 감소시키기 위한 연구가 선진국들을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 가솔린 직접분사, 희박연소 및 층상급기, 배기 재순환량 최소화 및 정밀한 연료량 제어 또는 대체연료엔진 등의 기술을 적용하여 엔진배출 공해물질을 최소화하고, 배기 후처리 기술의 적용을 통하여 차량배출 공해물질을 감소시키는 등 다각도로 연구가 추진되고 있다. 이들 중 배기후처리 기술은 촉매를 이용하여 배기가스 중의 공해물질을 제거하는 방식이다. 그러나 배기 공해물질 중 일산화탄소와 미연 탄화수소는 FTP-75 냉시동 모드 초기, 즉, 촉매가 채 가열되기 전에 총 규제치의 50 - 80%가 배출되므로 냉시동 이후 가능한 빠른 시간 내에 촉매가 작동 온도에 이를 수 있도록 하는 기술이 필수적으로 요구되고 있으며, 다음과 같은 다양한 기술이 개발되고 있다.

배기 다기관에 촉매 장치를 바로 부착하는 Close-coupled Catalytic Converter (CCC) 방식은 부가적인 장치 없이 배기 열을 효과적으로 보존하여 촉매의 작동 시기를 앞당길 수 있는 기술로 각광받고 있으나, 촉매장치 입구의 유동 불균일성으로 인해 배기가스 유동이 촉매의 일부분에 집중될 수 있으므로 촉매의 수명 감소와 정화 효율 저하를 야기할 수 있는 단점이 있다[1].

전기가열방식은 촉매장치에 높은 전류(100 - 200A)를 공급하여 냉시동 후 15 - 20초 내에 촉매가 작동온도에 이르도록 하지만, 그 구성부품의 복잡성과 높은 가격으로 인해 차량에 적용하는데 어려움이 있으며 원활한 작동을 위해서는 초기 시동기간 동안 2차공기를 공급하여 공연비를 이론공연비 수준으로 맞추어야 하는 제약조건이 따른다.

Afterburner 방식은 촉매의 상류에 직접 2차 연료와 공기를 공급하고 연소시켜 담체의 온도를 작동온도에 이르게 한다. 그러나 연소가 열선 또는 스파크 플러그에 의해 시작되고 지속되기 위해서는 배기가스의 온도가 일정온도 이상이 되어야 하므로 냉시동 이후 바로 작동치 못하는 단점이 있어 촉매의 작동시기를 앞당기는데 한계가 있다.

냉시동 초기 배기시스템을 통해 외부로 빠져나가는 열손실을 최소화하기 위하여 배기시스템의 단열특성을 개선한 thin-wall 배기 파이프, air-gap 배기 매니폴드 등을 이용하여 촉매의 작동시기를 단축시키는 기술로 현재 활발한 연구가 수행중이나, 보존된 배기열을 충분히 이용하기 위해

서는 촉매장치를 가능한 엔진에 가깝게 부착해야 하는 제약조건이 따르며, 촉매의 반응시간 단축에는 한계가 있다.

미국의 Ford사에서 개발중인 Exhaust Gas Ignition (EGI) 방식은 최대한 빠른 시간 내에 촉매를 작동 온도점에 도달시키기 위해 냉시동 초기 수 초 동안 연소실에서 농후한 혼합기를 연소시키고, 배기관에 2 차공기를 공급하여 이론공연비 근방으로 재조절한다. 이 배기가스는 촉매 입구에서 글로우 플러그에 의해 점화되어 촉매를 가열한다. 이 기술은 다른 방식보다는 적은 장치비용으로 효율적인 배기 저감 효과를 얻을 수 있는 기술로 기대되고 있다[2-5]. 그러나 2 차공기 공급장치가 부가적으로 필요하며, 냉시동 초기 연소실 내부에서 너무 농후한 혼합기의 연소로 인해 연소실내의 과도한 퇴적물 생성과 이로 인한 엔진 및 촉매의 내구성에 미치는 영향이 검증되어야 한다.

이러한 각 기술의 단점을 보완하는 신기술로서, 본 연구에서 개발한 Cranking Exhaust Gas Ignition (CEGI) 방식은 EGI 개념으로부터 발전된 기술이며, 최대한 빠른 시간 내에 촉매를 작동 온도점에 도달시키기 위해 냉시동시 엔진의 점화신호를 수 초 동안 차단하여 실린더내에 공급된 연료-공기 혼합기가 연소하지 않은 채로 배기관으로 배출되게 한 후, 촉매장치 상류에서 글로우 플러그나 점화플러그를 이용하여 혼합기를 연소시키는 기술이다. CEGI 기술은 다른 방식에 비해 적은 장치비용으로 효율적인 배기 저감 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 냉시동 초기에 희박한 혼합기를 엔진에 공급하고 연소시키지 않은 채 배출시켜 배기관에서 점화시키므로 EGI 방식에서 염려되는 연소실 퇴적물, 엔진 내구성 문제를 동시에 해결할 것으로 기대된다.

