

수소기관의 수소연료 희석에 의한 역화억제효과에 관한 연구

김서영[†], 김윤영*, 김용태*, 이종태**

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

A Study on Enhancement of Combustion Performance by Dilution of Hydrogen in Heavy-Duty Hydrogen Engine

S. Y. KIM[†], Y. Y. KIM*, Y. T. Kim*, JONG T. LEE**

*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.
300 Chunchundong Jangangu, Suwon, Gyeonggido, 440-746, Korea

ABSTRACT

Hydrogen gas has several merits such as lower ignition energy, wide flammability and shorter quenching distance. It leads to high thermal efficiency but backfire occurrence. In this study, feasibility of expansion of BFL(Back-Fire Limit) equivalence ratio and combustion characteristics by a dilution of hydrogen fuel are experimentally examined by using experimental heavy duty single cylinder hydrogen fueled engine. As results, it is found that BFL equivalence ratio is expanded to rich range and torque is increased.

주요기술용어 : Backfire(역화), Heavy duty hydrogen engine(대형수소엔진), Backfire limit equivalence ratio(역화한계당량비), Dilution by compressed natural gas(천연가스에 의한 희석)

1. 서 론

수소연료는 넓은 가연한계, 빠른 연소속도, 작은 소염거리, 높은 단열화염온도 등 탄화수소계 연료와는 상이한 독특한 특성을 갖고 있다. 즉 수소(H₂)의 층류화염속도는 약 170cm/s($\Phi=1$ 인 경

우)로 매우 빠르며 가연한계는 4~75%정도로 매우 넓어 초회박 운전영역에서도 안정된 운전이 가능하다¹⁾. 이와 같은 수소연료의 연소 특성은 희박혼합기 사용을 가능하게 하여 저부하영역에서 고효율 및 저배기를 실현시킬 수 있다. 그러나 고부하영역에서는 조기착화 및 역화 등 이상연소가 발생하고, 수소의 큰 비체적에 의한 흡기공기량 감소로 출력의 저하가 초래된다. 이로 인해 수소

[†] Corresponding author : secage@skku.edu

기관 개발의 주요 관점은 역화발생 억제와 출력 향상에 주목하고 있다.

저자들은 수소기관의 역화를 억제하기 위한 방법으로 연소실 벽표면 온도의 감소, 희박혼합기 사용 및 피스톤 crevice 내의 혼합기 역류 억제 등을 검토한바 있다. 수소기관 역화발생 원인중의 하나는 수소연료의 빠른 연소속도에 기인한다²⁾. 이것을 고려하면 수소연료에 상대적으로 연소속도가 늦은 이종연료를 첨가하면 역화 발생이 억제되고, 고부하영역 운전으로 출력확장도 도모할 수 있을 것으로 생각된다.

최근 저공해기관 연료로 인식되어 보급이 활성화되고 있는 천연가스는 층류연소속도가 40cm/s ($\phi=1$ 인 경우)로 가솔린에 비해 빠르지만 수소연료에 비해 현저히 늦은 특성이 있다. 가연한계는 체적비로 5~15% 로서 수소에 비해 좁으며, 소염거리도 1.2mm로 수소의 0.08mm에 비해 넓은 연소특성이 있다. 따라서 수소와 연소특성이 상반되는 천연가스를 수소연료에 첨가하여 독특한 수소 연소특성을 감쇄시킨다면 역화발생 방지 및 연소 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다³⁾.

본 연구에서는 상기 관점으로부터 수소연료를 천연가스로 희석하는 경우에 대해 역화발생 억제와 연소성능 향상의 가능성을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 중대형 단기통수소기관, 동력계, 수소 및 천연가스의 공급계통, 흡배기계 및 각부의 온도압력측정 장치로 구성된다.

