



압축비 변화가 경유-CNG 혼소 엔진의 성능 및 연소 특성에 미치는 영향

Effects of Compression Ratio on the Performance and Combustion Characteristics of Diesel-CNG Dual Fuel System in a Diesel Engine

유경현*† · 원종근**

Kyung-Hyun Ryu*† and Jong-Geun Won**

(Received 22 May 2019, Revision received 30 July 2019, Accepted 08 August 2019)

Abstract: This paper describes the effects of compression ratio on the performance and emission characteristics of diesel-CNG dual fuel combustion system in a single cylinder direct injection diesel engine. Engine tests were performed with the compression ratios (CR) of 15 and 18 at an engine speed of 1,500 rpm and various engine loads. This study showed that the peaks of cylinder pressure and heat release rate of the dual-fuel combustion decreased as the CR decreased. The ignition delay period of pilot fuel at the CR 15 was increased more than that at the CR 18. The pilot injection timing of CR 15 for the maximum power was advanced compared to the CR 18. The engine operation was stable with COVimep of 3% at the CR 15. Smoke with dual fuel combustion was decreased compared to those with single fuel conventional diesel combustion, and it was also decreased as the CR decreased. Compared to the CR 18, NOx emissions with the CR 15 were increased at middle-load conditions and CO and THC were more exhausted under low-load conditions.

Key Words : Compression ratio, Diesel engine, Dual fuel combustion, CNG, Exhaust emissions

1. 서 론

높은 열효율과 경제성을 갖고 있는 디젤엔진이 입자상물질(particulate matters, PM)과 NOx 등의 배출로 인한 심각한 환경오염의 원인으로 지목됨에 따라 디젤엔진에 대한 배출가스 규제를 엄격하게 강화시키고 있다.¹⁾

더군다나, 국내에서도 디젤엔진으로 인한 도시 지역의 대기오염을 개선하기 위하여 정부에서는 2000년부터 천연가스버스를 보급하여 왔으며, 제작차 중심의 저공해자동차 보급정책뿐만 아니라 오염이 심한 경유자동차를 대상으로 배출가스 저감장치를 부착하거나 저공해 자동차로 개조하는 정책을 2004년부터 진행하고 있는 실정이다.²⁾

*† 유경현(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2345-1192>) : 교수, 군산대학교 기계융합시스템공학부

E-mail : khryu@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4871

**원종근(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2461-1343>) : 군산대학교 대학원 건설기계공학과

*† Kyung-Hyun Ryu(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2345-1192>) : Professor, School of Mechanical Convergence System Engineering, Kunsan National University.

E-mail : khryu@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4871

**Jong-Geun Won(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-2461-1343>) : Graduate School, Kunsan National University.

디젤엔진의 배출가스를 저감시키기 위한 방안으로는 DPF, DOC, deNOx Trap 등과 같은 후처리 장치를 장착하거나 연료의 연소시스템을 개량하는 방법 등 다양한 방법들이 제시되고 있으나, 전 세계적으로 점점 강화되고 있는 배출가스 규격을 만족시키기에는 한계가 있다.

최근 주목받고 있는 기술 중의 하나는 경유연료를 착화연료로 사용하고 천연가스를 주 연료로 사용하는 혼소(dual fuel combustion) 엔진시스템이다. 이러한 혼소엔진 시스템은 비교적 값싸고 깨끗한 연료인 천연가스를 높은 압축비를 갖는 압축착화엔진에 사용할 수 있어 환경적인 측면뿐만 아니라 연비측면에서 유리한 장점을 갖고 있다. 이 혼소엔진시스템은 현재 운행 중인 대형 및 소형 디젤기관을 개조하면 바로 적용할 수도 있어 운행 중인 기관들의 배출가스 저감에도 매우 효과적이라고 판단된다.

특히, 기존 디젤엔진을 혼소엔진시스템으로 개조하는 것은 연소실의 변경없이 천연가스 공급시스템만을 장착함으로써 쉽게 천연가스 엔진으로 변경할 수 있는 장점이 있어, 미국에서도 LNG를 이용한 혼소차량 시스템을 개발하여 운영 중에 있는 실정이다. Wong 등³⁾은 Micropilot 인젝터를 적용한 혼소시스템의 경우, 불규칙한 착화 없이도 배기배출물을 낮출 수 있다고 보고하였으며, Beck 등⁴⁾은 혼소시스템이 기존 디젤엔진보다 빠른 연소와 배기배출물을 적게 배출하는 특성이 있다고 보고하였다. 캐나다의 CAP 사⁵⁾에서는 혼소시스템을 적용한 자동차 기술을 선보기도 하였으며, Abd Alla 등⁶⁾은 간접분사식 디젤엔진에서 메탄이나 프로판을 주 연료로 사용하고 경유를 파일럿 연료로 사용한 경우에 파일럿 연료량이 엔진 성능에 미치는 영향을 보고하기도 하였다.

국내에서도 디젤엔진을 천연가스 전소엔진시스템으로의 개조 기술에 대한 연구는 어느 정도 보고되고 있고,^{7,8)} 다양한 연구 결과 및 실용화 과정이 여러 차례 보고된 바 있으나,⁹⁻¹³⁾ 현재까지 천연가스 혼소엔진시스템에 대한 명확한 연소 특성이 규명되지는 못하였고, 천연가스의 연소 특성을 고려한 연소의 안정성 확보를 위한 다양한 연구가 필요한 실정이다.

