

커먼레일 시스템용 구동방식에 따른 인젝터별 바이오디젤 분무 특성 연구

성기수* · 김진수* · 정석철* · 이진욱***

An Experimental Study on Spray Characteristics of Bio-diesel fuel in Three Injectors with Different Operating Mechanism for Common-rail System

Gisu Sung, Jinsu Kim, Seokchul Jeong and Jinwook Lee

Key Words: Spray characteristics(분무특성), Atomization(미립화), Spray tip penetration(분무도 달거리), Spray visualization(분무 가시화), CRDi(커먼레일 직접 분사)

Abstract

Recently, exhaust gas regulation has been gradually strengthened due to depletion of fossil fuels and environmental problem like a global warming. Due to this global problem, the demand for eco-friendly vehicle development is rapidly increasing. A clean diesel vehicle is considered as a realistic alternative. The common-rail fuel injection system, which is the key technology of the clean diesel vehicle, has adopted injection strategies such as high pressure injection, multiple injection for better atomization of the fuel. In addition, the emission regulations in the future is expected to be more stringent, which a conventional engine is difficult to deal with. One of the way for actively proceeding is the study of alternative fuels. Among them, the bio-diesel has been attracted as an alternative of diesel. So, in this study, spray characteristics of bio-diesel was analyzed in the common-rail fuel injection system with three injectors driven by different operating mechanism.

1. 서 론

최근 화석연료 자원의 고갈과 전 세계적인 지구온난화로 인하여 이산화탄소 규제가 점차 강화되고 있다. 이러한 전 세계적인 에너지 및 경제위기, 환경문제로 인하여 친환경 자동차의 개발에 대한 수요가 급격히 증가하였으며, 가장 현실적인 대안으로 부각된 것이 클린디젤 자동차이다. 클린디젤 자동차는 미국의 Tier-2 Bin 5, 유

럽의 Euro-6 규제에 대응할 수 있는 고효율 디젤엔진을 의미한다⁽¹⁾.

이러한 클린디젤 자동차의 핵심이라고 할 수 있는 커먼레일 고압 연료 분사시스템은 연료의 미립화를 촉진시키기 위해 연료의 고압분사(High pressure injection), 정확한 분사율(Injection rate) 제어, 다단분사(Multiple injection) 등 다양한 전략을 채택하고 있다. 이러한 다양한 분사전략을 만족시키기 위해서는 인젝터의 빠른 구동 응답성과 분사율 제어에 대한 보다 높은 자유도가 필요하다⁽²⁾. 현재는 솔레노이드 또는 피에조 액츄에이터가 컨트롤 밸브를 작동시켜 니들을 통해 연료를 분사하는 유압서보방식의 전자식 인젝터가 주로 사용되고 있으며, 피에조 액츄에이터가 니들을 직접 구동하는 방식의 인젝터가 개발되고 있는 실정이다.

또한, 앞으로의 배기규제 추세는 통상의 엔진 시스템

Received: 27 Mar 2015, Received in revised form: 10 Jun 2015, Accepted: 11 Jun 2015)

*숭실대학교 대학원 기계공학과

**숭실대학교 기계공학과

†책임저자, 종신회원, 한국액체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929

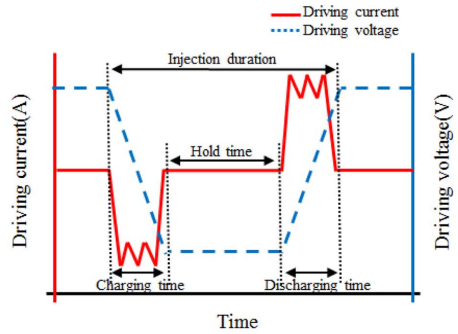
으로 극복하기 어려운 수준으로 점차 강화될 것으로 예상되고 있다. 이를 위한 대책의 한 방법으로 디젤엔진에 적용할 수 있는 다양한 대체연료에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히, 바이오디젤은 낮은 황 함유량, 높은 세탄가, 산소를 포함하는 합산소 연료로써 주목을 받고 있다. 하지만 연료 자체의 높은 점성, 표면장력, 밀도 등과 같은 물리적 성질은 연료 분무에 악영향을 미치는 요인들로 실제 디젤엔진에 적용하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 대표적으로 Jun Deng 등은 커먼레일 고압 연료 분사시스템에서 바이오디젤의 물리적 특성이 분무 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구를 수행하였으며, Krzysztof 등은 피에조 인젝터를 사용하여 바이오디젤 연료의 분사압력 변화에 따른 분무 미립화 특성에 관한 연구를 수행하였다^(3,4).

