

CNG 기관의 수소혼합률 변화에 따른 성능 및 배출가스 특성에 관한 실험적 연구

김인구^{1†} · 손지환¹ · 김정화¹ · 김선문¹ · 김정수¹ · 이성욱²

¹국립환경과학원 교통환경연구소, ²국민대학교 자동차공학과

An Experimental Study on Performance and Emission Characteristics of Hydrogen Mixtures in a CNG Engine

INGU KIM^{1†}, JIHWAN SON¹, JOUNGHWAN KIM¹, SUNMOON KIM¹,
JEONGSOO KIM¹, SEANGWOCK LEE²

¹Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research,
Hwangyoung-ro 42, Seo-gu, Incheon, 22689, Korea

²Prof, Department of Automotive Engineering Kookmin University, 77 Jeongneung-ro,
Seongbuk-gu, Seoul, 02707, Korea

Abstract >> Recently, the world faces the environmental problem such as air pollution due to harmful gas discharged from car and abnormal climate due to the green-house gases increased by the discharge of CO₂. Compressed Natural Gas (CNG), one of alternative for this problem, is less harmful, compared to the existing fossil fuel, as gaseous fuel, and less carbon in fuel ingredients and carbon dioxide generation rate relatively favorable more than the existing fuel. However, CNG fuel has the weakness of slow flame propagation speed and difficult fast burn. On the other hand, hydrogen does not include carbon in fuel ingredients, and does not discharge harmful gas such as CO and HC. Moreover, it has strength of quick burning velocity and ignition is possible with small ignition energy source and it's has wide Lean Flammability Limit. If using this hydrogen with CNG fuel, the characteristics of output and discharge gas is improved by the mixer's burning velocity improved, and, at the same time, is possible to have stable lean combustion with the reduction of CO₂ expected. Therefore, this research tries to identify the characteristics of engine and emission gas when mixing CNG fuel and hydrogen in each portion and burning them in spark igniting engine, and grasp the combustion stability and emission gas characteristics according and use it as the basic data of hydrogen-CNG premixed engine.

Key words : Hydrogen(수소), CNG(압축천연가스), Dual-fuel(혼합연소), Part load(부분 부하)

1. 서 론

최근 세계는 자동차로부터 배출되는 유해배출가

스에 의한 대기환경오염과 CO₂ 배출증가로 인한 온실가스 증가에 따른 이상기후 발생이라는 환경적인 문제에 직면해 있다. 이와 같은 문제의 대안 중 하나인 천연가스(CNG)는 기상연료로서 기존의 화석 연료에 비해 유해배출가스가 적고, 이산화탄소의 발생량도 기존 연료에 비해 비교적 유리하다. 또한 전 세

[†]Corresponding author : ingukim@korea.kr

Received: 2016.7.15 in revised form: 2016.8.9 Accepted: 2016.8.30

Copyright © 2016 KHNES

계적으로 매장량이 풍부하여 장기적인 공급이 가능한 대체 에너지로서 개발 및 적용이 확대되고 있다. 하지만 CNG연료는 화염전파속도가 느려 급속연소가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

이에 반해 수소는 연료성분 내 탄소를 포함하지 않아 유해 배출가스인 CO, HC 등을 배출하지 않으며, 작은 에너지원으로도 점화가 가능하고, 화염전파속도가 빨라 희박가연한계가 넓다는 장점이 있다. 이러한 수소를 CNG 연료와 함께 사용한다면 수소의 연료특성에 의해 혼합기의 연소속도가 증대됨에 따라 불완전연소 생성물의 감소와 동시에 H/C비율 증가에 따른 CO₂ 저감도 기대된다.

이에 본 연구에서는 수소-CNG 혼소시스템을 구축하여 기관의 부하조건과 수소혼합률 변화에 따른 기관의 성능 및 배출가스 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 SI 기관에 수소-CNG 혼소 시스템을 적용하여 기관 회전속도 및 부하, 수소혼합률 변화에 따른 기관실험을 실시하였으며, 연소압력, 열발생률, C.O.V_{IMEP}, 배출가스 조성 등의 결과들을 통해 기관성능 및 배출가스 특성을 파악하였다.

