

FT반응 Off-gas를 이용한 고압축비 전기점화 엔진의 연소 및 배기가스 특성에 관한 연구

정 탄* · 이준순* · 이용규**, 김창업**, 오승묵†

Combustion and Emission Characteristics in a High Compression Ratio Spark Ignition Engine using Off-gas from FT reaction

Tahn Chung, Junsun Lee, Yonggyu Lee, Changup Kim and Seungmook Oh

Key Words: Compression ratio(압축비), Emissions(배기가스), Off-gas(오프가스), Stoichiometric ratio(이론공연비), Syngas(합성가스)

Abstract

FT process is a technology of chemical reactions that converts a mixture of carbon monoxide and hydrogen into liquid hydrocarbons. During the FT process unreacted gas, known as Off-gas which has low-calorie, is discharged. In this study, we developed an engine that utilize simulated Off-gas, and studied the characteristics of the engine. The off-gas composition is assumed to be H₂ 70%, CO 15%, CO₂ 15% respectively. Under stoichiometric air-fuel ratio, the experiment was conducted at WOT and IMEP 0.3 Mpa changing compression ratio. Ignition timing was applied with MBT timing. Maximum indicated thermal efficiency 37% was achieved at compression ratio 15 under WOT. CO, CO₂ and NO_x were influenced by changing compression ratio, and CO emission was satisfied with the US Tier 4 standard for nonroad engine over the entire experimental conditions.

기호설명

FT reaction : Fischer & Tropsch reaction
WOT : Wide Open Throttle
IMEP : Indicated Mean Effective Pressure
MBT : Maximum Brake Torque
MFC : Mass Flow Controller
COV : Coefficient of Variation

MFB : Mass Fraction Burned
CR : Compression Ratio
BTDC : Before Top Dead Center
ISCO : Indicated Specific Carbon monoxide
ISCO₂ : Indicated Specific Carbon dioxide
ISNO_x : Indicated Specific Nitrogen oxides

1. 서 론

FT 프로세스는 바이오매스(Biomass), 석탄, 천연가스 등의 가스화 과정을 통하여 궁극적으로 디젤, 가솔린과 같은 석유화학 제품을 생산하는 기술이다⁽¹⁾. 이때 가스화 과정을 통해서 생산된 가스를 합성가스라고 하며 FT 프로세스에서 반응하지 않고 배출되는 낮은 열량의 미활용가스를 Off-gas라고 한다⁽²⁾.

(Received: 31 May 2018, Received in revised form: 17 Jun 2018, Accepted: 20 Jun 2018)

*과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과

**한국기계연구원

†책임저자, 회원, 한국기계연구원 & 과학기술연합
대학원대학교 환경에너지기계공학과

E-mail : mook@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7382 FAX : (042)868-7305

가스화기의 파라미터에 따라 합성가스 구성이 달라지며 여러 파라미터들 중 가스화 물질이 가스 조성에 가장 큰 영향을 미친다⁽³⁾. 가스화 과정에 산소(O₂), 수증기(H₂O) 그리고 공기를 주 가스화 인자로 사용하며 생산된 합성가스는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 수소(H₂), 메탄(CH₄), 물(H₂O), 질소(N₂) 그리고 타르(tar)와 같은 오염물질과 다른 불순물을 포함한다⁽⁴⁻⁶⁾. 가스화 인자로써 수증기(H₂O)나 산소(O₂)를 이용하여 생산한 합성가스는 수소(H₂), 일산화탄소(CO)로 구성되며 메탄(CH₄)도 포함될 수 있다. 이 때 생산한 합성가스는 Medium calorific value syngas라 불리며 발열량 범위는 10~28 MJ/Nm³이다⁽⁵⁾. 가스화 인자로써 공기를 이용하여 생산한 합성가스는 조성 중 불연소 물질을 50% 이상 포함한다. 이 합성가스는 Lower calorific value syngas나 Producer gas라 불리며 발열량 범위는 4~7 MJ/Nm³이다⁽⁶⁾.

Shuodo 등⁽⁷⁾은 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂)의 조성 비율을 변화시키며 가시화 전기점화 엔진에서 합성가스 연료의 연소 특성을 발표하였고 Sridhar 등⁽⁸⁾은 전기점화 엔진에서 압축비 변경(압축비 10:1~17:1) 실험을 통해 Producer gas 엔진 개발에 대해 발표하였다. Hagos 등⁽³⁾은 조성이 H₂: 50 Vol%, CO: 50 Vol%인 합성가스를 사용하여 합성가스 분사 타이밍을 변화시켜 전기점화 엔진의 연소, 성능 및 배기가스 특성에 대해 발표하였다. 또한, Indrawan 등⁽⁹⁾은 낮은 밀도의 바이오매스에서 얻은 저발열량 합성가스를 이용하여 전기점화 엔진의 성능 및 배기가스 특성에 대해 발표하였다.

