

2단분사조건에서 파일럿 분사량이 바이오디젤 연료의 연소 및 배기 배출물 특성에 미치는 영향

이형민[†]

(Received May 28, 2019 ; Revised July 16, 2019 ; Accepted August 20, 2019)

Effect of pilot injection quantity on the combustion and emission characteristics of biodiesel fuel under two stage injection condition

Huynghmin Lee[†]

요약: 본 연구의 목적은 파일럿 분사와 주 분사로 이루어지는 2단분사조건에서 파일럿 분사량이 바이오디젤 연료의 연소 및 배기 배출물 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 또한, 파일럿 분사량에 따라 주 분사의 연소 가시화 시험도 수행되었다. 파일럿 분사량에 따라 바이오디젤 연료의 연소 및 배기 배출물 특성 분석, 연소 가시화는 가시화가 가능한 커먼레일 단기통 디젤엔진에서 수행되었다. 바이오디젤 연료의 총 분사량은 10mg/stroke이며, 파일럿 분사량에 따라 주 분사량도 조절되었다. 파일럿 분사량이 증가할수록 실린더 벽면 또는 피스톤 적십을 증가시킬 뿐만 아니라 주 분사의 연소 성능을 저감시켜 실린더 내부 압력, 열발생율, 도시평균유효압력 및 토크가 떨어지는 결과를 보였다. 파일럿 분사량이 증가할수록 일산화탄소 및 탄화수소는 증가한 반면, 질소산화물은 감소하는 결과로 나타났다. 연소가시화를 통해 파일럿 분사량이 증가할수록 주 분사 시 점화지연기간은 짧아지며, 초기 연소 시 예혼합 연소 보다는 확산연소에 가까운 형태로 나타났다.

주제어: 2단분사, 파일럿 분사량, 바이오디젤, 연소 및 배기 배출물, 연소가시화

Abstract: The purpose of this research is to analyze the influence of pilot injection quantity on the combustion and exhaust emission characteristics of biodiesel fuel under two-stage injection conditions: pilot injection and main injection. The combustion visualization test of the main injection was also carried out on the amount of the pilot injection. Analysis of the combustion and exhaust emission characteristics of biodiesel fuel according to the pilot injection quantity and combustion visualization was performed in a common rail single cylinder diesel engine, which can be visualized. The total injection quantity of biodiesel fuel was 10 mg/stroke, and the main injection amount was adjusted according to pilot injection quantity. The increase in pilot injection quantity caused a cylinder wall surface or piston wall wetting increment, thereby reducing the combustion performance of the main injection. As a result, the in-cylinder pressure, rate of heat release, indicated mean effect pressure, and torque decreased. As the pilot injection amount increased, carbon monoxide and hydrocarbons tended to increase while nitrogen oxides decreased. As the pilot injection quantity increased through combustion visualization, the ignition delay period during the main injection became shorter and appears to be similar to diffusion combustion rather than premixed combustion in the initial combustion.

Keywords: Two-stage injection, Pilot injection quantity, Biodiesel, Combustion and exhaust emissions, Combustion visualization

Nomenclature

ABDC	After Bottom Dead Center	CoV	Coefficient of Variation
ATDC	After Top Dead Center	EOC	End Of Combustion
BBDC	Before Bottom Dead Center	HC	Hydrocarbon
BTDC	Before Top Dead Center	IMEP	Indicated Mean Effect Pressure
CE	Combustion Efficiency	LHV	Low Heating Value
CO	Carbon Monoxide	m_f	Fuel mass
		MPa	Mega Pascal

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1999-2604>): Professor, Department of Navigation and Ship Handling System, Republic of Korea Naval Academy, Jungwonro-1, Jinhaegu, Changwonsi, 51704, Korea, E-mail: hmsj1226@korea.ac.kr, Tel: 055-907-5345

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.

