

전기점화 엔진에서 개질가스 첨가에 의한 희박연소특성 연구

오 승 목* · 김 창 업 · 강 건 용 · 최 영

한국기계연구원 친환경엔진연구센터

Lean Operation Characteristics of a Spark Ignition Engine with Reformed Gas Addition

Seungmook Oh* · Changup Kim · Kernyong Kang · Young Choi

Engine Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 5 December 2005 / Accepted 24 January 2006)

Abstract : Hydrogen can extend the lean misfire limit to a large extent when it is mixed with conventional fuels for a spark ignition engine. In this study, hydrogen-enriched gaseous fuels by reforming process were simulated according to their proportions of H₂, CO, CO₂ and N₂ gases. Pure hydrogen and two different hydrogen-enriched gaseous mixtures(A-, B-composition) were tested for their basic effects on the engine performances and emissions in a single cylinder research engine. A- and B-composition showed different results from 100% H₂ addition because air/fuel mixtures were more diluted by their additions. Even though the energy fraction of reformed gases was increased, combustion stabilities and lean misfire limits were not sensitively improved. It means that combustion augmentation by H₂ addition was offset by the charge dilution of N₂ and CO₂. In addition, the low flammability of CO gas deteriorated thermal efficiencies. CO emission was drastically increased with B-composition which included higher CO component. However, NO_x was reduced as energy fraction(X_e) rised except for the case of 100% H₂ addition at $\lambda=1.2$ and was , for A-composition, lowered to a factor of ten when compared with that of H₂ addition. HC emissions were largely influenced by COV_{imep} due to misfire and partial burns.

Key words : Reformed gas(개질가스), Hydrogen enrichment(수소첨가), Lean burn(희박연소), Lean misfire limit(희박실화한계), Single cylinder engine(단기통엔진), Nitric oxides(질소산화물)

Nomenclature

BTDC : before top dead center
°CA : crank angle degree
COV_{imep} : coefficient of variation of imep
EGR : exhaust gas recirculation
imep : indicated mean effective pressure
LHV : lower heating value

LPG : liquefied petroleum gas
MBT : minimum retard for best torque
rg : reformed gas
 X_e : energy fraction of a reformed gas in total fuel
 λ : air excess ratio

1. 서론

수소를 내연기관에 활용하는 기술은 수소의 물리 화학적특성으로 사용에는 많은 어려움이 있다. 낮

*Corresponding author. E-mail: mook@kimm.re.kr

은 에너지 밀도는 연료저장 및 비출력의 한계를 가지게 되며 폭발에 가까운 연소특성으로 인한 연소소음, 이상연소 등 연소제어의 어려움이 있어 왔다.¹⁾ 그러나 연료저장의 문제는 개질기(reformer)를 이용한 실시간 수소공급이 가능하게 되었고, 소량의 수소를 주 연료에 첨가하여 혼합연료 형태로 사용하게 됨에 따라 연료의 연소특성을 향상시키게 되어 수소만을 사용하는 경우에 발생할 수 있는 기술적 문제의 해결이 가능하게 되었다.²⁾

화석연료로부터 합성연료를 제조하기 위한 중간 단계로서 개질기술을 통해 개질가스(reformed gas) (혹은 합성가스, synthetic gas)가 만들어 지게 되는데 개질가스는 H_2 , CO , CO_2 , N_2 와 같은 성분으로 이루어져 있으므로 이것을 직접 내연기관에 공급하게 된다.

개질가스를 내연기관에 활용하기 위한 연구는 이미 70년대에 General Motors, California Institute of Technology 등에서 활발하게 연구되었다. 그러나 당시의 개질기술은 효율이 크게 떨어져서 전체 에너지 효율을 저하시키는 한편 엔진기술 또한 지금같이 발달하지 못하여 이상연소의 문제를 가지고 있었다.^{3,4)}

개질장치를 직접 자동차에 적용하기 위해서는 시동시간의 단축, 부하변동에 대한 빠른 응답속도, 소형화, 그리고 내구성이 갖추어져야 하는데 최근에 개발되고 있는 마이크로 반응기, 플라즈마 반응기와 같은 실시간 수소제조 기술은 향후 실제 자동차에서 실용화 가능성을 높여가고 있다.^{5,6)}

따라서 플라즈마 반응기와 같은 개질장치로부터 만들어지는 개질가스를 내연기관에서 활용하기 위해서는 가스성분비에 따라서 달라지는 엔진특성을 비교하여 최적화하는 것이 필요하게 된다.

