

LPG기관의 부분부하 조건에서 수소 혼합에 따른 성능 및 배출가스 특성에 관한 실험적 연구

김인구^{1†} · 김기종² · 이성욱³ · 조용석³

¹국민대학교 자동차공학전공대학원, ²한국로버트보쉬, ³국민대학교 자동차공학과

An Experimental Study on the Performance and Emission Characteristics with Hydrogen Enrichment at Part Load Conditions Using a LPG Engine

INGU KIM^{1†}, KIJONG KIM², SEANGWOCK LEE³, YONGSEOK CHO³

¹Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin Univ, 861-1 Jeongneung-dong, Seongbuk-gu, seoul 136-702, korea

²Robert Bosch Korea, 298 Bojeong-dong, Giheung-gu, Yongin, Gyeonggi-do, 446-913, Korea

³Prof, Department of Automotive Engineering Kookmin University, 861-1 Jeongneung-dong, Seongbuk-gu, seoul 136-702, korea

Abstract >> The purpose of this study is to obtain low-emission and high-efficiency by hydrogen enriched LPG fuel in LPG engine and is to clarify the effects of hydrogen enrichment in LPG fuelled engine on exhaust emission and performance. An experimental study was carried out to obtain fundamental data for performance and emission characteristics of hydrogen enrichment in LPG engine. The research was held by changing the hydrogen ratio to 0, 5, 10, 20% in 1500rpm, bmep 2 and 4bar. The result turned out that the combustion duration was shortened due to fast flame propagation of hydrogen. And the amount of Carbon dioxide and Hydrocarbon decreased. However, the amount of NOX increased, which is thought to be the result of high adiabatic flame temperature of hydrogen. It has been confirmed that this phenomenon has changed by the Hydrogen mixing ratio.

Key words : H₂(수소 연료), LPG(액화석유가스), Part load(부분부하), Emission(배출물), H₂-LPG(수소-액화석유가스 혼소연료), Dual fuel system(혼소 시스템)

1. 서 론

최근 세계는 자동차로부터 배출되는 유해배출물로 인한 대기오염과 온실가스로 분류되는 CO₂ 배출 증가에 따른 이상기후 발생이라는 두 가지 환경적인

문제에 직면해 있다. 이에 세계 각국 정부에서는 유해배출물 허용치에 대한 기준을 갈수록 강화해 가고 있으며, 이와 더불어 연비 및 CO₂ 배출에 대한 규제 또한 시행할 예정에 있다.

LPG는 다른 탄화수소계 연료에 비해 탄소와 수소 비율이 낮고 황 화합물이나 이산화화합물 등의 공해 요소가 낮은 연료이기는 하나, 향후 강화될 배출물 규제에 대응하기 위한 새로운 기술이 요구되고 있다.

[†]Corresponding author : Ingu_Kim@kookmin.ac.kr

[접수일 : 2013.4.27 수정일 : 2013.6.24 게재확정일 : 2013.6.30]

Copyright © 2013 KHNES

특히 탄화수소계 연료의 완전연소 생성물인 CO₂는 연료를 적게 사용하는 것 외에는 특별한 저감방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

선행되어진 수소혼소연료에 대한 연구결과들로부터 수소를 첨가함으로써 연소속도 증대에 따라 완전연소 생성물이 감소되고 H/C비를 증가에 따라 CO₂ 배출농도가 감소함을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 수소-LPG 혼소시스템을 구축하여 기관의 부하조건과 수소혼합률에 따른 기관의 성능 및 배출가스 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 LPG 기관에 수소-LPG 혼소 시스템을 적용하여 기관 부하, 수소혼합률에 따른 LPG 기관 실험을 실시하여 연소압력, 열발생률, C.O.V_{IMEP} (Coefficient of Variation IMEP), 배출가스 조성 변화로부터 기관성능 및 배출가스 특성을 파악하였다.

2.1 실험장치

2.1.1 대상 기관

실험에 사용된 기관은 HMC(Hyundai Motors Company)의 2 리터급 LPLi nu engine이며 그 모습과 제원을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 주변 장치

본 실험에서는 130kW 급 EC 동력계로 기관 회전속도 및 부하를 제어하였고, 기관의 일반적인 특성 및 온도 등의 변화를 파악하기 위해 NI SCXI-1302 장비 및 PCI-MIO-16E-4 DAQ card를 사용하여 흡입 공기온도, 오일 온도, 냉각수 온도 등 기관 작동 상태를 파악할 수 있는 기본 요소를 측정하였다.

