KIGAS Vol. 14, No. 4, August, 2010
(Journal of the Korean Institute of Gas)

대형 천연가스엔진에서의 수소 첨가에 의한 희박연소특성 연구

†박철웅* · 김창기 · 최 영 · 원상연
*한국기계연구원 그린동력연구실
(2010년 1월 28일 접수, 2010년 8월 5일 수정, 2010년 8월 21일 채택)

A Study on Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a Heavy Duty Natural Gas Engine

†Cheol Woong Park* · Chang Gi Kim · Young Choi · Sang Yeon Won
*Engine research team, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea
(Received 28. January. 2010, Revised 5. August. 2010, Accepted 21. August. 2010)

요 약

자동차 연료로서의 천연가스는 고옥탄가, 넓은 연소 한계, 낮은 미연탄화수소 배출 특성, 지구 온난화 물질인 CO_2배출 저감 등 디젤과 가솔린을 대신할 수 있는 현실성 있는 대체연료이다. 그러나 희박운전 영역에서는 느린 연소속도 등으로 연소가 불안정해지고 유해 배기가스가 증가하는 단점이 있다. 수소의 첨가는 연소속도를 빠르게 하고 가연한계를 확장시켜 초희박 영역에서도 안정된 운전을 가능하게 하며, NOx의 저감에 유리하다. 본 연구에서는 대형 수소-천연가스 혼합연료 엔진에서 수소 첨가에 따른 기본 연소특성과 희박영역 확장, 배기성능 및 효율 특성에 대해 검토하였다.

Abstract - Natural gas is one of the most promising alternatives to gasoline and diesel fuels because of its high thermal efficiency and lower harmful emissions, including CO_2. However, the possibility of partial burn and misfire makes the benefits of natural gas fueled engine worse under lean burn operation condition, Hydrogen addition can promote the combustion characteristics while reduces emissions extremely. In this study, the effect of hydrogen addition on an engine performance was investigated. The results showed that thermal efficiency was increased due to the expansion of lean operation range under stable operation. NOx emission can be significantly reduced with the small increase in HC or CO emissions.

Key words : Heavy Duty Natural Gas Engine, Lean Combustion, Hydrogen Addition, Combustion Stability

I. 서 론

천연가스는 탄화수소 계 연료 중 탄소성분이 가장 적은 청정연료로서 기존의 가솔린 및 디젤 연료에 비해서 HC와 CO의 저감이 가능한 장점이 있다. 그러나 차기 자동차 유해배출가스 규제와 이산화탄소로 대변되는 온실가스 규제를 동시에 만족시키기 위해서는 기존 엔진의 기술 개선이나 신형식 엔진의 개발이 필수적이며, 이러한 노력을 통해 친환경자동차기술을 확보하는 것이 치열해지는 국가경쟁에서 살아남을 수 있는 관건으로 부각되고 있는 실정이다.

천연가스 연료의 높은 옥탄가는 엔진에서의 고압축비화를 통한 고출력 및 고효율 화를 실현시킬 수 있으나, 희박운전 영역에서는 좁은 가연한계와 느린 연소속도 등으로 연소가 불안정해지고 유해 배기가스가 증가하여 강화되는 배기규제를 만족하기에는 어려움이 있다[1,2].

한편 수소는 넓은 가연한계, 빠른 연소속도, 짧은 소염거리, 높은 단열화염온도 등 탄화수소계 연료와는 상이한 연소 특성을 갖고 있다. 이러한 연소특성은 초희박 연소를 가능하게 하여 저부하 영역

†주저자:cwpark@kimm.re.kr

에서의 고효율 및 저배기를 실현시킬 수 있는 장점이 있다.[3-5] 특히, 수소는 입자상 물질 또는 THC, CO 등의 유해 배기가스의 배출이 없는 청정연료이기 때문에 이를 천연가스에 첨가, 희박 운전함으로써 엔진의 성능향상을 도모할 수 있다.[6,7]

