



HCNG 엔진의 공기과잉을 변화에 따른 노킹 특성에 관한 연구

임기훈 · [†]박철웅* · 이성원* · 최 영* · 김창기* · 이장희*
과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과, *한국기계연구원
(2012년 6월 15일 접수, 2013년 1월 2일 수정, 2013년 1월 2일 채택)

A Study on the Knocking Characteristics with Various Excess Air Ratio in a HCNG Engine

Gihun Lim · [†]Cheolwoong Park* · Sungwon Lee* · Young Choi*
Changgi Kim* · Janghee Lee*

Dept. of Environment & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajungro Yuseong-gu Daejeon 305-350, Korea

**Korea Institute of Machinery and Materials, 104 Sinseongno Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea*

(Received June 15, 2012; Revised January 2, 2013; Accepted January 2, 2013)

요약

자동차 배기가스 규제가 강화됨에 따라 천연가스에 수소를 첨가하는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG)를 기존의 압축천연가스(CNG) 엔진에 적용하려는 많은 연구들이 진행되고 있다. 그러나 수소의 높은 연소 속도로 인한 역화, 조기착화, 노킹(knocking) 등의 이상연소 발생 가능성은 엔진의 가열 또는 열효율 및 출력의 저하를 야기하는 문제점이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 CNG 연료에 수소를 일정 부분 혼합한 HCNG 연료를 기존의 CNG 엔진에 적용하여 희박연소 한계 확장을 통해 연소 성능 개선을 확인하고, CNG와 HCNG 연료의 노킹 특성을 파악하고자 하였다. 공기과잉율의 변화에 따른 노킹 발생 조건을 관찰함으로써 HCNG 연료의 적용성 및 노킹마진을 평가하고자 하였다. HCNG 연료 사용 시 최적운전조건에서 노킹 문제없이 엔진을 운전할 수 있었으나 노킹이 일어날 수 있는 가능성이 높아져 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract - As emission regulation for vehicle has been reinforced, many researches carried out for HCNG(hydrogen-natural gas blends) fuel to the conventional compressed natural gas (CNG) engine. However, abnormal combustion such as backfire, pre-ignition or knocking can be caused due to high combustion speed of hydrogen and it can result in over heating of engine or reduction of thermal efficiency and power output. In the present study, improvement of combustion performance was observed with HCNG fuel since it can extend a flammability limit. Knocking characteristics for CNG and HCNG fuel were investigated. Feasibility of HCNG fuel was evaluated by checking the knock margin according to excess air ratio. The operation of engine with HCNG was stable at minimum advance for best torque(MBT) spark timing and knock phenomena were not detected. However, it is necessary to prepare higher knock tendency since possibility of knock is higher with HCNG fuel.

Key words : CNG, HCNG, Knocking, Thermal efficiency, Excess air ratio, Lean combustion

[†]Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr

I. 서론

천연가스는 메탄(CH₄)이 주성분인 가연성 가스로서 탄소 성분이 적을 뿐만 아니라 유황, 분진 등의 불순물도 거의 함유되지 않은 청정 연료로서 장기적으로 안정된 공급이 가능한 대체 에너지원으로 전망이 밝다. 하지만 기존의 천연가스 기관으로는 추후 강화되는 중대형 차량의 배기가스 규제 강화치를 만족시키기 어려울 것으로 보인다. 이에 대한 대안으로 천연가스에 수소가스를 첨가하는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG or Hythane) 동력시스템이 유력한 해결 기술의 하나로 제시되고 있다[1-3]. 그러나 수소의 높은 연소 속도로 인하여 역화, 조기착화, 노킹(knocking) 등의 이상연소가 발생할 수 있다.

