

커먼레일식 분사시스템에서 바이오디젤연료의 분사특성에 관한 연구

서영택¹⁾ · 서현규¹⁾ · 이창식^{*2)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

A Study on the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail Injection System

Young Taek Seo¹⁾ · Hyun Kyu Suh¹⁾ · Chang Sik Lee^{*2)}

¹⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 5 January 2007 / Accepted 2 April 2007)

Abstract : The object of this work is to analyze the macroscopic spray performance and atomization characteristics between diesel and biodiesel fuels. In this study, the effects of mixture ratios of biodiesel fuel on the spray tip penetration, fuel injection rate, spray cone angle, and the atomization characteristics such as droplet size, droplets distribution, and spray arrival time according to the axial distance were investigated at various injection parameters. It is revealed that the injection rate is more affected by injection pressure than mixture ratio. And, the spray development process is closely matched between diesel and biodiesel fuels. However, the droplet atomization characteristics of biodiesel shows deteriorated results as the mixture ratio of biodiesel increased because of the high viscosity and density.

Key words : Biodiesel(바이오디젤), Injection rate(분사율), Spray tip penetration(분무도달거리), SMD(Sauter 평균 입경), PDPA(위상 도플러 입자 분석기)

Nomenclature

- BD : biodiesel
- L_z : axial distance from injector tip
- L_R : radial distance from the injector axis
- P_{amb} : ambient pressure
- P_{inj} : injection pressure
- Q_{inj} : injection quantity
- SMD : sauter mean diameter
- T_{asoi} : time after start of injection
- Θ : spray injection angle

1. 서론

화석연료의 고갈에 대응하고 환경오염을 방지하기 위한 노력의 일환으로 기존 디젤 연료를 대체할 수 있는 여러 대체 연료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대체 연료 중 바이오디젤은 일반적으로 사용되는 디젤 연료와 물성이 유사하여, 기존 디젤 엔진이나 연료 시스템 및 공급체제를 그대로 사용할 수 있는 특징이 있다.

바이오디젤은 동물성 또는 식물성 기름에서 재생 가능한 연료일 뿐만 아니라, 11~15%의 산소를 포함하고 있기 때문에 연소 배출물이 현저하게 감소하는 장점을 가지고 있다. 이미 국내에서도 2006년 7

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

월부터 바이오디젤 0.5%를 디젤 연료와 혼합하여 판매하고 있으며, 그 사용은 점차 확대될 것으로 기대된다.

그동안 바이오디젤 연료에 관한 연구는 주로 연소 및 배출물 특성에 주안을 두고 진행되었다.

Ramahas 등¹⁾은 디젤 엔진에 바이오디젤 연료를 사용한 연소실험을 통해 대체 연료로의 가능성을 입증하였고, 윤 등²⁾은 직접분사식 디젤 엔진에서 바이오디젤과 일반적으로 사용되는 디젤 연료의 혼합비가 연소 및 배출물에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한 Goering 등³⁾은 식물성 연료 11개에 대한 연소 실험에서 디젤 연료의 대체 연료로서의 가능성을 입증하였으며, 이 등⁴⁾은 바이오디젤 연료의 혼합비에 따른 분무 및 연소 특성 실험을 통해 대체 연료로의 가능성을 입증하였다. 이외에도 바이오디젤 연료의 디젤 엔진 적용 가능성, 연소 및 배출물 특성에 대한 다수의 논문이 발표되었다.^{5,6)}

바이오디젤의 물성에 대한 연구로 Tate 등^{7,8)}은 온도에 따른 바이오디젤의 점성과 밀도의 변화를 측정하였으며, 서 등⁹⁾은 커먼레일식 분사시스템을 이용하여 바이오디젤 연료의 종류에 따른 분무 미립화 특성과 거동에 대해 연구하였다.

