

## 디젤 분사방식에 따른 이중연료 엔진의 성능 및 배기 분석

박현욱<sup>\*†</sup> · 이준순<sup>\*</sup> · 오승묵<sup>\*,\*\*</sup> · 김창업<sup>\*</sup> · 이용규<sup>\*,\*\*</sup> · 장형준<sup>\*</sup>

### Analysis on Performance and Emission with Different Diesel Injection Methods in a Dual-Fuel Engine

Hyunwook Park, Junsun Lee, Seungmook Oh, Changup Kim,  
Yonggyu Lee and Hyungjoon Jang

**Key Words:** Dual fuel(이중연료), Natural gas(천연가스), Diesel(디젤), Injection method(분사방식), 연소효율(Combustion efficiency), Methane emission(메탄 배출)

#### Abstract

Performance and emissions with different diesel injection methods were analyzed in a natural gas-diesel, dual-fuel engine under low-load conditions. Natural gas was supplied to intake port during the intake stroke to form a natural gas-air premixed mixture for all methods. Diesel was injected directly into the cylinder during the compression stroke in three ways: early injections, late injections, and a combination of early and late injections. The early injections had the highest thermal efficiency among the three methods owing to its highest combustion efficiency. The wide dispersion of diesel before the combustion initiation also allowed superior emissions characteristics.

#### 1. 서 론

전 세계적으로 온실가스 배출에 대한 관심이 증가하면서 다양한 부문에서 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 노력을 기울이고 있다. 승용 차량 부문에서는 기존 내연기관에서 하이브리드 엔진 또는 리튬이온 배터리를 동력원으로 대체하려는 움직임이 정부 주도 하에 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 상용 차량 및 선박 부문에서는 대체 동력 후보군들의 낮은 가격경쟁력 및 기술 성숙도로 인해, 기존 동력원인 내연기관에 저탄소 또는 무탄소 연료

적용을 검토 중에 있다<sup>(2)</sup>.

천연가스는 대표적인 저탄소 연료로, 기존 석유 기반 연료 대비 이산화탄소 저감이 가능하므로 상용화 단계에서 널리 이용되고 있다<sup>(3)</sup>. 천연가스의 높은 옥탄가는 스파크점화 연소 방식에 매우 적합하나, 해당 연소 엔진의 열효율은 기존 상용 차량 및 선박에 적용 중인 디젤 압축착화 엔진 대비 상당히 낮은 수준이다<sup>(4)</sup>. 따라서 기존 디젤 엔진에 상응하는 열효율을 달성하기 위해서는 천연가스를 압축착화 방식의 이중연료 엔진에 적용하는 것이 유리하다<sup>(5)</sup>. 이중연료는 반응성이 다른 두 연료를 엔진 실린더 내에서 혼합하는 연소 기술이다<sup>(6)</sup>. 천연가스는 주로 흡기행정 중에 흡기포트로 공급되어 천연가스-공기 예혼합기를 형성하고, 디젤은 압축행정 중에 엔진 연소실 내로 직접 분사되어 천연가스-공기 예혼합기의 점화원으로 작용한다<sup>(7)</sup>. 대형트럭에서 천연가스-디젤 이중연료 엔진은 기존 디젤 엔진 대비 이산화탄소 배출을 약 20%까지 저감할 수 있

(Received: 10 Jun 2022, Received in revised form: 22 Jun 2022, Accepted: 23 Jun 2022)

<sup>\*</sup>한국기계연구원 모빌리티동력연구실

<sup>\*\*</sup>과학기술연합대학원대학교 친환경에너지 기계

<sup>†</sup>책임저자, 정회원, 한국기계연구원

E-mail : hwpark@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7177 FAX : (042)868-7305

는 것으로 알려져 있다<sup>(8)</sup>.

디젤의 늦은 분사(pilot dual fuel, Pilot-DF)는 이중연료 연소의 가장 전통적인 방식이다. Pilot-DF모드는 압축행정 말기의 높은 분위기 압력 및 온도 조건에서 디젤을 분사하며, 디젤을 분사하고 짧은 점화지연 이후 연소가 시작되므로, 이중연료 엔진의 연소상 제어에 이점을 갖고 있다<sup>(9)</sup>. 이러한 이점에도 불구하고 Pilot-DF 모드는 디젤 분무가 도달하지 않은 천연가스-공기 혼합기의 낮은 반응성으로 인해 높은 탄화수소 및 일산화탄소 배출의 단점을 지니고 있다<sup>(10)</sup>.

