

수소첨가 CNG기관의 성능 및 배출가스 특성에 관한 실험적 연구

류규현^{1†} · 김인구²

¹인천대학교 기계시스템공학부, ²국민대학교 자동차공학전문대학원

An Experimental Study on the Performance and Emission Characteristics with Hydrogen Enrichment in a CNG Engine

KYUHYUN RYU^{1†}, INGU KIM²

¹Prof, Department of Mechanical system Engineering, Incheon University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Korea

²Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, 861-1 Jeongneung-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-702, Korea

Abstract >> Recent research has focused on alternative fuel to improve engine performance and to comply with emission regulation. Finding an alternative fuel and reducing environment pollution are the main goals for future internal combustion engines. The purpose of this study is to obtain low-emission and high-efficiency by hydrogen enriched CNG fuel in SI engine and is to clarify the effects of hydrogen enrichment in CNG 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 SI engine. The experiment was conducted at 2500 rpm, bmep 2 bar, 4 bar conditions while CNG fuel was mixed with 10, 20 and 30% hydrogen blends. From the experimental results, combustion duration was shortened due to rapid flame propagation velocity of hydrogen and these were attributed to the burning velocity increasing exponentially with increasing hydrogen blending ratio. Hydrogen has much wider flammable limit than methane, gasoline and the minimum ignition energy is about an order of magnitude lower than for other combustion. By adding hydrogen, CO₂ and HC were reduced. However, NO_x was increased due to high rate of heat release for hydrogen substitutions.

Key words : H₂(수소 연료), CNG(압축천연가스), Part load(부분부하), Emission(배출물), H₂-CNG(수소-압축천연가스 혼소연료)

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈로 인하여 고유가 시대가 초래되었고 내연기관에서 배출되는 유해 물질로 인한

지구 환경문제가 국제 사회의 주요 이슈로 부각되면서 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 대체연료 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 화석연료의 사용을 줄이고 천연가스와 수소에너지를 연료로 대체하는 연구가 끊임없이 이루어지고 있다. 그 중 압축천연가스(CNG: Compressed Natural Gas)는 기상 연료로서 기존의 화석 연료에 비하여 배출가스가 적

[†]Corresponding author : khryu@incheon.ac.kr

Received : 2015.04.09 in revised form : 2015.04.20 Accepted : 2015.04.30

Copyright © 2015 KHNES

고, 저탄소계 연료이기 때문에 지구온난화의 원인 중 하나로 꼽히고 있는 CO₂의 발생량도 적다. 또한 전 세계적으로 매장량이 풍부하여 장기적인 공급이 가능한 석유 대체 에너지로 개발 및 적용이 확대되고 있기는 하나, 향후 강화될 유해배출가스 및 온실가스 규제를 동시에 만족시킬 수 있는 기술이 필요한 실정이다.

선행된 수소 혼소 연구결과들로부터 기관성능과 배기특성이 향상됨을 확인 할 수 있었다. 수소는 빠른 연소속도와 낮은 점화에너지로도 점화가 가능하며 연소안정성이 향상되고, 희박가연한계가 넓다는 장점이 있다¹⁾. 이러한 수소를 CNG 연료와 혼소하여 사용한다면 연소특성의 개선으로 유해배출가스 및 이산화탄소 배출을 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다²⁻⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 SI 기관에 수소-CNG 혼소 시스템을 구축하고 기관 부하와 다양한 수소혼합률에 따른 기관 실험을 통해 CO₂ 저감 효과와 기관성능 및 배기특성을 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 SI 기관에 수소-CNG 혼소 시스템을 적용하여 기관 부하, 수소혼합률에 따른 실험을 실시하여 연소압력, 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 130 kW 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 압력선도, C.O.V_{IMEP} 등을 실시간으로 확인하였으며, 배출가스 성분 분석에는 HORIBA의 EXSA-1500을 통해 배출물 특성을 파악하였다.



