

수소-CNG 혼소기관의 공기과잉률 변화에 따른 희박가연한계 및 배출가스 특성에 관한 연구

김인구¹ · 손지환¹ · 김정화¹ · 김정수¹ · 이성욱² · 김선문^{1,†}

¹국립환경과학원 교통환경연구소, ²국민대학교 자동차공학과

An Experimental Study on Lean-burn Limit and Emission Characteristics of Air-fuel Ratio in a CNG Engine

INGU KIM¹, JIHWAN SON¹, JOUNGHWA KIM¹, JEONGSOO KIM¹, SUNMOON KIM^{1,†}

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

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

†Corresponding author :
ingukim@korea.kr

Received 9 January, 2017

Revised 13 March, 2017

Accepted 30 April, 2017

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 lean combustion limit and emission gas characteristics according and use it as the basic data of hydrogen-CNG premixed engine.

Key words : Hydrogen(수소), Dual-fuel(혼합연소), Excess air ratio(공기과잉률), Lean-burn Limit(희박가연한계)

1. 서론

최근 에너지수급 및 수송용 자동차의 유해 배출가스로 인한 도심 대기 환경문제가 주요 이슈로 대두되면서, 대체에너지에 대한 관심과 요구가 증대되고 있다. 또한 점차 강화되고 있는 각국의 자동차 배기가스규제는 대체에너지를 적용할 수 있는 기관의 개발을 가속화시키고 있다. 현재까지 제안된 다양한 대체연료 중 압축천연가스(compressed natural gas, CNG)는 가솔린이나 디젤 등 화석연료보다 적은 탄소를 포함하고 있기 때문에 CO₂ 배출량 면에서 보다 유리하다고 알려져 있다. 이러한 CNG는 다른 탄화수소계 연료에 비해 탄소와 수소비율이 낮고 황 화합물이나 이산화황화물 등의 공해요소가 낮은 연료이기는 하나, 향후 강화될 배출물 규제에 대응하기 위한 새로운 기술이 요구되고 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.

선행 연구를 통해 기존 CNG 연료에 수소를 혼합하여 연소할 경우 수소의 연료특성에 의해 연소안정성 및 유해 배출물 특성이 향상 되는 것을 확인하였으며^{1,2)}, 이와 같은 연구결과를 통해 수소-CNG 혼소 시 가연한계가 넓어져 희박연소가 가능할 것이라 판단되고, 희박연소가 이루어질 경우 자동차에서 발생하는 유해배출물이 대폭 향상될 것이라 판단된다^{3,4)}.

이에 따라 본 연구에서는 수소혼합률과 공기과잉률을 변수로 설정하여 각 연료별 희박가연한계와 각 공기과잉률별 배출가스 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 SI 기관에 수소-CNG 혼소 시스템을 적용하여 수소혼합률 변화에 따른 희박가연한계와 연소안정성을 파악하고, 연료별 공기과잉률 변화에 따른 배출가스 경향을 파악하여 적용 가능 범위를 판단하고자 실험을 실시하였다.

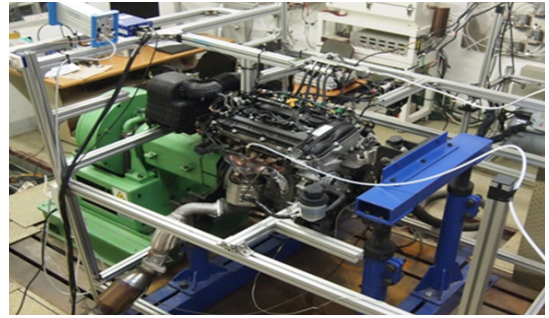


Fig. 1. Photograph of 2.0 LPLi engine

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

2.1 실험장치

2.1.1 대상 기관

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

2.1.2 실험 장비

본 실험에서는 130 kW급 EC 동력계로 기관 회전속도와 부하를 설정하였다. 기관의 작동상태를 파악하기 위해 데이터 수집 장치(NI, SCXI-1302/PCI-MIO-16E-4 Card)를 이용해 흡입공기온도, 엔진 오일온도, 냉각수온도 등의 기관의 작동상태를 파악할 수 있는 요소들의 데이터를 확보하였으며, 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 기관의 작동상태를 실시간으로 확인할 수 있는 OBD (on board diagnostics) 스캐너를 추가적으로 장착하여 수집된 데이터와 비교/확인하였다. 공기과잉률 설정은 Lambda meter (ETAS, LA04)에 연료 조성에 맞는 이론공기연료비 및 H/C비를 계산 후 입력하여 공기과잉률을 유지하였다. 연소실 내 압력을 측정할 수 있는 점화플러그



