



단기통 디젤엔진에서 바이오디젤 연료의 분사시기가 연소, 배기배출물 및 에너지 효율에 미치는 영향

Effects of Biodiesel Fuel Injection Timing on Combustion, Exhaust Emissions, and Energy Efficiency in a Single Diesel Engine

이형민*†
 Hyung-Min Lee*†

(Received 01 July 2019, Revision received 02 August 2019, Accepted 12 August 2019)

Abstract: The purpose of this study is to analyze the effect of biodiesel fuel injection timing on combustion, exhaust emissions, and energy efficiency in a single diesel engine. The biodiesel fuel injection timing was changed from BTDC30° to BTDC3° with 5° intervals. The maximum in-cylinder pressure was increased from BTDC30° to BTDC15°, and gradually decreased after BTDC15°. Indicated mean effective pressure, which is an index of combustion performance, showed to increase the fuel injection timing is retarded to TDC. In addition, engine torque exhibited the same tendency as result of indicated mean effective pressure characteristics. The highest rate of heat release occurred between Θ_{10} and Θ_{50} depending on the fuel injection timing. Oxygen, carbon monoxide, and hydrocarbon emissions in the exhaust pollutants were reduced as the fuel injection timing was retarded to TDC, and carbon dioxide tended to increase. Nitrogen oxides showed the highest value at BTDC15° as the maximum in-cylinder pressure characteristics. Energy efficiency increased as the fuel injection timing was retarded to TDC due to the negative work that occurred while the compression stroke decreased.

Key Words : Biodiesel fuel, Fuel injection timing, Combustion, Exhaust emissions, Energy efficiency

— 기 호 설 명 —

ABDC : After Bottom Dead Center	CO ₂ : Carbon dioxide(%)
ATDC : After Top Dead Center	dQ : Rate of heat release(ROHR, J/deg.)
BBDC : Befor Bottom Dead Center	HC : Hydrocarbon(ppm)
BTDC : Befor Top Dead Center	IMEP : Indicated mean effective pressure(MPa)
CO : Carbon monoxide(ppm)	m _f : Fuel mass(kg)
	\dot{m}_f : Fuel mass flow rate(kg/s)
	MFB : Mass fraction burned(%)

*† 이형민(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1999-2604>) : *† Hyung-Min Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-1999-2604>) : Professor, Department of Navigation and Ship Handling System, Republic of Korea Naval Academy.
 교수, 해군사관학교 함정운용학과
 E-mail : hmsj1226@korea.ac.kr, Tel : 055-907-5345
 E-mail : hmsj1226@korea.ac.kr, Tel : 051-907-5345

- N : Engine speed(rpm)
- NOx : Nitrogen oxides(ppm)
- O : Oxygen(%)
- P : In-cylinder pressure(MPa)
- P : Engine power(kW)
- P_{inj} : Injection pressure(MPa)
- Q_{LEV} : Low heating value of fuel(kJ/kg)
- rpm : revolution per minute
- η_f : Fuel conversion efficiency(%)
- n_R : number of revolution per cycle
- Θ_{10} : 10% MFB
- Θ_{50} : 50% MFB
- Θ_{90} : 90% MFB

1. 서 론

디젤엔진의 커먼레일 연료분사 시스템은 연료 분사 압력, 연료 분사시기, 연료 분사방법 등을 엔진 운전조건에 따라 변경 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히, 특정 운전영역에서 동일한 양의 연료를 분사하더라도 연료의 분사시기에 따라 연료의 분사 타킷팅이 변경되고, 실린더 내부 연료-공기 혼합기 형성에 영향을 미치기 때문에 연소, 엔진출력, 배기 배출물 농도 특성에 중요한 인자로 작용한다.¹⁻³⁾ 연료분사시기의 영향을 연구한 결과들은 연료의 분사시기가 지각되면 연소품질은 향상되고, 실린더 내부 최고 압력과 질소산화물은 특정 분사시기에서 최솟값을 나타내며, 일산화탄소 및 탄화수소는 점점 줄어드는 경향을 보인다고 발표하였다.⁴⁻⁷⁾ 본 연구의 초점은 엔진 부하가 없는 무부하 운전조건에서 바이오디젤 연료의 연료분사량을 동일하게 적용하여 연료분사시기에 따른 연소, 배기 배출물 특성(산소, 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화물, 탄화수소) 및 연료가 변환되는 에너지 효율을 단기통 엔진을 이용하여 실험적으로 분석하는 것이다.