디젤의 이른 분사(reactivity controlled compression ignition, RCCI)는 Pilot-DF 모드의 단점을 해결할 수 있는 연소 방식이다. 디젤의 이른 분사를 통해 긴 점화지연 기간 동안 디젤의 넓은 분포를 통해 천연가스-공기 혼합기의 반응성을 높일 수 있다<sup>(11)</sup>. Park 등은 RCCI 모드의 디젤 분사시기 진각을 통해 탄화수소 및 일산화탄소 배출을 저감할 수 있다고 보고하였다<sup>(12)</sup>. 질소산화물 또한 연료-공기 예혼합기의 낮은 연소온도를 통해 저감 가능하였다. 그러나 RCCI 모드의 자발점화는 연료-공기 혼합기의 화학반응론에 의해 지배되어 연소상 제어에 한계가 있으며, RCCI 모드의 운전영역이 저부하로 제한된다<sup>(13)</sup>. Yousefi 등은 운전부하 증가에 따라 RCCI 모드의 최고압력상승률이 급격히 높아져서 엔진 운전이 불가능하다고 보고하였다<sup>(14)</sup>.

Pilot-DF와 RCCI 모드의 장점만을 취합한 디젤의 늦은 분사와 이른 분사의 혼합(early pilot, E-Pilot) 방식 또한 존재한다. RCCI 모드와 유사한 분사시기를 갖는 E-Pilot 모드의 첫 번째 분사는 디젤의 넓은 분포를 통해 연료-공기 혼합기의 반응성을 높이고, Pilot-DF 모드와 유사한 분사시기를 갖는 E-Pilot 두 번째 분사는 연소상 제어할 수 있다고 알려져 있다<sup>(15)</sup>. Park 등은 RCCI 모드 운전이 불가능한 고부하 운전영역에서 E-Pilot 모드 구현을 통해 Pilot-DF 모드 대비 높은 열효율을 얻을 수 있다고 보고하였다<sup>(16)</sup>.

천연가스-디젤 이중연료 엔진의 상용화를 위해 디젤의 늦은 분사, 이른 분사 및 혼합 방식 등 각각의 연소 모드에 대한 한계점을 극복하기 위한 연구가 상당히 진행되었다. 그러나 이러한 이중연료 모드들의 비교와 관련된 연구는 극소수의 연구자들에 의해 진행되어 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 세 가지 이중연료 모드의 구현이 가능한 저부하 운전영역에서 디젤 분사방식에 따른 이중연료 엔진의 성능 및 배기를 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 조건

### 2.1 실험 장치

본 연구에 적용된 엔진은 11 L급 6기통 디젤 엔진에 천연가스 연료 공급 시스템을 부착하여, 이중연료 연소 방식이 구현되도록 개조한 것이다. 자세한 엔진 제원은 Table 1에 나타내었다. 압축비는 높은 열효율 달성을 위해 베이스 엔진의 압축비와 동일하게 적용하였다. 천연가스는 포트 분사기를 통해 흡기포트로 0.8 MPa의 압력으로 공급되었고, 디젤은 커먼레일 시스템을 통해 고압으로 엔진 실린더 내로 직접 분사되었다. 고부하 엔진 운전을 위해 공기 과급은 wastegate 터보차저를 통해 구현되었다.

Table 2는 본 연구에서 적용된 천연가스와 디젤 연료의 물성치를 나타낸 것이다. 천연가스는 국내 도시가스

Table 1 Engine specifications

Number of cylinders [-]	6
Bore×Stroke [mm]	123×155
Displacement [L]	11.1
Piston geometry [-]	Bathtub
Number of intake valves [-]	2
Number of exhaust valves [-]	2
Diesel injection system	Common-rail (Max. 180 MPa)
Natural gas injection system	Port-injection (0.8 MPa)
Boosting system	Wastegate turbocharger

Table 2 Fuel properties

Fuel	Natural gas	Diesel
Composition [-]	91.3% CH <sub>4</sub> 5.3% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 2.2% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 1.0% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 0.2% N <sub>2</sub>	-
Density @ 273 K [kg/m <sup>3</sup> ]	0.79	838
Stoichiometric air-to-fuel ratio [-]	16.9	14.5
Lower heating value [MJ/kg]	48.8	42.6