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

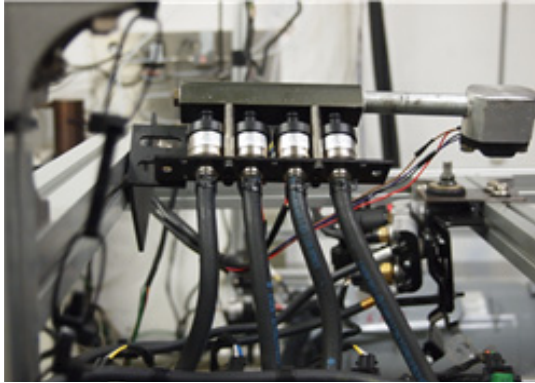


Fig. 2 Gas injector installation in the intake system

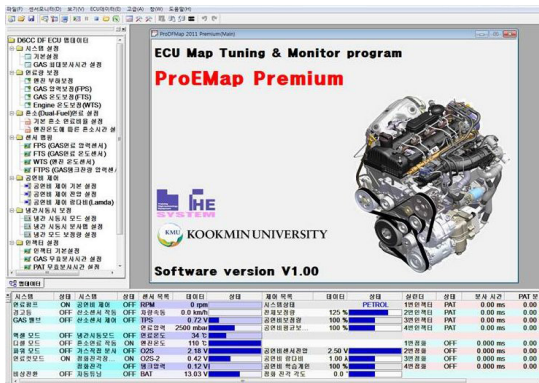


Fig. 3 Fuel system control software program

2.1.3 수소-CNG 분사 시스템

기존의 인젝터는 액상의 연료를 분사하는 인젝터로서 기상의 연료를 분사하기 위해서는 별도의 인젝터가 필요하다. 따라서 기상연료를 분사하기 위한 별도의 가스 인젝터와 이를 제어하는 별도의 ECU를 기관에 설치하였으며, 설치된 ECU를 제어하기 위해 Labview기반의 프로그램을 이용하여 제어하였다. Fig. 2는 흡기관에 기상연료를 분사하기 위한 가스 인젝터를 설치한 모습이며, Fig. 3은 제어에 사용된 ECU제어 프로그램이다. 연료의 분사압력을 일정하게 유지하기 위해 연료라인 내 MFC (Mass Flow Controller)를 설치하여 연료레일의 압력을 3 bar로 일정하게 유지하였다. Fig. 4는 수소-CNG 혼소 시스템의 전체적인 개략도를 보여주고 있다.

>> 한국수소 및 신에너지학회 논문집

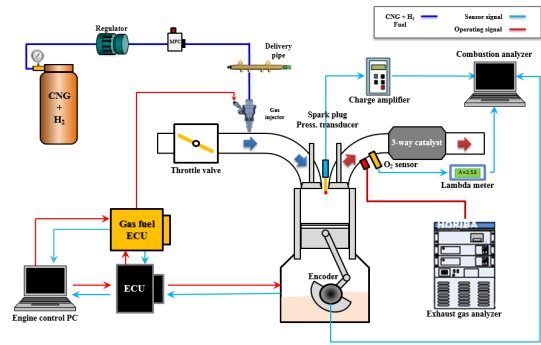


Fig. 4 Schematic diagram of H₂-CNG engine test

Table 2 Experimental conditions

Engine speed	Load (BMEP)	Ignition timing	H ₂ Sub. (%)
2500	2 bar	Maximum Brake Torque	0, 10, 20, 30
	4 bar		

2.2 실험 방법 및 실험 조건

기관회전속도(RPM) 및 부하(BMEP: Brake Mean Effective Pressure)에 따른 기관실험에 대한 조건을 Table 2에 명시하였다. 수소혼합률은 선행되어진 연구결과를 바탕으로 수소의 역화특성과 큰 비체적이 체적효율을 저해시키는 영향을 고려하여 설정하였다^{6,7)}.

실험에 사용된 연료는 각각의 조건에 맞게 혼합된 혼합가스를 사용하였으며, 기관의 점화시점은 ECU 제어프로그램을 통해 점화시기를 변경하여 모든 실험을 MBT조건에서 진행하였다. 모든 조건에서 냉각수 온도는 80±2°C로 일정하게 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수소 첨가에 따른 기관 성능

3.1.1 수소혼합률에 따른 연소압력

Fig. 5, 6은 2500 rpm, BMEP 2, 4 bar 일 때 수소혼합률에 따른 압력선도를 나타내고 있다. 각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 최대 연소압력 이 상승하