2. 시험장치 및 방법

Fig. 1은 바이오디젤 연료(Table 1)의 분사시기

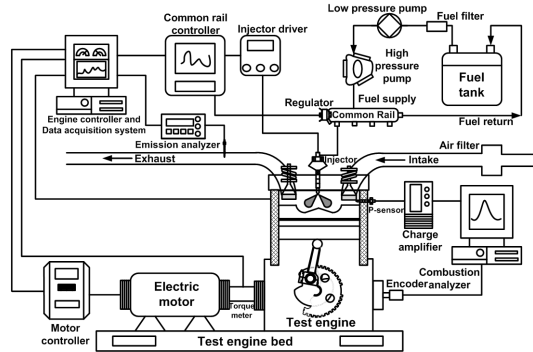


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 Properties of biodiesel fuel

Properties	Unit	Values
Carbon	wt%	77.71
Hydrogen		13.05
Distillation Temperature	10%	330.5
	50%	334.3
	90%	343.0
Density(15°C)	kg/m ³	882.7
Cetane number	-	56.3
Kinematic viscosity(40°C)	mm ² /s	4.341
LHV	kJ/kg	36,910
Flash point	°C	154.0
*Analysis service : K-Petro		

가 연소, 배기 배출물 및 에너지 효율에 미치는 영향을 분석하기 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험장치는 커먼레일 단기통 디젤엔진, 엔진 회전수를 정밀하게 제어하는 22 kW급 전기모터, 연료 분사량, 분사시기 및 압력 등을 제어하는 Laview 기반 엔진 제어체계, 연소현상을 분석하기 위한 연소해석기(Mobiltek, MT-7002S), 배기 배출물 특성을 분석하기 위한 센서 기반 배기가스 분석기(Testo-350K) 등으로 구성되어 있다. 바이오디젤 연료의 분사압력은 30 MPa, 엔진회전수는 무부하 조건에서 800 rpm, 냉각수 온도는 60°C, 연료 분사시기는 BTDC30°~ATDC3°까지 5° 간격으로 시험을 진행하였다. 시험엔진의 주요제원과 시험조건을 Table 2에 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 2는 단기통 디젤엔진의 무부하 운전조건에서 바이오디젤 연료의 분사시기에 따른 실린더 내부 압력 특성 및 압력 변화율과 열발생률을 나타낸 결과이다. 연료분사시기가 BTDC30°에서 BTDC15°까지 지각(늦은 분사)될수록 실린더 내부 최고 압력은 증가하다가, 연료분사시기를 BTDC15° 기준으로 TDC쪽으로 이동할수록 줄어드는 경향을 보이며, 열발생률은 떨어지는 경향으로 나타났다. 열발생률 결과에서 연료분사시기가 지각될수록 예혼합 연소에 의한 열발생률은 줄어드는 반면 확산연소에 의한 열발생률이 길어짐을 확인할 수 있다. 이는 진각(이른 분사) 조건에서 분사된 연료는 실린더 내의 낮은 온도와 압력 때문에 점화지연이 지각조건에서 분사된 경우보다는 길어져 축적된 연료가 일시적으로 연소되는 예혼합 연소가 뚜렷하게 나타나기 때문이다. 분사조건이

Table 2 Specifications of test engine and conditions

Items	Descriptions	
1. Test engine		
Displacement(cc)	498	
Valve Operation	SOHC	
Bore × Stroke (mm)	83 × 92	
Compression ratio	17.7 : 1	
Number of valve	2-Intake, 2-Exhaust	
Fuel injection system	Bosch common rail	
Valve timing	Intake open	BTDC7°
	Intake close	ABDC43°
	Exhaust open	BBDC52°
	Exhaust close	ATDC6°
2. Test conditions		
Engine speed	800 rpm	
Injection pressure(p_{inj})	30 MPa	
Injection timing	BTDC30°~ ATDC3° (5° interval)	
Injection quantity	10 mg/stroke	
Coolant temperature	60°C	