본 연구는 합성가스와 조성이 비슷한 미활용 Off-gas를 발전용 엔진의 연료로 활용함으로써 이를 통해 연료유 생성 및 전력을 동시에 생산하는 독립형 에너지생산 플랜트를 구현하는 것을 목적으로 한다. Off-gas는 모사가스를 사용하여 엔진 연료로 사용하였는데 Off-gas의 구성은 순 산소개질 및 물(H₂O) 전기분해를 통해 추가 수소(H₂) 공급을 가정하여 수소(H₂) 농도가 높은 H₂ 70%, CO 15%, CO₂ 15%로 정하였다. 본 연구에서는 디젤엔진을 개조한 전기점화 엔진에서 수소(H₂) 비율이 높은 Off-gas 모사가스를 이용하여 이론공연비 조건에서 압축비 변경을 통해 엔진의 성능 및 배기가스 특성에 대해 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 엔진

본 실험에 사용된 엔진은 발전용 상용 디젤엔진

Table 1 Engine specifications

Engine type	4-stroke, 1-cylinder
Ignition	Spark ignition
Bore × Stroke (mm)	123 × 155
Displacement (cm ³)	1,842
Air aspiration system	Natural aspiration
Fuel supply system	Mixer

(DE12T, 두산인프라코어)으로 전기점화 엔진 실험을 위하여 기존 11리터급 6기통 디젤엔진을 단기통 엔진으로 개조하여 연구를 수행하였다. 6실린더 중 1번 실린더를 사용하였으며, 2~5실린더는 기존 피스톤에 홀을 뚫어 압축일이 발생하지 않도록 하였다. 디젤엔진을 전기점화 엔진으로 변경하기 위하여 기존 디젤 인젝터 장착 홀을 개조하여 점화플러그를 설치하였고 연소실 압력 측정을 위해 감도가 ≈ -200 pC/Mpa이고 측정 오차가 $\pm 0.5\%$ 인 연소압 센서(Type 6043Asp, Kistler)를 장착하였다. 1번 실린더의 흡기관에 부하 및 연료 제어를 위한 스로틀바디(Throttle body)와 Off-gas 연료공급시스템을 장착하였고 전용 ECU를 통하여 공기량, 점화시기가 제어될 수 있도록 엔진 하드웨어를 구성하였다. 개조한 단기통 엔진의 제원은 Table 1과 같다. 피스톤은 기존 디젤엔진의 압축비 17:1 피스톤을 개조하여 사용하였으며 전기점화 엔진에 맞게 피스톤 크라운(Piston crown) 안쪽 형상을 가공하였고 압축비는 11:1, 13:1, 15:1, 17:1로 변경하였다.

2.2 Off-gas 공급 시스템

Off-gas를 모사하고 엔진에 공급하기 위해 가스 연료 공급시스템을 구축하였다. Off-gas 모사를 위해 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂)를 공급하였고 각각의 유량 제어를 위하여 3개의 MFC(H₂ lps: 0.07~5.56 $\pm 0.5\%$, CO lps: 0.02~2.78 $\pm 1\%$, CO₂ lps: 0.07~1.94 $\pm 1\%$)와 원활한 가스 혼합을 위한 서지 탱크를 설치하였다. MFC의 정확한 제어를 위해 각 가스는 레귤레이터를 통해 0.4 Mpa로 공급하였다. 실험조건에 따라 연료유량이 변하여도 정해진 Off-gas 조성에 따라 각 가스유량이 자동으로 변경되도록 시스템을 제작하였다.

2.3 배기가스 분석 시스템

Off-gas 연소 후 엔진에서 배출하는 배기가스를 분석

Table 2 Exhaust gas analyzer specification

Manufacturer	AVL
Model	AMA i60 R1
NO _x (ppm)	0~5000
CO (ppm)	0~5000
CO ₂ (Vol%)	0.5~19

하기 위해 AVL사의 배기가스 분석기 AMA i60를 사용하였으며 사양은 Table 2에 나타내었다. 배기가스 분석을 위해 배기관에 샘플러(Sampler)를 설치하고 배기가스 분석기와 연결되어 있는 프로브(Probe)에 샘플러를 연결하였다. 프로브 라인온 실험시 온도제어기로 191°C를 유지하였다. 배기가스 분석기는 배기가스를 포집한 후 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂)의 농도를 측정하였다.