따라서, 본 연구에서는 클린디젤 자동차의 핵심 요소인 커먼레일 연료 분사시스템에 구동방식이 다른 세 가지 인젝터를 적용하여 경유와 바이오디젤 혼합물에 따른 연료 분무의 특성을 분석하고자 수행하였다.

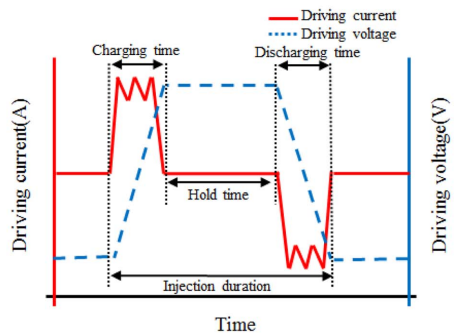
2. 실험장치 및 방법

2.1 본 연구에 사용된 3개 인젝터 비교

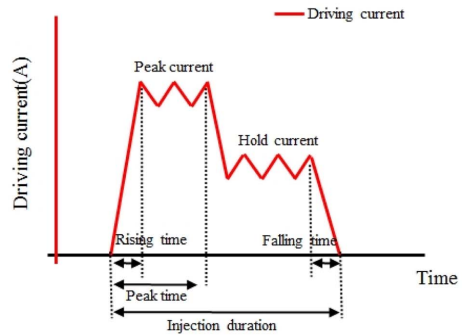
본 연구에서 사용된 CRDi용 세 가지 인젝터의 사양을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 세 가지 인젝터의 구동전류 및 전압파형을 나타낸 것이다. 유압서보형 피에조 인젝터는 피에조 세라믹이 수십~수백개의 웨이퍼 적층으로 이루어진 피에조 액추에이터를 통해 전류의 충·방전을 제어한다. 전류의 충전시 피에조 액추에이터가 수십 마이크로 단위의 변위를 발생시켜 내부 유압밸브를 작동시켜 연료를 분사하는 구동



(a) Direct-acting piezo injector



(b) Hydraulic-servo piezo injector



(c) Hydraulic-servo solenoid injector

Fig. 1 Driving Current wave of injector used in study

Table 1 Specification of injectors used in study

Item	DPI	PI	SI
Actuator type	Piezo		Solenoid
Driving type	Direct-acting	Hydraulic-servo	
Maximum injection pressure (bar)	2,000	1,800	1,600
Number of nozzle hole	7		
Load type	Capacitive load		Induction load

방식을 갖는다. 반면, 직접구동방식 피에조 인젝터는 서보유압방식 피에조 인젝터와 기본적으로 역압전 효과를 이용하는 것은 같지만, 전류가 방전시 연료를 분사한다는 특징을 갖는다. 본 연구에서 사용된 직접구동방식 피에조 인젝터는 서보유압방식 피에조 인젝터에 비해 내부 회로가 복잡하지 않고 피에조스택이 니들을 직접 구동하기 때문에 응답성이 빠르다. 또한, 별도의 인젝터 연료 리턴라인이 없고 인젝터 내부에 연료를 저장하기 때문에 압력맥동에 의한 연료분사율 왜곡이 상대적으로

Table 2 Comparison diesel and bio-diesel

	Diesel	Bio-diesel
Cetane number	45 ~ 50	48 ~ 60
Sulfur (mg/kg)	< 30	< 10
Carbon (wt%)	< 0.15	< 0.1
Density @15°C	815 ~ 855	860 ~ 900
Heating value (MJ/kg)	40.6 ~ 44.4	37.2
Oxygen (wt%)	0	11

적다는 연구 결과가 있다⁵⁾. 유압서보형 솔레노이드 인젝터는 피크-홀드(Peak and hold)방식으로 전류를 제어하며, 솔레노이드에 전압을 인가하여 전류 상승시간(Rising time)과 하강시간(Falling time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이는 특징을 가지고 있다⁶⁾.