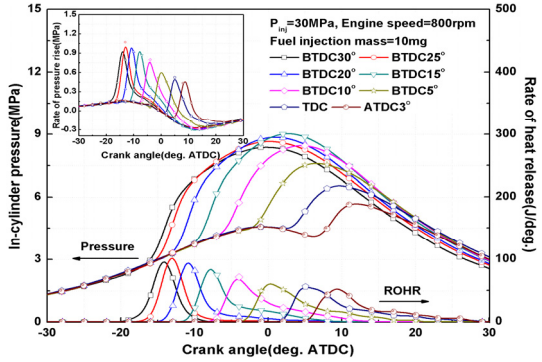


Fig. 2 In-cylinder pressure, ROHR, and ROPR characteristics

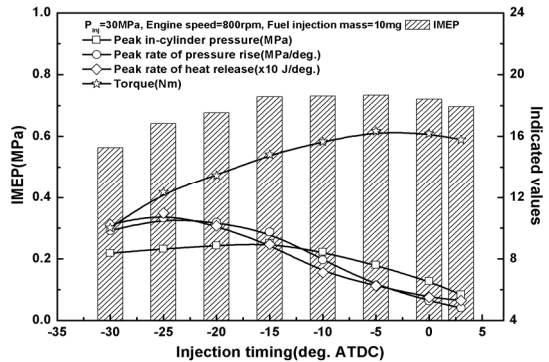


Fig. 3 IMEP, Peak(P, dQ, dP) and Torque characteristics

지각될수록 실린더 내부 분위기 온도와 압력은 높아지고 점화지연 기간은 짧아진다. 실린더 내부에 분사되는 연료의 초기상태는 예혼합 연소가 발생하고, 이후 분사 종료 시까지는 확산연소로 진행된다. 실린더 내부 압력 상승률은 연료분사시기가 지각될수록 줄어드는 경향으로 나타났다.

Fig. 3은 바이오디젤 연료분사시기가 도시평균 유효압력(IMEP), 실린더 내부 최고압력, 최고 열발생률, 최고 압력상승률 및 엔진 토크를 나타낸 결과이다. 도시평균유효압력은 연소 성능을 나타내는 지표로 활용된다. 시험결과에서 연료분사시기가 지각될수록 도시평균유효압력은 증가하는 경향을 보였다. 연료분사시기가 진각조건에서는 대부분의 열발생률이 압축행정에서 발생했고, 이는 압축행정 과정에서 음의 일이 증가되는 원인

으로 작용한다. 실린더 내 최고 압력은 연료분사 시기가 지각될수록 줄어들며, 열발생률 및 실린더 내 압력 상승률 또한 줄어드는 경향으로 나타났다. 엔진토크는 연료분사시기에 따른 도시평균유효압력의 변화 경향과 동일하게 났다. 엔진 출력은 엔진 내부에서 발생하는 도시평균유효압력과 엔진 외부에서 발생하는 토크에 비례하고, 엔진회전수 및 엔진에서 발생하는 다양한 손실들이 시험조건에서 동일하다고 가정하면 엔진토크는 도시평균유효압력의 크기에 비례한다. Fig. 4는 바이오디젤 연료분사시기에 따른 실린더 내부 최고 압력과 열발생률 지점을 10%(Θ_{10})~90%(Θ_{90}) 질량연소율(MFB)과 비교한 결과를 나타낸 것이다. 연료분사시기를 기준으로 실린더 내부 최고압력과 열발생률은 질량연소율 10%(Θ_{10})~50%(Θ_{50})에 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 예혼합 연소에 의해 나타난다. 연료분사시기가 지각될수록 질량연소율 10~50%까지의 기간은 점점 증가한다. 또한, 연료분사시기가 지각될수록 실린더 내부 압력과 열발생률은 연소가 시작되는 시점인 10%(Θ_{10}) 질량연소율에 근접한다. 연료분사시기가 지각될수록 실린더 내부 온도와 압력이 높기 때문에 점화지연기간이 짧아졌고, 이는 연소 촉진 및 성능을 향상시키는 원인으로 작용한다. 연료분사시기가 지각될수록 50%(Θ_{50}) 이후 질량연소율부터 90%(Θ_{90}) 질량연소율 구간까지는 확산연소 기간이 길어지기 때문에 늘어난다. Fig. 5는 바이오디젤 연료분