2.4 실험방법 및 조건

본 연구에 사용된 전체 실험장치의 개략도는 Fig. 1와 같으며 주요 실험조건은 Table 3와 같다. 엔진의 회전수와 부하제어를 위해 45 kW급, AC 동력계를 사용하였으며 동력계의 사양은 Table 4에 나타내었다. 엔진회전수는 1800 rpm으로 일정하게 제어하였는데, 이는 연구

Table 4 AC Dynamometer specification

Motor specification	
Manufacturer	HYOSUNG
Model	TEFC
Phase	3
Power (kW)	45
frequency (Hz)	60
Voltage (V)	380
Current (A)	89.5
Inverter specification	
Manufacturer	ABB
Model	ACS800-31-0060-3
phase	3
Max. power (kW)	55
Voltage (V)	380

대상엔진이 발전기에 사용되는 엔진이므로 60 Hz의 교류 전류를 발생시키기 위해서는 엔진회전수를 1800 rpm으로 고정해야하기 때문이다. 엔진부하는 전부하(WOT) 조건과 부분 부하의 대표조건인 IMEP 0.3 Mpa에서 실험을 수행하였다. 각 조건 실험은 데이터를 실시간 모니터링하여 엔진이 정상 상태에 도달함을 확인한 후 데이터를 수록하였다.

Off-gas를 모사하기 위해 사용된 각 가스는 제어 패널(Panel)에서 MFC를 이용하여 각 가스 유량을 조절하고, 이를 100리터 크기 서지 탱크에서 혼합시킨 후 엔진 스톨바디 후단의 흡기관에 대기압으로 공급하였다. 서지 탱크에서 충분한 혼합을 거친 후 예혼합 방식으로 실린더에 연료를 공급하였고 연료로 사용된 가스 조성은 H₂ 70%, CO 15%, CO₂ 15%이며 발열량은 2260 kcal/Nm³ (9.46 MJ/Nm³)이다.

이론공연비 도출은 이론적 화학방정식으로부터 구하였다⁽¹⁰⁾. 공기와 Off-gas의 이론공연비 조건에서 부피비는 2.03:1이고 질량비는 4.82:1이며 이를 토대로 연료공급시스템으로 연료 유량을 제어하고 ECU로 스톨바디를 제어하여 배기관에 장착된 산소센서에서 측정된 산소농도 0.3~0.6%를 이론공연비($\lambda = 1$)로 결정하였다.

점화시기는 ETAS사의 ES590으로 엔진 전용 ECU와 통신하여 PC 프로그램인 INCA5.4로 제어하였다. 연소압력 센서(Type 6043Asp, Kistler)와 연소해석기(619

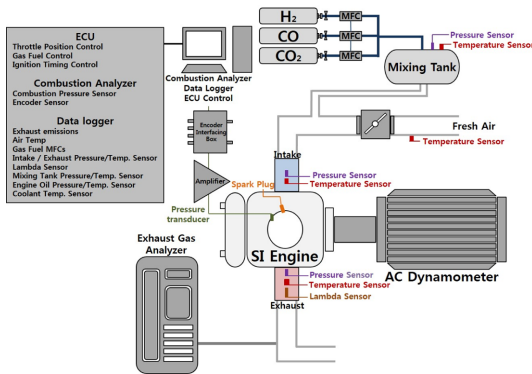


Fig. 1 A schematic of the engine experimental setup

Table 3 Engine experimental conditions

Engine speed	1800 rpm
Engine load	WOT, IMEP 0.3 Mpa
Fuel (Vol%)	H ₂ 70%, CO 15%, CO ₂ 15%
Compression Ratio	11, 13, 15, 17
Excess air ratio (λ)	1.0

Indimeter, AVL), 엔코더(364C01, AVL)를 사용하여 0.2 크랭크각도 단위로 400 사이클을 기록한 후 평균하여 연소특성을 분석하였다. 엔진오일 온도 및 압력, 냉각수 온도, 흡배기 온도 등 엔진 주요부위 온도, 압력, 유량 등의 자료는 샘플링 간격이 10 ms~1 h인 데이터 취득 장치(GL820, Graphtec)를 사용하여 1초 간격으로 데이터를 2분 동안 측정하고 이를 평균하여 분석하였다. 엔진냉각수는 온도제어기를 사용하여 공급온도 기준으로 냉각수 온도를 70°C로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진의 성능 및 연소 특성

