



천연가스-디젤 혼소 엔진의 50% 부하 조건에서 제동효율 및 연소안정성 개선을 위한 디젤 분무 특성 평가

오세철 · 오준호* · 장형준 · 이정우** · 이석환 · 이선엽 · †김창기
한국기계연구원 그린동력연구실, *전북대학교 기계시스템공학부 석사과정,
**전북대학교 기계시스템공학부 교수
(2022년 4월 1일 접수, 2022년 6월 8일 수정, 2022년 6월 9일 채택)

Investigation on Diesel Injection Characteristics of Natural Gas-Diesel Dual Fuel Engine for Stable Combustion and Efficiency Improvement Under 50% Load Condition

Sechul Oh · Junho Oh* · Hyungjun Jang · Jeongwoo Lee*
Seokhwan Lee · Sunyoup Lee · †Changgi Kim

*Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials,
Daejeon 34103, Republic of Korea*

**Dept. of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University,
Jeonju 54896, Republic of Korea*

(Received April 11, 2022; Revised April 20, 2022; Accepted April 28, 2022)

요약

디젤엔진의 배출물 개선을 위해 탄소수가 낮은 천연가스를 혼합하여 사용하는 천연가스-디젤 혼소 연소가 각광받고 있다. 특히 자발화 특성에 차이가 있는 디젤과 천연가스의 특성을 이용한 반응성 제어 압축착화(reactivity controlled compression ignition, RCCI) 연소 전략을 통해 기존 디젤엔진의 효율과 배출가스를 동시에 개선시키는 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 상사점보다 앞당겨진 디젤 직접 분사시기 적용을 통해 실린더 전체 영역의 균일 혼합기를 형성하여 전체적으로 희박한 자발화 기반 연소를 달성함으로써 질소산화물(NOx) 및 입자상물질(PM) 저감과 제동열효율 개선을 동시에 달성할 수 있다. 하지만 매우 희박한 저부하 영역에서 불완전 연소량이 증가하는 단점이 존재하며, 안정적인 연소 구현을 위해 디젤 분사시기가 민감하게 제어되어야 하는 어려움도 존재한다.

본 연구에서는 앞서 언급된 저부하 영역에서의 천연가스-디젤 혼소 엔진의 효율 및 배기 개선을 확인하고, 동시에 발전용 엔진 구동 영역에서 디젤 분사시기에 따른 연소안정성을 평가하였다. 실험에는 6 L급 상용 디젤 엔진이 사용되었으며, 1,800 rpm, 50% 부하 영역(~50 kW)에서 실험이 진행되었다. 제동효율 및 연소안정성을 개선하기 위한 전략으로 분무 패턴이 다른 2개의 인젝터를 적용하였으며, 천연가스/디젤 비율과 디젤 분사시기를 바꿔가면서 실험이 진행되었다. 실험 결과, 협각 분사가 추가된 수정 인젝터에서 제동 열효율이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 연소안정성 및 출력, 그리고 강화된 배기 규제를 고려하였을 때 수정 인젝터의 분무 패턴이 예혼합연소 형성에 적합하였고 이를 통해 질소산화물 배출량을 Tier-V 기준치인 0.4 g/kWh 이하로 저감함으로써 RCCI 연소 가능 영역을 확장할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Abstract - In order to improve the emission of diesel engines, natural gas-diesel dual fuel combustion compression ignition engines are in the spotlight. In particular, a reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion strategy is investigated comprehensively due to its possibility to improve both efficiency and emissions. With advanced diesel direct injection timing earlier than TDC, it achieves spontaneous reaction

†Corresponding author:cgkim@kimm.re.kr

with overall lean mixture from a homogeneous mixture in the entire cylinder area, reducing nitrogen oxides (NOx) and particulate matter (PM) and improving braking heat efficiency at the same time. However, there is a disadvantage in that the amount of incomplete combustion increases in a low load region with a relatively small amount of fuel-air. To solve this, sensitive control according to the diesel injection timing and fuel ratio is required.

In this study, experiments were conducted to improve efficiency and exhaust emissions of the natural gas-diesel dual fuel engine at low load, and evaluate combustion stability according to the diesel injection timing at the operation point for power generation. A 6 L-class commercial diesel engine was used for the experiment which was conducted under a 50% load range (~50 kW) at 1,800 rpm. Two injectors with different spray patterns were applied to the experiment, and the fraction of natural gas and diesel injection timing were selected as main parameters. Based on the experimental results, it was confirmed that the brake thermal efficiency increased by up to 1.3%p in the modified injector with the narrow-angle injection added. In addition, the spray pattern of the modified injector was suitable for premixed combustion, increasing operable range in consideration of combustion instability, torque reduction, and emissions level under Tier-V level (0.4 g/kWh for NOx).