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification	Unit
Engine model	ND 130DI	-
Number of cylinder	1	-
Combustion chamber	DI	-
Bore × stroke	95 × 95	mm
Displacement volume	673	cc
Compression ratio	18	-
Fuel injection system	Bosch common-rail	-
Injector type	Solenoid type	-
Number of injector hole	7	-
Coolant temperature	70±2	°C

따라서 본 연구에서는 디젤엔진에서 경유-CNG 혼합연료 연소시스템을 적용할 경우, 압축비 변화에 따른 엔진 성능, 연소 및 배기 특성을 고찰하고자 한다. 특히, 압축비를 변경할 경우 경유-CNG 혼소엔진시스템에 미치는 영향을 파악하여 경유-CNG 혼소엔진시스템의 운전 영역 확대를 위한 기초 기술을 확립하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 연료

본 연구에 사용된 디젤엔진은 수냉식, 4행정, 단기통, 직접분사식 디젤기관이며, 시동모터에 의해서 시동이 되고 와전류(eddy current) 엔진 동력계(110kW)에 의해 기관부하와 회전속도를 임의로 조정할 수 있도록 하였다. Table 1은 실험에 사용된 엔진의 주요 사양을 나타낸 것이다.

압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합연료 연소 특성을 파악하기 위하여 압축비는 실린더 헤드 가스켓의 두께에 변화를 주어 변경하였으며, 기존 엔진의 압축비와 비교하여 평가하였다.

고압의 연료 분사와 혼합 연료 연소시의 착화를 위한 파일럿(pilot) 연료를 분사하기 위해 기존에 장착된 연료 인젝터(injector)를 탈거하고 별도로 상용 커먼레일(common-rail) 시스템을 엔진에 부착하였으며, 상용 고압펌프를 이용하여 커먼레

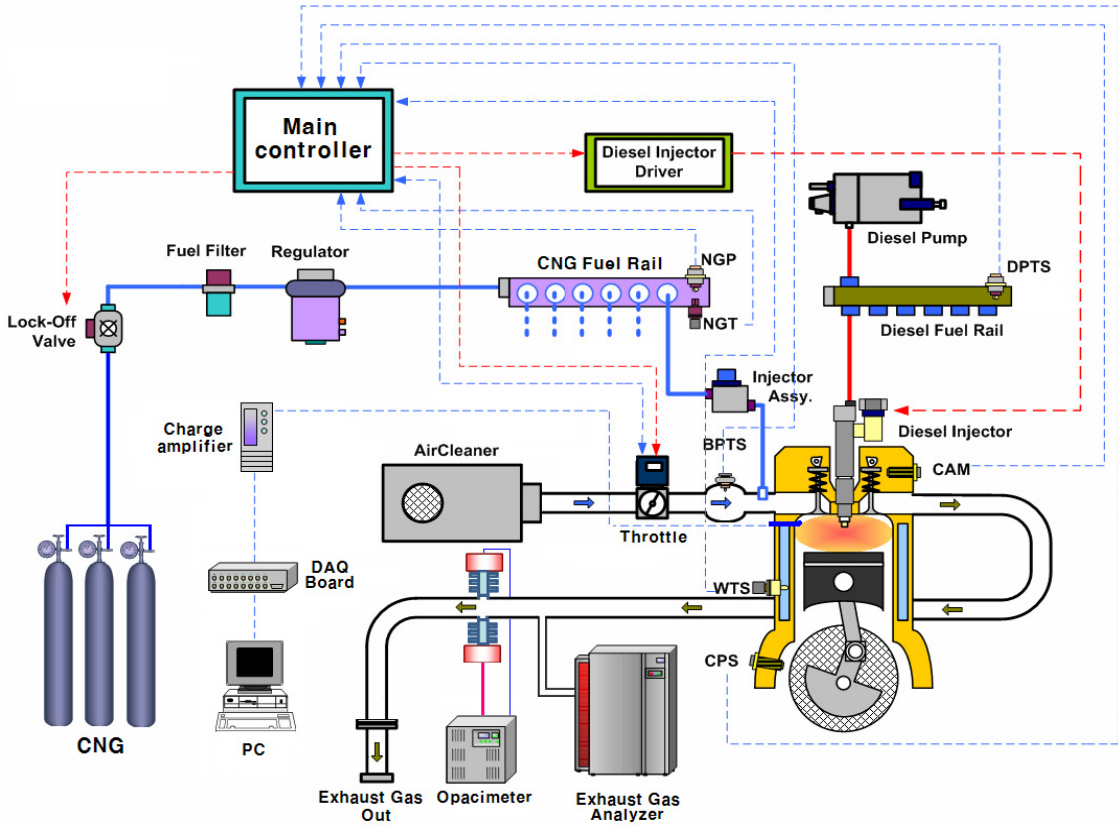


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

일에 연료를 가압하고 레일압력제어기를 통하여 설정한 압력으로 일정하게 유지할 수 있도록 연료공급시스템을 구성하였다. 파일럿 인젝터는 7-hole 솔레노이드 인젝터(solenoid injector)를 사용하였으며 분사량은 엔진 크랭크각도를 기준으로 1° 단위로 제어하였다.

