

HCNG 엔진의 NO_x 배출특성에 관한 연구

박철웅* · 김창기 · 최영 · 원상연 · 이선엽

한국기계연구원 그린동력연구실

A Study on the NO_x Emission Characteristics of HCNG Engine

Cheolwoong Park* · Changgi Kim · Young Choi · Sangyeon Won · Sunyoup Lee

Environmental System Research Division / Engine Research Team, Korea Institutes of Machinery & Materials,
104 Sinseongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 23 August 2010 / Accepted 14 January 2011)

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 CO₂. Although the high octane value of natural gas increases engine output and efficiency due to the high compression ratio, this fuel is prone to such difficulties as a narrow limit of inflammability and a slow combustion speed in the lean burn operation domain, leading to unstable combustion and higher emissions of harmful exhaust gases. Hydrogen blended with natural gas can extend the lean burn limit while maintaining stable, efficient combustion and achieving lower NO_x, hydrocarbon and green house gas emissions. In this study, the effect of hydrogen addition on an engine performance and NO_x emission characteristics was investigated in a heavy duty natural gas engine. The results showed that thermal efficiency was increased and NO_x emissions were reduced due to the expansion of lean operation range under stable operation. NO_x emission can be significantly reduced with the retard of spark advance timing.

Key words : Heavy duty natural gas engine(대형 천연가스 엔진), Lean combustion(희박연소), Hydrogen addition(수소첨가), Combustion stability(연소안정성)

Nomenclature

- MBT : minimum spark advance for best torque, degree
- COV_{IMEP} : coefficient of variation of indicated mean effective pressure, %
- CAD : crank angle degree, degree

1. 서론

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

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

소염거리, 높은 단열화염온도 등 탄화수소계 연료와는 상이한 연소 특성을 갖고 있다. 이러한 연소특성은 초회박 연소를 가능하게 하여 저부하 영역에서의 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, 회박 운전함으로써 엔진의 성능향상을 도모할 수 있다.^{6,7)}

이러한 수소연료의 장점을 이용한 HCNG 엔진은 수소와 천연가스를 혼합한 연료를 사용하는 엔진을 의미하며 CNG만 사용하였을 경우보다 회박연소 한계를 확장시킬 수 있고 NOx와 CO₂의 저감이 가능하다. 따라서 수소와 천연가스의 연료 공급 및 이용에 대한 연구는 수소 에너지 시대를 준비하고자 하는 가교 역할을 하게 될 것이다.

수소를 내연기관에 활용하는 기술은 1800년대 초부터 연구되어 왔으며, 천연가스에 수소를 첨가하여 회박 운전 범위를 확대하는 한편 유해 배출가스를 감소시키는 기술이 소개되어 왔다.^{8,9)} 그중에서도 수소를 체적비 20% 첨가한 Hythan™(Hydrogen Consultant Inc.) 연료가 많이 알려져 있다. 이전의 실험결과를 통해 수소혼합비율이 증가할수록 회박영역의 확장을 통한 효율증가와 NOx 저감을 확인하였으나, 수소혼합비율 40% 이상의 경우 체적당 발열량이 낮은 수소연료의 특성상 버스차량용 연료로서 주행거리가 짧아질 수밖에 없는 단점이 있다.¹⁰⁾

이에 본 연구에서는 대형 수소-천연가스 엔진의 적용가능성을 파악하고 최적화시키기 위한 기초연구로서 실제 엔진을 대상으로 수소를 체적비율로 30% 혼합한 천연가스를 사용하였을 때의 연소안정성 및 NOx 저감 측면에서 최적인 제어방안을 제시하고자 하였다. 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 민감한 영향을 미치는 공기과잉율 또는 점화시기의 변화에 대한 효율 및 배기 성능의 Trade-off 특성을 비교하였다. 아울러 연료 내 수소함유율의 편차에 기인하는 엔진의 성능 및 배출가스 편차변화를 검토하여 대체연료로서의 적용성을 검토하였다.