수소를 내연기관에 활용하는 기술은 1800년대 초부터 연구되어 왔으며, 천연가스에 수소를 첨가하여 희박 운전 범위를 확대하는 한편 유해 배출가스를 감소시키는 기술이 소개되어 왔다[8,9] 그중에서도 수소를 체적비 20% 첨가한 HythanTM(Hydrogen Consultant Inc.)연료가 많이 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 대형 수소-천연가스 엔진의 적용가능성을 파악하고 최적화시키기 위한 기초연구로서 실제 엔진을 대상으로 수소를 체적비율로 30% 혼합한 천연가스를 사용하였을 때의 연소촉진효과를 규명하고자 하였다. 아울러 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 민감한 영향을 미치는 공기과잉율을 변화시킬 경우, 엔진의 기본 연소특성과 배기 성능 향상 및 효율 변화를 검토하여 대체연료로서의 적용성을 검토하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

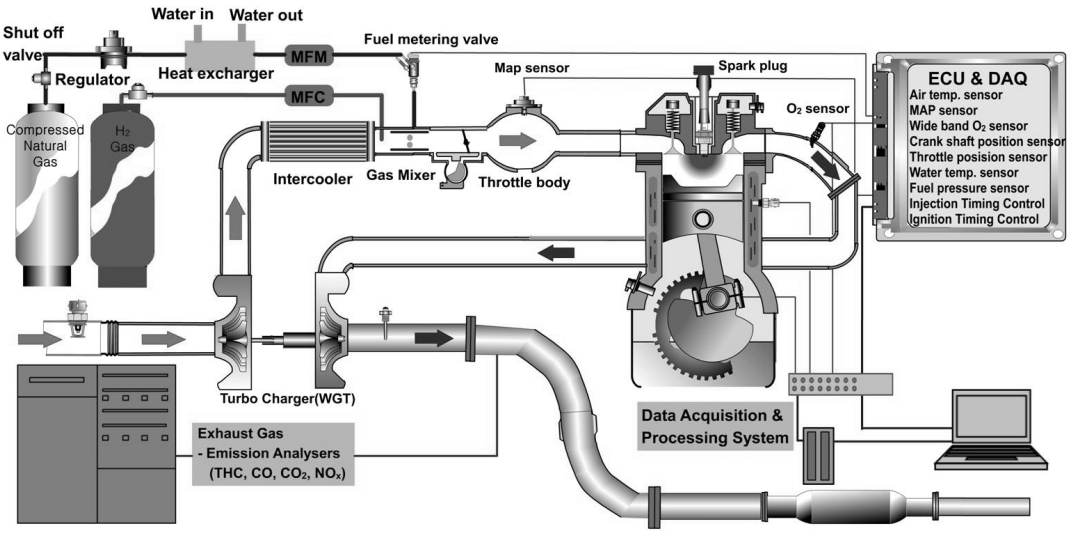
본 연구에서는 대형 천연가스 엔진에서 수소첨가에 따른 영향을 실제 엔진을 통해 검토하기 위해서 11L급 6기통 천연가스 엔진을 설치하여 기본적인 성능 실험을 하였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 천연가스 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었으며, 기존 엔진을 기초로 하여 고압 천연가스 및 수소 공급 및 제어를 위한 여러 가지 시스템을 추가하였다.

주연료인 천연가스는 실제 엔진에서 사용되는 연료공급시스템을 사용하여, 20 MPa 정도로 충전된 고압연료용기로부터 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압된 연료가 Metering valve및 Mixer를 통하여 흡기매니폴드로 공급되도록 하였다. 이때 연료량은 가스분사기 8개가 하나의 모듈을 구성하는 Metering valve에 의해 제어되었으며, 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 열교환기를 장착하였다.

Table 1. Specification of base diesel engine.

Type	Description
Number of cylinder	6
Bore (mm)	123
Stroke (mm)	155
Displacement volume (cc)	11,050
Compression ratio	10.5
Max. power	213 kW / ,2,200 rpm
Max. Torque	1,226 N · m / 1,260 rpm

Fig. 1. Schematic of experimental setup.