2.1 실험장치

2.1.1 대상 기관

실험에 사용된 기관은 HMC (Hyundai Motors Company)의 2.0 LPLi nu engine 이며 그 모습과 제원을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 실험 장비

본 실험에서는 130 kW급 EC동력계로 기관 회전속도와 부하를 제어하였다. 기관의 작동상태를 파악하기 위해 데이터 수집 장치(NI, SCXI-1302 / PCI-

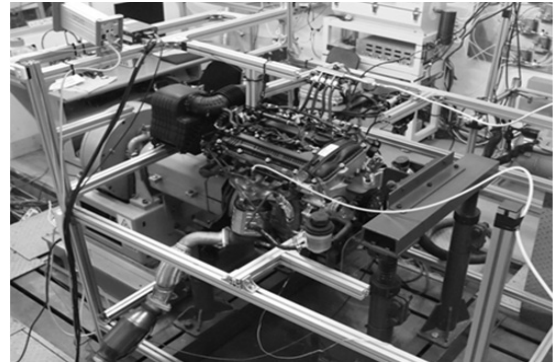


Fig. 1 Photograph of 2.0 LPLi Engine

Table 1 Specification of 2.0 LPLi nu engine

Item	Specification
Type	4-stroke DOHC LPLi
Number of cylinders	Inline 4-cylinder
Bore / Stroke	81.0 / 97.0 mm
Displacement volume	1999 cc
Compression ratio	10.3 ± 0.2:1

MIO-16E-4 Card)를 이용해 흡입공기온도, 엔진오일 온도, 냉각수온도 등의 기관의 작동상태를 파악할 수 있는 요소들의 데이터를 확보하였으며, 수집된 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 기관의 작동상태를 실시간으로 확인할 수 있는 OBD (On Board Diagnostics) 스캐너를 추가적으로 장착하여 수집된 데이터와 비교/확인하였다.

연소실 내 압력을 측정할 수 있는 점화플러그 타입의 압력센서(KISTLER, 6117B)와 Charge meter (KISTLER, 5015A)를 이용하여 연소실 내 압력변화를 측정하였고, Labview로 프로그래밍 한 제어로직을 통해 연소압력 데이터를 측정하였다. 이 데이터를 바탕으로 P-Theta, 질량연소율, C.O.V_{IMEP}, 열 발생률 (ROHR: Rate of Heat Release)을 확보하여 기관의 성능 특성을 파악하였다. 또한 배출가스 분석을 위해 삼원촉매 전단의 배기매니폴드에 냉각코일이 포함된 시료 채취관을 삽입하였으며, 배출가스 분석기 (HORIBA, EXSA-1500)를 통해 기관의 배출특성을 분석하였다. 기존에 장착된 LPLi용 injector는 액상의

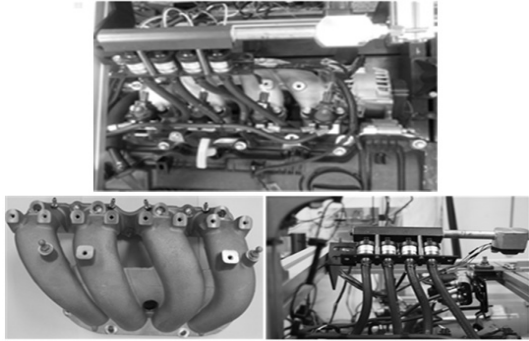


Fig. 2 Gas injection system installation on the intake manifold

연료를 분사하기 위한 injector로서 본 연구의 사용 연료인 기상연료를 분사하기에는 gas-leak 등의 이유로 부적합하였다. 이에 따라 H₂-CNG 혼합연료를 분사하기 위한 Gas-injector를 흡기매니폴드에 추가적으로 설치하였으며, 이를 제어하기 위해 기존 ECU와 연동하여 제어할 수 있는 별도의 Injector driver를 사용 하였다. Fig. 2는 흡기매니폴드에 별도로 장착된 기상연료 분사시스템의 모습이다.