2. 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 감

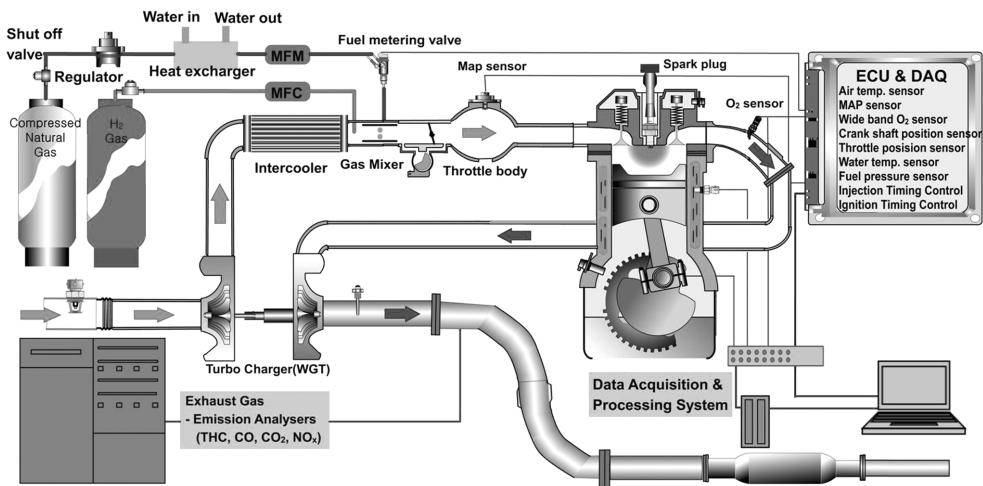


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Specification of base natural gas 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

압된 연료가 Metering valve 및 Mixer를 통하여 흡기 매니폴드로 공급되도록 하였다. 이때 연료량은 가스분사기 8개가 하나의 모듈을 구성하는 Metering valve에 의해 제어되었으며, 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 열교환기를 장착하였다.

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 스톱을 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. 주요배출가스 CO, THC, NOx는 배출가스 분석장치(MEXA7000, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

2.2 실험방법

본 연구의 대상이 되는 차량은 대형버스차량으로서, 시험 시 운전조건은 대상차량의 주요 운전 영역인 1,260 rpm / 600 Nm로 설정하였다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 $82.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 공연비는 전 실험구간에서 공기과잉율이 $\lambda=1.3$ 에서부터 0.1 단위로 증가시키면서 희박한계까지 변화시켰다. 각각의 실험조건에 대해 점화시기를 변경하여 MBT(Minimum advance for Best Torque)를 찾았으며 연료에 따른 효율, 배기가스 배출량, 연소안정성 등을 검토하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공기과잉율에 따른 영향

천연가스는 옥탄가가 120정도로 높기 때문에 일반적인 가솔린 엔진보다 압축비를 높이고도 노킹없이 운전이 가능하며 이를 통해 열효율과 출력향상을 도모할 수 있다. 또한 연소 한계범위가 넓어서 희박연소의 실현이 용이하고 연비향상과 NOx 저감에 효과적이다. Fig. 2와 Fig. 3에 공기과잉율의 변화에 따른 열효율 및 NOx 배출량을 나타내었다. 엔진에 공급되는 혼합기가 희박해질수록 열효율은 증대하는 경향을 보여주지만 각각 최대효율을 나타내는 공기과잉율 조건보다 희박해질 경우 연소안정성의 악화로 효율이 감소되었다. 공기과잉율이 어느 한계에 도달하게 되면 연소가 정상적으로 이루어지지 않을 정도로 화염전파속도가 느려지고 점화 지연 및 그 편차가 증가한다. 수소를 첨가하게 되면 연소속