- NO_x Nitrogen Oxides
- P_{inj} Injection pressure
- Q_{LEV} Low heating value of fuel
- ROHR Rate Of Heat Release
- rpm revolution per minute
- SOC Start Of Combustion
- TDC Top Dead Center

1. 서론

디젤엔진에 적용되는 커먼레일 분사 시스템의 발전과 함께 연료분사량 및 연료분사시기 조절을 포함한 연료의 다단분사전략이 지속적으로 연구되고 있다. 연료의 다단분사전략에서 파일럿 분사량은 주 분사에 의해 이루어지는 연소거동에 지대한 영향을 미치며 엔진 성능 및 배출 배출물 최적화에 중요한 변수로 적용되고 있다[1]. R. Opat *et al.* [2]은 디젤엔진의 분사방식을 다단분사방식으로 적용했을 때 일산화탄소 및 탄화수소는 저감된다고 보고하였고, T. Fang *et al.* [3]은 다단분사전략에서 연료의 분사시기 조절을 통해 바이오디젤 연료에서 증가하는 질소산화물을 저감시킬 수 있다고 발표했다. S. H. Park *et al.* [4]은 에탄올 혼합 디젤연료 2단분사 시험에서 파일럿 분사량이 증가할수록 파일럿 분사에 의한 열발생율은 높아지나 주 분사에 의한 열방출은 낮아지는 결과를 보인다고 발표하였다.

본 연구에서는 연소 가시화가 가능한 커먼레일 단기통 디젤엔진에서 파일럿 분사와 주 분사 방법의 2단분사전략을 적용하였다. 또한, 동일한 무부하 운전 조건에서 파일럿 분사량에 따른 연소 및 배기 배출물 특성을 분석하기 위하여 파일럿 분사시기와 주 분사시기를 고정시킨 상태에서 연소가시화 구현, 연소 및 배기 배출물 특성을 분석하였다.

2. 시험장치 및 방법

Figure 1은 2단분사조건에서 파일럿 분사량에 따른 바이오디젤 연료(Table 1)의 연소 및 배기 배출물 특성을 분석하기 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

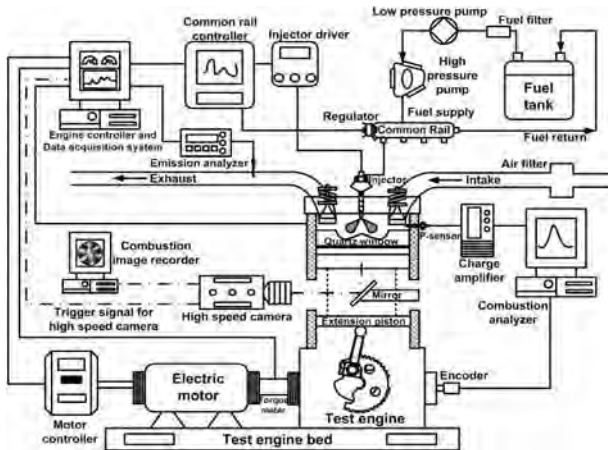


Figure 1: Schematic diagram of experimental system

Table 1: Properties of biodiesel fuel

Properties	Unit	Values	
Carbon	wt%	77.71	
Hydrogen		13.05	
Others(oxygen etc.)		9.94	
Distillation Temperature	10%	°C	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	J/g	36,910	
Flash point	°C	154.0	

시험장치는 연소 가시화가 가능한 커먼레일 단기통 디젤엔진, 시험엔진의 회전수를 정밀하게 제어하는 22kW급 전기모터, Laview 기반 엔진 제어 체계, 연소해석장치, 배기 배출물 특성을 분석하기 위한 센서 기반 배출가스 분석기, 연소과정을 촬영할 수 있는 초고속 카메라 등으로 구성되어 있다. 시험엔진의 연료분사압력은 30MPa, 회전수는 800rpm, 냉각수 온도는 60°C로 설정하여 시험을 진행하였다. 연료의 2단분사 시 파일럿 분사량에 따라 주 분사량도 조절되었으며, 파일럿 분사량 증가에 따른 인젝터 통전시간과 주 분사와의 간섭을 고려하여 파일럿 분사 시기는 BTDC30°, 주 분사시기는 BTDC5°로 설정하였다. 시험장치의 주요제원과 시험조건을 Table 2에 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 파일럿 분사량에 따른 연소 특성 및 성능

