



## HCNG 엔진의 배출가스 특성에 따른 상용화 타당성 연구

†박철웅 · 김창기 · 최 영 · 이장희

한국기계연구원 그린동력연구실

(2012년 4월 12일 접수, 2013년 1월 2일 수정, 2013년 1월 2일 채택)

## A Study on Commercialization Feasibility of HCNG Engine in Emissions Characteristics

†Cheolwoong Park · Changgi Kim · Young Choi · Janghee Lee

\*Engine research team, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received April 12, 2012; Revised January 2, 2013; Accepted January 2, 2013)

### 요 약

NO<sub>x</sub> 배출허용기준이 강화되는 배출가스 규제에 대응하기 위한 대안으로서 제시되는 천연가스-수소 혼합연료 (HCNG)는 수소의 빠른 화염속도와 넓은 가연범위를 이용하여 후처리 장치 없이 규제를 만족할 수 있어 디젤엔진에 비해 저공해성이나 가격경쟁력 측면에서 유리한 장점이 있다. 열효율 측면에서도 우수성을 인정받는 HCNG 연료는 수소 혼합율을 물론 운전영역별 운전전략에 따라 연소특성이 달라진다. 본 연구에서는 대형 천연가스 엔진에 수소혼합율 30%의 HCNG 연료를 적용하여 운전영역별 안정적인 연소특성 및 배출가스 특성을 살펴봄으로써 상용화 가능성과 운전전략을 포함한 기술 개발방향에 대해 검토하고자 하였다.

**Abstract** - Using natural gas-hydrogen blended fuel (HCNG) in a heavy duty vehicle is regarded as an alternative to meet reinforced emission regulation compared to a recent direct injection (DI) diesel engine. Hydrogen can lead stable lean combustion even under leaner mixture condition than natural gas, so that improving not only thermal efficiency but also NO<sub>x</sub> emissions. In the present study, the feasibility of HCNG engine's commercialization was accessed with HCNG fuel (30% H<sub>2</sub> and 70% natural gas) in aspect to the reliability and possibility to reduce NO<sub>x</sub> emissions by the level of EURO-VI under various operating conditions.

**Key words** : HCNG, lean-burn, operating range, emission regulation, power output

### 1. 서 론

최근 지구온난화 문제와 대기환경 오염에 대한 심각성이 대두되면서 가솔린 및 디젤과 같은 기존연료에 비해 저공해연료이며 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)의 발생이 적은 천연가스 연료의 사용과 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 메탄을 주성분으로 하는 천연가스는 가솔린 대비 배출가스 저감효과가 현저하여 탄화수소 (HC)는 30-50%, 일산화탄소 (CO)는 20-30%

이상 감소되는 것으로 보고되고 있다. 또한 옥탄가가 130으로 높기 때문에 압축비를 높일 수 있어 엔진효율이 좋고 연료소비율을 향상시킬 수 있다.

우리나라에서는 도심지 대기환경 개선을 위하여 2000년도부터 지속적으로 디젤버스를 대체하여 압축천연가스 (CNG; compressed natural gas)버스로 교체되어 왔으며, 삼원촉매를 사용하는 이륜공연비연소는 물론이고 희박연소만으로도 EURO-V 배기규제를 만족시킬 수 있을 만큼 우수한 성능을 가지고 있다. 그러나 질소산화물 (NO<sub>x</sub>) 배출기준이 엄격해지는 EURO-VI 규제부터는 희박연소만으로는 NO<sub>x</sub> 규제를 만족시키기 어렵고 고가의 NO<sub>x</sub> 저감 촉매를

†Corresponding author: cwpark@kimm.re.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

장착해야 한다. 때문에 이러한 문제를 해결할 수 있는 유력한 기술의 하나로 천연가스에 수소를 첨가하여 연소를 하는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진의 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 연구 결과들이 보고되고 있다.

천연가스와 수소를 혼합하는 이유는 H/C 비율이 높은 천연가스의 경우 개질을 통한 수소의 생산에 유리하고, 두 연료 모두 가스연료로서 혼합이 용이할 뿐 아니라 기존에 설치되어 있는 천연가스 충전시설을 포함한 인프라를 활용할 수 있기 때문이다. 수소의 경우 화염속도가 빠르고 가연범위가 넓기 때문에 천연가스의 희박연소 한계범위를 넓혀서 EURO-VI의 엄격한 NO<sub>x</sub>규제를 만족할 수 있다는 점은 미래 연료로서의 수소의 사용을 적용하는 가장 큰 이유 중의 하나로 볼 수 있다.