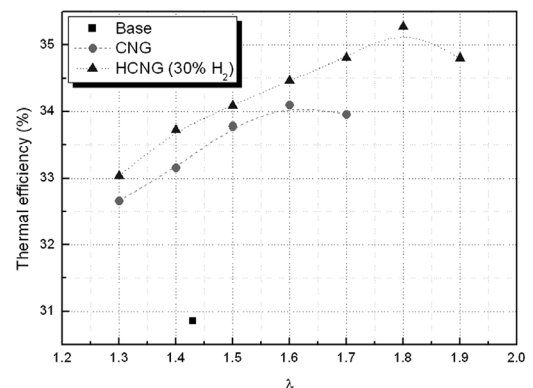


Fig. 2 Effect of hydrogen addition on thermal efficiency at 1260 rpm, 600Nm operating condition

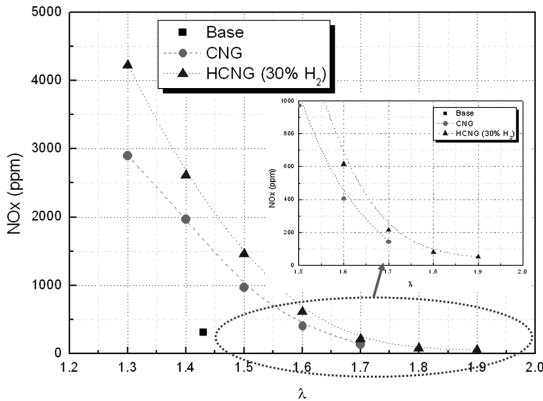


Fig. 3 Effect of hydrogen addition on NO_x emissions at 1260 rpm, 600Nm operating condition

도가 빠른 수소연료의 특성상 희박연소한계가 $\lambda = 1.8$ 이상까지 확장이 가능하기 때문에 천연가스만 사용된 경우에 비해 높은 열효율을 얻을 수 있다.

희박영역에서 공기과잉율이 증가함에 따라 산소 농도가 증가하고, 연소온도가 낮아짐에 따라 NO_x의 농도는 급격히 감소한다. 그러나 수소를 첨가하면 수소의 높은 단열화염온도에 의해서 연소가스의 온도가 상승하여 NO_x 생성을 촉진하기 때문에, 일정한 공기과잉율 조건에서는 수소의 첨가에 따라 NO_x가 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 각각의 연료조성에 대하여 최적효율을 나타내는 운전조건에서의 NO_x 배출을 비교하면 수소를 첨가하여 연소안정성이 확보되는 영역인 $\lambda = 1.8$ 조건에서 희박연소 운전할 경우 천연가스 연료만으로 운전되는 상용엔진의 운전조건에서 배출되는 NO_x의 량(Base)에 비해 약 74%의 NO_x 저감이 가능하였다.

3.2 점화시기에 따른 영향

점화시기가 지각되면 엔진의 성능은 악화되고, NO_x 배출량은 개선된다. Fig. 2와 Fig. 3에서 천연가스 연료만 사용된 경우와 MBT 점화시기 조건과 상용 엔진에서 사용되는 Base 운전조건을 비교하여 보면, 비슷한 값의 공기과잉율 조건에서 점화시기가 MBT 시기일 경우 높은 효율을 보이고 NO_x의 배출도 높게 나타났다.¹¹⁾ Base 운전조건에서 점화시기는 BTDC 18.6도로서 MBT 점화시기에 비해 약 12도 정도 지각된 시기이다. 천연가스 연료만 사용하

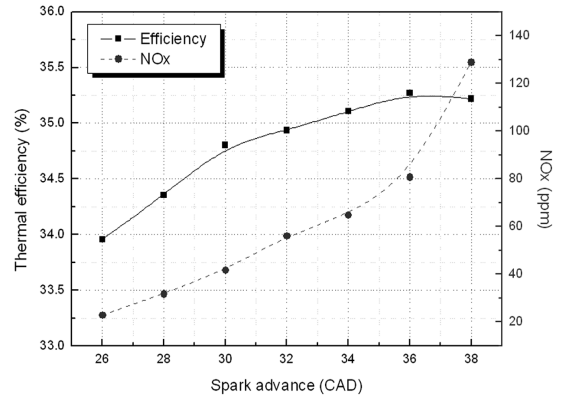


Fig. 4 Effect of spark advance retard on thermal efficiency and NO_x emissions with 30% hydrogen addition at 1260 rpm, 600Nm, $\lambda = 1.8$ operating condition