노킹 현상은 엔진 실린더 내에서 이상연소에 의해 망치로 두드리는 것과 같은 날카로운 소리가 나는 현상이다. 스파크 점화 엔진의 고부하 운전영역에서 주로 문제가 되는 현상으로서 스파크 플러그에 의한 화염과 배기 밸브 쪽에서 비정상적으로 자발화된 화염이 충돌하면서 급격한 압력상승과 함께 고주파의 압력파를 만들어내는 현상이다[4,5]. 이러한 노킹 현상은 저옥탄가 연료를 사용하거나, 흡기 온도가 높을 때, 점화 시기가 이를 때, 압축비가 높을 때, 엔진이 과열되어 있을 때, 연소실에 카본이 축적되어 있을 때, 혼합기가 농후할 때 등 발생하게 된다[4]. 노

킹이 일어날 경우 엔진의 피스톤, 실린더 라이너, 실린더 헤드 등 엔진의 주요 부품에 치명적인 손상을 일으킬 뿐 아니라 출력 저하의 원인이 되기 때문에 엔진 개발 시 필수적으로 고려되어야 하는 제어요구 사항이다[6-8].

본 연구에서는 시내버스용 대형 HCNG 엔진 개발의 일환으로서 CNG 연료에 수소를 일정 부분 혼합한 HCNG 연료를 기존의 CNG 엔진에 적용하여 희박 연소를 시킴으로서 연소 성능을 개선하고, CNG와 HCNG 연료의 노킹 특성을 파악하고자 하였다. 비교를 위해 공기과잉율에 따른 노킹 발생 조건들을 관찰함으로써 HCNG 연료의 적용성을 평가하고자 하였다.

II. 실험장치 및 실험방법

와류 동력계(Schenck co., WT470)를 사용하여 엔진의 속력 및 부하를 제어함으로써 실험적 연구를 수행하였다.

2.1. 실험장치

본 연구에 사용한 엔진은 EURO-5 배기규제에 대응이 가능한 시내버스용 11 L급 6기통 압축천연가스(CNG) 엔진(GL11K, Doosan Infracore Inc.)이다. 자세한 엔진 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은

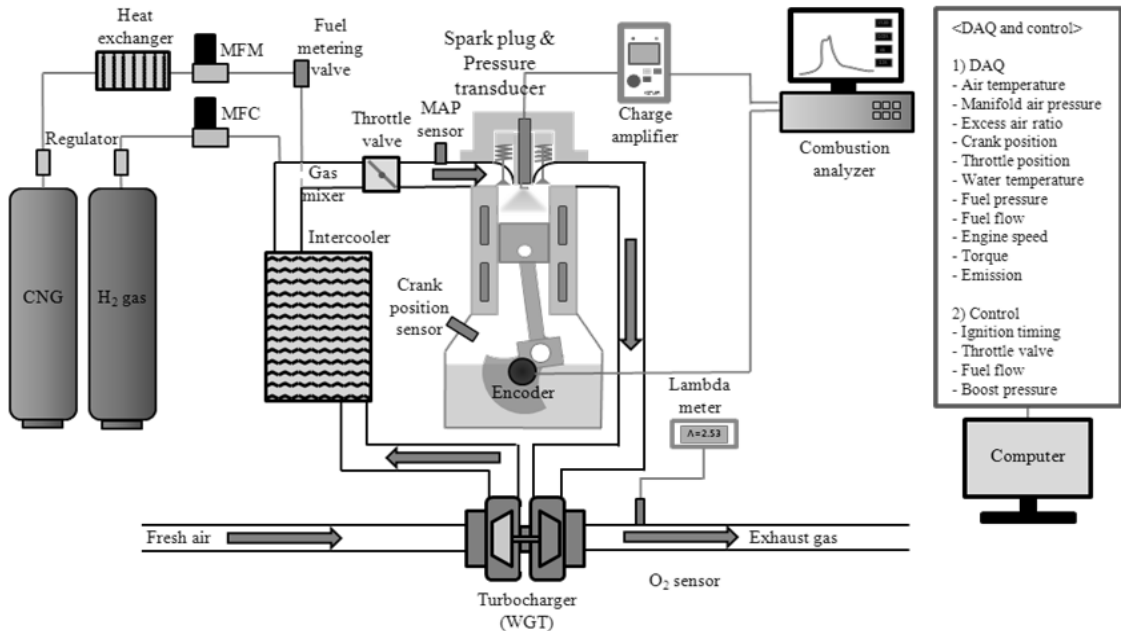


Fig. 1. Schematic diagram of engine experimental setup.