전부하 조건에서 도시열효율, 점화시기, IMEP와

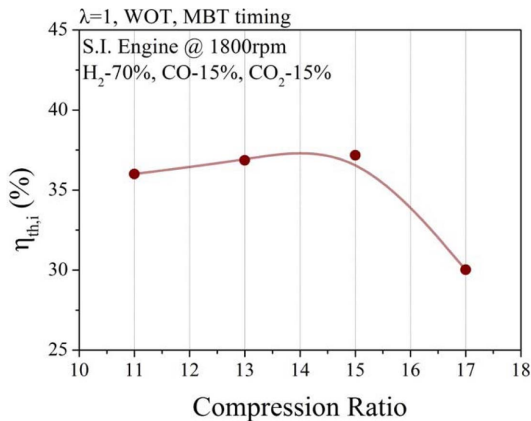


Fig. 2 Indicated thermal efficiency according to CR at WOT

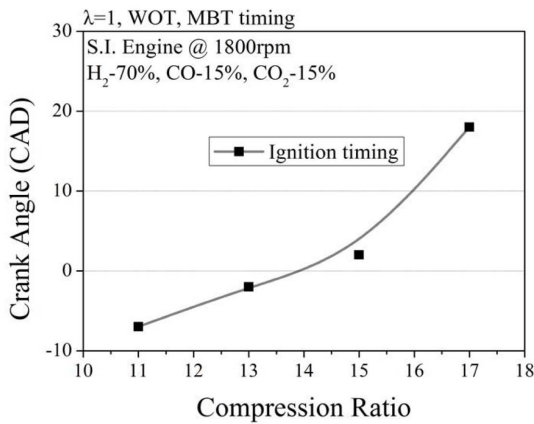


Fig. 3 Ignition timing according to CR at WOT

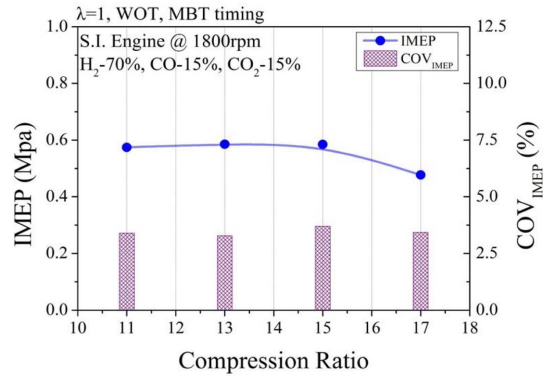


Fig. 4 IMEP and COV_{IMEP} according to CR at WOT

COV_{imep}를 각각 Fig. 2-4에 나타내었다. 전기점화 엔진은 점화시기에 따라 엔진효율과 노킹(knocking) 발생 여부에 영향을 미치므로 각 실험조건에서 점화시기는 노킹이 발생하여 점화시기가 지각된 지점을 제외하고 MBT timing에서 측정하였다.

도시열효율은 Fig. 2과 같이 압축비 15 조건에서 최대 값 37%를 보여주고 있다. 이는 전기점화 엔진의 이론 사이클인 정적 사이클의 효율은 압축비의 함수이므로 압축비 증가에 따라 효율이 상승하지만 압축비 17에서 노킹 발생에 의해 점화시기가 상사점 이후 18°까지 지각되어 Fig. 4에 나타나 있듯 IMEP가 감소로 인해 효율도 감소하여 압축비 15에서 최대 효율을 나타내었다. 압축비가 증가할수록 실린더 내부 온도가 증가하여 Off-gas의 가장 큰 비율을 차지하는 점화에너지가 낮은 수소(H₂)의 조기점화에 의해⁽¹⁾ 압축비 13, 15에서도 노킹이 발생하였고 이로 인해 Fig. 3와 같이 점화시기가 지각되었다. 그러나, 압축비 13, 15에선 점화시기가 지각되었음에도 불구하고 IMEP가 압축비 11에 비해 증가하는 경향을 보이고 있어 압축비 13, 15의 점화시기는 MBT timing에 가깝다고 판단할 수 있다.

COV_{imep}는 사이클 변동계수로써 엔진 실린더 내 연소 안정성을 나타내며 일반적으로 가스 엔진의 경우 COV_{imep}가 10% 이하이면 안정적인 연소가 이루어진다고 평가한다⁽²⁾. 그러나 압축비 17은 노킹에 의한 점화시기 지각으로 흡배기 밸브의 오버랩 구간에서 연소가 지속되어 간헐적으로 흡기포트에 역화가 발생하기 때문에 엔진 운전이 어려워 연소가 안정적이라고 판단할 수 없다.

