

# 합성가스를 이용한 가솔린엔진 아이들 성능 개선에 관한 연구

송춘섭\* · 김창기\*\* · 강건용\*\* · 조용석\*

## A Study on Idle Performance Improvements for a Gasoline Engine with the Syngas Assist

Chun-Sub Song\*, Chang-Gi Kim\*\*, Kern-Young Kang\*\*, Young-Seok Cho\*

### ABSTRACT

Recently, fuel reforming technology for the fuel cell vehicle has been applied to internal combustion engines, with various purpose. Syngas which is reformed from fossil fuel has hydrogen as a major component. It has better effort in combustion characteristics such as wide flammability and high speed flame propagation.

In this study, syngas was added to a gasoline engine for the improvement of combustion stability and exhaust emission in idle state. Combustion stability, exhaust emissions, fuel consumption and exhaust gas temperature were measured to investigate the effects of syngas addition on idle performance. Results showed that syngas has ability to extend lean operation limit and ignition retard range, with dramatical reduction of engine out emissions.

**Key Words :** Syngas, Fuel reforming, Exhaust emissions, Exhaust gas temperature, Idle stability, Specific fuel consumption

### 기 호 설 명

COVimep	Coefficient Of Variation	LHV	Low Heating Value
$\lambda$	Excess air ratio	IGA	Ignition Angle

## 1. 서 론

향후 10~20 년간은 저유가 시대의 마감과 더욱 강화되어가는 환경규제로 인해 연소 및 동력 기술에 커다란 변혁기가 될 것으로 예상하고 있다. 또한 후처리장치를 통한 배출가스 저감기술은 점차 한계를 나타냄에 따라 강화되는 환경규제에 대응하기 위해 높은 효율성과 원천적으로 배출가스가 적은 대체에너지의 개발이 활발히 진행 중에 있다. 현재 대부분의 OECD 국가에서는

수소를 그 대안으로 인식하고 있으며 수소 생산 및 이용기술에 대해 장기적이고 체계적인 프로그램을 국가가 주도하여 진행시켜오고 있다. 수소 연료는 석탄, 석유, 천연가스는 물론 재생이 가능한 에너지원으로부터 얻을 수 있고 유해배기가스가 거의 배출되지 않는 궁극적인 미래에너지로 평가받고 있다. 즉, 수소는 지구상 어디에서나 얻을 수 있고 열 및 동력을 발생시키는 화학반응을 거치면서 원리적으로는 물(H<sub>2</sub>O) 이외에는 배출하지 않는다.

그러나 각국에서 수소에너지와 관련된 기술개발에 정책적인 의지가 높음에도 불구하고 최대 수요대상인 수소연료자동차가 실질적으로 보급되기까지는 상당한 시간이 소요될 것으로 분석되고

\* 국민대학교 자동차전문대학원

\*\* 한국기계연구원

† 연락처, qaune@kookmin.ac.kr

있다. 이는 기술적인 측면뿐만 아니라 수소의 생산, 저장, 이동에서 생성되는 CO<sub>2</sub> 배출량, 그리고 수소공급 인프라 구축에 소요되는 막대한 비용 등과 같은 어려운 문제점이 상용화를 지연시키기 때문이다.[1-3] 연료 인프라 구축문제를 해결하기 위해 가솔린, 디젤과 같은 기존의 자동차연료를 사용하여 수소를 함유한 혼합가스(합성가스)를 생산하는 연료개질(fuel reforming) 기술에 대해서도 연구가 활발히 이루어지고 있지만[3,4] 연료전지자동차에 탑재시키기에는 아직 많은 문제점이 남아있는 상태이다.

한편, 최근 들어서는 연료전지자동차용으로 지금까지 개발되어 왔던 개질 기술을 기존의 연소기기 또는 엔진에 접목시킨 새로운 기술들이 다수 발표되고 있다.[5-8] 기존의 자동차 연료에 수소를 첨가할 경우 수소의 넓은 가연범위 특성과 안정되고 빠른 연소특성을 바탕으로 연소 및 배기성능을 상당히 개선할 수 있다는 것은 이미 많은 연구를 통해 밝혀진 바 있다.[9,10] 수소가 함유된 합성가스를 사용할 경우에도 유사한 효과를 얻을 수 있고 특히, 수소저장과 인프라 문제를 해결할 수 있기 때문에 연료개질기술의 발달과 더불어 합성가스의 엔진적용은 그 범위를 점차 넓혀갈 것으로 예상하고 있다.

