Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 3, pp.94-101 (2008)

Copyright © 2008 KSAE
1225-6382/2008/093-14

가솔린 기관의 냉간시동 조건에서 합성가스 배기분사 기술에 의한 촉매의 활성화 온도 도달시간 단축 및 유해배출물 저감에 관한 연구

조 용 석*[1] · 이 성 욱[1] · 원 상 연[2] · 송 춘 섭[2] · 박 영 준[2]

국민대학교 기계자동차공학부[1] · 국민대학교 자동차공학전문대학원[2]

Study on Shortening Light-Off Time of Three Way Catalyst and Reduction of Harmful Emissions with Exhaust Synthetic Gas Injection(ESGI) Technology during Cold Start of SI Engines

Yong-Seok Cho*[1] · Seang-Wock Lee[1] · Sang-Yeon Won[2] · Chun-Sub Song[2] · Young-Joon Park[2]

[1]*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
[2]*Graduated school of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*
(Received 20 August 2007 / Accepted 26 December 2007)

Abstract : Since regulations of exhaust emissions are continuously reinforced, studies to reduce harmful emissions during the cold start period of SI engines have been carried out very extensively worldwide. During the cold start period, raising the temperature of cold exhaust gas is a key strategy to minimize the light-off time of three way catalysts. In this study, a synthetic gas containing a large amount of hydrogen was injected into the exhaust manifold to raise the exhaust gas temperature and to reduce harmful emissions. The authors tried to evaluate changes in exhaust gas temperature and harmful emissions through controlling the engine operating parameters such as ignition timings and lambda values. Also the authors investigated both combustion stability and reduction of harmful emissions. Experimental results showed that combustion of the synthetic gas in the exhaust manifold is a very effective way for solving the problems of harmful emissions and light-off time. The results also showed that the strategy of retarded ignition timings and increased air/fuel ratios with ESGI is effective in raising exhaust gas temperature and reducing harmful emissions. Futhermore, the results showed that engine operating parameters ought to be controlled to lambda = 1.2 and ignition timing = 0 ~ 3° conditions to reduce harmful emissions effectively under stable combustion conditions.

Key words : Harmful emissions(유해배출물), Exhaust gas temperature(배기가스 온도), Ignition timing(점화시기), Lambda control(공연비 제어), Synthetic gas(합성가스), ESGI(합성가스 배기분사 기술)

1. 서 론

전 세계적으로 청정에너지인 수소를 이용한 다양한 기술이 개발되고 있으며 수소를 포함하고 있는 합성가스(synthetic gas)를 이용한 엔진 전처리 및 후처리 기술에 대한 연구가[1] 다양한 관점에서 시도되고 있다. 합성가스란, 탄화수소계 연료를 개질하였을 때 발생하는 H_2, CO, N_2를 포함하는 혼합가스이다.

본 연구에서는 냉간시동 조건에서 촉매의 활성화 온도 도달시간을 효과적으로 단축시키기 위하여 합성가스를 배기다기관에 분사하여 연소시켰다. 배기다기관은 부족한 O_2 농도, 불규칙한 맥동에 의해 연소 조건 형성이 매우 어렵지만 합성가스에 포함되어 있는 수소의 빠른 연소 속도 및 넓은 가연한계는[2]

*Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

배기가스의 온도를 효과적으로 상승시킬 수 있다.

본 연구에서는 기관 작동 시 공연비 제어를 통해 배기가스에 포함되어 있는 O_2 농도를 조절하여 배기다기관에 분사된 합성가스의 연소 조건을 파악하였으며 합성가스의 분사와 함께 공연비와 점화시기와 같은 기관제어변수를 변경하여 배기가스의 온도 및 유해배출물의 농도 변화를 비교, 분석하였다. 공연비와 점화시기와 같은 기관의 제어변수를 변경하기 때문에 기관의 원활한 작동특성을 파악하기 위하여 연소안정성을 평가하였다. 또한 합성가스의 분사압력은 배기가스 온도 및 유해배출물의 저감에 영향을 미치므로 분사압력을 변화하여 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 기관은 1,979 cc DOHC 가솔린 기관이며, 기관의 주요 제원은 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 기관의 제어로 공연비와 점화시기를 변경하였으며, 연소 안정성 평가를 위해 Kistler 6052B를 사용하여 0.1°CA간격으로 연소실 압력을 측정하였다. 기관의 제어변수의 변경과 합성가스의 연소에 의한 촉매의 활성화 특성을 파악하기 위해 Horiba Exsa-1500을 사용하여 촉매 후단의 THC, CO의 농도 변화를 측정하였으며, k-type 열전대를 통하여 촉매내부의 온도 변화를 측정하였다.

실험에 사용된 합성가스는 공급의 편의를 위해서 가솔린 연료를 개질하여 생산되는 합성가스와 성분비가 유사한 H_2: 26.8%, CO: 22.8%, N_2: 50.4%의 모사가스를 사용하였다. Table 2는 가솔린과 합성가스의 구성성분 중 에너지를 발생할 수 있는 H_2, CO의 물성치를 나타낸다.

Fig. 2는 합성가스 분사노즐과 글로플러그의 장착 상태를 보여주고 있다. 배기다기관에 합성가스를 분사하기 위해 배기다기관 상단으로부터 3.6 cm 아랫부분에 수직방향으로 합성가스 분사노즐을 장착하였으며 1.2 mm 크기의 노즐팁을 사용하였다. 전자식 밸브를 장착하여 기관이 회전하는 동안 합성가스가 지속적으로 공급되도록 하였다. 또한 합성가스와 혼합된 배기가스의 연소를 위해 점화원으로 글로플러그(SRM type, Y722J)를 배기다기관의 중심 부분에 장착하였다.

