

LPG엔진에서 수소연료 보조분사에 의한 희박연소특성 연구

오 승 목* · 김 창 업 · 강 건 용

한국기계연구원 친환경엔진연구센터

Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a LPG Fuelled Spark Ignition Engine

Seungmook Oh* · Changup Kim · Kernyong Kang

Engine Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea
(Received 25 July 2005 / Accepted 16 September 2005)

Abstract : The basic effects of hydrogen addition for engine performance and emission were investigated in single cylinder research engine. Seven commercial injectors were tested to choose a suitable injector for hydrogen injection prior to its engine implementation. The hydrogen fuel leakage and flow rate were evaluated for each injector and KN3-1(Keihin, CO.) showed the best performance for hydrogen fuel. At the higher excess air ratio($\lambda=1.7, 2.0$), the better combustion stability was found with hydrogen addition even though its effect was small at lower excess air ratio ($\lambda=1.0, 1.3$). Stable operation of the engine was even guaranteed at $\lambda=2.0$, if the amount of hydrogen gas was near 15% of total energy. In the lean region, $\lambda>1.3$, thermal efficiency was improved slightly while it was not clearly observed at $\lambda=1.0, 1.3$. It is considered that, in some cases, high temperature environment due to hydrogen combustion caused further heat loss to surroundings. Except for $\lambda=1.0$, with larger amount of hydrogen addition, CO was reduced drastically but it was emitted more at the leaner region. Nitric oxides(NO_x) was increased a little more with hydrogen addition at $\lambda=1.0, 1.3$. However, at $\lambda>1.3$ its relative amount of emission was low. In addition, the amount of NO_x was continuously decreased with hydrogen addition, but, at $\lambda=2.0$ the amount of NO_x was lowered to 1/100 of that of $\lambda=1.0$. THC emission was significantly increased as air/fuel ratio was raised to leaner region due to misfire and partial burn.

Key words : Hydrogen addition(수소첨가), Lean burn(희박연소), LPG engine(액화석유가스엔진), Single cylinder engine(단기통엔진), Nitric oxides(질소산화물)

Nomenclature

BTDC	: before top dead center	$X_{m,h}$: mass fraction of hydrogen of total fuel
°CA	: crank angle degree	$X_{e,h}$: energy fraction of hydrogen of total fuel
COV_{imep}	: coefficient of variation of imep	m_T	: total mass of LPG and hydrogen
imep	: indicated mean effective pressure	λ	: air excess ratio
MBT	: minimum retard for best torque		

1. 서론

수소연료는 탄소원자를 포함하지 않으면서 단위 질량당 발열량이 크고 연소생성물이 이론상 물밖에

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

발생하지 않으므로 주목받는 대체에너지원으로 인식되고 있으나 생산 및 공급의 측면에서 효율적인 방법의 개발이 미진하여 아직까지 기존 연료의 벽을 넘고 있지 못하고 있는 실정이다. 특히, 자동차 연료로서의 적용은 저장수단의 한계로 인하여 한번의 연료공급으로 이동할 수 있는 거리가 짧아 아직까지 실용화되기에는 부족한 면이 많다.¹⁾ 그러나 최근에 개발된 개질기술은 과거보다 향상된 수소생산이 가능하게 되어 향후 활용범위의 확대가 기대되고 있다.²⁾

수소연료를 내연기관에 활용하는 기술은 1800년대 초부터 연구되어 왔는데 수소의 독특한 물리적 특성으로 인하여 엔진에서 이용하기 위한 노력이 상당기간에 걸쳐서 이루어져 왔다. 1970년대에는 연료전지의 개발로부터 비롯된 개질기(reformer)의 등장과 함께 수소를 포함하는 개질가스 활용을 위한 연구가 General Motors, California Institute of Technology 등에서 있었다.^{3,4)} 최근에는 BMW, Ford 등에서 실제 수소내연기관을 탑재한 자동차를 선보이고 있으나 아직 수소연료의 공급망과 Well To Wheel 효율을 고려하면 수소 내연기관을 탑재한 차량의 실용화는 많은 시간을 필요로 할 것으로 판단된다.