합성가스의 엔진적용방법에는 여러 가지가 있으나 최근 주목을 받고 있는 분야 중 하나는 냉간운전상태, 즉, 냉간시동 및 냉간이들 상태에서 배출되는 유해배기가스를 합성가스를 이용하여 획기적으로 저감시키는 분야이다. 냉간상태에서 배출되는 유해배기가스는 촉매의 미활성화로 인해 정화되지 않고 그대로 배출됨에 따라 배기규제 만족에 최대의 걸림돌로 작용하고 있다. 본 연구에서는 합성가스를 냉간운전상태에 직접 적용하기에 앞서 최적의 합성가스의 활용방안을 폭넓게 도출하고자 우선 아이들 운전영역을 대상으로 합성가스의 적용효과를 파악하였다. 실험에서는 합성가스의 첨가량을 포함한 여러 가지 엔진 변수에 대하여 연소특성, 배기특성, 그리고 배기가스온도 등을 측정함으로써 냉간운전상태에서 필요로 하는 주요인자들의 특성을 파악하여 향후 냉간시동 및 아이들 성능을 개선하는데 활용하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에는 승용차용 가솔린 엔진인 1975cc, 4실린더 DOHC 엔진을 사용하였으며 실험 대상 엔진의 제원을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Test engine Specifications

Item	Specifications
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Compression ratio	10.1
Idle speed	700 ± 100 rpm
Spark timing	BTDC8±5°
Intake Timing	BTDC9° /ABDC43°
Exhaust Timing	BBDC50° /ATDC10°
Valve overlap	15°

Table 2. Test device specifications

Content	Device
engine control	SAM2000(SIEMENS)
emission analyzer	HORIBA MEXA-8120
cylinder press.	KISTLER 6117BFD-17
DAQ system	NI SCXI-1000
lambda sensor	ETAS lambda sensor
MFC	A&D GMC-1000
digital scale	

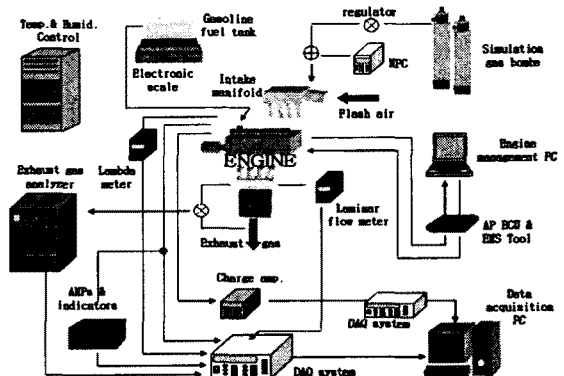


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 1은 실험장치 개략도를 나타내며 Table 2은 각 실험장치의 제원을 나타낸다. 실험에는 합성가스의 공급편의를 위해 개질장치를 통해 생산되는 합성가스를 직접 사용하지 않았으며 합성가스와 유사한 성분조성의 모사가스(simulation

gas)를 사용하였다. 모사된 합성가스(이하 합성 가스)는  $H_2/CO/N_2$ 의 비가 26.8/22.8/50.4로서 가솔린을 개질할 경우 얻을 수 있는 성분비와 유사하다. 여기서 개질할 때 실제 발생할 수 있는  $H_2O$ ,  $CO_2$ , HCs 등은 그 양이 작아 무시하였다.

합성가스의 공급유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 조절하였으며 합성가스 질량유량 측정의 정확성을 위해 전자저울을 사용하여 전 유량범위에 대해 검증을 하였다. 대부분의 엔진제어는 EMS tool(SAM2000)을 사용하여 이루어졌으며 엔진의 주요부분에 대해 압력과 온도를 측정하여 엔진상태를 파악하였다. 배기가스 성분측정을 포함한 모든 측정 데이터는 데이터 획득장치를 통하여 PC에 저장되도록 하였다.

