

천연가스와 수소가 적용된 대형엔진의 부분부하 성능 및 배출가스

이 준 순¹⁾ · 박 현 옥^{*1)} · 오 승 목^{1,2)} · 김 창 업¹⁾ · 이 용 규^{1,2)} · 강 건 용¹⁾

한국기계연구원 모빌리티동력연구실¹⁾ · 국가연구소대학교 친환경에너지 기계²⁾

Performance and Exhaust Emissions of Heavy-Duty Engines Fueled with Natural Gas and Hydrogen in Part-Load Operation

Junsun Lee¹⁾ · Hyunwook Park^{*1)} · Seungmook Oh^{1,2)} · Changup Kim¹⁾ · Yonggyu Lee^{1,2)} · Kernyong Kang¹⁾

¹⁾Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery and Materials,
156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34103, Korea

²⁾Environment and Energy Machinery, Korea National University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea
(Received 17 November 2023 / Revised 26 December 2023 / Accepted 10 January 2024)

Abstract : Natural gas and hydrogen are suitable fuels for heavy-duty applications that require significant reduction in carbon dioxide emissions. This study investigated the performance and exhaust emissions of heavy-duty spark-ignition engines fueled with natural gas and hydrogen under part-load conditions. While the natural gas engine could carry out stoichiometric operations, an increase in excess air ratio was limited to 1.4, due to combustion instability. The hydrogen engine could be operated up to an excess air ratio of 2.8, but a reduction in the excess air ratio was limited to 1.6, due to engine knocking. Based on superior lean combustion performance, the hydrogen engine showed high thermal efficiency and near-zero nitrogen oxide emissions, compared to that of a natural gas engine. However, its low exhaust gas temperature and insufficient power output would pose significant challenges in developing heavy-duty hydrogen engines in the future.

Key words : Natural gas(천연가스), Hydrogen(수소), Heavy-duty engine(대형엔진), Part load(부분부하), Performance(성능), Exhaust emissions(배출가스)

1. 서론

세계적으로 기후변화에 대응하기 위해 이산화탄소 배출 저감을 위한 노력을 진행 중이다. 수송 분야에서는 이산화탄소가 주로 배출되는 승용 및 상용 부문의 이산화탄소 규제가 강화되고 있다. 상대적으로 배터리 전기차 유입이 유리한 승용 부문과 달리, 상용 부문은 저탄소 연료인 천연가스와 무탄소 연료인 수소를 적용한 대형엔진 도입을 고려하고 있다.¹⁾ 천연가스와 수소가 적용된 대형엔진은 수송뿐만 아니라 건설기계 및 발전 분야로의 확장이 가능하다. 현재 대형엔진이 적용되는 분야에서는 상대적으로 낮은 엔진속도를 요구하므로, 효율이 높고 토크가 우수한 디젤 압축착화 엔진이 주로 탑재되고 있다. 그러나 전기점화 엔진 대비 소음과 진동이 심하고, 배기관으로 상당한 질소산화물과 입자상물질이 배

출되는 문제점을 지니고 있다.²⁾

천연가스와 수소를 대형엔진에 적용하는 쉬운 접근 방식 중 하나는 기존 디젤 압축착화 엔진에 이중연료 형태로 활용하는 것이다.³⁾ 이 경우, 이산화탄소 저감에 기여하는 천연가스와 수소는 주연료로, 디젤 연료는 주연료의 착화원으로 활용된다. 김우영 등⁴⁾은 천연가스-디젤 이중연료 엔진의 연소 및 배출가스 특성을 분석하였다. 천연가스의 대체율이 증가할수록 초기화염 성장속도가 감소하고 집화지연이 증가하였다. 천연가스 대체율이 증가할수록 입자상물질의 배출은 감소하였으나, 미연탄화수소 및 일산화탄소 배출이 증가하는 문제점을 보였다. Park 등⁵⁾은 수소의 대체율에 따른 수소-디젤 이중연료 엔진의 성능 및 배출 특성을 보고하였다. 무탄소 연료인 수소의 비율이 증가할수록 탄소계 배출물인 미연

*Corresponding author, E-mail: hwpark@kimm.re.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

탄화수소, 일산화탄소 및 이산화탄소 배출이 상당히 감소하였다. 수소의 대체율과 배기가스재순환율의 최적화를 통해 베이스 디젤 엔진 대비 높은 열효율 및 낮은 질소산화물 배출 또한 달성 가능하였다.