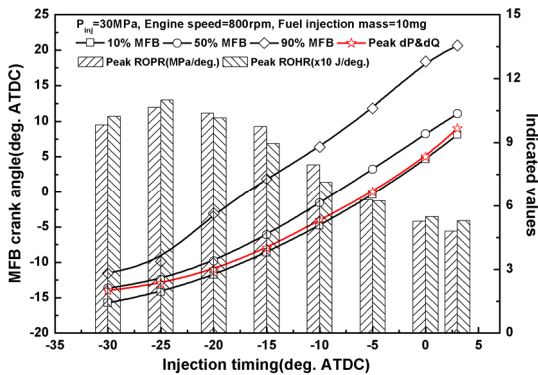


Fig. 4 Peak P and dQ point with 10~90% MFB

사시기에 따른 연소 및 점화지연 기간을 나타낸 결과이다. 시험결과에서 연료분사시기가 지각될수록 연소기간은 늘어나며, 점화지연기간은 짧아지는 경향으로 분석되었다. 연소기간은 질량연소율이 10%(Θ_{10})~90%(Θ_{90})이며, 점화지연기간은 연료분사시기부터 10%(Θ_{10}) 질량연소율까지이다. Fig. 4의 결과로부터 연료분사시기가 지각될수록 50%(Θ_{50}) 질량연소율에 도달할 때까지의 연소기간은 뚜렷한 차이를 보이지 않지만, 50%(Θ_{50}) 질량연소율 이후 90%(Θ_{90}) 질량연소율, 즉 연소가 종료되는 시점까지는 연소기간이 늘어나는 것을 알 수