부분 부하 조건에서의 연소 및 배기특성을 살펴보기 위하여 IMEP 0.3 Mpa에서 압축비를 변경하며 실험을 진행하였다. 압축비에 따라 IMEP 0.3 Mpa에서 크랭크

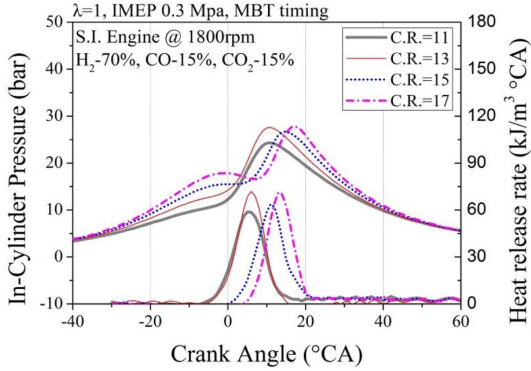


Fig. 5 Heat release rate and In-Cylinder Pressure according to CR at IMEP 0.3 Mpa

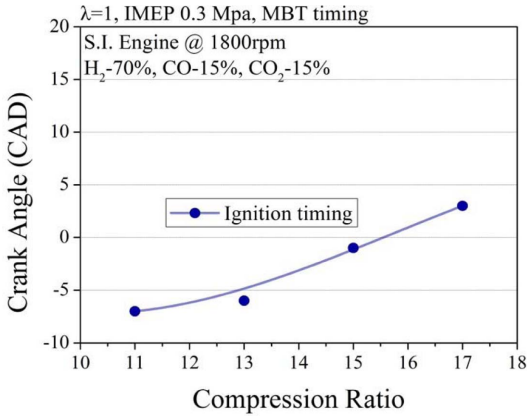


Fig. 6 Ignition timing according to CR at IMEP 0.3 Mpa

각도에 따른 실린더 내 압력과 열방출률은 Fig. 5에 나타내었고 같은 실험조건인 점화시기와 점화지연 및 주연소기간, COV_{IMEP} , 도시열효율은 Fig. 6-9에 나타내었다. 점화지연은 일반적으로 점화시점부터 MFB 10%까지의 기간으로, 주 연소기간은 MFB 10%부터 MFB 90%까지의 기간으로 정의하였다⁽¹³⁾.

부분 부하 조건임에도 불구하고 전부하 조건과 같이 압축비 13, 15, 17에서 노킹으로 인한 점화시기 지각으로 실린더 내 최고 압력과 최대 열방출률 발생 시기가 늦어지는 것을 Fig. 5와 6에서 확인할 수 있다. 압축비 13에서 압축비 11에 비해 실린더 내 최고 압력과 최대 열방출률이 증가하는데 이는 압축비 11의 점화시기는 BTDC 7°이며 압축비 13의 점화시기가 BTDC 6°로 비슷한 점화시기에서 압축비 11보다 압축비 13의 압축행정 시 실린더 내 내부 온도가 더 높아⁽¹¹⁾ Fig. 7에 보듯 Off-gas의 수소(H₂) 연소 속도가 증가하여 더 빠른

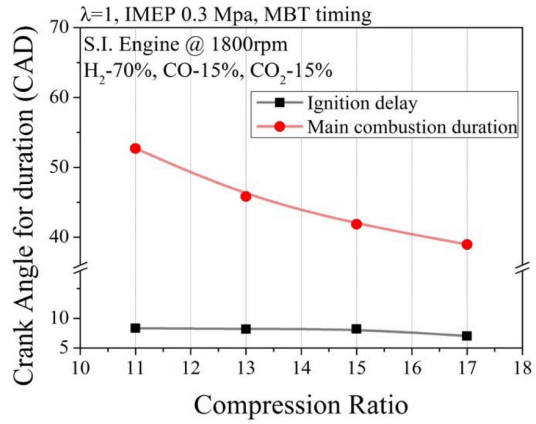


Fig. 7 Ignition delay and main combustion duration according to CR at IMEP 0.3 Mpa

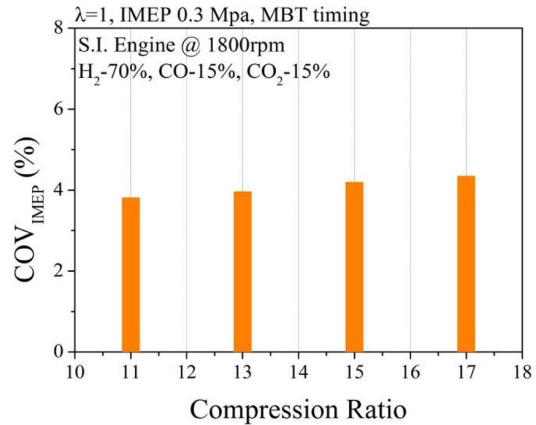


Fig. 8 COV_{IMEP} according to CR at IMEP 0.3 Mpa

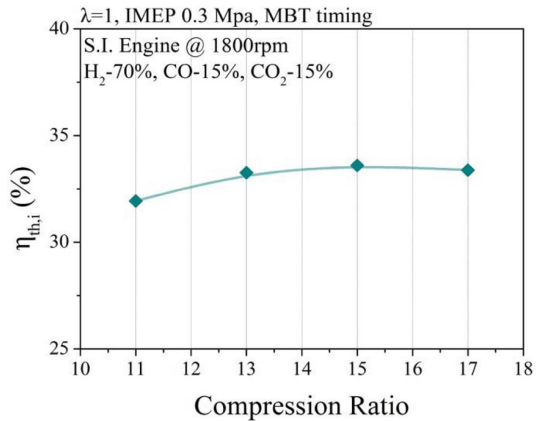


Fig. 9 Indicated thermal efficiency according to CR at IMEP 0.3 Mpa

기간에 압력이 상승하므로 최고 압력과 열방출률이 더 상승하였다.