Fig. 2는 실험에 사용된 중대형 수소 단기통기관의 실물사진이다. 수소기관은 1345cc, 압축비 10.9의 수냉식기관이다. 단기통 수소기관은 크게 크랭크 샤프트와 메인베어링 하우징을 포함한 크랭크 케이스부, 실린더 블록 및 플라이휠 부, 실린더 헤드 및 OHC 구동부와 오일공급장치 및 냉각계통으로 구성된다. 수소기관의 출력축에는 AC 동력계를 직결하였다. 수소와 천연가스는 고압 볼

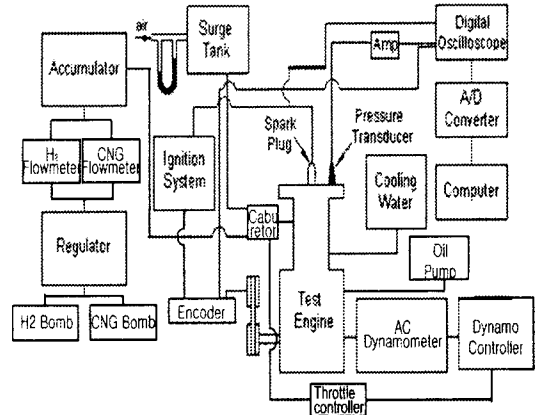


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

베로부터 1차 감압기에서 30bar로 감압되어 수소 및 천연가스 유량계를 거친 후 2차 압력조절기에서 4bar로 일정하게 공급된다. 수소와 천연가스의 공급방식은 별도의 인젝터로 공급되어 흡기관내에서 혼합되도록 하였다. 흡기관의 전방에는 약 200리터 용량의 서어지탱크를 설치하여 맥동현상을 최소화하였다. 흡입공기량은 서어지탱크 상부에 설치된 층류유량계로 측정하였다.

냉각방식은 실린더 헤드와 실린더 블록에 독립적으로 공급되는 강제순환 방식을 채택하였다. 실린더헤드에는 연소실내 압력측정을 위한 piezo타



Fig. 2. Photography of test engine

입의 압력변환기를 삽입하였다. 압력신호는 charge amp에 의해 증폭된 후, data recorder와 A/D 변환기가 내장된 컴퓨터로 입력되고 해석된다.

수소 희석율, R_{dH_2} 는 식 (1)에서 나타난바와 같이 전체 공급 연료량에 대한 천연가스 공급량의 체적비로 정의된다.

$$R_{dH_2} = \frac{V_{CH_4}}{V_{H_2} + V_{CH_4}} \quad (vol\%) \quad (1)$$

실험에서 수소 희석율은 5~30%까지 5%씩 단계적으로 변화시켰다. 연료공기당량비는 $\Phi = 0.5 \sim 0.9$ 까지 0.1씩 단계적으로 변화시켰다. 상기 실험 조건에서 기관부하는 전부하, 점화시기는 MBT, 기관회전수는 1400rpm, 냉각수온도는 70°C로 고정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수소연료 희석에 따른 연소특성

Fig. 3은 수소기관의 질량연소율을 수소희석율 변화에 대해 나타낸 것이다. 여기서 수소희석율 0%는 수소연료만으로 운전한 경우를 의미하며, 동일 연료공기당량비 조건에서 수소희석율이 증가함에 따라 천연가스 혼합비율은 증가된다. 그리고 연료공기당량비는 수소연료를 희석하지 않았을 때 역화가 발생하는 최대 연료공기당량비 근방인 $\Phi = 0.5$ 이다.

그림에 나타난바와 같이 질량연소율은 수소희석율이 증가할수록 감소되며, 또한 연소가 끝나는 시점, 즉, 질량연소율 100% 시점은 지연되는 것을 나타낸다. 이것은 층류연소속도가 낮은 천연가스의 첨가량 증가에 따라 희석된 수소연료의 연소속도가 늦어지는데 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 상기조건하에서 수소연료를 희석한 경우의 연소기간을 초기연소기간, 주연소기간 및

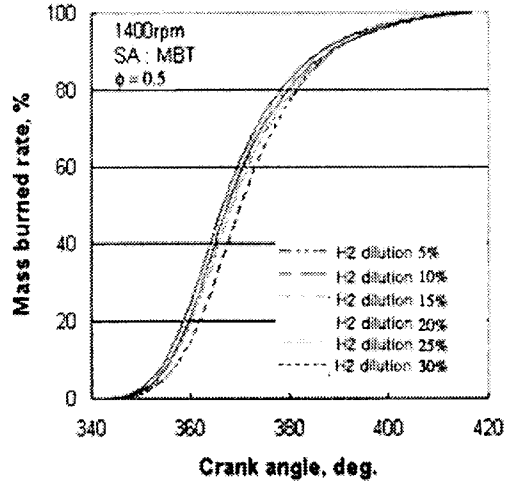


Fig. 3. Mass burned rate fraction with dilution rate of H_2

후연소기간으로 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 초기연소기간은 질량연소율 0~10%, 주연소기간은 질량연소율 10~90%, 후연소기간은 질량연소율 90~100%로 정의한 것이다.