HCNG 연료는 수소의 혼합율에 따라 연소특성이 달라지는데, Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 Collier[1-3] 등의 연구 결과에 따르면 수소 혼합율이 30% 이상에서는 희박연소를 통하여 NO<sub>x</sub> 배출량이 0.1 g/kWh 이하로 만족시킬 수 있음을 확인하였다. HCNG 연료의 또 다른 장점은 CO<sub>2</sub> 저감 성능으로서 수소 혼합율이 높을수록 CO<sub>2</sub>는 저감되며[4,5], 연비향상과 온실가스 배출규제를 고려할 때 HCNG 연료의 적극 활용이 기대된다.

본 연구에서는 차세대 연료로서의 HCNG 연료의 운전영역별 연소 및 배출가스 특성을 살펴보고 이를 기존의 천연가스 엔진과 비교·검토함으로써 국내 관련기술 개발 방향과 상용화 가능성에 대해 검토하고자 하였다.

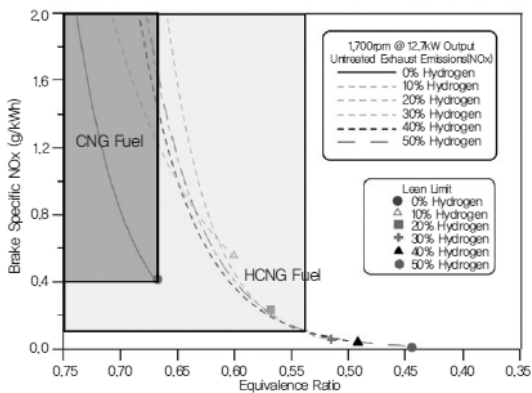


Fig. 1. NO<sub>x</sub> versus equivalence ratio for varying hydrogen content in natural gas (SAE 2005-01-0235).

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서는 대형 천연가스 엔진에서 운전영역에 따른 수소첨가의 영향을 검토하기 위해서 11 L급 6기통 천연가스 엔진을 설치하여 기본적인 성능실험을 수행하였다. Fig. 2에 엔진을 포함한 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었으며, 천연가스 엔진의 제원은 Table 1과 같다. 기존의 희박연소엔진을 기반으로 하여 고압천연가스 및 수소 공급·제어시스템을 설치하였다.

주 연료인 천연가스는 실제 엔진에서 사용되는 연료공급시스템을 사용하여, 20 MPa 정도로 충전된 고압연료용기로부터 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압된 연료가 Metering valve 및 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.

수소연료는 12 MPa로 충전된 여러 개의 고압수소 가스용기를 병렬로 연결하고 압력 조절기를 이용하여 0.8 MPa의 압력으로 감압한 후 MFC (Mass flow controller)로 전해진 뒤, 믹서 전단에서 공급하여 흡입공기와 섞인 후 흡기 매니폴드로 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 관찰하였다. 공연비 측정에는 LA 4 lambda meter (ETAS Co.)를 이용하였다.