## 2.2 실험 조건 및 방법

실험에 사용된 엔진운전조건은 냉각수온도가  $80 \pm 2^\circ C$ 인 워밍업 이후의 열간아이들로서 배기규제모드 중 가장 유해배기가스가 많이 방출되는 냉간아이들을 모사하기 위한 조건이다. 냉간아이들은 실험조건 유지와 반복이 매우 어려운 천이영역에 따라 다양한 접근을 시도하기에는 많은 시간적 제약이 따른다. 두 조건은 연소실온도에 있어서 다소 차이가 있지만 열간아이들에서의 경향은 냉간상태에서도 유지될 것으로 판단된다.

실험변수는 합성가스의 가솔린 연료에 대한 첨가비, 공연비, 점화시기로서 각각을 연소안정성이 보장되는 영역까지 변화시키면서 실험을 실시하였다. 각 실험변수의 변화에 따라 THC,  $NO_x$ , CO 배기가스 배출량, 연소안정성, 배기가스온도, 공연비, 연료소모량 등을 측정하였으며 냉간아이들 상태에서 갖추어야 할 여러 가지 필요조건들을 토대로 최적운전조건을 찾아나갔다. 여기서 연소안정성이 보장되는 영역의 판단기준은 임의적 제어변경이 실시되지 않은 가솔린 베이스엔진의 아이들 연소안정성( $COV_{imep}$ )으로 정의하였다.

MFC를 통해 유량이 조절된 합성가스는 엔진스로틀 바디 이전에 흡입공기와 혼합시킴으로써 충분히 균일한 상태로 엔진에 공급될 수 있도록 하였다. 합성가스 첨가비는 전체 공급연료의 저위발열량에 대한 합성가스의 저위발열량의 비로서 다음의 식으로 정의된다.

SYNGAS ADDITIVE RATIO (%)

$$= \frac{LHV_{syngas} \times m_{syngas}}{LHV_{syngas} \times m_{syngas} + LHV_{gasoline} \times m_{gasoline}} \times 100$$

연료소모량의 계산은 측정된 가솔린 질량유량과 합성가스의 질량유량을 가솔린 질량유량으로 변환하여 합산하여 이루어졌다. 합성가스 질량유량을 가솔린 질량유량으로 변환하는 계산에 있어서 가솔린연료가 개질과정 중에 약 20%의 저위발열량이 손실되는 것으로 고려하였다.

각 실험변수를 포함한 실험조건을 Table 4에 나타내었다. 각 조건에서의 데이터 취득은 정상상태 도달 후 약 5분이 경과한 다음 30초간 측정하여 평균값을 취하였고 최소 3회 이상 실시되었다. 연소안정성을 평가하기 위한  $COV_{imep}$  측정은 100 사이클에 대하여 이루어졌으며 각 조건에 대해 5회 이상 실시되었다.

Table 3. Experimental Condition

engine speed(rpm)	700 rpm
ambient temp.	$25 \pm 3^\circ C$
ambient humidity	$50 \pm 10\%$
simulation gas fraction	0%, 10%, 25%
coolant and oil temp.	$80 \pm 2^\circ C$
Lambda	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4
ignition timing	$7^\circ, 2^\circ, -3^\circ, -8^\circ, -13^\circ, -18^\circ$ (BTDC)
fuel	Simulated syngas and Gasoline

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 연소안정성( $COV_{imep}$ )

Fig. 2은 합성가스 첨가비에 따른 연소안정성의 변화를 점화시기와 공연비의 변화에 대해 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타낸 값은 비교의 편의를 위해 임의적 제어변경이 이루어지지 않은 가솔린 베이스엔진의 운전조건(합성가스 첨가비 0%,  $\lambda = 1.0$ , IGA = BTDC  $7^\circ$ )을 기준으로 상대 비교한 것이며, 이후 배기가스 온도를 제외한 다른 결과의 비교에서도 동일한 기준조건을 적용하였다. 결과에서 나타난 바와 같이 합성가스의 첨가량이 많아질수록 전체적으로 연소가 안정적으로 이루어짐을 알 수 있으며 25%일 경우 최대 60%까지 개선될 수 있음을 확인 할 수 있다. 합성가스 첨가비 0%(=가솔린100%)에서는 희박함에 따라 매우 급속하게 연소안정성이 악화되지만 합성가스를 첨가할수록 그 경향은 점차 줄어든다. 합성가스의 첨가는 희박가연한계를 확장시켜 합성가스 첨가비 10%에서는  $\lambda=1.2$ 까지, 그리고 25%에서는  $\lambda=1.4$ 까지 아이들 운행이 가능하다. 이것은 합성가스에 함유된 수소의 넓은 가연범위 특성과 빠르고 안정된 연소특성에 기인하는 것으로 풀이될 수 있으며 합성가스를 많이 첨