연소실 압력 데이터를 수집하고 실시간으로 확인하기 위해 스파크 플러그 타입 압력센서와 로터리 타입 엔코더, National Instruments Labview 8.5로 프로그래밍 된 Combustion Analyzer 사용하여 압력선

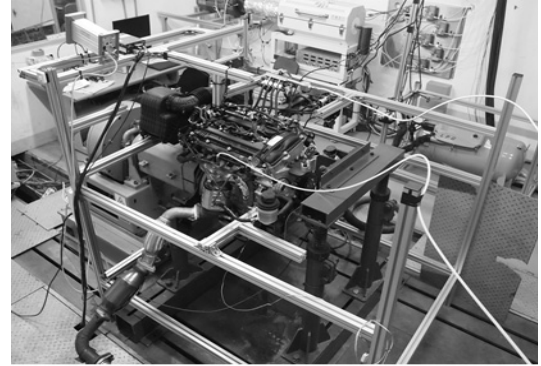


Fig. 1 Photograph of 2.0 LPLi nu Engine

Table 1 Specification of 2.0 LPLi nu Engine

Item	Specification
Type	4-stroke DOHC
Number of cylinders	4
Bore	81.0mm
Stroke	97.0mm
Displacement volume	1999cc
Compression ratio	10.3±0.2:1
Firing oder	1-3-4-2

도, 열발생률, IMEP_{gross}, C.O.V_{IMEP} 등을 실시간으로 확인하였으며, 배출가스 성분 분석에는 HORIBA의 EXSA-1500을 통해 배출물 특성을 파악하였다.

2.1.3 수소-LPG 혼소 시스템

Fig. 2는 흡기관에 수소를 분사하기 위한 가스 인젝터를 설치한 모습이다. 인젝터 레일의 압력은 3bar로 일정하게 유지하였으며, MFC (Mass Flow Controller)를 통해 유량을 측정하였다. LPG와 수소를 혼소하기 위해 Dual fuel ECU를 사용하였으며, Fig. 3은 수소-LPG 혼소 시스템의 전체적인 개략도를 보여주고 있다.

ECU 제어 프로그램(Dual fuel ECU operating program)에 의해 Mapping된 값을 Dual fuel ECU에서 수소를 분사하는 가스 인젝터와 LPG를 분사하는 LPG 인젝터에 작동신호를 인가한다. LPG 연료 대신 수소 연료를 분사하는 Duty(Injector operating signal)



Fig. 2 Gas injector installation in the intake system

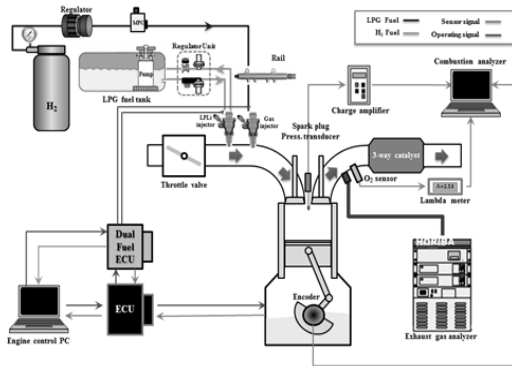


Fig. 3 Schematic diagram of H₂-LPG engine test

비율을 혼합률(%)로 정의하였다.

2.2 실험 방법 및 실험 조건

기관회전속도(RPM) 및 부하(BMEP: Brake Mean Effective Pressure)에 따른 수소혼합률(0, 5, 10, 20%) 조건을 Table 2에 명시하였다.

수소혼합률은 선행되어진 연구결과를 바탕으로 수소의 역화특성과 큰 비체적이 체적효율을 저해시키는 영향을 고려하여 설정하였다¹⁻²⁾.

LPG 연료의 조성은 Butane 70% + Propane 30%이며, 수소비율은 앞서 언급한 분사기간에 따른 혼합률(%)로 정의하였다. 또한 LPG 연료 분사량과 수소 유량을 측정하여 각 수소혼합률 조건에서의 수소 체적비율을 명시하였다.