메탄연료에 수소를 첨가하여 희박운전의 범위를 확대하는 한편 유해 배출가스를 감소시키는 기술이 소개되어 왔다.^{5,6)} 그 중에서도 부피비로 메탄 80%에 수소 20%를 첨가한 Hytane™(Hydrogen Consultants Inc.) 연료가 많이 알려져 있다.

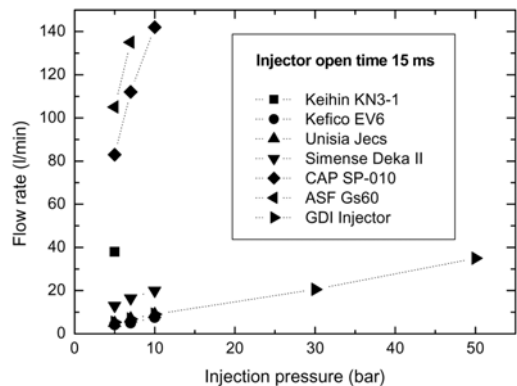
내연기관에 수소연료만 사용하는 전소기술은 수소저장의 부담이 많고 폭발에 가까운 연소특성으로 인한 연소소음, 이상연소 등 연소제어의 어려움을 수반하고 있다.⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 적은 양의 수소로 큰 효과를 기대할 수 있는 혼소시스템에 관심을 가지고 기존의 기술이 활용 가능한 범위 내에서 수소첨가의 장점을 검증하기 위한 연구를 LPG 엔진에서 수행하였다.

2. 실험장치

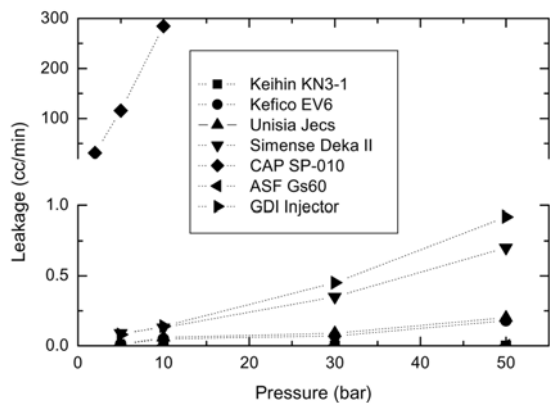
2.1 수소연료용 인젝터 선정

내연기관에 수소연료를 사용하기 위해서는 수소

인젝터의 개발이 선행되어야 한다. 그러나 수소엔진에 사용된 인젝터는 대부분 연구개발 단계에서 사용된 것으로 시중에서 구하기가 어려우므로 본 연구에서는 기존 시장에 유통되고 있는 인젝터를 평가하여 적절한 인젝터를 사용하였다. 수소 인젝터는 고압의 수소연료에 대해 기밀성이 높고, 무운활 가스인 수소의 사용에 따른 내구성이 우수하고, 엔진에 장착성이 좋아야 한다. 본 연구에서는 선행 연구 단계에서 수소연료에 대한 기밀성 및 유량에 초점을 맞추어 7가지의 인젝터를 선정하여 평가하였으며 결과는 Fig. 1과 같다. 실험결과, Keihin사의 KN3-1 분사기와 AFS사의 Gs60 분사기가 수소연료에 대한 누설이 거의 없는 결과를 보여주었으나 실험엔진의 운전조건을 고려하여 연료유량이 가장 적합한 KN3-1 분사기를 선정하여 실험에 사용하였다.



(a) Injector flow rate test



(b) Injector leak test

Fig. 1 Injector flow rate and leakage test with hydrogen fuel

2.2 단기통 엔진 실험장치

본 연구에 사용된 단기통엔진의 제원은 Table 1 과 같다. 기본엔진은 디젤엔진을 전기점화식 엔진으로 개조한 것으로 압축비를 9.3으로 낮추었으며 점화플러그 및 스토틀밸브를 추가로 설치하였다. 엔진 헤드는 flat roof이며 흡기밸브와 배기밸브는 각각 하나씩이다. 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.

