

고압축비 전기점화 엔진에서 저발열량 합성가스 연료의 연소 및 배기 특성

이 준 순¹⁾ · 박 현 옥²⁾ · 잠스랑 니랑후²⁾ · 오 승 목^{*1,2)} · 김 창 업²⁾ · 이 용 규^{1,2)} · 강 건 용²⁾

과학기술연합대학원대학교 환경에너지기공학¹⁾ · 한국기계연구원 그린동력연구실²⁾

Combustion and Emission Characteristics for Low-Calorific Syngas in a Spark Ignition Engine with a High Compression Ratio

Junsun Lee¹⁾ · Hyunwook Park²⁾ · Narankhuu Jamsran²⁾ · Seungmook Oh^{*1,2)} · Changup Kim²⁾ · Yonggyu Lee^{1,2)} · Kernyong Kang²⁾

¹⁾Environment and Energy Mechanical Engineering, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

²⁾Department of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

(Received 8 October 2021 / Revised 7 December 2021 / Accepted 3 February 2022)

Abstract : Syngas with a high-octane number can be used as fuel for spark ignition engines with a high compression ratio to improve thermal efficiency. Furthermore, the use of syngas is advantageous in terms of lean combustion due to its low ignition energy, and improvement in thermal efficiency can be expected. The simulated syngas was composed of hydrogen(H₂), carbon monoxide(CO), and carbon dioxide(CO₂). In this study, the characteristics of combustion and exhaust emissions based on the composition of syngas and load conditions were investigated. The in-line, six-cylinder compression ignition engine, with a compression ratio of 17.1, was modified to become a single-cylinder spark ignition engine. The coefficient of the variation of indicated mean effective pressure(COV_{IMEP}) was limited within 5 % at 1800 rpm for full and part load conditions. The maximum load was obtained under a stoichiometric air-fuel ratio(AFR) condition, while high efficiency could be achieved at the lean operating condition. The maximum load increased with a higher H₂ and CO composition of syngas. Moreover, the lean operating condition was expanded, and the highest efficiency operating condition was moved to a relatively leaner operating region. In the case of 15 % H₂, 15 % CO, and 70 % CO₂, stable engine operation was ensured under full and part load conditions with low calorific value syngas. However, the lean operation region was reduced, and there was a deterioration in the engine's gross indicated thermal efficiency(ITE_g).

Key words : High compression ratio(고압축비), Single cylinder spark ignition engine(단기통전기점화 엔진), Syngas(합성가스), Hydrogen(수소), Low calorific fuel(저발열량 연료)

Nomenclature

AFR : air-fuel ratio
 COV_{IMEP} : coefficient of variation of indicated mean effective pressure
 IMEP_g : gross indicated mean effective pressure
 IMEP_n : net indicated mean effective pressure
 ISCO : indicated specific carbon monoxide
 ISNO_x : indicated specific nitrogen oxides
 ITE_g : gross indicated thermal efficiency

ITE_n : net indicated thermal efficiency
 WOT : wide open throttle

1. 서론

기후변화 대응을 위한 온실가스 배출 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 저탄소 연료와 수소를 기반으로 하는 연료에 대한 관심이 증가하고 있다. 합성가스는 수소와 일산화탄소를 포함하는 혼합가스를 말하며, 메탄 개질, 석탄가스화, 바이오매스 가스화 등을 통해 생산할 수 있

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

[†]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.

다. 합성가스 연료는 화학 에너지를 기계적 또는 전기 에너지로 변환하기 위해 대표적 동력 시스템인 내연기관을 활용할 수 있다.¹⁾

합성가스는 압축착화, 예혼합압축착화, 전기점화 등과 같이 다양한 연소 방식을 통해 내연기관에서 운전이 가능하다. 압축착화 엔진은 고압축비 적용으로 고효율 달성이 가능하지만, 질소산화물(NO_x: Nitrogen Oxides) 및 입자상물질(PM: Particulate Matter) 등의 유해배출물을 저감하기 위한 복잡한 후처리장치 구성이 요구된다. 또한, 합성가스 연료를 단독으로 적용할 경우, 자발화가 어렵기 때문에 점화를 위해 디젤 연료 공급이 추가적으로 필요한 이중연료 엔진에 적용된다.²⁾ 이중연료 엔진에서 합성가스는 흡기 매니폴드로 공급되어 공기와 함께 예혼합기를 형성하고, 압축행정 말기에 소량의 디젤이 실린더 내로 직접 분사되어 연소가 시작된다.³⁾ 이중연료 엔진에서는 합성가스 연료를 주에너지원으로 활용하여 디젤 소비를 줄일 수 있는 장점이 있다.⁴⁾ 합성가스-디젤 혼소 엔진에서 합성가스의 수소 비율과 부하가 증가할수록 열효율이 상승하였으며, 압축비 17.1, IMEP_i(Net indicated mean effective pressure) 0.5 MPa 운전 조건에서 디젤 엔진과 동등한 수준의 도시 열효율 41.5 %를 만족하였다.⁵⁾ 이와 같은 장점에도 불구하고 합성가스 연료의 압축착화 엔진 적용은 합성가스 대체율 한계 및 추가적 디젤 연료 공급의 단점을 지니고 있다.⁶⁾

이에 반해 예혼합압축착화 연소는 합성가스만을 단독으로 공급하여 엔진 운전이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 일반적으로 합성가스의 높은 자발화 온도로 인해 연소를 위한 흡기온도와 엔진의 높은 압축비를 필요로 한다.⁷⁾ 또한 예혼합압축착화 연소는 화학 반응에 의해 자발화가 일어나므로, 연소상 제어의 어려움이 있다.⁸⁾ 안정적인 엔진 운전을 위해서는 흡기 온도와 압력의 정밀한 제어가 요구되며, 높은 압력상승률로 인해 예혼합압축착화 엔진의 고부하 영역 운전이 제한된다는 단점을 지니고 있다.⁹⁾