그러나 디젤 엔진에서 바이오디젤 연료의 연소를 최적화하기 위해서는 바이오디젤 연료의 분사특성을 좀 더 정확하게 파악해야 한다. 따라서 바이오디젤이 디젤 연료보다 높은 점성을 감안하여 실제 사용가능한 혼합비의 바이오디젤에 대해 다양한 실험 조건을 통한 더욱 체계적이고 폭 넓은 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 디젤 엔진의 고효율과 저공해 특성을 구현하기 위하여 사용되고 있는 커먼레일식 분사 시스템을 사용하여 디젤 연료와 바이오디젤 연료의 혼합비에 따른 분무 거동 및 미립화 특성을 실험을 통하여 디젤 연료의 특성과 비교분석함으로써 바이오디젤의 분사 및 미립화 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

분사율 측정을 위하여 구축한 실험 장치는 커먼레일식 분사 시스템, 인젝터 드라이버 및 데이터 검

출부, 분사율 측정부로 구성하였다.

분사율 측정은 연료로 가득 채워진 긴 관 내부로 연료가 분사될 때 측정관 내부의 압력변화를 측정하여 분사율을 계산하는 Bosch법¹⁰⁾을 사용하였다.

연료를 고압 상태로 안정적으로 공급하기 위하여 두 개의 고압 펌프 (Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 펌프로 공급되는 압축 공기의 압력을 이용하여 커먼레일 내의 압력을 조정하였다. 또한, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200)를 사용하여 연료 분사량 및 분사 시기를 제어하였으며, 관내 압력 변화를 측정하기 위해 최고 200bar까지 측정 가능한 피에조식 압력센서(KISTLER, 601A)를 사용하였다. 분사율 데이터는 분사율 측정 프로그램을 작성하여 DAQ Board (National Instrument, NI 6013)로부터 취득하였다.

연료의 분무 발달 과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템과 분무 미립화 특성인 입경과 분무 속도를 측정하기 위한 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 광원으로는 514.5nm의 파장을 가진 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 고해상도 ICCD카메라와 이미지 그래버를 이용하여 분무 이미지를 취득하였다. 분사 후 시간의 경과에 따른 분무 미립화 특성을 취득하기 위해, 디지털 신호 발생기를 이용하여 인젝터 분사 신호와 PDPA 시스템의 신호 분석기를 동기화하였다. 가시화 시스템과 PDPA 시스템에 사용된 레이저의 자세한 제원은 Table 1과 같다.

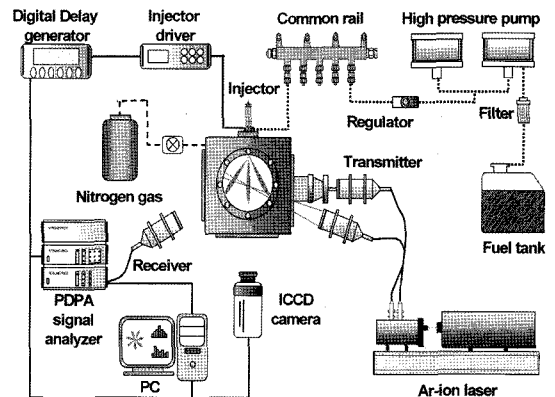


Fig. 1 Schematics of spray visualization system and PDPA system

Table 1 Specifications of the visualization system

Light source	Ar-ion laser	
Wave length(nm)	514.5	
Collection angle(°)	30	
Focal length (mm)	Transmitter	500
	Receiver	500

본 실험에서 사용한 인젝터는 노즐의 지름이 0.119mm인 커먼레일식 7공 인젝터이다. 인젝터 노즐의 개략도는 Fig. 2에 나타내었으며 자세한 제원은 Table 2와 같다.