천연가스와 수소를 활용한 이중연료 엔진에서 디젤 압축착화 엔진 대비 이산화탄소 배출을 상당히 줄일 수 있으나, 최근 강화되는 이산화탄소 규제를 만족하기 위해서는 단일연료로 전기점화 엔진에 활용하는 것이 효과적이다. 이준순 등⁶⁾은 전기점화 엔진의 단점으로 지적되고 있는 낮은 효율을 향상시키기 위해 고압축비와 옛킨슨 사이클을 적용한 연구를 수행하였다. 디젤 압축착화 엔진을 천연가스 전기점화 엔진으로 개조하고 효율 향상을 위해 통상적인 전기점화 엔진 대비 높은 압축비를 적용하였다. 또한, 낮은 흡기밸브 닫힘시기를 이용하는 옛킨슨 사이클을 적용하여 펌핑 손실 및 마찰 손실을 감소시킴으로써 효율을 높일 수 있다고 보고하였다. Koerfer⁷⁾는 대형 부문 디젤엔진을 수소 전기점화 엔진에 맞게 개조한 시험 결과를 제시하였다. 판매 중인 베이스 엔진에 최소한의 하드웨어 변경을 통해 베이스 디젤 엔진과 동등한 수준의 열효율, 최고토크 및 최고출력을 달성 가능하다고 보고하였다.

선행 문헌들에서는 천연가스 또는 수소를 단독으로 활용하는 단일연료 전기점화 엔진, 그리고 디젤을 착화원으로 활용하는 혼소로 활용하는 이중연료 엔진 연구에 대한 결과를 제시하였다. 각각의 연구에서 대형엔진으로 적용하기 위한 한계점 및 가능성을 잘 분석하였으나, 하나의 엔진에서 천연가스와 수소를 적용하여 비교 평가한 결과가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 대형 전기점화 엔진의 연료로 천연가스와 수소를 각각 적용하여 부분부하 운전에서의 성능 및 배출가스 특성을 분석하였다. 일반적인 압축착화 엔진보다는 압축비가 낮고, 기존 전기점화 엔진 대비 압축비가 다소 높은 압축비 12:1을 적용하였다. 모든 엔진 하드웨어는 동일하게 적용하였으며, 연소상, 공기과잉률 및 점화시기를 변수로 실험결과를 제시하였다. 또한, 수소 연료를 이용하는 경우, 이론적으로 배출가스에는 질소산화물과 수분만을 포함하기 때문에 배출가스는 질소산화물을 중점적으로 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 대형엔진의 연료로 활용한 천연가스와 수소의 물성치를 Table 1에 정리하였다. 천연가스와 수소는 높은 옥탄가를 지니고 있어, 전기점화 방식에 적합

Table 1 Fuel properties

Property	Natural gas	Hydrogen
Octane number	120-130	120
Stoichiometric air to fuel ratio mass	17.2	34.3
Lower heating value [MJ/Nm ³]	36.6	10.8
Lower heating value [MJ/kg]	47.5	120
Flame propagation speed [m/s]	0.41	2.2
Adiabatic flame temperature [°C]	1,890	2,400
Auto ignition temperature [°C]	540	560
Minimum ignition energy [mJ]	0.28	0.02

Table 2 Engine specifications

Item	Specification
Engine type	Single cylinder, 2-valve, spark ignition,
Displacement [L]	1.842
Bore × stroke [m]	0.123 × 0.155
Compression ratio [-]	12:1
Intake valve timing	Open: 18 CAD BTDC
	Close: 34 CAD ABDC
Exhaust valve timing	Open: 46 CAD BBDC
	Close: 14 CAD ATDC

하다. 두 연료 모두 엔진에 가스상으로 공급되었으며, 수소 대비 천연가스의 저위발열량이 단위부피당 3배 이상 높다. 수소는 천연가스 대비 화염전파 속도가 빠르고 낮은 점화 에너지에도 연소가 가능하기 때문에 가연 범위가 넓은 특성을 보인다.

디젤 압축착화 6기통 엔진을 전기점화 단기통 엔진으로 개조된 엔진을 이용하였다. 엔진의 자세한 제원은 Table 2에 표기하였다. 흡기-배기 밸브가 각각 1개씩 장착된 엔진으로, 1.8 L 급 배기량에 압축비는 12:1이 적용되었다. 단기통 엔진의 피스톤 보울 형상은 Bathtub 타입으로 적용하였다.