전기점화 연소는 압축착화 및 예혼합압축착화 연소의 단점들을 개선할 수 있어 합성가스 엔진 개발에 유리한 방식이다. 합성가스 연료 단독으로 적용하여 전기 점화를 통해 연소상을 제어할 수 있으며, 고부하 운전 또한 가능하다.¹⁰⁾ 높은 옥탄가를 갖는 합성가스 연료는 전기 점화 엔진에 적용시 압축비를 높일 수 있어, 이에 따른 열효율이 증가하는 이점이 있다.¹¹⁾ 또한 합성가스의 공급장치 추가 외에 기존의 시스템 그대로 사용 가능하기 때문에 엔진 시스템을 간단하게 구성할 수 있다.

고압축비 전기점화 엔진에서 합성가스를 활용하는 선행연구에서 이론공연비(Stoichiometric air fuel ratio), 전

부하(WOT: Wide Open Throttle) 운전조건에서는 수소 50 %의 합성가스가 수소 60 %, 70 %의 합성가스보다 더 높은 36.3 %의 도시열효율을 만족하였다.¹²⁾ 수소 60 %, 70 %의 합성가스의 경우 역화 발생으로 인해 최적 점화시기가 지각되어 열효율이 저하되었다.

선행연구에서 알려진 바와 같이 전기점화 연소 방식은 합성가스 단일 연료 적용, 연소상 제어 및 고부하 운전 등 다양한 장점을 갖고 있으나, 다른 연소 방식에 비해 저발열량 합성가스를 적용하기에는 착화의 어려움이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 고압축비를 적용한 전기점화 엔진을 이용하여 저발열량 합성가스 연료의 적용 가능성과 엔진의 연소 및 배출가스 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 이용한 연료의 물성치는 Table 1에 표기하였다. Fischer-Tropsch(FT) 반응을 이용한 석탄 가스화에서 산화제로 산소를 공급하는 경우, Fuel A와 같이 수소 30 %, 일산화탄소 25 %로 조성된 합성가스 생산이 가능하고, 산소 대신 공기를 산화제로 이용하는 경우에는 Fuel B와 같이 수소 15 %, 일산화탄소 15 %로 조성된 합성가스 생산이 가능하다. 수소와 일산화탄소 외에 이산화탄소, 질소 등의 가스가 포함되지만, 시스템의 단순화를 위해 수소, 일산화탄소, 이산화탄소로 연료를 구성하였다.¹⁰⁾ Fuel A의 저위 발열량은 6.08 MJ/Nm³이고, Fuel B의 저위 발열량은 3.34 MJ/Nm³로 합성가스 생산의 여러 공정 중에서도 상당히 낮은 편에 속한다.¹¹⁾ Fuel A의 이론공연비는 1.38이며, Fuel B는 높은 이산화탄소 비율로 인해 이론공연비가 0.58로 상당히 낮은 수치를 갖는다.

디젤 압축착화 엔진을 고압축비 전기점화 엔진으로 개조하여 실험을 진행하였고, 주요 사양은 Table 2에 표기하였다. 6기통 11리터급 디젤 엔진을 단기통엔진으로 개조하였으며, 엔진의 보어 및 스트로크는 각각 0.123 m, 0.155 m이고, 압축비는 17.1:1이다. Fig. 1은 합성가스 엔진 실험을 위한 장치 구성도를 나타낸 것이다. 디젤 인젝

Table 1 Fuel properties

Item	Unit	Fuel A	Fuel B
Composition	H ₂	30	15
	CO	25	15
	CO ₂	45	70
Density	kg/Nm ³	1.23	1.58
Low heating value	MJ/Nm ³	6.08	3.34
Stoichiometric air-fuel ratio	-	1.38	0.58

터 대신 점화플러그를 장착하고, 전자식 스로틀을 설치하여 공기량을 제어하였다. 엔진으로 공급되는 공기량의 정확한 측정을 위해 코리올리 유량계(CMFS050M, Emerson)를 설치하였다. 공기는 공기압축기로부터 공기 유량계와 서지탱크를 거쳐 엔진으로 공급된다.

수소, 일산화탄소, 이산화탄소의 각 공급 라인에 설치된 질량유량 제어기(Mass flowmeter M3500V, Line Tech)를 이용하여 모사 합성가스의 조성비와 공급량을 제어함으로써 스로틀과 함께 공연비 제어에 활용하였다. 공급되는 모사 합성가스는 혼합장치(Mixer)를 통해 충분한 혼합을 거친 후 엔진으로 공급되며 혼합장치는 합성가스의 혼합과 가스 공급 시 연료라인에 발생할 수 있는 맥동 효과를 저감시키는 서지탱크 역할을 한다.