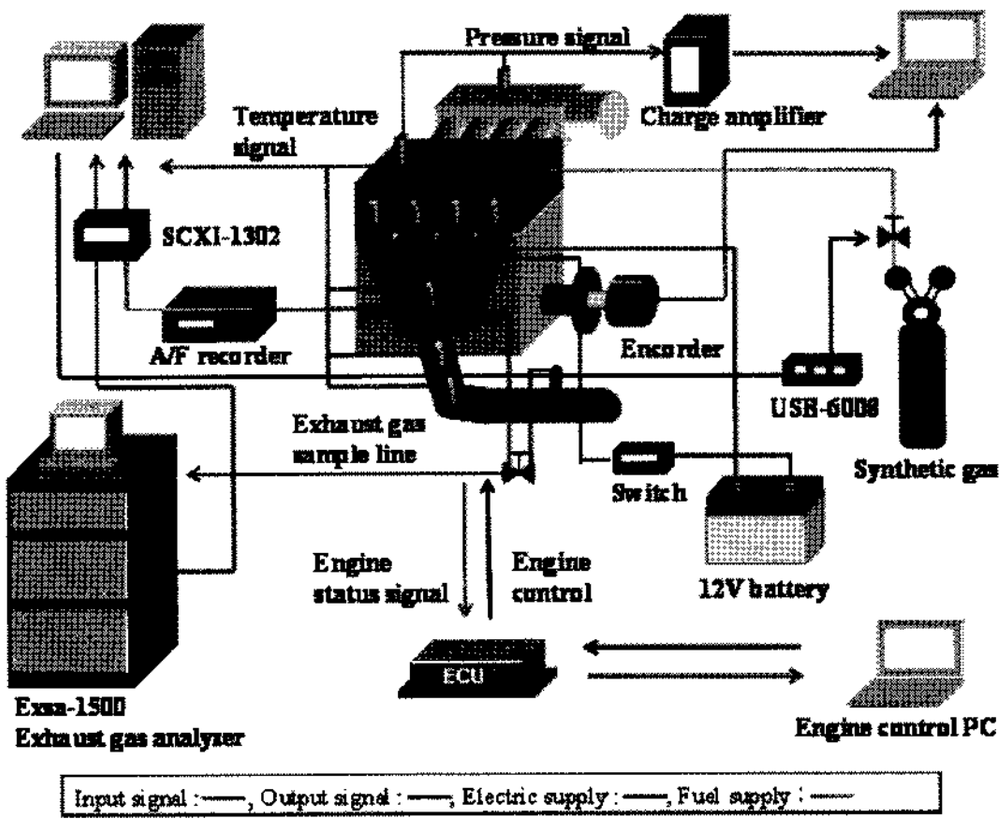

Fig. 1 Schematic diagram of test engine bench

Table 1 Specification of test engine

Items	Specifications
Bore	82 mm
Stroke	93.5 mm
Compression ratio	10.1
Idle speed	700 ± 100 rpm
Intake timing(°CA)	ATDC 11°/ ABDC 59°
Exhaust timing(°CA)	BBDC 42° / ATDC 6°

Table 2 A property of matter for H_2 and CO contained in synthetic gas and gasoline

Property	Gasoline	H_2	CO
Lean limit equivalence ratio in air	0.58	0.51	0.34
Flammability limits (volume %)	1.2 ~ 6	4 ~ 75	12 ~ 74
Laminar flame speed (m/s)	0.37 ~ 0.43	1.9 ~ 2.7	~ 0.4
Spontaneous ignition temperature (°C)	280 ~ 400	574	609
Net energy density (MJ/m^3)	202	10.3	12.6
Quench distance (mm)	~ 2.0	0.64	-
Minimum ignition energy (MJ)	0.24	0.02	-
Lower heating value (MJ/kg)	44.0	120.0	10.1

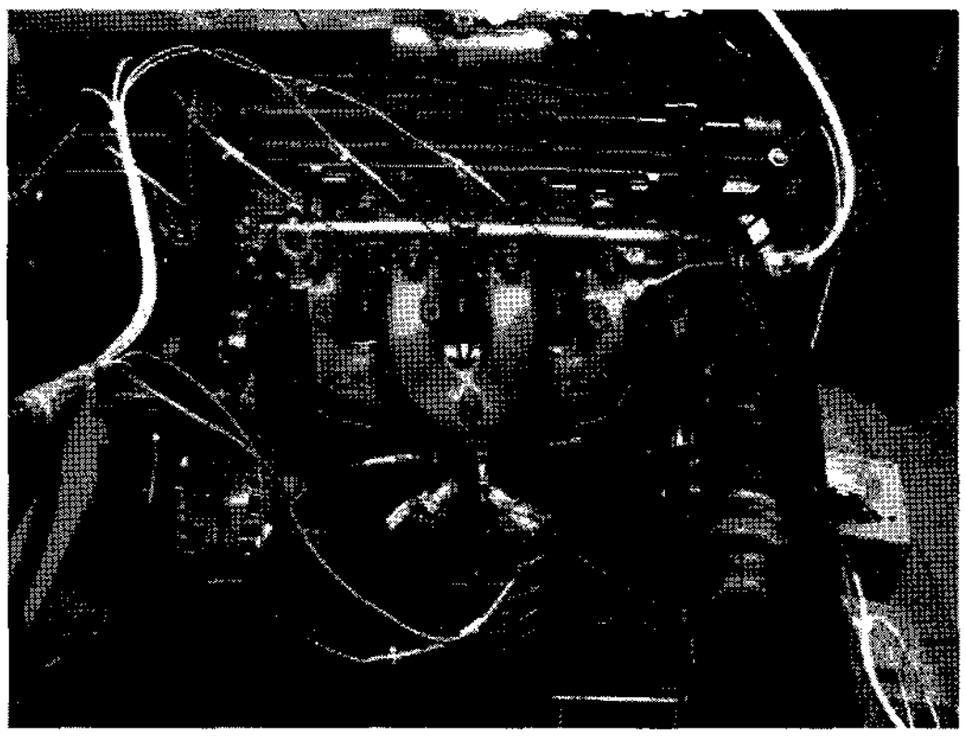

Fig. 2 Experimental setup of nozzle and glow plug

2.2 실험조건 및 방법

본 실험은 냉간시동 및 무부하 조건에서 크랭킹 기간부터 공회전 정상상태에 도달하는 시점까지 이루어졌다. 주변 환경의 영향을 배제하기 위하여 실험 공간 내의 대기 온도, 냉각수 온도, 오일 온도를 냉간시동 조건인 20°C 온도로 유지하였다. 합성가스는 배기가스에 포함되어 있는 O_2와의 혼합을 증가시키기 위해 4번 배기분지관에서 분사되었으며,[3] 합성가스가 포함된 배기가스의 연소를 위한 글로우 플러그는 충분히 예열된 상태에서 실험하였다.

냉간시동 조건에서 배기다기관에 분사된 합성가스의 연소 조건을 파악하기 위해 공연비를 변경하였으며 배기가스의 온도 변화특성을 파악하기 위해 각각의 공연비 조건에서 점화시기를 변경하였다. 또한 합성가스의 분사압력에 따른 배기가스의 온도 변화 및 유해배출물 성분의 농도 변화를 평가하기 위하여 분사압력을 1.5, 2 bar로 변화하여 실험을 수행하였으며 이때의 합성가스는 각각 0.37, 0.47 g/s로 분사되게 된다. 각각의 실험 변수의 제어조건은 Table 3에 정리하였다.

점화시기는 'IGA'로서 명명하였고, 'IGA=0°, λ=1.0, w/o Syn.' 조건을 base 조건으로 설정하였다.

Table 3 Experimental condition

Experimental variables	Value
λ	1.0, 1.1, 1.2
Ignition timing(IGA, BTDC(°CA))	3°, 0°, -3°
Supplied synthetic gas pressure(bar)	w/o, 1.5 bar, 2 bar

또한 연소안정성 평가를 위하여 기관의 시동 후 5초 이후의 60 cycle의 연소실 압력을 측정하였으며 도시평균유효압력의 평균값에 대한 표준편차를 백분율로 표시하여 나타내었다.[4]

$$\mathrm{COV}_{\mathrm{imep}}(\%) = \frac{\sigma_{\mathrm{imep}}}{\mathrm{imep}} \times 100 \tag{1}$$

유해배출물의 저감율은 base 조건의 크랭킹 기간부터 촉매의 활성화 온도 도달시간 동안의 전체 배출량을 기준으로 하여 상대적으로 나타내었다.

$$\text{Efficiency of reduction}(\%) = \left(1 - \frac{\int_{t_1}^{t_2} m_i \, dt}{\int_{t_1}^{t_2} m_{base} \, dt}\right) \times 100 \tag{2}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 연소안정성 평가