Fig. 2. Gas injection system installation on the intake manifold

Table 2. Experimental conditions

Speed (rpm)	Load (bmp)	Ignition timing	H2 vol. ratio(%)	Access air ratio (λ)	Coolant temp. ($^{\circ}\text{C}$)
1500 rpm	4 bar	MBT	CNG Only H ₂ 10% H ₂ 20% H ₂ 30%	Increased by 0.1 from base (1.0)	80 ± 2

타입의 압력센서(KISTLER, 6117B)와 Charge meter (KISTLER,5015A)를 이용하여 연소실 내 압력변화를 측정하였고, Labview로 프로그래밍한 제어로직을 통해 연소압력 데이터를 수집하였다. 이 데이터를 바탕으로 C.O.V_{IMEP} (coefficient of variation IMEP)를 확보하여 기관의 연소안정성을 파악하였다. 배출가스 분석을 위해 삼원촉매 전단의 배기매니폴드에 냉각코일이 포함된 시료 채취관을 삽입하였으며^{5,6)}, 배출가스 분석기(HORIBA, EXSA-1500)를 통해 기관의 배출특성을 분석하였다. 기존에 장착된 LPLi용 injector는 액상의 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 사용하였다. Fig. 2는 흡기매니폴드에 별도로 장착된 기상연료 분사 시스템의 모습이다.

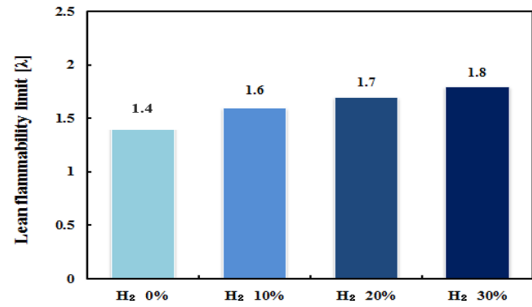


Fig. 3. Limit of lean flammability with hydrogen mixtures in H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

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 혼합하였다⁷⁾. 기관회전속도 및 부하조건은 실제 도심주행에서 주로 구현되는 중속, 저부하 영역을 바탕으로 설정하였으며, 점화시점은 진/지각을 통해 최적의 점화시기(MBT)에서 실험하였다. 모든 실험에서 공기과잉률(λ)은 이론공연비를 기준으로 0.1씩 증가시켰으며, 각 공기과잉률에서 엔진의 정상작동이 불가하거나, C.O.V_{IMEP}가 5% 이상일 경우 연소가 안정적이지 않음으로 판단, 해당 연료의 가연한계를 판단하였다. 냉각수의 온도는 80 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으며, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 10회 반복 실험하였다. 이와 같은 조건에서 수행한 실험결과를 통해 수소혼합에 따른 희박가연한계와 연소안정성, 배출가스 특성변화를 파악하여 희박연소의 가능성을 판단하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소혼합에 따른 가연한계와 연소안정성

Fig. 3은 설정된 운전조건에서 각 연료에서의 희박가연한계를 나타내고 있으며, 연소가 가능한 공기과잉률 조건에서의 연소안정성을 평가하기 위해 C.O.V_{IMEP}를 Fig. 4에 나타내었다. 수소혼합률이 증