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

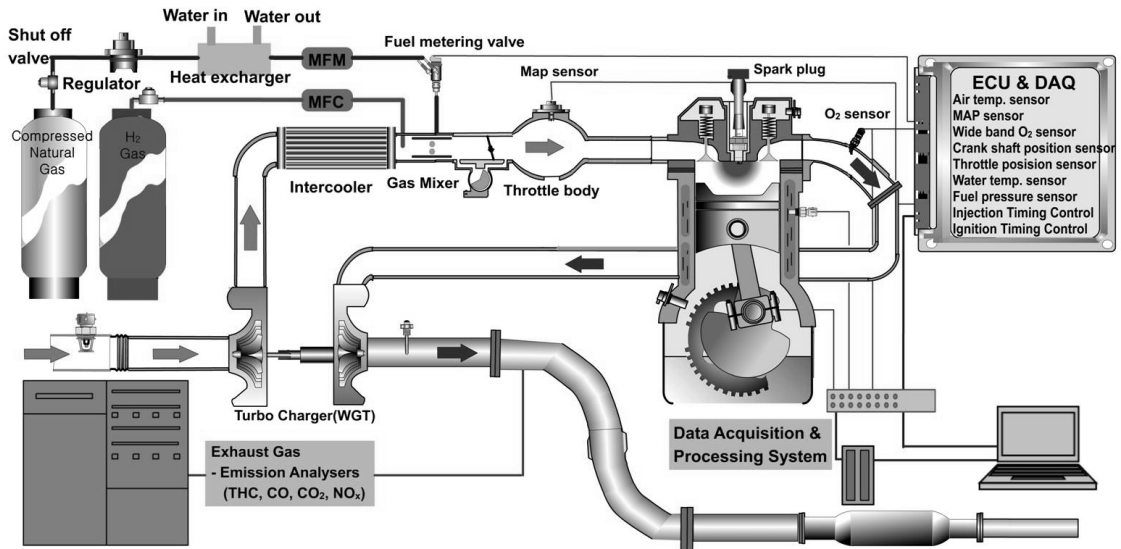


Fig. 2. Schematic of experimental setup.

주요배출가스 CO, HC, NO<sub>x</sub>는 배출가스 분석장치 (MEXA7100D-EGR, Horiba)를 사용하여 측정하였다.

## 2.2. 실험방법

Table 2는 각각의 운전조건에서의 공연비 및 점화시기를 정리하여 나타낸 것이다. 본 연구의 대상이 되는 차량은 대형버스차량으로서, 시험 시 운전 조건은 대상차량의 주요 운전영역인 최대토크의 절반에 해당하는 1,260 rpm / 570 Nm을 포함하여 최대출력 및 최대토크 운전조건 등의 6가지의 운전영역으로 설정하였다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 82.5 ± 2.5°C에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 전 실험영역에서 최대 효율을 나타내는 공연비 조건을 최적 공연비 조건으로 간주하고 실험을 진행하였다. 각각의 운전영역에서 점화 시기는 MBT (minimum advance for best torque) 점화시기에서 운전되도록 하며 효율, 배출가스 특성을 검토하였다. 엔진에 공급되는 연료는 기존의 천연가스 연료와 수소가 체적비율로 30% 혼합된 연료를 사용하여 천연가스 연료를 사용한 경우와 비교하였다.

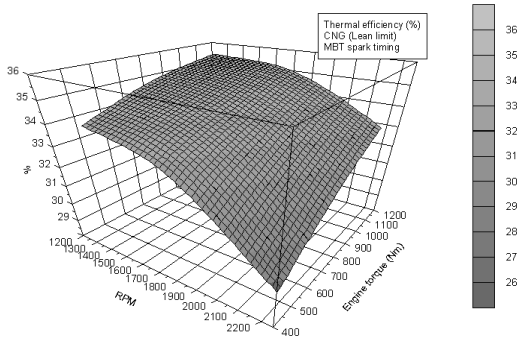
## III. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 열효율 및 출력 특성

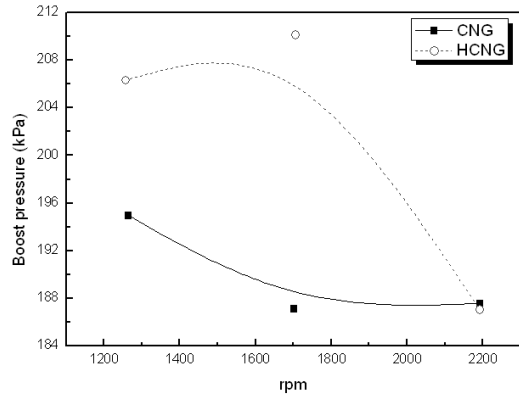
HCNG 엔진은 연비 또는 열효율 측면에서도 천연가스 엔진에 비해 우수한 것으로 알려져 있다. 이

전의 연구결과에서 일정한 운전조건에서 수소 혼합율의 증가에 따라 열효율이 상승하는 것으로 나타났으며<sup>6)</sup>, Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 안정적인 희박연소성능이 확보되는 공기과잉율 조건에서 각각의 운전영역을 비교해보면 HCNG 연료의 경우 희박연소한계가 크게는 공기과잉율로 0.2 정도 늘어났다. 희박연소한계의 확장은 연소온도 및 열발생에 의한 손실을 저감시키는 효과가 있고, 전체적으로 HCNG 연료에서 크게는 약 1.5% 정도의 열효율이 개선되는 결과를 나타내었다.