2.2 본 연구에 사용된 바이오디젤 특징

바이오디젤은 해바라기씨, 유채 등과 같은 식물성 오일, 우지 등과 같은 동물성 지방, 폐식용유 등과 같은 다양한 자원을 원료로 만든 지방산메틸 에스테르(Fatty methyl esters, FAME)을 총칭한다. 이는 청정 에너지원으로 화학적 구조가 경유와 유사하며 세탄가가 높아 경유의 대체연료로써 주목을 받고 있다. 또한, 황 함유량이 낮고 질량 기준 약 11% 정도의 산소를 함유하고 있어 HC, CO의 저감뿐만 아니라 연소실에서 Soot 성분의 산화 과정을 일으켜 입자상물질의 발생을 억제하기도 하는 것으로 알려져 있다. 반면, 바이오디젤은 경유 대비 단위 질량당 에너지 함유량이 낮고 높은 점성, 표면장력, 밀도와 같은 물리적 특성이 분무특성에 악영향을 미쳐 기관성능의 저하를 유발하는 것으로 알려져 있다⁷⁾. Table 2에 본 연구에서 사용한 경유와 바이오디젤의 물리·화학적 특성을 비교하였다.

2.3 분무가시화 실험장치 및 연료분사

본 논문에서는 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였고, 고속 분무가시화 실험을 위해 체적 855 cc의 정적 챔버를 사용하였다. 연료 분사시스템은 EDC-17 커먼레일 시스템(Bosch)을 적용하였으며, 커먼레일 제어기(ZB-9013, Zenobalti)를 통해 제어하였다. 최대 2,000 bar까지 연료를 가압할 수 있는 고압펌프를 1.5 kW(60 Hz, 1,140 rpm)의 출력을 갖는 모터와 벨트를 사용하여 구동시켰다. 피에조 및 솔레노이드 인젝터의 구동을 위해

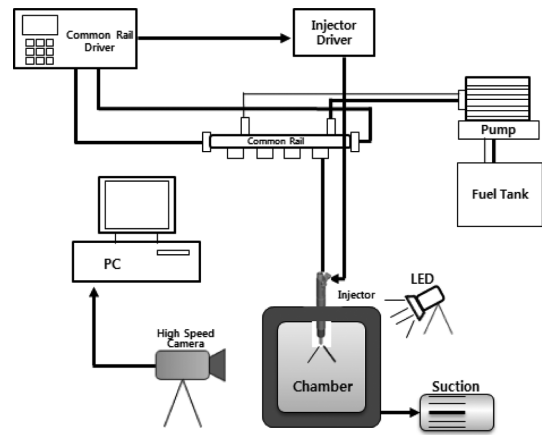


Fig. 2 Schematic diagram of high speed spray visualization

Table 3 Specification of high speed camera

Item	Specification
Model	Phantom V7.3 Mono
Full resolution	800 × 600
Sensor type	14 bit sensor SR-CMOS
Picture per second	500,000 pps
Trigger	TTL signal or Contact closure
Memory	8 G DDR RAM

피에조 전용 제어기(ZB-6200, Zenobalti)와 솔레노이드 전용 제어기(ZB-5100, Zenobalti)를 각각 사용하였다.

또한, 고속 분무가시화를 위해 후방 LED 광원에 의한 Mie-scattering을 직접 촬영하는 기법을 통해 분무의 거시적 이미지를 취득하였고, 사용한 고속카메라의 사양은 Table 3과 같다.