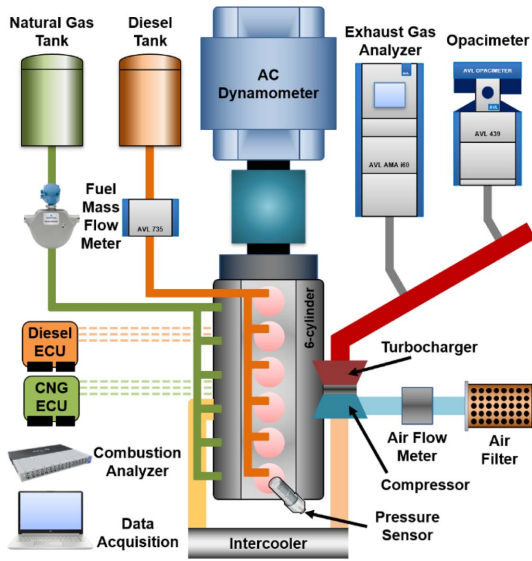


Fig. 1 Schematic diagram of dual-fuel engine setup

를 활용하였고, 메탄의 조성은 91.3% 수준이었다. 디젤은 국내 주유소에서 표준으로 공급하는 것으로 활용하였다.

Figure 1은 본 연구에 적용된 천연가스-디젤 이중연료 엔진 실험의 장치 구성도를 나타낸 것이다. 천연가스는 연료탱크로부터 흡기포트로 공급되었으며, 엔진으로 공급된 천연가스 유량은 Coriolis 방식의 질량 유량계(CMFS025M, Emerson)로 측정하였다. 디젤은 연료탱크로부터 실린더 내로 공급되었으며, 해당 유량 또한 Coriolis 방식의 질량 유량계(735S, AVL)로 측정하였다. 분사시기, 분사량 및 분사압력 등의 주요 연료 공급 변수들은 각각의 engine control unit (ECU)을 통해 제어되었다. 엔진으로 공급된 공기의 질량 유량은 hot-film 방식의 유량계(FMT700-P, ABB)를 통해 측정되었다. 피스톤 압축 및 연소로 인해 변경되는 실린더 압력은 piezo-electric 방식의 압력센서(GU21D, AVL)을 통해 측정하였다. 측정된 압력은 엔코더(ETU-427, AVL)를 통해 0.2 crank angle degree (CAD) 간격으로 연소해석기(X-ion, AVL)로 전송되었다. 엔진 배출가스의 농도는 배기분석기(AMA i60, AVL)를 통해 측정하였다. 입자상물질 배출은 opacimeter (439, AVL)를 통해 extinction coefficient를 측정하여 계산되었다.

## 2.2 실험 조건

Table 3은 본 연구에서 실시한 천연가스-디젤 이중연

Table 3 Experimental conditions

Engine speed [rev/min]	1,200
Engine load [-]	0.6 MPa BMEP
Coolant temperature [K]	363 ± 2
Oil temperature [K]	367 ± 2
Natural gas Substitution rate [%]	80
Diesel injection Pressure [MPa]	80

료 엔진의 실험 조건을 나타낸 것이다. 엔진 속도는 베이스 엔진의 최고토크를 달성하는 1,200 rpm으로 선정하였다. 엔진 부하는 베이스 엔진 최고토크의 25% 지점에 해당되는 0.6 MPa brake mean effective pressure (BMEP)로 선정하였다. 엔진 냉각수 및 오일온도는 표에 나타난 것과 같이 제어하였다. 천연가스 대체율은 전체 연료의 에너지 함량 대비 천연가스 연료의 에너지 함량의 비율로 정의하였다. 대체율의 증가는 엔진 출력의 에너지원으로서 저탄소 연료인 천연가스 비중 증가를 의미하며, 엔진의 이산화탄소 배출 저감에 기여할 수 있다. 본 연구에서 천연가스 대체율은 80%로 선정하였다. 이중연료 엔진의 저부하 운전조건에서 천연가스 대체율 80% 이상으로의 증가는 연소 불안정성으로 인해 운전영역이 매우 좁아서 세 가지 디젤 분사방식에 대한 비교분석이 어려웠다. 디젤 분사압력은 엔진 부하 및 이중연료 연소 특성을 고려하여 80 MPa로 선정하였다.