Figure 2는 커먼레일 단기통 디젤엔진에서 바이오디젤 연료의 파일럿 분사량 변화가 실린더 내부 압력 및 열방출에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 연료의 총 분사량은 10mg이며, 파일럿 분사량에 따라 주 분사량을 조절하여 총 분사량이 동일한 조건에서 시험을 진행하였다. 2단분사에서 파일럿 분사량은 주 분사의 점화지연 및 연소 특성에 중요한 영향을 미친다. BTDC30°에서 분사된 파일럿 분사량이 증가할수록 파일럿 분사에 의한 실린더 내부 압력은 상승하며, 주 분사에 의한 실린더 내부 압력은 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 파일럿 분사량이 증가할수록 열발생율이 높아 실린더 내부 온도가 높아지며, 이는 실린더 내부 압력상승에도 영향을 미친다. 주 분사(BTDC5°)가 이루어지는 시점에서 실린더 내부 압력 상승과 열발생율 특성 비교 시 파일럿 분사량이 증가할수록 주 분사에 의한 점화지연이 짧아지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 파일럿 분사량 증가에 의한 실린더 내부 압력 상승, 연료-공기 희박도 감소 및 열발생율 증가에 의한 실린더 내부 온도 증가가 주 분사의 점화지연을 짧게 했다고 설명할 수 있다. 파일럿 분사량 증가는 주

분사에 의한 연소 특성에 영향을 미친다. 파일럿 분사가 없는 단일분사의 경우(single injection, 10mg) 최고 열발생율은 가장 높지만 실린더 내부 최고 압력은 주 분사가 5/7/9mg인 경우보다 낮다. 이는 점화지연으로 인한 연소가 지연됨에 따라 TDC 이후에 연소가 활발하게 진행되어 실린더 내부 압력 상승이 파일럿 분사가 이루어진 경우보다 낮게 된다.

Table 2: Specifications of experimental system and test 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. Combustion analyzer		
Maker & Model		Mobiltek MT-7002S
Main ensemble data		P-θ, IMEP, dQ-dθ etc.
3. Emission analyzer		
Maker & Model		Testo-350K
Analysis range	NOx	~ 40,000ppm
	HC	~ 5,000ppm
	CO	~ 10,000ppm
4. High speed camera		
Maker & Model		Photron Fastcam SA 3
Frame rate applied in test		16,000 fps(res. 256×256)
Shutter speed applied in test		1/32,000s
5. Test conditions		
Engine speed		800rpm
Injection pressure(p _{inj})		30MPa
Injection timing	1 st (pilot)	BTDC30°
	2 nd (main)	BTDC5°
Injection quantity	Single(w/o pilot)	10mg (BTDC5°)
	1 st (pilot)+2 nd (main)	(1+9)mg, (3+7)mg, (5+5)mg
Coolant temperature		60°C

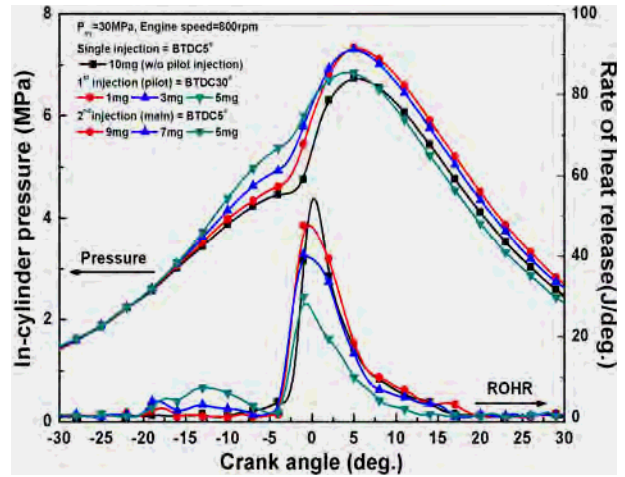


Figure 2: In-cylinder pressure and rate of heat release characteristics with pilot injection quantity