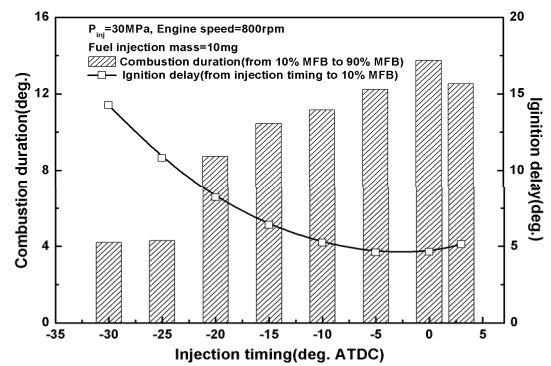


Fig. 5 Combustion duration and ignition delay characteristics

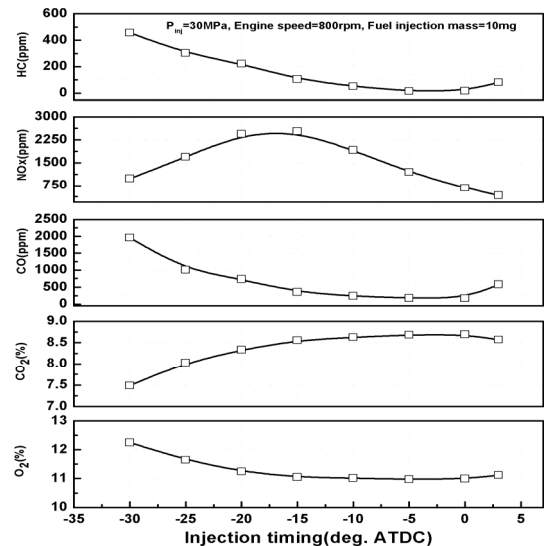


Fig. 6 Emission characteristics

있다. 이는 예혼합 연소 이후 연료분사시기가 지각될수록 확산연소기간이 늘어남을 의미한다.⁸⁾

Fig. 6은 바이오디젤 연료분사시기에 따른 배기 배출물 특성을 나타낸 결과이다. 배기가스 내부 산소(O₂) 배출물은 연료분사시기가 지각될수록 12.4%에서 10.9%까지 줄어드는 경향을 나타냈다. 이는 연료분사시기가 지각될수록 점화지연기간이 짧아지므로, 실린더 내부에 분사된 연료와 산화반응이 촉진된다는 의미로 해석된다. 이산화탄소(CO₂)의 경우 연료분사시기가 지각될수록 7.5%에서 8.7%까지 증가하는 경향을 나타냈다. 이산화탄소는 연료의 산화비율에 좌우되므로 배기가스 내부의 산소농도와 이산화탄소 배출농도는 밀접한 관련이 있다. 산소 배출 농도가 감소한다는 의미는 연료의 산화를 촉진시키고 분사된 연료량의 연소율이 향상되기 때문에 이산화탄소 배출 농도는 늘어난다. 일산화탄소(CO)와 탄화수소(HC)는 연료분사시기가 지각될수록 동일하게 저감되는 결과로 나타났다. 일산화탄소는 실린더 내부의 불충분한 산소 분포와 연소실의 낮은 온도에 의한 불완전 연소 발생으로 배출된다. 연료분사시기가 지각될수록 실린더 내부의 분위기 온도와 압력이 진각조건보다 높기 때문에 불완전 연소가 덜 발생하고 또한 산화강도가 증가하기 때문에 일산화탄소 중 일부가 이산화탄소로 전환된다. 배기 배출물 중 산소 농도는 연료 분사시기가 BTDC30°에서 지각될수록 점점 줄어들며, 이는 연료의 산화작용이 매우 활발하게 발생한다는 것이다. 이러한 현상이 일산화탄소 배출 저감에 중요한 영향을 미친다. 탄화수소는 일반적으로 실린더 적심(wall wetting), 불충분한 산소 및 불완전 연소 등이 주요 원인이다. 진각조건에서는 낮은 분위기 온도와 압력 때문에 실린더 내부로 유입된 분무는 급속도로 발달하고, 실린더 벽면에 적심된 연료(wall wetting)는 국부적으로 농후 영역으로 변하게 된다. 이러한 현상과 점화지연 시간의 증가 현상이 불완전 연소를 촉진시키며, 이는 탄화수소의 배출증가의 원인으로 작용한다. 질소산화물(NOx) 배출에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 실린더 내부 연소가스 온도이다. 시험결과에서 연료분사시기가 BTDC15°에서 가장 높게 배출되었으며,

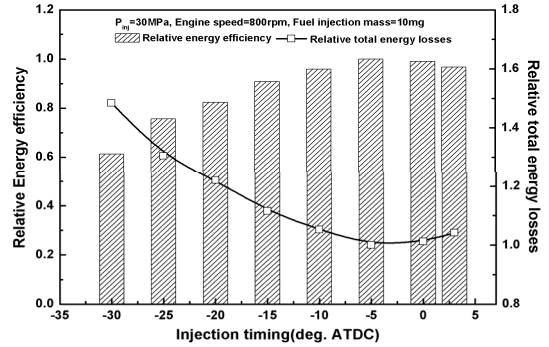


Fig. 7 Fuel conversion energy efficiency characteristics

BTDC15°를 기준으로 진각-지각될수록 저감되는 경향으로 나타났으며, BTDC15°에서 분사된 연료의 분무가 실린더 내부의 공기와 혼합 강도가 가장 강하다고 판단된다. 실린더 내부의 혼합기를 이상기체라고 생각하면, 실린더 내부 온도는 실린더 내부 압력에 가장 큰 영향을 받는다. BTDC15°를 기준으로 연료분사시기가 진각-지각될수록 실린더 내부 압력은 떨어지는 결과를 확인할 수 있다. 연료분사시기에 따른 질소산화물 배출특성은 실린더 내부 최고 연소압력 결과와 동일하다. 실린더 내부 최고 연소압력과 연소가스 온도는 비례하므로 실린더 내부 최고 연소압력이 높을수록 연소반응의 강도도 높아지며, 이는 연소가스의 온도를 증가시키는 원인으로 작용하기 때문에 온도의 지배를 받는 질소산화물 배출 농도는 증가한다. Fig. 7은 바이오디젤 연료분사시기에 따른 연료 변환 에너지 효율 특성을 BTDC50°를 기준으로 상대적인 값으로 나타낸 결과이다. 연료 변환 에너지 효율을 산출하기 위해 아래 식 (1)을 적용하였다.

$$\dot{m}_f = m_f \frac{N}{n_R}, \quad \eta_f = \frac{P}{m_f Q_{LEV}} \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_f 은 연료의 질량 유량(kg/s), m_f 은 연료의 질량, N 은 엔진 rpm(revolution per minute), n_R 은 사이클당 회전수, η_f 은 연료 변환 에너지 효율, P 는 출력(kW), Q_{LEV} 는 연료의 저위 발열량(kg/kJ)을 나타낸다. 바이오디젤 연료 변환 에너지 효율