Table 2 Experimental conditions

rpm	Load (BMEP)	Ignition timing (BTDC deg.)	H ₂ Sub. (%)	H ₂ vol. ratio (%)
1500	2 bar	39	0, 5, 10, 20	0, 15, 25, 40
	4 bar	28		

각 기관조건에서 수소혼합률이 변화하여도 점화시점은 Base 조건(H₂ Sub.0%)과 동일하게 설정하였으며, 모든 조건에서 냉각수 온도는 80±2℃로 일정하게 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수소 첨가에 따른 기관 성능

3.1.1 수소혼합률에 따른 연소압력 및 열발생률

Fig. 4, 5는 1500 rpm, BMEP 2, 4bar 일 때 수소혼합률에 따른 압력선도 및 열발생률을 나타내고 있다. 각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 최대 연소압력 및 열발생률이 상승하고 최대 연소압력 발생시점이 TDC에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 실린더 내 연소최대압력 및 열발생률이 상승하고, 최대 연소압력 발생시점이 진각 되는 경향을 보인다. 수소혼합률이 변화하여도 Base 조건(H₂ Sub.0%)의 점화시점과 동일하기 때문에 수소혼합률이 증가할수록 수소의 빠른 화염전파 특성으로 인해 최대압력 발생시점은 TDC에 가까워진다. TDC에서 피스톤 헤드는 상사점에 위치하므로, 이로 인해 더 작은 연소실 체적에서 연소가 발생하여 최대압력 및 최대 열발생률이 증가하는 것으로 판단된다.

3.1.2 수소혼합률에 따른 출력변동 및 연소안정성

Fig. 6은 기관 부하와 수소혼합률에 따른 IMEP_{gross} (gross indicated mean effective pressure)를 나타내었다. 각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 최대 압력 발생시점이 TDC에 가까워지고 그에 따라 연소실 내 최대압력이 높아진다.

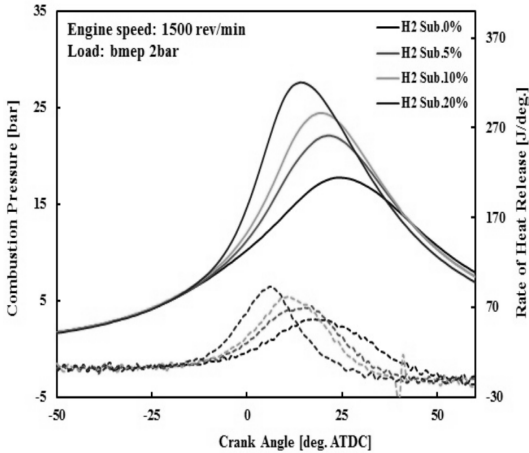


Fig. 4 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen substitutions in a H₂-LPG engine as a function of crank angle. Operating at 1500 rev/min, BMEP=2bar

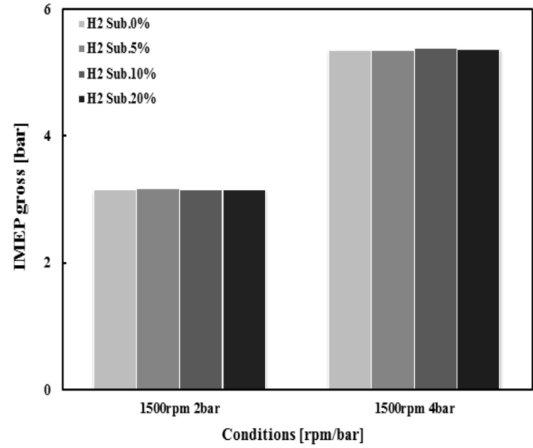


Fig. 6 Variation of gross indicated mean effective pressure with hydrogen substitutions for average of 100 cycles in H₂-LPG engine operating at 1500 rev/min, BMEP=2, 4bar