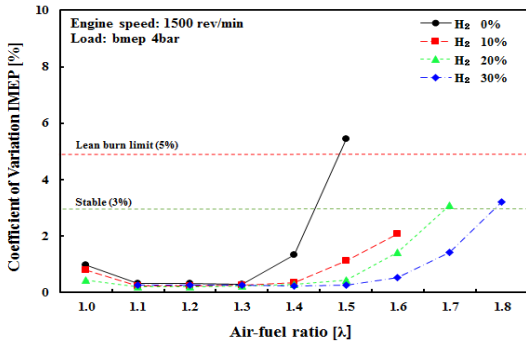


Fig. 4. Variation of C.O.V_{IMEP} with hydrogen mixtures and Lambda in H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

가할수록 기존의 CNG 연료에 비해 희박가연한계가 확장하는 것을 확인하였으며, 동일한 공기과잉률 조건에서의 C.O.V_{IMEP}는 감소하는 결과를 보여 연소 안정성이 향상됨을 확인하였다. 연소안정성 판단의 일반적 기준인 C.O.V_{IMEP} 5%를 희박가연한계라 설정하였을 때 기존 CNG 연료만 연소하였을 경우 공기과잉률 1.4 이후 영역에서 변동계수가 증가하여 안정적인 연소가 불가하거나, 정상작동이 불가함을 확인하였다. 이는 과도하게 희박한 영역에서 연료부족으로 인해 발생하는 부분연소 및 불완전연소 등의 영향을 받아 각 사이클에 대한 연소가 불균형적으로 이루어졌기 때문으로 판단된다⁸⁾. 수소가 혼합된 모든 경우에는 변동계수가 감소하여 안정적인 연소가 가능함과 동시에, 희박가연한계가 확장됨을 확인하였다. 이와 같은 결과는 수소가 혼합됨에 따라 높은 공기연료비에 의한 실린더 내부에서 발생할 수 있는 실화(misfire)를 방지하고 안정적인 연소가 가능하도록 기여하기 때문으로 판단된다.

3.2 희박연소에 따른 배출가스 특성

3.2.1 이산화탄소(CO₂)

Fig. 5는 설정된 운전조건에서 각 연료에 대한 공기과잉률 변화에 따른 CO₂의 배출농도와 Base 조건 (only CNG, λ = 1.0) 대비 CO₂의 저감률을 나타내고 있다. 공기과잉률이 증가할수록 CO₂의 배출량이

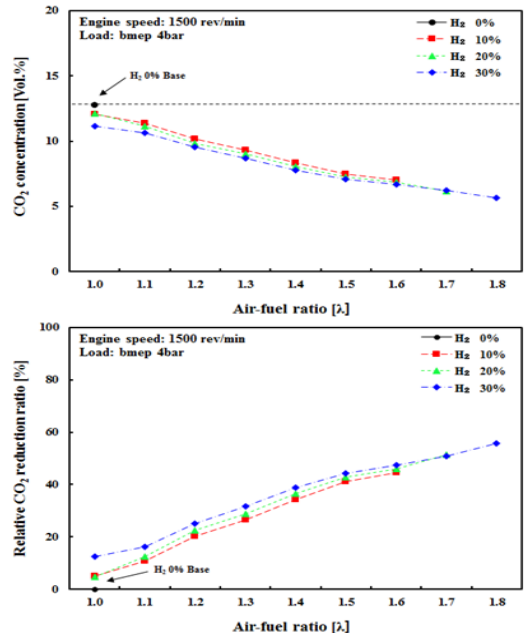


Fig. 5. Variation of CO₂ concentrations & reduction ratio by variation of hydrogen mixtures and Lambda in a H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

선형적으로 감소하는 경향이 나타남을 확인하였으며, 수소혼합률이 가장 높은 30% 조건에서는 최대 54%까지 저감됨을 확인하였다. 수소혼합률이 증가할수록 각각의 연료(H₂ + CH₄)의 H/C 비율이 증가하여 탄화수소계 연료에서만 발생하는 CO₂의 배출농도가 감소된 것이라 판단되며⁹⁾, 이와 함께 일정한 실린더 내의 공기과잉률이 증가할수록, 분사된 연료의 양이 감소하여 실린더 내에 분사되는 연료량 자체가 감소하는 영향에 의한 것으로 판단된다. 이에 따라 안정적인 연소가 확보되는 C.O.V_{IMEP} 5% 미만에서의 CO₂의 배출농도는 수소혼합률과 공기과잉률이 높을수록 감소하는 것으로 판단된다.