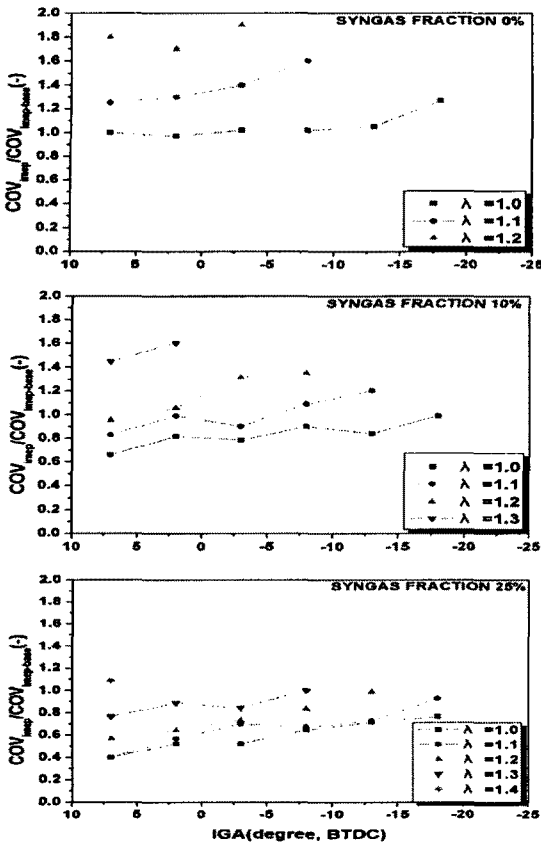


Fig. 2 Comparison of COV<sub>imep</sub> with the various syngas fractions

가할수록 그 효과는 점차 확대된다는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다.

점화시기의 영향은 상대적으로 크지는 않지만 대체적으로 지각할수록 연소안정성이 악화되는 경향을 나타내었다. 점화시기는 배기가스 배출량과 촉매활성화 기간 단축에 큰 영향을 미치는 주요한 변수이기 때문에 회박영역에서도 가능한 한 지각시킬 수 있도록 합성가스의 첨가를 통해 연소안정성을 확보해 두는 것이 중요하다.

### 3.2 배기가스 온도 측정결과

촉매전단에서 측정된 배기가스 온도는 냉간운행 초기의 촉매활성화기간에 영향을 미치는 주요한 변수로서 높을수록 그 기간이 단축된다. 냉간 운전조건에서 배출되는 유해배기가스가 특히 문제가 되는 것은 촉매 미활성화에 기인하기 때문에 이를 저감시키기 위해서는 촉매 활성화기간을 단축시키는 것이 필수적이다.

