

## 바이오디젤이 혼합된 디젤 연료의 분무 및 연소 특성에 관한 연구

서현욱\*·전충환\*†

부산대학교 기계공학부 대학원, \*부산대학교 기계공학부

(2014년 12월 15일 접수, 2015년 2월 2일 수정, 2015년 2월 5일 채택)

### A Study on Spray and Combustion Characteristics of Biodiesel Blended Diesel Fuel in a Constant Volume Combustion Chamber

Hyun-uk Suh, Chung-hwan Jeon\*†

Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 15 December 2014, Revised 2 February 2015, Accepted 5 February 2015)

#### 요 약

바이오디젤은 재생가능한 친환경적인 연료로서 화석연료의 대체에너지로 수송분야에서 각광받고 있다. 따라서 바이오디젤의 사용량은 향후 꾸준히 증가할 것으로 보이며, 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 순수 디젤 대비 바이오디젤이 질량기준으로 0%, 5%, 20%, 50%, 100% 혼합된 연료를 사용하여 분무 및 연소 실험을 진행하고, 분무각, 평균 입경, 열발생율 등의 특성을 도출하였다. 실험 결과, 바이오디젤의 혼합률이 증가할 수록 연료의 점도 및 밀도가 증가하여 분무각과 특정 위치에서의 평균 입경이 작아지는 것을 확인할 수 있었으며, 바이오디젤의 함산소 특성으로 인해 초기 연소가 촉진되며, 이로 인해 연소 종료 시점이 앞당겨 지는 것을 볼 수 있었다.

**주요어** : 바이오디젤, 분무각, 평균 입경, 열발생률

**Abstract** - The objective of this study is to investigate the effect of biodiesel blending on spray and combustion characteristics. In order to this, blended fuels containing 0, 5, 20, 50, 100% biodiesel in weight fraction was injected via common rail to constant volume combustion chamber. As a result, spray cone angle decreased and the Sauter mean diameter increased because of the higher dynamic viscosity and density of biodiesel, however, it does not seemed that spray penetration was affected by these factors considerably. In the combustion experiment, ignition delay of biodiesel was shorter than that of diesel due to higher cetane number. And the peak value of heat release rate increased and the end of combustion was advanced owing to higher combustion efficiency cause by the characteristic of oxygenated fuel.

**Key words** : Biodiesel, Spray cone angle, Sauter mean diameter, Heat release rate

## 1. 서 론

오늘날 지속적인 화석연료의 고갈로 인해 대체에너

지에 대한 수요가 증가하고 있으며, 바이오디젤은 적 용하기 용이한 대체에너지로 각광받고 있다[1].

특히, 바이오디젤은 대두, 카놀라, 동물성 지방, 폐 식용유 등 재생가능한 자원에서 생산될 뿐만 아니라 기존 압축착화기관의 구조 변경 없이 사용할 수 있으며, 또한 연료 내에 산소를 함유하고 있어 연소 효율 을 증진시킬 수 있고 입자상 물질의 저감에도 효과가 있다[2,3]. 이와 더불어 연소에 의해 생성된 이산화탄

†To whom corresponding should be addressed.

Energy Conversion System Lab. School of Mechanical Engineering, Pusan National University Gijeingwan 30 San Jangjeon-dong, Geumjeong-Ku, Busan, 607-735, Korea  
Tel : 051-510-3051 E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

소가 원료가 되는 식물의 광합성 작용을 통해 흡수되기 때문에 대기 중의 이산화탄소 농도 증가를 억제할 수 있으며, 생분해도가 높아 연료 내 독성이 비교적 낮다는 점으로 인해 사용이 증가하고 있다[4].

국내에서는 2002년부터 수도권과 전라북도 등에서 바이오디젤 혼합 연료의 시범 보급이 시작되었고, 2006년 3월 이래로 산업자원부와 정유사 간 협회에 의해 바이오디젤 원액 함유율을 매년 증가시켜 2013년에는 2% 혼합되어 보급되고 있으며, 장기적으로는 5%까지 혼합률을 증가시킬 계획을 수립하였다[5,6].