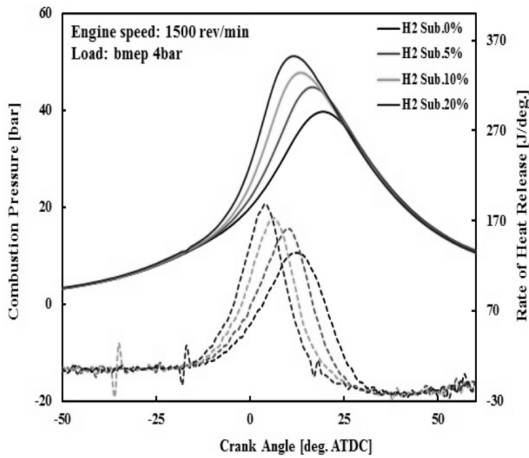


Fig. 5 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen substitutions in a H₂-LPG engine as a function of crank angle. Operating at 1500 rev/min, BMEP=4bar

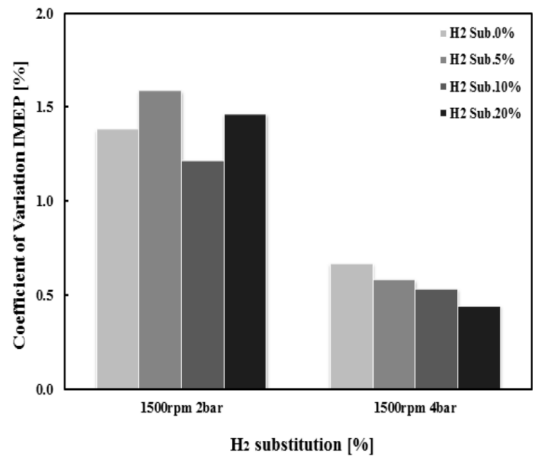


Fig. 7 Variation of C.O.VIMEP with hydrogen substitution for 100 consecutive cycles in H₂-LPG engine operating at 1500 rev/min BMEP=2, 4bar

따라서 압축행정과 팽창행정 동안 피스톤에 이루어지는 일로 정의되는 $IMEP_{gross}$ 는 증가할 것으로 예상하였으나, $IMEP_{gross}$ 는 수소혼합률이 증가하여도 일정한 것으로 확인되었다. 이는 단열화염온도가 높은 수소의 특성으로 인해 연소실 내 온도가 상승하였을 것으로 예상되며, 이로 인해 팽창행정 중 연소실 벽면으로 열손실이 증가하여 손실이 발생한 것으로 판단된다.

실험조건에 따른 기관의 연소안정성을 평가하기

위하여 각 조건에서 100 cycle 동안의 $IMEP_{gross}$ 표준편차를 평균으로 나눈 C.O.V $_{IMEP}$ 를 Fig. 7에 도시하였다. 모든 실험조건에서 C.O.V $_{IMEP}$ 는 2% 이하로 안정적인 연소가 일어났음을 확인할 수 있고, 모든 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 수소의 빠른 화염전파속도 및 넓은 가연한계로 인해 연소특성이 개선되어 C.O.V $_{IMEP}$ 가 낮아진 것으로 판단된다.

3.2 수소 첨가에 따른 배출가스 특성

3.2.1 일산화탄소

Fig. 8는 기관 부하, 수소혼합률에 따른 CO 배출 농도를 나타내고 있다.

본 연구의 대상기관은 이론공연비로 제어되기 때문에 모든 조건에서 1 vol.% 이하로 CO 배출농도는 상당히 낮은 수준을 보이는 것으로 판단된다.

CO 배출의 경우, 수소혼합률에 따라 명확한 경향

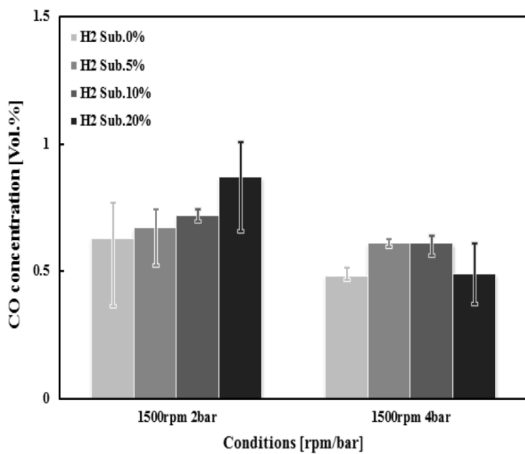


Fig. 8 Variation of CO concentrations with hydrogen substitutions in H₂-LPG engine. Operating at 1500 rev/min, BMEP=2, 4bar