2.2 실험방법

본 실험에서의 수소혼합률과 기관회전속도 및 부하 등의 실험조건을 Table 2에 명시하였다. 실험에 사용된 CNG 연료의 조성은 CH₄ 100%이며, 수소-CNG 혼합률은 체적비를 기준으로 혼합하였다. 기관회전속도 및 부하조건은 실제 도심주행에서 가장 많이 사용되는 저속, 중속 영역을 바탕으로 설정하였으며, 점화시점은 각각의 실험조건에서 진각, 지각을 통해 최적의 점화시기(MBT)에서 실험하였다. 또한 수소혼합률 변화에 따라 각 조건 별 BMEP를 구현하기 위한 연료의 양이 상이하기 때문에 각 조건별 BMEP를 만족할 때의 1회 연료분사량을 Table 3에 명시하였다. 모든 실험에서의 공기과잉률(λ)은 1.0, 냉각수의 온도는 80±2°C로 일정하게 유지하였으며, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 10회 반복 실험하였다. 이와 같은 조건에서 수행한 실험데이터를

Table 2 Experimental conditions

Engine speed (rev/min)	Load (bmeP)	Ignition timing	H ₂ vol. ratio(%)	Access air ratio (λ)	Coolant temp. (°C)
1500	2 bar 4 bar	MBT	CNG Only H ₂ 10% H ₂ 20% H ₂ 30%	1.0	80±2
2500	2 bar 4 bar				

Table 3 Quantity of the injected fuel

Engine speed (rev/min)	Load (bmeP)	Base (mg)	H ₂ 10% (mg)	H ₂ 20% (mg)	H ₂ 30% (mg)
1500	2 bar	13.00	11.96	11.54	9.92
	4 bar	20.41	20.04	19.45	17.71
2500	2 bar	14.40	12.21	11.62	10.66
	4 bar	23.16	21.70	20.39	18.70

분석을 통해 수소혼합률 변화에 따른 기관성능과 배출가스 변화경향을 파악하고, 수소혼합에 따른 희박 연소의 가능성을 파악하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소 혼합에 따른 출력특성

Fig. 3, 4는 각 조건에서의 수소혼합률 변화에 따른 압력선도와 열 발생률을 나타내고 있다. 모든 조건에서 수소혼합률 증가에 따라 실린더 내 최대압력 및 열 발생률이 상승하는 경향을 보이고 있다. 각 조건에서 최대압력 발생시점은 큰 차이가 없는 결과를 보였는데, 이는 모든 실험조건에서의 점화시점이 각 조건별 MBT를 만족하는 지점으로 진행되었기 때문에 연소실 내 최대압력이 발생하는 지점은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 하지만 수소혼합률이 증가할수록 MBT를 만족하는 점화시점은 지각되어 TDC에 점차 가까워지는 것을 확인하였다. 각 실험조건에서의 최대압력과 최대압력 발생시점, 점화시점을 Fig. 5에 나타내었으며, 이를 입증하기 위해 Wiebe function을 이용한 질량연소율(%)을 Fig. 6, 7에 나타