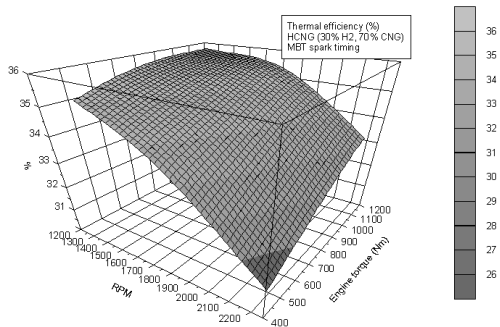
희박연소한계의 확장에 의한 열효율 개선은 부하가 낮은 조건에서 그 경향이 두드러지고, 각 엔진회전수에서 전부하 (WOT; Wide open throttle) 운전 조건의 경우 희박연소한계가 확장되지 않거나 확장되는 폭이 작기 때문에 열효율의 개선이 0.3-0.4% 수준으로 그다지 크지 않았다. 전부하 조건에서의 과급압력을 나타낸 Fig. 5에서 볼 수 있는 것과 같이 2,200 rpm의 엔진회전수 조건에서의 공기과잉율은 각 연료에 대하여 동일하기 때문에 비슷한 수준의 과급압력을 나타내고 있으나, 그 보다 낮은 엔진회전수 조건에서는 HCNG 연료의 경우 전부하 조건에서 희박연소한계 확장을 위해 추가적인 과급이 요구되기 때문에 각 운전 조건에서의 과급압력이 높게 나타났다. 이는 높은 과급압력 확보를 위해 보다 많은 터빈출력이 요구됨을 보여주는 결과로서, 전부하 조건에서는 희박연소한계 확장에 의한 열효율 개선 효과가 상쇄되어 0.3% 수준에 머무는 것을 뒷받침



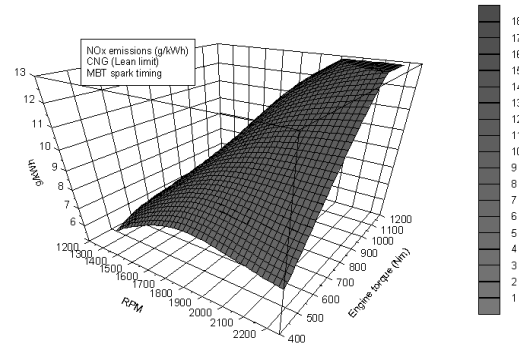
**Fig. 3.** Thermal efficiency with CNG fueled and MBT spark timing under excess air ratio of maximum thermal efficiency operating condition.



**Fig. 5.** Boost pressure under WOT operating condition for both CNG and HCNG fuels.



**Fig. 4.** Thermal efficiency with HCNG fueled and MBT spark timing under excess air ratio of maximum thermal efficiency operating condition.



**Fig. 6.** NO<sub>x</sub> emissions with CNG fueled and MBT spark timing under excess air ratio of maximum thermal efficiency operating condition.

하는 결과로 볼 수 있다. 향후 과급장치의 과급능력 개선을 통해 고속, 고부하 영역에서의 희박운전이 가능하게 될 경우 NO<sub>x</sub> 저감뿐만 아니라 열효율의 향상을 기대할 수 있다.

### 3.2. 배출가스 특성

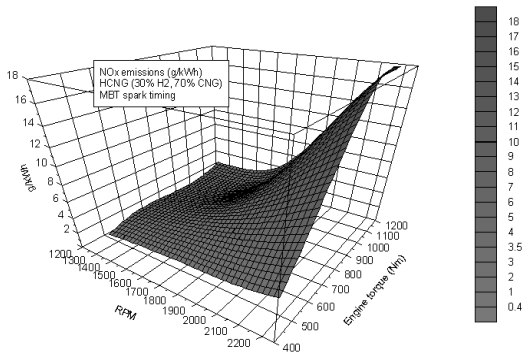
수소는 연료성분 내에 탄소가 포함되어 있지 않기 때문에 HCNG 연료를 연소하게 되면 천연가스 연소 시에 비해 CO<sub>2</sub>, CO 및 HC의 배출이 감소된다. 공기과잉율의 증가에 의하여 질량으로 환산된 상기 배출물 들의 값이 천연가스의 경우와 비슷한 수준을 유지하더라도, CO<sub>2</sub>의 경우 열효율 개선에 의해 저감될 수 있고, CO와 HC는 산화촉매에서 처리될 수 있다. 그러나 삼원촉매를 사용할 수 없는 희박연소의