3.2.2 일산화탄소(CO)

Fig. 6은 각 연료에 대한 공기과잉률 변화에 따른 CO의 배출농도와 Base 조건 대비 CO의 저감률을 나타내고 있다. 수소가 포함되어 있지 않은 순수 CNG 연료의 CO 배출량 대비 수소가 포함된 모든 조건에서 95% 이상의 저감률을 확인할 수 있었으

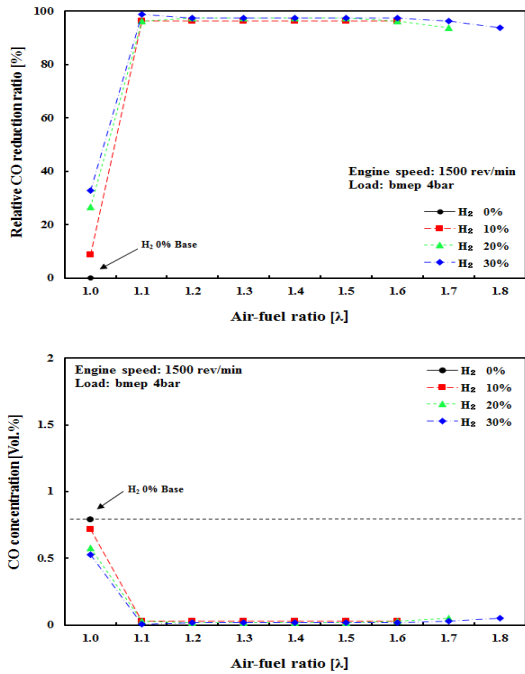


Fig. 6. Variation of CO concentrations & reduction ratio by variation of hydrogen mixtures and Lambda in a H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

며, 수소혼합률이 가장 높은 30% 혼합조건에서 최대 98% 저감됨을 확인하였다. 이는 공기과잉률이 증가함에 따라 산소가 풍부해지고, 실린더 내 분사된 모든 연료를 연소시키는데 충분한 산소가 확보됨에 따라 불완전연소의 비율이 크게 감소되어 CO의 배출량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 각 조건에서 희박가연한계에 근접함에 따라 CO의 배출량이 미세하게 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 과도한 희박에 따라 상대적으로 연료부족으로 인해 발생하는 부분연소 및 불완전연소 등의 영향인 것으로 판단된다. 그러나 증가하는 양이 극히 소량이며, Base 조건 대비 90% 저감된 상당히 낮은 수준임을 결과를 통해 확인하였다.

3.2.3 탄화수소(THC)

Fig. 7은 각 연료에 대한 공기과잉률 변화에 따른 THC의 배출농도와 Base 조건 대비 THC의 저감률을 나타내고 있다. 전체적으로 수소혼합률이 높을수

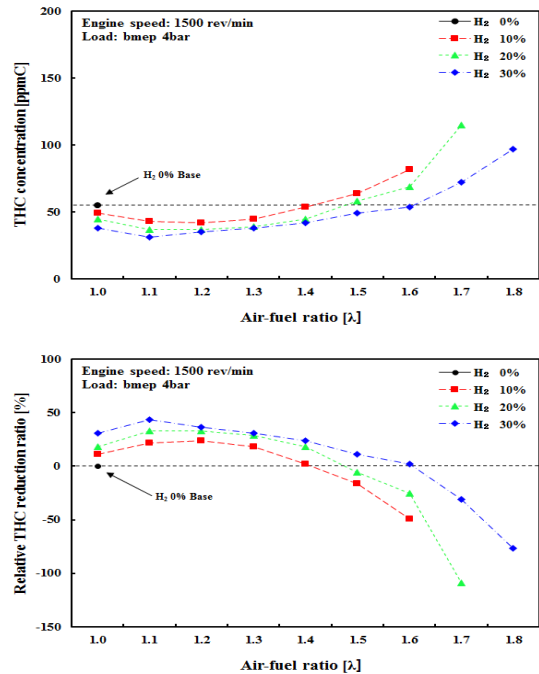


Fig. 7. Variation of THC concentrations & reduction ratio by variation of hydrogen mixtures and Lambda in a H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