전술한 바와 같이 수소연료에 천연가스연료를 첨가시켜 희석율을 증가시킴에 따라 연소기간은 선형적으로 증가하는 것을 나타낸다. 연소기간이 증가하는 기여도를 상술한 각 연소기간 별로 파

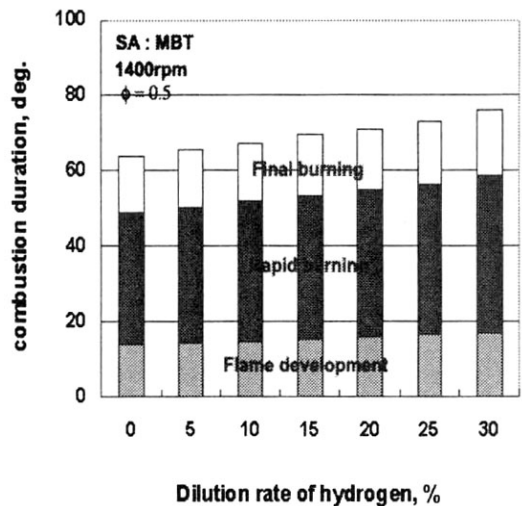


Fig. 4. Combustion duration with dilution rate of H_2

약하면 초기연소기간 및 주연소기간의 증가가 대부분이며, 후연소기간은 크게 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. 수소희석율이 증가함에 따라 초기연소기간 및 주연소기간이 증가하는 것은 점화에너지가 크고 가연한계가 좁고 연소속도가 낮은 천연가스연료성분의 증가에 의해 점화지연기간이 증가되고 연소속도가 감소되는데 의한 것이라 볼 수 있다. 상기 조건하에서 수소희석율을 30% 증가시키면 전연소기간은 18.7% 증가하며, 초기연소기간은 21.4%, 주연소기간은 20% 증가하는 것이 보여졌다.

수소를 희석시킴에 따라 연소속도가 늦어지는 것은 기관의 최대토크를 얻기위해 점화시기를 전각시켜야 된다는 것을 의미한다. 어느 정도 전각시켜야 되는 가를 파악하기 위해 각 연료공기당량비 조건에서 수소희석율을 증가함에 따른 수소기관의 최적점화시기(MBT)를 파악하였으며, Fig. 5에 그 결과를 나타낸다.

최적점화시기는 예측한대로 수소희석율이 증가될수록 전각되는 것을 나타내며, 이 경향은 연료공기당량비가 변화하여도 대체로 동일한 것을 보인다. 각각의 당량비에서 수소희석율에 대해 점화시기를 전각시키는 비율을 평균하면 약 4.6 degree/Rd_{H2} %이다.

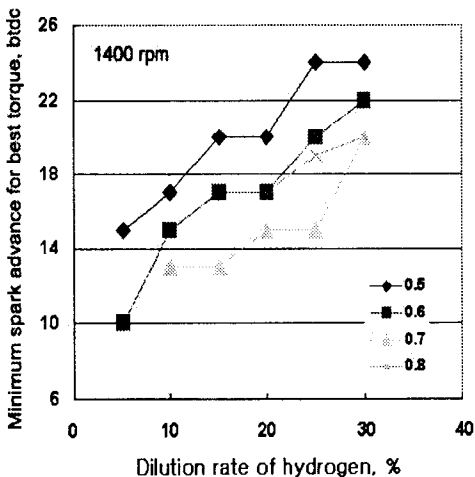


Fig. 5. MBT vs dilution rate of H₂

3.2 수소기관의 역화한계 당량비 확장

Fig. 6은 수소연료만으로 운전한 경우 중대형 수소 단기통기관의 역화발생영역을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 역화발생영역은 연료공기당량비 $\phi = 0.6$ 부근에서 나타나며, 그 이상의 연료공기당량비를 갖는 고부하영역에서 정상운전이 불가능하였다. 이와같이 중대형 수소 단기통기관의 역화발생영역이 비교적 희박한 영역에서 나타나는 것은 기관의 S/V 비, 압축비, 피스톤 탑랜드부 및 링구르브부 체적 등과 같은 형상인자가 크게 기인하는 것으로 생각된다.

