

# 1리터급 가시화 압축착화 엔진을 이용한 천연가스/디젤 이중연료 예혼합압축착화 연소 과정 및 배기 배출 특성 분석

김 우 영 · 김 현 수 · 배 충 식\*

한국과학기술원 기계공학과

## Investigation of Combustion Process and Emission Characteristics of CNG/Diesel Dual-Fuel PCCI Combustion in a 1.0 Liter Optical CI Engine

Wooyeong Kim · Hyunsoo Kim · Choongsik Bae\*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST), Daejeon 34141, Korea  
(Received 19 October 2020 / Revised 26 November 2020 / Accepted 26 November 2020)

**Abstract** : Dual-fuel premixed charge compression ignition(PCCI) combustion is one of the advanced combustion concepts based on compression-ignition diesel engines. The use of natural gas as a low-reactivity fuel has been proven to be a promising solution for both improvement of thermal efficiency and reduction of pollutant emission, such as particulate matters and nitrogen oxides. In this study, the compressed natural gas(CNG)/diesel dual-fuel PCCI combustion was demonstrated in a heavy-duty optical engine. The diesel injection timing and natural gas substitution ratio were varied in order to implement the variation in mixture reactivity. Flame visualization results indicated that the mixture with a larger natural gas substitution revealed a considerable reduction in the soot-oriented luminous flame. Advanced injection of diesel resulted in a shift in the location and direction of early flame development, while the area of diffusion flame decreased significantly. The measurement of pollutant emission concentration in thermodynamic engine verified the reduction of particulate emissions with respect to the mixture formation parameters.

**Key words** : Dual-fuel(이중연료), Natural gas(천연가스), Optical engine(가시화 엔진), Flame visualization(화염 가시화), Exhaust emission(배기 배출물)

### Nomenclature

CA10 : crank angle at 10 % mass fraction burnt  
CA50 : crank angle at 50 % mass fraction burnt  
CA90 : crank angle at 90 % mass fraction burnt  
CAD : crank angle degree  
HCCI : homogeneous charge compression ignition  
HRR : heat release rate  
IMEP : indicated mean effective pressure  
MPRR : maximum pressure rise rate  
NGSR : natural gas substitution ratio  
PCCI : premixed charge compression ignition

PM : particulate matter  
RCCI : reactivity controlled compression ignition  
SOI : start of ignition  
TDC : top dead center  
*LHV* : lower heating value, MJ/kg  
*m* : mass flow rate, kg/h

### Subscripts

D : diesel  
NG : natural gas

\*A part of this paper was presented at the KSAE 2020 Spring Conference

\*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.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.

## 1. 서론

디젤 연료의 연소를 기반으로 한 압축착화 엔진은 근 100여 년간 교통과 물자 수송을 위한 도로 수송 및 비도로 수송의 동력원으로 널리 사용되어져 왔다. 그러나 자동차 배출가스가 주요 대기 오염원 중 하나로 지목되면서, 지속적으로 강화되는 배출가스 규제에 의해 디젤 엔진의 수요는 자동차 시장에서 큰 변화를 경험하고 있다. 승용자동차 시장의 경우 디젤 엔진에 대한 지역적 선호도가 상이하지만, 유럽의 경우에도 2015년 이후 디젤 자동차의 신규 등록이 지속적으로 감소하고 있으며 해당 수요가 가솔린 엔진 자동차로 대량 이동하고 부분적으로 하이브리드 및 전기 자동차의 수요 상승으로 이어짐을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 그럼에도 불구하고 화물 수송 분야의 경우 견인성능과 항속거리, 그리고 경제성 측면에서 디젤 엔진을 완전히 대체할 수 있는 추진 시스템의 도입이 단기간 내 어려울 것으로 전망하고 있다.<sup>2)</sup> 전 세계적으로 화물 운송 수요가 확대되고 그에 따른 탄소 배출이 지속 증가하는 상황에서, 압축착화 연소 기술의 진보를 통한 고효율 친환경적 엔진의 개발은 산업 전반 및 사회적으로 큰 기여를 할 것으로 예상된다.<sup>3)</sup>

자동차 배출가스 규제 도입 및 강화에 따라 디젤 엔진은 다른 요소기술과 더불어 배기가스 후처리 기술을 상용화하여 대응하고 있다. 그러나 이에 의한 시스템 복잡성 및 비용 상승의 부담이 존재하여, 저온연소(Low-temperature combustion) 기술과 같이 연소 방식의 근본적인 변화를 통해 후처리 의존도를 낮추고자 하는 노력이 지속되어 왔다. 저온연소 기술은 디젤 엔진 연소 시 입자상 물질(Particulate Matter, PM) 및 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 생성이 혼합기의 당량비(Equivalence ratio)와 온도에 의해 결정되는 관계를 활용하여, 이를 회피하여 저온·저당량비 영역에서 연소를 제어하는 혼합기 형성 전략을 기반으로 한다.<sup>4)</sup> 단일연료를 사용하는 저온연소의 경우 공통적으로 이른 분사시기와 대량의 배기재순환을 사용하는 특징을 가지며, 혼합기 형성 전략에 따라 균일예혼합 압축착화(Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI), 부분예혼합 압축착화(Premixed Charge Compression Ignition, PCCI) 등으로 명명된다. 상기 단일연료 저온연소의 경우 배출허용기준 이하로 배기 배출량을 제어할 수 있지만, 분사 전략만으로는 연소 과정에서 열방출 시점과 속도를 제어하기 어려운 문제로 인해 상용화에 한계점을 보여왔다.<sup>5-7)</sup>

이를 극복하기 위한 방안으로 이중연료(Dual-fuel) 연소기술은 압축착화 엔진에 반응성이 서로 다른 두 종류

의 연료를 공급하여 저온 연소를 구현함과 동시에 연소 제어성을 향상하는 전략이다. 이중연료 연소에서 사용하는 대표적인 고반응성 연료는 디젤이며, 저반응성 연료는 가솔린, 천연가스, 알코올 등이 있다. Fig. 1은 본 연구의 대상 연소 기술인 천연가스/디젤 이중연료 압축착화 방식의 개념도를 나타낸다. 저반응성 연료인 천연가스는 흡기 포트에 주입되어 흡기 행정 중 연소실에 공급되어 균일한 예혼합기를 형성한다. 이후 압축 행정 중 혼합기의 자착화(Auto-ignition)를 유도하기 위해 고반응성 연료인 디젤을 직접 분사한다.