## 2. 실험 장치의 구성

본 연구에 사용된 CEGI 실험장치의 개략도와 촉매장치가 Fig. 1에 나타나 있다. 기존 엔진의 점화모듈에 외부 스위치를 연결하여 크랭킹시 일정 시간동안 엔진의 점화신호를 차단할 수 있게 한다. 또한 엔진에 장착되어있는 4 개의 연료분사밸브 중 1 개의 연료분사신호를 차단하여, 그 실린더는 단지 공기만 배출하게 함으로써 크랭킹시 희박한 연료-공기 혼합기의 공급이 이루어지도록 하였다. 이때 실린더내에서 연소되지 않고 그대로 배출되는 희박한 혼합기는 촉매장치 상류의 배기관에 장착된 글로우 플러그로 점화시킨다. 따라서 CEGI 적용을 위한 부가적인 장치는 외부 스위치와 두개의 글로우 플러그 뿐이다.

점화된 배기가스의 온도는 첫번째 담체의 10mm 상류 중심부에 설치한 열전대로 측정한다. 담체의 온도는 담체의 전면부에 설치한 열전대와 담체 전면부로부터 40mm 후방의 담체 중심부, 즉 첫번째 담체의 정중앙 위치에 설치한 열전대로 측정한다. 또한 Horiba EXSA-1500 배기가스 분석기를 이용하여 배기가스 중의 유해 물질들의 농도를 측정함으로써 CEGI 방식의 효과를 검증할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다.

본 연구에서는 CEGI 기술을 차량하부장착 촉매장치(Underbody Catalytic Converter, UCC)에 적용해 실험을 수행하였다. 엔진실험에 사용된 가솔린 엔진은 배기량 1341cc, 4 실린더, 12 밸브이며 연료분사방식은 실린더별 독립분사 (Multi-Point Injection, MPI)방식이다. 실차실험 차량의 엔진은 배기량 1500cc, DOHC 사양이며 나머지 조건은 실험엔진의 사양과 같다.

## 3. 엔진적용 실험 및 결과

### 3.1. 엔진실험조건

엔진적용실험은 다양한 조건하에서 수행되었으며, 각 실험의 조건은 Table 1에 나타나 있다. Baseline case는 스로틀 밸브를 공전위치에 둔 상태에서 크랭킹하고 이후 공전상태를 유지한 기존의 상태이며, 아래에 설명한 나머지 4 개의 실험조건은 모두 CEGI 기술을 적용한 것이다.

Idle to idle, 4 cyl 조건은 4 개의 연료분사 밸브를 모두 작동시키면서 스로틀 밸브를 공전상태로 두고 10 초간 시동모터를 이용하여 엔진을 크랭킹한 후 점화신호를 연결하여 시동을 걸고 이

후 공전상태를 유지한 경우이다.

Idle to idle, 3 cyl 조건은 3 개의 연료분사 밸브만 작동시키면서 스로틀 밸브를 공전상태로 두고 10 초간 시동모터를 이용하여 엔진을 크랭킹한 후 점화신호를 연결하여 시동을 걸고 이후 공전상태를 유지한 경우이다.

WOT to idle, 3 cyl 조건은 3 개의 연료분사 밸브만 작동시키면서 스로틀 밸브를 전개상태로 열고 10 초간 시동모터를 이용하여 엔진을 크랭킹한 후 점화신호를 연결하여 시동을 걸고 이후 공전상태를 유지한 경우이다.

3 to 4 cyl, @ 50 sec 조건은 3 개의 연료분사 밸브만 작동시키면서 스로틀 밸브를 공전상태로 두고 10 초간 시동모터를 이용하여 엔진을 크랭킹한 후 점화신호를 연결하여 시동을 걸고 공전상태를 유지하다가 40 초 후 4 개의 연료분사 밸브를 모두 작동시킨 경우이다.