이로 인해 바이오디젤의 사용은 꾸준히 증가할 것으로 판단되며, 혼합률이 증가함에 따른 영향을 고찰하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 커먼레일 시스템이 적용된 정적연소기에서 바이오디젤의 혼합률을 달리한 연료에 대해 분무 및 연소 실험을 진행하고 그에 따른 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. 실험 조건

본 연구에서 사용한 연료의 물성치는 Table 1에 표기하였다. 연료는 순수 디젤에 폐식용유 바이오디젤을 질량 비율로 혼합하여 제조되었으며, 혼합률이 증가함에 따라 연료의 밀도와 동점도가 증가하며, 발열량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 실험 조건은 분사압과 정적 연소기 내 분위기압을 고정한 상황에서 바이오

디젤의 혼합률만 변경하여 진행하였으며, 연소 실험의 경우 수소 이단 연소에 의해 분위기압이 60 bar 부근에서 진행되었다. 각 실험의 실험 조건은 Table 2에 표기하였다.

### 2-2. 분무 및 연소 실험 장치

연료는 커먼레일 시스템을 통해 정적연소기 내로 분사되며, 분사압, 분사기간 등의 분사 조건은 인젝터 컨트롤러(CRDI inject tester, The system)에 의해 제어된다. 분무 및 화염 이미지는 초고속카메라(SA4, Pho-

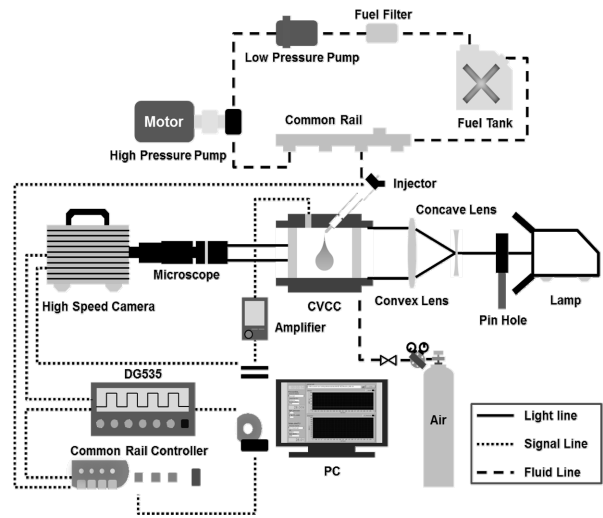


Fig. 1. Schematic diagram of non-evaporating spray experimental setup

Table 1. Properties of fuel with respect to biodiesel blending ratio

Items	Units	Fuel type				
		BD0	BD5	BD20	BD50	BD100
density	g/ml	0.814	0.817	0.825	0.842	0.872
dynamic viscosity	mm <sup>2</sup> /s	3.47	3.54	3.77	4.40	5.88
LHV	kJ/kg	45949	45814	45245	43404	39831

Table 2. Experimental conditions of spray and combustion

Items	Units	Value				
Ambient pressure	bar	spray			45	
		combustion			60	
Ambient temperature	K	spray			340	
Blending ratio	wt %	0	5	20	50	100
Injection pressure	bar	1200				
Injection signal duration	ms	0.7				