Key words : Natural gas, Diesel, RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition), Injector

I. 서 론

기후 변화에 대한 선제적인 대응을 위해 다양한 분야에서 연소를 기반으로 하는 동력원에 대한 배기 규제가 강화되고 있다. 차량의 경우 승용차 및 소형 상용차에는 Euro 6 배기규제가 2014년부터 적용되었고, 중형 이상의 상용차에는 Euro 6 규제가 2013년부터 적용되고 있으며 [1], 현재 더욱 강화된 Euro 7 규제에 대한 논의가 진행 중이다 [2]. 선박 분야에서는 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)에서 제 72차 해양환경보호위원회 (Marine Environment Protection Committee, MEPC) 발표한 배기규제를 바탕으로 하여 전체 선박의 연간 온실가스 총 배출량을 2008년 대비 2030년까지는 약 40%, 그리고 2050년까지는 70%까지 줄이는 협약을 채택하였다 [3]. 출력 범위에 따라 다양한 수요처에서 활용되고 있는 디젤연료 기반 압축착화 엔진 또한 이러한 배기 규제에 대응하기 위한 변화가 필요하며, 이를 위해 연료 다양화 [4], 후처리 개선 [5], 신연소 방식 [6] 등의 다양한 전략이 연구되고 있으며 일부 적용되고 있다.

이 중 발전 및 선박 분야에서는 기존의 디젤과 같이 탄소수가 높은 액상 탄화수소계열 연료를 탄소수가 낮은 천연가스로 대체하고자 하는 움직임이 활발하게 이뤄지고 있다. 특히 액화천연가스 (liquefied natural gas, LNG) 저장과 관련된 기술의 발달과 함께 선박 분야에서의 적용이 확대되고 있다. 한편 선박보다 작은 규모의 육상발전 및 차량용 디젤엔진에서도 다양한 대체연료가 고려되고 있다. 주로 기존의 디젤 연료

와 대체연료를 함께 사용하는 혼소 전략이 많이 연구되어 왔으며, 대표적인 대체연료로서 천연가스 [7], 수소 [8] 등이 사용되고 있다.

이와 같이 디젤과 대체연료를 함께 사용하는 혼소 전략은 두 연료의 반응성, 특히 자발화 (spontaneous reaction) 특성이 다른 두 연료를 이용한 반응성 제어 압축착화 (이하 RCCI)와 같은 신연소 전략과 맞물려서 다양한 조합으로 연구되어 왔다. 기존의 상사점 주변에서의 디젤 직접 분사를 통한 확산 화염 기반의 전통적인 디젤 연소 (conventional diesel combustion, CDC)는 운전 조건에 따라 NOx 또는 PM의 과대 배출이라는 뚜렷한 단점을 가지고 있었고, 이를 극복하기 위해 디젤 분사시기를 앞당기는 부분예혼합압축착화 연소 (partially premixed compression ignition, PPCI)가 주목받았으나 연소상의 제어가 어렵다는 단점이 있었다 [9]. RCCI는 이러한 연소상 제어의 어려움을 두 가지 연료의 반응성 차이를 통해 극복하게 되는데, 기본적으로 자발화 반응이 일어나기 어려운 저반응성 연료를 흡기 매니폴드에서 공기와 함께 예혼합하여 실린더로 유입시키고 (분위기 연료), 디젤과 같이 자발화 반응이 일어나기 쉬운 연료를 실린더 내에 직접 분사함으로써 전체적인 연소 현상을 제어하는 것이 주된 방식이라고 할 수 있다. 이를 통해 기존 CDC 및 PPCI와 비교하였을 때 효율과 배기 특성을 동시에 개선할 수 있었다 [10]. 하지만 반응성이 높은 직접 분사 연료의 자발화 시기에 따라 고부하 영역에서 지나치게 높은 연소압 및 연소압력상승률이 형성될 수 있다는 문제점이 존재하였고, 이에 대응하기 위해 압축

비를 낮추거나 피스톤 형상을 변경하는 등의 고부하 영역 확장이 가능한 전략들이 고려되었다 [11]. 한편 저부하 영역에서는 상대적으로 낮은 실린더 혼합기 온도 및 압력으로 인해 실린더 전체에서 예혼합연소가 발생하지 못하게 되고, 이는 squish volume 등의 실린더 내 일부 영역에서의 불완전연소를 유발한다 [12]. 따라서 적절한 혼합기 형성을 위한 하드웨어 변경이나 분사 제어가 필요하다. 관련하여, 협각 분사 전략을 통해 분무 패턴을 개선하는 선행연구가 진행되었으며, 협각 분사를 통해 조기 분사시 발생하는 벽면 분무적침을 줄임으로써 벽면에 묻는 액상 디젤로부터의 pool fire를 제거할 수 있다는 것이 실험적으로 보고되었다 [13]. 저자의 이전 연구에서도 협각 분사를 이용하여 저부하 영역(제동일 30 kW 범위)에서 Non-methane hydrocarbon (NMHC)를 저감하고 제동 효율 증대 및 methane (CH₄) 저감을 통한 global warming potential (GWP) 개선을 진행한 바 있다 [7]. 하지만 고부하 영역 확장이나 연소 안정성 개선 등에 대한 연구는 실험적으로 수행하지 못했으며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

본 연구에서는 천연가스-디젤 혼소엔진에서 디젤 분사시기 제어에 따른 RCCI 연소 안정성을 실험적으로 평가하였다. 발전용 엔진의 주된 운전 조건에 해당하는 1,800 rpm의 엔진 회전수에서 실험을 진행하였으며, 설계점 목표인 최대부하 100 kW의 50%에 준하는 50 kW의 부하 조건에서 디젤 분사시기에 따른 연소 안정성을 다양한 천연가스 분율 조건에서 확인하였다. 또한, 협각 분사 인젝터와 기존 순정 인젝터의 성능 실험 결과도 비교하였다.