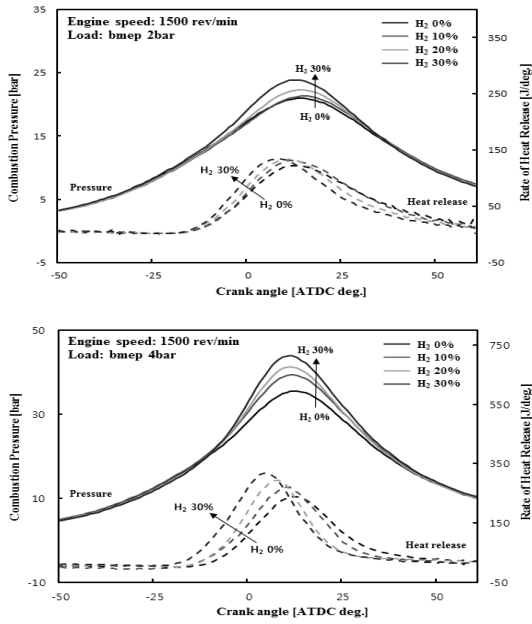


Fig. 3 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen mixtures in a H₂-CNG engine as a function of crank angle. Operating at 1500 rev/min, bmep=2, 4bar

내었다. 질량연소율 비교로부터 수소혼합률이 증가할수록 각각의 점화시기를 기준으로 수소가 포함되지 않은 순수 CNG에 비해 후기연소가 급격하게 나타남을 확인하였다. 이로 인해 SOI 직후부터 질량연소율 90%지점까지 도달하는 연소기간이 짧아짐을 확인하였으며 비교적 저속, 고 부하 조건인 1500 rpm, 4 bar 조건에서 최대 21°까지 단축되는 것을 확인하였다.

따라서 수소혼합률이 증가할수록 수소의 빠른 화염전파특성으로 인해 연소기간이 단축되며, MBT를 만족하는 점화시점이 TDC에 가까워짐에 따라 더 적은 연소실 체적에서 연소가 가능하기 때문에 최대압력과 최대 열 발생률이 증가하는 것으로 판단된다.

이와 같은 결과로 인해 수소가 혼합될수록 비교적 낮은 발열량으로도 각 조건의 MBT를 만족시킬 수 있을 것이라 판단함에 따라 기관 내에 분사된 연료량과 연료의 특성, 발열량 등을 고려해 분석한 결과 Base 조건(수소혼합률 0%) 대비 낮은 발열량으로도

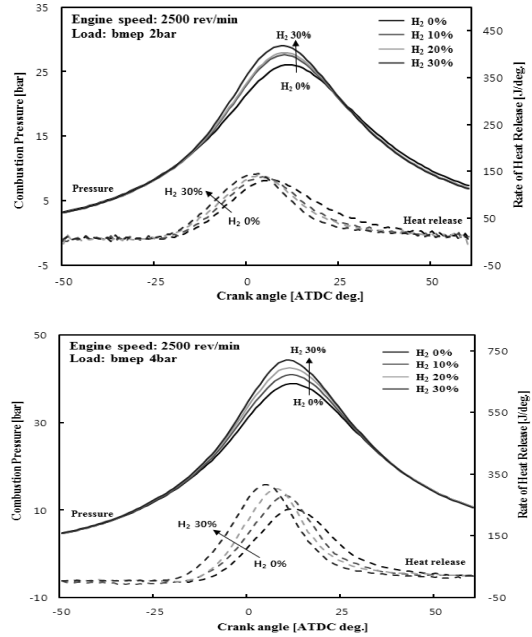
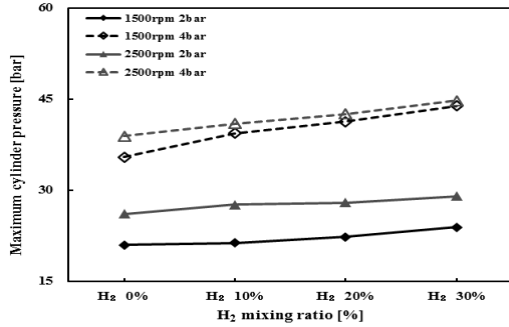


Fig. 4 Cylinder pressure, rate of heat release for hydrogen mixtures in a H₂-CNG engine as a function of crank angle. Operating at 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