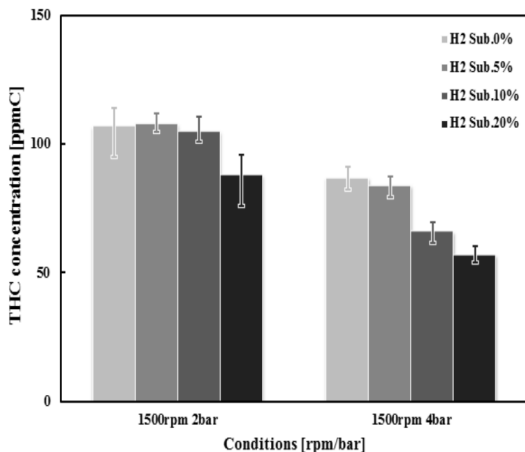


Fig. 9 Variation of THC concentrations with hydrogen substitutions in H₂-LPG engine. Operating at 1500 rev/min, BMEP=2, 4bar

성은 보이지 않으나 실제 CO 배출량은 매우 낮은 수준이고 변동 폭 역시 작으므로 이는 실험 오차범위 내에 들어간다고 판단된다.

3.2.2 탄화수소

Fig. 9은 각 실험조건에 따른 HC 배출농도를 보여 주고 있다. 각 부하 조건에서 수소혼합률 이 증가할 수록 HC 배출농도는 감소하는 경향을 보인다. 수소 난류연소속도(약 1.7m/s)는 LPG 난류연소속도(약 0.4m/s) 보다 약 4배 정도 빠르기 때문에 연소실 벽면에 소염층 이 얇게 형성되었을 것으로 예상되며, 이로 인해 HC 배출농도가 감소한 것으로 판단된다(3-6,8).

부하 조건이 BMEP 2bar에서 4bar로 증가하면 분사되는 연료량 증가 및 연소실 내 고온, 고압의 분위기 조건으로 인해 연소효율이 상승하여 HC 배출농도가 감소한 것으로 판단된다.

3.2.3 질소산화물

Fig. 10은 각 실험조건에서 수소혼합률에 따른 NO_x 배출농도를 나타내고 있다. 각 조건에서 수소혼합률이 증가할수록 NO_x 배출농도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 수소의 단열화염온도(2384℃)가 LPG

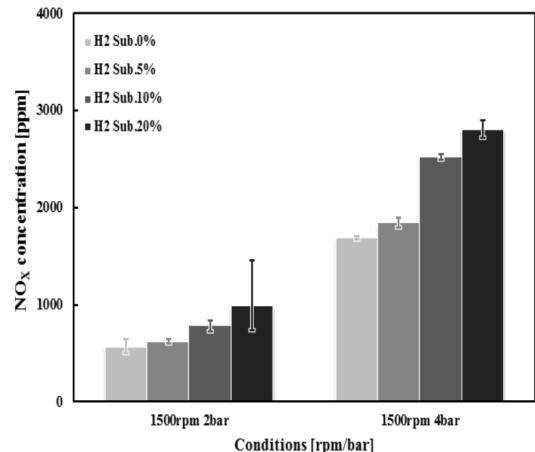


Fig. 10 Variation of NOX concentrations with hydrogen substitutions in H₂-LPG engine. Operating at 1500 rev/min, BMEP=2, 4bar

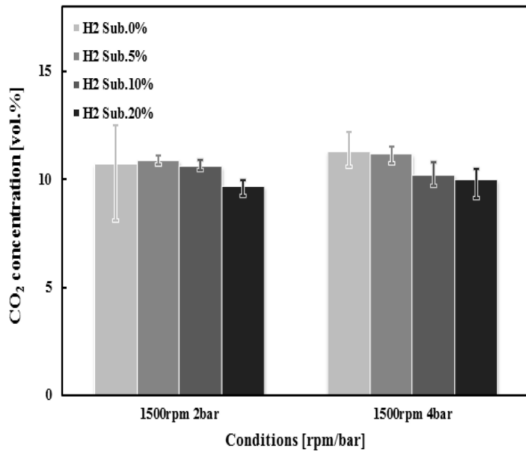


Fig. 11 Variation of CO₂ concentrations with hydrogen substitutions in H₂-LPG engine. Operating at 1500 rev/min, BMEP=2, 4bar

단열화염온도(1990°C)^{7,9)} 보다 높기 때문에 수소혼합률이 증가 할수록 연소실 내 온도가 높아져 Thermal NO_x 생성이 증가한 것으로 판단된다.