Figure 3은 파일럿 분사량에 따른 누적 열발생율 특성과 연료에서 발생하는 화학에너지($m_f Q_{LEV}$)와 누적 열발생율을 비교하여 계산한 연소효율 결과를 나타낸 것이다. 연소효율은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$CE = \frac{100}{m_f Q_{LHV}} \int_{SOC}^{EOC} ROHR(\theta) d\theta \quad (1)$$

시험결과에서 파일럿 분사량에 상응하는 주 분사량 비율이 높을수록 누적 열발생율이 높다는 것을 확인할 수 있다. 파일럿 분사가 없는 단일분사의 누적 열발생율은 주 분사가 5mg인 조건보다는 높고, 주 분사가 7mg인 조건과 비교했을 때 큰 차이는 없지만, 9mg인 조건보다는 낮다. 이는 단일분사의 경우 **Figure 2**에서 확인할 수 있듯이 예혼합 연소에 의한 최고 열발생율은 높지만, 9mg인 조건과 비교했을 때 최고 열발생율 이후 떨어지는 기울기가 줄어들기 때문이다. 또한, 파일럿 분사 시 발생하는 열발생율이 누적되기 때문이다. 그러나 확산 연소과정에서 발생하는 열방출은 주 분사량이 5mg인 조건보다는 높고, 7mg인 조건과 비교했을 때 크게 차이가 나지 않지만, 파일럿 분사량 3mg의 열발생율이 누적되기 때문에 누적 열발생율은 **Figure 3**과 같이 나타난다. 주 분사량이 5mg인 경우 파일럿 분사량에 의한 누적 열발생율은 가장 높지만 주 분사량 비율이 가장 낮고 연료에서 발생하는 화학에너지 또한 가장 낮기 때문에 누적 열발생율은 가장 낮은 결과로 나타났다.

Figure 4는 파일럿 분사량에 따른 실린더 내부 압력 상승률을 나타낸 결과이다.

파일럿 분사에 의한 실린더 내부 압력 상승률은 파일럿 분사량이 증가할수록 높고, 주 분사량이 감소할 수 록 낮은 것을 확인할 수 있다. 단일분사 조건인 경우 압력 상승률이 증가하는 시점은 파일럿 분사가 이루어진 조건보다 지각되어 나타남을 알 수 있으며, 예혼합 연소 이후 압력상승률은 급격히 상승함을 확인할 수 있으나, 실린더 내부 압력 상승에는 큰 영향을 미치지 못한다.

Figure 5는 파일럿 분사량에 따른 도시평균유효압력 (IMEP: Indicated Mean Effective Pressure) 및 사이클별 도시평균유효압력 변화를 나타낸 결과이다.

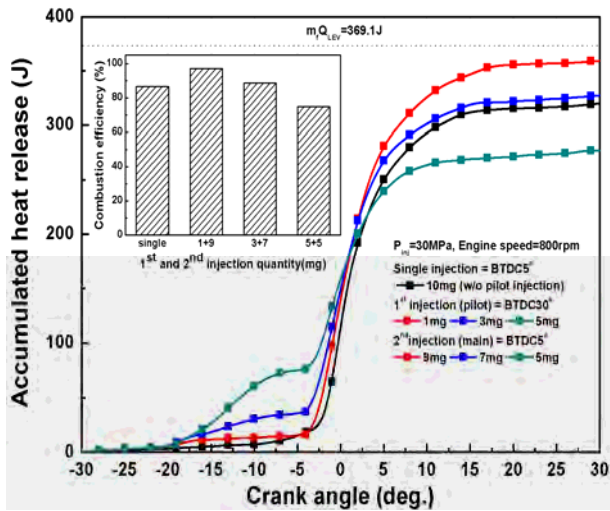


Figure 3: Accumulated heat release and combustion efficiency with pilot injection quantity