Table 1. Engine specifications

Engine type	CNG - TCI
Cylinder No.	6
Bore × Stroke	123 mm × 155 mm
Displacement	11.051 L
Compression ratio	10.5 : 1
Max. Power	213 kW at 2,100 rpm
Max. Torque	1,150 Nm at 1,260 rpm

엔진 실험의 개략도를 보여준다. HCNG 연료를 모사하기 위해 CNG와 수소 분배로부터 레귤레이터를 거쳐 감압된 가스를 MFC (Mass flow controller)를 통해 유량을 각각 제어하여 수소의 비율을 조절하였다. 압축기를 통해 가압된 흡입공기는 인터쿨러에서 냉각 후 흡기 파이프를 통해 공급된 연료와 혼합되어 스로틀 밸브를 지나 엔진 실린더 내부로 공급된다. 스파크 플러그를 통해 연소된 배기가스는 터빈을 거쳐 배출된다. 1번 실린더에 스파크 플러그형 압력 센서 (KISTLER co., 6117BFD17)를 설치하였고 압력 센서로부터 나오는 신호는 전하증폭장치 (KISTLER co., 5011)를 이용해 증폭 후 크랭크축에 연결된 엔코더의 신호와 동기화시켜서 연소해석기 (DEWETRON co., DEWE800)에서 실린더 압력을 측정하였다. 실린더 압력의 실시간 측정을 통해 열방출률, 실린더 압력의 최대 변화율 등을 관찰하였다. 혼합기의 공기과잉율은 터빈 후단에 설치한 램다센서 (ETAS co., LA4)를 이용해 관찰하였다. Engine control unit을 이용해서 점화 시기, 스로틀 밸브, 연료 유량, 과급 압력 등을 제어하였으며, DAQ 장비 (GRAPHTEC co., GL820)를 사용하여 엔진 주요 부위의 온도 및 압력, 연료 유량을 측정하였다.

2.2. 실험방법

Table 2에 실험 조건을 정리하여 나타내었다. 노킹이 일어날 가능성이 큰 최대 토크 운전조건에서 엔진을 운전하였으며, 연료는 CNG와 HCNG30(CNG 70 vol.%, H2 30 vol.%)를 사용하였다. 공기과잉율은 1.3부터 0.1씩 증가시키며며 회박 연소 한계까지 실험하였다. 점화시기는 2도 간격으로 진각 또는 지각시키며 최적점화시기(Minimum spark advance for Best Torque; MBT)를 찾았다. 엔진은 충분히 예열된 상태로 실험을 진행하였다.

일반적으로 노킹현상이 고주파의 급격한 압력변동과 함께 소음을 동반하지만, 상기와 같은 현상을

Table 2. Experimental conditions

Engine speed	1,260 rpm
Torque	1,150 Nm
Fuel	CNG & HCNG30
Excess air ratio	From 1.3 at the intervals of 0.1
Ignition timing	Advanced with 2 CAD
Coolant temp.	(82.5±2.5) °C