이러한 선행연구를 목적으로 본 연구에서는 개질가스 성분을 모사한 시뮬레이션 가스를 제조하고 이것을 내연기관에 공급하여 이때 나타나는 연소 및 배출가스 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치

본 연구에 사용된 단기통엔진의 제원은 Table 1과 같다. 기본엔진은 디젤엔진을 전기점화식 엔진으로 개조한 것으로 압축비를 9.3으로 낮추었으며 점화

Table 1 Engine specifications

Bore	130 mm	
Stroke	140 mm	
Compression ratio	9.3	
Displacement volume	1858 cc	
Valve timing	Intake open	BTDC 18°C
	Intake close	ABDC 50°C
	Exhaust open	BBDC 50°C
	Exhaust close	ATDC 18°C

플러그 및 스로틀밸브를 추가로 설치하였다. 엔진 헤드는 flat roof이며 흡기밸브와 배기밸브는 각각 하나씩이다. 피스톤은 디젤엔진의 re-entrant형 연소실에서 직경 112 mm, 깊이 29 mm인 dog-dish 형태의 연소실 형상을 가지도록 변경하였다. 실린더 하나의 행정 체적이 1.8 L 정도인 대형의 단기통 엔진이기 때문에 진동은 따로 설치된 밸런싱 축(balancing shaft)을 통하여 상쇄시켜 주었다. 단기통 엔진은 직류모터식 동력계(DC dynamometer)를 변속기 없이 직결하여 사용하였다.

단기통엔진 및 측정장치를 포함하는 전체적인 실험장치도는 Fig. 2에 나타내었다. 주 연료인 LPG 연료는 연료분사기를 통하여 액상으로 포트로 분사되는 반면 개질가스는 흡기관에 직접 연결하였으며 가능한 엔진연소실에 가깝게 설치하여 역화(back-fire)에 의한 흡기관내 폭발을 방지하였다. 연료분사 압력은 LPG 액상 연료의 경우 11 bar, 수소의 경우 3 bar로 일정하게 유지하였다.

공기유량 측정은 층류유량계(laminar flowmeter, Meriam 50MY15)를 이용하였고, 합성가스의 유량은 MFC(mass flow controller)를 통하여 제어하였으며, 액상 LPG의 유량은 전자저울(balance)을 이용하여 측정하였다. 공연비 측정은 배기다기관에 설치한 UEGO(universal exhaust gas oxygen) 센서에서 확인하였다. 연소해석을 위한 연소압력 측정은 연소해석기(Indiset 620, AVL)와 점화플러그형 압력센서(GU12S, AVL)를 사용하여 실시간으로 연소압력 데이터를 획득 및 처리하였다. 이 밖에 각 부위의 온도와 압력측정을 위해서 열전대(thermocouple)와 압력계를 설치하였다. 주요 배출가스 CO , THC , NO_x 는 배출가스 분석장치(EXSA1500, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