수소연료는 12 MPa로 충전된 여러 개의 고압수소 가스용기를 병렬로 연결하고 압력조정기를 이용하여 0.8 MPa의 압력으로 감압한 후 MFC(Mass flow controller)로 전해진 뒤, 믹서 전단에서 공급하여 흡입공기와 섞인 후 흡기매니폴드로 공급되도록 하였다.

천연가스의 유량측정은 MFM(Mass flow meter)를 이용하였고, 수소유량은 MFC를 이용하여 직접 제어하였다. 컴퓨터에 의해 제어되는 EMS(Engine management system)을 이용해 천연가스 연료의 분사량과 분사시기 및 점화시기를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. 엔진의 회전수 및 부하는 와전류식 동력계를 이용하여 제어하였고, 엔진의 회전수 및 스로틀 개도 등 엔진 제어변수를 모니터링하였다. 공연비 측정은 LA 4 lambda meter(ETAS Co.)를 이용하였고, 연소해석을 위한 연소압력측정은 연소해석기와 점화플러그형 압력센서를 사용하여 실시간으로 연소압력 데이터를 취득하였다. 주요 배출가스 CO, THC, NOx는 배출가스 분석장치(MEXA7000, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

2.2. 실험방법

본 연구의 대상이 되는 차량은 대형버스차량으로서, 시험 시 운전조건은 대상차량의 주요 운전영역인 1,260 rpm / BMEP 0.4MPa로 설정하였다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 82.5 ± 2.5℃에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 공연비는 전 실험구간에서 공기과잉율이 λ=1.3에서부터 0.1 단위로 증가시키면서 희박한계까지 변화시켰다. 각각의 실험조건에 대해 점화시기를 변경하여 MBT(Minimum advance for best torque)를 찾았으며 연료에 따른 효율, 배기가스 배출량, 연소안전성 등을 검토하였다.

엔진에 공급되는 연료는 기존 천연가스 연료와 수소가 체적비율 30% 혼합된 연료를 사용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

희박연소시의 효율은 부하와 연소안정성의 영향에 의하여 그 결과가 나타나는데 저회전수, 저부하 영역에서와 같이 연소 안정성이 좋지 않은 상태에서 희박운전범위가 확대되면 사이클 변동성이 급격히 악화되어 희박연소에 의한 효율개선 효과는 제한적이다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 중속 중부하 영역에서는 보다 많은 양의 연료 분사로 인해 연소안정성이 확보된 영역이기 때문에 어느 정도의 연료 소비율의 감소에 의한 효율의 증가가 가능하다.

공기과잉율에 따른 MBT의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 희박한 영역으로 갈수록 화염전파속도가 느려져 점화시기는 진각되었으며, 수소첨가시에는 수소의 빠른 연소속도에 의하여 점화시기가 지각되었다. TDC(Top dead center) 가까운 시점에서 점화가 일어나면 연소안정성이 향상되므로 수소첨가로 인한 연소안정성 향상을 기대할 수 있다.

수소첨가에 따른 열효율을 비교하여 보면 Fig. 3에 나타난 것과 같이 희박해질수록 열효율은 증대하는 경향을 보여주지만 각각 최대효율을 나타내는 공기과잉율 조건보다 희박해질 경우 연소안정성의 악화로 효율이 감소되었다. 수소를 첨가하게 되면 수소연료의 특성상 λ=1.9 이상의 희박조건에서 운전이 가능하기 때문에 천연가스만 사용된 경우에 비해 높은 열효율을 얻을 수 있다.

그러나 일정한 공기과잉율 조건에서 수소첨가는 낮은 효율을 보이고 있다. 이는 수소의 빠른 연소속도에 의해 연소실 내부 온도가 상승하여 열전달에 의한 열손실이 증가하였기 때문으로 판단된다. Fig. 4에 나타낸 배기가스 온도의 결과도 이러한 결과를 반영하고 있음을 알 수 있다. 일반적으

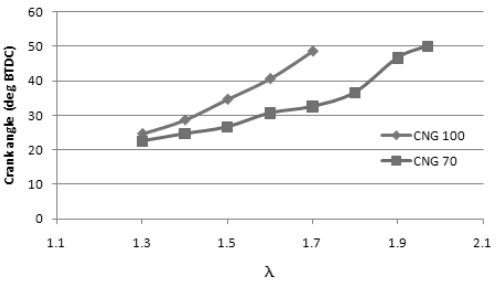


Fig. 2. Effect of hydrogen addition on MBT timing.