Table 2 Engine specification

Item	Specification
Engine type	Single cylinder, spark ignition,
Displacement [L]	1.842
Bore × stroke [m]	0.123 × 0.155
Compression ratio [-]	17.1:1
Intake valve timing	Open: 18 CAD bTDC
	Close: 34 CAD aBDC
Exhaust valve timing	Open: 46 CAD bBDC
	Close: 14 CAD aTDC

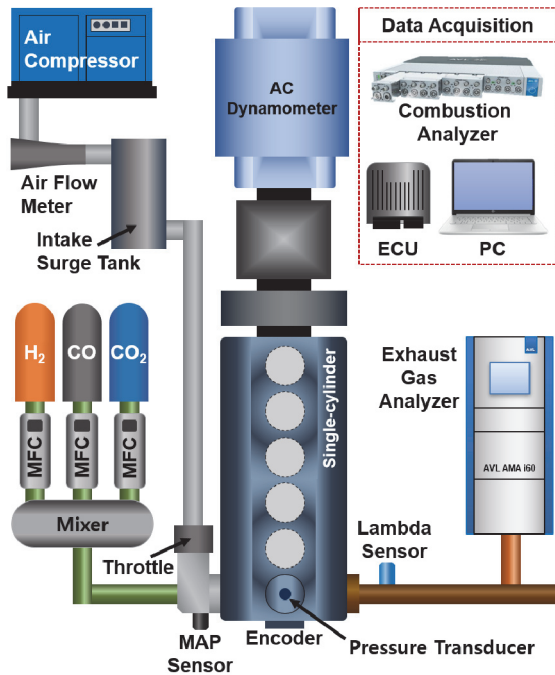


Fig. 1 Schematic diagram of syngas engine setup

45 kW 전동 모터(TEFC, Hyosung)와 인버터로 구성된 AC 동력계를 이용하여 엔진속도를 1800 rpm으로 일정하게 제어하였다.

실린더 헤드를 가공하여 연소실 압력센서(6043Asp, Kistler)를 장착하였고 연소실 압력을 측정을 위하여 크랭크 샤프트에 엔코더(364C01, AVL)를 장착하여 크랭크 각을 측정하였다. 측정된 연소실 압력과 크랭크각 데이터는 연소해석기(Indimeter, AVL)를 이용하여 연소압력을 측정하였으며 400 사이클 데이터를 평균하였다.

배기가스는 배기분석기(i60, AVL)를 이용하여 질소산화물, 일산화탄소, 이산화탄소, 산소 등의 가스를 측정하였다. 연료 성분 중 탄화수소의 배출원이 없으므로 본 연구에서는 탄화수소의 배출은 고려하지 않았다. 연료 공급량, 공기 공급량, 배기가스 등의 데이터는 DAQ(GL820, Graphtec)를 이용하여 실시간으로 데이터를 계속하였고, 정상상태에서 90초 데이터를 평균하였다.

측정 장비를 이용하여 분석한 데이터의 불확실성은 Table 3에 표기하였으며, 불확실성 분석은 제곱평균제곱근법의 원리에 따라 수행하였다.¹³⁾

실험 조건은 Table 4에 연료 별 엔진속도, 부하조건 등을 표기하였다. 엔진속도는 1800 rpm으로 동일하며, Fuel A와 Fuel B의 연료에 따른 WOT 운전조건에서의 연소 및 배기가스 특성을 분석하였다. 또한, 저발열량 연료인 Fuel B의 부분부하 특성을 분석하기 위해 IMEP_g(Gross indicated mean effective pressure) 0.3 MPa에서 실험을 진행하였다. 운전조건 선정을 위해 기초실험을 수행한 결과, Fuel B를 이용하여 WOT 이론공연비 운전에서 0.59 MPa IMEP_g 운전이 가능하였다. 단기통 엔진의 특성상 부하가 낮아질수록 스로틀 개도량이 감소하고 흡기매니폴드에서의 맥동이 크게 나타나기 때문에 연소안정성

Table 3 Uncertainties of parameters

Parameters	Data uncertainty [%]
Indicated mean effective pressure	± 0.5
Indicated thermal efficiency	± 0.7
Indicated specific NO _x	± 1.5
Indicated specific CO	± 1.5

Table 4 Engine operating conditions

	Fuel A	Fuel B
Engine speed [rev/min]	1800	
Engine load	WOT	WOT, IMEP _g 0.3 MPa
Excess air ratio [-]	1.0 - 3.1	1.0 - 2.1
Spark timing [CAD aTDC]	Maximum Brake Torque(MBT)	

COV_{IMEP}가 증가한다. 결과적으로 COV_{IMEP} 증가량이 적은 WOT 이론공연비 운전 부하의 50% 수준인 IMEP_g 0.3 MPa를 부분부하 운전조건으로 선정하였다. Fuel A는 공기과잉률 1.0~3.1, Fuel B는 1.0~2.1 범위에서 실험하였으며, 모든 운전조건의 최적 점화시기는 MBT로 선정하였다.

3. 결과

3.1 합성가스 조성비에 따른 연소 및 배기 특성

합성가스 조성비가 서로 다른 Fuel A와 Fuel B의 WOT 부하조건에서 공기과잉률 변화에 따른 연소 및 배기가스 특성을 분석하였다.

공기과잉률 변화에 따른 IMEP_g와 연소안정성 COV_{IMEP} 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 수소 조성이 30%인 Fuel A는 공기과잉률 1.0에서 3.1까지 COV_{IMEP}가 5% 이내로 안정적인 운전이 가능하였다. 공기과잉률이 1.0인 이론공연비 운전에서는 IMEP_g 0.78 MPa로 가장 높았으며, 희박 한계 운전조건인 공기과잉률 3.1에서는 IMEP_g 0.40 MPa 엔진 운전이 가능하였다. Fuel B는 Fuel A대비 다소 좁은 운전 영역인 공기과잉률 1.0에서 2.1까지 COV_{IMEP} 5% 이내로 안정적인 운전이 가능하였다. Fuel B 역시 Fuel A와 동일하게 공기과잉률 1.0에서 IMEP_g 0.59 MPa로 가장 높은 부하운전이 가능하였으나, Fuel A보다는 낮은 부하 특성을 보였다. 가장 희박한 운전조건인 공기과잉률 2.1에서는 IMEP_g 0.38 MPa 부하운전이 가능하였다. Fuel A는 공기과잉률 3.1에서도 안정적인 엔진 운전을 보인 것과는 달리, 낮은 수소 및 일산화탄소 조성의 Fuel B는 공기과잉률 2.1 이상의 조건에서는 COV_{IMEP}가 5% 이상으로 불안정한 연소를 보였다. Fuel A, B 모두 공기과잉률 1.0에서 가장 높은 부하운전이 가능하였는데, Fig. 3과 같이 이론공연비 운전영역에서 연료의 공급량이 최대가 되기 때문에 높은 부하운전에 유리하며, 과급