2.4 실험조건 및 방법

본 연구의 고속 분무가시화 실험조건은 Table 4와 같다. 정적챔버 내의 분위기는 대기압, 대기온 조건으로 하였으며, 고속카메라의 영상 취득 시간은 40 μs로 설정하였다. 고속카메라의 트리거는 인젝터의 구동신호를 TTL 신호로 받아 분무영상을 획득할 수 있도록 하였다. 고속 분무가시화 실험을 위한 연료는 경유, BD100(바이오디젤 100%), 경유와 바이오디젤을 체적비율로 혼합한 BD10(경유 90%, 바이오디젤 10%), BD30(경유 70%, 바이오디젤 30%)을 사용하였으며, 각 연료의 분사량을 1/

Table 4 Experimental conditions for high speed spray visualization

Item	Specification
Injection pressure (bar)	300
Injection quantity (mg/stroke)	10.3
Fuel temperature (°C)	30 ± 2
Constant volume chamber condition	Pressure and temperature of atmosphere
Resolution	320×320 (25,000pps)

1000 g까지 측정 가능한 초정밀 전자저울(GF-4000, AND)을 사용하여 정량적으로 측정하였다.

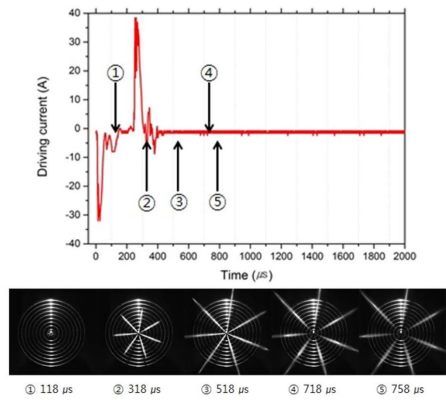
3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 커먼레일 엔진용 구동방식이 다른 인젝터별 바이오디젤의 분무특성을 분석하기 위한 고속 분무가시화 실험을 수행하였으며, 취득한 분무의 거시적 이미지를 정성적·정량적으로 분석하였다.

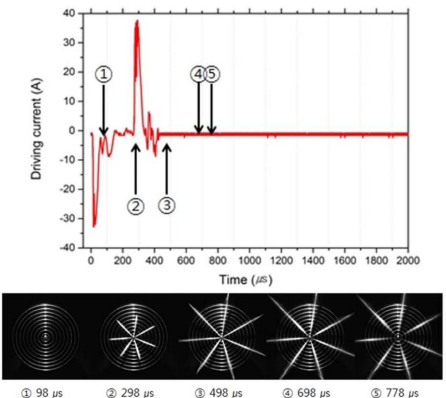
구동방식이 다른 세 가지 인젝터의 바이오디젤 분무 이미지를 비교하기 위해, 고속카메라를 통해 취득한 분무의 거시적 이미지를 기준으로 분사 시작점(①번 지점 : Start of Injection, SOI)과 분사 종료점(⑤번 지점 : End of Injection, EOI)을 지정하였다. 또한, 분사압력이 300 bar인 경우 분사 시작 후(After Start of Injection, ASOI) 200 μs의 시간 간격으로 ②, ③, ④ 지점을 구분하였다.

Fig. 3, 4와 5는 동일한 양의 연료 조건에서 분사압력 300 bar일 경우, 세 가지 인젝터의 바이오디젤 혼합물에 따른 분무의 거시적 이미지를 나타낸 것이다. 직접구동형 피에조 인젝터는 ‘방전 시 분사’, 유압서보형 피에조 인젝터는 ‘충전 시 분사’, 유압서보형 솔레노이드 인젝터는 ‘피크-홀드’ 방식의 전류 제어를 통해 분사가 이루어짐을 확인할 수 있었다.

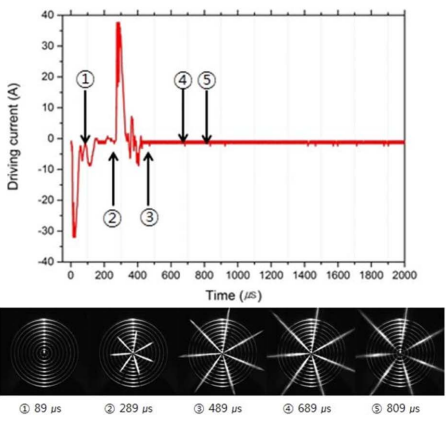
분무의 거시적 이미지를 분석한 결과, 직접구동형 피에조 인젝터의 분사 시작점(①)과 분사 종료점(⑤)이 다른 두 가지 유압서보형 인젝터에 비해 짧음을 알 수 있었다. 이는 직접 구동형 피에조 인젝터가 복잡한 유압회로를 가지지 않고, 피에조 액츄에이터에 의해 니들을 직접 구동하여 연료를 분사하여 더 빠른 응답속도를 갖기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 세 가지 인젝터 모두 경우 대비 바이오디젤 혼합율이 증가할수록 분사 종료점



