

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0066

## 2차 공기분사 및 냉각수제어에 의한 SI 엔진의 탄화수소 배기 저감

### SI Engine Hydrocarbon Emissions Reduction with Secondary Air Injection and Coolant Control

박 기 수\*, 조 영 진\*, 박 심 수\*\*  
Keesoo Park, Young Jin Cho, Simsoo Park

#### ABSTRACT

It is well known that the majority of the emissions measured from vehicle exhaust in the US Federal Test Procedure(FTP-75) are emitted during the first 60 seconds. This paper describes an experimental study on SI engine emissions reduction after cold start with interval secondary air injection and coolant control. Secondary air injection after cold start to reduce exhaust emissions causes an exothermic reaction at the exhaust port and gives sufficient air to the catalyst. For that reason, engine-out emissions oxidized in the exhaust port and the rapid heating of a catalytic converter after cold start with CSAI and ISAI are estimated.

The influence of the coolant temperature on SI engine emissions has been estimated. In the present study, coolant control of the cylinder head temperature is used to investigate the effect of coolant temperature on SI engine emissions.

The results show that engine-out hydrocarbon and carbon monoxide emissions are considerably reduced with interval secondary air injection and coolant control.

주요기술용어 : Continuous Secondary Air Injection(CSAI, 연속 2차 공기분사), Interval Secondary Air Injection(ISAI, 간헐 2차 공기분사), Coolant Control(CC, 냉각수 제어), Low Emission Vehicle(LEV, 저공해 자동차), BHC(Burner Heated Catalyst), EHC(Electrically Heated Catalyst), EGI(Exhaust Gas Ignition)

#### 1. 서 론

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학과

자동차 생산능력이 수요를 증가함에 따라 각 자동차 회사는 기관의 출력을 높이고 연비를 향상시키고 배출가스 규제를 만족시켜야 하는 과제를 안고 있다. 특히 저 배기 기술의 중요성은 더욱 증대되어 LEV(Low Emission Vehicle)와 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)의 대응

방안에서 SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle)으로 제안되고 있다. 이러한 배출가스 규제에서 더욱 강화되고 있는 것이 HC이며 그 대부분이 초기 냉 시동(Cold Start)구간에서 배출되지만, 이를 줄이는데 있어서 촉매활성화온도(350°C 전후)에 도달하는데 일정한 시간을 필요로 하는 삼원 촉매장치(Three Way Catalyst)로는 규제를 만족 시키기 어렵기 때문에 이를 위한 후처리 시스템 개선, 엔진 본체 개선, 엔진 제어 개선 등으로 분류되는 배출가스 저감 기술이 시도되고 있다.<sup>1,2)</sup>

엔진의 시동초기에 배출가스를 저감시키고 배출가스의 온도를 높여서 촉매 변환기의 성능을 개선시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 성능이 좋은 전자식 2차 공기 펌프를 사용하여 배기 밸브와 가까운 위치에 2차 공기를 분사하는 기술, 배출가스의 온도를 높이기 위해 점화시기를 지각(Retard)시키고 엔진의 공회전 속도를 높이는 방식, 배기 포트에 2차 공기를 분사하면서 버너로 촉매를 가열하는 BHC와 전기적으로 촉매를 가열하는 EHC, 배출가스를 점화시켜 촉매활성화온도의 도달시간을 줄이는 EGI등이 있다.<sup>3,4,5)</sup>

엔진에서 배출되는 HC는 엔진자체의 점화시기, RPM, 공연비와 관계가 있다. 일반적으로 엔진시동초기에는 RPM이 낮고 엔진공연비가 농후하여 많은 양의 미연탄화수소와 일산화탄소가 배출되는데, 이러한 배출가스를 산화시키고 촉매활성화시간을 단축시키는데 2차 공기분사가 효과적이다. 그러나 배기 과정을 제외한 나머지 과정에서도 연속적으로 2차 공기를 분사하면 배출가스의 분포가 균일하지 못하게 되고, 배기 포트 및 배기 다기관에서 배출가스의 온도를 저하시키는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 배기 과정에만 2차 공기를 분사하는 것이 효과적이며, 배기 과정에서 발생하는 배기 다기관내의 급격한 압력변화에 대응하기 위하여 분사위치는 배기 밸브에 가까이 하고 분사각도는 정면으로 하면서 분사속도를 높여주는 것이 효과적이다.<sup>6,7)</sup>