Table 1 Engine specifications

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

단기통엔진 및 측정장치를 포함하는 전체적인 실험장치도는 Fig. 2에 나타내었다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 수소연료분사기는 Keihin사의 KN3-1 분사기를 사용하였다. 주 연료인 LPG처럼 수소연료도 분사기를 통하여 포트에 분사되며 가능한 엔진 연소실에 가깝게 설치하여 역화(backfire)에 의한 흡기관내 폭발을 방지하였다. 연료분사압력은 LPG 액상 연료의 경우 11 bar, 수소의 경우 3 bar로 일정하게 유지하였다.

공기유량 측정은 층류유량계(laminar flowmeter, Meriam 50MY15)를 이용하였고, 수소유량은 열식 질량유량계(mass flow meter)를, 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 처리하였고 400사이클의 자료를 평균하여 연소해석을 수행하였다. 이 밖에 각 부위의 온도와 압력측정을 위해서 열전대(thermocouple)와 압력계를 설치

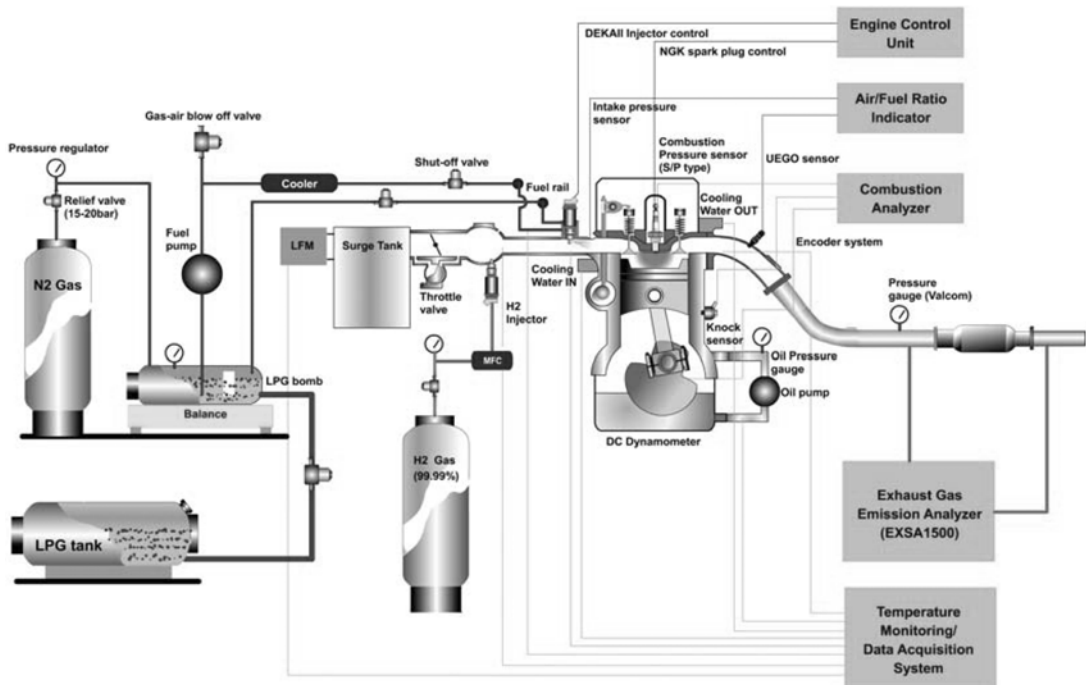


Fig. 2 Schematic apparatus for single cylinder engine test

하였다. 주요 배출가스 CO, THC, NOx는 배출가스 분석장치(EXSA1500, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험방법

전 실험을 통하여 엔진회전수는 단기통엔진의 최고 토크 영역인 1000 rpm, 엔진부하는 지시평균유효압력(imep) 4 bar로 고정하였다. 모든 데이터는 MBT 점화시기에서 측정되었으며 공기과잉율(λ)은 이론공연비에서 2.0까지 변화시켰다. 본 연구에서는 LPG연료에 수소를 첨가하였으므로 공연비 계산을 위한 작업이 필요하였다. 따라서 두 혼합연료가 충분히 혼합되었다고 가정하고 아래의 이론식을 이용하여 공연비를 계산하였다.