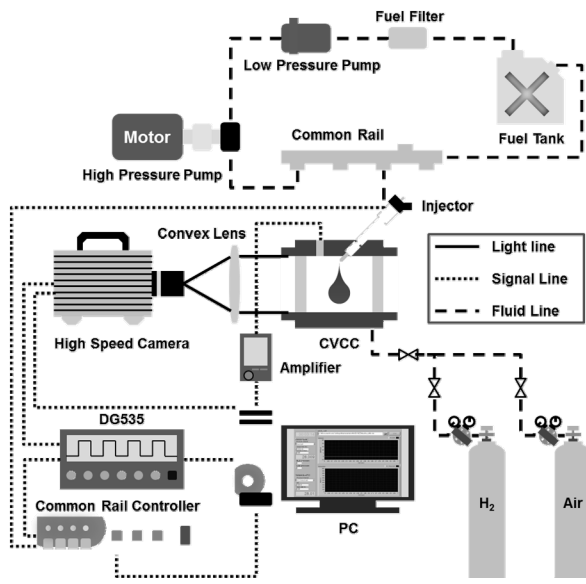


Fig. 2. Schematic diagram of combustion experimental setup

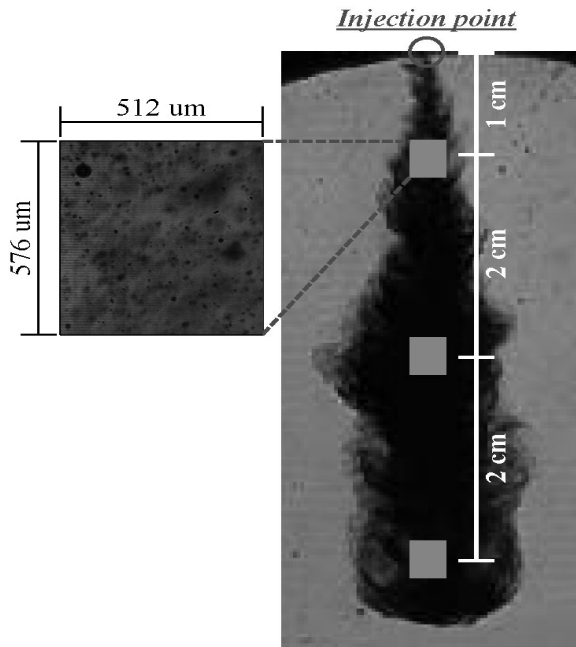


Fig. 3. Image taking locations of droplets

tron)를 통해 취득되며, 액적 촬영 시에는 초고속카메라에 마이크로스코프(K2, Infinity)를 장착하였다. 인젝터와 초고속카메라의 동기화는 LabView와 함수발생기(DG535, Stanford Research)간의 GPIB통신과 함수발생기의 TTL신호로 이뤄지며, 목표 압력에서 분사와 촬영이 동시에 시작되도록 구성된다. 또한, 연소 실험 시에는 이단 연소 방식을 사용하기 위해 수소가

스 공급라인이 추가적으로 설치되며, 수소의 착화를 위해 예열플러그(F 002 G50 068, Bosch)를 사용하였다. 액적 촬영 및 연소 실험 장치의 개략도는 Fig. 1-2에 도시하였으며, 액적의 촬영 위치는 Fig. 3과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 분무관통거리 및 분무각

본 연구에서 거시적 분무 특성은 취득된 이미지의 이진화 작업을 수행한 후 측정되었으며, 분공부터 분무의 끝단까지의 길이를 분무관통거리, 분공과 분공에서 3 cm 아래 지점의 분무폭으로 계산된 각도를 분무각이라 한다. Fig. 4는 시간에 따른 바이오디젤 혼합물별 분무발달과정을 도시한 것으로, 축방향과 반경방향으로 발달하는 분무의 형태와 실제 분사가 1.3 ms 가량 지속됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 바이오디젤의 혼합물에 따른 분무관통거리 측정 결과를 도시한 것이다. 분사 초기에는 혼합물에 따른 차이가 크지 않으며, 액주분열시간 이후부터 다소간의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 분사 후기로 갈수록 서로 수렴하는 형태를 보이며, 순수 디젤의 결과와 비교 시 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다.