냉각수 온도가 미연탄화수소에 미치는 영향에

대한 연구도 진행되어 왔다. 실린더 헤드와 블럭에 있는 냉각수 통로의 체적을 감소시켜서 초기에 냉각수 온도를 높임으로서 엔진의 Warm-up 시간을 단축키거나 실린더 헤드의 온도가 실린더 블럭의 온도보다 연소실내의 미연탄화수소에 더 영향을 미친다는 것에 착안하여 실린더 헤드의 냉각수 온도를 제어하는 기술도 진행중이다.<sup>8,9)</sup>

엔진 시동초기에 작동가스와 연소실 벽면의 온도차로 인해 실린더내부에 Wall Wetting이 발생되며 틈새체적(Crevice Volumes)내에 소염층의 생성으로 인해 다량의 미연 탄화수소가 배출된다. 실린더 헤드의 온도는 이러한 미연 탄화수소에 많은 영향을 미치므로 냉각수 제어에 의한 실린더 헤드의 온도상승은 연소조건을 개선시켜 미연탄화수소를 감소시키는데 효과가 있다.<sup>10,11)</sup>

본 연구의 목적은 초기 냉 시동구간에서 2차 공기분사 및 냉각수 제어를 적용하지 않은 시험조건을 기준으로 하여, 연속적으로 2차 공기분사를 적용한 시험조건, 배기 과정에서만 2차 공기를 분사하는 시험조건, 냉각수 제어를 적용한 시험조건을 개별적으로 시행하면서 HC의 저감과 배기가스의 온도상승을 비교한 후에, 최종적으로 간헐적인 2차 공기분사와 냉각수 제어를 동시에 적용하여 엔진 대상 배출가스의 저감과 배출가스의 온도의 상승을 극대화하는 시스템을 구성하는 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

엔진은 2.0L 4기통이며, 엔진제어를 위해 연료 분사 및 점화모듈이 엔진에 연결된 PC를 사용하였으며, 엔진으로 흡입되는 공기의 온도 및 엔진에서 순환되는 냉각수의 온도를 일정하게 유지되도록 온도제어장치를 엔진에 연결하였다.

Fig. 1은 엔진에 장착된 배기 매니폴드 및 촉매변환기의 개략도를 나타낸 것이다. 배기 포트로부터 촉매입구까지의 거리는 약 32cm이고 배출가스의 공연비와 온도를 측정하기 위해 그림과