실험에 사용된 LPG연료는 프로판 부탄의 혼합비가 질량비로 6대4이므로 프로판, 부탄, 수소의 몰 비는 다음과 같다.

$$C_3H_8 : (1 - X_{m,h})m_T \times 0.6/44$$

$$C_4H_{10} : (1 - X_{m,h})m_T \times 0.4/58$$

$$H_2 : X_{m,h} \times m_T/2$$

그러므로 이론식은 다음과 같다.

$$\frac{(1 - X_{m,h})(0.6)}{44} C_3H_8 + \frac{(1 - X_{m,h})(0.4)}{58} C_4H_{10} + \frac{X_{m,h}}{2} H_2 + a(O_2 + 3.76N_2) = bCO_2 + cO_2 + dN_2 + eH_2O$$

윗 식을 각 원소에 대하여 정리하면, O_2 의 몰비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_2 = \frac{a - 0.113 - 0.137X_{m,h}}{4.76a + 0.0445 + 0.2055X_{m,h}}$$

따라서, 공기과잉율(λ)은 이론공연비에서 산소 몰농도에 대한 실제 산소의 몰농도이므로

$$\lambda = \frac{\text{actual oxygen present}}{\text{stoichiometric oxygen requirement}} = \frac{a}{0.113 + 0.137X_{m,h}}$$

여기서,

$$a = \frac{0.113 + 0.137X_{m,h} + (0.0445 + 0.2055X_{m,h})O_2}{(1 - 4.76O_2)}$$

공연비 측정장치 입력에 필요한 H/C 비 및 이론공연비 값 또한 위의 식으로부터 구한 각 계수로부터 구할 수 있다.

4. 실험결과

본 연구에서는 수소를 엔진에 활용할 경우 희박영역을 확장함으로써 효율 및 배출가스 저감 가능성을 검증하는 것이 필요하므로 연소안정성이 가장 우선적으로 확인이 되어야 한다. 따라서 수소연료의 비율에 따른 COV_{imep} 의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 공기과잉율(λ)이 증가하면서 COV_{imep} 값은 증가하지만 수소의 비율이 증가함에 따라 사이클 변동을 나타내는 COV_{imep} 값은 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 변화는 공기과잉율이 낮은 경우에는 영향이 미미하지만 공기과잉율이 증가하면서 크게 영향을 주고 있음을 알 수 있다. $\lambda=1.7$ 의 경우에는 수소가 전체 에너지의 9% 정도 공급될 경우 COV_{imep} 값이 5% 이하로 감소하여 안정된 연소상태를 확인할 수 있다. 희박한계(lean misfire limit)를 10%로 잡으면 $\lambda=2.0$ 인 경우에도 수소비율이 15% 만 확보되면 안정적 운전이 가능한 영역에 포함되는 것으로 나타나고 있다. 공기과잉율 2.0은 포트분사식 전기점화기관의 경우 수소첨가 없이는 불가능한 운전영역으로 판단되며 imep 4 bar 조건은 50% 부하 수준에 해당하므로 고부하 운전으로 가면 희박영역의 확장은 더욱 가능할 것으로 생각된다.

실제 엔진에 적용하기 위해서는 수소의 첨가비를

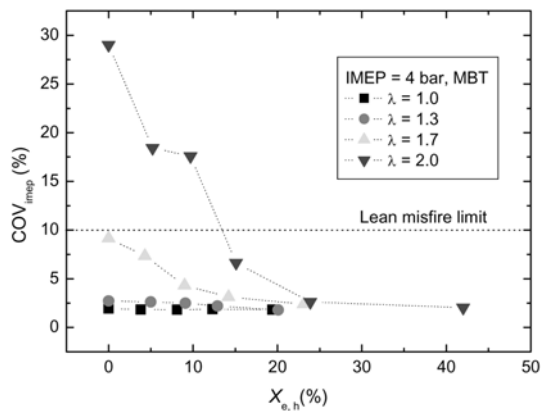


Fig. 3 COV_{imep} characteristics with hydrogen addition

을 가능한 줄이면서 안정된 연소조건을 확보하는 것이 중요하므로 $X_{e,h}=10\%$ ($X_{m,h}\approx 4\%$) 이하의 첨가를 통해 연소안정성 확보를 위한 연소기술개발이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 연료 성층화 기술이나 고압분사를 통해 연소실내 연료와 공기의 혼합을 연소안정성에 유리하도록 개선하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

수소의 첨가비율에 따라 최적점화시기(MBT)의 변화는 Fig. 4와 같이 나타났다. 희박한 영역으로 갈수록 점화시기는 빨라지지만 수소첨가에 의하여 점화시기는 상사점에 가깝게 이동하는 현상을 볼 수 있다. 상사점에 가까운 시점에서 점화가 일어나면 연소안정성이 향상되므로 앞의 사이클 변동에서도 나타났던 수소첨가로 인한 연소안정성 향상을 설명할 수 있다.