이에 반해 압축비 15의 점화시기는 상사점 인근이기 때문에 팽창 과정 중 압력이 상승하여 실린더 내 최고 압력과 열방출률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 압축비 17에서 압축비 15에 비해 점화시기가 더 지각되었음에도 불구하고 실린더 내 최고압력과 열방출률이 다시 증가하는데 이는 압축 행정 시 높은 압축비로 인해 실린더 내 높은 온도 상승으로 빠른 연소 속도를 가진 수소(H₂)의⁽¹⁴⁾ 연소 속도가 더욱 촉진되었기 때문이다. 그래서 급격한 압력 상승이 발생하여 압축비 15에 비해 실린더 내 최고 압력과 열방출률이 상승한 것을 확인할 수 있다.

부분 부하 IMEP 0.3 Mpa의 전 실험조건에서 COV_{imep}가 Fig. 8에서 보듯 10% 이하이기 때문에 연소가 안정적으로 이루어진 것을 알 수 있다. 그러나 도시열효율을 나타낸 Fig. 9에 나타나있듯 전부하 조건과 같이 압축비 17에서 점화시기 지각으로 인해 효율이 감소하였으므로 엔진 운전은 어렵다. 정적 사이클 효율 방정식에 의해 압축비 15까지 도시열효율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 또한, 압축비가 증가할수록 실린더 내 혼합기의 온도가 증가하여 Fig. 7을 보듯 Off-gas의 연소속도가 빨라져 실린더 벽을 통한 열손실이 감소하여 엔진 사이클이 이론 사이클에 가까워져 열효율이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 압축비 15에서 33.6%로 도시열효율이 가장 높아 최적 압축비는 15라는 것을 알 수 있다.

3.2 배기가스 특성

가솔린이나 디젤의 연소 과정에서 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 총탄화수소(THC)와 입자상물질(PM: Particulate Matter)같은 대기오염 물질이 배출된다.^(15,16) 그러나 본 연구에서는 Off-gas를 모사하여 발전용 전기 점화 엔진의 연료로 사용하였기에 엔진에서 배출된 배기가스에선 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x)이 검출되었다. 부분 부하 IMEP 0.3 Mpa의 실험조건에서 각 배기가스는 Fig. 10-12에 나타내었다. 엔진에서 배출된 ISCO는 Fig. 10에 나타내었다. ISCO가 감소하면 완전연소율이 높아진다고 판단할 수 있다.⁽¹⁷⁾ 그러나 ISCO와 도시열효율의 경향이 일치하지 않는데, 이는 Fig. 5에서 보듯 연소 특성이 달라져 실린더 내 열방출률이 증가하면 ISCO가 감소하고 열방출률이 감소하면 미연 Off-gas가 증가하여 ISCO도 증가하는 것으로 판단되어 연소 효율이 일산화탄소(CO) 발생과 상관관