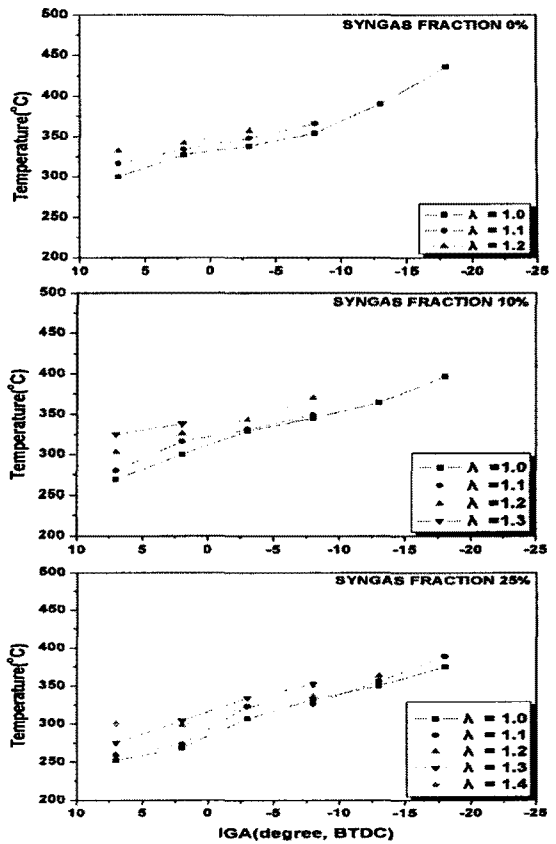


Fig. 3 Comparison of exhaust gas temperature with the various syngas fractions

Fig. 3은 실험조건에 따른 배기가스의 온도를 나타내고 있는 곡선으로 합성가스 첨가량이 증가할수록 전체적으로 배기가스 온도가 감소함을 보여준다. 이는 합성가스에 포함되어 있는 수소의 빠른 연소 특성으로 인해 실린더 내의 연소가 상대적으로 일찍 종료되기 때문이다. 동일한 합성가스 첨가비에 대해서는 공연비가 회박한 영역으로 갈수록 배기가스의 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 일반적으로 회박연소를 적용할 경우 배기가스온도가 감소하는 경향이 있지만 아이들 운전영역에서는 회박연소에 의한 느린 화염전파 속도의 영향이 더 큰 것으로 보인다.

점화시기의 영향은 지각시킬수록 배기가스 온도가 빠르게 상승하는 전형적인 특성을 잘 나타내고 있다. 비록 합성가스 첨가비 0%에서 가장 높은 배기가스 온도를 얻을 수 있으나 연소안정성 확보가 우선이므로 합성가스를 첨가하여 점화시기를 안정적으로 지각시킬 수 있도록 한 다음 배기가스 온도상승을 유도하여야 한다.

3.3 배기가스 농도 측정결과

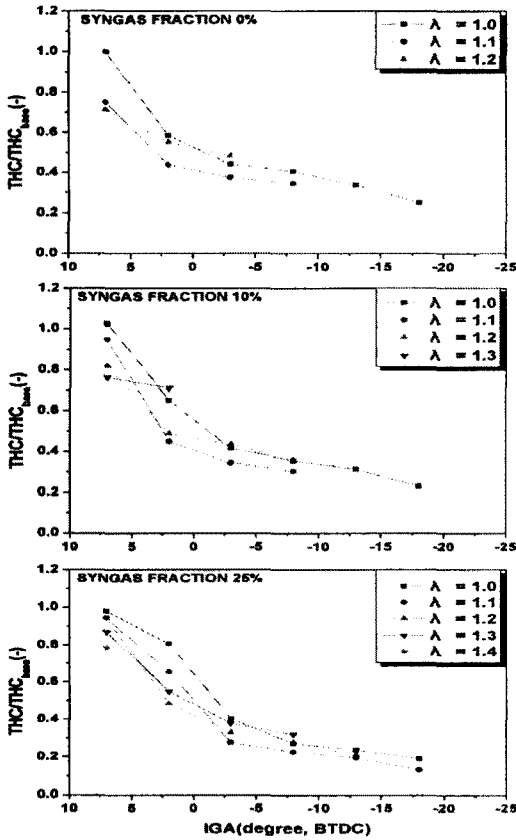


Fig. 4 Comparison of THC with the various syngas fractions

유해배기가스로 대표되는 THC, NOx, CO는 일반적으로 공연비와 점화시기에 민감하게 반응하며 동시저감을 이루기 위해서는 안정된 회박연소가 필수적이다. 합성가스를 아이들영역에 적용하고자한 이유도 수소의 도움으로 회박가연한계를 높여 유해배기가스를 근원적으로 저감시키기 위함이다.