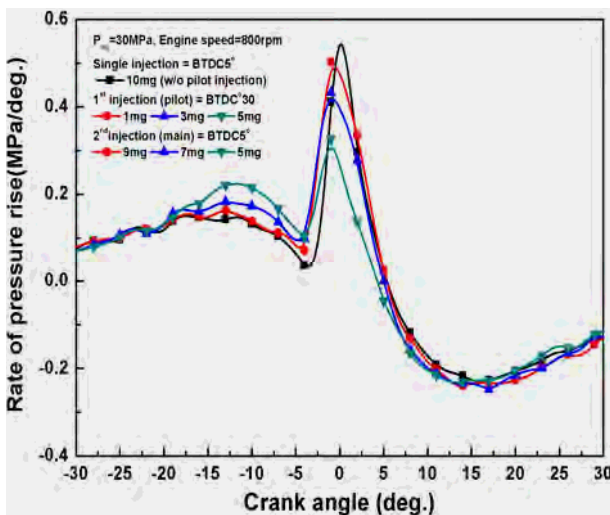
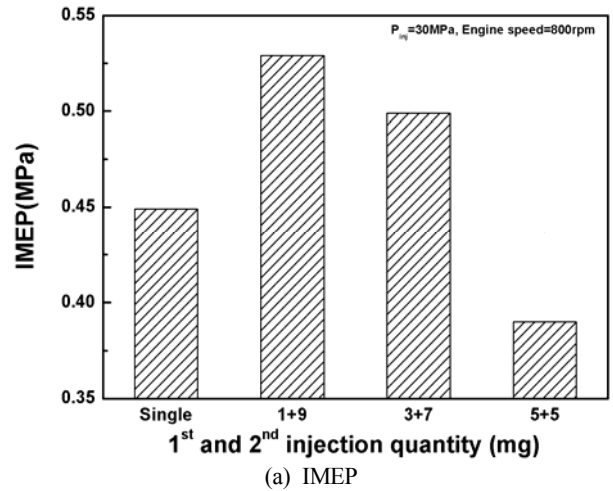
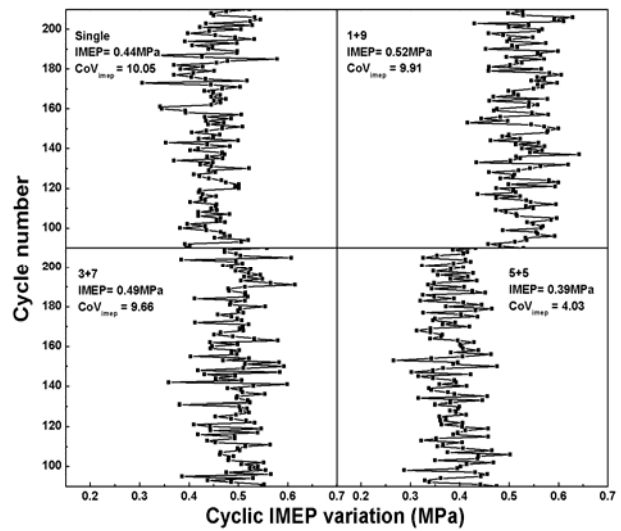


Figure 4: Rate of pressure rise with pilot injection quantity



(a) IMEP



(b) Cyclic IMEP variation

Figure 5: IMEP and cyclic IMEP variation with pilot injection quantity (pilot=1st injection, main=2nd injection)

사이클별 도시평균유효압력 변화는 총 500사이클 측정값 중 100~200사이클에 해당하는 도시평균유효압력만 나타내었다. 도시평균유효압력은 연소 성능을 대표하는 지표로 사용된다. 시험결과로부터 확인할 수 있듯이 파일럿 분사량이 1mg, 3mg인 경우 도시평균유효압력은 단일분사보다 높고 파일럿 분사량이 5mg 경우 도시평균유효압력은 단일분사와 비교 시 낮으며, 파일럿 분사량이 증가할수록 도시평균유효압력은 감소되는 경향으로 나타났다. 파일럿 분사량 증가에 의한 주 분사량 감소는 연료분사 및 연소 지속기간을 감소시키기 때문에 팽창행정 시 연소압력이 감소되는 결과를 초래하며, 팽창행정 시 일의 양이 줄어들기 때문에 도시평균