수소첨가에 따른 열효율을 비교하여 보면 Fig. 5에 나타난 것과 같이 희박해질수록 열효율은 증대하는 경향을 보여주지만 $\lambda=1.0, 1.3$ 에서는 수소첨가에 의한 열효율 향상이 거의 발견되지 않고 있다. 반대로 경우에 따라서 약간씩 감소하는 경향도 나타나고 있는데 이것은 수소의 연소가 진행되면 발열량이 급속히 커지므로 인해 연소실 내부 온도가 높아져서 열전달에 의한 열손실이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 더욱 희박한 $\lambda=1.7, 2.0$ 조건에서는 수소 비율의 증가가 열효율의 향상으로 나타나고 있으며 그 영향은 $\lambda=2.0$ 인 희박조건에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3에서와 같이 희박영역이 확대되면 수소첨가가 작을 경우

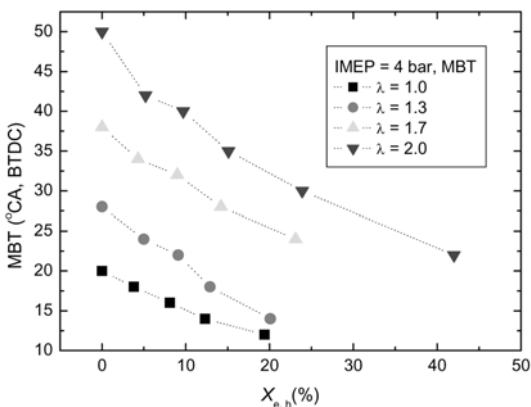


Fig. 4 MBT variation with hydrogen addition

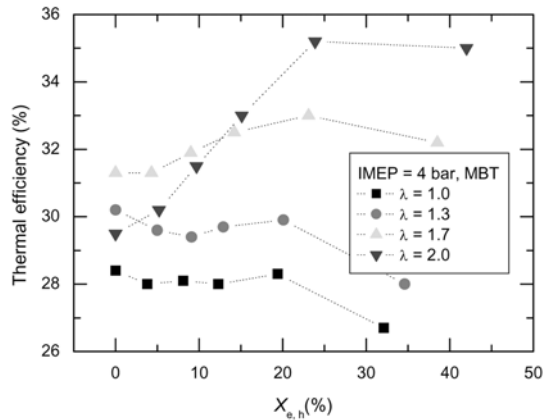


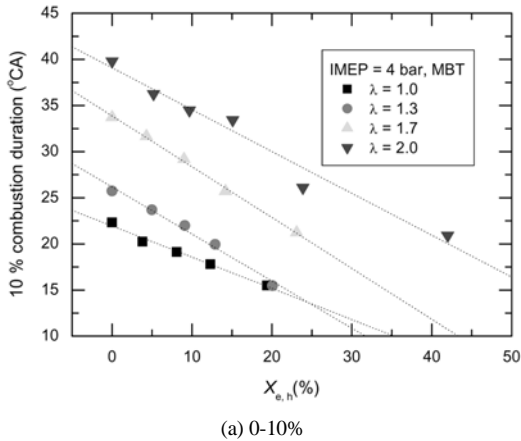
Fig. 5 Thermal efficiency characteristics with hydrogen

연소안정성이 떨어져 실화율이 높아지고 부분연소도 증대되어 효율이 급속히 떨어지는 것으로 생각된다. 그러나 수소비율이 높아지면서 이러한 현상이 해소되어 연소가 안정됨과 동시에 효율도 급격히 증대하고 있다. 그러나 모든 경우에 대하여 일정 비율이상의 수소공급은 열효율을 급격히 감소시키고 있음을 알 수 있다.