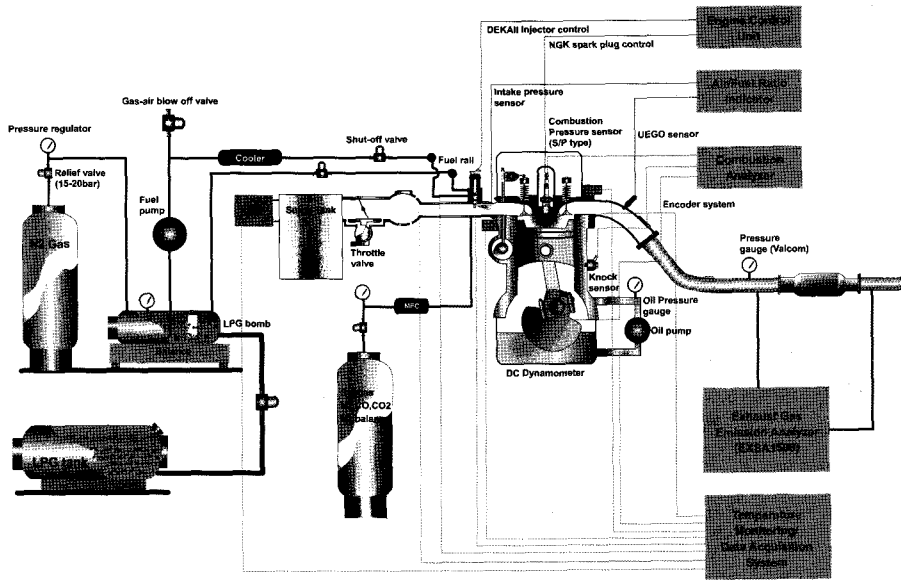


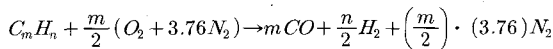
Fig. 2 Schematic apparatus for single cylinder engine test

3. 실험방법

본 실험에는 사용된 주 연료는 프로판 부탄의 혼합비가 질량비로 6대4인 LPG 연료이며 개질가스의 조성에 따른 영향을 살펴보기 위하여 Table 2와 같이 개질가스를 모사한 시뮬레이션가스가 실험에 사용되었다. 각 조성은 개질 장치에서 생성될 수 있는 가스의 비율을 가정된 것으로 A의 경우 완전산화 과정이 진행되어 수소의 비율이 낮은 반면 CO₂의 비율은 크다. B의 경우는 개질가스의 성분 중에 H₂, CO, N₂만 존재하게 되는 다음 식에서와 같이 이상적인 부분산화과정을 거친 경우의 조성비에 해당한다.

Table 2 Compositions of simulation gases tested in this study (unit: %)

Composition	H ₂	CO	CO ₂	N ₂
H ₂	100	0	0	0
A	17	3	10	70
B	31	24	0	45



또한 조성 A, B의 결과는 100% H₂를 첨가할 경우와 비교하였다.

전 실험을 통하여 엔진회전수는 단기통엔진의 최

대 토크 회전수인 1000 rpm, 엔진부하는 50% 부하에 해당하는 지시평균유효압력(imep) 4 bar로 고정하였다. 모든 데이터는 MBT 점화시기에서 측정되었으며 공기과잉율(λ)은 1.2에서 회박한계까지 변화시키며 측정하였다. 공연비는 두 혼합연료가 충분히 혼합되었다고 가정하고 이론식을 이용하여 계산하였다.⁷⁾

회박영역으로 갈수록 측정된 데이터의 재현성 및 오차가 커지므로 COV_{imep} 기준으로 3%이내에서 400사이클 평균으로 데이터를 취득하였으나 그 이상일 경우 1000사이클 이상 측정된 결과의 평균값을 사용하였다. 측정된 압력신호로부터 열방출량해석(heat release analysis)을 통하여 연소해석을 수행하였다.

실험결과를 도시할때 X_e은 전체 연료의 발열량에 대한 개질가스의 발열량 비인 X_e로 나타내었다. X_e의 정의는 아래와 같다.

$$X_e = \frac{\text{Energy of reformed gas}}{\text{Total energy of fuel}} = \frac{\sum m_{rg,i} \cdot LHV_{rg,i}}{\sum m_{rg,i} \cdot LHV_{rg,i} + m_{LPG} \cdot LHV_{LPG}} \times 100$$

여기서 개질가스의 에너지는 가연성 가스인 H₂, CO가 고려된다.