Figure 2는 본 연구에서 적용된 세 가지 디젤 분사방식을 알아보기 쉽게 표현한 것이다. 모든 방식에서 천연

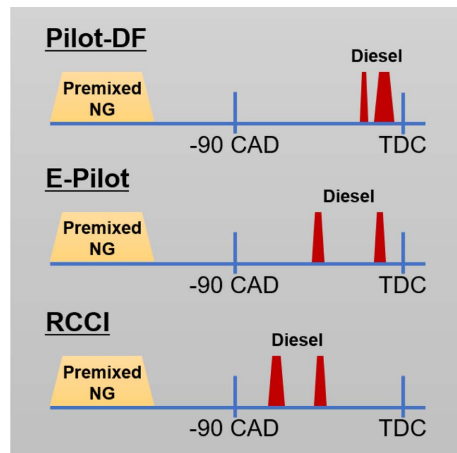


Fig. 2 Diesel injection methods with dual-fuel modes

Table 4 Specific values of diesel injection parameters

Dual-fuel modes	Pilot SOI [CAD]	Main SOI [CAD]	Main mass fraction
Pilot-DF	-28 ~ -20	-22 ~ -14	85%
E-Pilot	-56 ~ -48	-22 ~ -14	40%
RCCI	-84 ~ -72	-54 ~ -42	40%

가스는 흡기행정 에 공급하였다. Pilot-DF 모드는 압축행정 말기에 디젤의 이단분사를 적용하였고, RCCI 모드는 상대적으로 이른 시기에 디젤의 이단분사를 적용하였다. E-Pilot 모드에서 디젤의 파일럿 분사는 RCCI 모드의 분사시기와 유사하게, 메인 분사는 Pilot-DF 모드의 분사시기와 유사하게 실시하였다. 각각의 디젤 분사 방식에서 구체적인 디젤의 파일럿 분사시기, 메인 분사시기 및 전체 분사 대비 메인 분사의 질량분율은 Table 4에 표시하였다. 디젤 메인 분사의 질량분율은 ECU 상의 디젤 파일럿 및 메인 분사량 입력값을 바탕으로 계산하였다. Table 4에 제시된 값은 각각의 이종연료 모드 별로 최고 열효율을 달성할 수 있도록 예비 실험을 통해 선정된 것이다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 디젤 분사방식에 따른 이종연료 엔진 성능 분석

디젤 분사방식에 따른 이종연료 엔진의 성능을 분석하기 위하여 모든 분사방식의 엔진 운전이 가능한 저부하 영역에서 비교분석을 실시하였다.

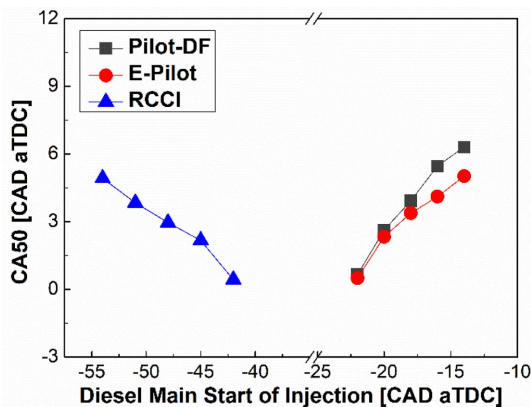


Fig. 3 CA50 of three diesel injection methods according to diesel main start of injection

Figure 3은 디젤 메인 분사시기에 따른 세 가지 디젤 분사방식의 CA50을 나타낸 것이다. CA50은 연소상을 대표하기 위한 하나의 파라미터로서, 이종연료 연소에서 총 열방출의 50%가 발생하는 지점으로 정의하였다<sup>(7)</sup>. Pilot-DF와 E-Pilot 모드에서는 디젤 분사시기 제어와 CA50 제어 방향이 일치한 반면, RCCI 모드에서는 디젤 분사시기 진각에 따라 연소상이 지각하였다. Pilot-DF 모드에서는 디젤이 압축행정 말기에 분사되므로, 높은 분위기 압력 및 온도에서 디젤이 분사되면 짧은 점화지연을 거쳐 연소가 시작되었다<sup>(9)</sup>. 반면에 RCCI 모드에서는 이른 디젤 분사 이후 상당한 점화지연 기간 동안 연료-공기 혼합기의 혼합이 진행되며, 피스톤의 상사점 부근에서 혼합기의 당량비 및 반응성이 높은 지점(디젤이 분사된 영역)으로부터 연소가 발생하였다<sup>(11)</sup>. 따라서 RCCI 모드에서는 디젤 분사시기가 진각된 경우, 디젤이 분사된 지점의 국부 당량비 및 반응성이 낮아지므로 연소상이 지각되었다<sup>(12)</sup>. E-Pilot 모드의 파일럿 디젤이 RCCI 모드와 유사한 지점에서 분사되었음에도 파일럿 디젤로는 연소가 시작되지 않았다. 따라서 Pilot-DF 모드와 같이 메인 디젤 분사시기에 따라 연소상이 제어되었다.