특성상 NO<sub>x</sub> 배출 수준을 고려하지 않을 수 없다. Fig. 6과 Fig.7에 나타난 것과 같이 수소의 경우 높은 단일화염온도 (2,384℃) 때문에 2,200 rpm / 950 Nm 조건과 같이 동일한 공기과잉을 조건에서는 NO<sub>x</sub>의 배출이 약 39% 정도 크게 증가하였다. 그러나 수소 첨가에 의해 희박연소한계가 확장된 다른 운전조건 의 경우 연소온도의 저감 효과로 인해 27-52% 정도 감소되었다.

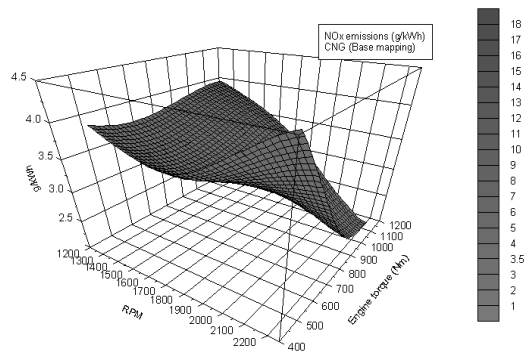
실험에 사용된 엔진은 EURO-IV 규제를 만족하는 하는 것으로 희박연소가 구현되더라도 희박연소 한계에서 MBT 점화시기로 운전될 경우 Fig. 6의 결과와 같이 모든 시험 운전영역에서 5 g/kWh를 초과하여 NO<sub>x</sub> 규제치인 3.5 g/kWh를 만족하기 어렵다. 따라서 엔진 제작사에서는 Table 3에 나타난 것과

**Table 3.** Summary of excess air ratio and spark timing at each operating condition with base operating map data

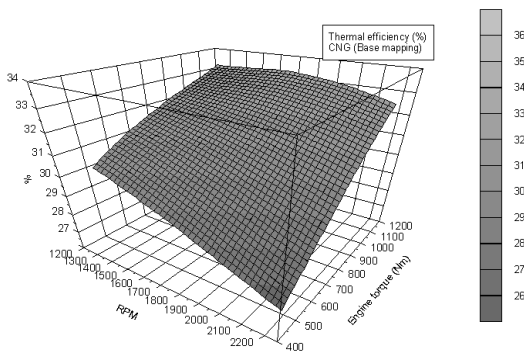
Condition	Engine speed (rpm)	Engine load (Nm)	CNG	
			$\lambda$	Spark advance timing (BTDC, CAD)
1	1,260	570	1.44	18.6
2	1,260	1140	1.53	20.4
3	1,700	535	1.47	23
4	1,700	1070	1.59	25
5	2,200	475	1.52	27
6	2,200	950	1.57	29



**Fig. 7.** NO<sub>x</sub> emissions with HCNG fueled and MBT spark timing under excess air ratio of maximum thermal efficiency operating condition.



**Fig. 9.** NO<sub>x</sub> emissions with CNG fueled and retarded spark timing under base engine mapping.



**Fig. 8.** Thermal efficiency with CNG fueled and retarded spark timing under base engine mapping.

같이 효율적인 측면에서 손실이 있더라도 NO<sub>x</sub> 배출 규제를 만족시키기 위하여 점화시기가 지각된 조건에서 운전되도록 하였다. 이때 점화시기가 지각되면 연소안정성이 악화되기 때문에 희박연소한계에서 점화시기 지각 전략을 이용하는 것은 운전안정성 및 신뢰성을 확보하기에 무리가 있기 때문에, 상대적으로 농후한 공기과잉을 조건에서 점화시기 지각을 이용하여 NO<sub>x</sub> 배출을 저감한 것을 알 수 있다.