이중연료 연소 방식은 고반응성 연료의 분사시기에 따라 상이한 연소 특성을 보이며, 이를 통해 연소 전략을 구분할 수 있다.<sup>8)</sup> 통상적인 디젤 엔진의 연료 분사시기를 사용하며 흡기에 천연가스를 혼합하여 공급할 경우, 고온 고압의 환경에서 디젤 연료가 착화원(Ignition source)으로 작용하며 이후 디젤의 확산연소와 동시에 천연가스 예혼합기의 산화를 유도한다.<sup>9-11)</sup> 따라서 상기 연소 방식은 저온연소 보다는 일반 디젤 연소와 유사한 형태를 보이며, 이를 통상 Micro-pilot 연소 또는 Pilot-DF 연소라 칭한다. 반면 디젤 분사시기를 상사점으로부터 40-70 크랭크각(Crank Angle Degree, CAD) 전각하여 설정 시, 디젤 연료가 바로 착화되지 않는 대신 비교적 긴 기간 미립화를 통해 부분 예혼합 상태의 혼합기를 형성한다. 상기 조건에서 열방출 형태는 연료의 분사시기보다 두 연료의 비율에 지배적인 영향을 받으며, 이를 반응성제어 압축착화(Reactivity Controlled Compression Ignition, RCCI) 연소라 칭한다.<sup>12,13)</sup> RCCI연소의 경우 긴 점화지연(Ignition delay)에 의해 일반 디젤 연소 대비 낮은 당량비에서 연소가 발생하고, 저반응성 연료의 존재로 열방출 속도를 제어하여 저온연소를 구현함으로써 입자상 물질 및 질소산화물 생성을 억제할 수 있다. 또한 RCCI 연소는 저온연소 특성상 연소 과정의 열전달 손실을 효과적으로 저감하여 일반 디젤 연소 대비 향상된 열효율을 달성할 수 있다.<sup>14-16)</sup> 먼저, 천연가스 대체율 증가 시 최대 연소 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연소실 내 전체적인 당량비가 낮은 환경에서

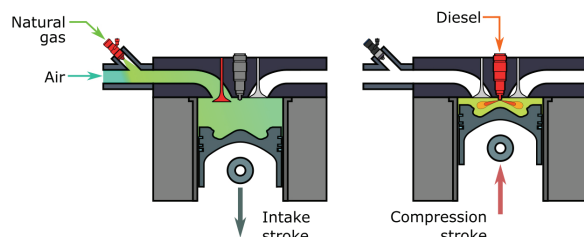


Fig. 1 Dual-fuel engine using natural gas and diesel

고반응성 연료인 디젤의 비율이 감소한 것이 원인으로, 결과적으로 운전 부하가 감소하는 결과를 나타냈다. 또한 천연가스 대체율이 증가할수록 연소 시작(CA10)과 연소상(CA50), 그리고 연소 종료(CA90)이 모두 지각되는 경향을 확인할 수 있다. 이는 착화 저항성이 높은 천연가스 비율 증가에 의해 혼합기의 점화지연(Ignition delay)이 증가하는 것에 기인한다.

천연가스/디젤 이중연료 엔진의 연소 과정은 실린더 내 반응성의 성층화로 인해 일반적인 압축착화 연소와는 상이한 특성을 가지며, 따라서 실린더 압력 측정에 의한 열방출률 분석과 더불어 수치해석적 분석에 기반한 이해가 중요한 역할을 수행해왔다. 특히 실린더 내 온도도와 수산화(OH) 등 중간생성물, 그리고 연소 생성물의 시공간적 분포는 혼합기 형성 조건이 이중연료 연소에 미치는 영향을 파악하는데 효과적이다.<sup>17-20)</sup> 이와 더불어 가시화 엔진 환경에서 이중연료 연소를 구현하여 화염의 생성 및 발달 과정을 계측한 결과는 연소 과정을 가장 정확하고 직접적으로 인지 해석할 수 있는 연구 방법론이다. 고속 이미징으로 취득한 자연 발광(Natural luminosity) 화염 영상을 분석한 결과, 천연가스/디젤 이중연료 연소 시 두 연료의 비율에 따라 화염 발달 속도와 휘염(Luminous flame) 영역이 달라짐을 확인할 수 있다.<sup>21,22)</sup> 또한 화염 면에서 발생하는 OH의 화학 발광(Chemiluminescence) 신호를 분석한 결과 두 연료의 비율에 따라 자착화 반응과 화염 전파 반응의 비율이 결정되는 것을 확인하였다.<sup>23)</sup> 상기 문헌의 경우 상사점 전 15 CAD 부근에서 고정된 디젤 분사시기를 사용한 관계로, 이중연료 연소에서 고반응성 연료의 분사 전략의 영향을 파악할 수 없다. 또한 화염 분석을 위해 상용 디젤 연료분사와 맞지 않는 형태의 분사기를 사용하여 향후 상용 디젤 엔진을 천연가스/디젤 이중연료 엔진으로 개량(Retrofit) 적용 시의 현상을 반영하지 못하는 한계점이 존재한다.