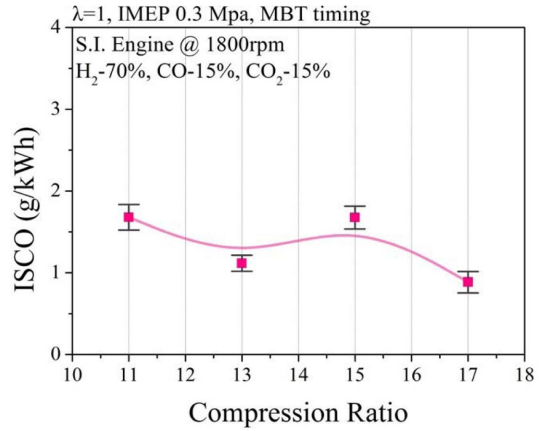


Fig. 10 ISCO according to CR at IMEP 0.3 Mpa

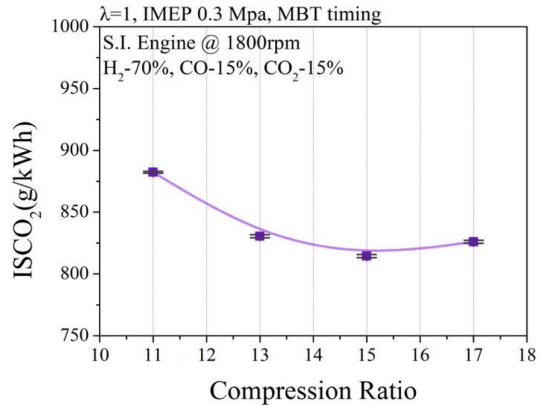


Fig. 11 ISCO₂ according to CR at IMEP 0.3 Mpa

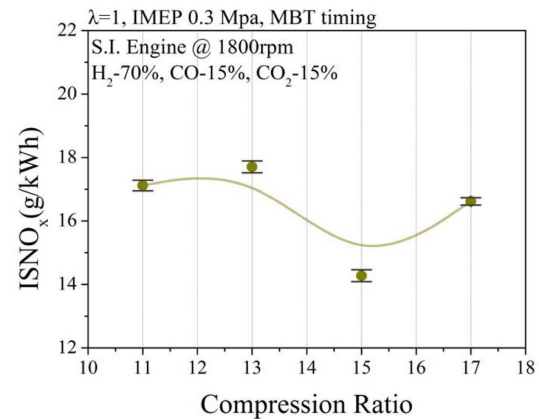


Fig. 12 ISNO_x according to CR at IMEP 0.3 Mpa

계를 보이나, 도시열효율은 공급 연료량, 점화시기 등의 차이로 인해 일산화탄소(CO) 발생과 일치하지 않는 경

향을 보이는 것으로 사료된다.

IMEP 0.3 Mpa 전 실험조건에서 미국의 비도로 용 엔진 배기가스 규제인 Tier 4의 일산화탄소(CO) 배출 기준인 5 g/kWh 이하를 만족하였다. ISCO는 전 실험 영역에서 2 g/kWh 이하의 낮은 배출량을 보였는데 이는 수소(H₂) 때문이다. 일산화탄소(CO)의 점화가능성은 적은 양의 수소(H₂)로도 매우 촉진되기 때문에⁽⁷⁾ Off-gas의 높은 수소(H₂) 농도로 인해 일산화탄소(CO)의 완전연소율이 높아졌다.

배기가스 이산화탄소(CO₂)의 ISCO₂는 Fig. 11에 나타내었다. 모사 Off-gas에서 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)가 각각 15%를 차지하기 때문에 배출되는 이산화탄소(CO₂) 양이 많은 것을 확인할 수 있다. 압축비 15까지 공급 연료량이 감소하고 이론공연비 조건에 따라 공급 공기량도 줄어들기 때문에 ISCO₂가 감소하였고 압축비 17에서 다시 공급 연료량이 증가하여 ISCO₂가 증가하였다.

배기가스 질소산화물(NO_x)의 ISNO_x는 Fig. 12에 나타내었다. 질소산화물(NO_x)의 생성량은 실린더 내 온도에 영향을 받는다⁽¹⁸⁾. 실린더 내 압력이 증가하면 온도도 함께 증가하기 때문에 Fig. 5에서 압축비 13 조건이 압축비 11 조건보다 실린더 내 최고 압력이 더 높아 ISNO_x는 증가하였다. 압축비 15 조건의 실린더 내 최고 압력은 압축비 13 조건 보다 낮아 ISNO_x가 감소하였으며 다시 압축비 17 조건의 실린더 내 최고압력이 압축비 15 조건 보다 높아 ISNO_x는 다시 증가하였다. ISCO와 비교하면 완전연소율이 높아질수록 질소산화물(NO_x) 방출량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 부분 부하 IMEP 0.3 Mpa의 전 실험조건에서 미국 Tier 4의 질소산화물(NO_x) 배출 기준인 0.40 g/kWh 이하를 만족하지 않았기 때문에 기준 충족을 위해선 후처리 장치나 희박 조건에서 연소가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 FT 프로세스에서 반응하지 않고 배출되는 낮은 열량의 미활용 Off-gas를 발전기용 전기점화 엔진의 연료로 사용하기 위해 Off-gas 모사가스를 이용한 선행연구를 수행하였다. 이를 위해 낮은 열량의 Off-gas를 이용할 수 있는 전기점화 엔진을 제작하고 이론공연비 조건에서 압축비 변경을 통해 엔진의 연소 및 배기 특성을 연구하였으며 본 연구를 통해 정리한 결론

은 아래와 같다.

(1) Off-gas 연료 사용은 높은 비율을 가진 수소(H₂) 때문에 빠른 연소 특성으로 인해 전부하 조건에서 압축비 17을 제외하고 우수한 연소안정성을 가졌으며 압축비 15에서 가장 높은 도시열효율(37%)을 보여 주었다.