4. 실험결과

개질가스를 기존 연료에 첨가하여 연소특성을 기하기 위해서는 수소의 비율이 높아야 하나 실제 개질기에서 나오는 가스는 부분산화 과정 중에 다양한 성분을 포함하게 된다. 개질가스는 수소 이외에도 달리 여러 종류의 성분을 포함하고 있으므로 100% H₂를 첨가하는 경우와 비교해서는 연소성능 측면에서 불리한 점을 가지고 있을 것이며, 특히, 연소안정성은 CO₂, N₂와 같은 불연성 가스에 의하여 크게 영향을 받을 수 있다. Fig. 3은 X_e에 따른 COV_{imep}의 변화를 나타내고 있다. 공기과잉율(λ)이 증가하면서 희박효과에 의해 COV_{imep} 값은 증가하지만 개질가스의 비율이 증가함에 따라 COV_{imep} 값은 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 수소의 희박한계 확장에 따른 연소 안정성의 증가를 보여주고 있다. 100% H₂의 경우 X_e=25%에서 $\lambda=2.4$ 까지 운전이 가능한 것으로 나타나고 있다. 그러나 조성 A의 경우는 $\lambda=1.6$ 보다 공기과잉율이 증가하면 희박한계(lean misfire limit)에 근접하여 $\lambda=2.0$ 실험은 불가능하였다. 또한, N₂의 비율이 높아서 개질가스의 에너지비를 높이는데 한계를 가지고 있으므로 본 연구의 실험조건내에서는 X_e=20% 이상의 개질가스 공급이 불가능하였다. 이에 반하여 조성 B의 경우는 $\lambda=2.1$ 까지의 안정적인 운전이 가능하게 나타나고 있다. 조성 B에는 조성 A와는 달리 H₂ 외에도 CO 성분이 24% 포함되어 있어 X_e 값이 증가하여도 100% H₂ 첨가 수준의 연소안정성을 보여주고 있다.

Fig. 3의 결과로부터 희박연소한계를 COV_{imep}=5%로 설정하고 각각의 조성에 대하여 X_e에 대한 희박실화한계를 정리하여 나타내면 Fig. 4와 같다. H₂의 경우 X_e의 증가에 따라 실화한계는 빠르게 증가하는 것과 비교하여 조성 A의 경우는 매우 완만하게 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이것은 조성 A의 경우 X_e가 증가함에 불구하고 개질가스성분 중에 포함되어 있는 N₂, CO₂의 양이 늘어남으로써 생기는 희석(dilution)효과에 의하여 상대적으로 H₂ 증가 효과가 상쇄되기 때문이며 이러한 조건에서는 실화나 부분연소에 의한 사이클 변동이 증가하게 된다.

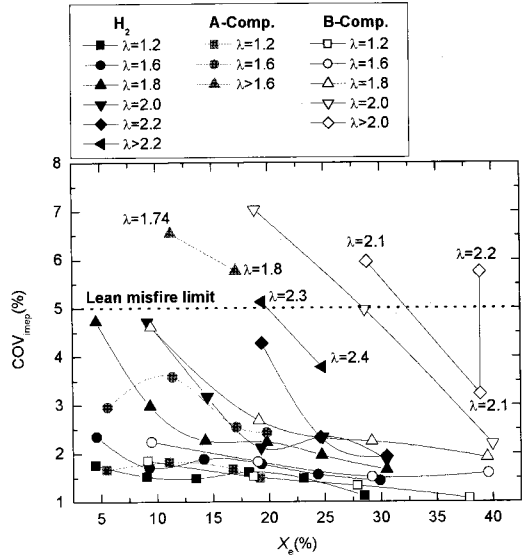


Fig. 3 COV_{imep} characteristics with reformed gas addition

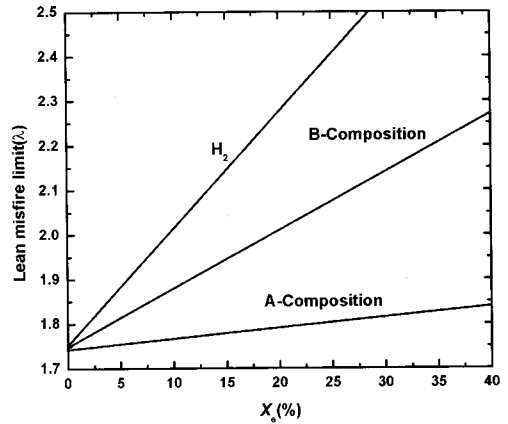


Fig. 4 Lean misfire limit versus X_e (max. ±5% error)