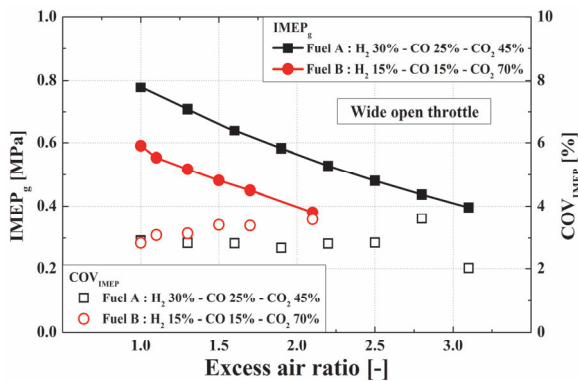
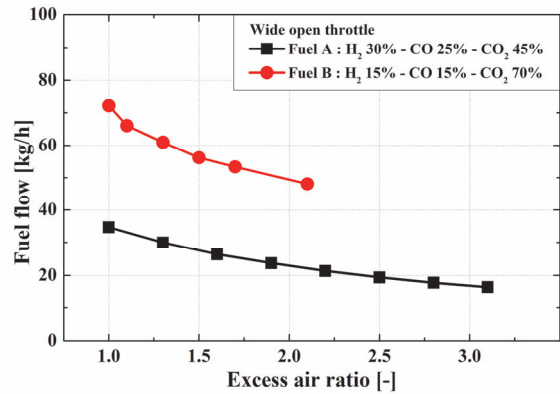


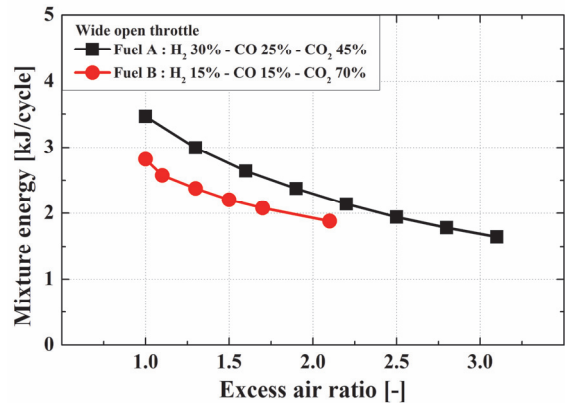
Fig. 2 IMEP_g and COV_{IMEP} along different excess air ratio

기를 이용하여 연료와 공기의 공급량을 증가시키서 희박영역에서의 출력저하 보완이 필요함을 알 수 있다.

가스연료를 기체상태로 엔진에 공급하는 경우, 액체 연료 대비 가스연료의 부피가 크기 때문에 엔진으로 공급 가능한 최대 연료량이 제한된다. 본 연구에서 이용한 흡기포트 내에 연료를 공급하는 자연흡기 엔진은 WOT 운전조건에도 불구하고, 체적효율 한계에 의해 실린더에 공급되는 연료량과 공기량이 제한되어 출력이 저하되는 단점을 갖고 있다. 또한, 공기과잉률 증가에 따라 연료의 공급량이 감소하기 때문에 운전 가능한 최대 부하가 감소한다. Fig. 3은 공기과잉률 조건에 따른 연료 유량 및 사이클 당 실린더에 공급되는 연료의 에너지량을 나타낸 것이다. Fuel A는 Fuel B 대비 상대적으로 높은 수소와 일산화탄소의 조성과 낮은 이산화탄소 조성으로 Fuel B보다 높은 이론공연비 1.38을 갖는다. Fuel B는 낮은 수소와 일산화탄소의 조성과 높은 이산화탄소 조성으로 Fuel A보다 낮은 이론공연비 0.58을 갖는다. Fig. 3 (a)와 같이 WOT 운전에서 Fuel B의 연료에 포함된 밀도



(a) Fuel flow along different excess air ratio



(b) Mixture energy along different excess air ratio

Fig. 3 Fuel flow and mixture energy with composition ratio

가 높은 70 %의 이산화탄소 조성과 낮은 이론공연비에 의해 Fuel A 대비 Fuel B의 연료 유량이 많은 결과를 보여 주었다. Fig. 3(b)와 같이 혼합기가 희박해질수록 혼합기의 발열량은 감소하는데, 이론공연비가 높으면 발열량 감소가 크고, 이론공연비가 낮으면 발열량 감소가 적게 나타난다. 결과적으로 이론공연비에서 Fuel A, Fuel B의 발열량차이가 크지만 희박해질수록 혼합기의 발열량차이는 줄어들게 된다.