동력계 상에서 엔진실험을 진행하였으며, 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 45 kW급 3상 전동 모터(TEFC, Hyosung)와 50 kW급 인버터(ACS800, ABB)로 구성된 AC 동력계를 이용하여 엔진속도를 일정하게 제어하였다. 압축공기의 압력제어와 스로틀 개도를 통해 연소실

내로 공기를 공급하였고, 해당 질량유량은 코리올리 유량계(CMFS050M, Emerson)로 측정하였다. 천연가스와 수소는 질량유량제어기로 연료 공급량을 변경하였고, 연료 질량유량의 정확한 측정을 위해 코리올리 유량계(CMFS010M, Emerson)를 활용하였다. 연소실 내로 유입된 연료-공기 혼합기의 연소는 점화플러그를 통해 시작되었다. 스로틀 개도와 점화시기는 엔진제어유닛의 Can 통신을 위한 모듈(ES582.1, ETAS)과 제어 소프트웨어(INCA, ETAS)를 이용하여 제어하였다.

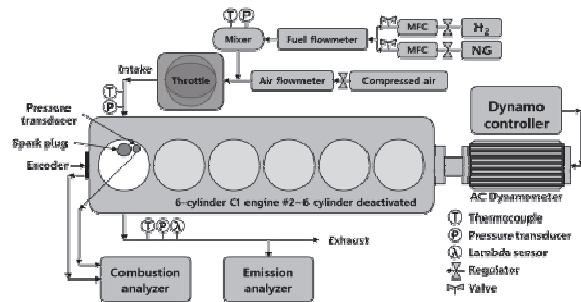


Fig. 1 Schematic diagram of engine setup

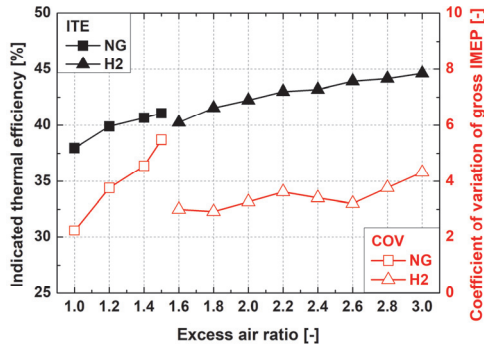


Fig. 2 Indicated thermal efficiency and coefficient of variation of IMEP of two fuels according to excess air ratio

연소실 압력 측정을 위해 실린더 헤드를 가공하여 연소실 압력센서(6043Asp, Kistler)를 장착하였고, 크랭크 각 데이터를 측정하기 위해 크랭크 샤프트 폴리에 어댑터를 가공하여 엔코더(364C01, AVL)를 장착하였다. 측정된 연소실 압력과 크랭크각 데이터는 연소해석기(X-ion, AVL)를 이용하여 연소실 압력, 열방출률, 연소 파라미터 등을 실시간으로 모니터링 하였으며, 데이터 추출 또한 실시하였다. 엔진 연소 이후 배기구로 배출되는 가스농도는 배출가스분석기(i60, AVL)를 이용하여 탄화수소, 천연가스, 질소산화물, 일산화탄소, 이산화탄소, 산소 등의 가스를 분석하였다.

2.2 실험 방법

대형엔진의 상용 차량 및 발전 분야 적용을 고려하여 엔진속도는 1,800 rpm으로 선정하였다. 엔진부하는 본 단기통 엔진에서 천연가스를 연료로 이용하였을 때, 전 부하의 50 % 수준에 해당하는 도시평균유효압력(Net Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) 0.4 MPa을 부분 부하 운전 조건으로 선정하여 실험을 진행하였다. 천연 가스 엔진 운전에서 공기과잉률은 이론공연비 연소로부터 최대 1.5까지 적용하였다. 수소 엔진 운전은 1.6부터 3.0까지 변경하였다.

엔진의 흡기 및 배기의 온도와 압력, 연료량, 공기량, 배출가스 농도 등의 정보는 데이터수집장치(GL820, Graphtec)를 통해 초당 1개의 데이터를 60초 동안 수집하여 평균 데이터를 이용하였다. 연소해석기를 통한 열방출을 곡선 및 연소 파라미터는 연속적인 300 사이클을 측정하여 평균데이터를 결과로 이용하였다.