라도 $\lambda = 1.6$ 의 희박한 공기과잉율 조건에서 운전이 가능하나, 희박연소한계에 가까운 조건에서 운전되도록 하는 것은 신뢰성을 확보하기에 무리가 있고 NO_x 배출이 비교적 높다. 따라서 상대적으로 농후한 공연비 조건에서 점화시기를 지각하여, 효율 면에서는 2% 정도의 손실이 발생되더라도 NO_x 배출을 저감한 결과로 볼 수 있다.

Fig. 4는 $\lambda = 1.8$ 조건에서 수소연료 첨가 시 점화시기의 변화에 따른 효율 및 NO_x 배출 결과를 보여준다. 점화시기가 지각됨에 따라 NO_x 배출이 감소되고, 연소안정성의 악화로 효율이 감소하였다. 희박연소영역에서 점화시기가 지각되면 화염 전파속도가 느려져, 연소상태가 불안정하여 희박한계에 일찍 도달하게 된다. 따라서 희박한 공연비를 유지하면서 점화시기를 지각하는 방법보다는 상대적으로 약간 농후한 분위기에서 점화시기의 지각을 통한 NO_x 배출의 추가적인 저감이 검토되어야 한다.

Fig. 5는 수소연료첨가 시 연소안정성을 대표하는 값인 COVIMEP 값이 base 운전조건과 동일한 1.8%를 만족하는 조건에서 공기과잉율의 변화에 따른 성능 및 배출가스 특성을 표준화하여 나타낸 것이다. 이때 각각의 공연비 조건에서 점화시기는 MBT 점화시기에 비해 약 13도정도 지각되었다. $\lambda = 1.5$ 의 공기과잉율 조건에서 Base 운전조건과 동일한 효율을 보이고 있으며, 희박한 영역으로 갈수록 효율이 개선됨에 따라서 연료의 유량도 감소되었다. 희박영역의 확장과 점화시기의 지각을 통해 λ

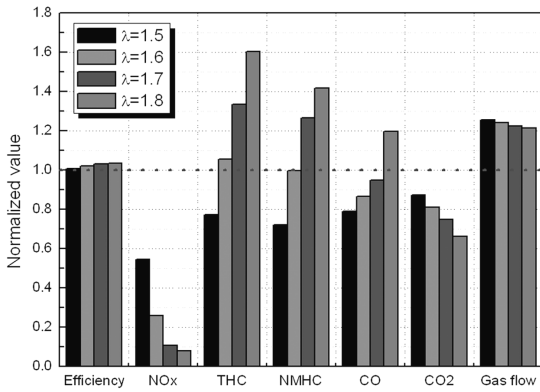


Fig. 5 Effect of operating strategy on performance and emissions with 30% hydrogen addition at 1260 rpm, 600Nm operating condition

=1.7 조건에서 Base 조건대비 약 89%의 NOx 저감을 얻을 수 있으나, 화염전파속도가 늦어지고 점화 지연이 길어짐에 따라 규제 대상인 NMHC(Non Methane Hydrocarbon)를 포함한 THC(Total Hydro-Carbon)의 농도가 약 30% 정도 증가하기 때문에 Trade off가 고려되어야 한다.

3.3 수소 변동에 따른 영향

수소첨가 시에도 연비 및 동력성능을 유지하면서 동시에 배출가스의 규제를 만족시키도록 엔진 파라미터를 최적으로 매핑을 완수했다고 하더라도, 개질효율의 변화 등으로 인한 연료 내 수소함유율의 편차에 기인하는 엔진의 성능 및 배출가스 편차가 발생할 수 있다. 수소의 높은 단열화염온도에 의해 NOx가 증가하는 경향을 고려할 때, 수소함유율의 편차는 배출가스의 양이 규제치를 벗어나게끔 하는 원인이 될 수도 있다.