개질가스 첨가에 따른 열효율(thermal efficiency)의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 열효율은 X_e의 증가와 함께 비례하여 같이 증가하고 있으며 전체적으로 동일한 공기과잉율(λ)에서 조성 B의 경우가 낮은 효율을 보여주고 있다. 이것은 개질가스 중에 포함된 CO의 가연한계(flammability limit)가 12.5%로 다른 연료성분(C₃H₈, C₄H₁₀, H₂)보다 희박연소에 불리하여 실화의 가능성이 증가했기 때문으로 생각된다.⁸⁾ 이러한 결과는 희박연소영역에서 OH기가 활성화 되지 않아서 CO

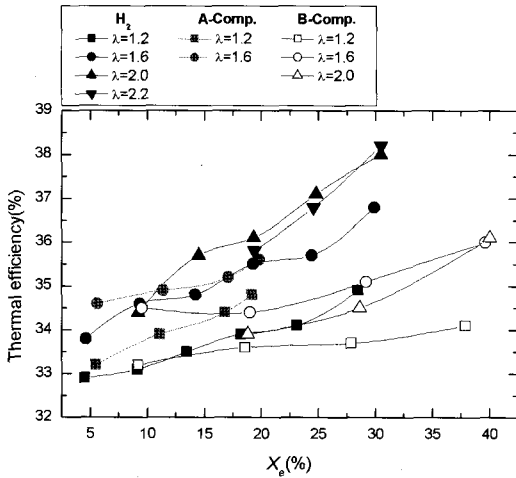


Fig. 5 Thermal efficiency versus X_e

와 OH의 미약한 연쇄 종료 반응으로부터 기인한 것으로 분석된다.^{9,10)}

$\lambda=1.2, 1.6$ 조건에서는 조성 A의 개질가스에 포함된 불활성가스의 희석효과로 인하여 효율이 가장 높게 나타나지만 공기과잉율의 한계로 100% H₂의 $\lambda=2.0$ 에서 효율이 전반적으로 높게 나타났다. 그러나 이 결과는 실제 개질장치에서의 효율을 고려하지 않은 것이므로 전체 시스템을 고려할 때는 달라질 수 있다. 즉 개질가스를 발생시키는 개질기에서의 발열반응을 고려할 경우는 조성 A의 경우 높은 연소열을 동반하므로 다소 낮아질 것으로 예상된다.

지난 연구에서 100% 수소 첨가시에는 X_e 가 일정 값 이상 증가하면 연소온도가 높아져서 열전달로 인한 손실이 크게 되어 열효율이 감소하는 결과를 얻었고 공기과잉율이 커질수록 수소첨가비율의 영향을 크게 받는 결과를 얻었다.⁷⁾ 그러나 본 연구에서 100% 수소는 실험조건 내에서 열효율의 지속적인 증가를 보여주고 있는데 이러한 차이는 연료공급방식이 달라짐에 따라 생기는 결과로 판단된다. 즉, 소량의 수소를 첨가할 경우에는 믹서방식으로 흡기관에 연속적으로 공급하는 방법이 수소가 균일하게 혼합기 중에 분포하도록 하여 수소연소의 장점이 전체연소실에 걸쳐 작용할 수 있는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 개질가스가 증가함에 따라 최적점화시 기인 MBT 변화를 나타낸 그림이다. 수소의 비율이