III. 실험 장치 구성 및 방법론

본 연구를 진행하기 위한 실험 장비 선정 및 구성에 대한 개략도가 Fig. 1에 제시되어 있다. 실험에는 6 L 급 직렬형 6기통 디젤 압축착화 엔진이 사용되었다 (현대자동차 G엔진). 디젤 연료의 경우 솔레노이드형 직분사 시스템을 통해 최대 1,800 bar 까지 분사가 가능하였으며, 차량용 ECU 이외에 별도의 외부 제어 시스템을 구성하여 분사압, 분사 시기 및 분사 기간 등을 독립적으로 제어하였다. 기존의 디젤 전소 엔진 시스템에 천연가스 공급을 위해 별도의 수정 작업이 진행되었다. 엔진 셀 외부 탱크에 저장된 천연가스는 셀 내부로 공급되는 과정에서 레귤레이터를 통해 8 bar (abs.) 로 감압된 후에 흡기 매니폴드로 직접 공급되었다. 이 과정에서 별도의 mass flow controller (Brooks, SLA) 를 통해 유량을 제어하였다 디젤 및 천연가스의 공급유량은 별도의 코리올리식 질량유량계 (Micro

motion mass flow sensor; Emerson)를 사용하여 실시간으로 측정되었다. 필터를 거쳐 흡기 매니폴드에 공급되는 공기의 유량은 공기유량계 (FLOWSONIX air, AVL)를 사용하여 측정하였으며, 배기 매니폴드에 장착된 광대역 램다센서를 (LA4, ETAS) 통해 공연비 값을 측정하였다. 연소압력은 전체 6개 실린더 중 1번 실린더에서 연소압 센서 ((6052C, Kistler)를 사용하여 측정하였으며, 연소압을 기반으로 한 연소해석 (e.g. 열발생률 계산)을 연소해석기 (DE500, Dewetron)를 사용하여 진행하였다. 이를 통해 최대 연소압이나 열발생률 곡선 형태와 같이 RCCI 연소에서 중요한 변수들을 실험 진행 과정에서 실시간으로 모니터링할 수 있었다. 또한 각 조건 별 연소 해석은 200 개의 연속적인 사이클 평균을 통해 진행되었다. 엔진은 220kW 급 와류 동력계 (Fuchino, ESF-H300)에 체결되었으며, 해당 동력계와 연계된 제어 시스템을 통해 (Dacos,

Table 1. Engine specifications.

Parameters	Specification
Cylinder number [-]	6
Displacement [L]	5.9
Bore x Stroke [mm]	103 x 118
Compression ratio [-]	15 (Bathtub, modified)
Injector spray angle and hole number	150 deg for 8 holes 90 deg for 4 holes
Connecting rod [mm]	200
Maximum power output [kW]	165.4 @ 2,500 rpm (diesel only)
Maximum torque [N·m]	686.0 @ 2,500 rpm (diesel only)

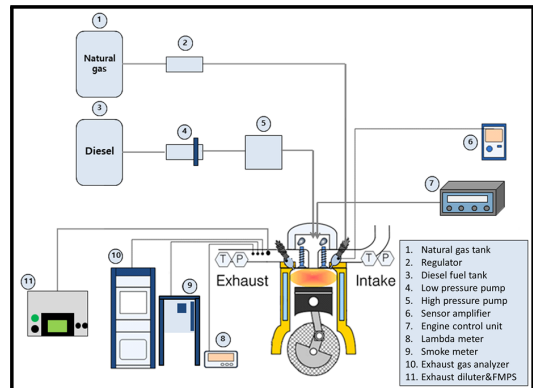


Fig. 1. Experimental configuration.

Table 2. Fuel specifications.

Parameters	Diesel	Natural gas
Composition	C_xH_{2x}	CH ₄ 88.9 vol% C ₂ H ₆ 8.9 vol% C ₃ H ₈ 1.3 vol% (minor species: i-C ₄ H ₁₀ , n-C ₄ H ₁₀ i-C ₅ H ₁₂ , N ₂)
Lower heating value [MJ/kg]	42.5	49.3 (liquid) @ 0 °C, 1 atm
Cetane/Octane number [-]	54 (CN)	120 (RON)
Stoichiometric ratio of AF [wt%]	14.6	17.2

Table 3. Specifications of measuring devices.

Device	Accuracy value
Micro motion mass flow sensor; Emerson (for diesel)	Mass flow accuracy: ±0.15%
SLA; Brooks Instrument K. K (for natural gas)	Mass flow accuracy: ±0.15% +0.2 of full scale
ETAS, LA4	Accuracy: ±0.3 AFR when 12.5 AFR ±0.1 AFR when 14.7 AFR ±0.5 AFR when 23.0 AFR
Kistler, 6052C	Sensitivity: 200 pC/MPa Sensitivity change ≤ ±0.5% Linearity ≤ ±0.3%/FSO
HORIBA, MEXA 7100DEGR	Resolution: 1 ppm
AVL Smokemeter 415-S	Measuring range: 0-10 FSN (filter smoke number) Resolution: 0.001 FSN / 0.01 mg/m ³