Fig. 3은 공연비와 점화시기 변경에 따른 기관의 연소 안정성을 나타낸다. 가솔린 기관의 냉간시동 조건에서 유해배출물의 저감과 촉매의 빠른 활성화를 위해서는 희박한 공연비 제어와 충분히 지각된 점화시기 제어가 요구되지만, Fig. 3을 통해 공연비가 희박할수록, 점화시기가 지각될수록 상대적으로 연소안정성이 악화되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 합성가스를 냉간시동 조건에서 가솔린과 혼합하여 연료로 사용할 경우 희박한 공연비 조건과 지각

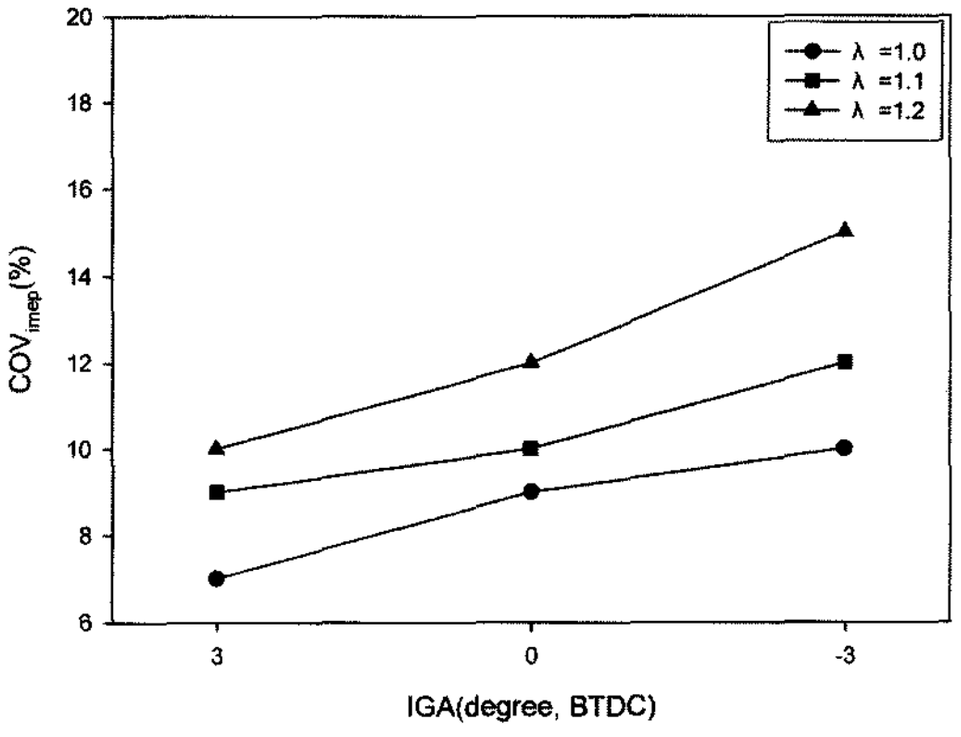

Fig. 3 Evaluation of coefficient of variation in indicated mean effective pressure with changes in ignition timings and air/fuel ratios

된 점화시기 조건에서 보다 안정적인 연소가 가능하다는 이전의 연구보고가 있다.[5] 따라서 보다 안정적인 연소 조건에서 ESGI의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

3.2 합성가스의 연소 환경

본 연구에서는 합성가스를 배기다기기관에 분사하기 이전에, 합성가스의 연소 환경을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. Fig. 4는 냉간시동 조건에서 공연비를 제어하였을 때 O_2의 농도변화를 나타낸다. 이론 공연비 조건(λ=1.0)에서 공회전 정상상태의 배기가스 내의 O_2 농도는 약 4%이고 λ가 1.1, 1.2로 증가함에 따라 배기가스 내의 O_2의 농도는 각각 약 6%, 8%로 증가한다.

배기다기관에 분사된 합성가스의 연소 유무는 배기가스 내에 존재하는 산소 농도, 합성가스 분사량, 불활성 가스의 농도 등에 의해 결정된다.[6] 본 실험에서 배기다기관에 분사된 합성가스의 연소는 λ=1.1 이상의 조건에서 이루어진다.

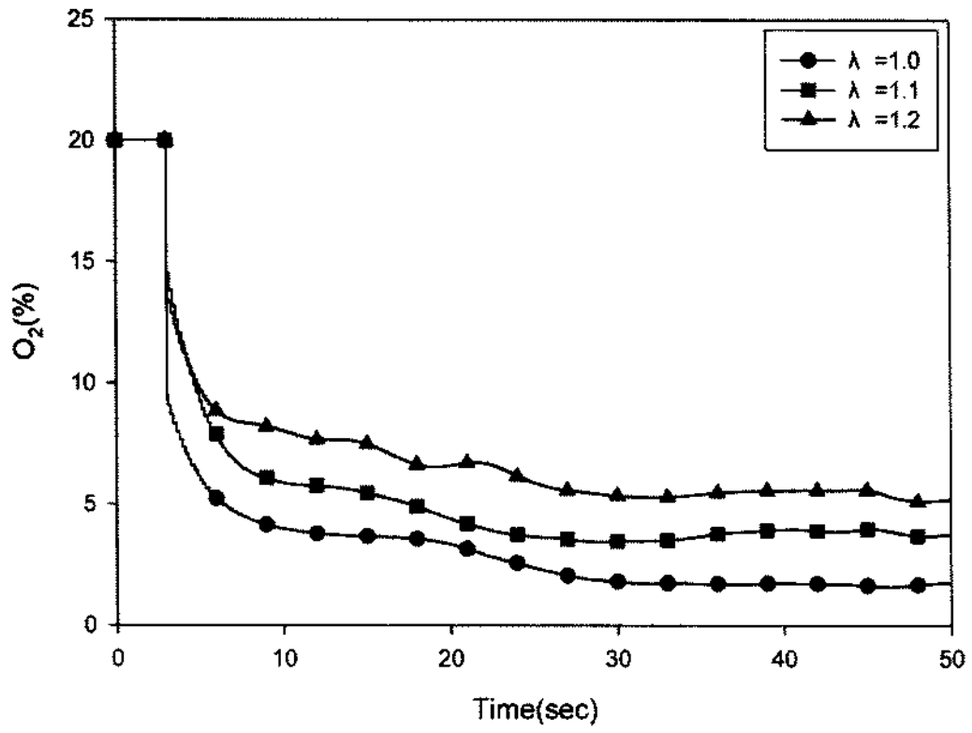

Fig. 4 Variations of O_2 concentration with changes in air/fuel ratios

3.3 배기가스 온도 변화

3.3.1 공연비 제어

공연비 변경과 합성가스 분사에 따른 촉매 내부의 온도변화 특성을 기관 크랭킹 기간부터 40초 동안 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. λ=1.2 조건으로 공연비가 희박해질수록 화염전파 속도가 감소하여 연소실 내부 화염의 지속시간이 증가하기 때문에