정량적인 노킹 발생의 기준으로 설정하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 실린더 압력의 최대 변화율을 기준으로 하였다.[9] 연소해석기를 통해 열방출률 곡선을 관찰할 때 팽창행정에서의 순간적인 추가 열방출을 확인하였으며, 상기와 같은 이상연소의 특성이 빈번하게 발생될 때의 실린더 압력의 최대 변화율은 500 kPa/CAD (Crank angle degree) 이상 값으로 측정되어 이를 노킹 발생의 기준으로 선정하였다. 차량 제작사에서도 엔진의 사양에 따라 차이는 있으나 일반적으로 압력의 최대 변화율이 400 kPa/CAD 이상인 경우 이상연소로 판정하고 이의 회피를 위해 운전전략을 변경하고 있기 때문에 타당한 수치로 볼 수 있다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 CNG와 HCNG 연료에 대해 공기과잉율에 따른 MBT 시점에서의 열효율 경향을 보여준다. HCNG 연료를 사용 시 MBT 점화시기에 운전될 경우 노킹 현상은 발생하지 않았으며, 이는 연료에 수소가 첨가되더라도 MBT 점화시기 조건에서의 안정적인 운전은 영향을 받지 않음을 보여주는 결과이다. 전체적으로 CNG에 비해 보다 안정적인 연소를 통해 약 2% 높은 열효율을 보였다. 그러나 실제 현장에서 운전되는 엔진의 경우 제어장치의 이상 작동 또는 센서류와 같은 핵심부품의 고장에 의해 실제 운전조건이 최적운전조건과 달라질 수 있다. 엔진에 공급되는 HCNG 연료의 조성이 일정하지 않아 수소의 비율이 달라지는 것도 최적조건에서의 운전을 방해하는 원인 중의 하나이다. 이렇게 HCNG 연료에 맞게 최적운전조건을 설정하더라도 위와 같은 원인에 의하여 운전조건에서 차이가 발생하게 되면 MBT 점화시기를 벗어나게 되고 이 경우 노킹이 발생할 여지가 있다. 엔진의 안정적인 운전을 위해 각 공기과잉율 조건에서 노킹으로부터 어느 정도 안전한 범위에서 운전되는지를 판단할 수 있도록 노킹

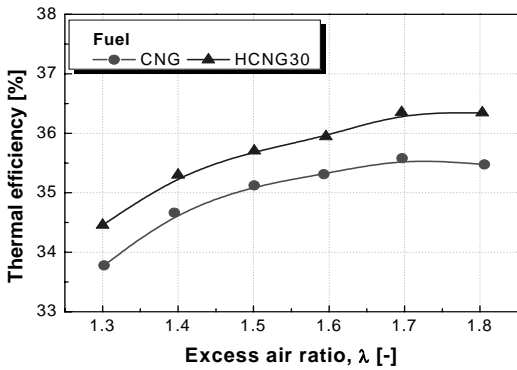


Fig. 2. Thermal efficiency at MBT timing with various excess air ratio for CNG and HCNG30 fuels.

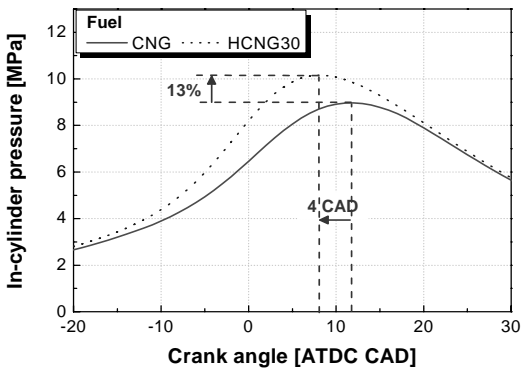


Fig. 3. In-cylinder pressure curve at the condition of $\lambda=1.6$, spark advance of BTDC 32 CAD for CNG and HCNG30 fuels.

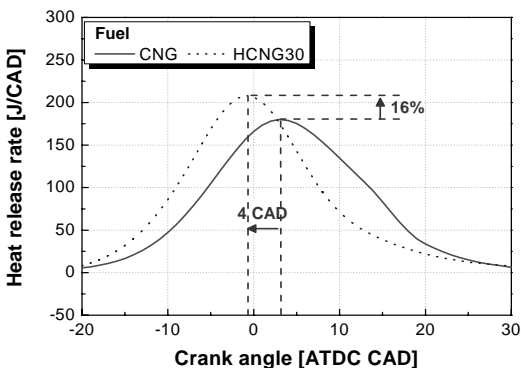


Fig. 4. Heat release rate curve at the condition of $\lambda=1.6$, spark advance of BTDC 32 CAD for CNG and HCNG30 fuels.