공기과잉률 변화에 따른 도시열효율(ITE_g: gross indicated thermal efficiency) 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fuel A는 공기과잉률 1.0에서 ITE_g 41.3 %, 공기과잉률 2.5에서 최대 ITE_g 45.6 %로 나타났으며, 공기과잉률 2.5 이상의 희박 영역에서는 ITE_g가 감소하였다. Fuel B는 공기과잉률 1.0에서 ITE_g 38.6 %, 공기과잉률 1.5 영역에서 최대 ITE_g 40.3 %를 만족하였으며, 공기과잉률 1.5 이상의 희박 영역에서는 ITE_g가 급격히 감소하였다. 이론공연비 연소에서 희박 연소 영역으로 공기과잉률이 증가할수록 연소온도가 감소하고 연소실 주변으로의 열손실 감소로 ITE_g가 증가하다가 최고 ITE_g를 기록한 후, 추가적인 공기과잉률 증가에 따라 연소 효율이 악화되어 ITE_g가 감소한 것으로 판단된다. 수소, 일산화탄소의 조성이 높은 Fuel A가 Fuel B 대비 고효율 달성에 효과적이었다. 고압축비가 적용된 엔진에도 불구하고 조기점화, 노킹, 역화 등의 이상 연소가 나타나지 않았는데, 연료에 포함된 이산화탄소가 배기가스 재순환과 같은 효과로 작용하여 연소온도를 낮추고 이상연소 발생을 억제시킨 것으로 판단된다.

합성가스의 연료 조성이 수소, 일산화탄소, 이산화탄소로 구성되어 있어, Figs. 5, 6과 같이 탄화수소를 제외한 배출 가능한 질소산화물, 일산화탄소 가스에 대한 결

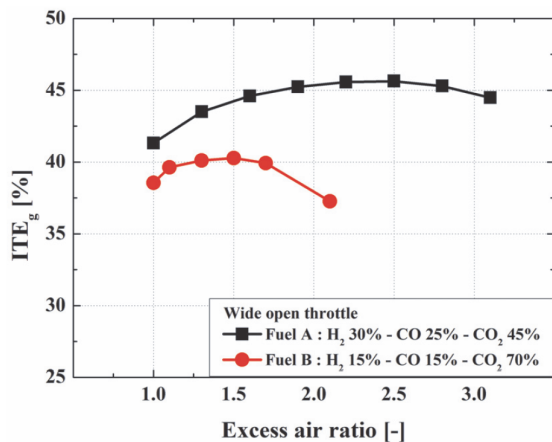


Fig. 4 Indicated thermal efficiency along different excess air ratio

과를 정리하였다. NO_x 배출가스의 경우, Fig. 5와 같이 Fuel A 연료를 이용한 경우 공기과잉률 1.0 운전조건에서 약 5.7 g/kWh의 높은 질소산화물이 배출되었고, 희박 운전영역으로 갈수록 질소산화물 배출이 크게 감소하였다.

공기과잉률 2.0 이상의 운전조건에서는 NO_x 배출이 0.1 g/kWh이하로 크게 감소하였는데, 희박 연소에 의해 연소 온도가 낮아지고 Thermal NO_x 생성 조건을 충족시키지 못해 NO_x 배출이 급감하고 있다. Fuel B의 경우 모든 공기과잉률 영역에서 0.05 g/kWh로 매우 낮은 NO_x 배출 특성을 보였다. Fuel B에 포함된 70 %의 이산화탄소는 열용량이 큰 특성을 갖고 있어 연소 시 연소 온도를 저감시켜 Thermal NO_x 생성을 억제하였다.

Fig. 6에서는 공기과잉률에 따른 일산화탄소 배출을 나타낸 것으로, 연료에 포함된 일산화탄소가 연소되지 않고 그대로 배출되는 정도를 측정하게 된다. 이론공연비 연소에서 공기과잉률 증가에 따라 일산화탄소 배출이 감소하여 최저치를 기록한 후, 공기과잉률 증가에 따라 일산화탄소 배출이 증가하였다. 이론공연비 연소에

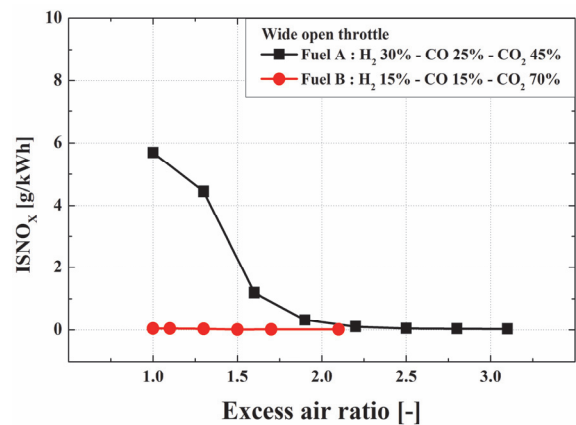


Fig. 5 NO_x emission along different excess air ratio

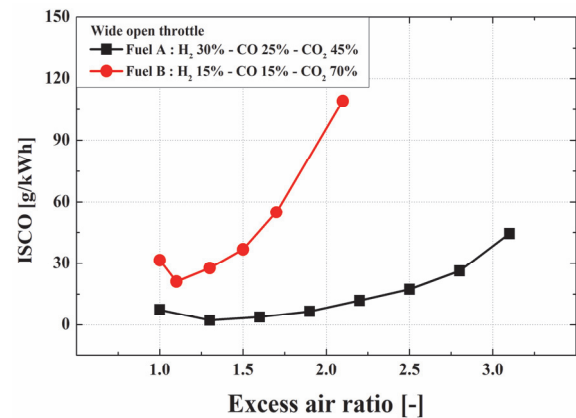


Fig. 6 CO emission along different excess air ratio

서 희박 연소 영역으로 이동할수록 낮아지는 연소온도로 인해 일산화탄소 배출이 증가하나, 공기과잉률 1.2~1.4 사이에서는 여분의 O₂로 인한 산화효과가 우세하여 일산화탄소 배출이 가장 적은 것으로 판단된다. Fuel B와 같이 이산화탄소 조성이 높은 경우, 희박 연소 영역에서 공기과잉률 증가에 따른 일산화탄소 배출 증가폭이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 희박 연소와 연료에 포함된 이산화탄소는 동일한 효과로 작용하여 연소온도를 감소시켜서 연료에 포함된 일산화탄소가 연소에 참여하지 못하고 그대로 배출되므로 ITE_g는 감소하고 일산화탄소 배출량은 크게 증가하였다.