THC는 연소안정성이 보장된다면 회박할수록 높은 연소효율에 의해, 그리고 점화시기가 지각될수록 틈새체적에 축적되어 있던 THC의 후연소에 의해 각각 저감되는 경향을 가지고 있다. Fig. 4에 나타낸 THC의 결과를 살펴보면 합성가스의 첨가비를 높임에 따라 THC의 최저값들이 점차 낮아지고 있는데 이는 합성가스에 의해 회박연소와 점화시기 지각을 안정적으로 확보할 수 있었기 때문이다. 반면, 합성가스 첨가비 0%의 경우 회박연소를 하거나 점화시기 지각을 하더라도 연소가 불안정한 조건이면 THC의 큰 저감은 기대할 수 없다. 합성가스는 탄화수소계의 성분

이 없어 합성가스의 첨가에 따른 THC 저감효과도 기대할 수 있으나 25%까지 첨가된 본 연구에서는 그 영향을 확실하게 구분하기가 어렵다.

NOx의 변화량을 나타내는 Fig. 5는 다소 특이한 경향을 보이고 있다. 우선, 합성가스를 첨가할수록 NOx가 저감되는 것으로 나타났는데 이것은 합성가스 자체가 부분연소된 상태로서 EGR과 유사한 효과를 가지고 있기 때문으로 해석된다. 점화시기의 지각은 일반적으로 실린더 내 최고 연소온도를 낮춤으로써 NOx 배출량을 감소시키는 효과를 가지고 있지만 실험결과에서는 반대의 경향을 보이고 있다. 아이들에서 점화시기 지각에 따른 NOx의 증가는 연료소비율의 증가 (Fig. 7), 즉 부하의 증가에 그 원인이 있는 것으로 추측되며 아이들에서는 점화시기 지각에 의한 연소최고온도의 영향이 상대적으로 작기 때문으로 추측된다. 공연비의 영향은 회박연소를 할수록 NOx가 저감되는 것으로 나타났다. 따라서 아이들 상태에서 NOx를 저감시키기 위해서는 합성가스의 첨가량을 늘리고 회박연소를 적용하는 반면 과도하게 점화시기를 지각시키지 않는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

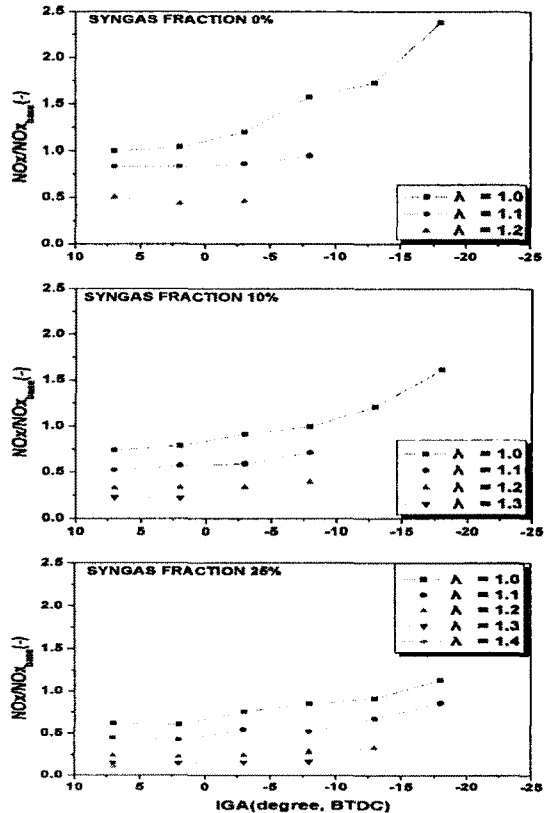


Fig. 5 Comparison of NOx with the various syngas fractions

아이들 조건에서의 CO 배출특성은 Fig. 6에서와 같이 이론공연비 연소와 희박연소의 영향을 극명하게 보여주고 있다. 희박정도에 따라서는 큰 변화를 보여주고 있지 않지만 희박연소가 적용되는 순간부터 CO 배출량이 급격하게 감소되어 계속 유지하고 있음을 알 수 있다. 점화시기의 영향은 THC와 유사하게 지각될수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면, 합성가스 첨가비가 높을수록 CO 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 합성가스의 주성분 중 하나가 CO로 이루어져 있기 때문이다. THC 및 NOx와는 반대로 CO는 합성가스 첨가에 따라 배출되는 최저값이 올라가지만 우려할 수준은 아니며 합성가스 첨가비가 100%에 도달하더라도 점화시기 지각으로 충분히 저감시킬 수 있으리라 판단된다.