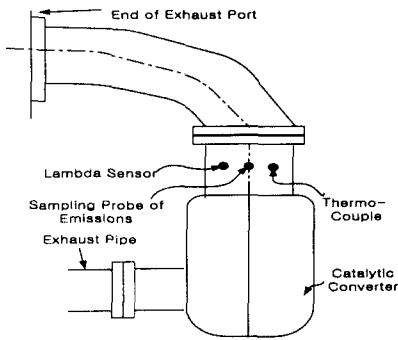


Fig. 1 Schematic of Exhaust Manifold and Catalytic Converter

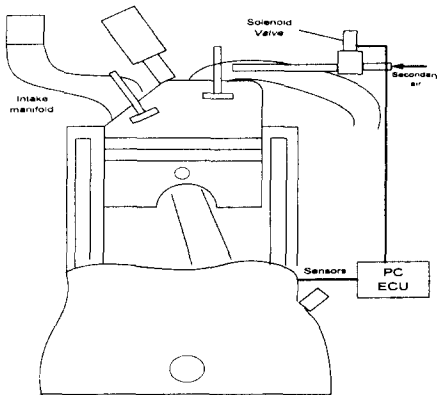


Fig. 2 Schematic of Secondary Air Injection

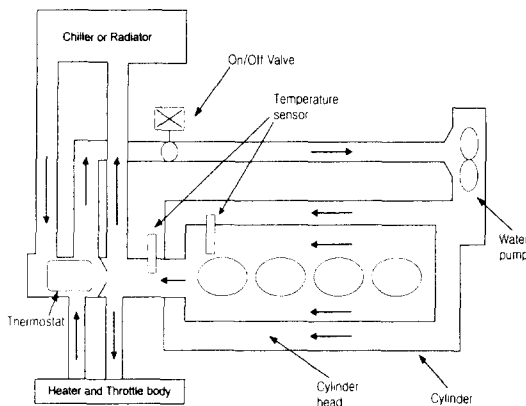


Fig. 3 Coolant Control System

같이 촉매입구의 중심부분으로부터 7 mm 떨어진 위치에 광역 산소 센서와 열전대를 설치하였다. 또한 HC 및 그 밖의 배출가스 (NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)를 추출하여 분석하는 HORIBA사의 MEXA-8120D 배출가스 분석기와 연결된 2개의 샘플링 파이프로 촉매입구의 중심부분으로부터 7 mm 떨어진 위치에 설치하였다.

Fig. 2는 2차 공기분사의 개략도를 나타낸 것이며 엔진으로부터 2차 공기를 분사하는데 필요한 신호를 감지하여 PC-ECU에 내장되어 있는 2차 공기분사 제어장치와 분사드라이버에 의해 각 실린더별로 2차 공기를 분사하도록 되어있다. 압축된 2차 공기는 솔레노이드 밸브를 지나서 배기 밸브의 정면으로부터 3 mm 떨어진 위치에 설치된 1개의 분사구멍을 가지고 있는 Stainless Steel Pipe를 통해 분사되도록 하였다.

Fig. 3은 냉각수 제어의 개략도를 나타낸 것이며, 엔진시동과 동시에 냉각수의 순환을 제어하기 위하여 워터펌프 이전에 On/Off 밸브를 설치하였고 냉각수의 온도를 측정하기 위해 그림과 같은 위치에 2개의 열전대를 장착하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서는 Table 1의 시험조건에서와 같이 초기 냉 시동상태를 고려하여 냉각수 온도를 20℃ 및 40℃로 유지하면서 3가지의 엔진 공연비(A/F)를 기준으로 각 RPM과 BMEP에 대해 MBT조건으로 시험하였다.

Table 1 Test Condition

RPM	BMEP	A/F	Coolant Temp.	SAI pressure
1500	1.70 bar	13, 14.6, 16	20, 40℃	2.0, 2.5, 3.0bar
1800	2.0 bar			
2400	2.5 bar			
Comparison between Standard, CC, CSAI, ISAI and ISAI+CC				

시험방법은 2차 공기분사 및 냉각수 제어를 하지 않는 표준상태에서 엔진의 시동과 동시에 촉매입구에서의 배출가스 온도변화 및 배출가스 분석시험을 행하였다.

CSAI은 Standard와 같은 조건에서 2차 공기의 분사압력을 변화시키면서 촉매입구에서의 공연비 변화시험을 추가하였다.

ISAI은 CSAI과 같은 조건에서 2차 공기의 분사시기 및 분사시간을 변화시키면서 시험을 행하였는데, 배기 밸브가 열릴 때 분사하는 경우가 배기 밸브가 열리기 전에 분사하는 경우보다 배출가스의 저감과 온도상승에 더 효과적이어서 각 실린더별로 배기 과정(240 °CA)에만 2차 공기의 분사압력을 변화시키면서 시험하였다.

냉각수제어는 Standard와 같은 조건에서 엔진의 시동과 동시에 On/Off 밸브를 작동시켜서 실린더헤드 주변의 냉각수 온도변화 및 배출가스 분석시험을 하였다.

ISAI + CC는 가장 적절한 ISAI과 냉각수제어를 엔진 시동과 동시에 적용한 것이다.