혼소엔진의 주 연료인 압축천연가스(CNG, compressed natural gas)는 흡입행정 시에 공급할 수 있도록 흡기관에 CNG 인젝터를 장착하였고, 고압연료탱크에서 공급된 천연가스는 CNG 압력조정기를 통하여 6 bar의 일정한 압력으로 CNG 레일로 공급되도록 하였고, 메인 제어기에서 CNG 인젝터로 연료 공급량에 맞게 펄스를 제어하는 방법으로 CNG의 분사량을 공급하였다. 또한 CNG의 공급량은 천연가스 전용 질량 유량계(TSM-140, MKP)를 사용하여 측정하였으며, 경유

pilot 연료량은 별도로 설치된 계량병을 이용하여 측정하였다.

실린더 내의 압력신호를 검출하기 위해 실린더 헤드에 피에조 압력센서(6051B1, Kistler)를 설치하였고, 측정된 압력은 증폭기(5015A, Kistler)와 DAQ 보드(PCI-6143, National Instrument)를 통해 컴퓨터에 저장하였으며, 200 cycles의 압력을 측정하여 연소특성을 해석하였다.

배출가스 성능을 평가하기 위하여 엔진동력계에 장착된 실험용 엔진의 배기다기관으로부터 후방 2 m 위치에 배기가스 분석기(Vario plus, MRU)와 Opacimeter(OP-130, EplusT)를 설치하여 배기가스를 채취하여 분석하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

Table 2와 Table 3은 실험에 사용된 pilot 연료인 경유와 CNG의 물성치를 각각 나타낸 것이다.

Table 2 Properties of diesel fuel

Item	Diesel fuel	Unit	Test method
Flash point	42	PM, °C	KS M 2010 : 2004
Kinematic viscosity	2.52	40 °C, mm ² /s	KS M 2014 : 2004
Sulfur	8	mg/kg	KS M 2027 : 2005
Cetane index	54	-	KS M 2610 : 2005
Density	826	15 °C, kg/m ³	KS M 2002 : 2006
Lower heating value	43.116	MJ/kg	ASTM D240

Table 3 Properties of CNG

Item	CNG	Unit
Net heating value	43.58	MJ/Nm ³
Specific gravity	0.55	compare to Air
Burning range	5 ~ 15	%
Ignition temperature	537	°C
Component	Methane	85.12 Vol. %
	Ethane	9.32 Vol. %
	Propane	4.58 Vol. %
	i-butane	0.56 Vol. %
	n-butane	0.42 Vol. %
	Nitrogen	0.01 Vol. %

2.2 실험 방법

단기통엔진의 연료경제적인 측면과 안정적인 운전 범위를 고려하여 엔진 회전수는 1,500 rpm으로, 엔진부하는 제동평균유효압력(BMEP, brake mean effective pressure) 0, 0.16, 0.32, 0.48, 0.64 MPa의 범위로 설정하였으며, 모든 실험은 엔진 냉각수 온도를 70±2°C로 일정하게 제어한 상태에서 수행하였다. 파일럿 분사량은 엔진회전속도 1,500 rpm과 파일럿 연료의 분사압력 120 MPa 상태에서 안정적인 연소가 형성될 수 있는 최소량

Table 4 Test conditions

Item		Test conditions
Engine speed (rpm)		1,500
Compression ratio		15, 18
Engine load (BMEP, MPa)		0, 0.16, 0.32, 0.48, 0.64
Pilot fuel	Pilot fuel	Diesel fuel
	Injection pressure (MPa)	120
	Injection timing (BTDC, °CA)	10, 23
CNG	Injection pressure (MPa)	0.6
	Injection timing (°CA)	BTDC 356 from expansion stroke
	Amount of injection (°CA)	Variable

을 분사하였으며, 최대 제동토크(MBT, maximum brake torque)가 발생할 수 있는 크랭크 각도를 고려하여 파일럿 연료의 분사시기를 제어 하였다. 엔진 회전수 및 부하의 제어는 주 연료인 CNG의 공급량을 변화시켜가면서 조절하였다. 일반적으로 혼소시스템의 경우, 공기과잉율 값을 1.6~1.9의 범위에서 조정하나 본 연구에서는 쓰로틀을 전개한 상태(WOT, wide-open throttle)에서 실험을 수행하였으며, 그 상태에서의 공기과잉율 값의 변화를 고찰하였다. Table 4는 실험 조건을 정리하여 나타낸 것이다.

3. 실험 결과 및 고찰

실험 결과 값의 측정 신뢰도를 고려하기 위해 실험장치와 각종 계측기에 대한 오차해석(uncertainty analysis)을 실시하였다. Table 5는 Coleman 등¹⁴⁾이 제시한 오차해석 방법을 이용하여 측정된 각종 계측기의 오차 값을 나타낸 것으로, 최대 오차가 CNG 유량에서 ±2.04%로 나타난 것을 제외하고는 1% 이하로 매우 낮은 오차가 발생함을 알 수 있었다.