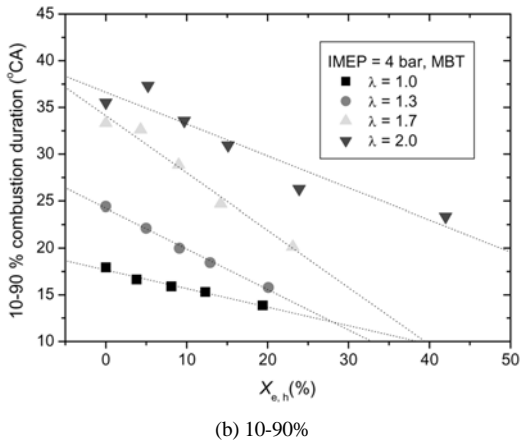
열방출량해석(heat release analysis)을 수행한 결과 연소기간(combustion duration)의 변화는 Fig. 6과 같이 나타났다. 연료와 공기의 혼합비가 농후할수록 수소 양이 증가할수록 연소기간은 짧아지고 있으며 수소비율의 증가에 의한 연소기간 감소는 거의 선형적인 특성을 보여주고 있다. 이것은 수소연료의 연소속도가 매우 빠르기 때문에 나타나는 결과로 볼 수 있다. 초기연소기간이 전체연소기간에 크게 영향을 미치기 때문에 수소의 연소특성을 이용하여 초기연소기간을 더욱 단축하여 급속연소를 실현할 수 있는 방법에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 배출가스비교를 위하여 주요 규제 대상인 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 탄화수소(THC)를 각 조건하에서 측정하였으며 Fig. 7-9는 그 결과를 보여주는 그림이다.

CO의 변화를 나타내는 Fig. 7을 보면 $\lambda=1.0$ 인 경우를 제외하고는 수소비율이 증가하면서 CO는 감소하는 경향을 보이거나 희박한 영역으로 갈수록 CO의 발생량은 크게 증가하는 것을 보여주고 있다. 그



(a) 0-10%



(b) 10-90%

Fig. 6 Burn duration characteristics with hydrogen addition

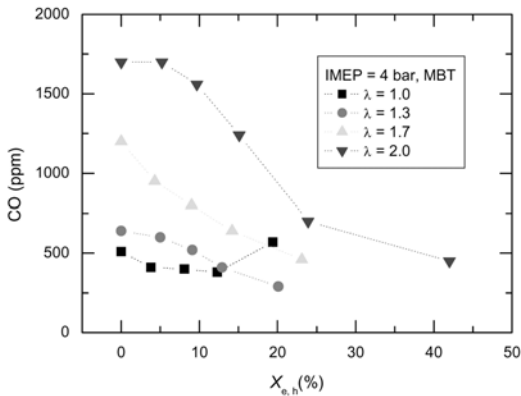


Fig. 7 CO characteristics with hydrogen addition

러나 희박한 경우에도 수소비율이 증가하면 CO 발생량은 $\lambda=1.3$ 수준으로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 수소 양이 늘어나기는 하지만 수소첨

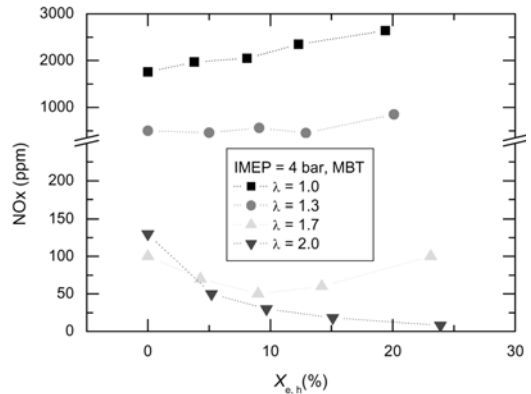


Fig. 8 NOx characteristics with hydrogen addition

가를 통해 CO의 발생을 상당 부분 저감할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 질소산화물(NOx)의 결과를 보여주는 것으로 수소첨가의 큰 장점 중의 하나를 나타내고 있다. $\lambda=1.0, 1.3$ 에서 NOx 발생량은 수소첨가로 약간 증가하는 듯한 경향을 보여주고 있고 그 절대량은 다른 두 경우와 비교하여 상당히 크게 나타나고 있다. $\lambda=1.7$ 의 경우도 절대량은 작지만 감소하다가 다시 증가하는 형태를 보여 준다. 이것은 희박조건이지만 수소 연소 시 연소온도가 상승하여 NOx 발생이 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 $\lambda=2.0$ 의 경우는 수소비율의 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보이며 절대량 또한 최고 1/100이하로 감소하는 결과를 보여주고 있다.