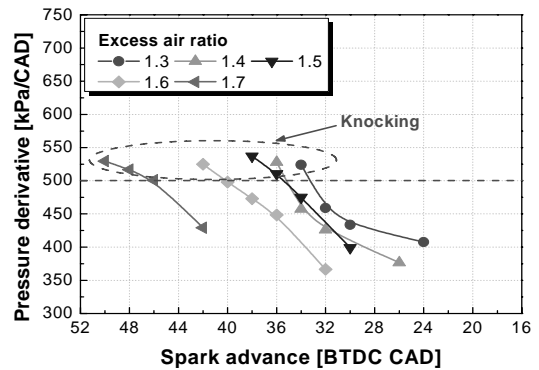


Fig. 5. Maximum derivative on in-cylinder pressure according to spark advance for excess air ratio with CNG fuel.

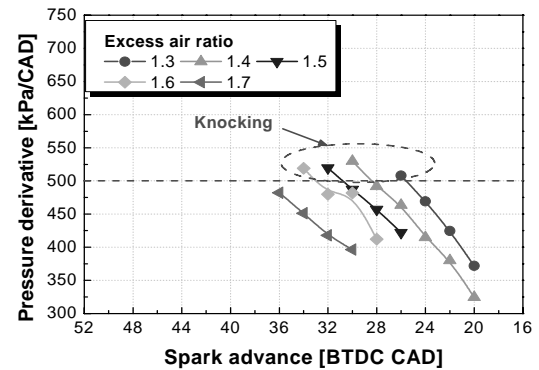


Fig. 6. Maximum derivative on in-cylinder pressure according to spark advance for excess air ratio with HCNG30 fuel.

마진을 검토할 필요가 있다.

Fig. 3에 나타난 것과 같이 공기과잉율 1.6, 점화 시기를 BTDC (Before top dead center) 32도로 일정하게 하고 연료에 따른 실린더 압력변화를 살펴보면, HCNG의 경우 CNG에 비해 최대압력값이 4도 진각된 시기에 나타나며 그 절대치도 13% 정도 증가하였다. Fig. 4의 열방출율 결과도 이와 유사하게 HCNG의 경우 CNG에 비해 4도 진각한 시기에 최대 열방출을 보이며, 16% 정도 증가된 최대 열방출을 값을 보였다. 이는 수소의 첨가로 인해 연소속도가 증가하여 열방출이 급격하게 일어남으로 인해 나타나는 결과로 볼 수 있다. 이러한 경향은 수소의 연소특성에 대한 다른 연구결과들과 일치하는 내용이며 HCNG 연료를 사용할 경우 실제로 노킹이 일어날 수 있는 가능성이 더 높음을 의미하는 결과이다.

Fig. 5와 6은 각각의 연료에 대해서 공기과잉율의

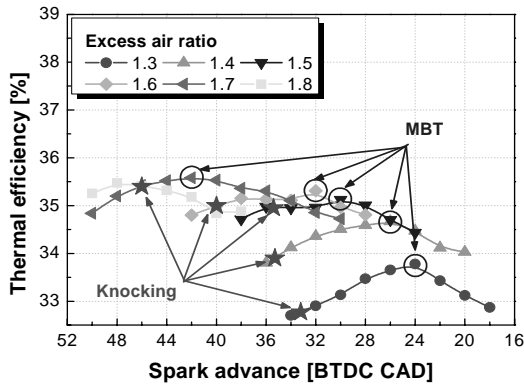


Fig. 7. Thermal efficiency according to spark advance for excess air ratio with CNG fuel.