세 가지 디젤 분사방식에서 디젤 분사시기는 CA50이 상사점 이전에 위치하지 않도록 제어하였다. 이는 상사점 이전에 발생하는 연소로 인해 발생하는 음의 일을 감소시키고, 급격한 최고압력상승률의 증가를 막는데 기여하였다. Fig. 4는 CA50에 따른 세 가지 디젤 분사방식의 최고압력상승률을 나타낸 것이다. CA50이 상사점 부근으로 진각할수록 최고압력상승률이 증가하는 경향을 보였다. 실제로 세 가지 모드에서 가장 높은 최고

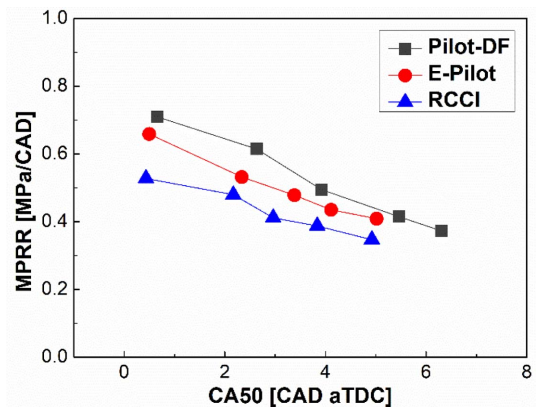


Fig. 4 Maximum pressure rise rate of three diesel injection methods according to CA50

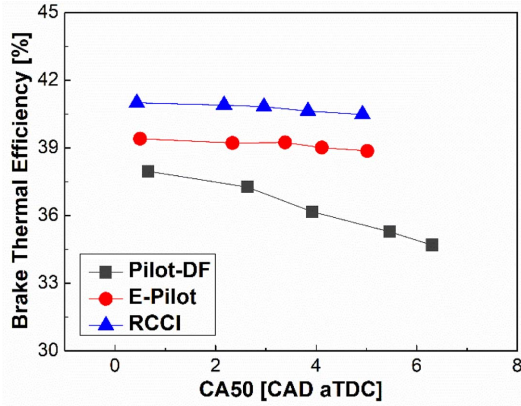


Fig. 5 Brake thermal efficiency of three diesel injection methods according to CA50

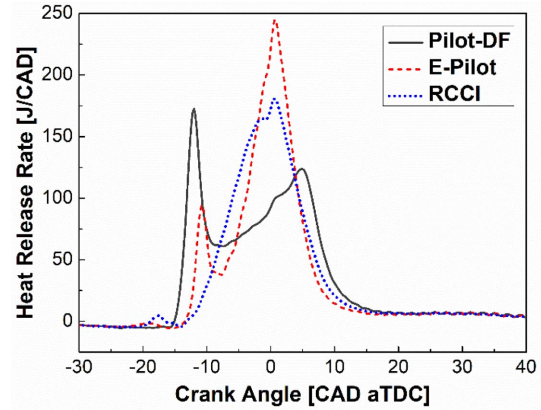


Fig. 7 Heat release rate of three diesel injection methods at an optimal point for brake thermal efficiency

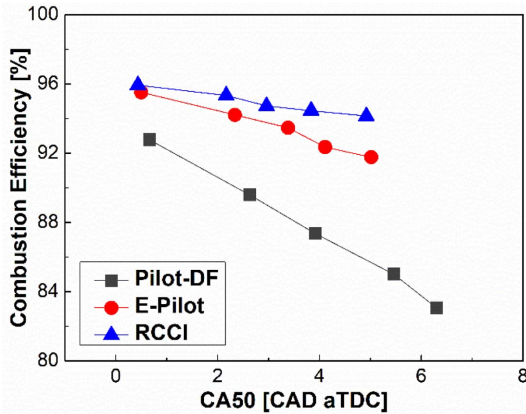


Fig. 6 Combustion efficiency of three diesel injection methods according to CA50

압력상승률을 보이는 Pilot-DF 모드에서 CA50이 상사점 이전에 위치할 경우, 최고압력상승률이 1.0 MPa/CAD를 상회하는 수준으로 피스톤 손상이 우려되는 수치를 기록하였다<sup>(16)</sup>.