3. 실험 결과

3.1 공기과잉률에 따른 열효율 및 엔진제어 특성

고정된 엔진부하(IMEP 0.4 MPa)에서 천연가스와 수소를 각각 연료로 공급한 경우, 엔진의 열효율(Indicated Thermal Efficiency, ITE)과 연소안정성(Coefficient of Variation of IMEP, COV of IMEP) 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 천연가스 엔진에서 공기과잉률 1.0에서 1.4까지 안정적인 운전(COV of IMEP 5 % 이내)이 가능하였다. 공기과잉률 1.5에서는 COV of IMEP가 5 %를 넘은 수치를 보였으며, 1.6 이상에서는 연소가 불안정하고 실화도 발생하여 정상적인 운전이 불가능하였다. 공기과잉률 1.0에서는 ITE 37.9 %, 공기과잉률 1.4에서는 ITE 40.7 %로 공기과잉률이 증가할수록 희박연소의 이점으로 ITE가 증가하는 경향을 보였다. 수소 엔진에서 공기과잉률은 1.6에서 3.0까지 넓은 영역에서 안정적인 운전이 가능하였다. 공기과잉률 1.6과 1.8에서는 최적 점화시기에서는 노킹 연소가 발생하여, 점화시기를 지각시킴으로써 운전이 가능하였다. 공기과잉률 1.5에서는 점화시기 지각에도 운전이 불가능하였다. 공기과잉률 1.6에서는 ITE 40.2 %, 공기과잉률 2.8에서는 44.2 % 수준을 보여, 천연 가스 엔진 대비 높은 공기과잉률의 희박연소 운전이 가능하여 상대적으로 높은 ITE를 기록하였다.

수소 엔진에서 공기과잉률을 3.0 이상으로 증가하였을 때 엔진 운전은 가능하였으나, Fig. 3과 같이 흡기 매니폴드의 압력(Manifold Absolute Pressure, MAP)이 100 kPa 이상으로 증가하였다. 이는 부분부하 운전이 아닌 스로틀 전개(Wide Open Throttle, WOT) 운전에 해당

하며, 수소 엔진의 부분부하 조건에서 과급기 없이는 공기과잉률 2.8까지 운전이 가능한 것으로 분석되었다. 천연가스 엔진의 이론공연비 조건에서 MAP은 55 kPa 수준이었으며, 공기과잉률이 증가할수록 MAP이 증가하는 특성을 보였다. 공기과잉률이 증가함에 따라 최적 연소상을 위해 점화시기 진각이 필요하였다. 천연가스 엔진에서는 공기과잉률이 증가할수록 급격한 점화시기 진각을 보인 반면, 수소 엔진에서는 상대적으로 완만한 점화시기 진각이 필요하였다.

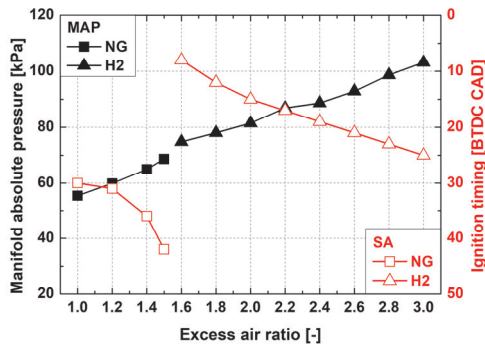


Fig. 3 Manifold absolute pressure and ignition timing of two fuels according to excess air ratio

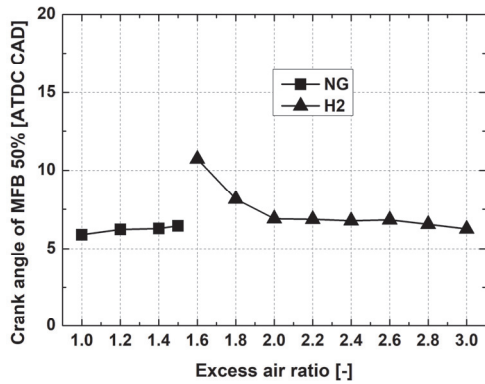


Fig. 4 Crank angle of mass fraction burned 50 % of two fuels according to excess air ratio

Fig. 4는 천연가스와 수소 엔진에서 열방출율이 50 % 발생하는 연소상(Mass Fraction Burned 50 %, MFB50)을 나타낸 것이다. 천연가스 엔진에서 MFB50은 모두 5 ~ 7 CAD ATDC에 위치하였다. 수소 엔진의 공기과잉률 2.0 이상에서 동일한 유사한 연소상을 보인 반면, 공기과잉률이 낮은 1.6과 1.8에서는 노킹 연소 발생으로 인해 점화시기를 지각하여 운전하였으므로 상대적으로 지각된 MFB50을 기록하였다.