상기의 전략을 이용한 운전을 통해 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타난 것과 같이 MBT 점화시기 대비 열효율은 2-4% 정도 감소되었으나, NO<sub>x</sub>의 배출은 NO<sub>x</sub> 규제치인 3.5 g/kWh 수준을 유지하였다. HCNG 연료의 경우 최대출력에 해당하는 운전영역을 제외한 운전영역의 MBT 점화시기 조건에서 약 2.6 g/kWh 수준을 유지하지만 점화시기의 지각을 통해 약 70% 정도의 NO<sub>x</sub> 배출을 저감할 수 있음을 고려하면, 운전

영역별로 운전전략을 최적화하여 개선된 열효율의 확보와 동시에 NO<sub>x</sub> 규제치인 0.4 g/kWh를 만족할 수 있을 것으로 보인다. 보다 자세하게는 희박연소한계의 확장 정도가 큰 부분부하 영역에서는 NO<sub>x</sub> 저감 효율이 높기 때문에 4.5 CAD 수준의 약간의 점화지각을 통하여 규제치를 만족시키고, 상대적으로 희박연소한계의 확장이 크지 않은 전부하 조건에서는 희박연소보다 농후한 조건에서 10 CAD이상의 점화지각을 통하여 NO<sub>x</sub> 배출을 저감시키면 고가의 추가적인 NO<sub>x</sub> 저감용 후처리 장치를 장착하지 않고서도 EURO-VI 규제를 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 천연가스버스는 지금까지 대도시의 대기환경 개선에 많은 기여를 하였으나, 디젤 차량의 지속적인 기술개발과 발전으로 인해 저공해 자동차로서의 위상이 약해지고 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 천연가스 연료에 수소를 첨가한 HCNG 연료를 사용한 엔진의 차기 배기규제 만족 가능성 및 상용화 가능성을 검토하였다.

1) 천연가스에 수소를 첨가하여 희박연소한계가 확장되었고, 전체적으로 CNG 연료의 경우와 비교하여 크게는 약 1.5% 정도의 열효율 개선 효과를 얻을 수 있었다.

2) 전부하 조건에서의 희박연소한계의 확장 효과는 높은 과급압력 확보를 위해 보다 많은 터빈출력이 요구됨으로써 희박연소한계 확장에 의한 열효율 개선 효과가 상쇄되고 열효율의 개선은 0.3% 수준으로 크지 않았으나, 과급장치의 개선을 통해 고부하 영역에서 희박운전이 가능할 경우 NO<sub>x</sub> 저감뿐만 아니라 열효율의 향상을 기대할 수 있다.

3) 수소첨가에 의해 희박연소한계가 확장된 다른 운전조건인 경우 연소온도의 저감 효과로 인해 27-52% 정도 감소되었으나, EURO-VI 규제를 만족하기 위해서는 농후한 조건에서의 점화시기 지각과 같은 운전전략을 통한 최적화가 필요하다.

4) 부분부하조건에서의 NO<sub>x</sub> 규제치 만족을 위한

점화시기의 지각정도가 4.5 CAD 수준으로 크지 않은 반면, 전부하 조건에서는 희박연소한계의 확장 정도가 크지 않기 때문에 보다 농후한 조건에서 10 CAD이상의 점화시기 지각을 통한 NO<sub>x</sub> 배출 저감이 요구된다.

#### 참고문헌

- [1] K. Collier, N. Mulligan, D. 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.
- [2] S. Munshi, C. Nedelcu, J. Harris, T. Edwards, J. Williams, F. Lynch, M. Frailey, G. Dixon, S. Wayne and R. Nine, "Hydrogen-blended natural gas operation of a heavy-duty turbocharged lean-burn spark ignition engine", SAE 2004-01-29561 2004.
- [3] M. Fanfua, W. Yu, L. Haiquan, L. Yong, W. Junjun and Z. Shuli, "Experimental study on thermal efficiency emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 5067-7075, 2006.
- [4] A. S. Orhan, D. Zafer, K. Nafiz and V. T. Nejat, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixture", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, 1527-1539, 2004.
- [4] S. Thipse, D. Rairikar, P. Kavathekar and P. Chitnis, "Development of a six cylinder HCNG engine using an optimized lean burn concept", SAE 2009-26-031, 2009.
- [5] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, "A study on lean combustion characteristics with hydrogen addition in a heavy duty natural gas engine", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 4, 12-17, 2010.