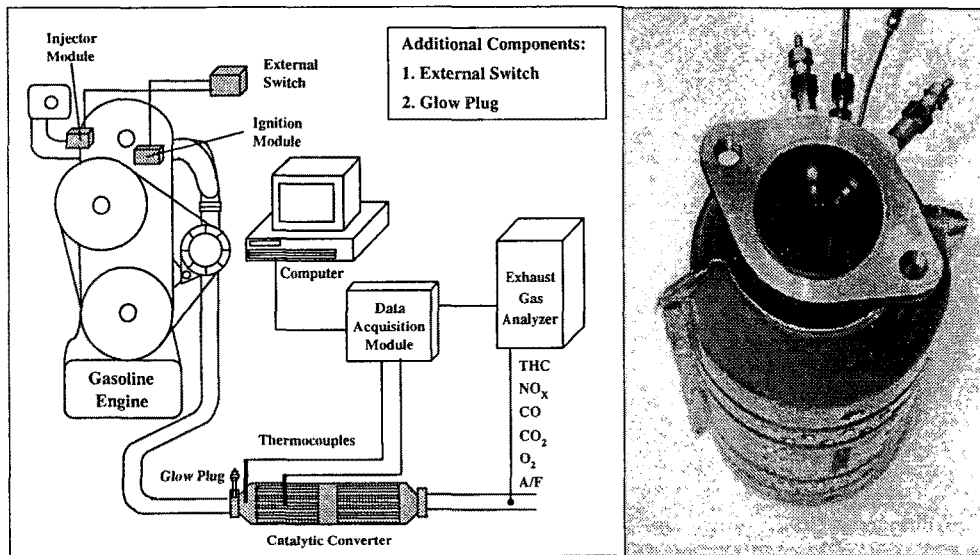


Fig. 1. Experimental setup for CEGI system.

Table 1. Operating conditions for engine tests.

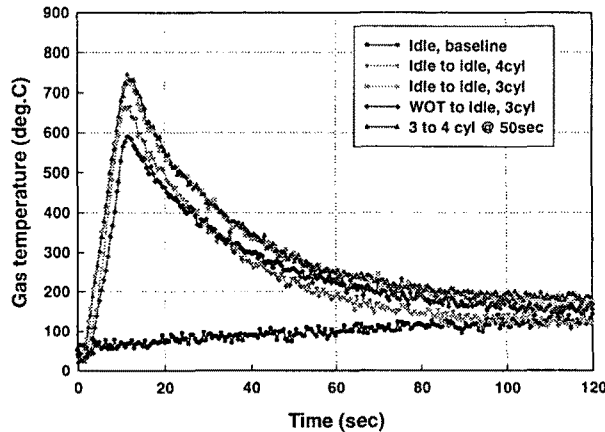
Test case	Throttle position		CEGI operation	No. of operating fuel injectors
	Cranking	After start		
Baseline case	Idle	Idle	No	4
Idle to idle, 4 cyl	Idle	Idle	Yes	4
Idle to idle, 3 cyl	Idle	Idle	Yes	3
WOT to idle, 3 cyl	WOT	Idle	Yes	3
3 to 4 cyl @ 50 sec	Idle	Idle	Yes	3 to 4 @ 50sec

### 3.2. 담체의 온도변화

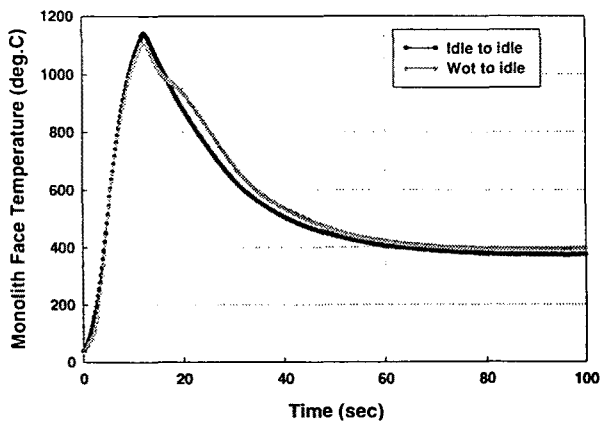
각 실험조건별로 배기가스와 담체의 온도변화를 비교한 그래프가 Fig. 2 에 나타나 있다. Fig. 2-a 에서 보는 바와 같이 Baseline case 에서는 정상시동 후에 담체 상류의 배기가스 온도가 낮아 촉매의 온도를 LOT(Light-off Temperature)인 300°C 이상으로 상승시키기 어렵다는 사실을 알 수 있다. 그러나 CEGI 를 작동시킨 모든 실험조건에서는 글로우 플러그에 의해 미연혼합기가 점화되므로 담체 10mm 상류의 배기가스의 온도는 급격히 상승하였으며, 특히 Idle to idle, 3cyl 조건과 3 to 4cyl @ 50sec 조건에서는 CEGI 작동후 약 10 초에 배기가스 온도가 약 750°C 까지 상승하는 결과를 보였다

높은 온도의 후연소 가스에 가장 먼저 노출되는 담체 전면부의 온도는 Fig. 2-b 에서와 같이 더욱 급격히 상승하게 되고, CEGI 작동후 약 3.5 초에 300°C 에 도달한다. 이 결과는 CEGI 작동 후 수 초 만에 담체의 전면부에서부터 촉매반응이 시작된다는 사실을 보여준다. CEGI 작동이 멈추는 시점에 담체 전면부의 온도는 최대 1140°C 까지 가열되고, 이후 엔진이 정상적으로 시동되어 배기유량이 증가하면 서서히 감소하는 경향을 보인다. 담체 전면부의 온도는 담체상류의 배기가스 온도보다 높게 측정되었는데, 이는 배출되는 배기가스가 LOT 이상으로 예열된 담체 전면부에서 정화될 때 발생한 열로 인해 담체의 온도가 더욱 상승하기 때문이다. 배기유량이 증가된 WOT 크랭킹 조건에서도 담체 전면부의 온도는 큰 차이가 없었다.