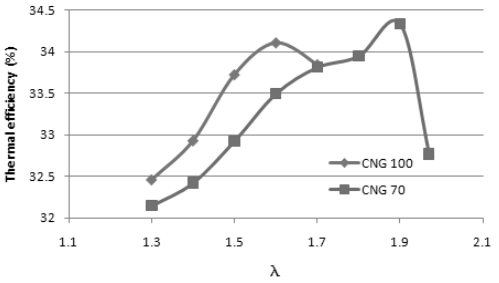


Fig. 3. Effect of hydrogen addition on thermal efficiency.

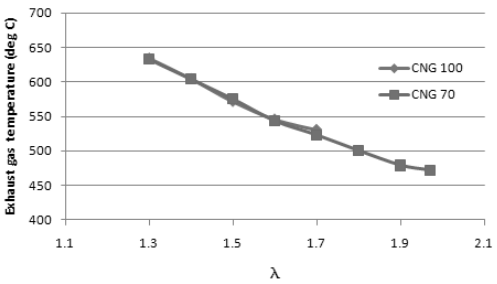


Fig. 4. Effect of hydrogen addition on exhaust gas temperature.

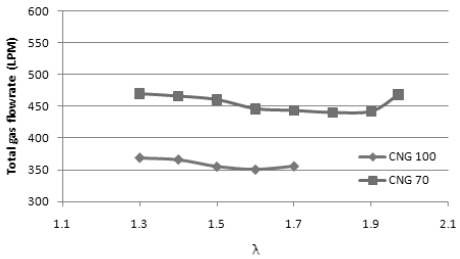


Fig. 5. Effect of hydrogen addition on total gas flowrate.

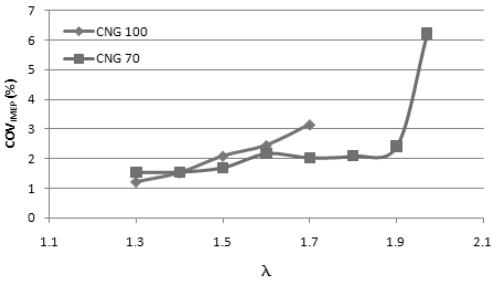


Fig. 6. Effect of hydrogen addition on combustion stability.

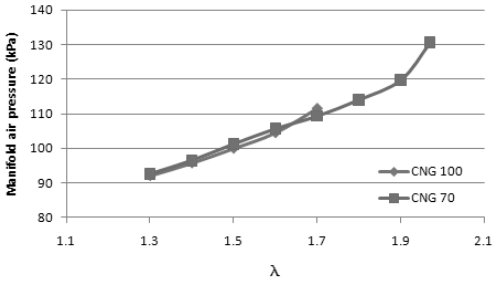


Fig. 7. Effect of hydrogen addition on manifold air pressure.

로 효율이 감소하게 되면 연소시 일발생에 기여하지 못한 연료의 후연소 또는 열발생에 의해 배기가스온도가 증가하게 된다. 그러나 수소를 첨가한 경우와 그렇지 않은 경우의 배기가스 온도가 거의 비슷한 것은 수소 연료의 에너지가 배기가스에 의한 손실보다는 연소실 내부의 열전달에 의해 손실되었음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

수소 연료의 체적당 발열량이 천연가스 연료에 비해 낮기 때문에, 수소첨가시 공급되는 가스연료의 전체유량은 증가하게 된다. 공연비 변화에 따른 전체가스유량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 공기과잉율이 증가할수록 효율이 증가하기 때문에, 동일 출력을 내기위해 필요한 연료의 량이 감소하는 결과를 보이고 있다. 30% 수소첨가시 공급가스유량의 증가는 평균적으로 약 127%이며, 이는 수소첨가 연료를 사용할 경우 동일 거리를 주행하기 위해 연료탱크의 체적이 기존 천연가스용 연료탱크에 비해 27% 정도 증가하여야 함을 나타낸다. 그러나 수소첨가시 효율향상을 고려하면 동일한 연료탱크를 사용하더라도 주행거리의 확보가 가능할 것으로 사료된다.