Fig. 6은 분사 말기에 측정된 분무각을 도시한 것이다. 혼합물에 따라 선형적인 변화를 보이지는 않으나 바이오디젤이 혼합됨에 따라 분무각이 협소해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 바이오디젤의 혼합에 따라 연료의 밀도가 증가하면서 분사 시 연료가 주위 공기의 영향을 비교적 덜 받은 것과 연료의 점도 증가로 인해 액주 내에 속도 구배와 분공 및 주위 공기와의 항력이 보다 강하게 발생하여 반경방향 속도가 감소한 것이 원인으로 사료된다.

#### 3-2. 평균 입경

분무관통거리와 분무각의 실험 결과를 종합해 볼 때, 바이오디젤의 혼합률이 증가함에 따라 연료는 비교적 밀집된 형태로 존재할 것으로 판단되며, 이에 따라 무화의 질이 저하될 것을 예상할 수 있다. 따라서 이를 확인하기 위해 분공으로부터 특정거리만큼 떨어진 위치에서 액적을 촬영하고 이미지를 분석하여 국소 평균입경을 산출하였으며, 여기서 평균 입경은 SMD(Sauter Mean Diameter)를 말한다.

Fig. 7은 바이오디젤의 혼합률과 분공부터의 거리

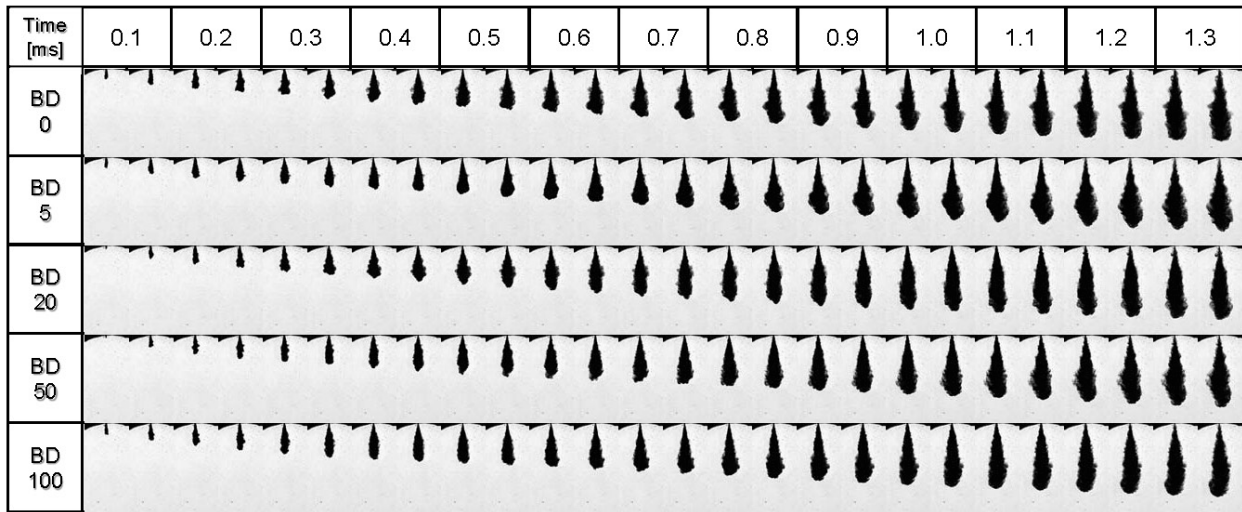


Fig. 4. Images of non-evaporating spray development process with respect to biodiesel blending ratio