유효압력은 줄어든다. 단일분사의 경우 실린더 내부 최고 압력은 파일럿 분사량이 5mg인 조건과 비교했을 때 큰 차이는 없는 것으로 나타났지만, 팽창행정 시 실린더 내부 압력은 높은 것을 알 수 있다. 이는 주 분사량이 5mg 조건보다 피스톤이 하강하면서 보다 큰 압력이 양의 일을 증가시키는 결과에 영향을 미치기 때문에 도시평균유효압력은 파일럿 분사량이 5mg인 조건보다 높다. 사이클별 도시평균유효압력 결과에서 도시평균유효압력 변동계수(CoV: Coefficient of Variation)는 단일분사인 경우가 가장 높으며, 파일럿 분사량이 5mg인 조건에서 가장 낮게 나타났다.

3.2 파일럿 분사량에 따른 배기 배출물

Figure 6은 파일럿 분사량에 따른 배기 배출물(일산화탄소, 질소산화물, 탄화수소) 특성 결과이다.

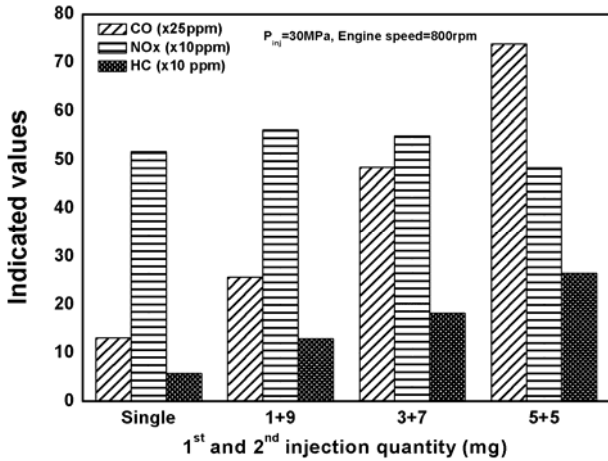


Figure 6: CO, NOx, and HC emissions with pilot injection quantity (pilot=1st injection, main=2nd injection)

일산화탄소(CO, Carbon Monoxide)는 불완전연소에 의해 대부분 생성되며, 배출량은 공기-연료 혼합비에 따라 달라진다. 시험결과에서 파일럿 분사량이 증가할수록 일산화탄소 배출량은 증가하는 경향으로 나타났다. 동일한 파일럿 분사시기(BTDC30°)에서 분사량이 증가할 경우 실린더 내 낮은 분위기 온도 및 압력조건에서 분무의 실린더 벽면 또는 피스톤 적심현상이 발생하고, 주 분사이전의 연료-공기 혼합비는 파일럿 분사량이 적은 경우보다 희박조건에서 농후 조건 발달되기 때문에 일산화탄소 배출증가의 원인이 된다[4][5].

질소산화물(NOx, Nitrogen Oxides)은 연소가스 온도에 크게 지배를 받는다. 시험결과에서 파일럿 분사량이 증가할수록 질소산화물은 배출수준은 감소되는 결과를 확인할 수 있다. 이는 주 분사에 의한 열발생율과 실린더 압력을 떨어뜨리는 원인으로 작용하게 되기 때문에 파일럿 분사량이 증가할수록 질소산화물은 저감되게 된다[6][7].