Fig. 5는 천연가스와 수소 엔진에서 주연소기간(main

combustion duration, MFB10-MFB90)을 나타낸 것이다. 두 연료 모두 공기과잉률이 증가할수록 연소시작 (MFB10)은 진각된 반면, 연소종료(MFB90)는 지각되었다. 결과적으로, 두 엔진에서 공기과잉률이 증가할수록 주연소기간은 증가하였으며, 수소 엔진은 천연가스 엔진보다 공기과잉률이 높음에도 불구하고 주연소기간이 짧은 특성을 보였다.

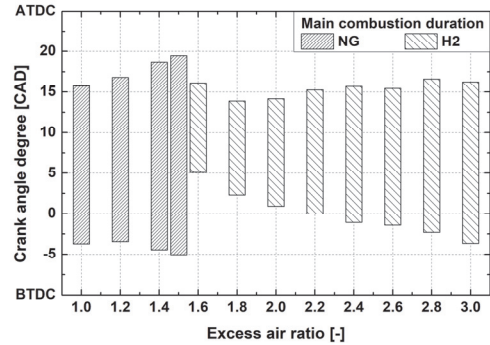


Fig. 5 Crank angle of main combustion duration of two fuels according to excess air ratio

3.2 공기과잉률에 따른 연소 및 배출가스 특성

3.1절에서 공기과잉률에 따른 천연가스와 수소 전기 점화 엔진에서 노킹 연소와 실화에 따른 공기과잉률 별 엔진제어 특성을 제시하였다. 본 절에서는 해당 엔진제어에 따른 연소 및 배출가스 특성을 분석하였다. Fig. 6은 공기과잉률 변동에 따른 최대 연소실 압력과 최대 압력 상승률(Maximum Pressure Rise Rate, MPRR)을 나타낸 것이다. MPRR은 크랭크각 1 CAD 변경에 따른 실린더 내 압력 증가량을 나타내며, 적정수치를 넘기면 엔진이 과손될 우려가 있다. 천연가스 엔진에서 공기과잉률이 감소하여 이론공연비 연소에 다가갈수록, 연소실 최대압력은 낮아지고 MPRR이 증가하는 경향을 보였다. 수소 엔진에서 공기과잉률이 감소할수록, 천연가스 엔진과 유사하게 연소실 최대압력은 낮아지고 MPRR이 증가하였으나, MPRR은 상대적으로 급격한 상승을 보였다.

무탄소 연료인 수소는 탄소계 유해가스가 거의 배출되지 않으므로, 천연가스와 수소가 적용된 엔진의 배출가스 비교평가를 위해 질소산화물 배출특성을 Fig. 7에 나타내었다. 상대적으로 농후한 영역에서 운전이 가능한 천연가스 엔진은 공기과잉률 1.2 부근에서 질소산화물 배출이 가장 높은 특성을 보였으며, 공기과잉률이 증가할수록 질소산화물 배출이 감소하였으나 연소 불안정성과 실화로 인해 공기과잉률 증가가 1.4로 제한되었다. 반면 상대적으로 희박한 영역에서 운전이 가능한 수소 엔진은 공기과잉률이 증가할수록 질소산화물 배출이 상

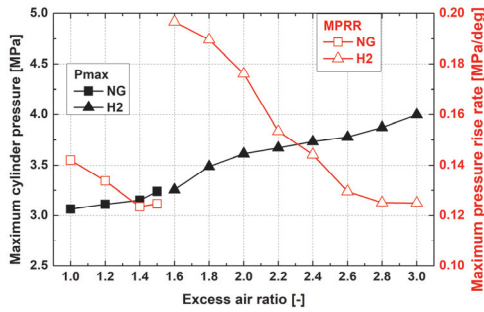


Fig. 6 Maximum cylinder pressure and maximum pressure rise rate of two fuels according to excess air ratio