따라서 본 연구는 상용 디젤 엔진 기반의 가시화 엔진에서 디젤/천연가스 이중연료 예혼합압축착화(Dual-fuel PCCI) 연소를 구현하여, 혼합기 형성 전략에 따른 연소 특성을 화염 가시화를 통해 분석하고자 한다. 건설기계용 디젤 엔진을 개조한 1리터급 단기통 엔진을 이용해 디젤 분사시기와 천연가스 대체율에 따른 연소 특성을 분석하였고, 배기 배출물 측정을 수행하였다. 대상 엔진에 가시화 모듈을 장착하여 성능 엔진과 동일한 혼합기 형성 조건에서 고속 이미징을 통해 화염의 자연 발광 신호를 취득하였고, 이와 동기화된 실린더 압력 측정을 통해 열방출률 분석을 동시 수행하였다. 상기 화염 가시화 결과 및 열역학적 분석을 바탕으로, 혼합기 형성 조건에

따른 배기 배출 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1 실험 장치

본 연구는 건설기계 및 대형차량에 사용되는 6리터급 디젤 엔진을 기반으로 개조한 1리터급 연구용 단기통 엔진을 사용하였다. 본 단기통 엔진은 커먼레일 방식의 디젤 직접분사를 사용하며, 엔진의 상세 제원은 Table 1과 같다.<sup>25)</sup>

본 연구에서 활용한 실험 장치의 구성도는 Fig. 2와 같다. 엔진의 흡입되는 공기는 질량 유량계(F-106AI, Bronkhorst)를 통해 측정하였다. 디젤 연료는 저압 및 고압 펌프로 가압하여 상용 커먼레일을 통해 분공수 7공, 분사각 144°의 디젤 분사기에 공급하였으며, 고정밀 중량식 연비계(733S, AVL)를 통해 연료소비율을 측정하였다. 천연가스는 고압가스 용기로부터 압력제어밸브를 통해 0.4 MPa로 공급하며, 질량 유량 컨트롤러(F-202AV, Bronkhorst)를 통해 실험 조건에 맞게 유량을 제어하였다. 실린더 내부 압력은 압전 센서(6052C, Kistler)와 흡기압 측정용 압저항센서(4045A5, Kistler)를 통해 측정하였고, 신호 동기화를 위해 로터리 엔코더(E40S, Autonics)를 장착하여 크랭크각을 0.2 Crank Angle Degree(CAD) 단위로 측정하였다. 엔진의 배기 배출물 측정은 성능 엔진 환경에서만 수행되었으며, 배기 가스 분석기(MEXA-7100DEGR, Horiba)를 통해 탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 질소산화물의 농도를 측정하였다. 입자상물질의 배출량은 스모크 미터(415S, AVL)를 사용해 FSN(Filter Smoke Number) 단위로 측정하였다.

상기 단기통 엔진은 가시화 모듈을 장착하여 성능 엔진과 동일한 공기/연료 공급 환경에서 엔진 연소실 내 가시화 실험을 수행할 수 있다. 가시화 모듈은 엔진 헤드와 실린더 블록 사이에 장착되며, 석영 유리창을 포함한 확장 피스톤과 45도 거울을 포함한다. 이를 통해 연

Table 1 Specifications of single-cylinder engine

Item [unit]	Specification
Type	Compression-ignition, four-stroke, single-cylinder
Bore x stroke [mm]	100 × 125
Displacement [liter]	0.982
Compression ratio	17.4:1
Valve type	Overhead valve
Fuel injection equipment	Common-rail direct-injection

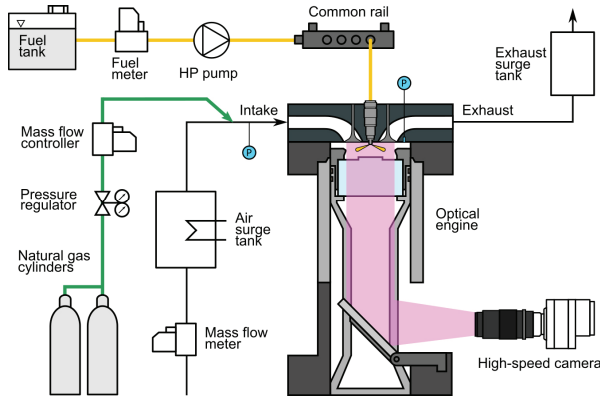


Fig. 2 Schematic of optical engine test

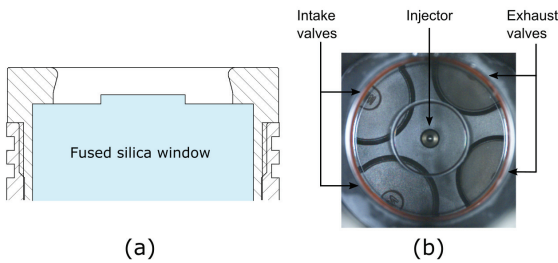


Fig. 3 (a) Optical piston design and (b) field of view

소실 내 발생하는 자연 발광 화염을 수평 방향의 이미징 센서로 취득할 수 있다. Fig. 3은 확장 피스톤의 피스톤 보울 형상과, 상사점에서 촬영한 실린더 내 가시 영역을 나타낸다. 연소 과정 분석을 위해 고속 카메라(Phantom VEO710L, Vision Research)를 사용하였으며, 512×512 픽셀의 영상 해상도에서 초당 10,000 프레임, 50 μs의 셔터 속도로 취득하였다. 이는 본 연구의 실험 조건인 800 rpm의 엔진 속도에서 0.48 CAD마다 영상 취득이 가능한 촬영 속도이다. 영상 취득 시 추가적인 광원은 사용하지 않았다.