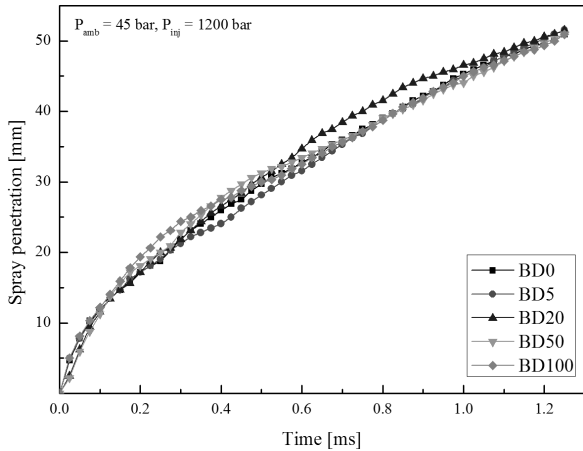


Fig. 5. Spray penetration with respect to biodiesel blending ratio

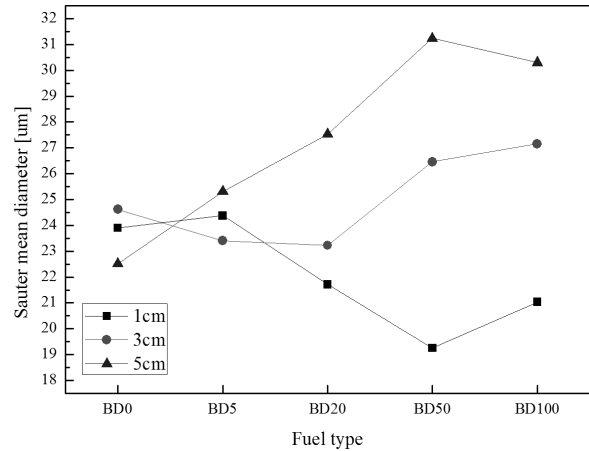


Fig. 7. Local SMD with respect to biodiesel blending ratio

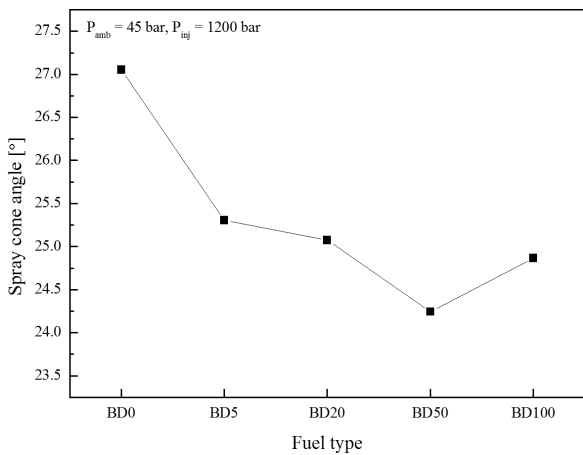


Fig. 6. Spray cone angle with respect to biodiesel blending ratio

별로 산출된 국소 평균 입경을 도시한 것으로, 거리 별 평균 입경의 경향이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 분공에서 10mm 떨어진 위치는 액주의 1차 분열이 발생하기 시작하는 부근으로 높은 분사압에 따른 난류 유동의 영향이 지배적이었던 것으로 판단되며, 이에 따라 연료 물성치에 따른 경향이 두드러지지 않는 것으로 보인다. 반면, 분공에서 보다 멀어질수록 바이오디젤의 높은 점성과 밀도에 의해 분열이 원활히 이뤄지지 않은 액적과 분열 후 다시 중합하는 액적들이 발생하여 바이오디젤 혼합률이 높은 연료의 평균 입경이 증가한 것으로 사료된다. 따라서 바이오디젤이 혼합된 연료는 순수 디젤 연료에 비해 무화도가 떨어진다고 할 수 있다.