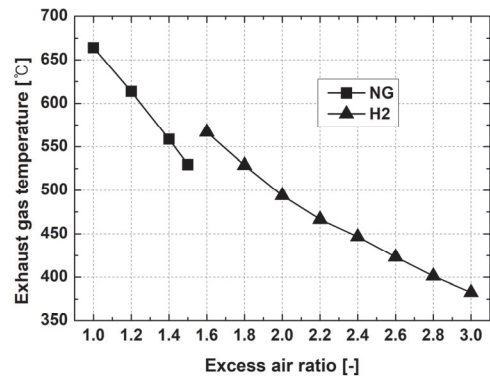


Fig. 9 Exhaust gas temperature of two fuels according to excess air ratio

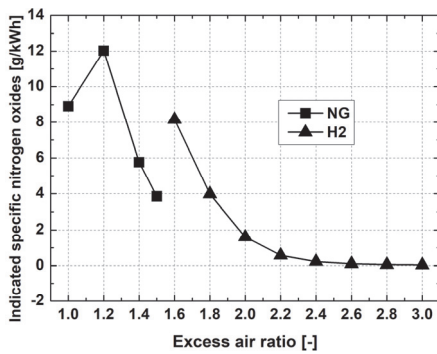


Fig. 7 Indicated specific nitrogen oxides of two fuels according to excess air ratio

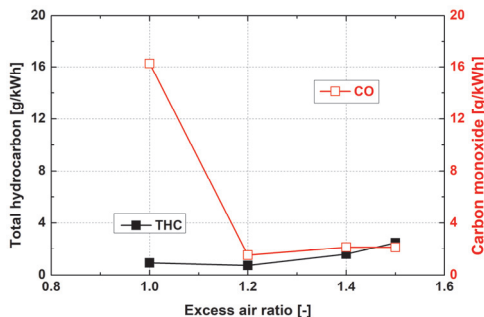


Fig. 8 Total hydrocarbon and carbon monoxide of natural gas fuel according to excess air ratio

당히 감소하였으며, 공기과잉률 2.2 이상의 영역에서는 1 g/kWh 이하의 매우 낮은 수준의 질소산화물 배출특성을 나타내었다.

Fig. 8은 공기과잉률 변화에 따른 천연가스 엔진에서의 Total hydrocarbon(THC)와 Carbon monoxide(CO)의 배출 특성을 나타낸 것이다. THC는 공기과잉률 1.2에서 0.7 g/kWh로 가장 배출이 적었으며, 희박해질수록 배출량이 증가하였다. CO는 공기과잉률 1.2에서 1.5 g/kWh로

배출이 가장 적었으나 이론공연비 운전에서는 16.3 g/kWh로 배출량이 급격히 증가하였고, 희박해질수록 다소 증가하는 경향을 보여주었다.

Fig. 9는 공기과잉률 변화에 따른 배기가스 온도를 나타낸 것이다. 상대적으로 농후한 영역에서 운전되는 천연가스 엔진은 이론공연비 연소에서 배기가스의 온도가 660 °C로 가장 높았으며, 공기과잉률이 증가할수록 배기가스 온도가 감소하였다. 수소 엔진은 상대적으로 희박한 영역에서 운전되어 공기과잉률 1.6에서는 배기가스의 온도가 560 °C 수준이었고, 공기과잉률을 2.8까지 증가하였을 때 배기가스 온도가 400 °C 수준으로 매우 낮은 특성을 보였다. 수소의 낮은 밀도로 인해 흡기포트로부터 공급되는 방식의 수소 엔진은 천연가스 엔진 대비 낮은 출력을 기록한다. 따라서 수소 엔진의 높은 공기과잉률에서 낮은 배기가스 온도는 실제 터보차저가 탑재된 수소 엔진에서 흡기 과급을 위한 터보차저 매칭이 중요한 이슈가 될 것으로 판단된다.

3.3 점화시기에 따른 연소 및 배출가스 특성

3.2절에서는 공기과잉률 변동에 따른 천연가스 및 수소 엔진의 연소 및 배출가스 특성을 분석하였다. 본 절에서는 공기과잉률과 함께 엔진 성능에 중요한 영향을 미치는 요소인 점화시기 변동에 대한 영향을 분석하였다. 각각의 공기과잉률에서 점화시기 변동에 대한 경향은 유사하였으며, 두 연료가 적용된 엔진에서 운전가능한 가장 농후한 조건(천연가스 엔진은 공기과잉률 1.0, 수소 엔진은 공기과잉률 1.6)에서 결과를 제시하였다. Fig. 10은 점화시기 변동에 따른 열효율과 연소상(MFB50)을 나타낸 것이다. 두 연료가 적용된 엔진 모두 점화시기 진각에 따라 열효율이 향상되었다. Fig. 10의 H2_K는 수소 엔진에서 노킹 연소가 발생된 운전영역에 해당한다. 수소