Table 5 Accuracy and uncertainty of measured parameters

Instrument	Measured parameters	Range	Accuracy	Uncertainty (%)
Load indicator	Engine torque	0-343 Nm	± 0.69 Nm	0.2
Speed sensor	Engine speed	0-10,000 rpm	± 10 rpm	0.1
Burette	Diesel fuel flow rate	1-30 cc	± 0.2 cc	0.67
Mass flow meter	CNG flow rate	0-24 m3/h	± 1 %	2.04
Laminar flow meter	Inlet air flow rate	0-203.4 kg/h	± 0.72 %	0.72
Exhaust gas analyzer	NOx emission	0-6,000 ppm	± 10 ppm	0.17
	CO ₂ emission	0-30 %	± 0.5%	1.7
	CO emission	0-10,000 ppm	± 40 ppm	0.4
	O ₂ emission	0-21 %	0.01 %	0.05
	HC emission	0-5,000 ppm	± 30 ppm	0.6
Smoke meter	Smoke	0-100%	± 0.1 %	0.103
Pressure transducer	Cylinder pressure	0-250bar	± 0.1 bar	0.04

3.1 압축비에 따른 Diesel-CNG 혼소시스템의 엔진 성능 및 연소 특성

Fig. 2는 압축비를 변경하였을 경우의 연료분사가 없는 모터링(motoring) 상태에서 실린더 내의 압력 특성을 나타낸 것이다. 압축비가 18일 경우, 실린더 내 최대 압력이 TDC에서 약 40 bar까지 상승하였으나 압축비를 15로 변경하였을 경우에는 31.5 bar까지만 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 1,500 rpm, BMEP 4.9 MPa에서의 압축비 변화에 따른 단일 연료 사용 시 실린더 내의 압력 거동을 나타낸 것이다. 압축비 18에서보다 압축비가 낮은 15에서 착화시기가 늦어지고 연소 최고 압력이 낮으며 연소 후반부의 압력이 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 Fig. 2에서 살펴본 바와 같이 압축비가 낮아짐에 따라 실린더 내의

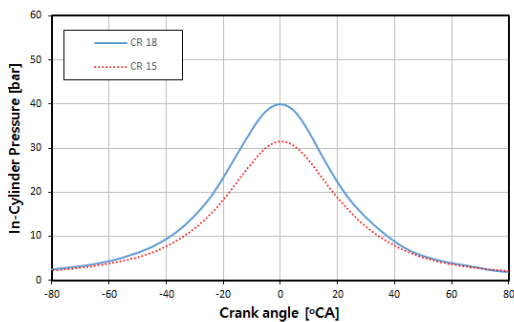


Fig. 2 In-cylinder pressure according to the compression ratio during motoring test

최고 압력이 낮아지고, 압축 말기의 연소실 내의 온도가 낮아짐에 따라 착화지연기간이 길어지기 때문에 판단된다.

Fig. 4는 1,500 rpm의 엔진속도와 엔진부하 변화조건에서 압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합 연료 연소 시의 도시평균유효압력(IMEP, indicated mean effective pressure)과 도시평균유효압력의 사이클 변동(COV_{IMEP}, coefficient of variation of IMEP) 특성을 나타낸 것이다. 경유-CNG의 혼합연소 시 IMEP는 엔진 부하가 증가하면서 전체적으로 증가하는 경향을 보였지만, 무부하를 제외하고는 대부분의 부하 조건에서 압축비 15에서의 IMEP가 압축비 18에서보다 더 높게 나타났다. 이는 압축비가 낮을 경우 노킹(knocking)을 억제함

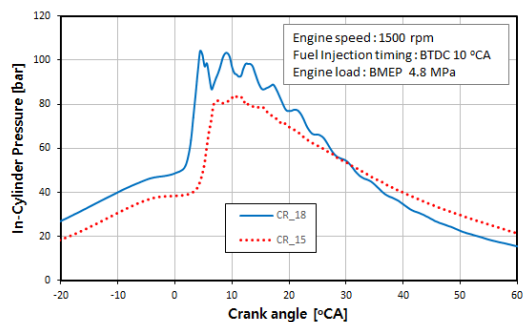


Fig. 3 In-cylinder pressure with different compression ratio in conventional diesel combustion at BMEP 4.8 MPa