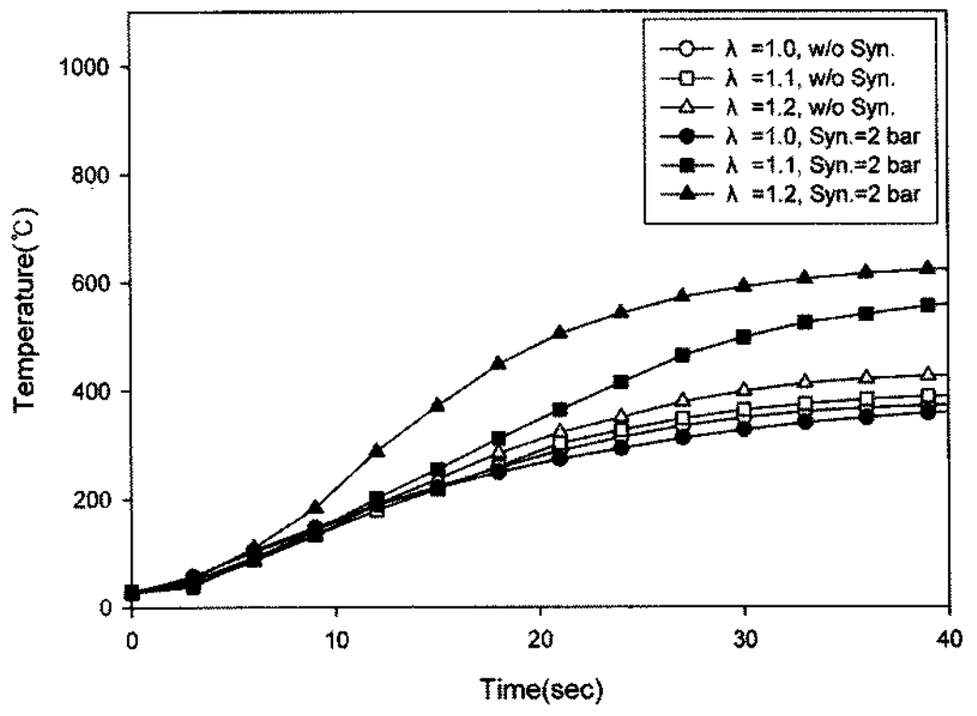

Fig. 5 Variations of temperature in the center of catalyst with changes in air/fuel ratios and synthetic gas injection

배출되는 배기가스의 온도는 상승하게 된다.[7] 또한 합성가스를 분사하였을 경우, 합성가스는 산소농도가 약 4%인 λ=1.0에서는 연소를 일으키지 못하지만, λ=1.1 이상의 조건에서 배기가스에 포함된 산소량의 증가로 배기다기관에 분사된 합성가스가 연소반응을 일으켜 촉매 내부의 온도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 λ=1.2 조건에서 합성가스의 연소가 배기가스의 온도 상승에 가장 효과적이다.

3.3.2 점화시기 제어

점화시기 변경과 합성가스 분사에 따른 촉매 내부의 온도변화 특성을 기관 크랭킹 기간부터 40초 동안 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 앞 절에서 배기가스의 온도 상승이 가장 높게 나타난 λ=1.2 조건을

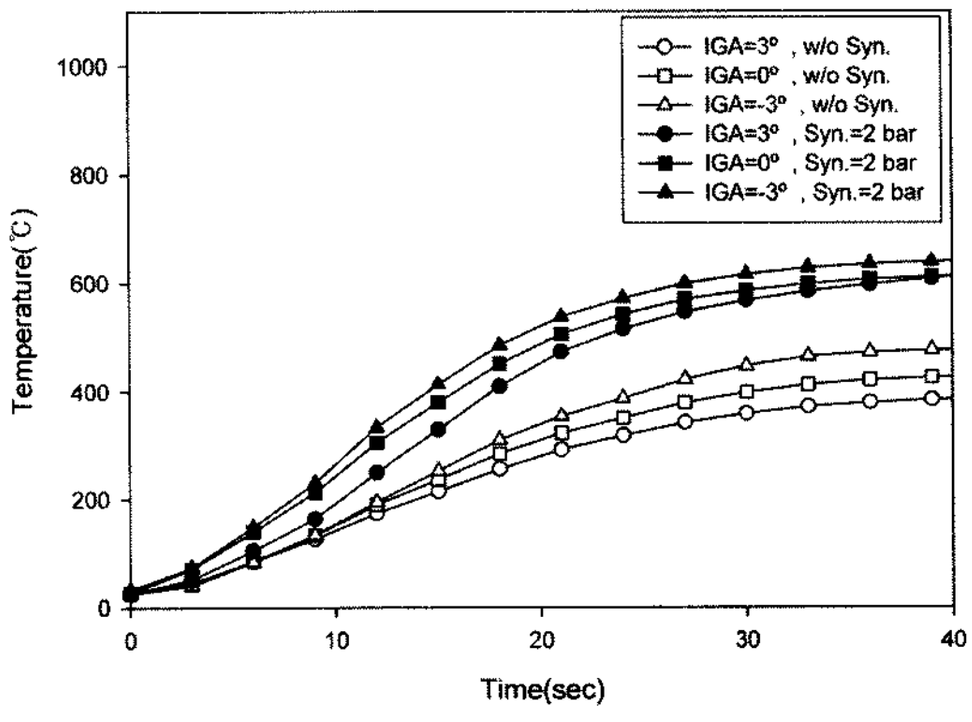

Fig. 6 Variations of temperature in the center of catalyst with changes in ignition timings and synthetic gas injection (λ=1.2)

공통 조건으로 설정하여 촉매 내부의 온도 변화를 측정하였다. IGA가 -3°로 지각됨에 따라 화염의 생성시기가 늦어지게 지고 팽창행정 말기까지 연소가 지속되므로 배기가스의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 IGA=-3°, λ=1.2 조건에서의 합성가스의 연소가 배기가스의 온도 상승에 효과적이며 삼원촉매의 활성화 온도 도달시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다.

3.4 유해배출물 성분의 농도 변화

3.4.1 공연비 제어

Fig. 7은 공연비와 합성가스의 분사 조건을 변화하였을 때 촉매 후단부에서 측정한 CO의 농도 변화를 나타낸다. λ=1.2 조건으로 공연비가 희박해질수록 기관 및 합성가스의 연소효율이 높아지기 때문에 CO의 농도는 감소하는 경향을 보이며 배기다기관에 합성가스를 분사하였을 경우 합성가스에 포함되어 있는 CO로 인해 CO의 농도는 전체적으로 증가한다. 따라서 합성가스의 연소가 이루어지는 λ=1.1 조건에서는 합성가스의 연소에 의한 빠른 촉매 활성화에도 불구하고 합성가스에 포함되어 있는 CO에 의해 CO의 배출량이 base 조건에 비해 증가한다. 그러나 λ=1.2 조건에서 합성가스를 분사하였을 경우, 높은 연소효율과 합성가스 연소에 의한 촉매의 빠른 활성화로 CO 배출량이 급격하게 감소하였으며 그 결과 CO의 배출량이 base 조건에 비해 약 61% 감소한다.