(2) 부분 부하 IMEP 0.3 Mpa의 전 실험 조건에서 연소가 안정적으로 이루어졌으며 전부하 실험과 같이 압축비 15에서 최대 도시열효율 33.6%가 나타났다.

(3) 디젤엔진과 동일한 압축비인 압축비 17은 전부하 조건에서는 노킹으로 인하여 낮은 효율을 보여주었으나 부분 부하 IMEP 0.3 Mpa에서는 노킹의 영향이 줄어들었다. 그러므로, 희박영역으로 운전 조건을 확장할 경우 최적 압축비는 증가할 것으로 예상된다.

(4) 본 연구에 사용된 모사 Off-gas의 조성은 일산화탄소(CO) 배출량은 부분 부하 IMEP 0.3 Mpa 전 실험 조건에서 미국 Tier 4를 만족하였다.

(5) 질소산화물(NO_x)은 연소실 최고 압력과 상관관계를 보여주었으며 발생량이 미국 Tier 4를 만족하지 않았기 때문에 희박 연소나 후처리 장치가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업의 일환으로 수행된 것이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) M. E. Dry, "The Fischer-Tropsch process: 1950-2000", *Catalysis Today*, Vol. 71, No. 3-4, 2002, pp. 227-241.
- (2) C. N. Hamelinck, A. P. C. Faaij, H. den Uil and H. Boerrigter, "Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential", *Energy*, Vol. 29, No. 11, 2004, pp. 1743-1771.
- (3) F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz and S. A. Sulaiman, "Effect of injection timing on combustion, performance and emissions of lean-burn syngas (H₂/CO) in spark-ignition direct-injection engine", *International Journal of Engine Research*, Vol. 17, No. 9, 2016, pp. 921-933.
- (4) M. Sarkar, A. Kumar, J. S. Tumuluru, K. N. Patil and D. D. Bellmer, "Gasification performance of switch-

- grass pretreated with torrefaction and densification”, *Applied Energy*, Vol. 127, 2014, pp. 194~201.
- (5) P. Basu, “Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory”, Elsevier, 2010, pp. 365.
- (6) L. Wei, J. A. Thomasson, R. M. Bricka, W. D. Batchelor, E. P. Columbus and J. R. Wooten, “Experimental study of a downdraft gasifier”, *ASAE Annual Meeting Paper 066029*, 2006.
- (7) T. Shudo, K. Tsuga and Y. Nakajima, “Combustion characteristics of H₂-CO-CO₂ mixture in an IC engine”, *SAE Transactions Journal of Engines*, Vol. 110, No. 3, 2001, pp. 199~206.
- (8) G. Sridhar, H. V. Sridhar, S. Dasappa, P. J. Paul, N. K. S. Rajan and H. S. Mukunda, “Development of producer gas engines”, *Automobile Engineering*, Vol. 219, No. 3, 2005, pp. 423~483.
- (9) N. Indrawan, S. Thapa, P. R. Bhoi, R. L. Huhnke and A. Kumar, “Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 148, 2017, pp. 593~603.
- (10) S. R. Turns, “An Introduction to Combustion Concepts and Applications”, McGraw-Hill, 2011, pp. 49~52.
- (11) A. R. Maher and A. B. Sadiq, “Effect of compression ratio, equivalence ratio and engine speed on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel”, *Renewable Energy*, Vol. 29, No. 15, 2004, pp. 2245~2260.
- (12) J. Wang, H. Chen, B. Liu and Z. Huang, “Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 18, 2008, pp. 4876~4883.
- (13) R. Stone, “Introduction to Internal Combustion Engines”, Palgrave Macmillan, 2012, pp. 48~50.
- (14) C. W. Park, C. G. Kim, Y. Choi, S. M. Oh and G. H. Lim, “The Performance and Emission Characteristics on Operating Condition for the SI Engine Fuel with Gasoline-Ethanol and Hydrogen Enriched Gas”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.18, No. 1, 2010, pp. 23~30.
- (15) J. Lee and Y. Lee, “The combustion and Emission Characteristics with increased fuel injection pressure in a gasoline direct injection engine”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 22, No. 1, 2017, pp. 1~7.
- (16) M. Choi, S. Yoon and S. Park, “Research on Post Injection for Diesel Particulate Filter Regeneration”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 22, No. 2, 2017, pp. 87~95.
- (17) N. N. Mustafi, Y. C. Miraglia, R. R. Raine, P. K. Bansal and S. T. Elder, “Spark-ignition engine performance with ‘Power-gas’ fuel (mixture of CO/H₂): a comparison with gasoline and natural gas”, *Fuel*, Vol. 85, No. 12~13, 2006, pp. 1605~1612.
- (18) J. B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Companies, 1988, pp. 567~592.