압축비 변화가 경유-CNG 혼소 엔진의 성능 및 연소 특성에 미치는 영향

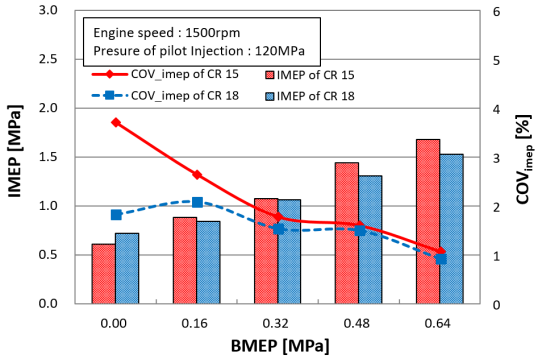
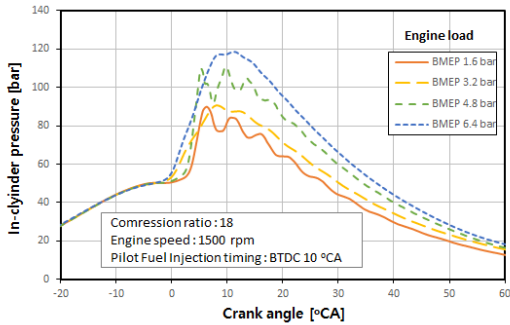
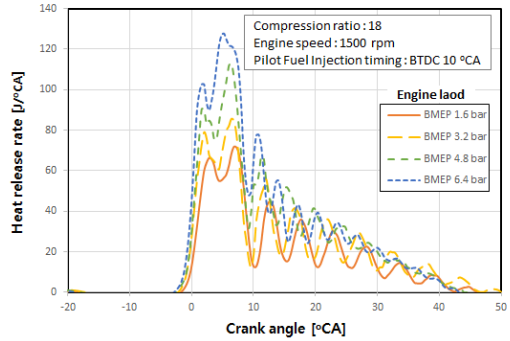


Fig. 4 IMEP and COVIMEP with different compression ratio in dual fuel combustion



(a) In-cylinder pressure



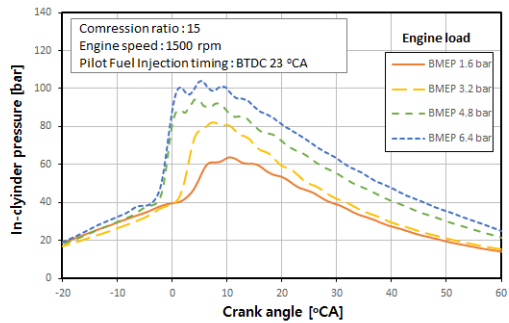
(b) Heat release rate

Fig. 5 Combustion characteristics at compression ratio 18

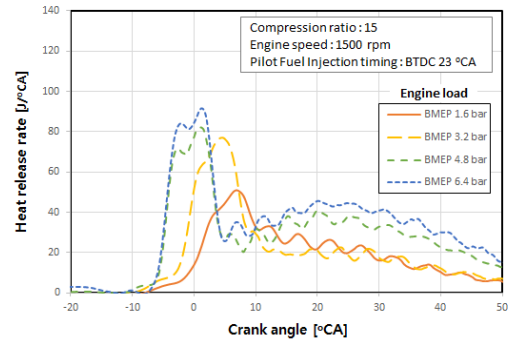
에 따라 천연가스를 주 연료로 사용하는 혼합연료의 연소 운전범위가 넓어졌기 때문으로 판단된다. 즉, 압축비가 낮아짐에 따라 최대제동토크 (MBT, maximum brake torque)를 위한 연료의 분사

시기가 진각되고, 그로 인해 상사점 근방에서 폭넓게 고압을 형성하였기 때문에 IMEP가 더 높게 나타난 것으로 사료된다. 한편, 경유-CNG 혼합연료 연소시 IMEP의 연소변동은 엔진 부하가 증가할수록 낮아졌으며, 압축비가 15일 때가 압축비가 18일 때보다 전체적으로 더 높게 나타났으나 전체적으로 3% 이하의 안정적인 연소특성이 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 1,500 rpm의 엔진속도와 엔진 부하변화 시 압축비 18에서의 경유-CNG 혼합 연료 연소시의 압력과 열발생율을 나타낸 것이다. 압축비가 18인 경우에서의 최대 출력을 위한 파일럿 연료의 분사시기는 BTDC 10°C가 적절하였으며, 엔진부하가 증가할수록 착화시기가 진각되고 연소 최고압력과 열발생율의 최대 피크도 증가하는 전통적인 특성을 나타냈으나, 최고 연소압력이 120 bar까지 증가하고 열발생율 피크도 120 J/°CA 이



(a) In-cylinder pressure



(b) Heat release rate

Fig. 6 Combustion characteristics at compression ratio 15

상으로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 6은 압축비가 15인 경우의 경유-CNG 혼합 연료 연소시의 압력과 열발생율을 나타낸 것으로, 압축비가 낮아짐에 따라 최대 출력을 발생시킬 수 있는 파일럿 연료의 분사시기가 BTDC 23°C로 진각됨을 알 수 있었다. 엔진부하가 증가할수록 연소압력도 증가하였으나 최고 연소압력이 100 bar 정도로 나타나고, 열발생율 피크도 90 J/°CA 정도로 나타나났으며, 고부하에서 연소후반부에 열발생율이 크게 나타났다. 또한 압축비 18에서의 연소기간(약 45°C)과 비교하여 압축비 15에서는 연소기간이 약 55°C 이상으로 길어짐을 알 수 있었다. 이로 인해 Fig. 7에서의 배기가스온도 그래프를 통해서도 확인할 수 있는 것처럼, 연소기간이 길어짐에 따라 배기가스온도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 5와 6을 종합하여 볼 때, 압축비가 높을 경우, 연소실 내의 최고 압력이 높아짐에 따라 노킹을 억제할 수 있는 범위로 연소압력을 제어하기 위해 연료 공급량을 제한해야 하는 등의 운전 조건이 구속받을 수 있으나, 압축비를 낮출 경우 최고 연소압력이 낮아지기 때문에 Fig. 4에서와 같이 최대 출력을 증가시킬 수 있는 운전조건의 범위가 넓어질 수 있다고 판단된다.