ITE_g가 높은 희박영역에서 엔진을 작동하기 위해서는 일산화탄소의 배출 저감이 필요하며, 산화촉매 장치의 설치를 통해 일산화탄소의 배출 저감이 가능할 것으로 판단된다.

점화시기부터 CA10(Crank angle of 10 % mass fraction burned)까지를 나타내는 점화지연(Ignition delay)을 Fig. 7에 나타내었다. 희박영역으로 이동할수록 점화지연은

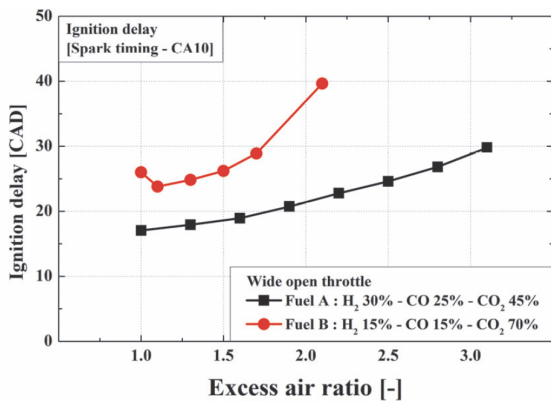


Fig. 7 Ignition delay along different excess air ratio

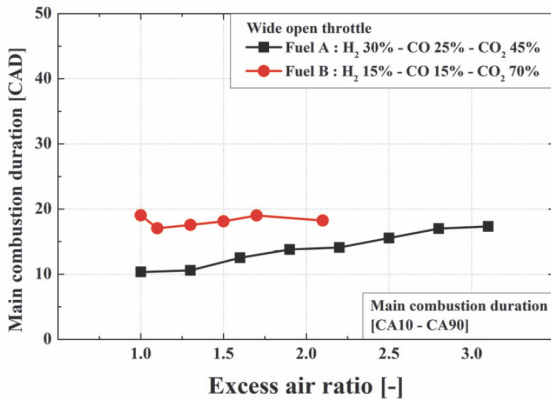


Fig. 8 Main combustion duration along different excess air ratio

증가하였으며, Fuel A의 점화지연이 Fuel B보다 짧은 특성을 보였다. 높은 수소 조성과 낮은 이산화탄소 조성으로 Fuel B 대비 Fuel A가 초기 화염 발달이 유리한 것을 확인할 수 있다.

CA10에서 CA90(Crank angle of 90 % mass fraction burned)까지를 나타내는 주연소기간(Main combustion duration) 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fuel A의 경우 동일 공기과잉률에서 Fuel B 대비 상대적으로 짧은 주연소기간을 갖고 있으며, 희박영역으로 이동할수록 주연소기간은 증가하는 특성을 보였다.

Fuel B의 경우 모든 공기과잉률 영역에서 15~20 CAD의 동등한 수준의 주연소기간 특성을 나타냈다. Fuel B는 연료에 포함된 높은 이산화탄소가 지배적 요인으로 작용하여, 공기과잉률 변화에도 불구하고 주연소기간에 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. Fuel B 대비 Fuel A의 높은 수소와 일산화탄소의 조성은 빠른 화염전파를 통해 상대적으로 짧은 주연소기간을 보였고, Fuel A의 향상된 연소 성능은 높은 ITE_g를 갖는데 기여한 것으로 판단된다. 반면에 Fuel B의 높은 이산화탄소 조성은 열적 희석효과로 작용하여, 화염속도를 저하시켜 상대적으로 낮은 ITE_g를 보였다. 수소 조성이 높은 연료를 이용하면 ITE_g 상승 및 일산화탄소 배출 저감을 기대할 수 있다.

3.2 저발열량 합성가스의 부분부하 운전조건에서의 연소 및 배기가스 특성

저발열량 합성가스 연료의 부분부하 운전 가능성과 연소 및 배기가스 특성을 분석하기 위해 수소 15%, 일산화탄소 15%, 이산화탄소 70% 조성으로 구성된 Fuel B를 이용하여 부분 부하 IMEP_g 0.3 MPa 운전조건에서의 결과와 3.1절의 WOT 운전조건에서의 결과를 비교하였