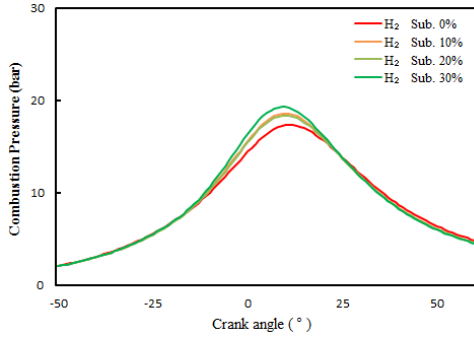


Fig. 5 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen substitutions in a H₂-CNG engine as a function of crank angle. Operating at 2500 rev/min, BMEP=2bar

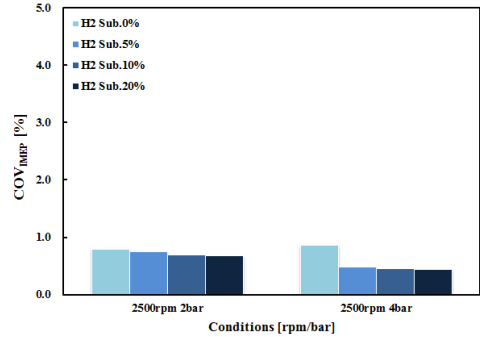


Fig. 7 Variation of C.O.V_{IMEP} with hydrogen substitution for 100 consecutive cycles in H₂-CNG engine operating at 2500 rev/min BMEP=2, 4bar

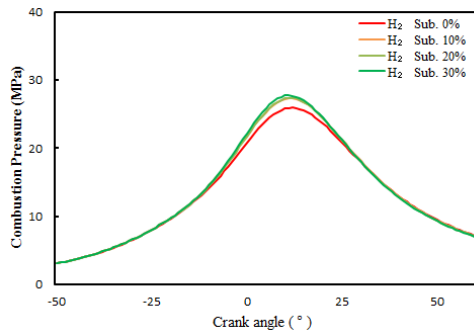


Fig. 6 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen substitutions in a H₂-CNG engine as a function of crank angle. Operating at 2500 rev/min, BMEP=4bar

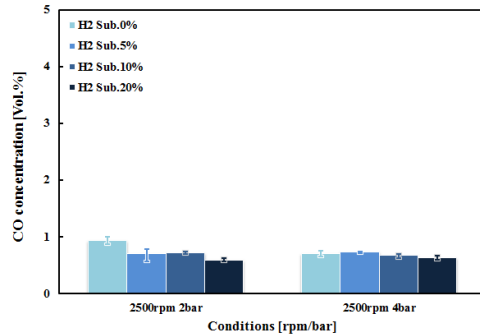


Fig. 8 Variation of CO concentrations with hydrogen substitutions in H₂-CNG engine. Operating at 2500 rev/min, BMEP=2, 4bar

고 최대 연소압력 발생 시점이 TDC에 가까워지는 것을 확인할 수 있다(CNG: 12°, H₂ Sub. 30%: 9°).

수소혼합률이 증가할 경우 수소의 빠른 화염전파 특성으로 인해 빠른 연소과정이 가능해지며, 이로 인해 연소과정이 짧아진다. 따라서 수소혼합률이 증가할수록 MBT를 만족하는 점화 시기는 진각 되며, 최대압력이 발생하는 시점은 TDC에 가까워진다. TDC에서 피스톤 헤드는 상사점에 위치하므로, 이로 인해 더 작은 연소실 체적에서 연소가 발생하여 최대압력이 증가하는 것으로 판단된다.

3.1.2 수소혼합률에 따른 연소안정성

Fig. 7은 기관 부하와 수소혼합률에 따른 C.O.V_{IMEP}를 나타내었다.

모든 실험조건에서 C.O.V_{IMEP}는 1% 이하로 매우 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(CO)

Fig. 8은 기관 부하와 수소혼합률 변화에 따른 CO 농도를 나타내고 있다.

수소는 연료성분 내에 탄소가 포함되어 있지 않기 때문에 수소혼합률이 증가할수록 메탄의 감소로 인한 CO의 농도가 감소되는 것으로 판단된다. 또한 부하가 증가할수록 수소의 영향으로 인한 높은 연소효율에 따른 완전연소를

의 증가로 인해 CO농도가 감소하는 것으로 판단된다.