록 THC의 배출량은 감소함을 보이며, 공기과잉률이 이론공연비보다 약간 높은 1.1~1.2 영역에서 모든 연료조건에서의 THC 배출량이 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 실제기관에서의 연료와 공기는 완전하게 균일 혼합된 상태가 아니기 때문에 가장 이상적인 연소가 가능한 약간 희박한 영역에서의 완전연소에 의한 것으로 판단된다. 또한 수소혼합률이 증가할수록 연료 내 H/C 비율 증가와, 수소의 연료 특성(높은 단열화염온도)에 의한 소염층(Quenching area) 감소에 의한 것으로 판단된다. 이후의 공기과잉률 조건부터 희박가연한계에 근접함에 따라 부분연소 및 불완전연소에 의해 THC의 배출량은 다시 증가함을 확인하였다¹⁰⁾. 수소혼합률이 30%인 연료 조건에서 공기과잉률이 1.6인 과희박한 조건에서도 Base 조건의 배출량과 동일한 수준임을 확인하였다.

3.2.4 질소산화물(NOx)

Fig. 8은 설정된 운전조건에서 각 연료에 대하여

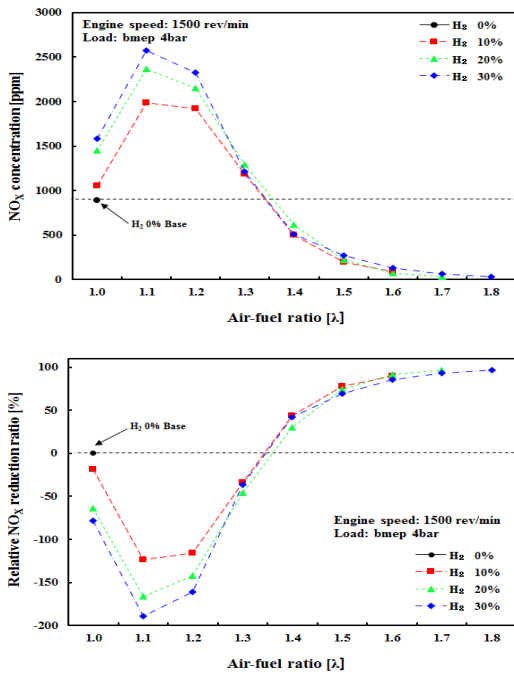


Fig. 8. Variation of NO_x concentrations & reduction ratio by variation of hydrogen mixtures and Lambda in a H₂-CNG engine. Operating at 1500 rev/min, bmep = 4bar

공기과잉률 변화에 따른 NO_x의 배출농도와 Base 조건 대비 NO_x의 저감률을 나타내고 있다. 공기과잉률 1.1 조건에서의 NO_x의 배출량이 일시적으로 증가하였으나, 이후의 희박 영역에서부터는 급격히 감소하는 경향을 보임을 확인하였다. 일반적으로 NO_x의 주 생성원인은 고온 화염에 의한 높은 연소실 온도, 농후한 산소농도, 산소와 질소가 반응할 수 있는 충분한 시간과 열해리과 같은 복잡한 상호작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다^{9,11)}. 이와 같은 여러 생성원인 중 NO_x의 생성에 가장 크게 관여하는 Thermal NO_x는 실린더 내 온도에 의존성이 강하며, 이에 따라 동일한 공기과잉률 조건에서 수소 혼합률이 증가할수록 수소의 높은 단열화염온도에 의해 NO_x의 배출농도가 증가함을 확인하였다.