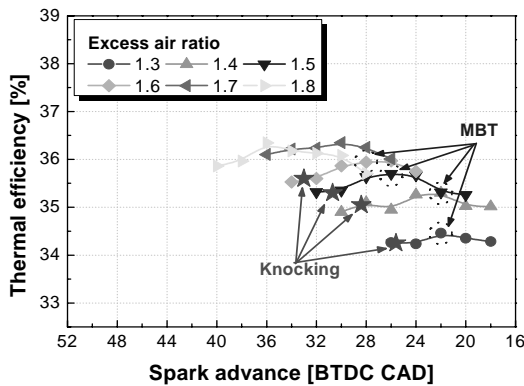


Fig. 8. Thermal efficiency according to spark advance for excess air ratio with HCNG30 fuel.

변화에 따른 실린더 압력의 최대 변화율 경향을 나타낸 것이다. HCNG의 경우 연소속도가 CNG에 비해 빠르기 때문에 각 공기과잉율에 대해서 전체적으로 지각된 점화시기 조건에서 실험이 진행되었으며, 이때 CNG와 유사한 값의 최대 압력상승율을 보이고 있다. 일정한 점화시기 조건에서는 혼합기가 희박할수록 희석효과에 의해 연소속도가 감소되기 때문에 압력변화율의 최대값이 감소되었다. 두 연료 모두에 대해서 점화시기를 진각 시킬수록 압축행정에서의 열방출 비율이 높아지기 때문에 최대 압력변화율이 높아지는 경향을 보인다.

Fig. 7과 8은 각각의 공기과잉율 조건에서 점화시기의 변화에 따른 열효율 결과를 나타낸 것이다. 위에서 언급한 것과 같이 두 연료 모두 전 공기과잉율 조건에서 MBT 점화시기보다 진각된 조건에서 노킹

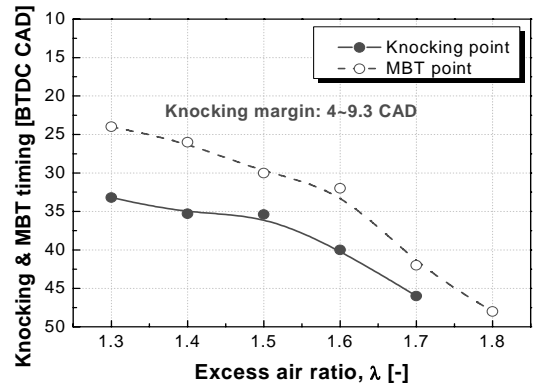


Fig. 9. Knocking and MBT timing according to excess air ratio with CNG fuel.

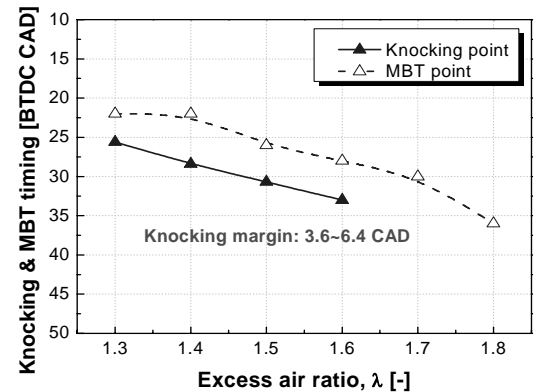


Fig. 10. Knocking and MBT timing according to excess air ratio with HCNG30 fuel.

이 발생을 하고 있기 때문에 MBT 점화시기 조건에서의 운전에는 영향을 미치지 않는다. MBT 점화시기보다 지각되거나 진각된 경우 노킹 또는 지연된 열방출에 의하여 효율이 감소하였다. 희박연소한계의 확장을 목적으로 하는 HCNG 연료의 경우 1.7이상의 희박영역에서는 희석에 의한 영향이 크기 때문에 노킹현상이 발생하지 않고 이상연소에 의한 악영향을 크게 고려하지 않아도 된다.