연료에 수소를 첨가한 경우 희박영역이 확대됨으로써 효율 및 배출가스 저감 가능성을 검증하는 것이 필수적이지만 연소안정성을 확보하는 것 또한 중요한 요소 중의 하나이다. Fig. 6은 수소연료 첨가시 공연비에 따른 연소안정성을 나타낸 그래프이다. 공기과잉율이 증가하면서 값은 증가하지만 수소의 첨가에 따라 사이클 변동을 나타내는 COV_{IMEP} 값은 감소하고 있음을 알 수 있다.

공기과잉율이 낮은 경우에는 천연가스만으로도 안정적인 연소가 확보되기 때문에 수소첨가에 의한 영향이 크지 않지만, λ=1.7 이상으로 희박연소조건이 되면 수소에 의한 영향으로 COV_{IMEP} 값이 3%이하의 안정된 연소상태가 유지된다.

Fig. 7은 공기과잉율에 따른 흡기매니폴드의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 공기과잉율이 증가할수록 요구되는 공기의 량이 증가하기 때문에 흡기매니폴드의 압력이 증가하고 있으며, 이는 희박연소의 고압축비화에 의한 열효율 증대 가능성을 보여주는 결과라 할 수 있다. 수소를 첨가하더라도 첨가하지 않은 경우와 거의 같은 값의 흡기매니폴드의 압력 결과를 보이고 있다. 수소의 체적당 발열량이 낮기 때문에 전체 연료의 유량은 증가하게 되지만, 수소의 이론공연비 연소에 필요한 공기의 량이 천연가스에 비해 감소하기 때문에 수소를 첨가하더라도 연료-공기 혼합기의 유량은 변하지 않았음을 알 수 있다.

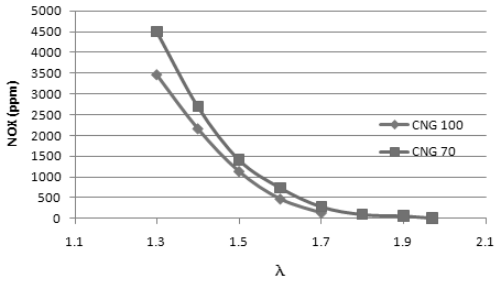


Fig. 8. Effect of hydrogen addition on NOx emissions.

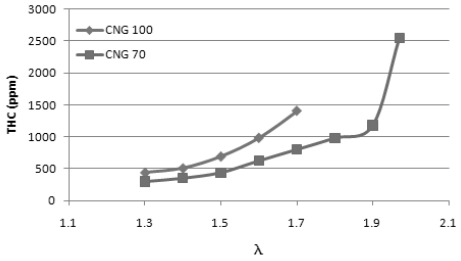


Fig. 9. Effect of hydrogen addition on THC emissions.

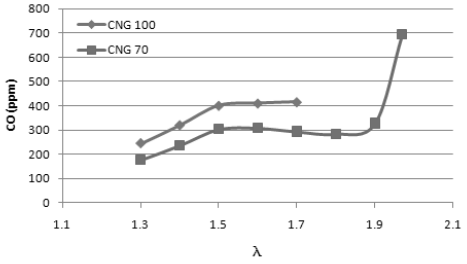


Fig. 10. Effect of hydrogen addition on CO emissions.

공기과잉율에 따른 NOx 배출 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 일정한 공기과잉율 조건에서는 수소의 첨가에 따라 NOx가 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 수소의 높은 단열화염온도에 의해서 연소가스의 온도가 상승하여 NOx 생성을 촉진하게 된다. 한편, 희박영역으로 갈수록 연소가스의 온도가 감소하기 때문에 NOx의 배출량은 현저하게 감소하는 것으로 판단된다. 각각의 연료조성에 대하여 최적효율을 나타내는 운전조건에서의 NOx 배출을 비교하면 수소를 첨가하여 연소안정성이 확보되는 영역인 λ=1.9 조건에서 희박연소 운전을 할 경우 천연가스 연료만으로 운전되는 상용엔진의 운전조건에서 배출되는 NOx의 량에 비해 약 90%의 NOx 저감이 가능하였다.