역화 발생과 관련된 수소의 독특한 연료 물성치를 감쇄시키기 위해 수소를 천연가스로 희석시켰을 경우 확장되는 역화한계 당량비를 Fig. 7에 나타낸다.

여기서 역화한계당량비는 역화가 발생되기 직전에 공급되는 연료공기당량비로 정의하였다. 전술한 바와 같이 수소희석율이 0%인 경우에는 연료공기당량비 $\phi = 0.58$ 이상의 영역에서 역화가 발생된다. 그러나 수소가스에 천연가스를 첨가시켜 희석하면 역화한계당량비가 점차 증가하여 수소희석율 Rd_{H2} = 30%가 되면 이론연료공기비보다 약간 농후한 혼합기를 공급하여도 역화가 발생되지 않는 것을 보이고 있다.

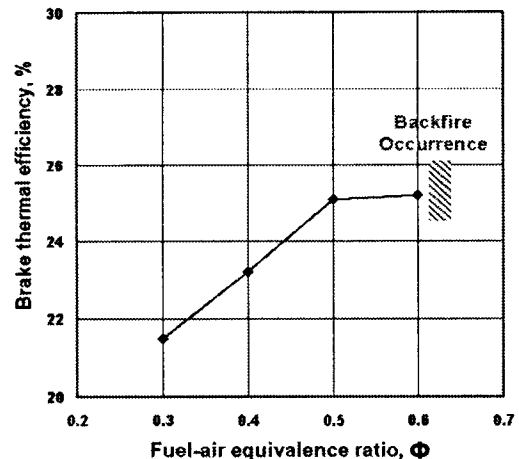


Fig. 6. Backfire limit equivalence ratio for Rd_{H2} = 0%

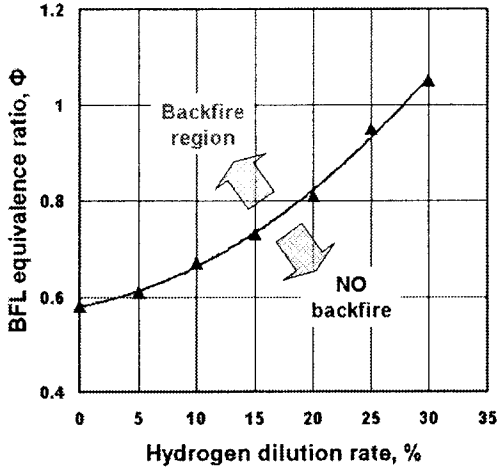


Fig. 7. BFL equivalence ratio versus hydrogen dilution rate

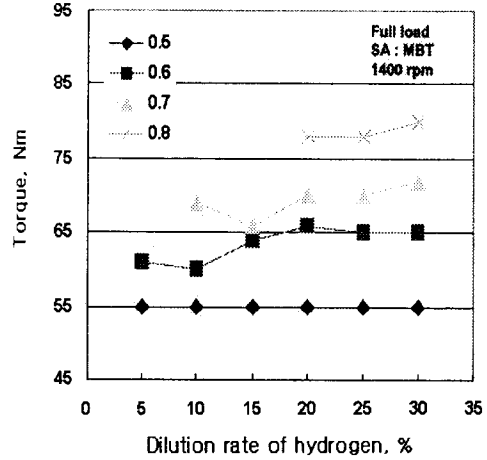


Fig. 8. Brake thermal efficiency versus dilution rate of H_2

역화발생은 실린더내에 모종의 원인에 의해 발생되는 착화원이 흡입되는 신기를 점화시켜 빠른 연소속도에 의해 화염이 흡기관쪽으로 역류되는데 기인하는 것으로 알려지고 있다. 수소에 천연가스를 첨가하여 희석하면 천연가스의 정적비열이 수소가스보다 큰 것에 의해 최고 연소가스온도는 오히려 감소된다. 이와 같은 실린더내 가스온도의 감소와 진술한 바와 같은 연소속도의 감소에 의해 수소 희석율이 증가되는데 따라 역화가 발생하는 연료공기당량비는 현저히 증가하는 것으로 파악된다.