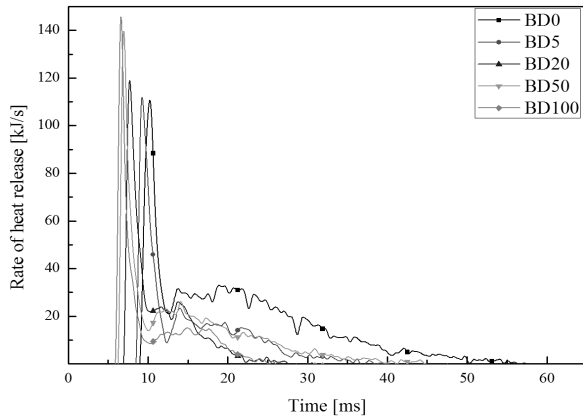


Fig. 8. Heat release rate with respect to biodiesel blending ratio

### 3-3. 열발생률

열발생률은 정적연소기 내부의 시간에 따른 압력 변동을 통해 계산되었으며, 각 연료의 열발생률 곡선은 Fig. 8에 도시하였다. 바이오디젤의 혼합률이 증가함에 따라 점화 지연이 단축되며, 이는 바이오디젤의 세탄가가 높은 것이 원인으로 보인다. 또한 예혼합 연소 단계에서의 최대 열발생률이 증가하고 연소 종료 시점이 앞당겨지는 경향을 확인할 수 있으며, 순수 디젤에 비해 연소가 촉진되었다고 볼 수 있다. 이는 바이오디젤의 혼합에 따라 평균 입경이 증가한 결과와는 상충되는 것으로, 정적 연소에서 액적의 크기보다는 바이오디젤의 함산소 특성이 지배적으로 나타난 것으로 판단되며, 또한 비증발 분무와 달리 연소 시의 온도 상승으로 인한 미소 폭발 현상이 발생했을 가능성도 있을 것으로 사료된다[7].

## 4. 결론

본 연구에서는 디젤과 폐식용유 바이오디젤을 혼합한 연료에 대해 정적연소기에서 분무 및 연소 실험을 수행하였으며, 바이오디젤의 혼합률의 증가에 따라 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 분무관통거리는 뚜렷한 경향성이 나타나지 않으나, 연료 밀도 및 점도의 증가로 인해 분무각이 협소해지고 평균 입경이 증가하는 경향은 확인할 수 있었다. 또한 평균 입경의 경향은 분공에서 멀어질수록 보다 명확히 나타났으며, 전반적으로 무화의 질이 떨어진다고 할 수 있다.

2. 열발생률 곡선을 통해서 바이오디젤의 높은 세탄가로 인해 점화 지연이 단축되는 것을 볼 수 있으며,

함산소 특성으로 인한 연소의 촉진으로 열발생률의 최대값이 증가하고 연소 종료 시점이 앞당겨지는 경향을 확인할 수 있었다.

3. 연소의 촉진에도 불구하고 바이오디젤의 낮은 발열량으로 인해 실제 압력의 상승은 낮아지는 것을 확인하였으며, 실제 엔진에 적용시 낮은 출력의 원인이 될 수 있다고 판단된다.

## 후기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20144010200780)입니다.

## Reference

1. Syed Ameer Basha, K. Raja Gopal, S. Jebaraj: "A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 1628-1634, (2009)
2. Seung Hyun Yoon, Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee: "Effect of Spray and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics of Biodiesel Fuel in a Compression Ignition Engine", *Energy & Fuels*, Vol. 23, 1486-1493, (2009)
3. Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tan, Xiukun Han: "Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel", *Int. J. Energy Res.* Vol. 32, 1329-1338, (2008)
4. 정규수, 이동곤, 노현구, 이창식: "바이오디젤 혼합 연료를 적용한 커먼레일 디젤엔진에서 파일럿 분사에 따른 연소 및 배기 특성", *한국연소학회지*, Vol. 16, No. 4, 1-7, (2011)
5. 김재곤, 박조용, 전철환, 민경일, 임의순, 정충섭, 이진휘: "다양한 식물성유지에서 유래된 바이오디젤의 연료 특성", *한국화학학회지*, Vol. 30, No. 1, 35-48, (2013)
6. 이상득, 정석호: "전자 제어 분사식 과급디젤기관에서 에스테르화와 비에스테르화 바이오 디젤유의 연소 특성 비교", *한국마린엔지니어링학회지*, Vol. 37, No. 1, 53-58, (2013)
7. 정만석, 이경환, "경유와 바이오 디젤 액적의 혼합 비율과 크기에 따른 연소특성", *에너지공학회지*, Vol. 18, No. 2, 101-107, (2009)