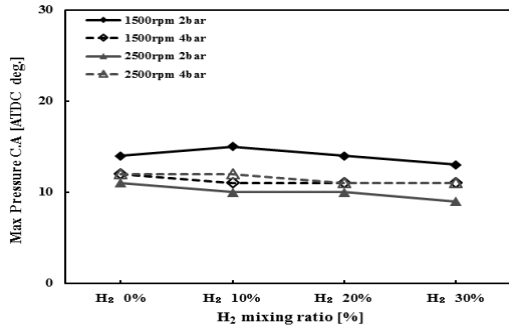
동일한 조건을 만족시킬 수 있는 것을 확인하였으며, 기관조건 2500 rpm, 2 bar, 수소혼합률 30%에서 Base 조건 대비 최대 21.4% 적은 발열량을 사용하여 동일 조건을 만족시키는 것을 확인하였다. 이는 수소의 특성인 연소기간 단축에 의한 연소효율 증가에 의한 것으로 판단된다. Fig. 8은 각 조건에서 기관에 분사된 연료에 대한 발열량을 나타내는 그래프이다.

3.2 수소 혼합에 따른 연소안정성 비교

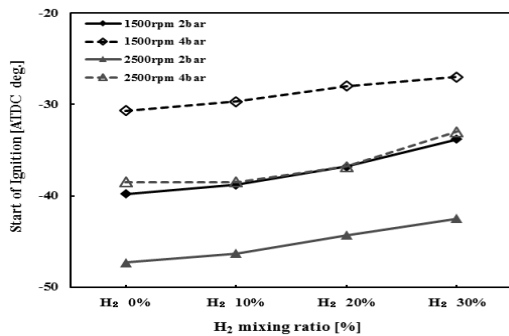
각 기관 회전속도 및 부하조건에서 수소혼합률 변화에 따른 연소안정성을 평가하기 위하여 각 조건별로 1000 cycle 동안의 IMEP_{gross} 표준편차를 10회 반복 수행하여 평균으로 한 C.O.V_{IMEP}를 Fig. 9에 나타내었다. 모든 실험조건에서 C.O.V_{IMEP}는 2%이하로 안정적으로 연소함을 확인하였으며, 순수 CNG만 연소하였을 경우에 비해 수소혼합률이 증가할수록 C.O.V_{IMEP}는 감소하여 더욱 안정적인 연소가 가능함을 확인하



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Variation of (a) maximum cylinder pressure, (b) C.A. of maximum cylinder pressure, (c) C.A. of SOI, with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

였다. 특히 비교적 저속조건인 1500 rpm, 에서의 연소안정성이 크게 증가함을 확인하였다. 이는 다른 조건영역에 비해 상대적으로 희박하게 운전되는 영역으로 수소의 빠른 화염전파속도 및 넓은 가연한계로 인해 더욱 안정적인 연소가 가능하기 때문으로 판단되며, 이와 같은 결과들을 바탕으로 이론공연비라는

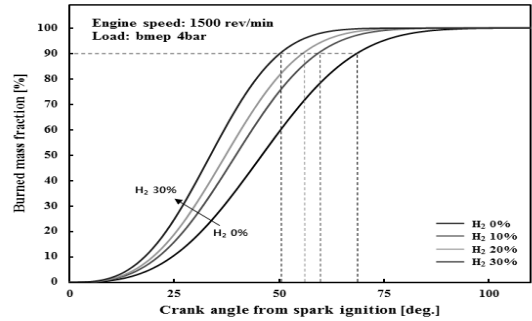
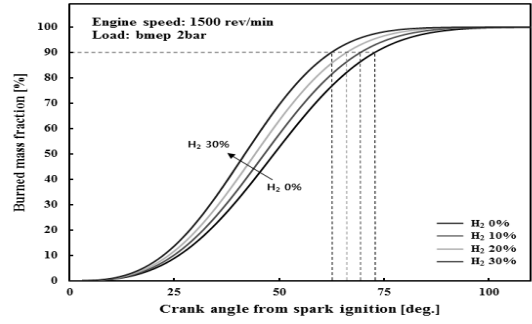