Dasan) torque 및 엔진 회전수 제어가 이뤄졌다. 배기 측정의 경우 크게 가스상 배출가스와 검댕 (smoke) 측정이 병렬적으로 진행되었다. 배출가스 분석기 (MEXA 7100-DEGR, HORIBA)를 사용하여 질소산화물, 일산화탄소, 이산화탄소, 미연탄화수소, 산소 및 메탄을 측정하였다. 검댕은 Smoke meter (415-S, AVL)를 사용하여 측정하였다. 엔진과 연료 및 측정 장비들에 대한 자세한 사양은 Table 1, 2, 3 에 각각 제시되어 있다. 디젤-천연가스 RCCI 연소의 경우 조기에 분사된

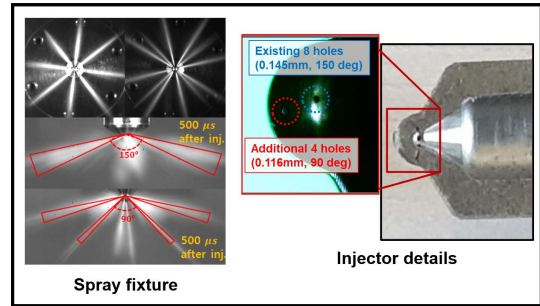


Fig. 2. Details of injector modification.

디젤 분무가 천연가스-공기 혼합기와 충분한 시간 동안 혼합되면서 적절한 시기에 자발화가 이뤄지는 제어가 필요하다. 따라서 디젤 분무가 혼합되는 과정이 활발하게 이뤄질 수 있는 하드웨어 개선이 필요하다. 피스톤 상면을 기존의 상사점 주변 디젤 분무에 적합한 re-entrant 형태에서 squish volume으로의 화염 전파가 용이한 bathtub 형상으로 변경하는 것이 RCCI 연소에 적합하다고 기존 연구에서 보고하였으며 [11], 이를 바탕으로 6개의 실린더에 장착된 피스톤을 혼합기 형성이 용이하도록 압축비를 기존 17:1에서 15:1로 변경한 수정 피스톤으로 교체하였다.

본 연구에서 적용한 수정 인젝터에 대한 자세한 사양이 Fig. 2 에 도시되어 있다. 기존 인젝터의 경우 0.145 mm 의 직경을 가지는 8개의 분사홀이 분사각 150도를 가지도록 대칭 가공되어 있다 (Fig. 2 좌측 분무사진 참고). 하지만 RCCI 연소 구현을 위해 디젤 연료를 조기 분사하는 경우, 해당 시점에 피스톤이 아직 상사점에 도달하지 못하여 실린더 부피가 크고 분위기 압력 및 온도가 낮기 때문에 150도 광각 분사시 분무 통과 거리가 증가하게 되며 이는 벽면 분무침착 현상을 발생시킬 수 있다 [14]. 따라서 분사각을 줄여 피스톤 방향으로 연료가 분사되도록 조정함으로써 천연가스-공기 혼합기와 잘 섞일 수 있는 조건을 만들어야 한다. 이를 위해 기존 인젝터에 Fig. 2 오른쪽 그림과 같이 0.116 mm 직경의 4개의 분사홀을 90도 분사각을 가지도록 추가적으로 가공하였다. 가공 전/후 대기 조건에서의 (25°C, 1 atm) 분사 패턴이 Fig. 2 좌측에 도시되어 있다. 이전 연구에서는 [11] 수정 인젝터를 이용하여 다양한 조건 (e.g. 부하, 천연가스 분율, 엔진 회전수 및 연소 형태)에서 실험을 진행하였고, 저속, 저부하 영역에서의 배기가스 및 효율을 평가하였다 [7]. 본 연구에서는 해당 엔진의 정격 구동 조건인 1,800 rpm (60 Hz), 100 kW의 50% 부하 조건에서 안정적인 연소 영역을 파악하고 효율 및 배기 특성을 파악하는 것을 주된 목표로 설정하였다. 이에 해당되는

Table 4. Operating conditions and emission constraints of experiments.

Parameters	Value
Engine speed [rpm]	1,800
Brake power at MBT [kW]	50
Mass fraction of Natural gas [%]	60, 70, 80, 85
Diesel injection pressure [bar]	1,500
Turbo position [-]	maximum for all conditions
Emission constraints (based on the Tier-V non-road emission regulation [16])	
BSNOx limit [g/kWh]	0.4
BSSmoke limit [mg/kWh]	15

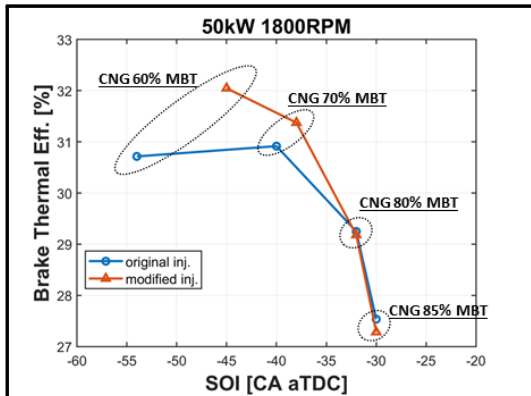


Fig. 3. Brake thermal efficiency according to diesel injection timing and natural gas fraction under 50 kW, 1,800 rpm condition.