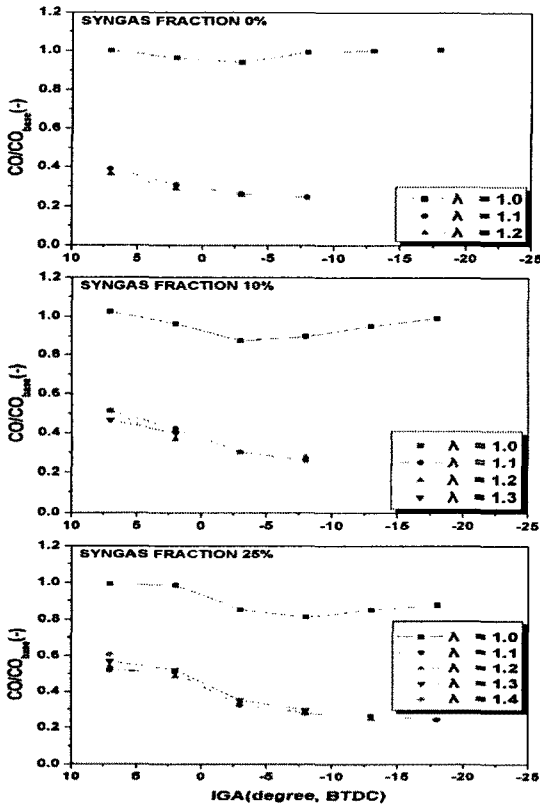


Fig. 6 Comparison of CO with the various syngas fractions

3.4 연료소모량

Fig. 7은 각 실험조건에서의 연료소모량을 나타내는 것으로서, 합성가스가 생산될 때 가솔린 저위발열량의 20%가 손실된다는 가정이 고려된

것이다. 손실의 원인으로는 가솔린 개질과정 중 부분산화과정에서 화학에너지 손실과 개질장치 자체의 전력소비가 있으며 본 연구에서는 각각 15%와 5%를 적용하였다.

연료소모량 결과를 보면 동일 공연비와 점화시기에서 합성가스가 첨가될수록 조금씩 개선되는 것을 확인할 수 있는데 이는 수소의 빠른 연소속도에 의해 효율적으로 에너지가 활용되기 때문이다. 그러나 합성가스를 첨가할 경우 배기가스 온도가 많이 감소하므로 점화시기를 지각시켜야만 하며 이때는 에너지의 비효율적 활용으로 연료소모량이 다시 증가되게 된다.

워밍업이 완료된 이후의 아이들 운전조건에서는 연료소모량이 매우 중요한 인자가 될 것임은 분명하다. 그러나 냉간상태에서는 촉매가 활성화되는데 필요한 시간이 20초 이내로 짧기 때문에 냉간아이들에서 배기가스를 저감시키기 위해 이루어지는 연료소모량의 증가는 전체 연비에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 합성가스를 냉간상태에 적용하여 유해배기가스를 저감시키는 과정에서 연료소모량이 다소 증가하더라도 이것이 큰 제약조건으로 작용되지는 않는다.