미연탄화수소(THC)의 발생은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 CO의 경우와 유사하게 희박영역에서 실화, 부분연소에 의해 발생량이 크게 증가하고 있다. 또한, $\lambda=1.7, 2.0$ 조건에서는 수소비율이 낮은 경우에 실화로 인한 THC 발생량이 증가하여 배기측정 장치의 측정범위(5000 ppmC)를 벗어나는 결과도 보여주고 있다. 현재의 결과는 THC의 경우에는 수소비율이 상당히 증가하여야 감소가 가능한 것으로 나타나고 있다. 이것은 수소를 첨가하여 희박연소의 확대를 실현할 경우 가장 큰 문제가 될 것으로 생각된다. 그러나 THC의 경우는 산화촉매장치를 이용하여 충분히 감소시킬 수 있으므로 촉매장치의 정화효율을 고려하여 THC 발생량을 제어할 수 있는 연구를 통해 해결이 가능할 것으로 판단된다.

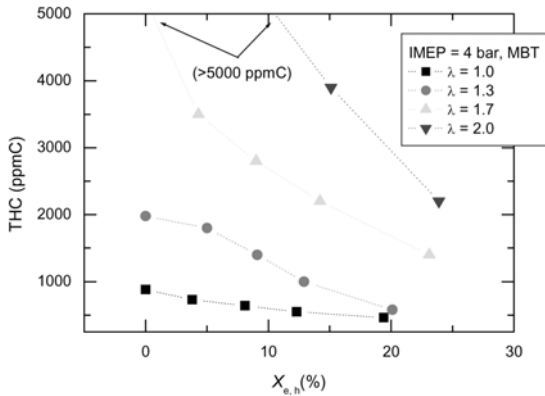


Fig. 9 HC characteristics with hydrogen addition

5. 결론

LPG 연료를 사용하는 전기점화엔진에서 수소연료를 부분적으로 첨가하여 연소 및 배출가스 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 한 결과, 전체적으로 수소연료의 첨가는 희박정도가 높은 경우($\lambda=1.7, 2.0$)에 영향이 크게 나타났으며 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수소첨가로 인하여 급속연소가 가능하여 MBT 점화시기는 지연되었으며 연소안정성(COV_{imep}) 또한 향상되었다.
- 2) $\lambda=2.0$ 인 경우 수소비율이 15% 확보시 $COV_{imep} = 10\%$ 이내로 운전이 가능한 영역에 포함되는 것으로 나타났다.
- 3) $\lambda=1.7, 2.0$ 인 경우 열효율은 수소연료첨가로 인하여 향상되지만 수소 첨가율이 일정비율 이상 증가시에 열효율이 오히려 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다.
- 4) CO, THC의 경우 수소첨가로 발생량이 전체적으로 줄어드는 결과를 얻었지만 NOx의 경우 $\lambda=2.0$ 을 제외하고는 수소에 의해 연소온도가 높아져서

오히려 증가하는 결과를 얻었다.

- 5) NOx의 발생은 수소첨가에 의한 희박영역확장이 가능하여 99% 이상 감소시킬 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, SAE, 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 Hydrogen-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) Y. T. Kim, C. M. Chung, D. Y. Jeong and J. T. Lee, "The Characteristics of Performance with the Change of Compression Ratio in Medium Duty Hydrogen-natural Gas Fueled Engine," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.382-387, 2005.
- 6) S. O. Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman and T. N. Veziroglu, "Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas-hydrogen Mixtures," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.29, pp.1527-1539, 2004.
- 7) R. Sierens, S. Verhelst, "A Hydrogen Fuelled V-8 Engine for City-bus Application," Int. J. Automotive Technology, Vol.2, No.2, pp.39-45, 2001.