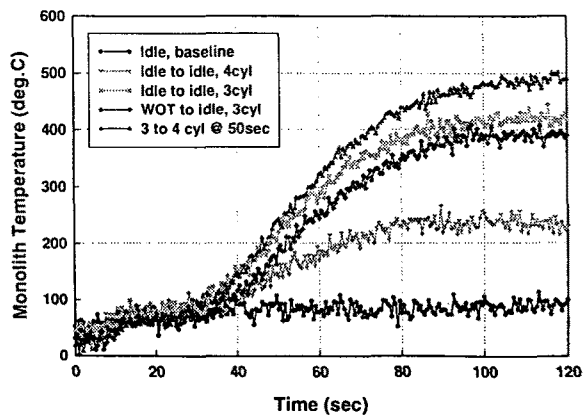
Fig. 2-c 는 담체 중심부의 온도변화를 보여주고 있는데, 담체 전면부보다는 온도가 늦게 상승하고 있음을 알 수 있다. 특히 Idle to idle, 4cyl 조건에 비해 혼합기가 더욱 희박해진 3cyl 조건일 때 담체의 온도가 더 높았다. 이는 희박 혼합기의 경우 후연소 가스 중의 충분한 산소농도로 인해 촉매장치에서의 반응이 보다 활성화되고 따라서 보다 많은 반응열이 발생하면서 담체의 온도를 상승시켰기 때문으로 사료된다. WOT 크랭킹 조건은 idle 크랭킹조건에 비해 연료량과 공기량이 증가했음에도 불구하고 담체의 온도는 Idle to idle, 3cyl 조건보다 오히려 낮은 경향을 보였다. 3 to 4cyl @ 50sec 조건에서는 초기 50 초 동안 3 개의 연료분사 밸브만 작동하기 때문에 배기가스중의 충분한 산소농도로 인해 활발한 반응이 일어나 담체의 온도를 고온으로 상승시키고, 50 초 후에는 4 개의 연료분사 밸브가 정상적으로 작동하여 혼합기가 이론공연비에 가깝게 제어되므로 보다 많은 양의 배기물질을 배출한다. 그러나 담체의 온도가 이미 작동온도 이상으로 상승되었기 때문에 배기배출량의 증가와 함께 더 높은 반응열을 발생시켜 다른 조건에 비해 담체 중심부의 온도는 가장 빨리 상승하는 결과를 보였다.



(a) Exhaust gas temperature



(b) Monolith face temperature



(c) Monolith center temperature

Fig. 2. Exhaust gas and monolith temperature change with time.

### 3.3. 배기가스농도의 변화

각 실험조건에서의 배기가스 농도변화 그래프가 Fig. 3 에 나타나 있다. Baseline case 는 촉매의 온도가 너무 낮아 THC 와 CO 가 정화되지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 CEGI 장치를 적용한 경우에는 크랭킹후 수 초 이내에 THC 의 정화가 활발히 시작되고 있다. 그러나 Idle to idle, 4cyl 조건에서는 담체가 예열 되었음에도 불구하고 배기가스중의 산소농도가 너무 낮아 정화작용이 활발히 일어나지 않았고, 담체의 후속적인 온도상승이 충분치 못하게 되어 정화효과는 미미한 수준이다.

Baseline case 의 경우에는 시동 초기에 매우 많은 양의 CO 가 배출되었으나 CEGI 기술을 적용한 경우에는 크랭킹 기간인 초기 10 초 동안 거의 배출되지 않았다. CO 는 근본적으로 고온의 연소분위기 내에서 열해리에 의해 발생된다[6]. 그러나 크랭킹시 촉매장치 입구에서의 조건은 실린더 내부와 같은 압축에 의한 고온연소 조건이 아니기 때문에 CO 의 배출량은 매우 적다. 그러나 엔진이 정상적으로 시동이 걸린 후에는 Baseline case 와 정성적으로 일치하는 경향을 보이고 있으며, Idle to idle, 4cyl 이외의 조건에서는 시동 후 수 초 이내에 정화가 시작된다. 이와 같은 엔진 적용실험으로부터 CEGI 기술의 배기저감 효과를 확인할 수 있었으며, 실험조건 중 Idle to idle, 3cyl 조건이 가장 우수함이 입증되었다.