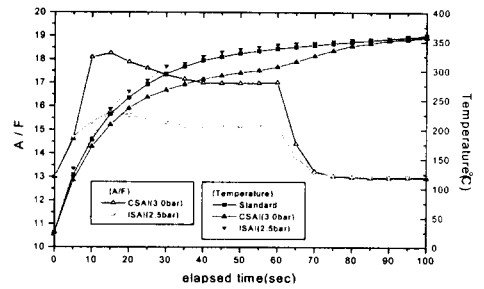
### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1 2차 공기분사(SAI)

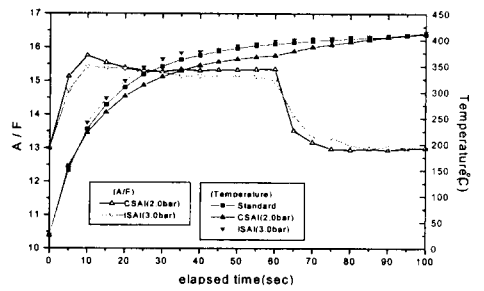
Fig. 4는 엔진 시동 후 경과시간에 대한 CSAI와 ISAI에 의한 촉매입구에서의 배출가스의 공연비와 온도변화에 대한 시험결과를 나타낸다. 2차 공기는 엔진 시동 후 60초까지만 분사하였고, 각 경우에 있어서 CSAI와 ISAI의 분사압력이 다른 이유는 이전의 배출가스 분석시험에서 HC를 저감시키는데 가장 적절한 분사압력으로 선택되었기 때문이다.

(a)의 경우 ISAI는 공연비가 증가하다가 감소하는 경향을 보이며, 가장 높은 배출가스의 온도변화를 나타내는데, 이는 배기 과정에만 분사되는 2차 공기와 배출가스가 효과적으로 산화반응을 일으켰기 때문이라고 판단된다. CSAI는 ISAI보다 희박한 공연비를 나타내며, 가장 낮은 배출가스의 온도를 나타내는데, 이는 배기 과정 이외에 분사되는 2차 공기의 양이 많고 그 온도가 낮아서 균일한 혼합 및 활발한 산화반응이 발생되지 않은 것으로 판단된다.

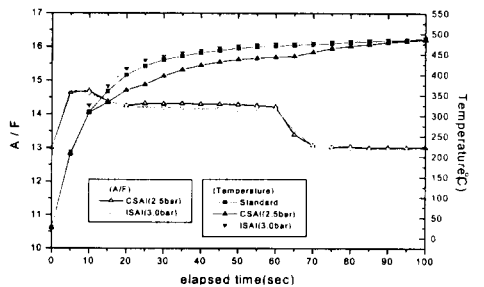
(b)와 (c)의 경우도 전반적으로 (a)와 비슷한



(a) 1500rpm/1.7bar



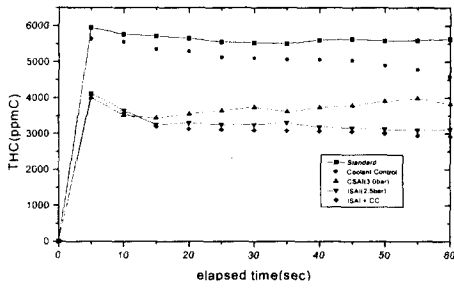
(b) 1800rpm/2.0bar



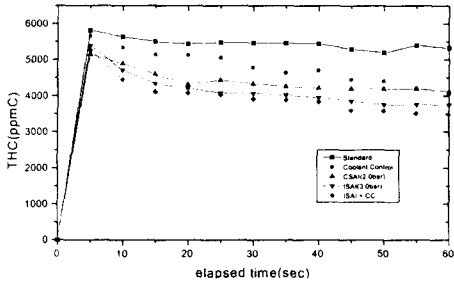
(c) 2400rpm/2.5bar

Fig. 4 Profiles of A/F and Exhaust Temperature Measured at Inlet of Catalyst for Standard, CSAI and ISAI (Engine A/F=13.0 Coolant Temperature=20°C)