2.2 실험 조건

본 연구에서는 이중연료 예혼합압축착화 연소를 구현하기 위해 디젤과 천연가스를 연료로 사용하였다. Table 2는 본연구의 실험 조건을 보여준다. 엔진 속도는 800 rpm으로 고정하였다. 실험 중 흡기 온도와 냉각수 온도는 각각 303 K, 353 K로 제어하였다. 디젤 분사시기의 영향을 조사하기 위해 분사시기(Diesel SOI)는 -20, -10 CAD aTDC로 변경하였고, 디젤 연료의 분사압력은 40 MPa, 천연가스 공급 압력은 0.5 MPa로 고정하였다.

이중연료 연소에서 두 연료의 비율이 연소 과정에 미치는 영향을 분석하기 위해 전체 연료의 공급 에너지를 고정한 상태에서 천연가스 대체율(Natural Gas Substitution

Table 2 Experimental conditions

Parameter [unit]	Value
Engine speed [rpm]	800
Total fuel rate, diesel-equivalent [mg/cycle]	20
Diesel injection pressure [MPa]	40
Diesel SOI [CAD aTDC]	-20, -10
NGSR [%]	20, 40, 60
Intake temperature [K]	303
Coolant temperature [K]	353

Ratio, NGSR)을 20, 40, 60로 변경하는 실험 조건을 수립하였다. 이때 천연가스 대체율은 식 (1)을 통해 연료의 발열량을 기준으로 전체 연료 중 천연가스가 차지하는 비율을 계산하였다.

$$NGSR [\%] = \frac{\dot{m}}{m_{NG}LHV_{NG} + m_D LHV_D} \times 100 \quad (1)$$

where  $\dot{m}$  : mass flow rate (kg/h)

$LHV$  : lower heating value (MJ/kg)

3. 결과 및 분석

3.1 천연가스 대체율 변화 시 연소 과정 분석

이중연료 예혼합압축착화 연소에서 두 연료의 공급 비율이 연소 현상에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에서 디젤 연료의 분사시기는 -10 CAD aTDC로 고정하였으며, 천연가스 대체율을 20, 40, 60 %로 변경하였다.

Fig. 4는 상기 실험 조건에서의 연소 가시화를 통해 취득한 자연발광 화염 이미지를 나타낸다. 상기 이미지는 -0.88 CAD aTDC 기준 매 0.48 CAD 간격으로 동기화되어 9장의 이미지를 순차적으로 나열하였다. 모든 이미지에서 흰색 실선으로 가시영역을 표시하였으며, 각 실험 조건의 첫 번째 이미지에는 흰색 실선으로 실린더 내 가시 영역 중 밸브와 연료분사기의 위치를 표시하였다. 먼저 천연가스 대체율 20 % 조건에서는 일반 디젤 연소와 유사한 형태로 디젤 분무 미립화에 의한 확산 화염이 지배적인 형태를 확인할 수 있다. 그러나 일반 디젤 연소와 달리 휘염이 발생하는 동시에 그 주변에 푸른색의 예혼합 화염이 지속적으로 발생하는데, 이는 천연가스가 공기와 예혼합된 상태로 연소실 전체에 분포한 뒤 미립화된 디젤과 가연 혼합기를 형성하여 자착화 및 화염 전파가 발생한 것으로 판단된다.

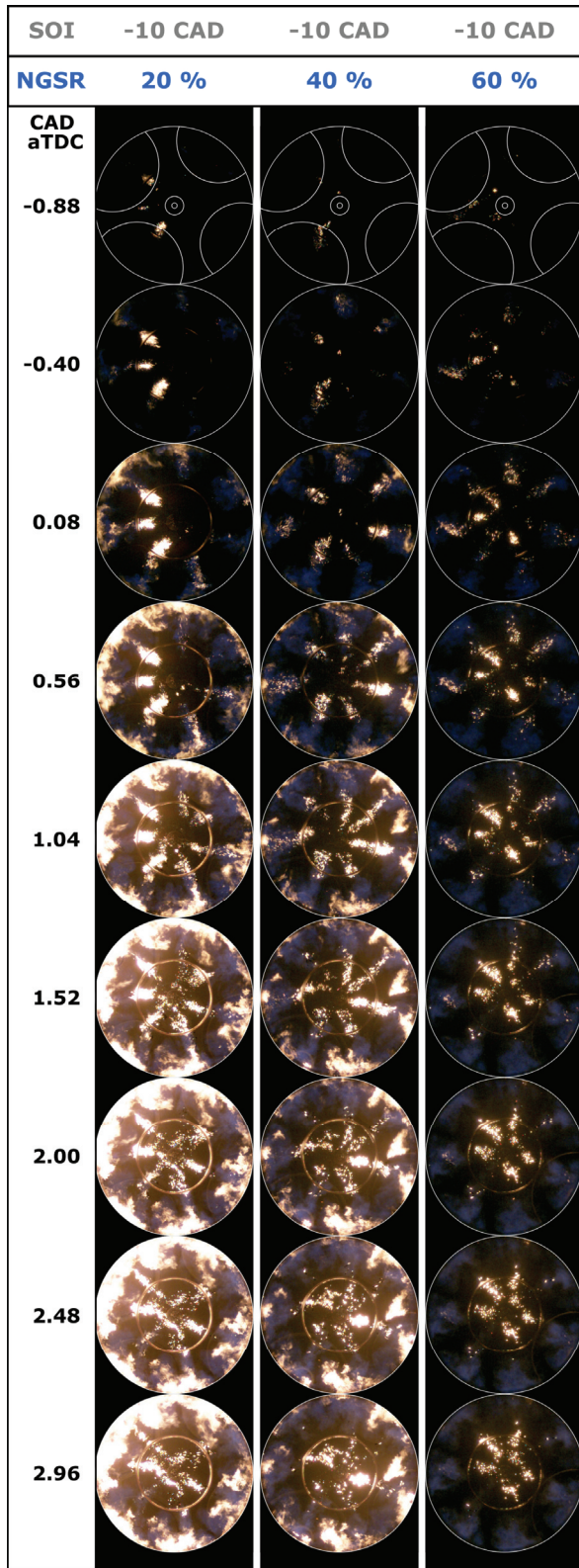


Fig. 4 Natural luminosity flame images of CNG/diesel dual-fuel PCCI combustion with respect to natural gas substitution ratio