실험 조건이 Table 4에 나타나있다. 엔진 회전수는 1,800 rpm으로 고정되었으며, 천연가스 분율과 디젤 분사시기를 주요 변수로 선정하였다. 최대 제동출력을 나타내는 디젤 분사시기 (i.e. maximum brake torque, MBT)에서 50kW 부하가 달성되도록 연료량을 제어하였다. 또한 기존 연구에서 예혼합연소 시 NOx 배출량을 최소화하기 위해서는 공연비를 최대한 희박하게 가져가야 한다는 것을 확인하였기 때문에 [15] 터보 개도량은 모든 조건에서 최대로 설정하였다. 천연가스 분율 및 디젤 분사시기의 작동 영역은 각 실험 조건에서 연소 및 배출가스 성능을 고려하여 결정되었다. 디젤 분사시기의 최대 진각은 smoke 배출량 및

연소안정성을 고려하여 설정하였으며, 최대 진각은 MBT 대비 연소상의 악화로 인한 출력 저감을 고려하여 설정하였다. 또한 천연가스 분율의 경우 85%를 초과하는 조건에서는 연소 불안정성이 높아지기 때문에 60~85%의 범위에서 실험이 진행되었다.

III. 실험 결과 분석

Fig. 3은 50% 부하 조건에서 디젤 분사시기 및 천연가스 분율에 따른 제동 열효율을 나타내고 있다. 천연가스 분율은 60%부터 85%까지 변경하였으며 각 조건에서 디젤 분사시기 (start of injection, SOI)를 바꿔가면서 MBT를 찾았다. 실험 결과 천연가스 분율이 낮은 조건 (< 80%)에서는 수정 인젝터를 적용함에 따라 제동 열효율이 개선되는 효과를 보였다. 천연가스 분율 60%와 70% 조건에서는 수정 인젝터의 MBT 분사시기가 지각되는 경향이 나타났는데, 이는 RCCI 연소를 위한 디젤 연료의 부분혼합 과정에 소요되는 시간이 수정 인젝터에서 더 적게 필요하다는 것을 의미하며, 결국 연료 혼합 및 예혼합연소 측면에서는 수정 인젝터가 더 적합하다는 것을 의미한다. MBT 지점에서의 주요 결과값을 Table 4에 제시하였다.

Fig. 3의 제시된 결과는 각 천연가스 분율 조건에서 미리 진행된 분사시기 sweep 실험을 바탕으로 얻은 MBT 값을 적용한 결과다. Fig. 3에 사용된 MBT 선정 근거를 분사시기 sweep 실험 결과를 통해 제시할 수 있다. 수정 분사기 적용에 따른 분무 패턴 변경 효과는 디젤 분율이 높을수록 두드러지기 때문에 천연가스 분율이 가장 낮은 60% 조건에서 디젤 분사시기에 따른 불완전연소 비율을 Fig. 4에 도시하였다. 실험 결과 불완전연소 비율이 가장 낮은 영역에 실제로 디젤 분사의 MBT가 위치하고 있음을 알 수 있다. 이보다 지각된 분사시기를 가져갈 경우 확산화염이 지배적인 연소로 작용하게 되며 분위기 연료인 천연가스가 squish volume에 존재하게 되면 확산화염이 전파되지 못하여 불완전 연소량이 증가하게 된다. 이는 THC나 CO와 같이 불완전 연소로 발생하는 배출가스의 증가분을 통해 확인할 수 있다. 한편 분사시기를 MBT보다 진각할 경우, 확산화염이 거의 발생하지 않고 디젤 연료가 모두 예혼합연소로 생성되기 때문에 단순 압축일만으로 전체 혼합기의 온도 및 압력이 상승하게 된다. 이로 인해 착화 요인인 디젤 점화지연이 길어지고 이는 전체 연소상의 지각을 야기한다. 흥미로운 점은 이러한 현상이 두 인젝터에 공통적으로 나타났으며 분사시기 최대 진각의 한계점은 서로 다르다는 것이다. 이는 앞서 언급되었듯이 직접 분사연료와 예혼합연료와의 혼합에 수정 인젝터가 더 적합하기 때문에

Table 4. Lambda, exhaust temperature, and exhaust emissions at MBT condition

Parameters (original / modified)	natural gas fraction [%]			
	60	70	80	85
Lambda [-]	2.768 / 2.819	2.774 / 2.731	2.626 / 2.528	2.484 / 2.394
Exhaust Temperature [°C]	323.5 / 319.5	327.5 / 328.7	334.8 / 339.3	339.4 / 340.6
BTHC [g/kWh]	7.07 / 6.61	9.54 / 14.41	25.21 / 27.44	33.40 / 32.73
BCH ₄ [g/kWh]	2.80 / 2.74	6.11 / 10.39	20.51 / 22.24	30.09 / 32.22
BCO [g/kWh]	24.28 / 19.65	22.35 / 14.56	18.37 / 13.13	17.55 / 15.45

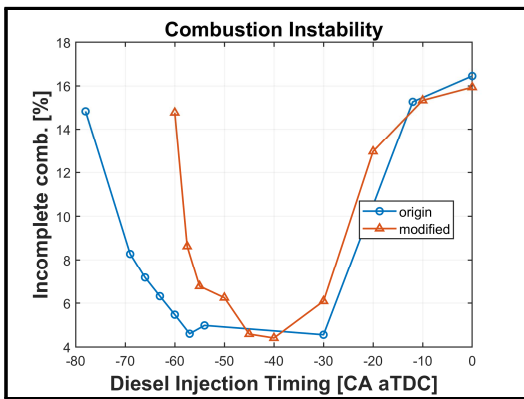


Fig. 4. Incomplete combustion fraction of origin and modified injector according to diesel injection timing under 50 kW, 1,800 rpm and 60% of natural gas fraction condition.