Figure 5와 6은 각각 CA50에 따른 세 가지 디젤 분사 방식의 제동 열효율 및 연소효율을 나타낸 것이다. 세 가지 모드에서 디젤의 분사시기 차이가 상당하여, CA50을 바탕으로 그래프를 직관적으로 도시하였다. CA50은 내연기관에서 엔진의 성능과 배기를 결정하는 중요한 인자 중 하나이다<sup>(18)</sup>. 모든 CA50에서 제동 열효율은 RCCI, E-Pilot, Pilot-DF 순이었다. 이는 E-Pilot과 RCCI 모드의 연소효율이 높았기 때문이다. 두 모드에서의 이른 디젤 분사시기로 인해 연소시작 전에 디젤이 넓게 분포하여 주변의 천연가스-공기 예혼합기의 반응

성이 증가하여 높은 연소효율을 보였다<sup>(11)</sup>. 두 모드에서 연소효율이 유사하였음에도 RCCI의 제동 열효율이 더 높은 것은 낮은 열전달 손실 때문이다<sup>(15)</sup>. RCCI 모드에서 디젤의 이른 분사시기로 인해 연료-공기 예혼합기 형성에 따라 연소온도가 감소하여 E-Pilot 모드 대비 낮은 열전달 손실을 보였다.

Figure 7은 세 가지 디젤 분사방식의 제동 열효율이 가장 높은 지점에서의 열방출률 곡선을 나타낸 것이다. Pilot-DF와 E-Pilot 모드에서는 확연한 2개의 열방출률 피크를 보인 반면, RCCI 모드에서는 종모양의 열방출률 곡선을 기록하였다. Pilot-DF와 E-Pilot 모드에서 첫 번째 피크는 디젤의 자발점화와 디젤 분무 주변의 천연가스-공기 혼합기의 연소에 해당되며, 두 번째 피크는 천연가스-공기 예혼합기의 화염전파에 의해 형성되었다<sup>(19)</sup>. RCCI 모드에서는 디젤이 천연가스-공기 혼합기와 예혼합되어 저온반응에 의한 낮은 열방출률 연소가 시작되었고, 바로 고온반응에 의한 열방출률로 이어졌다.

### 3.2 디젤 분사방식에 따른 이종연료 엔진 배기 분석

3.1 절에서는 디젤 분사방식에 따른 천연가스-디젤 이종연료 엔진의 성능을 분석하였다. 본 절에서는 같은 실험 조건에서 배기 특성을 분석하였다.

Figure 8은 CA50에 따른 세 가지 디젤 분사방식의 질소산화물 배출을 나타낸 것이다. 모든 CA50에서 Pilot-DF 모드의 질소산화물 배출이 가장 높았으며, E-Pilot 및 RCCI 모드 구현을 통해 질소산화물 배출이 저감되었다. Pilot-DF 모드에서 디젤의 늦은 분사로 인해 디젤 분무 주변의 고온 이온공연비 영역에서 질소산화물이



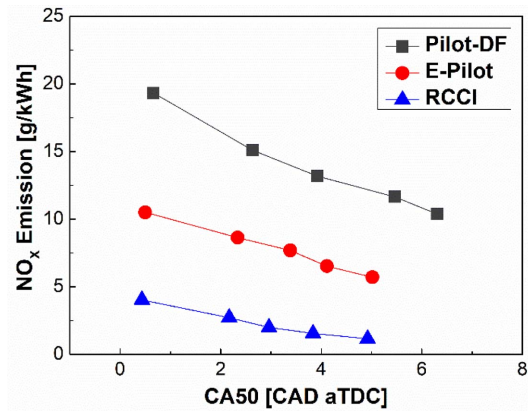


Fig. 8 Nitrogen oxide emissions of three diesel injection methods according to CA50