본 연구의 대상기관은 이론공연비로 제어되기 때문에 모든 조건에서 1 vol.% 이하로 CO 배출농도를 나타내고 있다. 이는 상당히 낮은 수준을 보이고 있다.

3.2.2 탄화수소(THC)

Fig. 9는 각 실험조건에 따른 HC 농도를 나타내고 있다. 수소혼합률이 증가할수록 HC 농도는 기존 CNG 연료 대비 최대 54%까지 감소하는 경향을 보인다. 이는 수소혼합률이 증가할수록 메탄체적비의 감소로 인한 HC의 감소로 판단할 수 있다⁸⁾. 또한 수소의 높은 연소속도(약 1.7 m/s)때문에 연소실 내부로의 빠른 화염 전파로 인한 완전연소로 인해 HC 배출농도가 감소한 것으로 판단된다. 그리고 부하가 증가하면

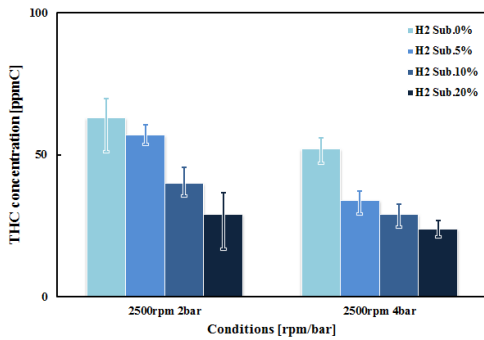


Fig. 9 Variation of THC concentrations with hydrogen substitutions in H₂-CNG engine. Operating at 2500 rev/min, BMEP=2, 4bar

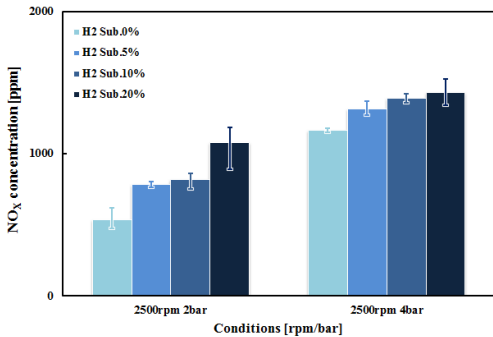


Fig. 10 Variation of NO_x concentrations with hydrogen substitutions in H₂-CNG engine. Operating at 2500 rev/min, BMEP=2, 4bar

서 연소실 내의 연료량 증가 및 고온, 고압의 분위기 조건으로 인해 연소효율이 상승하여 HC의 농도가 감소한 것으로 판단된다^{9,10)}.

3.2.3 질소산화물(NOx)

Fig. 10은 각 실험조건에서 수소혼합률에 따른 NO_x 배출농도를 나타내고 있다. 각 조건에서 수소혼합률이 증가할수록 NO_x 배출농도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 수소의 경우 높은 단열화염온도 (2,384°C) 때문에 수소혼합률이 증가 할수록 연소온도가 높아져 NO_x 생성이 증가한 것으로 판단된다⁷⁾.

BMEP 4 bar 조건은 2 bar 조건에 비해 연료량이 증가하고 연소실 내 고온 고압의 분위기 조건이 형성되면서 연소온도가 상승하여 NO_x의 농도가 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.4 이산화탄소(CO₂)

Fig. 11은 기관 부하, 수소혼합률에 따른 CO₂ 농도를 나타내고 있다.

각 조건에서 수소혼합률이 증가 할수록 CO₂ 배출농도는 감소하는 경향을 보인다. 이는 수소혼합률이 증가 할수록 연료의 탄소의 감소 때문인 것으로 판단된다⁹⁾. 더불어 CNG 연료량은 줄어들고 수소연료량은 증가하기 때문에 전체 연료(H₂+CH₄)의 H/C 비율이 증가하여

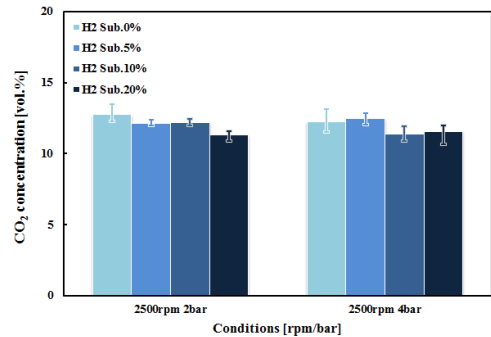


Fig. 11 Variation of CO₂ concentrations with hydrogen substitutions in H₂-CNG engine. Operating at 2500 rev/min, BMEP=2, 4bar

CO₂의 농도가 감소한 것으로 판단된다. 하지만 부하의 변화 따른 CO₂의 농도는 거의 변화가 없다^{10,11)}.