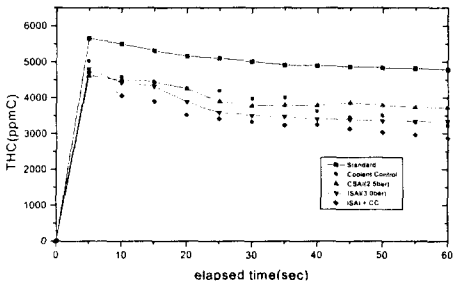
경향을 보이지만, ISAI과 CSAI의 배출가스의 공연비가 큰 차이가 나지 않으면서 배출가스 온도의 촉매활성화온도(350°C 전후) 도달시간에는 차이가 있는데, 이는 CSAI의 분사압력이 ISAI보다 낮고 RPM과 BEMP의 증가로 인해 엔진에서 배출되는 배기 온도가 더 높아졌기 때문이라 생각된다.



(a) 1500rpm/1.7bar



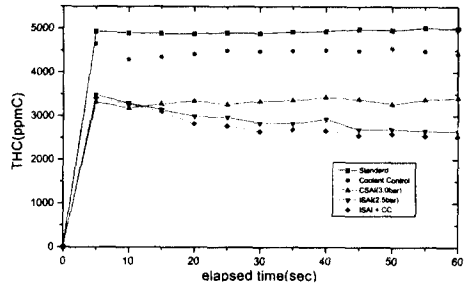
(b) 1800rpm/2.0bar



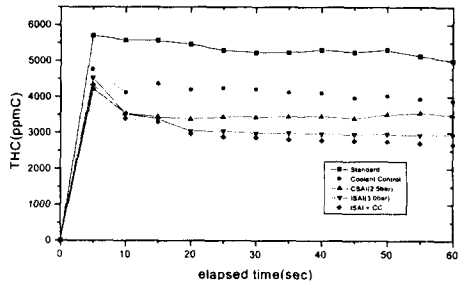
(c) 2400rpm/2.5bar

Fig. 5 Profiles of THC Emissions Measured at Inlet of Catalyst for Standard, Coolant Control, CSAI, ISAI and ISAI+CC (Engine A/F=13.0 Coolant Temperature=20°C)

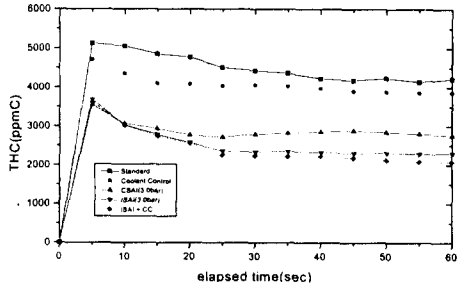
Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 엔진 시동 후 경과시간에 대한 Standard, Coolant Control, CSAI, ISAI, ISAI+CC에 의한 촉매입구에서의 THC(Total Hydrocarbon) 변화 시험결과를 Raw 데이터로 나타낸다. CSAI는 엔진시동 초기에는 급격한 감소량을 보이지만 시간이 지남에 따라 그 감소량이 줄어드는데, 이는 엔진 시동초기에는 많은 양의 2차 공기가 THC를 희석시키지만 시간이 지남에 따라 산화반응이 억제되기