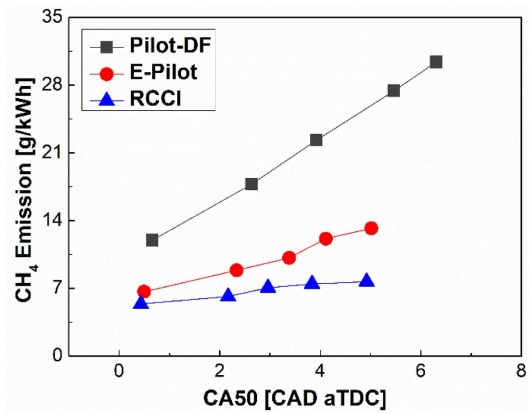


Fig. 10 Methane emissions of three diesel injection methods according to CA50

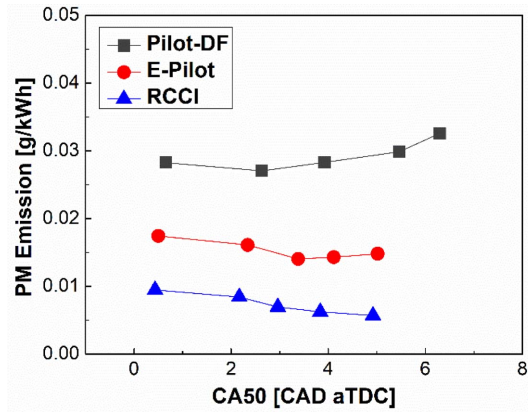


Fig. 9 Particulate matter emissions of three diesel injection methods according to CA50

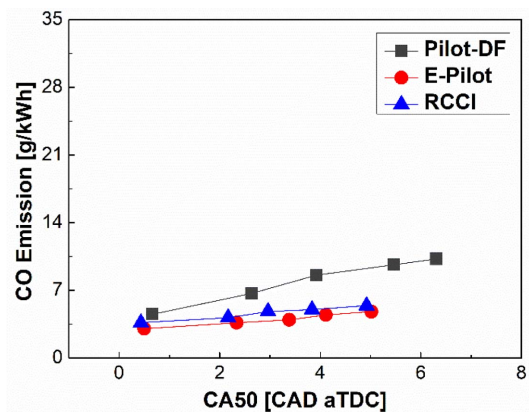


Fig. 11 Carbon monoxide emissions of three diesel injection methods according to CA50

다수 생성되었다<sup>(11)</sup>. 반면 RCCI 모드에서 긴 점화 지연 동안 연료-공기 예혼합기가 형성되었으며, 이로 인한 낮은 연소온도로 인해 질소산화물 생성이 억제되었다<sup>(12)</sup>. E-Pilot 모드에서는 RCCI와 Pilot-DF 모드의 중간 수준인 질소산화물 배출을 기록하였다.

Figure 9는 CA50에 따른 세 가지 디젤 분사방식의 입자상물질 배출을 나타낸 것이다. 모든 CA50에서 입자상물질 배출 또한 질소산화물 배출과 유사한 경향을 보였다. Pilot-DF 모드의 늦은 디젤 분사에 의한 디젤 분무의 고온 농후 영역에서 입자상물질이 형성된 반면 RCCI 모드는 연료-공기 예혼합기 형성으로 인해 상대적으로 희박 연료-공기 혼합기의 낮은 연소온도로 인해 입자상물질 생성이 억제되었다.

Figure 10과 11은 각각 CA50에 따른 세 가지 디젤 분사방식의 미연 메탄 및 일산화탄소 배출을 나타낸 것이

다. 모든 CA50에서 Pilot-DF 모드의 미연 메탄 및 일산화탄소 배출이 가장 높았으며, E-Pilot 및 RCCI 모드 구현을 통해 해당 배출물의 저감이 가능하였다. E-Pilot 및 RCCI 모드의 낮은 연소온도에도 불구하고, 이른 디젤 분사시기에 의한 디젤의 넓은 분포가 주변의 천연가스-공기 혼합기의 반응성을 높였기 때문에 우수한 연소 성능을 통해 미연 메탄 및 일산화탄소 배출이 저감되었다. 주목할 점은 E-Pilot 모드에서 이른 디젤 파일럿 분사만으로도 RCCI 모드 수준으로 미연 메탄 및 일산화탄소 배출 저감이 가능했다는 점이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디젤 분사방식에 따른 천연가스-디젤

이종연료 엔진의 성능 및 배기를 분석하였다. 디젤 분사 방식에 따른 세 가지 연소모드 구현이 가능한 이종연료 엔진의 저부하 운전영역에서 비교평가를 실시하였다.

(1) Pilot-DF와 E-Pilot 모드에서 디젤 분사시기 및 연소상 제어 방향이 일치한 반면, RCCI 모드에서는 디젤 분사시기 진각에 따라 연소상이 지각되는 경향을 보였다.