Fig. 6 Burned mass fraction for hydrogen mixtures in a H₂-CNG engine as a function of crank angle from spark. Operating at 1500 rev/min, bmep=2, 4bar

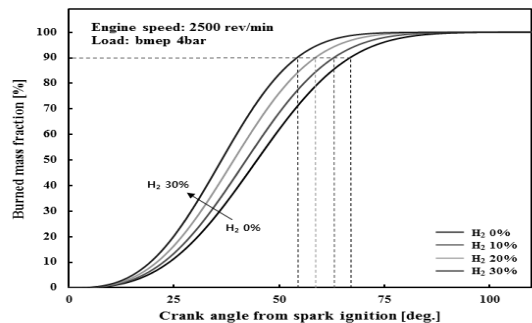
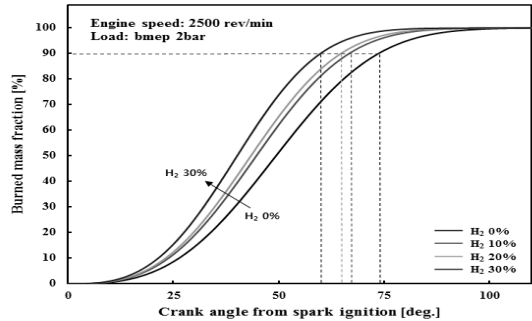


Fig. 7 Burned mass fraction for hydrogen mixtures in a H₂-CNG engine as a function of crank angle from spark. Operating at 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

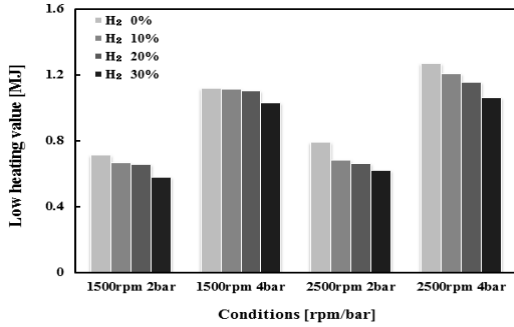


Fig. 8 Variation of Lower heating value with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

한계점이 있는 SI기관에서 CNG-H₂ 혼소 시 희박영역에서의 가연한계확장 및 연소안정성이 충분히 확보 될 것으로 판단된다.

3.3 수소 혼합에 따른 배출가스 특성

3.3.1 이산화탄소(CO₂)

Fig. 10은 기관 회전속도 및 부하, 수소혼합률에 따른 CO₂ 배출농도를 나타내고 있다. 각 조건에서 수소혼합률이 증가 할수록 CO₂의 배출농도가 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 수소혼합률이 증가할수록 총 연료성분 중 탄소가 포함되어있는 CNG (CH₄)의 성분은 줄어들고 탄소가 포함되어 있지 않은 수소(H₂)의 성분은 증가하기 때문에 전체 연료(H₂+CH₄)

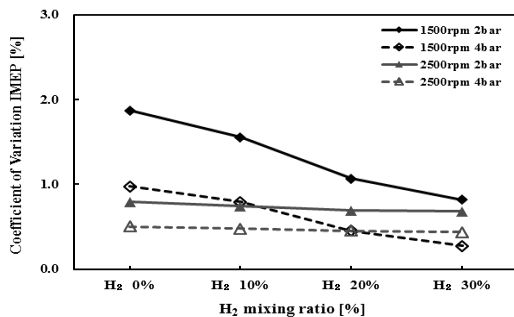


Fig. 9 Variation of C.O.V_{IMEP} with hydrogen mixtures for 1000 consecutive cycles in H₂-CNG engine operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