3.3 수소희석율 변화에 따른 성능특성

Fig. 8은 수소 희석율의 변화에 대한 수소기관의 제동열효율을 각각의 연료공기당량비에 대해 나타낸 것이다. 각 연료공기당량비에서 수소기관의 열효율은 수소희석율을 증가시키기에 따라 전반적으로 감소되는 경향이다. 수소연료에 천연가스를 첨가시키면 혼합연료의 비열비는 감소하며, 또한 연소속도의 감소는 열손실의 증가로 이어진다. 이러한 부적합적인 원인들에 의해 수소희석율의 증가에 의해 열효율이 감소되는 것이라 볼수 있다. 열효율의 최대치는 수소희석율이 변화하여도

연료공기당량비 $\Phi = 0.6$ 부근임을 나타낸다. 천연가스 첨가에 의한 수소연료의 희석은 연소의 안정으로 이어지며 이로 인해 상기 연료공기당량비에서 열효율이 최대치를 보이는 것으로 생각된다. 이보다 농후하게 되면 낮은 연소속도를 갖는 천연가스 공급량이 증가되고 이보다 희박하게 되면 수소연료의 희석에 의한 연소속도 감소로 두 경우 모두 열손실량이 상대적으로 증가되는데 기인하여 열효율이 감소되는 것이라 생각된다.

Fig. 9는 각각의 연료공기당량비 하에서 수소의 희석율 증가에 따른 기관토크를 나타낸것이다. 그림에서 보는바와 같이 기관토크는 공급열량이 상대적으로 적은 $\Phi = 0.5$ 부근을 제외하고 수소희석율이 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 것을 보인다.

이와같이 각각의 연료공기당량비에서 수소 희석율에 대한 기관토크의 증감경향은 연료와 산화제의 반응 몰수 및 단위몰당 발열량의 차이에 의한 공급열량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

3.4 수소희석율 변화에 따른 역화 억제 효과

Fig. 10은 수소연료만으로 사용한 경우 역화발

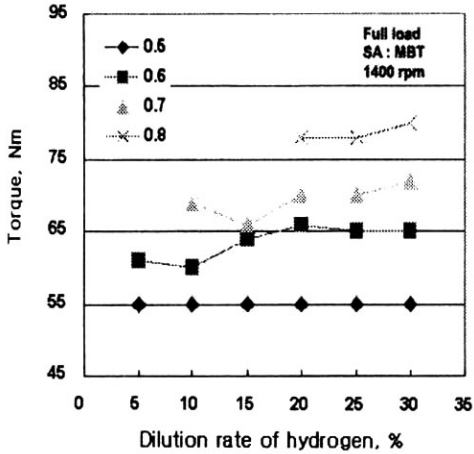


Fig. 9. Torque as a function of dilution rate of H₂

생에 의해 제한되는 최대토크와 수소 연료의 희석에 의해 역화발생을 억제한 경우에 발생하는 최대 토크 및 제동열효율을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 수소연료 희석율은 $Rd_{H_2} = 30\%$ 이며 기관회전수 1400rpm, 냉각수온도 70°C, 점화시기는 MBT이다. 그림에서 보는바와 같이, 수소희석율 0%인 경우 최대토크는 역화발생으로 60Nm정도를 나타내지만 수소희석율 30% 경우에는 역화한계당량비가 확장되어 82Nm까지 최대토크가 증

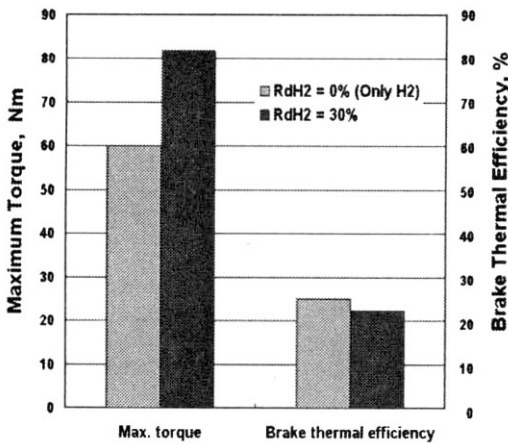


Fig. 10 Comparison of max. torque & thermal efficiency with $Rd_{H_2} = 0\%$ and $Rd_{H_2} = 30\%$