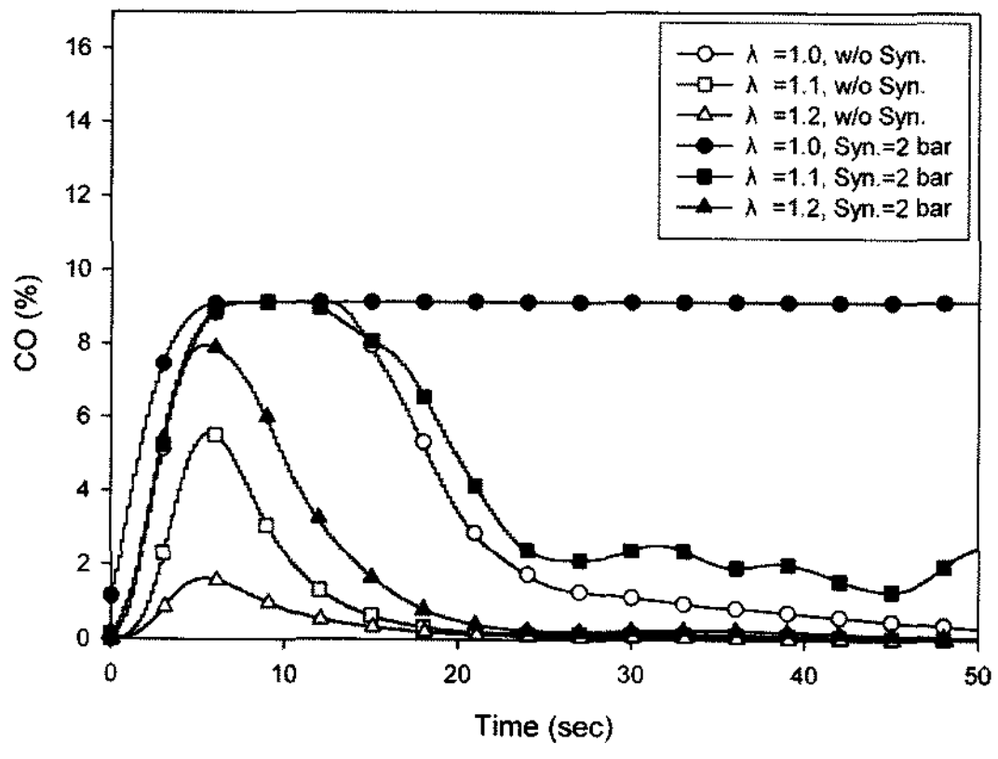

Fig. 7 Variations of CO concentration with changes in air/fuel ratios and synthetic gas injection in the downstream of catalyst

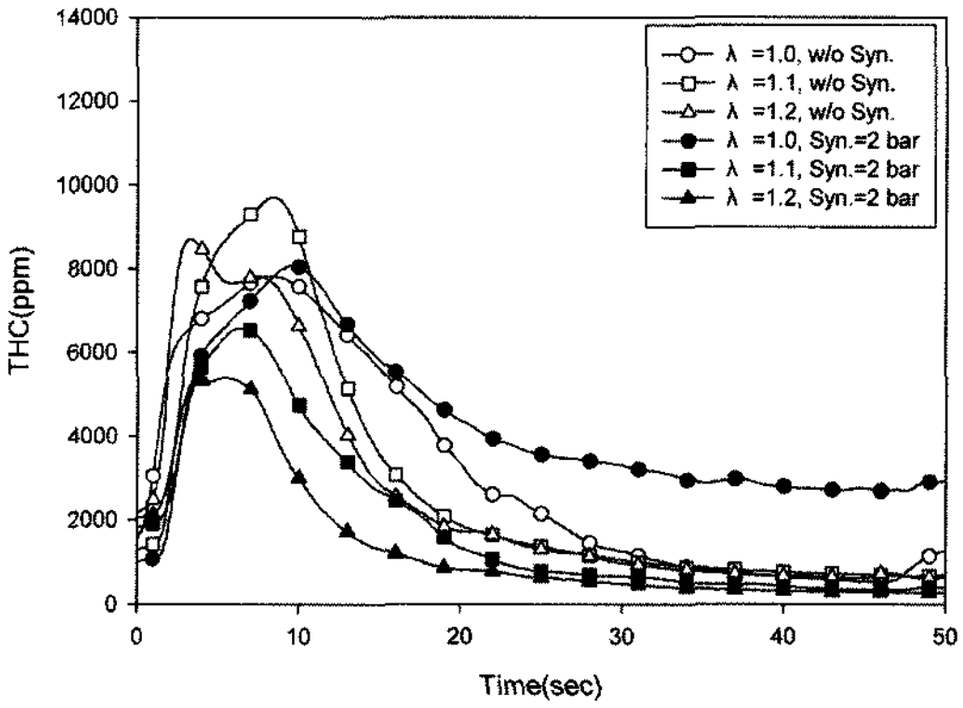

Fig. 8 Variations of THC concentration with changes in air/fuel ratios and synthetic gas injection in the downstream of catalyst

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 제어조건을 적용하여 촉매 후단부에서 측정한 THC의 농도 변화를 나타낸다.

λ=1.2 조건으로 공연비가 희박해질수록 기관 및 합성가스의 연소효율이 높아지기 때문에 THC는 저감되는 경향을 보이며 합성가스를 분사하였을 경우 배기다기관의 합성가스 연소 과정 중에 배기가스에 포함된 THC의 연소로 THC의 농도가 감소한다. 그 결과 λ=1.2 조건에서 합성가스를 분사하였을 경우, THC의 배출량이 base 조건에 비해 약 63% 감소한다. 그러나 합성가스의 연소가 일어나지 않는 λ=1.0 조건에서는 합성가스를 분사하였을 경우 상대적으로 저온인 합성가스가 배기가스의 온도를 감소시키므로 base 조건에 비해 THC의 배출량이 증가한다. 결론적으로 λ=1.2 조건에서 합성가스의 연소는 유해배출물 저감에 가장 효과적이다.

3.4.2 점화시기 제어

점화시기와 합성가스의 분사 조건을 변화하였을 때 촉매 후단부에서 측정한 CO의 농도 변화는 Fig. 9와 같다. 앞 절에서 유해배출물의 저감율이 가장 높았던 λ=1.2 조건을 공통 조건으로 설정하였다. IGA가 -3°로 지각됨에 따라 연소 말기의 높은 화염온도에 의해 CO의 배출량이 감소한다. 합성가스를 배기다기관에 분사하였을 경우 합성가스 내에 포함되어 있는 CO에 의해 CO의 농도는 전체적으로 증가한다. 그러나 λ=1.2 조건에서 합성가스를 분사하였을

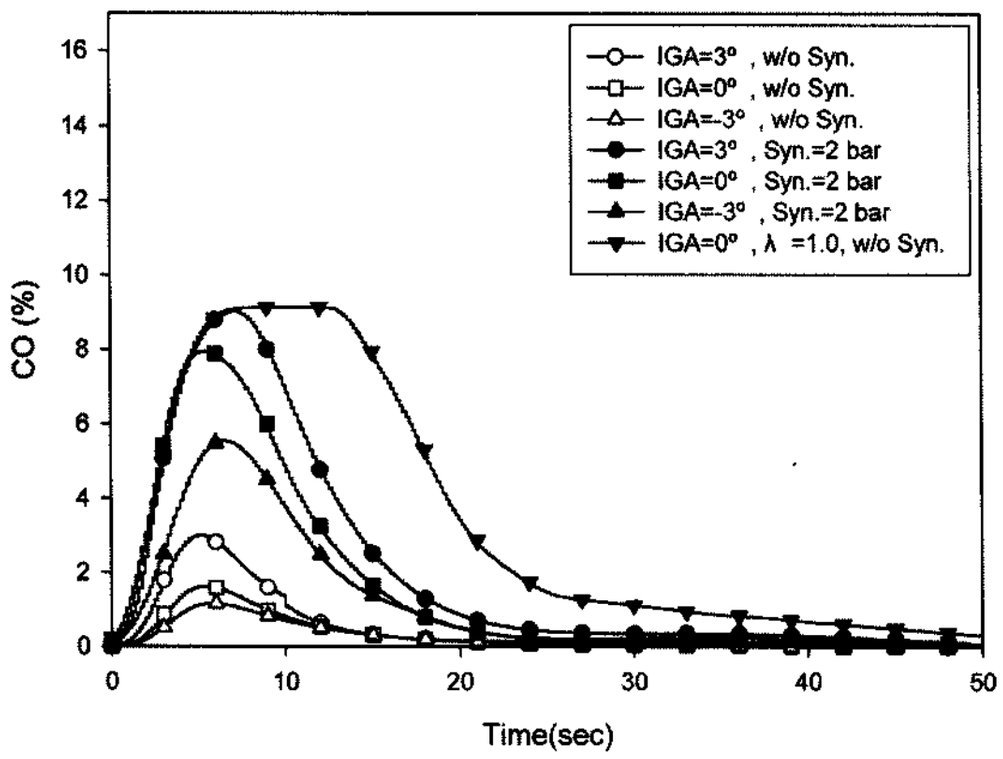

Fig. 9 Variations of CO concentration with changes in ignition timings and synthetic gas injection in the downstream of catalyst (λ=1.2)