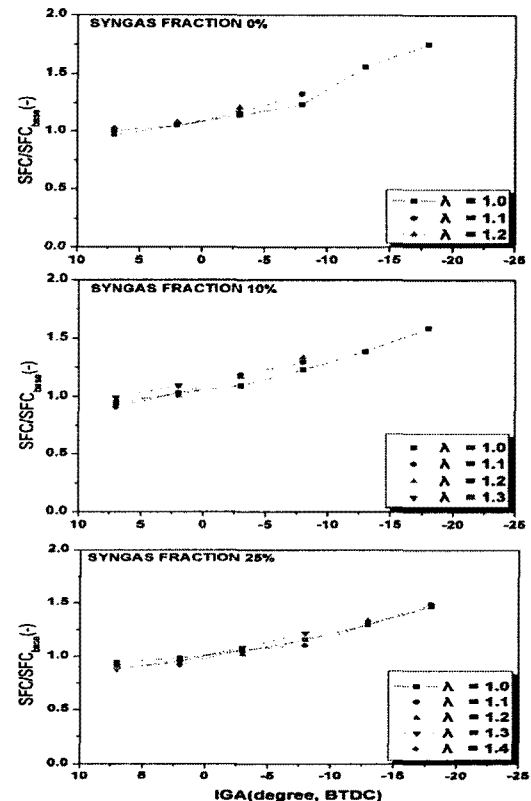


Fig. 7 Comparison of SFC with the various syngas fractions

#### 4. 결론

아이들 운전조건에서 연소안정성을 확보하고 유해배기가스를 저감하고자 수소가 함유된 합성가스를 가솔린 연료에 첨가하였으며 합성가스 첨가비, 공연비, 점화시기 변화에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 합성가스의 첨가는 수소의 우수한 연소특성으로 인해 희박가연한계를 확장시키고 점화시기를 충분히 지각하더라도 연소안정성을 확보할 수 있도록 하였다.
- 2) 배기가스 온도는 합성가스 첨가비가 높을수록 빠른 연소특성에 의해 감소되는 경향을 나타내었지만 점화시기 지각을 통해 충분히 만회할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 합성가스 첨가비를 높일수록 희박연소와 점화시기 지각 범위가 확대됨에 따라 THC를 더 낮은 수준으로 저감시킬 수 있었으며, NO<sub>x</sub>는 합성가스가 가지고 있는 희석효과에 의해 계속 감소하는 경향을 나타내었다. CO는 합성가스의 연료성분에 의해 합성가스를 첨가할수록 희박영역에서 증가하는 특성을 보였으나 점화시기 지각으로 충분히 감소되는 것으로 나타났다..
- 4) 합성가스를 이용하여 유해배기가스를 획기적으로 저감시키기 위해서는 충분한 점화시기 지각이 필요하며 이때 연료소모량이 다소 증가하지만 냉간상태에 적용할 경우 그 적용기간이 짧기 때문에 문제가 되지는 않는다.
- 5) 합성가스 첨가비, 공연비, 점화시기에 따라 배기가스 온도특성과 THC, NO<sub>x</sub> CO의 배출특성이 다르게 나타나기 때문에 trade-off를 통하여 최적조건을 찾아야 한다.
- 6) 가솔린연료만을 사용한 기준조건( $\lambda=1.0$ , IGA BTDC 7°)과 비교했을 때, 합성가스를 25% 첨가할 경우 아이들 상태의 THC, NO<sub>x</sub>, CO을 동시에 50% 이상 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 후 기

이 연구는 '미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발' 과제의 일부로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Norbert Metz (BMW Group), "Hydrogen-The Alternative Fuel for Future Powertrain, FISITA 2002, World Automotive Congress,

- Helsinki 4, June
2. Jensen MW, et al, "The Ultimate Challenge: developing an infrastructure for fuel cell vehicles", Environment (2000), Vol. 42, No. 7, 10-22
3. Seth Dunn, "Hydrogen futures: towards a sustainable energy system", Int'l J. of Hydrogen Energy 27 (2002), 235-264
4. 이 기준 외, "전기화학엔진의 구성 및 응용", 기계저널, Vol. 42, No. 9, pp. 50-54
5. L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich and N. Alexeev, "Experimental Evaluation of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer" SAE paper NO.2000-01-2206
6. Dale Andreatta, Fobert W. Dibble, "An Experimental Study of Air-Reformed Natural Gas in Spark-Ignited Engines" SAE paper NO. 960852.
7. John E. Kirwan, Ather A. Quader and M. James Grieve, "Fast Start-Up On-Board Gasoline Feformer for Near Zero Emissions in Spark-Ignition Engines" SAE paper NO. 2002-01-1011
8. Kristine Drobot Isherwood, Jan-Roger Linna and Peter J. Loftus, "Using On-board Fuel Reforming by Partial Oxidation to Improve SI Engine Cold-Start Performance and Emissions" SAE paper NO. 980939
9. J. Scott MacDonald, "Evaluation of the Hydrogen Supplemented Fuel Concept with an Experimental Multicylinder Engine" SAE paper NO. 760101
10. Per Tunestal, Magnus Christensen, Patrik Einewall, Tobias Andersson, Bengt Johansson, "Hydrogen Addition FOR Improved Lean Burn Capability of Slow and Fast Burning Natural Gas Combustion Chambers" SAE paper NO. 2002-01-2686