최대 진각 시에 발생하는 불완전연소 현상이 수정 인젝터에서 더 빠르게 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 5는 기존 인젝터에서 60% 천연가스 분율을 사용하는 경우 MBT 조건 (위)과 분사시기 최대 진각 조건 (아래)에서 측정된 개별 사이클의 실린더압을 나타내고 있다. 디젤 분사시기는 다르지만 최대 진각 조건에서 수정 인젝터 또한 유사한 경향을 나타내었다. 실험 결과, 주연소기간인 상사점 직후의 압력선도의 편차가 아래 그래프에서 큰 것을 바탕으로 연소상이 많이 흔들리고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 불완전연소가 특정 사이클에서 급격히 이뤄질 수 있음을 의미

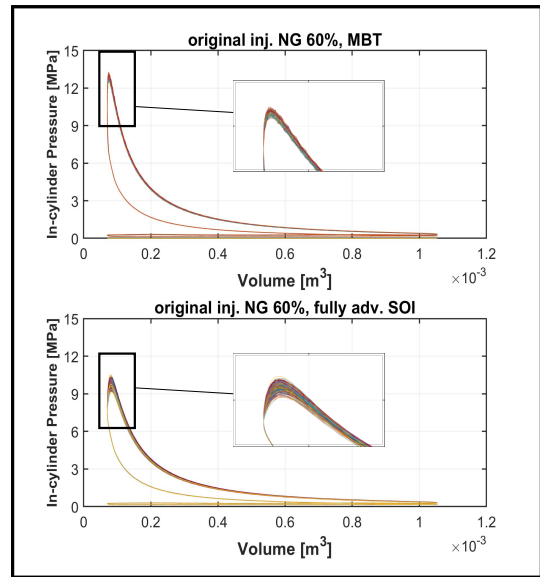


Fig. 5. In-cylinder pressure from individual cycles for two different cases (upper: 60% of natural gas fraction, original injector, MBT / lower: 60% of natural gas fraction, original injector, fully advanced).

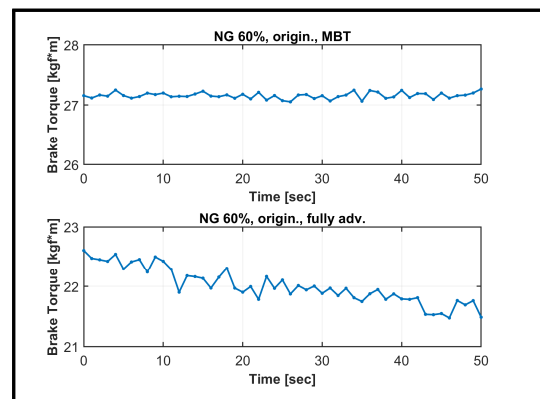


Fig. 6. Brake torque according to operating time for two different cases (upper: 60% NG, original injector, MBT / lower: 60%, original injector, fully advanced).

한다. 해당 조건의 data logging 과정에서 동시에 얻어진 제동 torque 경향이 Fig. 6에 도시되어 있다. 실린더압을 기반으로 한 도시 일 (indicated work)의 이 시간에 따라 저감되며 이로 인해 분사시기 최진각 조건에

서 제동torque가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 지나친 분사시기 전각으로 인해 연료-공기 혼합기의 예혼합연소를 위한 점화지연이 길어지고 이로 인해 불완전연소량이 증가하며, 배기온도 저감 및 터보차징 감소로 인해 흡기 조건이 달라짐에 따라 연소상이 지각되는 현상이 발생하였다. 결과적으로 시간에 따라 제동torque가 계속해서 감소하였기 때문에 해당 조건에서의 data logging 이 불가능하였다.