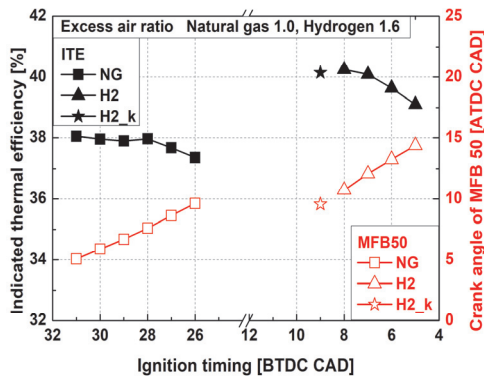


Fig. 10 Indicated thermal efficiency and MFB50 of two fuels according to ignition timing

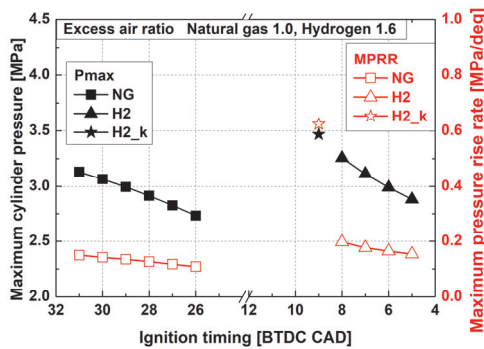


Fig. 11 Maximum cylinder pressure and maximum pressure rise rate of two fuels according to ignition timing

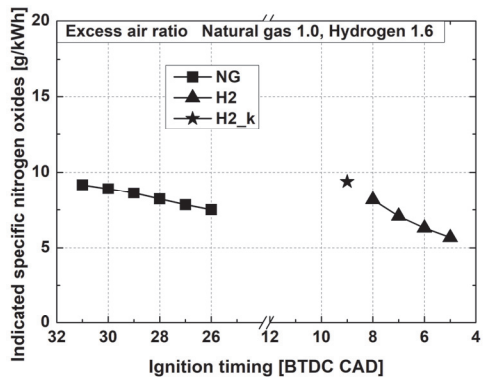


Fig. 12 Indicated specific nitrogen oxides of two fuels according to ignition timing

엔진에서는 노킹 연소 발생으로 인해 최적 연소상에서 운전이 불가능하였으며, 이를 억제하기 위해 지각된 점화시기를 적용하였다. 그럼에도 수소 엔진에서 상대적으로 높은 공기과잉률 적용으로 천연가스 엔진 대비 높은 열효율을 기록하였다.

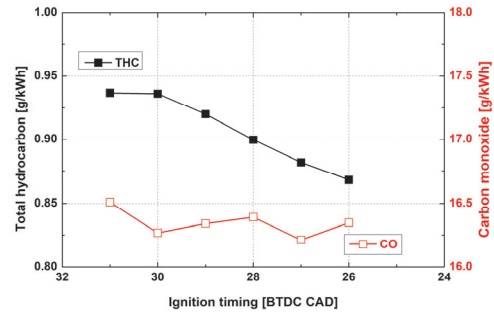


Fig. 13 Total hydrocarbon and carbon monoxide of natural gas fuel according to ignition timing

Fig. 11은 점화시기 변동에 따른 최대 연소실 압력과 MPRR을 나타낸 것이다. 천연가스 엔진에서 최적 연소상까지 점화시기를 진각한 경우에도 노킹 연소 발생이 없었으므로 최대 연소실 압력과 MPRR이 소폭 상승하였다. 수소 엔진에서는 천연가스 엔진 대비 상대적으로 최대 연소실 압력과 MPRR이 큰 폭으로 상승하였으며, 노킹 연소가 발생한 H2_K의 운전에서는 MPRR이 0.6 MPa/CAD 이상으로 급격히 상승하였다.