(a) Diesel-Mie spray images



(b) BD30-Mie spray images

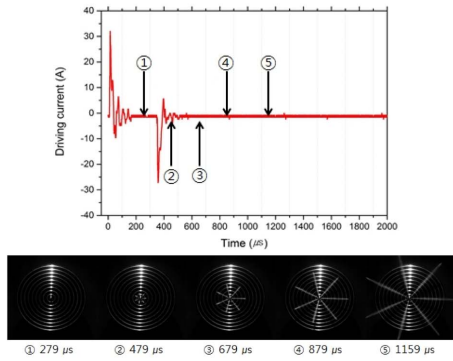


(c) BD100-Mie spray images

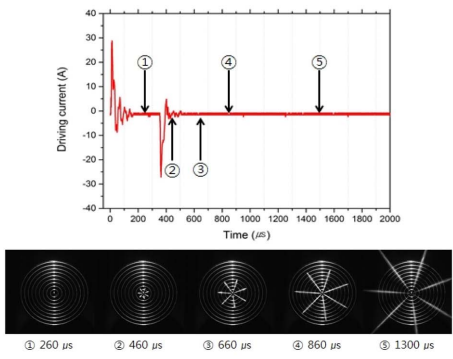
Fig. 3 Mie spray images and input current for different driving mechanism injectors at pressure of 300 bar in case of direct-acting piezo injector

(⑤) 기간이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

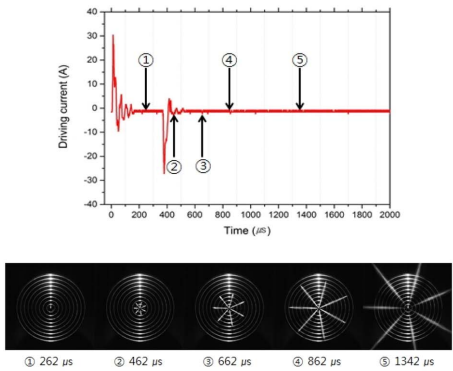
Fig. 6은 취득한 분무의 거시적 이미지를 정량적으로



(a) Diesel-Mie spray images



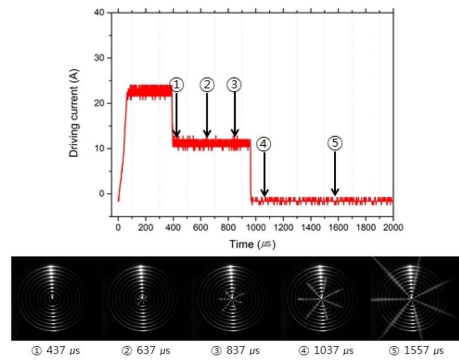
(b) BD30-Mie spray images



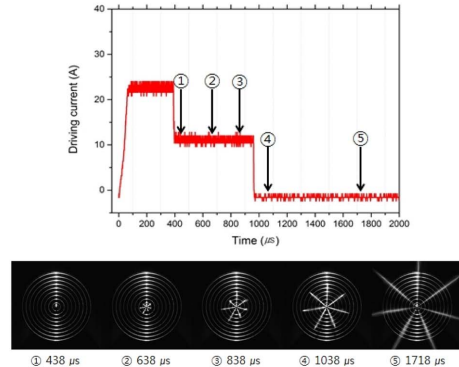
(c) BD100-Mie spray images

Fig. 4 Mie spray images and input current for different driving mechanism injectors at pressure of 300 bar in case of hydraulic-servo piezo injector