(a) Coolant Temperature=40°C Engine A/F=13.0



(b) Coolant Temperature=20°C Engine A/F=14.6

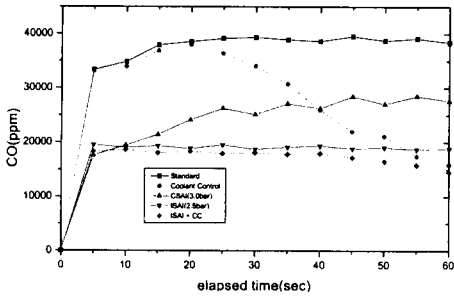


(c) Coolant Temperature=20°C Engine A/F=16.0

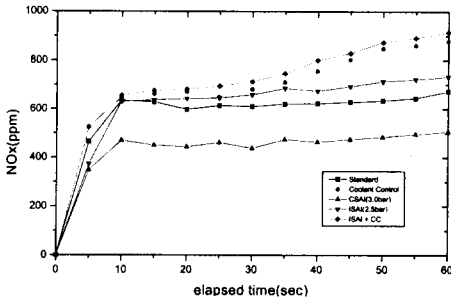
Fig. 6 Profiles of THC Emissions Measured at Inlet of Catalyst for Standard, Coolant Control, CSAI, ISAI and ISAI+CC (1500rpm/1.7bar)

때문이라 판단된다.

ISAI는 엔진시동 초기에는 CSAI보다 적은 THC의 감소량을 보이지만 시간이 지남에 따라 그 감소량이 더 많아지며, (b)와 (c)에 비해서 (a)는 분사압력이 낮음에도 불구하고 (a)가 더 많은 감소량을 나타낸다. 이는 배기 과정에만 분사되는 2차 공기가 배출가스와 적절한 산화반응과 균일한 혼합을 이루고, (a)는 (b)나 (c)보다 배기 과정 시간이 길어서 2차 공기와 배출가스가 산화



(a) CO



(b) NOx

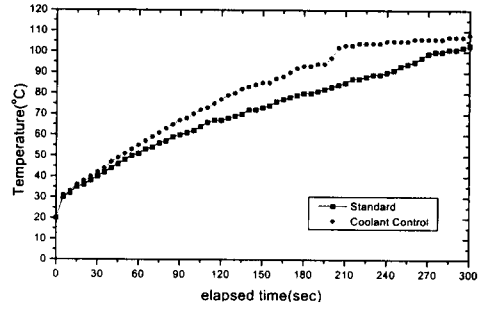
Fig. 7 Profiles of CO and NOx Emissions Measured at Inlet of Catalyst for Standard, Coolant Control, CSAI, ISAI and ISAI+CC (Engine A/F=13.0 Coolant Temperature=20℃ 1500rpm/1.7bar)

될 수 있는 충분한 조건이 형성되었기 때문이라 생각된다.

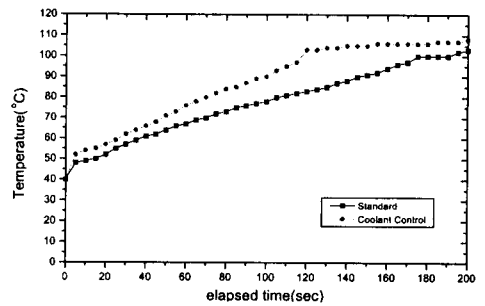
Fig. 6은 Fig. 5의 (a)와 같은 조건에서 냉각수 온도 및 엔진 공연비(Engine A/F)를 바꾼 상태의 THC 변화 시험결과(Raw 데이터)이다.

(a)는 Fig. 5의 (a)와 비슷한 경향을 보이지만 전반적으로 THC의 농도가 낮게 나타나는데, 이는 온도가 높아진 냉각수가 실린더주변을 순환하면서 흡기 포트 및 연소실내에서의 연소조건을 향상시켜 미연탄화수소를 저감시키고 이로 인해 배출가스의 온도가 상승되었기 때문이라 판단된다.

(b)와 (c)도 Fig. 5의 (a)와 비슷하게 THC가 저감되는 경향을 나타내는데, 이는 2차 공기분사 후의 배출가스 공연비가 THC의 생성에 최소가 되는 배출가스 공연비가 되기 때문이다.



(a) Coolant Temperature = 20 ℃



(b) Coolant Temperature = 40 ℃

Fig. 8 Profiles of Cylinder Head Coolant Temperature (Engine A/F = 13.0 1500rpm/1.7bar)

Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건에서 CO와 NOx 변화시험 결과를 Raw 데이터로 나타낸다.