실제 발전용 엔진 구동 시에는 배기 규제에 의해 운전 가능 영역이 제한될 수 있기 때문에, 앞서 언급된 제동 torque 외에 주요 배기 배출물인 NOx 및 smoke 배출 결과를 함께 고려해야 한다. 이를 위해 실험 조건 중 디젤 분율이 높아 NOx 및 smoke 배출량이 가장 높은 천연가스 분율 60% 조건에서의 배기규제 적용 사례를 Fig. 7에 도시하였다. 해당 그래프의 NOx 및 smoke의 경우 Table 4에 도시된 비도로용 배기규제 Tier-V에 해당하는 규제치가 [16] 적색 점선으로 도시되어 있다. 실험 결과 디젤 분율이 높아 Smoke 배출량이 가장 높을 것으로 예상되는 천연가스 분율 60% 조건에서도 대부분의 영역에서 15 mg/kWh의 규제값 이하로 구동이 가능하였다. -60 CA aTDC 까지 분사시기를 전각하면 수정 인젝터의 경우 smoke 배출량은 증가하지 않았는데, 이는 협각 추가 분사를 통해 디젤 분무가 벽면 침착을 일으키는 현상이 줄어들었음을 의미한다. NOx 배출량의 경우 각 인젝터의 MBT에 해당하는 분사시기 (원본 인젝터: -54 CA aTDC, 수정 인젝터: -45 CA aTDC) 보다 분사가 지각된 경우 NOx 배출량이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 인젝터를 이용한 연소에서 MBT에 해당되는 분사시기에서는 모두 예혼합연소가 주된 연소 모드로 진행되었다. 따라서 Table 4에 정리된 바와 같이 희박한 공연비 값이 실린더 전체에서 균일하게 적용되었기 때문에 연소 과정 중에 발생하는 질소산화물의 배출량은 상당히 적다. 하지만 분사시기가 MBT 보다 지각될수록 실린더 내 온도 압력이 증가한 상황에서 디젤 연료가 분사되고, 이로 인해 확산 화염 형태의 연소가 주된 연소 모드로 진행된다. 이는 실린더 내 연소 현상이 다양한 공연비에서 발생하게 됨을 의미하는데, 확산 화염면에서는 이론공연비에 준하는 연소가 이뤄지고, 여기에 참여하지 않은 연료 중 길어진 점화지연 기간 동안 충분히 혼합된 디젤 연료의 경우 전체 실린더 영역에서 희박 조건 연소가 진행되게 된다. 이로 인해 연소 후 배출가스의 국부적인 온도가 오르게 되며 질소산화물 배출량이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 분무 패턴 개선을 통해 smoke 배출 규제값을 만족할 수 있었으나, 0.4 g/kWh의 NOx 규제의 경우 확산화염이 일정 부분 생성되면 만족하

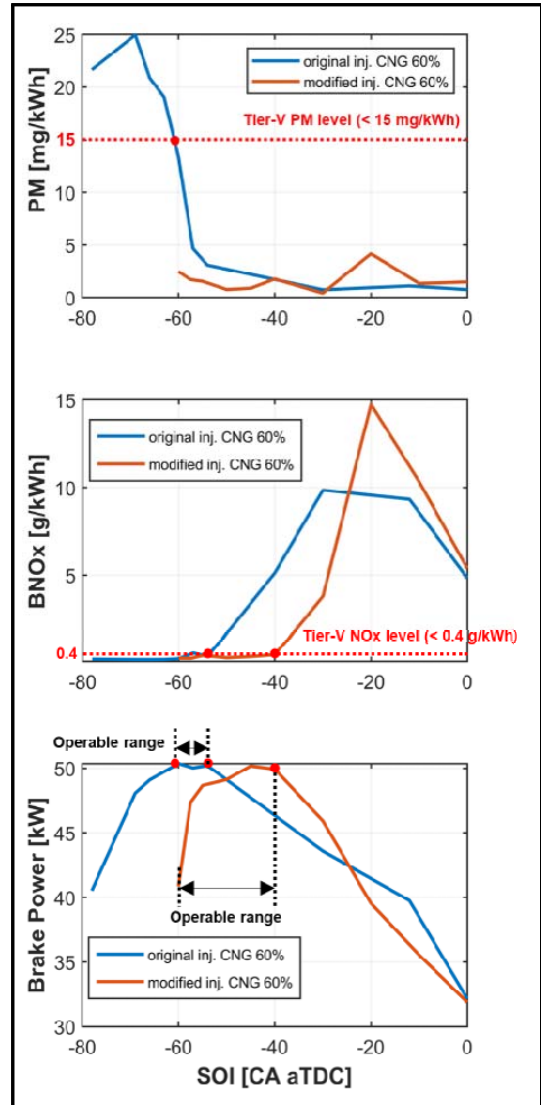


Fig. 7. Determination of the operable range of RCCI combustion equipped with original and modified injector considering the smoke, NOx, and brake torque under 60% of natural gas fraction.

기 어려운 규제치임을 알 수 있다. 출력 범위에 따라 다르지만 0.4 g/kWh의 NOx 배기규제는 대략 수십 ppm 범위의 배출가스 내 NOx 농도에 해당되는 수치이다. 이러한 배기규제와 torque 저하 한계를 동시에 만족하는 영역을 작동 가능 영역 (operable range)으로

Fig. 7 아래 그래프에 표시하였다. 따라서 디젤-천연가스 혼소 시 구동 가능한 영역을 확장하는 과정에서는 강화된 배기 규제중 질소산화물 규제치를 만족하는 것이 가장 중요한 조건임을 알 수 있다. 또한 실린더 내에서 압축과정이 꽤 진행된 이후에 연료를 분사하여도 혼합 과정이 잘 이뤄짐으로써 확산화염이 아닌 예혼합연소가 활발하게 일어날 수 있는 분무 전략을 취하는 것이 배기 규제 대응에 효과적이라고 결론지을 수 있다. 본 연구에서는 협각 분사가 추가된 다중홀 인젝터를 적용함으로써 RCCI 연소가 안정적으로 구동될 수 있는 분사시기 영역을 효과적으로 확장할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 디젤-천연가스 RCCI 연소에서 분무 전략 개선이 구동 영역 확장에 미치는 영향을 50% 이하 구동 조건에서 실험적으로 확인하였다. 해당 연구 내용을 아래와 같이 요약하였다.