Fig. 8은 경유만을 사용한 경우와 경유-CNG 혼합연료 연소 시의 압축비 변화에 따른 착화지연기간을 나타낸 것이다. 전체적으로 엔진부하가 증가할수록 착화지연기간은 감소하였으며, 압축비가 감소할수록 착화지연기간은 길어짐을 알 수 있었

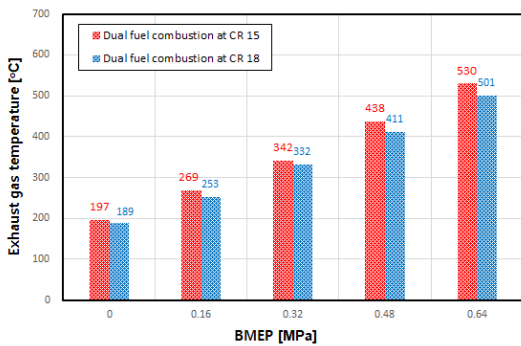


Fig. 7 Exhaust gas temperature with different compression ratio in dual fuel combustion

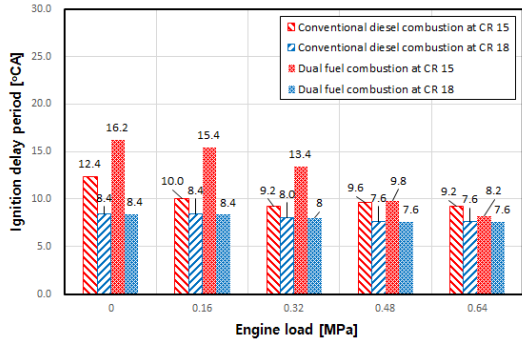


Fig. 8 Ignition delay period with different compression ratio in conventional diesel combustion

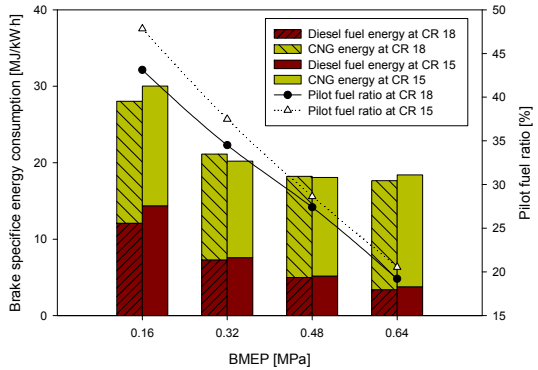


Fig. 9 BSEC with different compression ratio in dual fuel combustion

다. 특히, 압축비 18의 경우에서는 경유만을 사용하는 단일 연소와 경유-CNG 혼합연료 연소에서 착화지연기간의 차이가 거의 없었으나, 압축비가 15로 감소될 경우에는 단일 연료 연소시보다 혼합 연료 연소 시에 착화지연기간이 크게 증가함을 알 수 있었다. 이는 압축비가 높을 경우, 압축과정시에 파일럿 연료를 착화시키기 위한 충분한 착화에너지가 형성되기 때문에 단일 연소나 혼합 연료 연소 시에 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 그러나 압축비가 15로 낮아질 경우, 파일럿 연료의 착화에너지가 감소하기 때문에 착화지연기간이 길어진 것으로 판단된다.¹⁵⁾

한편, Fig. 9는 경유-CNG 혼합연료 연소시의 제동에너지소비율(BSEC, brake specific energy consumption)을 나타낸 것으로, 전체적으로 엔진부

하가 증가할수록 BSEC와 파일럿 연료의 비율이 감소하는 전형적인 특성을 보였다. 그러나 압축비가 낮아짐에 따라 파일럿 연료의 비율이 증가하였고, 전체적인 BSEC도 증가하는 특성을 보였다. 이를 종합하여 볼 때, 경유-CNG 혼합 연료 연소를 위해 압축비를 낮출 경우, 최대 출력을 위한 안정적인 연소를 위해서는 착화지연시간을 고려하여 파일럿 연료의 분사시기를 충분히 진각시킬 필요가 있으며, 파일럿 분사율도 약간 증가시킬 필요가 있다고 사료된다.