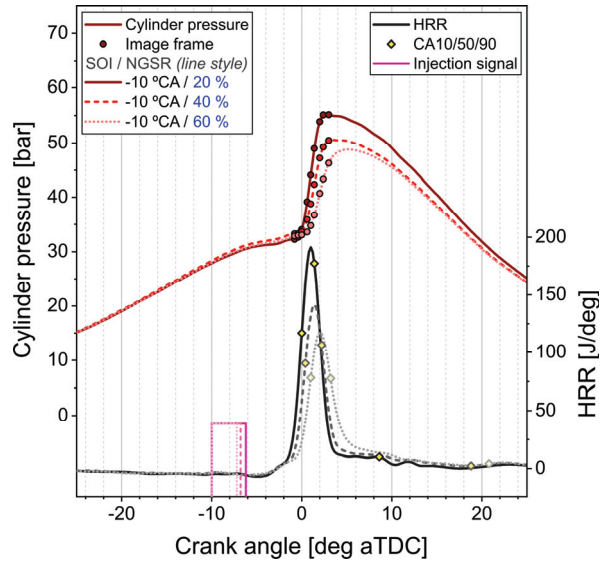


Fig. 5 Cylinder pressure and heat release rate with respect to natural gas substitution ratio

천연가스 대체율을 20 %에서 40, 60 %로 증가함에 따라 초기 화염의 발달 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고반응성 연료인 디젤 분사량이 감소하고 착화 저항성이 높은 천연가스 비율이 증가한 것에 기인한다. 또한 디젤 분사량이 감소하면서 확산 연소에 의한 회염 발생이 확연히 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 특히 천연가스 대체율 60 % 조건에서는 디젤 분무가 형성되는 방향에 따라 청염이 발생하고 전파되는 특징을 확인하였다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 단일 연소 사이클에서 측정된 실린더 압력(Cylinder pressure)과 이를 통해 계산한 열방출률(Heat Release Rate, HRR)을 크랭크각에 따라 도시한 결과를 나타낸다. 각 화염 이미지에 해당하는 크랭크각 위치를 실린더 압력 곡선 상에 기호로 표시하였고, 연소율(Burn rate) 분석에 의한 연소상 지표인 CA10, CA50, CA90을 열방출률 곡선 상에 기호로 표시하였다.

먼저, 천연가스 대체율 증가 시 최대 연소 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연소실 내 전체적인 당량비가 낮은 환경에서 고반응성 연료인 디젤의 비율이 감소한 것이 원인으로, 결과적으로 운전 부하가 감소하는 결과를 나타냈다. 또한 천연가스 대체율이 증가할수록 연소 시작(CA10)과 연소상(CA50), 그리고 연소 종료(CA90)이 모두 지각되는 경향을 확인할 수 있다. 이는 착화 저항성이 높은 천연가스 비율 증가에 의해 혼합기의 점화지연(Ignition delay)이 증가하는 것에 기인한다.

### 3.2 디젤 분사시기 변화 시 연소 과정 분석

이종연료 예혼합압축착화 연소에서 고반응성 연료인 디젤의 분사시기가 연소 현상에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에서 천연가스 대체율은 20 %로 고정하였으며, 디젤 분사시기를 -20, -10 CAD aTDC로 변경하였다.

Fig. 6은 상기 실험 조건에서의 연소 가시화를 통해 취득한 자연발광 화염 이미지를 나타낸다. 상기 이미지는 화염 신호가 확인된 첫 번째 이미지부터 매 0.48 CAD 간격으로 9장의 이미지를 순차적으로 나열한 것으로, 분사시기가 상이한 관계로 크랭크각 단위로 동기화되지 않았다.

디젤 분사시기 -10 CAD aTDC 조건에서 이종연료 예혼합압축착화 연소는 3.1절에서 분석한 바와 같이 노란 빛의 휘염이 지배적이며 디젤 분무에 의한 확산 화염이 분무 방향에 따라 발달하는 특징을 가진다. 반면 -20 CAD aTDC로 디젤 분사시기를 진각한 경우, 동일한 천연가스 대체율에도 불구하고 이전 조건과 달리 청염이 매우 지배적으로 발생하여 휘염 영역이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 분사시기 진각 시 초기 화염이 피스톤 보울 바깥 영역에서 형성되어 보울 중심을 향해 빠르게 전파되며 넓은 영역에 청염이 분포하는 현상을 보인다. 이러한 형태의 연소 과정은 분사시기가 상사점에서 멀어지면서 연소실 내 온도와 압력이 비교적 낮아 자착화 발생 전 연료 분사가 종료되고, 길어진 점화지연 기간 동안 분무 말단부터 가연 혼합기를 형성하여 자착화 및 화염전파가 내부를 향해 진행되는 과정으로 해석할 수 있다. 흡기 중 공급된 천연가스와 공기의 예혼합기가 기저 당량비를 높임으로써, 다단 분사를 적용한 단일연료 예혼합압축착화 연소 과정과 유사한 양상을 보인다.

Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 단일 연소 사이클에서 측정된 실린더 압력과 열방출률을 크랭크각에 따라 도시한 결과를 나타낸다. Fig. 5와 동일한 방식으로 각 이미지의 크랭크각 위치와 연소상 지표를 그래프 상에 표시하였다.