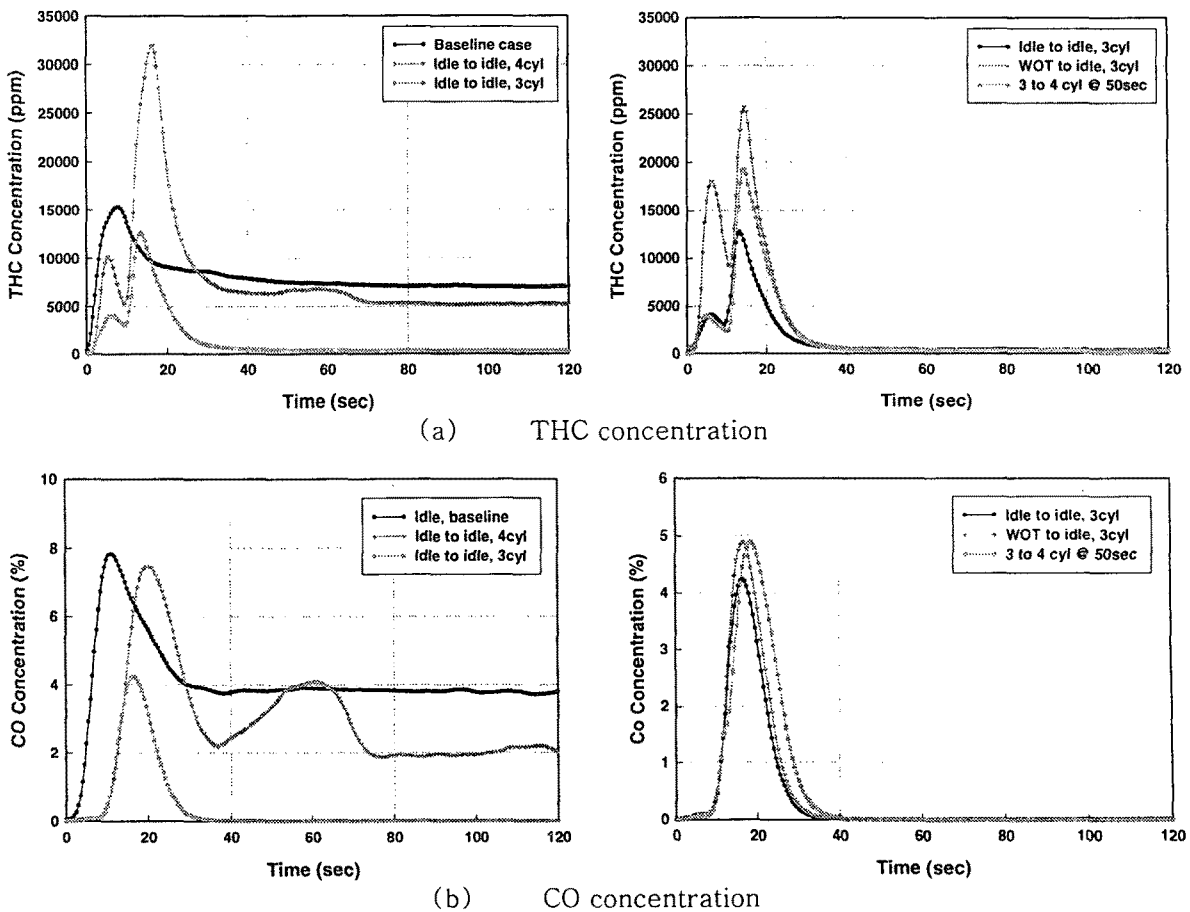


Fig. 3 THC and CO concentration change with time.