CO의 경우, CSAI는 높은 CO의 감소량을 나타내지만 ISAI보다 낮은 감소량을 나타내는데, 이것은 THC의 경우와 마찬가지로 ISAI는 배기 과정에만 2차 공기가 분사되어서 CSAI보다 배출가스와 균일한 혼합을 이루어서 불완전 연소량이 줄어들고 활발한 산화반응을 하기 때문이라 판단된다.

NOx의 경우, CSAI는 NOx가 감소되는 경향을 보이는데, 이것은 배출가스 공연비가 엔진공연비(Engine A/F=13.0)보다 희박해지고 배출가스 온도가 낮아졌기 때문이라 생각된다. ISAI는 시간이 지남에 따라 NOx가 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 2차 공기와 배출가스가 적절한 산화반응을 하여 배출가스 온도가 상승되고 배

출가스 공연비가 NOx의 생성률이 높은 이론공 연비와 비슷하게 되었기 때문이라 판단된다.

### 3.2 냉각수 제어 (Coolant Control)

Fig. 8은 시동 후 경과시간에 대한 Standard 와 냉각수제어를 하는 경우에 실린더헤드 주변의 냉각수 온도변화에 대한 시험결과이다.

냉각수제어의 경우가 Standard보다 높은 냉각 수온도를 나타내는데, 이는 실린더 헤드와 블록 의 냉각수순환을 차단함으로써 실린더헤드 주변 의 냉각수가 정체된 상태에서 연소실로부터 열을 전달받았기 때문이다.

Fig. 5, 6, 7은 엔진 시동과 동시에 냉각수제어 를 적용한 경우의 배출가스 분석의 시험결과를 나타낸 것이다.

THC는 시간이 지남에 따라 RPM과 BMEP 가 증가함에 따라 더 많이 감소되는데, 이것은 실 린더헤드의 온도가 상승됨에 따라 미연탄화수소 의 원인이 되는 틈새체적내의 소염층과 Wall Wetting의 생성이 억제되어 연료 무화가 개선되고 연소조건이 향상되었기 때문이라 생각된다.

CO의 경우도 시간이 지남에 따라 저감효과가 더 현저해지는데, 이는 CO의 생성원인이 되는 엔진 시동초기의 불완전연소를 개선시켰기 때문 이라 판단된다.

NOx의 경우는 오히려 증가하는 경향을 나타 내는데, 이는 실린더헤드의 온도상승으로 인하여 연소실내의 연소조건이 향상되어 연소가스의 온 도가 상승되었기 때문이라 판단된다.

### 3.3 2차 공기분사와 냉각수 제어

Fig. 5, 6, 7은 ISAI 및 Coolant Control을 동 시에 적용(ISAI+CC)한 경우의 배출가스 분석 시험결과를 나타낸다.

모든 시험조건에서 THC 및 CO를 저감시키는 데 가장 효과가 있음을 알 수 있으며, NOx의 경 우는 오히려 증가하였다. 이것은 앞서 언급한 것 처럼 냉각수제어에 의한 연소실내에서의 연소조

건 향상으로 미연 탄화수소 및 일산화탄소가 저 감되고, 배기 과정에만 분사되는 2차 공기와 배 기가 배기 포트 및 배기 다기관에서 균일하게 혼 합하고 활발한 산화반응을 하기 때문이라 생각된 다.

### 3.4 배기가스의 저감결과

Table 2는 촉매입구에서의 THC에 대한 배출 가스분석의 시험결과를 종합하여 나타낸 것이다.

배출가스의 저감비율은 Fig. 5와 Fig. 6을 근 거로 하여 1500rpm/1.7bar, 1800rpm/2.0bar, 2400rpm/2.5bar의 시험조건에 대한 전체적인 배 출가스의 저감결과를 나타낸 것이다.