Fig. 9와 10은 각 연료에 대해서 공기과잉율 변화에 따른 노킹 발생 시점과 MBT 점화시기를 비교하여 노킹 마진을 도시한 그래프이다. MBT 점화시기를 기준으로 노킹이 발생하기까지의 점화시기 여유를 노킹 마진으로 간주할 수 있으며, HCNG 연료의 경우 CNG의 경우에 비해 두 점화시기 간의 폭이 감소하여 노킹마진이 줄어드는 것을 볼 수 있다. CNG의 경우 4~9.3도, HCNG의 경우 3.6~6.4도의 노킹

마진을 확인하였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 추가적인 연소효율의 증가를 위한 압축비 증가와 같은 연소실 형상 변경은 노킹 경향성을 증대시키기 때문에 HCNG 연료에 대해서는 적용이 어려울 것으로 판단된다. 기존 CNG 엔진에서도 연소안정성 확보를 위해 상대적으로 농후하게 운전되는 영역 또는 시내버스용 엔진에서 출력성능이 중요하여 농후한 혼합기로 운전되는 저회전수 영역에서는 이상연소 발생 가능성이 증가하며 감소된 노킹마진은 엔진의 운전 안정성을 저해할 수 있는 요인이다. 따라서 농후한 조건에서의 정확한 고장진단 또는 보다 지각된 점화시기에서의 운전이 고려되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 HCNG 엔진에서 공기과잉율에 따른 노킹 특성을 기존의 CNG 엔진의 경우와 비교하여 분석하고자 하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 일정한 운전조건에서 HCNG 연료 사용 시 연소 속도가 증가하여 CNG에 비해 보다 이른 시기에 최대 실린더 압력 및 최대 열방출률 값이 확인되고 그 절대값 또한 증가한다.

(2) HCNG의 경우 연소속도가 CNG에 비해 빠르기 때문에 전체적으로 지각된 점화시기에서 유사한 값의 최대 압력상승율을 나타내었으며, 혼합기가 희박할수록 압력상승율은 감소하였다.

(3) 두 가지 연료 모두에 대해서 노킹 발생시기가 MBT 시기보다 진각되어 있어 MBT 점화시기에서의 운전은 가능하지만, HCNG의 경우 CNG에 비해 노킹 마진이 감소되었다.

감사의 글

본 연구는 친환경자동차기술개발사업단의 “EURO-6 대응 시내버스용 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진 개발” 과제 일환으로 수행하였으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] Fanhua, M., Haiquan, L., Yu, W., Yong, L., Junjun, W., and Shuli, Z., "Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 816-822, (2008)
- [2] Fanhua, M., Mingyue W., Long, J., Renzhe, Chen., Jiao, Deng., and Nashay, N., "Performance and emission characteristics of a turbocharged CNG engine fueled by hydrogen-enriched compressed natural gas with high hydrogen ratio", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 6438-6447, (2010)
- [3] Nafiz, K., Bilge, C., S., O. A., and Kadir, A., "Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp.1026-1034, (2009)
- [4] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed., McGRAW-HILL, The United States, (1988)
- [5] König, G. and Sheppard, C., "End Gas Autoignition and Knock in a Spark Ignition Engine", *SAE Technical Paper 902135*, (1990)
- [6] Nates, R. and Yates, A., "Knock Damage Mechanisms in Spark-Ignition Engines", *SAE Technical Paper 942064*, (1994)
- [7] König, G., Maly, R., Bradley, D., Lau, A. et al., "Role of Exothermic Centres on Knock Initiation and Knock Damage", *SAE Technical Paper 902136*, (1990)
- [8] Fitton, J. and Nates, R., "Knock Erosion in Spark-Ignition Engines," *SAE Technical Paper 962102*, (1996)
- [9] Valtadoros, T. H., Wong, V.W., and Heywood, J. B., "Engine Knock Characteristics at the Audible Level", *SAE Technical Paper 910567*, (1991)