3.2 압축비에 따른 Diesel-CNG 혼소시스템의 배출가스 특성

Fig. 10은 1,500rpm과 다양한 엔진부하 조건에서 압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합연료 연소의 매연 배출 특성을 나타낸 것이다. BMEP 0.64 MPa의 엔진 부하를 제외하고는 대부분 실험 조건에서 10% 이하의 낮은 매연을 배출하였으나, 이는 파일럿 연료의 분사 압력이 120 MPa로 높기 때문에 연료의 미립화 촉진으로 매연 배출이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 고부하(BMEP 0.64 MPa)에서 단일 연료 연소 시에 약 65% 정도의 높은 매연을 배출한 반면, 경유-CNG 혼합 연료 연소 시에는 약 7% 이하로 매우 낮게 배출하였다. 그러나 전통적인 단일 연소 시에는 압축비가 낮아지면 착화에너지가 낮아짐에 따라 연료의 불완전연소를 초래하여 매연을 증가시키는 것과는 다르게, 경유-CNG 혼합연료 연소 시에는 압축

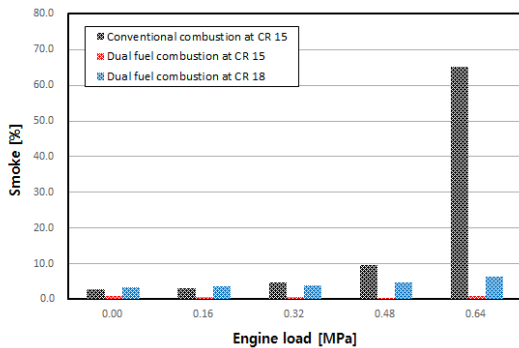


Fig. 10 Smoke with different compression ratio in dual fuel combustion

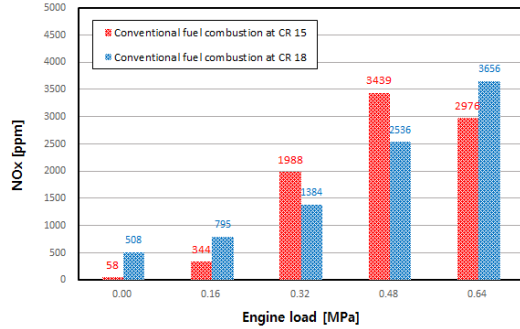


Fig. 11 NOx with different compression ratio in dual fuel combustion

비가 15일 때가 압축비 18일 때보다 더 적은 매연을 배출하는 특성을 보였다. 이는 압축비가 낮아지면 착화지연시간이 길어지고 파일럿 연료가 불완전 연소할지라도 경유-CNG 혼합 연료 연소 시에는 Fig. 6에서 살펴본 것처럼 전체적인 연소기간이 길어져 연소후반부에 주 연료인 CNG의 연소와 더불어 연소되지 못한 파일럿 연료를 완전 연소시켰기 때문으로 분석된다.

Fig. 11은 1,500 rpm과 다양한 엔진부하 조건에서 압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합연료 연소의 NOx 배출 특성을 나타낸 것이다. 전체적으로 엔진 부하가 증가할수록 NOx의 배출량이 증가하였으며, 중부하 영역에서는 압축비 15에서 압축비 18에서보다 약간 더 많이 배출되면서 전통적인 매연과 NOx의 상관관계는 나타나지 않았다. 이는 낮은 압축비에서도 파일럿 연료의 착화시기 제어를 통해 연소가 활발히 일어났기 때문으로 분석된다.

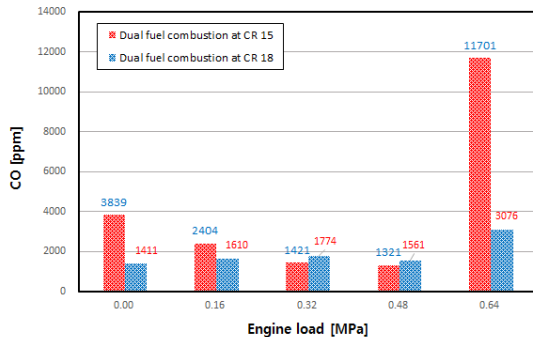


Fig. 12 CO with different compression ratio in dual fuel combustion

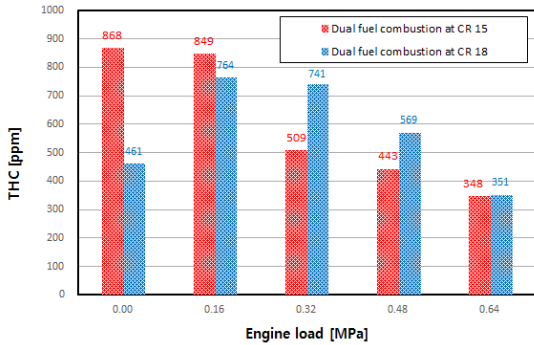


Fig. 13 THC with different compression ratio in dual fuel combustion

Fig. 12와 13은 1,500 rpm과 다양한 엔진부하 조건에서 압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합연료 연소의 CO와 THC의 배출 특성을 각각 나타낸 것이다. 중부하를 제외하고는 연소온도가 낮은 저부하 조건들에서 압축비가 낮을 때 CO와 THC가 더 높게 배출되었으며, 이는 NOx의 배출 특성과 상반되는 것으로 보아 압축비 18의 경우보다는 저부하에서 상대적으로 연소가 활발하지 못하였기 때문으로 분석된다.

4. 결 론

디젤엔진에서 압축비 변화에 따른 경유-CNG 혼합 연료 연소시의 엔진 성능, 연소 및 배기 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 경유-CNG 혼합연료 연소 시, 압축비가 낮을 때 실린더 내의 연소 최고압력과 열발생을 피크가 낮아짐을 알 수 있었으나, 연소변동은 3%이하로 안정적임을 알 수 있었다.