Table 2 Results of THC Emissions

	A/F=13.0 (20 °C)	A/F=13.0 (40 °C)	A/F=14.6 (20 °C)	A/F=16.0 (20 °C)
Coolant Control	9-21%↓	8-10%↓	6-22%↓	10-12%↓
CSAI	19-34%↓	13-33%↓	21-34%↓	18-36%↓
ISAI	24-41%↓	20-40%↓	30-40%↓	24-45%↓
ISAI+CC	27-43%↓	22-43%↓	33-43%↓	28-46%↓

Table 3은 촉매입구에서의 CO와 NOx에 대 한 배출가스의 시험결과를 종합하여 나타낸 것이 며, Table 2와 마찬가지로 전체적인 배출가스의 변화결과를 나타낸 것이다.

Table 3 Results of CO and NOx Emissions

	CO (A/F=13.0 20 °C)	NOx (A/F=13.0 20 °C)
Coolant Control	23-49%↓	17-25%↑
CSAI	25-35%↓	10-25%↓
ISAI	32-50%↓	6-11%↑
ISAI+CC	43-57%↓	21-30%↑

## 4. 결 론

냉 시동상태의 엔진에서 배출되는 HC와 CO 를 저감시키기 위하여 2차 공기분사 및 냉각수제 어를 하는 시험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2차 공기를 연속적으로 분사한 경우(CSAI)나

배기 과정에만 분사한 경우(ISAI)의 모든 조건에서 HC와 CO의 저감효과를 보였으며, ISAI의 경우에는 배기 과정의 시작과 동시에 2차 공기를 분사하는 것이 효과적이고 배기 과정이외의 구간에서는 HC와 CO의 감소량이 줄어드는 경향을 보였다.

2) 엔진시동 초기에는 CSAI가 ISAI보다 좋은 배출가스 저감효과를 보였지만 전체구간(60초)에서는 ISAI가 CSAI보다 높은 배출가스 온도(약 10-48℃)를 나타냈으며 HC는 5-9 % CO는 7-15 % 더 많이 저감되었다.

3) 냉각수제어에 의한 HC와 CO의 저감은 엔진시동 후 시간이 지남에 따라 RPM 및 BMEP가 증가함에 따라 큰 효과를 보였다.

4) 냉 시동 시 HC와 CO의 저감은 ISAI와 냉각수제어를 동시에 적용함으로써 가장 큰 저감효과를 볼 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 1998년도 및 1999년도 한국과학기술재단의 핵심전문 연구과제 (981-1212-036-2) 연구비에 의하여 수행된 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) K. Kollmann et al., "Concepts for Ultra Low Emission Vehicle," SAE Paper 940469, 1994.
- 2) P. Degobert, "Automobiles and Pollution," SAE, Inc., pp.101~161, 1995.
- 3) K. Kollmann et al., "Secondary Air Injection with a New Developed Electrical Blower for Reduced Exhaust Emissions," SAE Paper 940472, 1994.
- 4) E. Achleitner et al., "Electronic Engine Control System for Gasoline Engines for LEV and ULEV Standards," SAE Paper 950479, 1995.
- 5) D. Eade et al., "Fast Light-Off of Underbody Catalysts Using Exhaust Gas Ignition(EGI)," SAE Paper 952417, 1995.
- 6) 自動車用ガソリンエンジン編集委員會, "自動車用ガソリンエンジン," 山海堂, pp.69~105, 1998.
- 7) Edward W. Kaiser et al., "Effect of Engine Operating Parameters on HC Oxidation in the Exhaust Port and Runner of a SI Engine," SAE Paper 950159, 1995.
- 8) M.J. Clough, "Precision Cooling of a Four Valve per Cylinder Engine," SAE Paper 931123, 1993.
- 9) P. Guillemot and B. Gatellier, "The Influence of Coolant Temperature on Unburned HC Emissions from Spark Ignition Engine," SAE Paper 941962, 1994.
- 10) Wai K. Cheng et al., "An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in SI Engine," SAE Paper 932708, 1993.
- 11) S. Russ et al., "Effect of Cylinder Head and Engine Block Temperature on HC Emissions from a Single Cylinder Spark Ignition Engine," 952536, 1995.