탄화수소(HC, Hydrocarbon)는 분사된 연료가 실린더 벽면 또는 피스톤 적심에 의한 미연소, 점화지연 증가, 불완

전연소 등의 광범위한 이유로 발생되게 된다. 시험결과에서 파일럿 분사량이 증가할수록 탄화수소는 일률적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 탄화수소 배출의 광범위한 원인 중 실린더 내 낮은 분위기 온도 및 압력하에서 분사된 연료의 양이 증가할수록 실린더 벽면 또는 피스톤에 적심되는 현상도 크기 때문에 미연소 반응이 증가할 뿐만 아니라 주 연소의 점화지연을 증가시키고, 불완전 연소를 촉진시키기 때문이라고 판단된다[8].

3.3 파일럿 분사량에 따른 연소가시화

Figure 7은 파일럿 분사량에 따른 연소가시화 중 주 분사에 의해 연소가 시작되는 부분만 나타낸 결과이다.

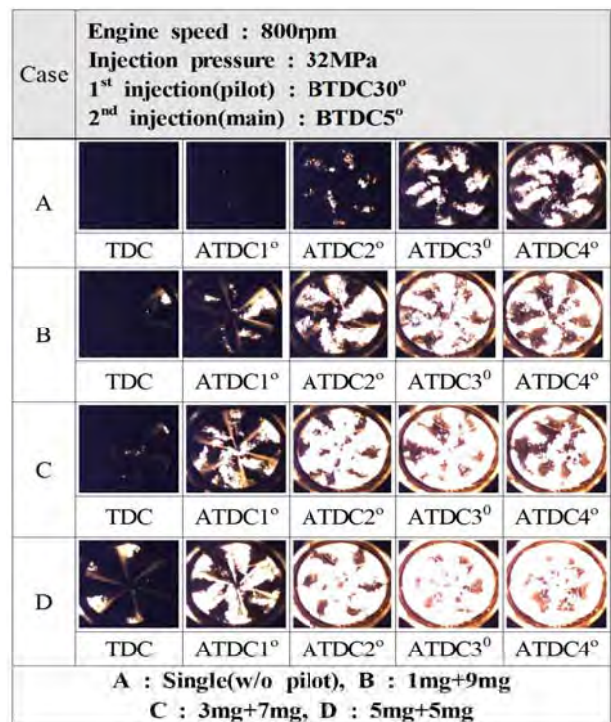


Figure 7: Combustion visualization with pilot injection quantity (pilot=1st injection, main=2nd injection)

파일럿 분사량이 증가할수록 주 분사 시 점화지연이 짧아지며 초기 연소 시 예혼합 연소보다 분무 끝부분부터 연소가 진행되는 확산연소 현상이 뚜렷이 보인다. 이는 동일한 실린더 내의 압력하에서 분사된 파일럿 연료(BTDC30°)의 양이 증가할수록 주 분사(BTDC5°)가 이루어지는 압축행정 말기까지의 기간동안 증발량이 많아져 분사된 연료의 화학적 에너지는 상승하여 실린더 내 분위기 온도를 충분히 상승시켰기 때문이라고 판단된다. 그러나 예혼합 연소의 강도가 단일분사 및 파일럿 분사량이 적은 경우보다 낮기 때문에 주 분사에 의한 실린더 압력 및 열발생율은 Fig. 2의 결과에서 확인할 수 있듯이 낮아진다. 또한 단일분사 시 점화지연시간은 파일럿 분사 조건 보다 다소 길지만 파일럿 분사량이 가장 많은 경우보다 예혼합 강도가 높기 때문에