## 4. 차량적용실험 및 결과

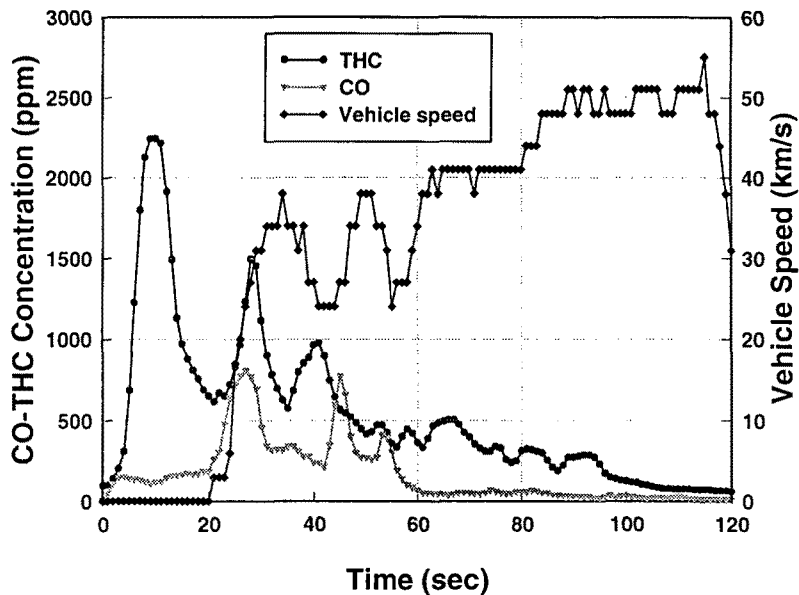
### 4.1. 차량실험조건

엔진적용실험 결과 Idle to idle, 3cyl 조건의 배기저감효과가 가장 우수하였으나 차량 적용실험

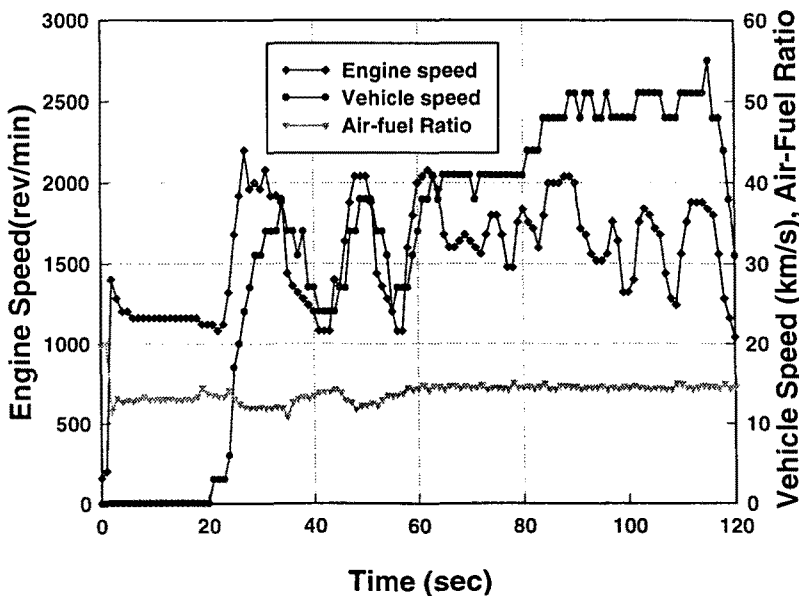
시는 차량의 정상적인 작동을 위하여 크랭킹 이후 50 초에 4 개의 실린더에 모두 연료를 공급하는 3 to 4 cyl @ 50sec 조건으로 실험을 수행하였다. 차량적용실험은 FTP-75 모드 주행시험을 통하여 이루어졌다. 먼저 Baseline 차량에 대한 모드주행시험을 시행하여 기준자료를 획득하였다. 이후 FTP-75 시험 규정에 따라 차량을 soaking 한 후 CEGI 장치를 장착한 차량에 대한 시험을 수행하여 비교 평가하였다.

#### 4.2. 차량실험결과

Fig. 4 는 Baseline 에 대한 FTP-75 모드 주행시험 결과를 보여주고 있다. 초기 시동시 많은 양의 THC 가 배출되고, 시동이후 감소하는 경향을 보이다가 20 초 후 차량이 첫번째 가속구간에 접어들면서 THC 와 CO 의 농도가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4-a). 연료-공기 혼합기의 공연비는 이론공연비인 14.7 근방에서 약간 변동하는 경향을 보인다(Fig. 4-b).



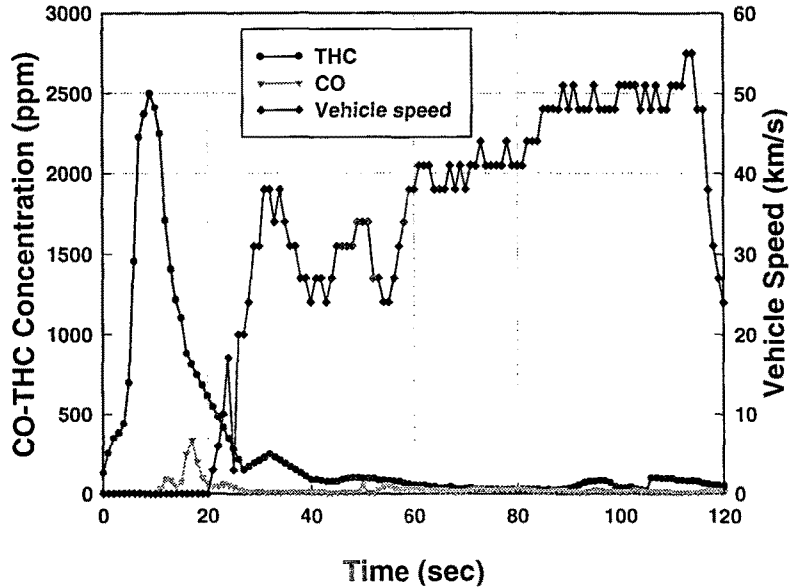
(a) THC and CO emissions and vehicle speed