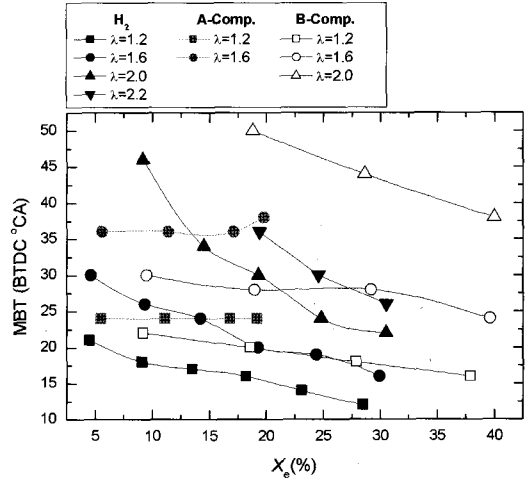


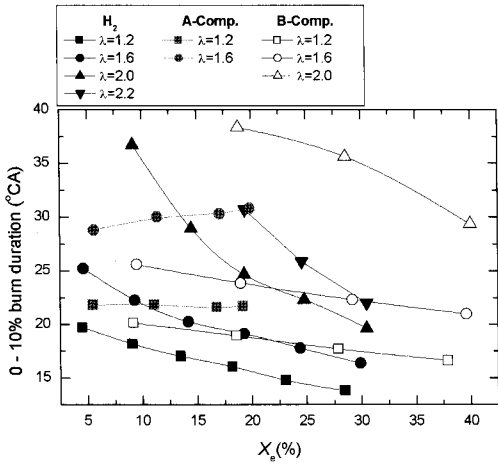
Fig. 6 MBT versus X_e

늘어나면 연소속도가 증가하게 되어 MBT는 지각(retard)되지만 조성 A의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 희석효과도 함께 증가하게 되어 MBT 변화가 거의 없음을 알 수 있다. $\lambda=1.6$ 의 경우 $X_e=20\%$ 근처에서는 MBT가 진각(advance) 되고 있다. 같은 이유로 조성 B의 경우도 H₂보다는 완만한 MBT 변화를 나타내고 있다.

열발출량 해석(heat release analysis)을 통하여 개질 가스 첨가에 의한 연소기간(burn duration) 변화를 Fig. 7과 같이 나타냈다. 조성 A의 경우 초기 연소에 해당하는 0-10% 연소기간은 거의 변화가 없거나 $\lambda=1.6$ 에서 소폭 증가하고 있으나 이외의 경우는 모두 X_e 의 증가와 함께 연소기간이 꾸준히 감소하고 있다. 10-90% 연소기간도 H₂, 조성 B의 경우는 감소하지만 조성 A에서는 소폭으로 감소하거나 혹은 증가하는 결과를 얻었다. 이와 같은 결과는 다시 한 번 수소의 빠른 화염전파에 의한 연소속도의 증가를 보여주고 있다.

본 연구에서는 배출가스비교를 위하여 주요 규제 대상인 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 탄화수소(HC)의 발생량을 측정하였으며 Fig. 8-10은 그 결과를 보여주는 그림이다.

CO의 변화는 Fig. 8에서와 같이 100% H₂ 첨가의 경우 X_e 의 증가에 따라 전체 탄소(C)성분이 감소할 뿐 아니라 연소안정성의 증가로 지속적으로 감소하게 나타나고 있으며 연료 성분 중 CO의 비율이 높은



(a) 0 - 10%

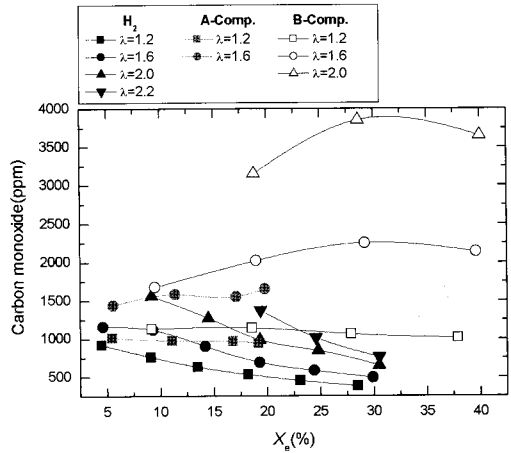
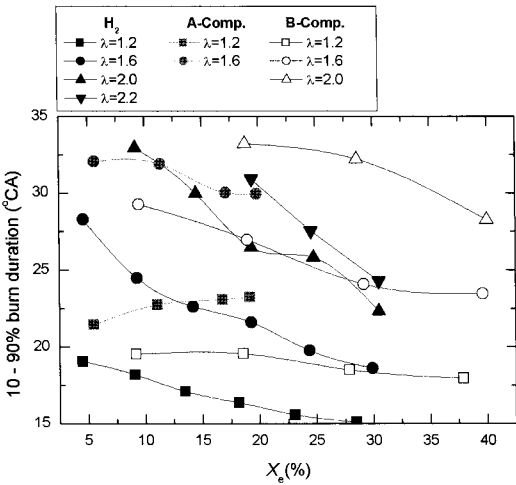