실린더 내 압력과 열발생율, IMEP 등 엔진 성능 지표를 나타내는 인자들이 크다는 것을 시험결과를 통해 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이오디젤 연료를 연소가시화가 가능한 단기통 디젤엔진에 적용하여 파일럿 분사량에 따른 연소 및 배기 배출물 특성 분석을 목표로 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 파일럿 분사량이 증가할수록 파일럿 분사량에 의한 실린더 내부 압력 및 열발생율은 상승하나, 주 분사량에 의한 실린더 내부 압력 및 열발생율은 낮아졌고, 연소 효율 또한 떨어졌다. 이는 총 분사량을 10mg으로 고정시킨 상태에서 파일럿 분사량 증가에 따른 주 분사량을 줄였기 때문이다. 파일럿 분사량 1mg, 주 분사량 9mg 조합 시 실린더 내부 압력과 누적 열발생율은 가장 높았으며, 연료의 발열량과 연료 분사량을 기준으로 했을 때 연소 효율은 가장 높은 결과를 보였다. 파일럿 분사량의 증가와 주 분사량의 감소는 엔진의 도시평균유효압력을 떨어뜨리는 부정적인 효과로 작용한다.
- (2) 파일럿 분사량이 증가할수록(1mg→3mg→5mg) 일산화탄소와 탄화수소는 증가하는 경향을 보였으며, 질소산화물의 경우 저감되는 효과로 작용하였다. 단일분사와 비교했을 때 파일럿 분사량이 1mg, 3mg인 경우에는 다소 높게 배출되었으며, 5mg 경우에는 다소 낮은 결과를 보였다. 실린더 내 낮은 분위기 온도와 압력하에서 파일럿 분사량의 증가는 실린더 벽면 또는 피스톤 적심현상을 초래하여 미연소 반응의 증가 및 불완전연소 촉진과 같은 연소 안정성에 부정적인 영향을 미치기 때문에 파일럿 분사량이 증가할수록 일산화탄소 및 탄화수소는 증가하는 경향으로 분석되었다. 그러나, 실린더 내부 압력과 온도에 절대적 지배를 받는 질소산화물은 파일럿 분사량이 증가할수록 실린더 내부 최고 압력이 감소하는 경향으로 나타나기 때문에 줄어드는 것으로 분석되었다.
- (3) 연소가시화 시험결과 파일럿 분사량의 증가할수록 주 분사에 의한 점화지연은 점점 짧아지며, 예혼합 연소보다 확산연소에 근접하는 연소상태를 보였다. 이는 파일럿 분사에 의한 실린더 내부 온도와 압력이 상승했기 때문이다. 단일분사 조건의 경우 파일럿 분사 조건보다 점화지연 시간은 길지만 팽창행정 기간 중 실린더 내부 압력과 열발생율의 경우 파일럿 분사량 5mg, 주 분사량 5mg의 조합보다 높기 때문에 도시평균유효압력은 높은 결과로 나타났다.

Author Contributions

The research presented in this paper was wholly contributed by the author.

References

- [1] N. R. Abdullah, M. L. Wyszynski, A. Tsolakis, R. Mamat, H. M. Xu, and G. Tian, "Combined effects of pilot quantity, injection pressure and dwell periods on the combustion and emissions behaviour of a modern V6 diesel engine," *Archivum combustions*, vol. 30, no. 4, pp. 481-495, 2010.
- [2] R. Opat, Y. Ra, D. M. A. Gonzales, R. Krieger, R. D. Reitz, and D. E. Foster, "Investigation of mixing and temperature effects on HC/CO emissions for highly dilute low temperature combustion in a light duty diesel engine," *SAE technical paper 2007-01-0193*, 2007.
- [3] T. Fang and Y. Lee, "Biodiesel combustion in an optical HSDI diesel engine under low load premixed combustion conditions," *Fuel*, vol. 88, no. 11, pp. 2154-2162, 2009.
- [4] S. H. Park, I. M. Youn, and C. S. Lee, "Influence of two-stage injection and exhaust gas recirculation on the emissions reduction in an ethanol-blended diesel-fueled four-cylinder diesel engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 11, pp. 1753-1760, 2010.
- [5] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamental*, International Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [6] H. W. Park, E. J. Shim, Y. H. Hwang, and C. S. Bae, "Diesel injection strategy in a premixed charge compression ignition engine under a low load," *Transaction of Korea Society of Automotive Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 295-303, 2018 (in Korean).
- [7] S. H. Park, S. H. Yoon, and C. S. Bae, "Effect of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel," *Applied Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 88-98, 2011.
- [8] E. Sher, *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines Pollutant Formation and Control*, Academic Press, 1988.