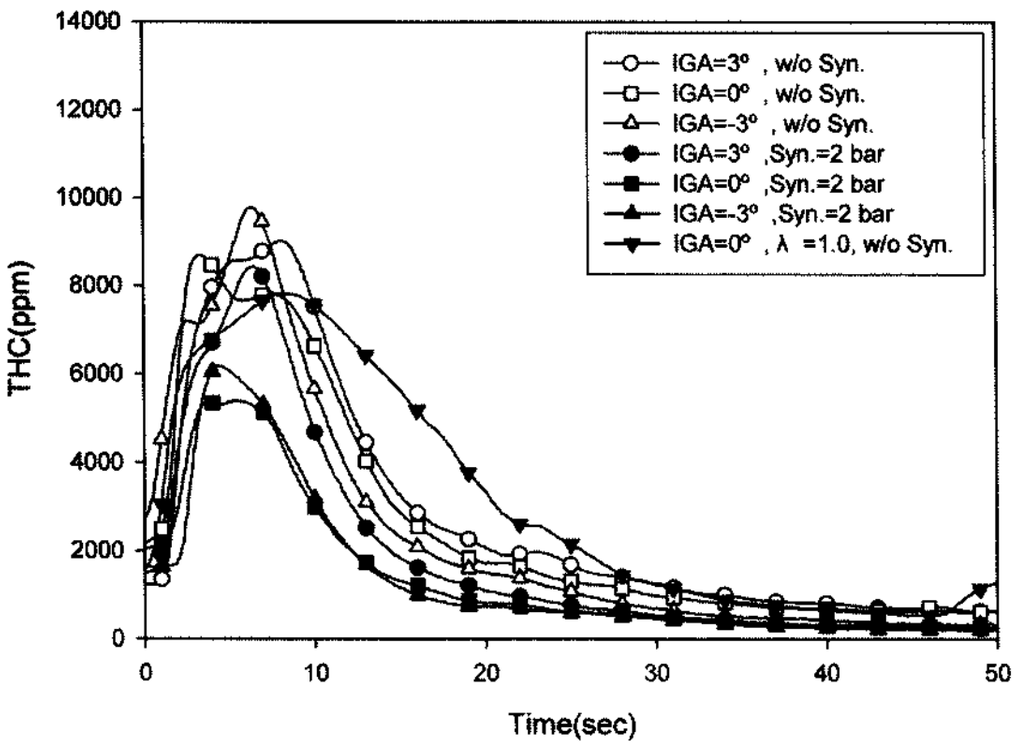

Fig. 10 Variations of THC concentration with changes in ignition timings and synthetic gas injection in the downstream of catalyst (λ=1.2)

경우, 높은 연소효율과 합성가스 연소에 의한 촉매의 빠른 활성화가 가능하며 그 결과 IGA=3°, 0°, -3° 조건에서 합성가스를 분사하였을 경우, CO의 배출량이 base 조건에 비해 약 48, 61, 70% 감소한다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 제어조건을 적용하여 촉매 후단부에서 측정한 THC의 농도 변화를 나타낸다. IGA가 -3°로 지각됨에 따라 연소압력이 감소하여 간극체적에 축적되는 THC의 양이 감소하고[8] 배기과정 동안의 높은 온도의 기연가스에 의한 THC의 산화가 증가하므로 THC의 배출량이 감소한다. 그 결과 IGA=3°, 0°, -3° 조건에서 합성가스를 분사하였을 경우, THC의 배출량이 base 조건에 비해 약 47, 63, 64% 감소한다. 따라서 IGA=-3°, λ=1.2 조건에서의 합성가스의 연소는 유해배출물을 효과적으로 저감시킬 수 있다.

3.5 합성가스 분사압력의 변화

3.5.1 배기가스 온도 변화

합성가스의 분사압력은 기관의 유해배출물의 저감효과나 합성가스의 연료소비율 측면 등이 고려되어 제어되어야 한다. 즉, 합성가스의 분사압력이 너무 높으면 합성가스에 포함되어 있는 CO로 인한 CO의 배출량 증가와 증가한 합성가스의 연료소비율 측면을 고려해야 하며, 반대로 합성가스의 분사압력을 너무 낮추면 상대적으로 낮은 유해배출물의 저감효과를 고려해야 한다. Fig. 11은 점화시기와 합성가스의 분사압력을 변화하였을 때의 촉매 내부의 온도변화를 나타낸다. Fig. 11에서와 같이 합성가스의 분사압력을 1.5 bar에서 2 bar로 증가시킴에 따라 합성가스에 포함되어 있는 불활성 가스인 N_2의 증가와 합성가스의 유량증가로 인한 열용량의 증가로 배기가스의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