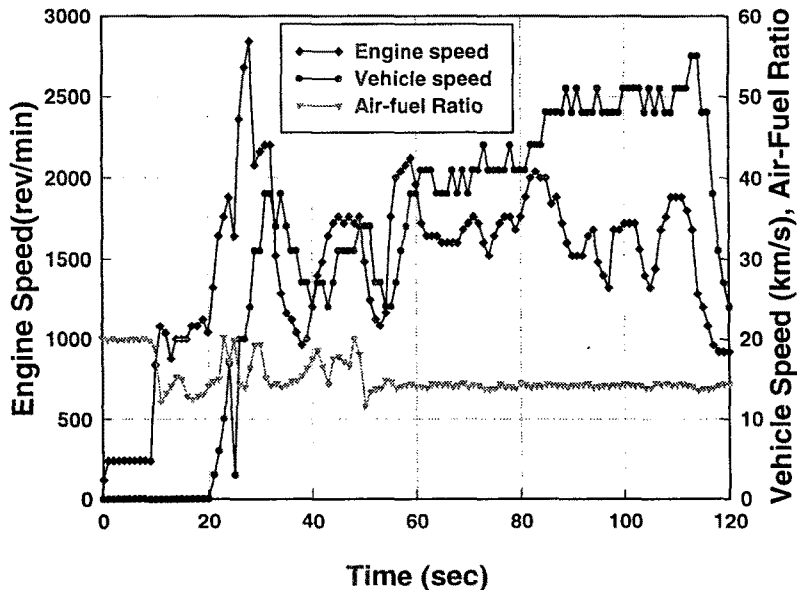
(b) Air-fuel ratio, engine speed and vehicle speed

Fig. 4. FTP-75 test results for the baseline case.

Fig. 5는 CEGI 기술을 적용한 경우의 FTP-75 모드 주행시험 결과를 보여주고 있다. 크랭킹 시에는 여전히 많은 양의 THC가 배출되나 저온 연소 분위기에 의하여 CO 배출량은 대폭 감소하였으며 이후 차량이 가속구간에 접어들면서 배출되는 THC와 CO는 이미 예열된 촉매장치에 의하여 정화되어 배출량이 현저히 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5-a). 1개의 연료분사밸브가 초기 50초 동안 작동하지 않기 때문에 자체 진단시스템이 연료분사밸브 고장으로 인식하고 이를 제어하므로 공연비의 변동이 심하게 된다. 50초 후 4개의 연료분사밸브가 모두 정상적으로 작동하게 되면 이런 현상이 사라진다. 엔진은 CEGI 작동구간인 초기 10초 동안 260rpm으로 회전하다가 10초 후 부터는 정상적으로 작동함을 알 수 있다(Fig. 5-b).



(a) THC and CO emissions and vehicle speed



(b) Air-fuel ratio, engine speed and vehicle speed

Fig. 5. FTP-75 test results for the CEGI case.

Fig. 6은 FTP-75 모드 주행시험시 Baseline과 CEGI의 THC와 CO의 배출농도를 비교한 그래프이다. Baseline의 경우에는 주행시험 초기 100초 동안 매우 많은 양의 THC와 CO가 배출되었다. 그러나 CEGI를 적용한 경우에는 초기 10초, 즉 크랭킹 기간동안은 담체 상류에서 이루어지는 연소의 불완전성으로 인해 많은 양의 THC가 배출되지만, 크랭킹이 끝나고 차량이 주행

모드를 따라 정상적으로 작동할 때의 THC 배출농도는 급격히 감소하였다(Fig. 6-a). 이는 크랭킹 기간동안 촉매가 반응온도 이상으로 충분히 예열되어 이후 배출되는 THC 성분을 활발히 정화시켰기 때문이다.

CO의 농도변화를 살펴보면 Baseline의 경우에는 냉시동 초기에 매우 많은 양이 배출되었다. 그러나 CEGI 기술을 적용하면 크랭킹시 배출되는 양이 매우 적고, 이후 엔진이 시동이 걸려 정상적으로 작동할 때 배출되는 성분은 충분히 예열된 촉매장치에 의해 정화되어 Baseline의 경우에 비해 크게 감소하였다(Fig. 6-b).

차량에 CEGI 기술을 적용한 결과 촉매장치는 크랭킹 기간 내에 반응온도에 도달하였으며, Table 2에 정리되어 있는 바와 같이 Baseline case에 비해 cold transient phase의 THC는 47.7%, CO는 88.6%가 감소된 결과를 보여주었다.