1) 기존의 150도의 광각 분사각을 가지는 8홀 원본 인젝터에 90도의 협각 분사각을 가지는 4홀을 추가한 수정 인젝터로 엔진을 구동하는 경우 1,800 rpm, 50 kW (50% 부하조건)에서 최고 효율 조건 (MBT) 에 해당하는 분사시기가 수정 인젝터에서 더 지각되었음을 확인하였다. 이는 협각 분사 4홀이 추가됨으로써 직접 분사된 디젤 연료가 공기와의 혼합이 더 잘 이루어졌기 때문이며, 효율 및 배기 개선이 가능한 디젤 예혼합연소에 수정 인젝터가 더 적합하다는 것을 의미한다.

2) 두 인젝터 모두 분사시기의 최진각 및 최지각 한계점이 형성되는 이유는 동일하였다. 분사시기를 진각할 경우, 확산화염이 거의 발생하지 않기 때문에 엔진 압축일로만 형성된 온도-압력 조건에서 점화 지연이 발생하고 이로 인해 연소상이 지각되어 불완전연소량이 증가하게 된다. 해당 결과는 실린더압의 편차 및 제동torque의 시간에 따른 감소 결과를 통해 확인할 수 있었다.

3) 분사시기를 지각할 경우, 확산화염이 주된 연소모드로 작용하게 되는데 이 과정에서 분위기 연료로 존재하는 천연가스의 불완전 연소가 증가하며, 압축과정에서의 연소 증가로 인한 냉각 손실 증가가 torque 및 효율 저감을 야기하게 되었다.

4) 분사율 개수 증가로 인해 제동torque 곡선상으로는 수정 인젝터의 구동 가능 범위가 좁았으나, 강화된 배기규제를 적용하였을 때에 최종적인 운전 가능 영역은 수정 인젝터가 더 폭넓게 존재함을 확인할 수 있었다. 이는 효율이 높은 MBT 주변 분사시기에서 확산

화염이 일부 발생되었을 때에 급격히 증가하는 NOx 배출량으로 인해 배기규제를 만족하지 못하기 때문인데, 결국 예혼합연소를 형성하기에 적합한 수정 인젝터를 사용하였을 때 강화된 배기규제에 적합한 분무 전략을 실현할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업 중 “세일가스 지상플랜트 청정 모듈화 및 천연가스 활용 기술개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명: 2,100 마력급 LNG-암모니아 혼소 엔진 개발)을 밝힙니다. 실험 진행에 많은 도움을 주신 트리버스 관계자 분들께 감사의 인사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] “Emissions in the automotive sector”, “<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128186>”, European Commission official, 2022년 3월 30일 접속
- [2] “European vehicle emissions standards – Euro 7 for cars, vans, lorries and buses”, “https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses_en”, European Commission official, 2022년 3월 30일 접속
- [3] Greenhouse Gas Emissions n.d. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx>, 2022년 3월 30일 접속.
- [4] Lee, Jeongwoo, et al., “Classification of diesel and gasoline dual-fuel combustion modes by the analysis of heat release rate shapes in a compression ignition engine”, *Fuel*, 209, 587-597, (2017)
- [5] Lee, Hoyeol, Cheon Seog Yoon, and Hongsuk Kim. “A study on reaction rate of solid SCR for NOx reduction of exhaust emissions in diesel engine”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 21(6), 183-194, (2013)
- [6] Kanda, Tomohiro, et al. “PCCI operation with early injection of conventional diesel fuel” *SAE transactions*, 114(3), 584-593, (2005)
- [7] Oh, Junho, et al., “Effect of multi-angle diesel injector nozzle on emission and efficiency of natural

- gas/diesel dual-fuel combustion in compression ignition engine", *Fuel*, 316, 123442, (2022)
- [8] Wang, Ye, et al., A Numerical Investigation of Mixture Formation and Combustion Characteristics of a Hydrogen-Diesel Dual Direct Injection Engine, No. 2021-01-0526. SAE Technical Paper, (2021)
- [9] Tanabe, K., F. Komatsu, and S. Nakayama., "A study on mode transition control between PCI and conventional combustion in a diesel engine", *International Journal of Engine Research*, 12(1), 69-86, (2011)
- [10] Nieman, Derek E., Adam B. Dempsey, and Rolf D. Reitz., "Heavy-duty RCCI operation using natural gas and diesel", *SAE International Journal of Engines*, 5(2), 270-285, (2012)
- [11] Hanson, Reed, et al., "Piston bowl optimization for RCCI combustion in a light-duty multi-cylinder engine", *SAE International Journal of Engines*, 5(2), 286-299, (2012)
- [12] Hanson, Reed, et al., "Fuel effects on reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion at low load", *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 394-411, (2011)
- [13] Walter, Bruno, and Bertrand Gatellier., "Development of the high power NADITM concept using dual mode diesel combustion to achieve zero NOx and particulate emissions", *SAE Transactions*, 779-787, (2002)
- [14] Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York.
- [15] Lee, Sunyoup, et al., "Effects of Overall-equivalence Ratios by Varying Intake Pressures and Exhaust Gas Recirculation Rates on the Natural Gas/Diesel Dual-fuel Combustion at a High Load Condition", *International Journal of Automotive Technology*, 23(1), 149-158, (2022)
- [16] "EUROPEAN STAGE V NON-ROAD EMISSION STANDARDS", 2016년 11월 발간, "https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf", 2022년 3월 30일 접속