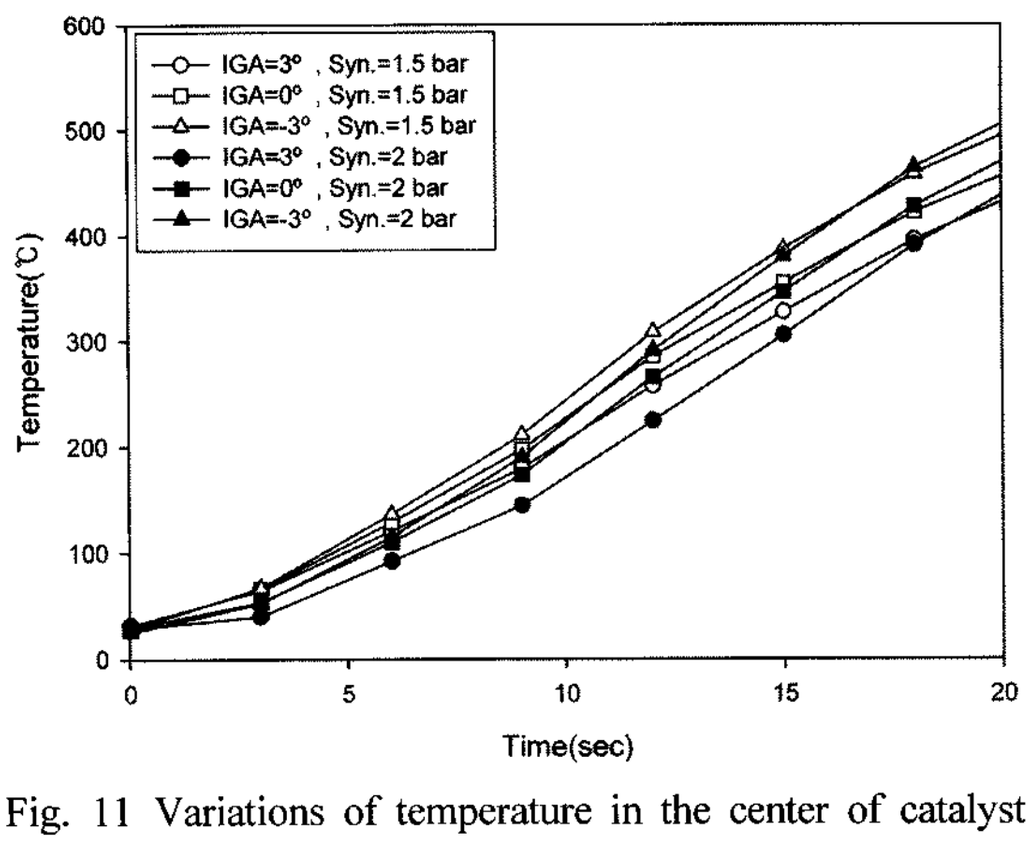

Fig. 11 Variations of temperature in the center of catalyst with changes in ignition timings and synthetic gas injection (λ=1.2)

3.5.2 유해배출물 성분의 농도 변화

Fig. 12는 점화시기와 합성가스의 분사압력을 변화하였을 때 촉매 후단부에서 측정한 CO의 농도변화를 나타낸다. IGA가 -3°로 지각됨에 따라서 높은 배기가스의 온도에 의한 후연소로 CO의 농도는 감

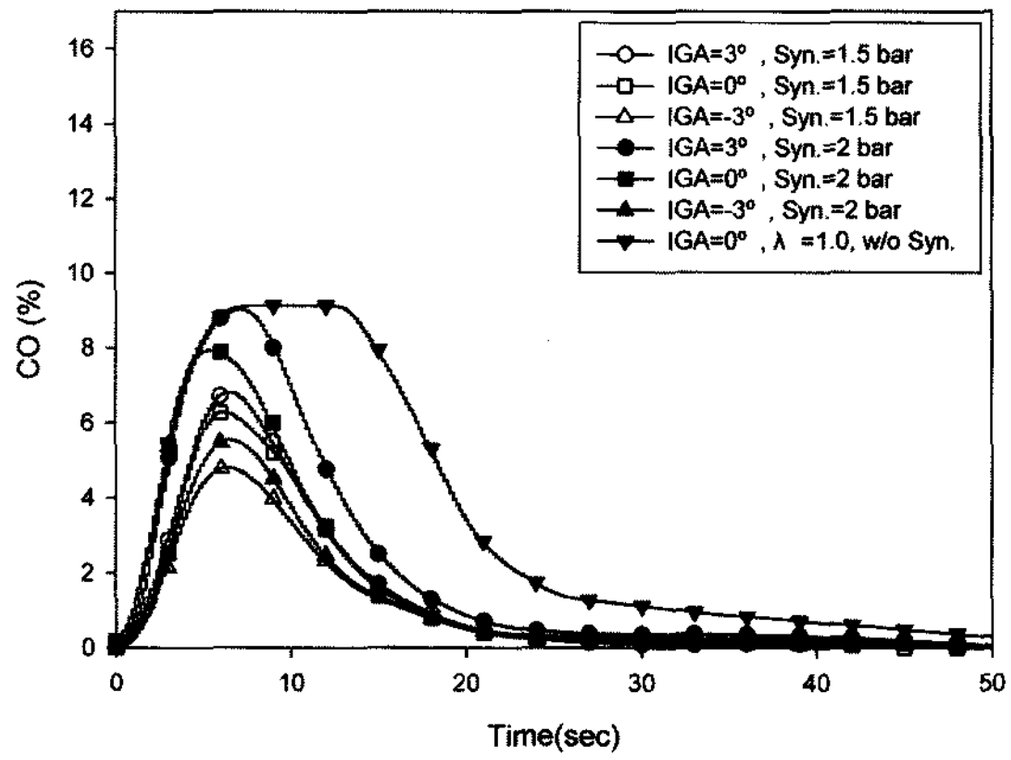

Fig. 12 Variations of CO concentration with changes in ignition timings and synthetic gas injection in the downstream of catalyst (λ=1.2)

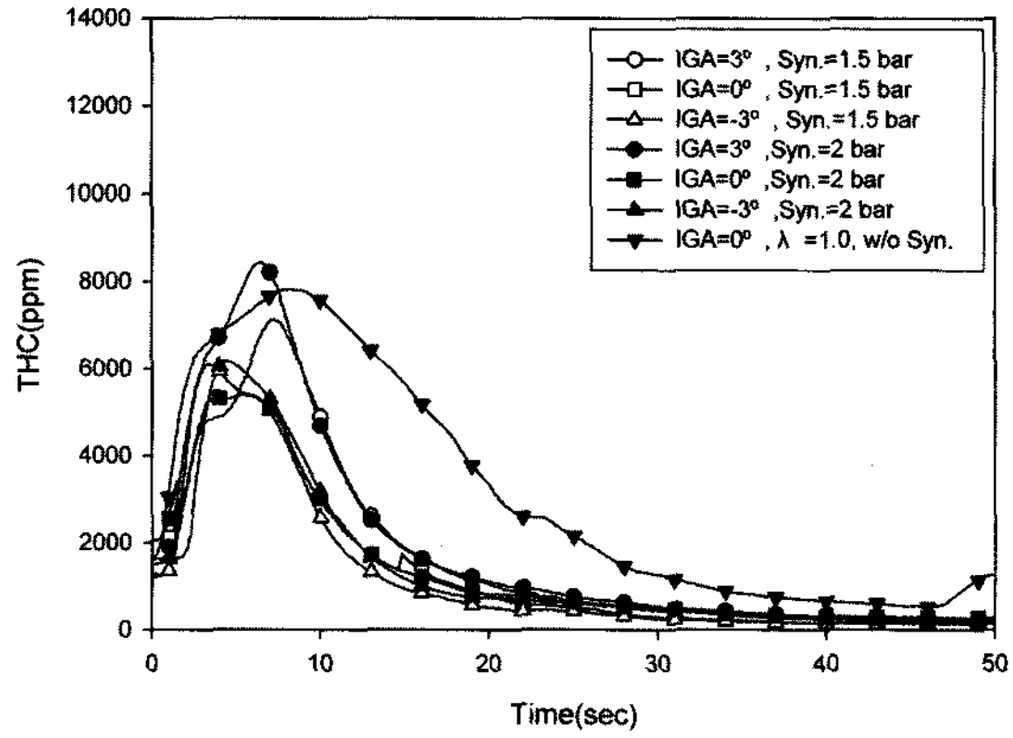

Fig. 13 Variations of THC concentration with changes in ignition timings and synthetic gas injection in the downstream of catalyst (λ=1.2)

소하고 합성가스의 분사압력을 2 bar에서 1.5 bar로 변화하였을 때 상대적으로 합성가스에 포함되어 있는 CO의 농도가 감소함에 따라 전체적으로 CO의 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 IGA=3°, 0°, -3° 조건에서 합성가스를 1.5 bar로 분사하였을 경우, CO의 배출량이 base 조건에 비해 약 64, 66, 73% 감소한다.