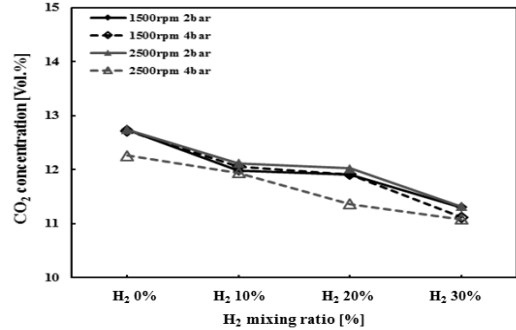


Fig. 10 Variation of CO₂ concentrations with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

Table 4 CO₂ reduction versus base condition(H₂ 0%)

	CO ₂ reduction (%)			
	Base	H ₂ 10%	H ₂ 20%	H ₂ 30%
1500rpm 2bar	0	5.97	6.59	11.30
1500rpm 4bar	0	5.19	6.37	12.58
2500rpm 2bar	0	4.87	5.65	11.15
2500rpm 4bar	0	2.61	7.34	9.62

의 H/C 비율이 증가하여 탄화수소계 연료에서만 발생하는 CO₂의 배출농도가 감소한 것으로 판단된다.

Table 4는 각 실험조건에서 Base 조건(H₂ 0%)을 기준으로 수소 혼합률에 따른 CO₂ 저감 비율을 나타내었다. 실험조건 중 수소혼합률 30% 일 때 H/C 비율이 가장 높기 때문에 CO₂ 저감을 또한 가장 높은 수치를 나타내는 것으로 판단된다.

3.3.2 일산화탄소(CO)

Fig. 11은 기관 회전속도 및 부하, 수소혼합률에 따른 CO 배출농도를 나타내고 있다. CO는 일반적으로 농후한 연료공기 혼합기가 연료의 모든 탄소를 완전히 연소시키는데 요구되는 충분한 산소가 부족하여 발생하는 불완전연소에 의해 발생하는데, 본 연구의 대상기관은 이론공연비로 제어되기 때문에 모든 조건에서 1 vol.% 이하로 CO 배출농도는 상당히 낮은 수준을 보이는 것을 확인하였다. 각 결과마다의 최대 오차범위는 ±0.3 vol.% 이하이고 수소혼합률에

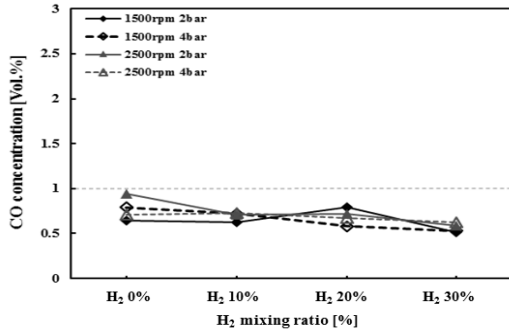


Fig. 11 Variation of CO concentrations with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

다른 명확한 경향성을 보이지 않으며, 그 변동 또한 오차범위 내에 포함된다.

3.3.3 탄화수소(THC)

Fig. 12는 각 실험조건에 따른 HC의 배출농도를 보여주고 있다. 모든 조건에서 수소혼합률이 증가할 수록 THC 배출농도는 감소하는 것을 확인하였다.

일반적인 이론공연비 기관에서 배출되는 탄화수소는 외부 및 냉각수에 의해 상대적으로 온도가 낮은 연소실 벽면에 형성된 소염층(Quenching Zone)에 접근함에 따라 소염되며 생성된다. 이때 연소실 내 온도가 낮고 화염전파속도가 느릴 경우 비교적 소염층이 두껍게 형성되어 HC의 배출농도가 증가하게

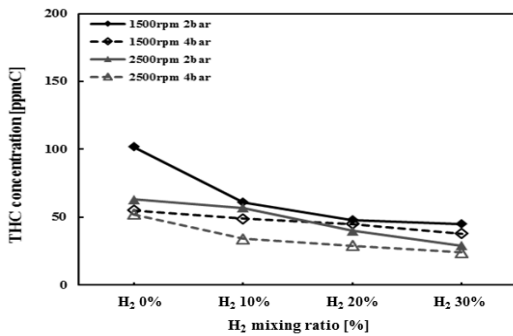


Fig. 12 Variation of THC concentrations with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