Fig. 6과 Fig.7은 각각 30% 수소 첨가시 희박연소 한계 영역인 $\lambda=1.8$, MBT 점화시기조건과 공기과잉율이 $\lambda=1.6$ 일 때 MBT 점화시기 대비 13도 지각시킨 조건에서 수소함유율이 $\pm 5\%$ 씩 변할 때의 성능 및 배출가스 편차를 표준화하여 나타낸 그래프이다. 표준화의 기준이 되는 조건인 수소 함유율이 30%로 일정할 때 두 조건에서의 NOx 배출은 약 80 ppm으로 비슷한 수준이다.

수소함유율이 $\pm 5\%$ 수준으로 변동이 있을 때, $\lambda=1.8$ 조건과 $\lambda=1.6$ 조건을 비교하여 보면, $\lambda=1.8$ 조

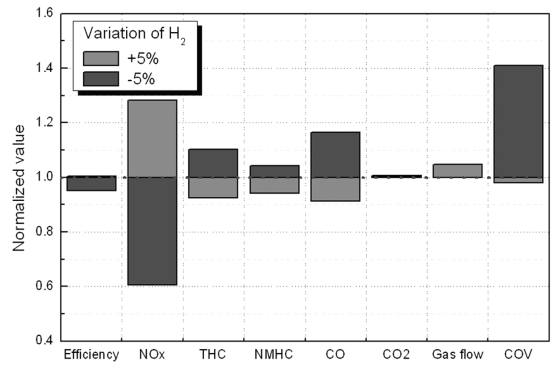


Fig. 6 Effect of hydrogen ratio variation on performance and emissions with 30% hydrogen addition at 1260 rpm, 600Nm, $\lambda=1.8$ MBT operating condition

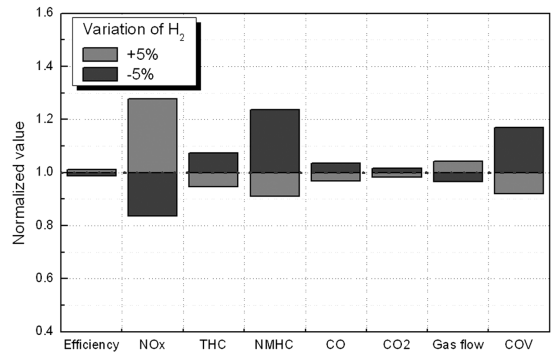


Fig. 7 Effect of hydrogen ratio variation on performance and emissions with 30% hydrogen addition at 1260 rpm, 600Nm, $\lambda=1.6$ retarded spark timing operating condition

건의 경우 수소비율이 감소되면서 NOx 배출이 감소되는 폭이 $\lambda=1.6$ 조건에 비해 큰 반면 연소안정성 및 효율 악화도 두드러지게 나타난다. 수소의 비율이 35%까지 증가한 경우는 두 공연비 조건에서 모두 NOx의 배출이 약 30% 정도 증가하였다. NMHC의 경우 $\lambda=1.6$ 조건에서의 배출되는 양의 절대값이 작기 때문에 변동이 크게 나타났다. 상기의 결과로 최적의 운전조건 설정을 검토해보면, $\lambda=1.8$ 조건에서 수소함유율의 변동에 따른 연소안정성의 악화가 큰 폭으로 나타나고 있으나 그 값이 2%이내를 유지하고 있다. NOx 배출량의 증가폭이 $\lambda=1.6$ 조건과 비교할 때 크지 않기 때문에 NMHC의 배출이 규제를 만족할 경우, 수소 비율의 변동에 따른 효율 악화를 감안하더라도 높은 효율을 나타내는 $\lambda=1.8$ 조건에서 운전되는 것이 적절한 것으로 판단된다.