그러나 화염전파속도가 빠르다는 수소의 또 다른 특성에 의해 연료 내 수소가 포함될 경우 Base 조건 대비 과희박한 영역에서도 안정적인 연소가 가능해져 희박가연한계가 확장됨을 알 수 있었다¹²⁾. 따라

서 연소실 내 유입공기량의 증가에 의한 냉각 효과가 Thermal NO_x의 생성을 억제하는데 큰 영향을 미쳐 공기과잉률 1.1 이후의 영역에서 NO_x의 생성량이 급격히 감소한 것으로 판단되며, 이 결과를 통해 수소혼합률에 의해 증가된 NO_x의 생성량을 희박연소에 따른 저감률로 상쇄시킬 수 있음을 확인하였다. 수소의 비율이 가장 높은 30% 조건에서 NO_x의 생성은 극히 소량이며, 기존 Base 조건 대비 최대 96% 이상의 저감률을 보임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 수소-CNG 혼소 기관에서 수소혼합률, 공기과잉률을 변수로 설정하고 희박가연한계 및 연소안정성, 배출가스의 특성을 파악하여 희박연소의 가능성을 판단하고자 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 수소혼합률이 증가할수록 기존의 CNG 연료에 비해 희박가연한계가 확장하는 것을 확인하였으며, 동일한 공기과잉률 조건에서의 연소안정성은 향상되어 C.O.V_{IMEP}는 감소함을 확인하였다.

2) CO의 배출량은 공기과잉률의 증가에 따라 급격히 감소되었으며, THC의 경우 연료 내 수소의 비율이 증가할수록 배출이 감소되는 것을 확인하였으나 공기과잉률을 1.6 이상으로 제어할 경우 불완전연소에 의해 CNG 연료만 연소하였을 때보다 배출이 증가하는 것을 확인하였다.

3) CO₂ 배출량은 희박연소한계에 근접할수록 감소하였으며, NO_x의 경우 연료 내 수소의 비율이 높을수록 배출량이 증가하지만 공기과잉률이 증가하면서 과희박 영역으로 갈수록 NO_x 배출이 급격히 저감되는 것을 확인하였다.

4) 수소혼합률 30%, 공기과잉률 1.6 조건에서의 유해 배기가스 배출량이 다른 조건에 비해 월등히 낮은 수준이었으며, 연소안정성 또한 충분히 확보됨에 따라 본 실험에서 가장 효율적인 조건이라 판단된다.

References

1. I. Kim, J. Son, J. Kim, S. Kim, J. Kim, and S. Lee, "An Experimental Study on the Performance and Emission Characteristics of Hydrogen mixture in a CNG Engine", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 4, 2016, pp. 357-364.
2. K. Kim, Y. Cho, and S. Lee, "An Experimental Study Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen Enriched LPG fuel in a Constant Volume Chamber", *KSAE*, KSAE12, 2012, pp. 360-366.
3. I. Kim, K. Kim, S. Lee, and Y. Cho, "An Experimental Study on the Performance and Emission Characteristics with Hydrogen Enrichment at Part Load Conditions Using a LPG Engine", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 3, pp. 242-248.
4. S. Won, C. Park, and C. Kim, "A Study on the Development of Hydrogen- Natural gas Dual fuel engine", *KSAE10-B0027*, 2010.
5. D. 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.
6. D. Ko, H. Lee, S. Choi, Y. Lim, Y. Cho, and S. G. Lee, "A Study on the Combustion and Emission Characteristics of HCNG for Vehicle Application", *KSAE10-A0122*, 2010.
7. 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, 2006, pp. 139-145.
8. Y. Goto and Y. Sato, "Combustion Improvement and Exhaust Emissions Characteristics in a Direct Injection Natural Gas Engine by Throttling and EGR", *JSME*, Vol 7, No. 659, 2001, pp. 228-233.
9. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, USA, 1988.
10. S. Oh, C. Kim, and K. Kang, "Lean Combustion Characteristics with Hydrogen Addition in a LPG Fuelled Spark Ignition Engine", *KSAE*, Vol. 14, No. 2, pp. 114-120.
11. J. Kim, J. Lee, C. Hwang, and C. E. Lee, "NOX Formation Characteristics with Strain rate in H₂/Air Non-premixed Flames", *Journal of KOSCO*, 2008.
12. T. Wallner, "Efficiency and Emissions Potential of Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles", *SAE paper 2011-26-0003*, 2011.