(2) 계동 열효율은 RCCI, E-Pilot, Pilot-DF 순으로 높았으며, RCCI 모드의 높은 열효율은 높은 연소효율 및 낮은 열전달 손실 때문이었다.

(3) Pilot-DF와 E-Pilot 모드에서 낮은 디젤 분사에 의한 2개의 피크 열방출율을 보인 반면, RCCI 모드에서는 종모양의 열방출 특성을 기록하였다.

(4) Pilot-DF 모드에서 가장 높은 배출가스 특성을 보인 반면, E-Pilot 및 RCCI 모드 구현을 통해 해당 배출가스 저감이 가능하였다.

(5) 저부하 운전영역 조건 하에서 RCCI 모드의 성능과 배기배출이 가장 우수하였다. 그러나 이종연료 엔진의 고부하 영역에서 Pilot-DF 모드의 운전이 불가피한 점을 고려한다면, Pilot-DF 모드와 연소상 제어 방향이 일치하고, RCCI 모드 수준의 배출가스 성능을 보이는 E-Pilot의 저부하 영역 운전도 하나의 답안지로 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 기계 산업핵심기술개발사업의 “디젤천연가스 고효율 융합연소 신엔진 기술개발(20003640)” 과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) A. García, J. Monsalve-Serrano, S. Martinez-Boggio, P. Gaillard, O. Poussin and A. A. Amer, “Dual fuel combustion and hybrid electric powertrains as potential solution to achieve 2025 emissions targets in medium duty trucks sector”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 224, 2020, p. 113320.
- (2) H. Park, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Comparison of Lean Combustion Performance in a Spark-Ignition Engine Fueled with Natural Gas and Hydrogen”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 26, No. 4, 2021, pp. 204-211.
- (3) H. Jang, B. Jeong, P. Zhou, S. Ha and D. Nam, “Demystifying the lifecycle environmental benefits and harms of LNG as marine fuel”, *Applied Energy*, Vol. 292, 2021, p. 116869.
- (4) H. Park, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Analysis of Energy Losses in a Natural Gas Spark Ignition Engine for Power Generation”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 25, No. 4, 2020, pp. 170-177.
- (5) H. Park, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and C. Bae, “Emission Reduction by Mixture Formation in a Diesel-Natural Gas Dual-Fuel Engine at Low Loads”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 194-202.
- (6) H. Park, E. Shim and C. Bae, “Injection strategy in natural gas-diesel dual-fuel premixed charge compression ignition combustion under low load conditions”, *Engineering*, Vol. 5, No. 3, 2019, pp. 548-557.
- (7) 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, 2016, pp. 243-253.
- (8) M. Nelles, “New engines at volvo trucks”, *ATZheavy duty worldwide*, Vol. 12, No. 3, 2019, pp. 12-17.
- (9) Z. Wang, F. Zhang, Y. Xia, D. Wang, Y. Xu and G. Du, “Combustion phase of a diesel/natural gas dual fuel engine under various pilot diesel injection timings”, *Fuel*, Vol. 289, 2021, p. 119869.
- (10) 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, 2019, pp. 186-198.
- (11) 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, 2017, pp. 642-657.
- (12) 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, 2019, pp. 763-774.
- (13) A. Indrajana, C. Bekdemir, X. Luo and F. Willems, “Robust multivariable feedback control of natural gas-

- diesel RCCI combustion”, IFAC-PapersOnLine, Vol. 49, No. 11, 2016, pp. 217–222.
- (14) A. Yousefi, H. Guo and M. Birouk, “Split diesel injection effect on knocking of natural gas/diesel dual-fuel engine at high load conditions”, Applied Energy, Vol. 279, 2020, p. 115828.
- (15) D. E. Nieman, A. P. Morris, G. D. Neely, A. C. Matheaus and J. T. Miwa, “Utilizing Multiple Combustion Modes to Increase Efficiency and Achieve Full Load Dual-Fuel Operation in a Heavy-Duty Engine”, SAE Technical Paper, No. 2019-01-1157, 2019.
- (16) H. Park, E. Shim, J. Lee, S. Oh, C. Kim, Y. Lee and K. Kang, “Large-squish piston geometry and early pilot injection for high efficiency and low methane emission in natural gas–diesel dual fuel engine at high-load operations”, Fuel, Vol. 308, 2022, pp. 122015.
- (17) 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, 2021, pp. 114224.
- (18) S. Saxena and I.D. Bedoya, “Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 39, No. 5, 2013, pp. 457–488.
- (19) 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, 2019, p. 113191.