연소 압력 분석 결과, 동일한 연료량 조건에서 분사시기 진각 시 최대 연소압과 최대압력상승률(Maximum Pressure Rise Rate, MPRR)이 모두 증가하는 것을 확인하였다. 이는 화염 가시화 결과에서 분석한 바와 같이 초기 화염 발달 과정에서 연쇄적인 자착화 반응 및 화염 전파에 의해 열방출이 발생한 것의 결과로 해석할 수 있다. 또한 열방출 해석 결과 점화지연이 -10 CAD aTDC 분사시기 조건 대비 2.6 CAD 증가한 것을 정량적으로 확인하였으며, 이는 화염 가시화 결과의 분석과 일치한다.

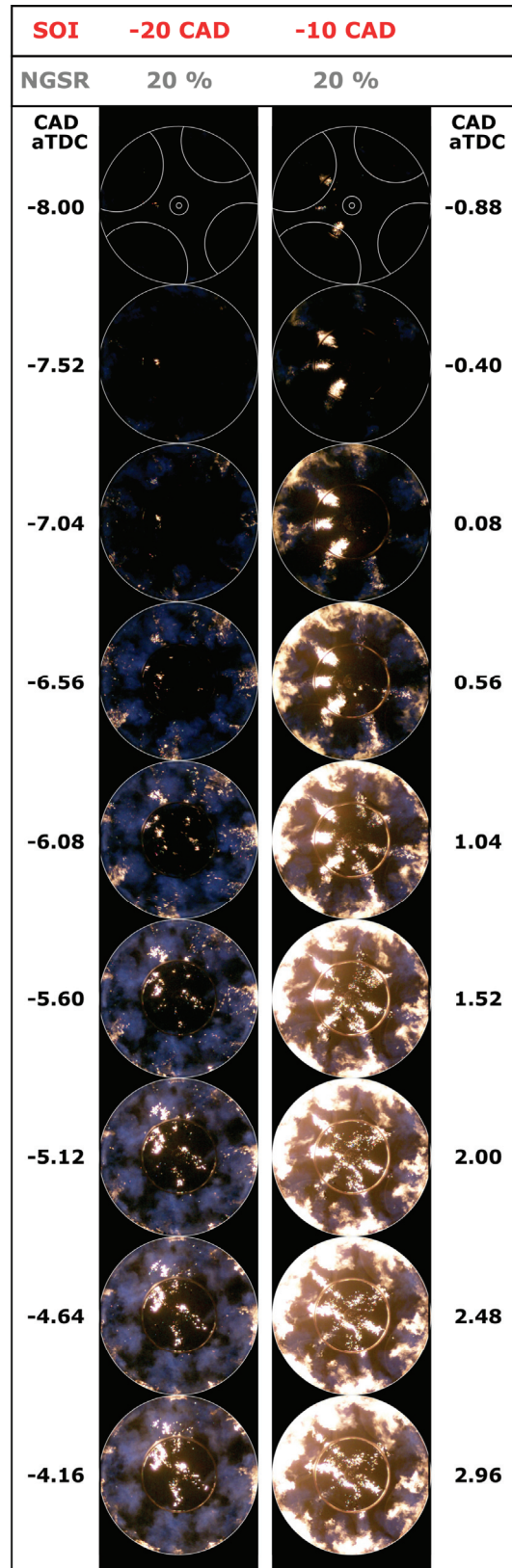


Fig. 6 Natural luminosity flame images with respect to diesel injection timing

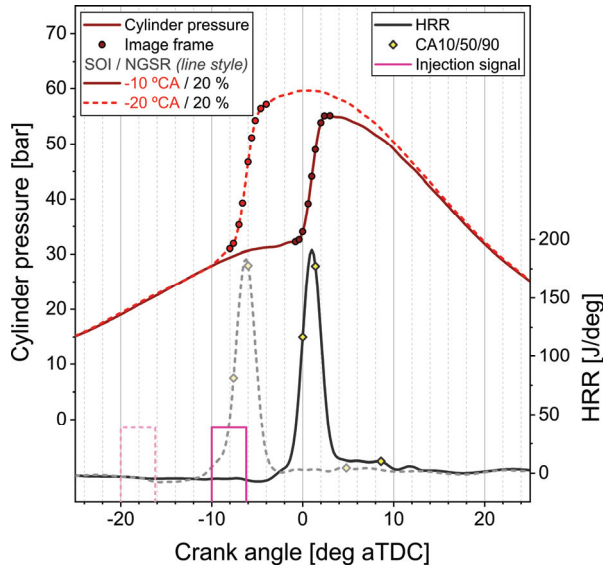


Fig. 7 Cylinder pressure and heat release rate with respect to diesel injection timing

### 3.3 배기 배출 특성 분석

Fig. 8은 천연가스/디젤 이중연료 예혼합압축착화 연소에서 발생하는 엔진 배기 배출량을 나타낸다. 상기 도표의 배기 배출량은 성능 엔진 환경에서 각 실험 조건 당 300 사이클 간 측정된 배기 배출물의 평균 농도를 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure, IMEP)으로 나눈 값으로 계산하였다. 배기 배출물의 배출량이 상이하여 한 도표에 도시하기 위해 특정 배출물의 경우 표기한 계수를 곱하여 표현하였다.