BMEP 4bar 조건은 BMEP 2bar 조건에 비해 연료량이 증가하고 연소실 내 고온 고압의 분위기 조건이 형성됨에 따라 연소효율이 증대함으로써 연소실 내 온도가 상승하여 NO_x 배출농도가 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.4 이산화탄소

Fig. 11은 기관 부하, 수소혼합률에 따른 CO₂ 배출농도를 나타내고 있다. 동일한 기관회전속도에서 BMEP 2bar 보다 BMEP 4bar에서 연료량의 증가로 인해 CO₂ 배출률이 증가함을 확인할 수 있다.

각 조건에서 수소혼합률이 증가 할수록 CO₂ 배출농도는 감소하는 경향을 보이며, 수소혼합률이 증가할수록 LPG 연료량은 줄어들고 수소연료량은 증가하기 때문에 전체 연료(H₂+LPG)의 H/C 비율이 증가하여 CO₂ 배출농도가 감소한 것으로 판단된다^{3,5,8)}.

4. 결 론

본 연구에서는 수소-LPG 혼소 기관의 부하, 수소

혼합률을 변수로 설정하고 진행한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 실험조건에서 수소혼합률이 증가할수록 연소실 내 최대 압력 및 열발생률이 증가하고 연소기간이 짧아짐을 확인하였다.
- 2) 각 실험조건에서 수소혼합률 변화에 따른 IMEP gross 증감은 거의 없었으며 모든 조건에서 C.O. VIMEP는 2% 내로 안정적 운전이 가능함을 확인하였다.
- 3) 각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 CO₂ 배출농도가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 혼합연료의 H/C 비율 증가에 따른 것으로 판단된다.
- 4) 모든 조건에서 CO 배출농도는 1 vol.% 이하로 매우 낮은 수준이었으며, 기관 부하, 수소혼합률이 증가할수록 HC 배출농도는 감소하였다.
- 5) 수소 혼합률 증가에 따라 NO_x 배출농도는 증가하였고, 이는 수소의 높은 단열화염온도 때문인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부의 친환경자동차기술개발사업단(글로벌탑 환경기술개발사업)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

References

1. Gyeung Ho Choi, Jae Cheon Lee, Yon Jong Chung, Jerald Caton and Sung Bin Han, "Effect of Hydrogen Enriched LPG Fuelled Engine with Converted from a Diesel Engine", Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, p.p. 139-145, 2006.
2. In-Tak Kim, Sang-Hee Lee, Woo-Jik Lee and Jong-Suk Yoon, "Development of HMC LPI Mono-Fuel Vehicle", SAE paper 2012-01-1314, 2012.

3. Kijong Kim, Yongseok Cho, Seangwock Lee
“An Experimental Study Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen Enriched LPG fuel in a Constant Volume Chamber”, KSAE, KSAE12, pp. 360-366, 2012.
4. Dongkyun Ko, “A Study on the Combustion and Emission Characteristics of H LPG in Constant Volume Chamber”, MS. Dissertation, Graduate School of Automotive Engineering Kookmin University, 2012.
5. Sangyeon Won, Chulwoong Park, Changgi Kim, “A Study on the Development of Hydrogen-Natural gas Dual fuel engine”, KSAE10-B0027, 2010.
6. John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, 1988.
7. Jonghyun Kim, Jaepark Lee, Cheolhong Hwang and ChangEon Lee, “NO_x Formation Characteristics with Strain rate in H₂/Air Non-premixed Flames”, Journal of KOSCO, 2008.
8. Dongkyun Ko, Hanseung Lee, Sulki Choi, Yunsung Lim, Yongseok Cho, Sean gwock Lee, “A Study on the Combustion and Emission Characteristics of HCNG for Vehicle Application”, KSAE10-A0122, 2010.
9. Thomas Wallner, “Efficiency and Emissions Potential of Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles”, SAE paper 2011-26-0003, 2011.