은 투입된 연료의 에너지는 고정이므로 일 에너지(출력)에 영향을 미치는 토크에 의해서 결정된다. 연료분사시기가 지각될수록 연료 변환 에너지 효율이 증가하는 이유는 토크가 증가했기 때문이다. 연료분사시기가 지각될수록 토크가 증가하는 이유는 압축행정 과정에서 발생하는 음의 일(negative work)은 감소하고, 팽창행정 과정에서 발생하는 양의 일(positive work)이 증가했기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 단기통 디젤엔진에 바이오디젤 연료를 적용하여 연료분사시기에 따라 연소, 배기 배출물 및 에너지 효율 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 바이오디젤 연료분사시기가 지각될수록 열발생률은 점점 감소되며, 실린더 내부 최고 압력은 BTDC15°에 최솟값을 나타냈으며, 이후 감소되는 경향으로 분석되었다. 엔진 연소 성능의 지표로 사용되는 도시평균유효압력은 연료분사시기가 TDC 쪽으로 지각되면서 증가되는 경향으로 분석되었다.

2) 도시평균유효압력 증가는 엔진출력 향상에 도 영향을 미치므로 바이오디젤 연료 변환 에너지 효율은 연료분사시기가 지각될수록 향상되는 결과를 보였다.

3) 바이오디젤 연료분사시기가 지각될수록 배기가스중의 산소, 일산화탄소, 탄화수소는 저감되었고, 이산화탄소는 증가되는 경향으로 분석되었다. 연료분사시기가 지각될수록 실린더 내부의 낮은 분위기 온도와 압력 때문에 실린더 적심 현상과 불완전 연소가 발생하며, 이는 일산화탄소 및 탄화수소 배출농도는 증가의 원인으로 작용한다. 연료분사시기가 지각될수록 산화강도가 높아지므로 이산화탄소 배출수준은 증가한다.

4) 실린더 내부 연소가스 온도에 절대적 지배를 받은 질소산화물은 BTDC15°를 기준으로 진각·지각되었을 경우는 감소되는 경향을 보였다.

References

1. S. H. Jang, 2012, "The Characteristics on the Engine Performance for Variation of Fuel

Injection Timing in DI Diesel Engine Using Biodiesel Fuel", The Korean Society For Power System Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 16-21.

2. S. P. Lee, S. J. Yoon, H. K. Kwon, J. K. Lee and S. W. Park, 2018, "Study on Injection Timng and EGR rate Combustion and Flame Characteristics in Diesel Optical Engine", Korea Society of Automotive Engineering, Spring proceedings, p. 149.

3. J. S Kim, K. H. Kim, H .S. Lee, S. W. Lim, H. Y. Kang and D. K. Koh, 2011, "Effects of the Fuel Injection timing on the Coimbustion Characteristics in CRDI Engine", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 10-15.

4. K. J. Jeong, D. G. Lee, S. W. Park and C. S. Lee, 2011, "Effect of Two-Stage Fuel Injection Parameters on NOx Reduction Characteristics in a DI Diesel Engine", Energies, Vol. 4, pp. 2049-2060. (DOI:10.3390/en4112049)

5. S. H. Park, S. H. Yoon and C. S. Lee, 2011, "Effwcts of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodisel fuel", Applied Energy, Vol. 88, pp. 88-98.

6. S. Jaichandar, P. S. Kumar and K. Annamalai, 2012, "Combined effect of injection timing and combustion chamber geometry on the performance of a biodiesel fueled diesel engine", Eneyg, Vol. 47, pp. 388-394.

7. A. K. Agarwal, D. K. Srivastava, A. Dhar, R. K. Maurya, P. C. Shukla and A. P. Singh, 2013, "Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine, Vol. 111, pp. 374-383.

8. F. Ma, C. Zhao, F. Zhang, Z. Zhao, Z. Zhang, Z. Xie and H. Wang, 2015, "An Experimental Investigation on the Combustion and Heat Release Characteristics of an Opposed-Piston Folded-Cranktrain Diesel Engine", Energies, Vol. 8, pp. 6365-6381. (DOI:10.3390/en8076365)