Fig. 8 CO versus X_e



(b) 10 - 90%

Fig. 7 Burn duration characteristics with reformed gases and H_2 addition

조성 B의 경우가 전체적으로 높은 값을 보여주고 있다. 조성 A, B의 경우는 CO 가스가 연료 중에 포함되어 있으므로 CO의 발생량이 높게 나타나고 있고 X_e 가 증가함에 따라 같이 증가하거나 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타나고 있다. X_e 가 증가하면 CO의 비율 또한 높아지므로 배출가스에 영향을 주지만 H_2 가 증가하게 되므로 연소안정성이 향상되어 CO 발생이 줄어드는 두 가지 영향이 상쇄되는 결과를 가져오기 때문에 X_e 의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그러나 CO는 주로

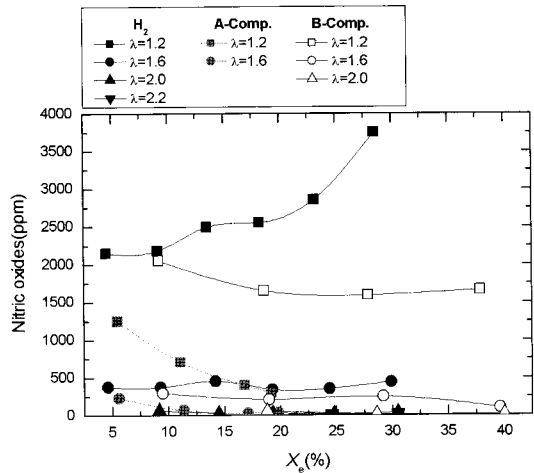


Fig. 9 NO_x versus X_e

연소장에서 불완전 연소에 의해 증가하기 때문에 실화나 부분연소가 일어나는 희박영역에서는 COV_{imep}가 CO 발생에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 9는 질소산화물(NO_x)의 결과를 보여주고 있다. 100% H_2 , $\lambda=1.2$ 조건에서만 X_e 의 증가에 따라 NO_x가 증가하고 있으며 그 이외의 경우는 모두 감소하거나 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타나고 있다. 조성 A의 감소 폭은 희석효과로 인하여 두드러지게 나타나고 있으며 조성 B의 경우도 $\lambda=1.2$ 조건에서 소폭 감소하는 경향을 보여주고 있다. 앞의 열효율 결과에서 설명한 바와 같이 조성 A,

B의 개질가스를 첨가할 경우 X_c 의 증가와 함께 N_2 , CO_2 의 양이 같이 증가하게 되므로 희석(dilution)에 의한 연소온도 감소효과가 H_2 증가로 인한 연소온도 상승요인을 상쇄되는 것으로 판단된다. 개질가스를 첨가할 경우 NO_x 의 감소는 배기재순환(EGR)과 동일한 효과를 볼 수 있으므로 조성 A에서는 X_c 의 증가로 500 ppm 이하의 값을 가지면서 90% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

미연탄화수소(HC)의 발생은 Fig. 10에 나타난 것과 같이 희박영역에서 발생량이 크게 증가하고 있으며 동일한 공기과잉률 조건에서 안정된 연소를 보여주는 100% H_2 , 조성 B, 조성 A 순으로 작게 발생하였다. $\lambda > 2.0$ 인 조건에서는 X_c 가 낮은 경우에 실화로 인한 HC 발생량이 증가하여 수소비율이 상당히 증가하여야 감소가 가능한 것으로 나타나고 있다. 조성 B의 경우 100% H_2 조건과 같은 수준의 HC 발생량을 만족시키기 위해서는 X_c 가 2배 이상 증가하여야 하는 결과를 보여 주고 있다. 따라서 개질가스를 첨가할 경우 정화효율이 높은 산화촉매의 사용이 요구된다.

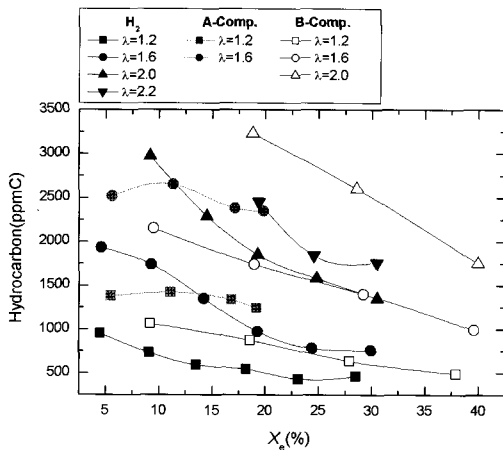


Fig. 10 HC versus X_c

4. 결론

LPG 연료를 사용하는 전기점화엔진에서 100% H_2 및 개질가스를 모사한 혼합가스를 부분적으로 첨가하여 연소 및 배출가스 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과

같다.