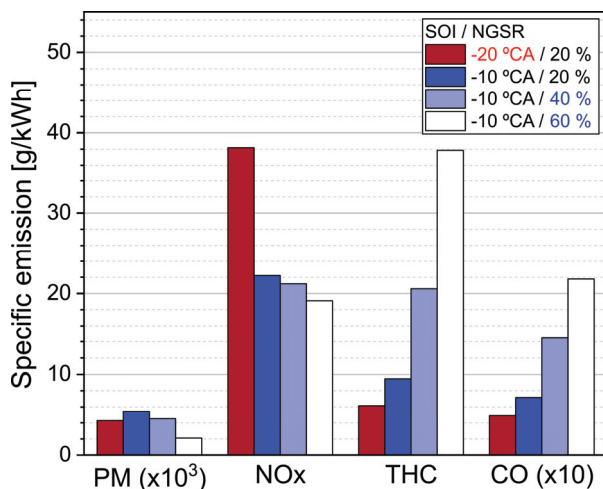


Fig. 8 Pollutant emissions of CNG/diesel dual-fuel PCCI combustion under different mixture formation conditions

입자상 물질의 경우, 모든 실험 조건에서 현행 Euro VI의 규제치인 0.01 g/kWh보다 낮은 배출량을 기록하였다. 저부하 실험 조건 상 공기과잉률이 높아 연소 과정 중 발생한 입자상 물질의 산화가 원활한 것의 결과로 해석할 수 있다. 연료 공급 조건으로 보면 천연가스 대체율이 증가하거나 디젤 분사시기를 전각한 경우 입자상 물질 배출이 감소하였는데, 이는 화염 가시화 결과에서 휘염이 감소하는 경향과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

질소산화물 배출은 모든 실험 조건에서 현행 규제치를 상회하였는데, 이것은 실제 배출 농도는 매우 낮지만 부하가 저조한 조건에서 환산한 결과로 해석할 수 있다. 엔진 연소 시 질소산화물 배출은 Zeldovich 메커니즘 상 실린더 내 연소온도의 함수로 설명할 수 있으며, 실험 결과의 배출 특성은 Fig. 5와 Fig. 7에서 나타난 최대연소압력 및 최대압력상승률 경향과 일치함을 확인하였다.

미연 탄화수소와 일산화탄소 배출은 연소효율을 대변하는 배기 배출 지표로써, 특히 천연가스/디젤 이중연료 엔진 운전의 주요 제한 요소로 알려져 있다.<sup>24)</sup> 특히 탄화수소의 경우, 연소에 참여하지 못하는 천연가스의 직접적인 배출에 크게 기인하며, 메탄이 전체 탄화수소 배출의 약 60~80%를 차지하는 특성을 갖는다.<sup>26)</sup> 고정된 디젤 분사시기(-10 CAD aTDC)에서 천연가스 대체율을 증가시킨 경우 탄화수소와 일산화탄소 배출이 급격히 증가하는 양상을 보인다. 이는 고반응성 연료인 디젤 분사량이 감소하여 연소실 내 반응성 저하에 의해 불완전 연소 비율이 증가하는 현상과, 예혼합기에 존재하는 천연가스가 연소에 참여하지 못하고 그대로 배출되는 현상으로 설명할 수 있다. 반면 고정된 천연가스 대체율(20%)에서 디젤 분사시기를 전각시킨 경우 탄화수소와 일산화탄소 배출이 모두 감소한 것은 이른 분사에 의해 피스톤 스쿠지 영역의 반응성이 증가하고 보울 영역 내 화염 전파에 의한 천연가스 산화가 촉진된 것으로 설명할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 1리터급 가시화 압축착화 엔진에서 천연가스/디젤 이중연료 예혼합압축착화 연소의 화염 발달 과정과 배기 배출 특성을 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이중연료 혼합기 형성 전략의 영향을 조사하기 위해 디젤 분사시기와 천연가스 대체율을 변화하여 실험을 수행하였다.

- 1) 동일한 디젤 분사시기(-10 CAD aTDC)에서 천연가스 대체율 증가 시 초기 화염 성장 속도가 감소하였다. 이는 연소율 분석 결과 점화 지연이 증가한 결과와

일치하며, 고반응성 연료량 저하에 의한 반응성 악화의 영향으로 해석할 수 있다.

- 2) 또한 천연가스 대체율 증가 시 입자상 물질 생성에 의한 휘염의 영역이 감소하고, 대신 예혼합 연소에 의한 청염 영역이 증가하는 것을 확인하였다.
- 3) 동일한 천연가스 대체율(20%)에서 디젤 분사시기를 진각할 경우 초기 화염 성장의 공간적 위치가 피스톤 보울 바깥 영역으로 이동하며, 예혼합 화염이 실린더 중심부를 향해 빠른 속도로 전파하는 양상을 확인하였다. 이는 분사시기 진각에 의해 점화지연이 증가하여 형성된 고반응성 연료의 당량비 구배를 따라 연쇄적인 자작화 반응과 화염 전파가 발생하는 것으로 해석할 수 있다.
- 4) 배기 배출물 측정 결과, 입자상 물질 배출은 화염 가시화 결과 휘염 발생 정도와 일치된 경향을 보이며, 질소산화물 배출은 압력상승률과 상관성을 보였다. 불완전 연소에 의한 탄화수소 및 일산화탄소 배출은 천연가스 대체율이 증가할수록 악화되는 경향을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project(글로벌탑 저배기/저탄소 자동차 신연소 원천기술 개발, 20160020001) 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- 1) European Automobile Manufacturers Association (ACEA), The Automobile Industry Pocket Guide 2019/2020, 2020.
- 2) International Energy Agency (IEA), The Future of Trucks – Implications for Energy and the Environment, 2017.
- 3) R. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler, S. Kokjohn, Y. Moriyoshi, A. Agarwal, D. Arcoumanis, D. Assanis, C. Bae, K. Boulouchos, M. Canakci, S. Curran, I. Denbratt, M. Gavaises, M. Guenther, C. Hasse, Z. Huang, T. Ishiyama, B. Johansson, T. Johnson, G. Kalghatgi, M. Koike, S. Kong, A. Leipertz, P. Miles, R. Novella, A. Onorati, M. Richter, S. Shuai, D. Siebers, W. Su, M. Trujillo, N. Uchida, B. Vaglieco, R. Wagner and H. Zhao, “IJER Editorial: The Future of the Internal Combustion Engine,” International Journal of Engine Research, Vol.21, pp.3-10, 2020.
- 4) K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki and