4. 결론

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

- 1) 천연가스에 수소를 첨가하여 연소안정성이 확보되는 영역인 $\lambda=1.8$ 조건까지 희박연소한계를 확장할 경우 MBT 점화시기 조건에서도 천연가스 연료만으로 운전되는 상용엔진의 지각된 점화시기 운전조건의 NOx 배출량에 비해 약 74%의 NOx 저감이 가능하였다.
- 2) 연소안정성을 확보하기 위해서는 희박한 공연비를 유지하면서 점화시기를 지각하는 방법보다는 상대적으로 약간 농후한 분위기에서 점화시기의 지각을 통한 NOx 배출의 추가적인 저감이 필요하다. 수소를 첨가하여 희박영역의 확장과 점화시기의 지각을 통해 $\lambda=1.7$ 조건에서 Base 조건대비 약 89%의 NOx 저감을 얻을 수 있으나 THC의 배출이 30%정도 증가하였다.
- 3) 동일한 수준의 높은 공연비 및 MBT 점화시기 조건과 상대적으로 농후한 혼합기에서 점화시기가 지각된 조건에서의 운전 안정성을 비교하면, 수소 비율의 변동에 따른 연소안정성 및 효율 악화의 정도가 크지 않고 효율이 높은 희박한 공연비의 $\lambda=1.8$, MBT 점화시기 조건에서 운전되는 것이 적절한 것으로 판단된다.

References

- 1) C. U. Kim, C. G. Kim, S. S. Kim, H. S. Pang, J. O. Han and Y. S. Cho, "A Study on the performance Improvement for a Natural Gas Engine under Lean Burn & WOT Condition," Transactions of KSAE, Vol.4, No.6, pp.11-17, 1996.
- 2) C. H. Lee, B. C. Choi and W. N. Juhng, "Comparison of NOx Reduction Characteristics of NOx Adsorption Catalyst with TWC for Lean-burn Natural Gas Vehicles," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.579-584, 2004.
- 3) H. S. Lim, Y. Y. Kim and J. T. Lee, "Enhancement of Engine Performance by Enriched Hydrogen in Haevy-duty Natural Gas Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.163-169, 2003.
- 4) P. Hupperrich and M. Durnholz, "Exhaust Emissions of Diesel, Gasoline and Natural Gas Fueled Vehicles," SAE 960857, 1996.
- 5) S. Y. Kim, Y. Y. Kim, Y. T. Kim and J. T. Kim, "A Study on Enhancement of Combustion Performance by Dilution of Hydrogen in Heavy-duty Hydrogen Engine," J. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol.15, No.4, pp.348-354, 2004.
- 6) R. S. Michael, J. Y. Mirza, D. Zafer and N. S. Mattew, "The Effects of Hydrogen Addition on Natural Gas Engine Operation," SAE 932775, 1993.
- 7) B. Nagalingam, F. Duebel and K. Schmillen, "Performance Study Using Natural Gas, Hydrogen Supplemented Natural Gas and Hydrogen in AVL Research Engine," Int. J. of Hydrogen Energy, Vol.8, No.9, pp.715-720, 1983.
- 8) 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, KSAE, pp.382-387, 2005.
- 9) S. O. Akansu, Z. Dulger, N. Kaharaman and T. N. Veziroglu, "Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas-hydrogen Mixtures," Int. J. of Hydrogen Energy, Vol.29, No.14, pp.1527-1539, 2004.
- 10) C. W. Park, C. G. Kim, Y. Choi and S. Y. Won, "A Study on Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a Heavy Duty Natural Gas Engine," Journal of the Korea Institute of Gas, Vol.14, No.4, pp.12-17, 2010.
- 11) K. Collier, N. Mulligan, D. S. Shin and S. Brandon, "Emission Results from the New Development of a Dedicated Hydrogen - Enriched Natural Gas Heavy Duty Engine," SAE 2005-01-0235, 2005.