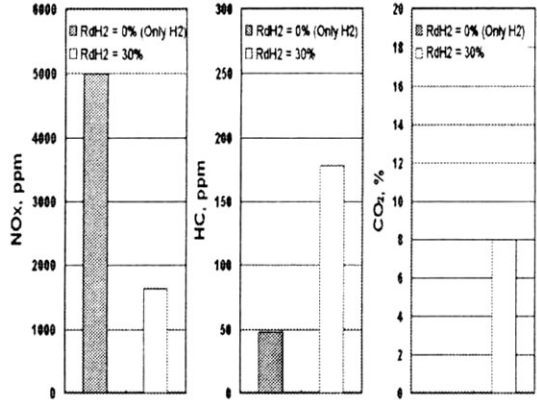


Fig. 11 Comparison of NO_x, HC and CO₂ with $Rd_{H_2} = 0\%$ and $Rd_{H_2} = 30\%$

가되는 것을 보이고 있다. 반면에 제동열효율은 수소희석율 30%인 경우 수소연료희석에 따른 비열비 및 연소속도의 감소에 기인하여 순수 수소연료만을 사용한 경우의 제동열효율에 비해 약간 낮은 22.1% 정도를 나타낸다.

수소희석율 0%와 30%인 경우의 NO_x, HC, CO₂ 배기특성을 비교하여 나타낸 것이 Fig. 11이다. NO_x는 수소희석율 0%의 경우가 높은 단열화염온도로 인해 5000ppm정도의 높은 배출 수준을 나타내지만 수소연료를 $Rd_{H_2} = 30\%$ 정도 희석시키면 대략 1640ppm까지 현저히 저감되는 것을 보이고 있다. HC는 수소-천연가스 혼합연료 기관의 경우 연소효율 저감으로 수소기관의 48ppm 보다 높은 178ppm을 나타내었다. 수소기관의 경우 연료성분중에 C성분을 함유치 않아 배기가스 농도 중 CO₂는 검출되지 않았으나 수소희석율 $Rd_{H_2} = 30\%$ 에서는 8%정도의 배출을 나타내었다.

이와같이 수소연료를 희석시킬 경우 제동열효율과 HC 및 CO₂ 측면에서는 불리하지만, 역화발생을 방지하면서 수소기관 대비 최대토크 37% 증가, NO_x 67% 저감효과를 얻을 수 있었다. 상기 결과는 수소연료를 희석함에 따라 역화를 억제함과 동시에 고출력을 달성할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결론

중대형 수소기관에 대하여 수소연료의 희석율 증가에 따른 연소특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 수소연료를 천연가스로 희석시킨 결과 수소의 빠른 연소 특성이 상쇄되어 연소기간이 증가되었고, 이로 인한 영향으로 수소희석율 30%(vol)인 경우 역화가 발생하는 연료공기당량비를 약 $\Phi = 1.05$ 까지 확장시킬 수 있었다. 또한 역화한계당량비의 확장에 의한 공급열량의 증가로 인해 기관토크는 수소가스만으로 운전한 경우보다 약 37%정도 증가하는 것이 보여졌다.

후 기

본 연구는 에너지·자원 기술개발사업 및 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 이종태, “수소기관의 개발현황 및 특성”, 한국자동차공학회, 학회지 Vol No.1 1996.6, pp.55-62
- 2) 이창욱, 오태석, 김윤영, 이종태, “Piston top land부의 crevice volume의 크기 가 역

- 화한계에 미치는 영향”, 한국수소에너지학회, 춘계학술대회 초록집, 1996.5, pp.44-49
- 3) 김윤영, 강정호, 이종태, “고출력 저배기 CNG기관의 개발을 위한 실린더내 직접 분사방식의 검토”, 한국자동차공학회, 춘계학술대회 논문집, 2001. 11, pp. 196-202.
 - 4) 임희수, 김윤영, 이종태, “중대형 수소-천연가스 기관의 수소혼합을 변화에 대한 연소 및 배기특성”, 한국수소 및 신에너지학회, 춘계학술대회 초록집, 2003.6
 - 5) 권오채, “수소-공기 화염의 안전성 향상을 위한 프로판 첨가 효과”, 한국수소 및 신에너지학회, vol. 15, No. pp.12-22 2004.3
 - 6) S.O rhan u Akansu, Zafer Dulger, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures" International Journal of Hydrogen Energy Vol. 29, 2004, pp. 1527-1539
 - 7) Per Tunestal, Magnus Christensen, Patrik Einewall, Tobias Andersson, Bengt Johansson, Owe Jonsson : "Hydrogen Addition For Improved Lean Burn Capability of Slow and Fast Burning Natural Gas Combustion Chambers", SAE 2002-01-2686.