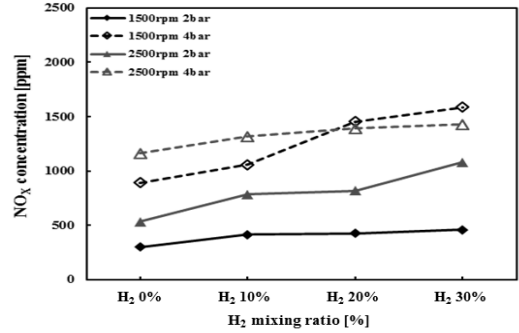


Fig. 13 Variation of NO_x concentrations with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500, 2500 rev/min, bmep=2, 4bar

되는데, 본 연구에서의 기존의 순수 CNG연료에 비해 수소가 혼합 될 경우 수소의 높은 단열화염온도 특성에 의해 연소실 벽면에 소염층 이 얇게 형성되었을 것으로 예상되며, 이로 인해 THC의 배출농도가 감소한 것으로 판단된다.

3.3.4 질소산화물(NO_x)

Fig. 13는 각 실험조건에서 수소혼합률에 따른 NO_x 배출농도를 나타내고 있다. 각 조건에서 수소혼합률이 증가할수록 NO_x 배출농도가 증가하는 경향을 보인다.

NO_x의 생성원인 중 주된 원인은 고온 화염에 의한 높은 온도로 인한 열해리 작용에 의해 발생하는 Thermal NO_x이며, 이에 따라 수소의 단열화염온도 (2384°C)가 CNG의 단열화염온도(1951°C) 보다 400°C 이상 높기 때문에 수소혼합률이 증가 할수록 연소실 내 온도상승에 의해 온도의 의존성이 높은 Thermal NO_x의 생성이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 수행한 수소-CNG 혼소 기관의 이론 공연비 상에서 기관회전속도, 부하, 수소혼합률을 변수로 진행한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 기관회전속도와 부하조건에서 수소혼합률이 증가할수록 SOI 직후부터 최대압력발생까지 도달하는 연소시간이 최대 21%까지 단축됨을 확인하였으며, 이와 같은 결과로 인해 연소효율 증가에 따른 실린더 내 최대압력 및 열 발생률이 상승하는 것을 확인하였다.
- 2) 수소혼합률이 증가할수록 비교적 낮은 발열량으로도 각 기관조건을 만족시킬 수 있는 것을 확인하였으며, 기관회전속도 2500 rpm, bmep 2 bar 조건에서 Base (H₂ 0%)조건 대비 21.4% 낮은 발열량으로 같은 출력을 낼 수 있음을 확인하였다.
- 3) 모든 실험조건에서 CNG만 연소하였을 경우에 비해 수소혼합률이 증가할수록 C.O.V_{IMEP}는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 전 영역에서 C.O.V_{IMEP}는 2% 이하로 안정적으로 연소함을 확인하였다.
- 4) CNG 연료만 연소하였을 때에 비해 연료 내 수소 비율 증가에 따라 CO, HC, CO₂의 배출은 수소의 빠른 화염전파속도 및 넓은 가연범위 특성에 의해 저감되는 것을 확인하였으며 NO_x의 배출량은 단일화염온도가 높은 수소의 특성에 의해 증가하는 것을 확인하였다.
- 5) 본 연구를 통해 기존 CNG연료에 수소를 혼합하여 연소할 경우 수소의 연료특성에 의해 안정적인 연소가 가능함과 동시에 희박가연한계가 넓어져 희박연소가 가능할 것이라 판단되며, 이에 따라 별도의 추가적인 후처리장치 없이도 기관의 유해배출물 특성이 더욱 향상될 것이라 판단된다.

Reference

1. Gyeong 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, pp. 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.