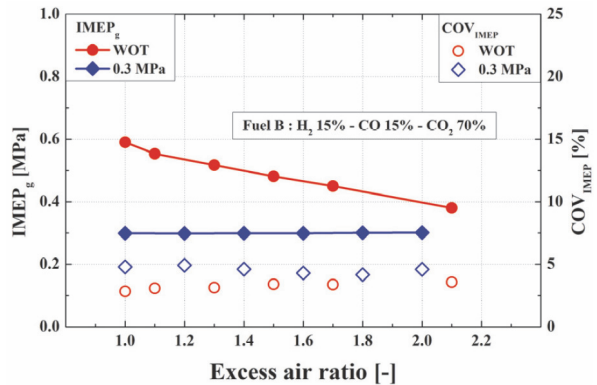


Fig. 9 IMEP_g of WOT and part load along different excess air ratio

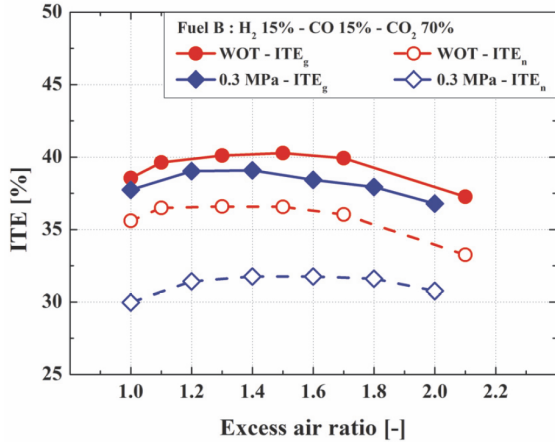


Fig. 10 ITE_g and ITEn along different excess air ratio

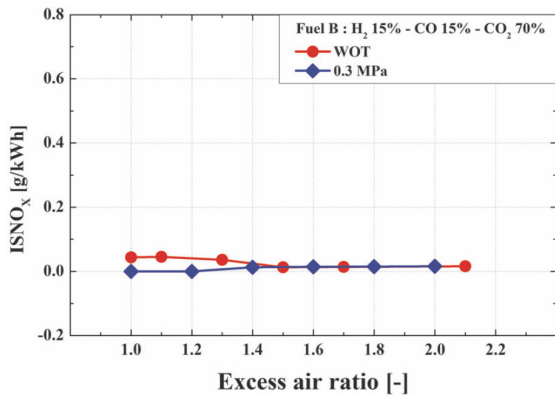


Fig. 11 NO_x emission along different excess air ratio

다. Fig. 9와 같이 WOT의 이론공연비 운전조건에서 IMEP_g 0.59 MPa의 가장 높은 부하 운전이 가능하였으며, 가장 희박한 운전에서는 IMEP_g 0.38 MPa의 가장 낮은 부하 특성을 보였다. 부분부하 IMEP_g 0.3 MPa 운전에서는 WOT 운전 대비 다소 높은 COV_{IMEP} 특성을 보였지만, 공기과잉률 1.0에서 2.0까지 WOT 운전조건과 동등한 수준의 공기과잉률 영역에서 COV_{IMEP} 5 % 이하에서 운전이 가능하였다.

WOT 및 부분부하 운전에서의 ITE_g, ITEn(Net indicated thermal efficiency)을 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. WOT 운전조건에서는 ITE_g와 ITEn이 동등한 결과를 보여야 하는데 실험결과 ITEn에서 약 3-4 % 낮은 경향을 나타냈다. 본 연구에서 이용한 엔진은 흡기 배기 밸브가 각각 1개씩 갖고 있으며, 스로틀을 완전 개방한 운전임에도 불구하고 흡기밸브에 의한 스로틀링 효과 때문에 부하가 감소하여 열효율 저하를 일으킨 것으로 판단된다. WOT 운전에서는 공기과잉률 1.5에서 최대 ITE_g 40.3 %를 달성하였다. IMEP_g 0.3 MPa 운전조건에서는 공기

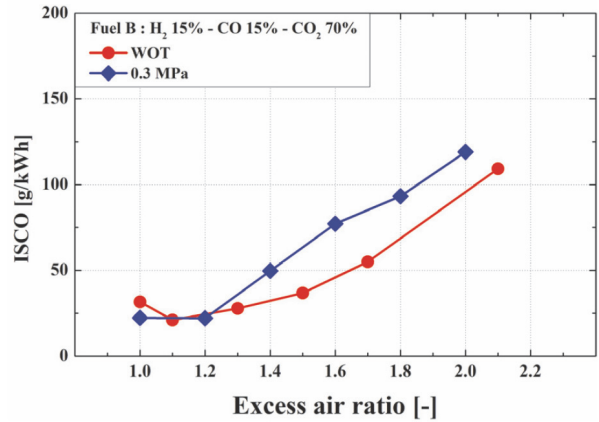


Fig. 12 CO emission along different excess air ratio

과잉률 1.4에서 최대 ITE_g 39.1 %를 달성하였으며, WOT 운전조건보다 약 1.2 % 차이를 보였다. ITEn의 경우 WOT 운전조건에서는 36.6 %, IMEP_g 0.3 MPa 운전조건에서는 31.8 %로 WOT 운전조건 대비 4.8 % 감소하였는데, 부분부하 운전에서 스로틀링에 의해 높은 펌핑손실을 보이기 때문이다.

WOT 운전조건에서의 NO_x 배출은 Fig. 11과 같이 공기과잉률 1.0 부근에서 0.05 g/kWh 수준으로 매우 낮은 배출특성을 보였다. 부분부하 운전조건에서는 모든 공기과잉률 영역에서 NO_x 배출이 거의 없는 수준의 결과를 보였는데, 합성가스 연료에 포함된 70%의 높은 이산화탄소 조성으로 인한 낮은 부하 운전으로 인해 Thermal NO_x 생성이 억제된 것을 알 수 있다.