- A. M. Dean, “Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature,” SAE 2001-01-0655, 2001.
- 5) S. Saxena and I. Bedoya, “Fundamental Phenomena Affecting Low Temperature Combustion and HCCI Engines, High Load Limits and Strategies for Extending These Limits,” Progress of Energy and Combustion Science, Vol.39, No.5, pp.457-488, 2013.
- 6) A. K. Agarwal, A. P. Singh and R. K. Maurya, “Evolution, Challenges and Path Forward for Low Temperature Combustion Engines,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol.61, pp.1-56, 2017.
- 7) 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.
- 8) H. Park, E. Shim and C. Bae, “Improvement of Combustion and Emissions with Exhaust Gas Recirculation in a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Premixed Charge Compression Ignition Engine at Low Load Operations,” Fuel, Vol.235, pp.763-774, 2019.
- 9) G. A. Karim, “Combustion in Gas Fueled Compression: Ignition Engines of the Dual Fuel Type,” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.125, No.3, pp.827-836, 2003.
- 10) R. G. Papagiannakis and D. T. Hontalas, “Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine,” Applied Thermal Engineering, Vol.23, No.3, pp.353-365, 2003.
- 11) M. J. Kim, J. H. Lim, K. Y. Kang and S. H. Lee, “A Study on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Premixed Gasoline/Pilot Diesel,” Transactions of KSAE, Vol.25, No.3, pp.326-335, 2017.
- 12) R. D. Reitz and G. Duraisamy, “Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines,” Progress of Energy and Combustion Science, Vol.46, pp.12-71, 2015.
- 13) E. Ansari, M. Shahbakhti and J. Naber, “Optimization of Performance and Operational Cost for a Dual Mode Diesel-Natural gas RCCI and Diesel Combustion Engine,” Applied Energy, Vol.231, pp.549-561, 2018.
- 14) S. L. Kokjohn, R. M. Hanson, D. A. Splitter and R. D. Reitz, “Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI): A Pathway to Controlled



- High-Efficiency Clean Combustion,” *International Journal of Engine Research*, Vol.12, No.3, pp.209-226, 2011.
- 15) J. Kang, S. Chu, J. Lee, G. Kim and K. Min, “Effect of Operating Parameters on Diesel/Propane Dual Fuel Premixed Compression Ignition in a Diesel Engine,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.19, No.1, pp.27-35, 2018.
  - 16) H. Park, E. Shim and C. Bae, “Expansion of Low-Load Operating Range by Mixture Stratification in a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Premixed Charge Compression Ignition Engine,” *Energy Conversion and Management*, Vol.194, pp.186-198, 2019.
  - 17) S. Kokjohn, R. Hanson, D. Splitter and R. Reitz, “Experiments and Modeling of Dual-Fuel HCCI and PCCI Combustion Using In-Cylinder Fuel Blending,” *SAE International Journal of Engines*, Vol.2, No.2, pp.24-39, 2010.
  - 18) D. Nieman, A. Dempsey and R. Reitz, “Heavy-Duty RCCI Operation Using Natural Gas and Diesel,” *SAE International Journal of Engines*, Vol.5, No.2, pp.270-285, 2012.
  - 19) A. Yousefi, M. Birouk and H. Guo, “An Experimental and Numerical Study of the Effect of Diesel Injection Timing on Natural Gas/Diesel Dual-Fuel Combustion at Low Load,” *Fuel*, Vol.203, pp.642-657, 2017.
  - 20) A. A. M. M. Ali, K. Ali, C. Kim, Y. Lee, S. Oh and K. Kim, “Numerical Study of the Combustion Characteristics in a Syngas-Diesel Dual-Fuel Engine under Lean Condition,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.20, No.5, pp.933-942, 2019.
  - 21) C. Aksu, N. Kawahara, K. Tsuboi, M. Kondo and E. Tomita, “Extension of PREMIER Combustion Operation Range Using Split Micro Pilot Fuel Injection in a Dual Fuel Natural Gas Compression Ignition Engine: A Performance-Based and Visual Investigation,” *Fuel*, Vol.185, pp.243-253, 2016.
  - 22) Z. Ahmad, O. Kaario, C. Qiang, V. Vuorinen and M. Larmi, “A Parametric Investigation of Diesel/Methane Dual-Fuel Combustion Progression/Stages in a Heavy-Duty Optical Engine,” *Applied Energy*, Vol.251, Paper No.113191, 2019.
  - 23) J. Rochussen and P. Kirchen, “Characterization of Reaction Zone Growth in an Optically Accessible Heavy-Duty Diesel/Methane Dual-Fuel Engine,” *International Journal of Engine Research*, Vol.20, No.5, pp.483-500, 2019.
  - 24) E. Shim, H. Park and C. Bae, “Intake Air Strategy for Low HC and CO Emissions in Dual-Fuel (CNG-Diesel) Premixed Charge Compression Ignition Engine,” *Applied Energy*, Vol.225, pp.1068-1077, 2018.
  - 25) W. Kim, H. Kim and C. Bae, “Investigation of CNG/Diesel Dual-Fuel PCCI Combustion in a 1.0 Liter Optically Accessible CI Engine,” *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.126-127, 2020.
  - 26) W. Kim, Y. Na and C. Bae, “Mixture Formation Strategies for Diesel/Natural Gas PCCI Engine Under Various Load Conditions,” *KSAE Fall Conference Proceedings*, p.225, 2019.