Fig. 9와 Fig. 10에 각각 공기과잉율의 변화에 따른 THC와 CO 배출을 나타내었다. 일반적으로 희박연소 과정시 완전연소 가능성의 증대로 THC와 CO가 감소될 수 있으나, 대형 천연가스 엔진의 특성상 느린 화염전파속도는 온도가 상대적으로 연소실 벽면에서의 소염 경계층 형성으로 인해 THC와 CO가 증가하였다. 그러나 천연가스에 수소를 첨가시 전체 연료중의 탄소성분이 감소하고 수소의 빠른 연소특성으로 인해 THC와 CO의 배출이 모두 감소하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 대형 천연가스 엔진을 대상으로 수소를 첨가하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 천연가스에 수소를 첨가한 경우 희박연소영역은 λ=1.9이상으로 확대되었으며, 운전영역이 희박연소영역으로 갈수록 효율은 증가하다가 최대효율조건보다 희박하게 되면 감소하였다.

2) 희박한 영역으로 갈수록 화염전파속도가 느려져 점화시기는 빨라지지만, 수소첨가시에는 수소의 빠른 연소속도에 의하여 점화시기는 상사점에 가깝게 지각되었다.

3) 수소의 빠른 연소속도에 의해 연소실 내부 온도가 상승하여 열전달에 의한 열손실이 증가하여 일정한 공기과잉율 조건에서의 수소첨가는 효율 감소로 나타났다.

4) 수소를 첨가하면 수소의 높은 단열화염온도에 의해 연소온도가 상승하여 NOx의 배출이 증가하고 THC, CO는 감소하지만, λ=1.9까지 확장된 희박연소영역에서의 운전으로 90% 정도의 NOx 저감을 기대할 수 있다.

참고문헌

[1] 김창업, 김창기, 김승수, 방효선, 한정옥, 조양수, “전부하시 희박영역에서의 천연가스엔진 성능향상에 관한 연구”, Transaction of KSAE,

4(6), 11-17, (1996)

[2] 이춘희, 최병철, 정우남, “희박 천연가스 자동차용 NOx 흡착촉매와 삼원촉매의 NOx 반응특성 비교”, KSAE Spring conference, 579-584, (2004)

[3] 임희수, 김윤영, 이종태, “수소 첨가에 의한 중대형 천연가스 기관의 기관 성능 향상”, KSAE Fall conference, 163-169, (2003)

[4] Hupperrich, P, Durnholz, M, ″Exhaust Emissions of Diesel, Gasoline and Natural Gas Fueled Vehicles″, SAE technical paper 960857, (1996)

[5] 김서영, 김윤연, 김용태, 이종태, “수소기관의 수소연료 희석에 의한 역화억제효과에 관한 연구”, J. of Korean Hydrogen and New Energy Society, **15**(4), 348-354, (2004)

[6] Michael, R.S., Mirza, J.Y., Zafer, D, Mattew, N.S., ″The Effects of Hydrogen Addition on Natural Gas Engine Operation″, SAE technical paper 932775, (1993)

[7] Nagalingam, B, Duebel, F, Schmillen, K, ″Performance study using natural gas, hydrogen supplemented natural gas and hydrogen in AVL research engine″, Int. J. of Hydrogen Energy, **8**(9), 715-720 (1983)

[8] 김용태, 정찬운, 정대용, 이종태, “압축비 변화에 대한 중형 수소-천연가스기관의 성능특성”, KSAE Spring conference, 382-387, (2005)

[9] Akansu, S.O., Dulger, Z, Kaharaman, N, Veziroglu, T.,N., ″Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas-hydrogen Mixtures″, Int. J. of Hydrogen Energy, **29**(14), 1527-1539, (2004)