4. 결 론

본 연구에서는 수소-CNG 혼소 기관의 이론공연비 제어에 대한 고속영역(2500 rpm)에서의 부하, 수소혼합률을 변경하여 진행한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 실험조건에서 수소혼합률이 증가할수록 연소실 내 최대 압력이 증가하고 연소최대압력 발생 지점이 최대 3° 진각 되는 것을 확인하였다.
- 2) 각 실험조건에서 수소혼합률 변화에 따른 C.O.V_{IMEP}는 1% 내로 안정적 운전이 가능함을 확인하였다.
- 3) 모든 실험조건에서 수소혼합률이 증가할수록 수소의 빠른 연소속도로 인한 높은 연소효율에 따른 완전연소율의 증가로 CO 농도와 THC의 농도는 모두 감소하였다.
- 4) 모든 실험조건에서 수소혼합률 증가에 따라 수소의 높은 단열화염온도로 인한 연소온도의 증가로 인해 NO_x 농도는 최대 46% 증가하였다.
- 5) 각 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 CO₂ 배출 농도가 감소하였다. 이는 수소혼합률의 증가에 따른 혼합연료의 H/C 비율 증가에 따른 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 (국제공동연구비) 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. S. W. Lee, K. J. Kim, D. K. Ko, Y. B. Yoon, and Y. S. Cho, "An Experimental Study on the Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen Enriched LPG Fuel in a Constant Volume Chamber", KHNES, Vol. 23, No. 3, pp. 227-235, 2012.
2. M. Bysveen, "Engine Characteristics of Emissions and Performance using Mixture of Natural Gas and Hydrogen", Energy, Vol. 32, Issue 4, pp. 482-489, 2007.
3. C. W. Park, C. G. Kim, Y. Choi, S. Y. Won, and S. Y. Lee, "A Study on the NO_x Emission Characteristics of HCNG Engine", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 4, pp. 78-83, 2011.
4. C. W. Park, C. G. Kim, Y. Choi, and J. H. Lee, "A Study on Commercialization Feasibility of HCNG Engine in Emissions Characteristics", KIGAS, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6, 2013.
5. S. W. Lee, G. H. Lim, C. W. Park, Y. Choi, C. and G. Kim, "Emission Characteristics of HCNG Engine with Compression Ratio Change", KSAE, Vol. 21, No. 4, pp. 106-112, 2013.
6. G. H. Choi, J. C. Lee, Y. J. Chung, J. Caton, and S. B. Han, "Effect of Hydrogen Enriched LPG Fuelled Engine with Converted from a Diesel Engine", Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 139-145, 2006.
7. I. T. Kim, S. H. Lee, W. J. Lee, and J. S. Yoon, "Development of HMC LPI Mono-Fuel Vehicle", SAE pp. 2012-01-1314, 2012.
8. Ryo Michikawauchi, Shiro Tanno, Yasushi Ito, Mutsumi Kanda and Masato Kawauchi, "Combustion Improvement of CNG Engines by Hydrogen Addition", JSAE 20119244, SAE 2011-01-1996, 2011.
9. Bartosz Flekiewicz, "Identification of Optimal CNG-Hydrogen Enrichment Ratio in the Small SI Engine", SAE International, 2012-32-0015, 2012.
10. D. K. Ko, H. S. Lee, S. K. Choi, Y. S. Lim, Y. S. Cho, and S. W. Lee, "A Study on the Combustion and Emission Characteristics of HCNG for Vehicle application", KSAE10-A0122, pp. 746-752, 2010.
11. S. Y. Won, C. W. Park, and C. G. Kim, "A Study on the Development of Hydrogen-Natural gas Dual fuel engine", KSAE10-B0027, 2010.
12. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.