Fig. 13은 Fig. 12와 동일한 제어 조건을 적용하여 촉매 후단부에서 측정한 THC의 농도변화를 나타낸다. IGA가 -3°로 지각됨에 따라서 후연소에 의한 THC의 저감효과를 확인할 수 있다. 또한 합성가스의 분사압력을 2 bar에서 1.5 bar로 변화하였을 때 상대적으로 높은 배기가스의 온도에 의한 촉매의 빠른 활성화와 합성가스 연소 과정 중의 배기가스에 포함되어 있는 THC의 연소율의 증가로 전체적으로 THC의 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 IGA=3°, 0°, -3° 조건에서 합성가스를 1.5 bar로 분사하였을 경우, THC의 배출량이 base 조건에 비해 약 51, 64, 69% 감소한다. 따라서 합성가스의 분사압력을 2 bar에서 1.5 bar로 변화하였을 경우 배기가스의 온도 상승 및 유해배출물 저감 측면에서 더욱 효과적인 것을 확인할 수 있다.

3.6 연소안정성 및 유해배출물 저감 효과

본 연구에서는 유해배출물의 저감효과 뿐만 아니라 공연비와 점화시기와 같은 기관 제어변수의 변경에 따른 연소안정성을 평가하는 것도 중요하다. Fig. 14는 λ=1.2 조건에서 합성가스를 1.5 bar로 분사하였을 경우 점화시기의 변경에 따른 연소안정성의 변화율과 유해배출물의 저감율을 나타낸다. Fig. 18에서와 같이 IGA=-3°, λ=1.2 조건이 유해배출물 저감에 가장 효과적이지만 상대적으로 연소안정성이 악화된다. 즉, 기관 idle 구간에서의 안정적인 COV_{imep} 조건이 약 15% 이하인 것을 고려하여 볼 때에 IGA=-3°, λ=1.2 조건이 상대적으로 연소가 불안정한 것을 확인할 수 있다.

따라서 보다 안정적인 연소 조건에서 합성가스 연소에 의한 유해배출물의 효과적인 저감을 가능하게 하기 위해서는 λ=1.2, IGA=3 ~ 0° 조건으로 공연비와 점화시기를 제어하여야 한다.

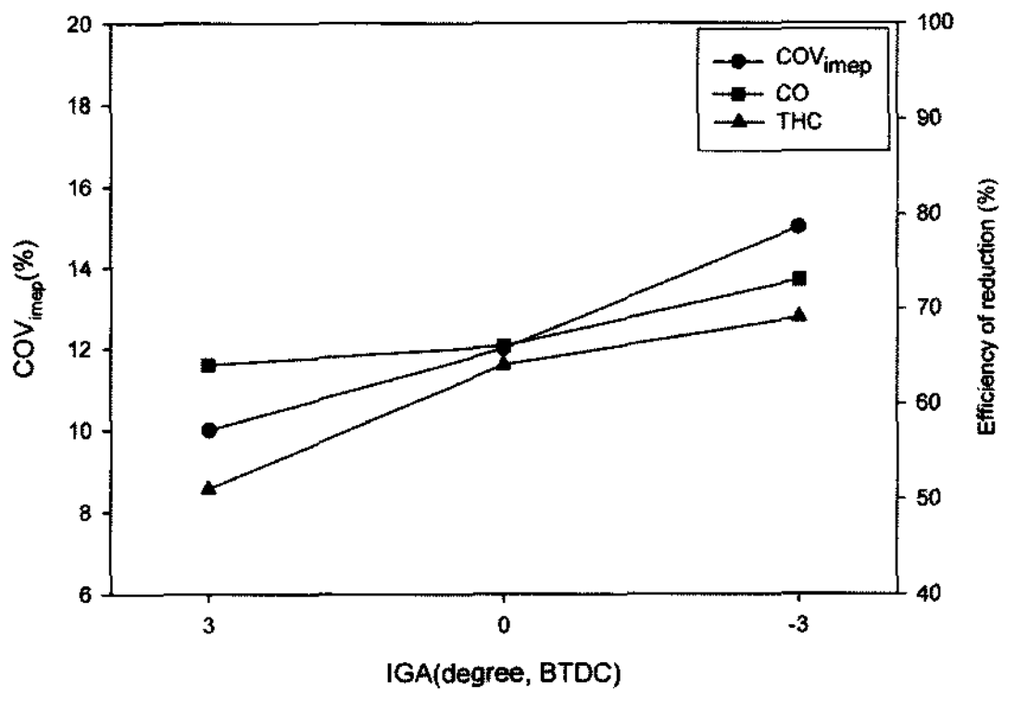

Fig. 14 Comparison of coefficient of variations in indicated mean effective pressure and reduction of harmful emission (λ=1.2, Syn.=1.5 bar)

4. 결 론

냉간시동 조건에서 배기가스의 온도를 상승하여 촉매의 활성화 온도 도달시간을 단축하고자 배기다기관에 합성가스를 분사하였으며 이때의 공연비 및 점화시기를 제어하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) λ=1.1(배기가스의 O_2의 농도가 약 6%) 이상의 조건에서 합성가스의 연소가 가능하다.
2) 합성가스의 분사압력을 2 bar에서 1.5 bar로 변화하였을 때 유해배출물 저감율이 높아진다. λ=1.2 조건에서 배기다기관에 1.5 bar로 분사된 합성가스의 연소에 의해 CO, THC의 배출량이 base 조건에 비해 약 63, 64% 저감되며 추가적인 점화시기 지각(IGA=-3°)으로 약 74, 67%의 저감이 가능하다.
3) λ=1.2 조건으로 공연비가 희박할수록, IGA가 -3°로 지각됨에 따라 배기가스의 온도 상승 및 유해배출물 저감에 효과적이지만 상대적으로 연소안정성이 악화된다.
4) 연소안정성을 보장하는 범위에서 합성가스의 연소에 의한 배기가스의 온도 상승 및 유해배출물 저감 효과를 높이기 위해서는 λ=1.2, IGA=3 ~ 0° 조건으로 공연비와 점화시기를 제어하여야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지자원 기술개발 "중소형 LPG 상용차 개발" 사업 및 2007년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구로, 이에 감사드립니다.

References

1) L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich and N. Alexeev, "Experimental Evalution of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer," SAE 2000-01-2206, 2000.
2) J. S. MacDonald, "Evaluation of the Hydrogen Supplement Fuel Concept with Experimental Multicylinder Engine," SAE 760101, 1976.
3) S. Y. Won, S. I. Yang, C. S. Song, Y. J. Park and Y. S. Cho, "An Experimental Study on Temperature Variation due to Combustion Condition of Synthetic Gas in Exhaust Manifold," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.21-26, 2007.
4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.413-418, 1988.
5) C. S. Song, C. G. Kim, K. Y. Kang and Y.-S. Cho, "Reductions of Exhaust Gas Emission with the Syngas Assist in Idle State of an SI Engine," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.34-41, 2005.
6) J.-W. An, P.-G. Jeon, Y.-J. Park, D.-S. Kim, Y.-S. Cho, "An Experimental Study on Combustion Characteristics of Synthetic gas by Constant Volume Chamber," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.70-76, 2006.
7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.402-406, 1988.
8) D.-K. Lee and J. B. Heywood, "Effects of Charge Motion Control During Cold Start of SI Engines," SAE 2006-01-3399, 2006.