- 1) 100% H_2 는 $X_c=25\%$ 로 $\lambda=2.4$ 까지 확장이 가능하였으나 개질가스(조성 A, B)의 경우 첨가비율(X_c)이 증가하면 H_2 와 동시에 CO_2 , N_2 또한 증가하므로, 희석효과(dilution effect)로 인한 H_2 증가 효과가 상쇄되어 연소안정성(COV_{imep}) 및 희박한계는 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 조성 B의 경우 첨가비율(X_c)을 37%로 증가시킴으로써 $\lambda=2.1$ 까지의 운전이 가능하였다.
- 2) 열효율의 경우 실제 개질장치에서의 열효율을 고려하지 않았으므로 전체 시스템으로 비교할 수는 없으나 CO의 높은 가연한계(12.5vol.%)로 인하여 다른 연료성분보다 희박연소에 불리하여 실화의 가능성이 증가하였고 이로 인하여 CO의 비율이 가장 높은 조성 B의 효율이 가장 낮았으며 CO가 포함되지 않고 가장 안정된 연소를 보이는 100% H_2 의 경우가 열효율이 가장 높게 나타났다.
- 3) 개질가스성분 중에 포함되어 있는 N_2 , CO_2 의 희석(dilution)효과에 의하여 최적점화시기 및 연소기간은 100% H_2 와는 달리 완만하게 감소하거나 일정한 값을 유지하였다.
- 4) CO는 개질가스에 포함된 CO의 영향으로 조성 B의 경우 가장 높은 발생량을 보였으며 HC는 같은 공기과잉률 조건에서 안정된 연소를 보여주는 100% H_2 , 조성 B, 조성 A 순으로 작게 나타났다.
- 5) 개질가스의 첨가비율(X_c) 증가로 NO_x 는 감소하는 경향을 보이며 희석효과가 가장 높은 조성 A의 발생량이 가장 적었으며 이 경우 90% 이상 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

References

- 1) J. M. Norbeck, J. W. Heffel, T. D. Durbin, B. Tabbara, J. M. Bowden and M. C. Montano, Hydrogen Fuel for Surface Transportation, Society of Automotive Engineers, Inc., 1996.
- 2) Y. Jamal and M. L. Wyszynski, "On-board Generation of Hydrogen-rich Gaseous Fuels - A Review," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.19, No.7, pp.557-572, 1994.
- 3) J. S. MacDonald, "Evaluation of the Hydro-

- gen-supplemented Fuel Concept with an Experimental Multicylinder Engine,” SAE 760101, 1976.
- 4) J. G. Finegold, “Hydrogen: Primary or Supplementary Fuel for Automotive Engines,” SAE 760609, 1976.
 - 5) J. B. Green Jr., N. Domingo, J. M. E. Storey, R. M. Wagner, J. S. Armfield, 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 2000-01-2206, 2000.
 - 6) E. J. Tully and J. B. Heywood, “Lean-burn Characteristics of a Gasoline Engine Enriched with Hydrogen from a Plasmatron Fuel Reformer,” SAE 2003-01-0630, 2003.
 - 7) S. Oh, C. Kim and K. Kang, “Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a LPG Fuelled Spark Ignition Engine,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.2, pp.114-120, 2006.
 - 8) B. Lewis and G. Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press Inc., Washington, p.693, 1961.
 - 9) U. Fissenewert and V. Sick, “Cycle-resolved Investigation of In-cylinder and Exhaust NO in a Spray-guided Gasoline Direct-injection Engine: Effect of Intake Temperature and Simulated Exhaust Gas Recirculation,” SAE 2005-01-3685, 2005.
 - 10) S. R. Turns, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, International Editions, New York, p.152, 2000.