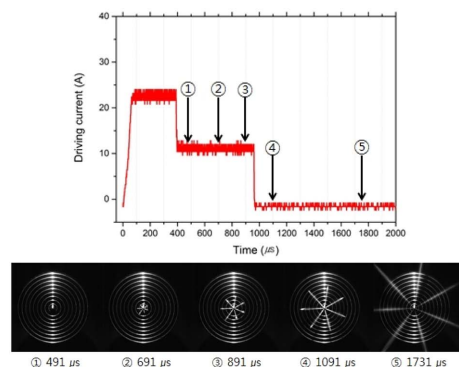
분석 및 각 spray plume의 분무침투거리 평균값을 나타낸 결과이다. 직접구동형 피에조 인젝터의 우수한 응답속도로 인해 다른 두 가지 인젝터에 비해 분무발달 속도가 빠른 것을 확인할 수 있었다. 또한, 분무침투거리 이 비교를 위해, 분사 시작 후(ASOI) 40 μs 간격으로 측



(a) Diesel-Mie spray images



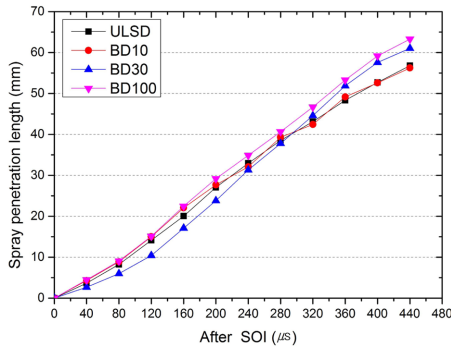
(b) BD30-Mie spray images



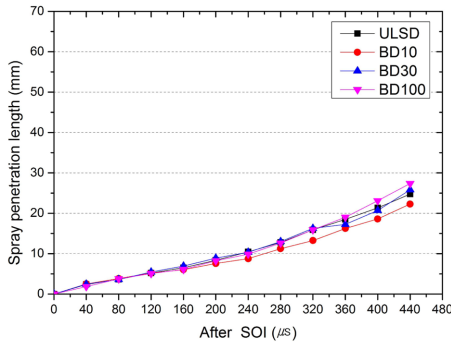
(c) BD100-Mie spray images

Fig. 5 Mie spray images and input current for different driving mechanism injectors at pressure of 300 bar in case of hydraulic-servo solenoid injector

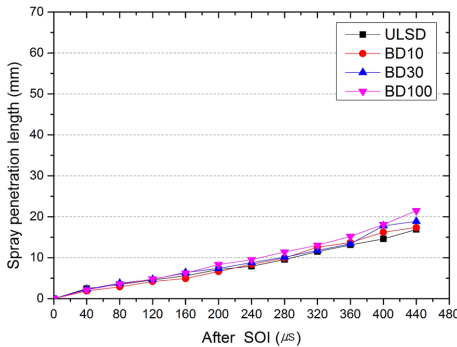
정을 하였다. 세 가지 인젝터의 분사 시작 후(ASOI) 440 μs 지점의 분무침투거리를 경유를 기준으로 BD100 과 비교하였다. 비교 결과, 직접구동형 피에조 인젝터는 경유 대비 BD100의 침투거리가 11.3% 증가하였으며, 유압서보형 피에조 인젝터의 경우 10.5%, 유압서보형



(a) Direct-acting piezo injector



(b) Hydraulic-servo piezo injector



(c) Hydraulic-servo solenoid injector

Fig. 6 Distribution of spray penetration length at injection pressure at 300 bar with respect to different bio-diesel blending ratios

솔레노이드 인젝터는 27.0% 증가함을 알 수 있었다. 이는 바이오디젤과 경유의 분무특성이 거의 유사하지만 바이오디젤의 높은 점성과 밀도 특성으로 인한 것으로 알려져 있다⁸⁾. Fig. 7은 동일한 양의 연료를 분사하였을 경우, 각 인젝터의 바이오디젤 혼합율별 분사시간을 나타내고 있다. 직접구동형 피에조 인젝터의 경우 빠른 응답속도로 인해 동일한 양의 연료를 짧은 시간 내에 분