WOT와 부분부하 IMEP_g 0.3 MPa에서의 일산화탄소 배출 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 공기과잉률 1.1, 1.2 부근에서는 부하에 관계없이 동등한 수준의 약 21 g/kWh 일산화탄소가 배출되었다. 희박 운전 영역으로 이동할수록 일산화탄소 배출량이 급격히 증가하는 결과를 보여주고 있다. 연료에 포함된 70%의 이산화탄소 조성에 의한 낮은 연소온도 특성과 희박운전에 의한 연소온도 저감으로 인해 합성가스 연료에 포함되어 있는 일산화탄소가 연소되지 못한 채 그대로 배출된 것으로 판단된다. 공기과잉률 1.2 이상의 희박 운전 영역에서는 일산화탄소 배출량이 급격히 증가하였으며, 부분부하 운전조건에서 WOT 운전조건보다 더 많은 일산화탄소 배출 특성을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 1.8리터급 단기통 고압축비 전기점화 엔진에서 저발열량 합성가스의 연소 및 배기특성에 대한 실험을 수행하였다. 최고출력을 위해서는 Fuel A, B

모두 WOT, 이론공연비에서 엔진을 운전하는 것이 가장 좋은 조건이다. 희박운전에서는 효율이 상승하지만 ISCO 배출이 급격히 증가하기 때문에 효율과 배출가스를 모두 고려하여 최적 운전조건을 선정해야 한다. Fuel A의 WOT 운전에서는 공기과잉률 1.9를 최적 운전조건으로 선정하였다. Fuel B를 이용한 경우, WOT 운전에서는 공기과잉률 1.3, 부분부하 IMEP_g 0.3 MPa에서는 공기과잉률 1.2를 최적 운전조건으로 선정하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 합성가스 연료는 기존 가스연료 대비 발열량이 낮지만 고압축비 조건에서 안정적인 연소가 가능하였으며 이상 연소의 발생없이 희박연소 영역의 확장이 가능하였다.
- 2) 연료에 포함된 높은 수소, 일산화탄소 조성과 낮은 이산화탄소 조성의 연료가 고출력, 고효율 달성에 유리하였고, 희박연소영역에서의 낮은 출력은 과급기를 적용하여 보완이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 이론공연비 운전보다 희박 운전에서 최고 효율 달성이 가능하지만, 일산화탄소 배출이 급격히 증가하기 때문에 실제 엔진 개발 측면에서 효율이 다소 낮은 이론공연비 운전을 선택하거나, 효율이 높은 희박 운전에서 추가적인 산화 촉매를 장착하여 일산화탄소 배출을 저감시키는 것이 필요하다.
- 4) 연료에 포함된 수소의 우수한 착화성과 고압축비의 적용으로 인해 WOT, IMEP_g 0.3 MPa 엔진부하 조건에서 이론공연비에서 공기과잉률 2.0까지의 영역에서 COV_{IMEP} 5% 이내로 안정적인 운전이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(No. CAP-16-06-KIER)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) M. Fiore, V. Magi and A. Viggiano, "Internal Combustion Engines Powered by Syngas: A Review," *Applied Energy*, Vol.276, Paper No. 115415, 2020.
- 2) U. Azimov, E. Tomita, N. Kawahara and Y. Harada, "Effect of Syngas Composition on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Pilot-ignited Dual-fuel Engine Operated in PREMIER Combustion Mode," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.36, No.18, pp.11985-11996, 2011.
- 3) C. A. Rinaldini, G. Allesina, S. Pedrazzi, E. Mattarelli and P. Tartarini, "Modeling and Optimization of Industrial Internal Combustion Engines Running on Diesel/syngas Blends," *Energy Conversion and Management*, Vol.182, pp.89-94, 2019.
- 4) B. B. Sahoo, N. Sahoo and U. K. Saha, "Effect of H₂:CO Ratio in Syngas on the Performance of a Dual Fuel Diesel Engine Operation," *Applied Thermal Engineering*, Vol.49, pp.139-146, 2012.
- 5) J. Lee, T. Chung, Y. Lee, C. Kim and S. Oh, "Syngas/diesel Dual Fuel Combustion in a Compression Ignition Engine with Different Composition Ratios of Syngas and Compression Ratios," *Journal of ILASS-Korea*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2019.
- 6) X. Kan, D. Zhou, W. Yang, X. Zhai and C. H. Wang, "An Investigation on Utilization of Biogas and Syngas Produced from Biomass Waste in Premixed Spark Ignition Engine," *Applied Energy*, Vol.212, pp.210-22, 2018.
- 7) Y. Yamasaki and S. Kaneko, "Prediction of Ignition and Combustion Development in an HCCI Engine Fueled by Syngas," *SAE 2014-32-0002*, 2014.
- 8) 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.
- 9) S. Bhaduri, B. Berger, M. Pochet, H. Jeanmart and F. Contino, "HCCI Engine Operated with Unscrubbed Biomass Syngas," *Fuel Processing Technology*, Vol.157, pp.52-58, 2017.
- 10) H. Park, J. Lee, N. Jamsran, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, "Comparative Assessment of Stoichiometric and Lean Combustion Modes in Boosted Spark-ignition Engine Fueled with Syngas," *Energy Conversion and Management*, Vol.239, Paper No.114224, 2021.
- 11) E. Porpatham, A. Ramesh and B. Nagalingam, "Effect of Compression Ratio on the Performance and Combustion of a Biogas Fuelled Spark Ignition Engine," *Fuel*, Vol.95, pp.247-256, 2012.
- 12) T. Chung, J. Lee, Y. Lee, C. Kim and S. Oh, "Lean-burn and Emissions Characteristics in a Spark Ignition Engine with High Compression Ratio Using Syngas," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.3, pp.163-170, 2019.
- 13) Z. Chen, T. Zhang, X. Wang, H. Chen, L. Geng and T. Zhang, "A Comparative Study of Combustion Performance and Emissions of Dual-fuel with Natural Gas/methanol and Natural Gas/gasoline," *Energy*, Vol.237, 2021.