Fig. 12는 점화시기 변동에 따른 질소산화물의 배출을 나타낸 것이다. 천연가스 및 수소 엔진 모두 점화시기가 진각할수록 연소온도 상승으로 인해 질소산화물 배출량이 증가하였다. 수소 엔진에서 천연가스 엔진 대비 점화시기 변동에 따라 상대적으로 급격히 질소산화물 배출이 증가하였으며, 노킹 연소가 발생하는 H2_K 운전에서도 질소산화물 배출은 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 13은 천연가스 엔진의 이론공연비 운전에서 점화시기 변화에 따른 THC와 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. THC 배출은 점화시기가 지각될수록 감소하는 특성을 보였다. CO의 경우, 점화시기에 따라 측정 오차가 다소 발생하였으나, 대체적으로 점화시기가 지각될수록 감소하는 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 천연가스와 수소를 적용한 대형 전기 점화 엔진의 부분부하 조건에서 엔진의 연소, 성능 및 배출가스 특성을 분석하였다. 두 연료를 적용한 엔진에서 동일한 공기과잉률 조건에서 엔진 운전이 불가능하여 절대적인 비교 분석은 다소 어려움이 있으나, 연료의 물성치에 따라 뚜렷한 경향의 차이를 보였다.

1) 천연가스 엔진에서 연소 불안정성으로 인해 공기과잉률 증가는 1.4까지 제한되었던 반면 수소 엔진은 높은 공기과잉률 구간에서 운전이 가능하였으며 공기과잉률 한계는 흡기압력으로 선정되었다.

- 2) 두 연료 모두 공기과잉률 증가에 따라 열효율이 향상되었으며, 넓은 공기과잉률 운전이 가능한 수소 엔진이 고효율 달성에 유리하였다.
- 3) 천연가스 엔진에서 이론공연비까지 공기과잉률이 감소할 수 있었던 반면, 수소 엔진에서는 노킹 연소 발생으로 공기과잉률 1.6 부근에서 높은 최대압력상승률을 보였다.
- 4) 수소 엔진은 우수한 희박연소 성능을 바탕으로 낮은 질소산화물 배출 특성을 보였으며, 특히 부분부하 조건의 공기과잉률 2.2 이상에서는 질소산화물 배출이 0.1 g/kWh 수준까지 감소하였다.
- 5) 천연가스 엔진은 이론공연비 운전이 가능하며, 해당 조건의 높은 배기가스 온도는 과급장치의 효율을 높여 고출력 대형엔진 분야에 유리할 것으로 판단된다.
- 6) 수소 엔진은 천연가스 엔진 대비 높은 공기과잉률 영역에서 운전이 가능하기 때문에 고효율 및 질소산화물 저감에 유리하였지만, 낮은 배기가스 온도와 희박연소의 낮은 출력을 보완하기 위해 연소 및 과급장치의 최적화를 통한 고출력 달성이 주요 과제이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 제원으로 에너지수요관리 핵심기술개발 사업 “다중 분산발전 기반의 옥상온실형 스마트 그린빌딩 융복합 시스템 개발 및 실증” 과제(20212020800050)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) H. Park, E. Shim, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Comparative Evaluation of Conventional Dual Fuel, Early Pilot, and Reactivity-Controlled Compression Ignition Modes in a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Engine,” *Energy*, Vol.268, Paper No.126769, 2023.
- 2) H. Park, E. Shim, Y. Hwang and C. Bae, “Diesel Injection Strategy in a Premixed Charge Compression Ignition Engine under a Low Load,” *Transactions of KSAE*, Vol.26, No.3, pp.295-303, 2018.
- 3) H. Park, E. Shim, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Large-Squish Piston Geometry and Early Pilot Injection for High Efficiency and Low Methane Emission in Natural Gas-Diesel Dual Fuel Engine at High-Load Operations,” *Fuel*, Vol.308, Paper No. 122015, 2022.
- 4) W. Kim, H. Kim and C. Bae, “Investigation of Combustion Process and Emission Characteristics of CNG/Diesel Dual-Fuel PCCI Combustion in a 1.0 Liter Optical CI Engine,” *Transactions of KSAE*, Vol.29, No.4, pp.321-329, 2021.
- 5) H. Park, J. Kim and C. Bae, “Effects of Hydrogen Ratio and EGR on Combustion and Emissions in a Hydrogen/Diesel Dual-Fuel PCCI Engine,” *SAE* 2015-01-1815, 2015.
- 6) J. Lee, H. Park, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Improvement of Thermal Efficiency Using Atkinson Cycle in a High-Compression Ratio, Spark-Ignition, Natural Gas Engine for Power Generation,” *Journal of ILASS-Korea*, Vol.28, No.2, pp.55-61, 2023.
- 7) T. Koerfer, “Efficiency-Biased Design of an H2-Fueled Internal Combustion Engine for Heavy and Challenging Applications,” *SAE* 2023-24-0075, 2023.