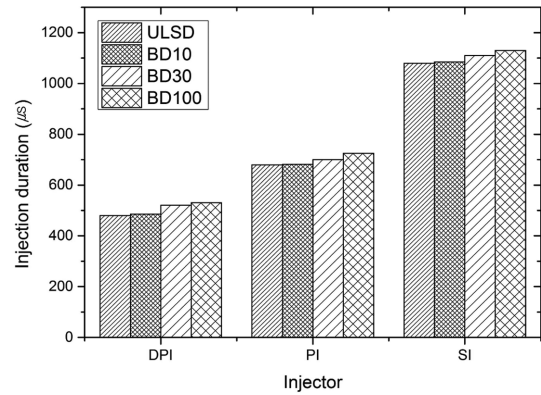


Fig. 7 Distribution of spray duration at injection pressure at 300 bar with respect to different bio-diesel blending ratios

사함을 확인하였고, 경유 대비 BD100의 분사시간이 4.6% 증가함을 알 수 있었다. 유압서보형 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 경우, 경유 대비 BD100의 분사시간이 6.6%, 10.4%로 각각 증가하는 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 클린디젤 엔진에 사용되고 있는 세 가지 인젝터(DPI, PI, SI)를 대상으로, 커먼레일 연료 분사시스템을 통한 바이오디젤의 분사특성을 비교한 것이다. 이를 위해 정적챔버와 고속카메라를 통한 고압 분무 가시화 실험을 수행하였다. 이를 통해 얻은 주요 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 바이오디젤 혼합율에 상관없이 DPI, PI, SI의 순서대로 연료의 분무 발달속도가 빠름을 알 수 있었다. 또한, 바이오디젤 혼합율이 증가함에 따라 세 가지 인젝터의 분사 종료점이 증가함을 알 수 있었다.

(2) 분무침투길이 비교 결과, 직접구동형 피에조 인젝터는 경유 대비 BD100의 침투길이가 11.3% 증가하였으며, 유압서보형 피에조 인젝터의 경우 10.5%, 유압서보형 솔레노이드 인젝터는 27.0% 증가함을 알 수 있었다.

(3) 동일한 양의 연료 분사시간 비교결과, 직접구동형 피에조 인젝터의 경우 경유 대비 BD100의 분사시간이 4.6% 증가하였고, 유압서보형 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 경우, 경유 대비 BD100의 분사시간이 6.6%, 10.4%로 각각 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차 기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 국립환경과학원 교통환경연구소, “클린 디젤자동차 현황과 전망”, 2009.
- (2) Shuichi Matsumoto, Charles Klose, Jason Schneider, Noriaki Nakane, Daiji Ueda and Shigeyuki Kondo, “4th Generation Diesel Common Rail System : Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine”, SAE Technical paper 2013-01-1590, 2013.
- (3) Jun Deng, Chunwang Li, Zongjie Hu, Zhijun Wu and Lihuang Li, “Spray Characteristics of Biodiesel and Diesel Fuels under High Injection Pressure with a Common Rail System”, SAE technical paper 2010-01-2268, 2010.
- (4) Krzysztof Wislocki, Ireneusz Pielecha, Dmytro Maslennikov and Jakub Czajka, “ Analysis of Bio-Diesel Spray Atomization in Common-Rail Piezoinjector System”, SAE technical paper 2010-01-2282, 2010.
- (5) G. Dober, N. Guerrassi and K. Karimi, “Mixture Preparation and Combustion Analysis, a Key Activity for Future Trends in Diesel Fuel Injection Equipment”, SIA Diesel Power-train International Conference, 2012.
- (6) 조인수, 권지원, 이진욱, “AMESim 기반 CRDi용 인젝터의 2단분사 동적거동 특성해석”, 한국액체미립화학회지, 제17권, 2호, 2012, pp. 57~63.
- (7) Azwan Sapit, Sho Nagayasu, Yasunori Tsuboi, Yuzuru Nada and Yoshiyuki Kidoguchi, “A Study on Improvement of Diesel Spray Characteristics Fueled by Rape-seed Oil”, SAE technical paper 2011-32-0561, 2011.
- (8) Liguang Li, Xusheng Zhijun Wu, Jun Deng and Chengjie Huang, “Experimental Study of Biodiesel Spray and Combustion Characteristics”, SAE technical paper 2006-01-3250, 2006.