2) 경유-CNG 혼합연료 연소 시, 압축비가 낮을 때 파일럿 연료의 착화지연기간이 길어짐을 알 수 있었고, 최대 출력을 위해서는 파일럿 연료의 분사시기를 진각시키는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

3) 안정적인 경유-CNG 혼합 연료의 연소를 위한 파일럿 연료의 분사율은 압축비가 낮아짐에 따라 증가하였으나, 엔진 부하가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다.

4) 경유-CNG 혼합 연료 연소 시, 단일 연료 연소 시보다 전체적으로 매연이 감소하였으며 고부하에서 크게 매연이 감소하였으나, 단일 연료 연소 시와는 다르게 압축비가 낮아지면 연소기간이 증가하여 매연 배출량은 오히려 감소함을 알 수 있었다.

5) NOx의 경우, 매연과의 상반관계를 보이지 않았으나 압축비가 낮아질 경우 중부하에서 더 높게 배출되었으며, CO와 THC의 경우 저부하에서 압축비가 낮을 때 더 많이 배출됨을 알 수 있었다.

상기를 종합하여 볼 때, 경유-CNG 혼합 연료 연소를 위해 압축비가 낮춘다면, 엔진 노킹을 억제하여 출력을 증대할 수 있을 것으로 판단되나, 열효율 특성 및 최적의 운전 조건을 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술개발기반구축사업의 “중소형 선박엔진 및 관련 기자재 공인 시험인증센터 구축” 과제의 지원과 '건설기계R&D 전문인력양성사업(N0001292)'의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

Author contributions

K. H. Ryu; Conceptualization. Data curation, Project administration, Supervision, Writing-original draft, Writing-review & editing. J. G. Won; Investigation, Validation.

References

1. <http://www.afsglobal.com/index.html>
2. S. J. Kim, 2004, "A Special Law for the Environmental Improvement of Air Quality in the Metropolitan Area and a Policy for the Supply of Low Emission Vehicles", Fall Conference Special Session Proceedings, KSAE, pp. 31-43.

3. H. C. Wong, N. J. Beck, and S. K. Chen, 2000, "The Evolution of Compression Ignition Natural Gas Engines for Low Emission Vehicles", ASEM Internal Combustion Engine Division, 2000 Fall Technical Conference, ASME 2000-ICE-318.
4. N. J. Beck, R. L. Barkhimer, W. P. Johnson, H. C. Wong, and K. Gebert, 1997, "Evolution of Heavy Duty Natural Gas Engines-Stoichiometric, Carbureted and Spark Ignited to Lean Burn, Fuel Injected and Micro-Pilot", SAE Paper 972665. (DOI: 10.4271/972665)
5. R. A. Erickson, K. Campbell, and D. L. Morgan, 2003, "Application of Dual-Fuel Engine Technology for On-Highway Vehicles", ASEM Internal Combustion Engine Division, 2003 Spring Technical Conference, ICES2003-586. (DOI:10.1115/ICES200 3-0586)
6. G. H. Abd Alla, H. A. Soliman, O. A. Badr, and M. F. Abd Rabbo, 2000, "Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance of a Dual Fuel Engine", Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 559-572. (DOI:10.1016/S0196-8904(99)00124-7)
7. Y. C. Han, Y. S. Oh, W. Y. Rha, J. K. Yoon and M. D. Eom, 1999, "A Study on Dedicated CNG Engine", Transactions of the KSAE, Vol. 7, No. 2, pp. 72-77.
8. T. H. Joo, C. J. Lee, P. C. Na, G. C. Kim, Y. D. Pyo and Y. J. Lee, 2004, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of 2.5 ton Retrofit CNG Truck", Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol. I, pp. 340-345.
9. M. Y. E. Selim, 2005, "Effect of Engine Parameters and Gaseous Fuel Type on the Cyclic Variability of Dual Fuel Engines", Fuel, Vol. 84, pp. 961-971. (DOI:10.1016/j.fuel.2004.11.023)
10. K. H. Ryu, J. C. Park, and K. H. Choi, 2010, "Performance and Emission Characteristics of Dual-fuel(Diesel-CNG) Combustion in a Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 4, pp. 132-139.
11. K. H. Ryu, 2013, "Effects of Pilot Injection Timing on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine using Biodiesel-CNG Dual Fuel", Applied Energy, Vol. 111, pp. 721-730. (DOI:10.1016/j.apenergy.2013.05.046)
12. S. Nag, P. Sharma, A. Gupta and A. Dhar, 2019, "Combustion, Vibration and Noise Analysis of Hydrogen-Diesel Dual Fuelled Engine", Fuel, Vol. 241, pp. 488-494. (DOI:10.1016/j.fuel.2018.12.055)
13. R. Kang, L. Zhou, J. Hua, D. Feng, H. Wei and R. Chen, 2019, "Experimental Investigation on Combustion Characteristics in Dual-Fuel Dual-Injection Engine", Energy Conversion and Management, Vol. 181, pp. 15-25. (DOI:10.1016/j.enconman.2018.11.057)
14. H. W. Coleman and W. G. Steele, 1989, "Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers", New York: John Wiley & Sons.
15. J. B. Heywood, 1988, "International Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, New York, p. 543.