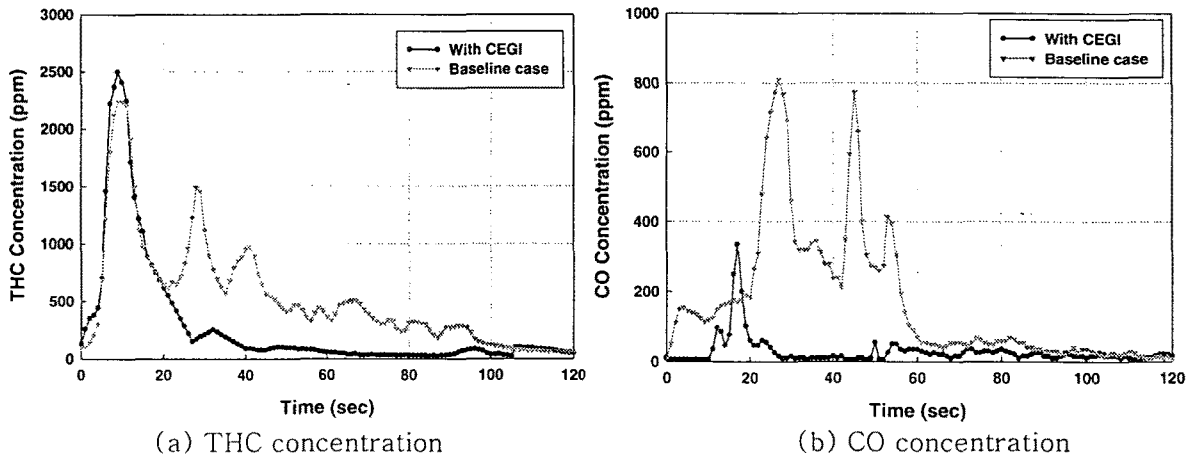


Fig. 6 THC and CO emissions during the first 120 seconds of FTP-75 mode test.

Table. 2 FTP-75 test results for cold transient phase (phase 1).

	Baseline case	CEGI	Reduction rate (%)
THC (g/mile)	0.256	0.133	47.7
CO (g/mile)	1.487	0.169	88.6

## 5. 결론

촉매장치의 반응시간을 단축시키기 위한 다양한 기술 중 배기가스 점화기술에 대하여 연구하여 CEGI 기술을 개발하였으며, 이 기술을 엔진과 차량에 적용하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CEGI 기술은 크랭킹 기간을 10초 이내로 하면 담체를 충분히 예열할 수 있으며, 크랭킹 후 수 초 만에 작동온도에 이르게 할 수 있다.
- 2) 냉시동시 THC 및 CO의 배출량을 대폭 감소시킬 수 있음이 엔진적용실험 결과 확인되었다.
- 3) 냉시동시 공연비가 기존엔진의 경우보다 희박하면 담체의 예열은 더욱 빨라지므로 추후 예견되는 희박시동에 더욱 적합한 기술이다.
- 4) CEGI 방식에서는 혼합기가 연소실내에서 연소되지 않은 채 그대로 배출된다. 따라서 EGI 방식의 문제점인 연소실 퇴적물과 엔진 내구성 문제를 동시에 해결할 수 있다.
- 5) CEGI 기술을 CCC에 적용하고, 배기관내에서의 연소상태를 최적화하여 초기의 THC 배출량을 감소시키면 배기배출물 수준을 ULEV 규제치 이하로 낮출 수 있으리라 기대된다.



## 참고문헌

1. 조용석 외 5인, "Close-Coupled Catalytic Converter 입구의 유동분포 측정 및 수치해석," KSAE 97380060, 1997.
2. 조용석 외 3인, "촉매의 가열시간 단축을 위한 배기가스 점화기술 개발", 제 5 회 차세대자동차 기술 Workshop, pp. 129-132, 1997.
3. T. Ma, N. Collins and T. Hands, "Exhaust Gas Ignition (EGI) - A New Concept for Rapid Light-Off of Automotive Exhaust Gas Catalyst," SAE Paper No. 920400, 1992.
4. D. Eade et. al., "Fast Light-Off of Underbody Catalysts Using Exhaust Gas Ignition," SAE Paper No. 952417, 1995.
5. S.C. Brett, D. Eade et. al., "Evaluation of Catalysed Hydrocarbon Traps in the EGI System: Potential for Hydrocarbon Emissions Reduction," SAE Paper No. 981417, 1998.
6. Stephen R. Turns et. al., "An Introduction to Combustion," Mcgraw-Hill, 1996.

## 후기

본 연구는 현대자동차(주)의 지원하에 국민대학교 자동차기술연구소 열기관실험실 연구과제의 일환으로 수행된 것임을 알립니다.