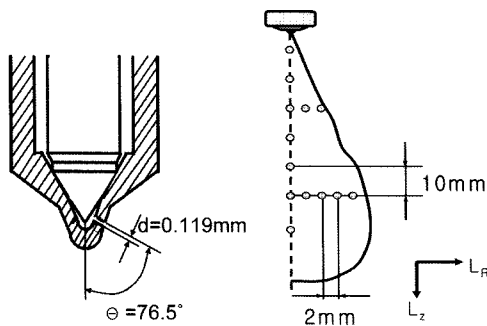


Fig. 2 Schematic of injector nozzle tip and measurement point of the PDPA experiment

Table 2 Specification of the Injector

Injection system	Common-rail
Number of holes	7
Hole diameter(mm)	0.119
Hydraulic flow rate(cm ³ /30s)	315
Injection angle(°)	153
Volume(cm ³)	18

2.2 실험 방법

바이오디젤 연료의 분무 거동 및 미립화 특성을 파악하기 위하여 바이오디젤 연료의 혼합비를 변화시켜 실험을 수행하여, 취득한 실험 결과를 디젤 연료와 비교 분석하였다. 실험에 사용한 바이오디젤은 대두유(soybean oil)이고, 산화를 막기 위해 연료를 밀봉한 상태에서 실험을 수행하였다. 바이오디젤의 혼합비는 디젤 연료와의 체적비로 나타내었다. 예를 들어 BD20%란, 바이오디젤 20%와 디젤 연료 80%를 체적 기준으로 혼합한 것을 나타낸다. 바이오디젤의 혼합비에 따른 연료의 물성치 변화는

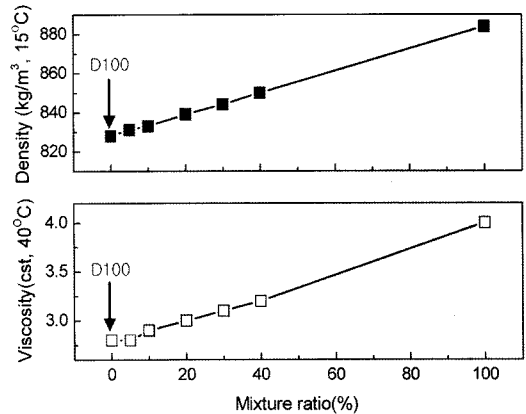


Fig. 3 Comparison of fuel property according to mixture ratio

Fig. 3에 나타내었다. 바이오디젤은 디젤 연료에 비해 높은 점도와 밀도를 가지고 있기 때문에 바이오디젤의 혼합비가 높아질수록 연료의 점도와 밀도가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

분사율은 혼합비가 다른 세 가지 연료(D100, BD20, BD40)를 사용하여 측정하였으며, 측정관 내의 압력을 2MPa로 유지하고, 분사 압력을 60MPa, 80MPa, 100MPa으로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 분사량은 1.0mg에서 10.0mg까지 0.5mg씩 증가시키며 100회씩 측정하였다.

또한, 바이오디젤의 분무 발달 과정을 비교 연구하기 위한 가시화 실험 조건으로는 분사 압력은 60MPa, 80MPa, 100MPa이며, 분위기 압력은 2MPa, 4MPa로 변화시켜 실험을 수행하였다. 인젝터의 분사시간은 1ms이며, 가시화 촬영은 0.2ms부터 2ms까지 0.1ms 간격으로 수행하였다.

분무 입경 및 속도의 측정 데이터는 두 개의 채널이 동시에 취득한 데이터가 30,000개가 되도록 하였으며, 2μm에서 100μm로 유효 입경의 범위를 측정하였다. 레이저의 출력은 데이터 취득율과 산란 등을 고려하여 1W로 일정하게 실험을 수행하였다.

분사 압력은 PDPA시스템의 측정성능을 고려하여 유효한 데이터를 취득하기 위하여 60MPa로 일정하게 하였다. 또한, 측정점은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 인젝터 축 방향으로 10mm간격으로, 반경 방향으로 2mm간격으로 측정하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental conditions

Mixture ratio(%)	Diesel	100
	Biodiesel	20, 40
Injection rate measuring system	Injection pressure(MPa)	60, 80, 100
	Injection quantity(mg)	1.0 ~ 10.0
	Number of injection	100
Spray visualization system	Injection duration(ms)	1
	Injection pressure(MPa)	60, 80, 100
	Ambient pressure(MPa)	2, 4
PDPA system	Injection duration(ms)	1
	Injection pressure(MPa)	60
	Ambient pressure(MPa)	0.1

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분사율 특성

Fig. 4는 분사 압력을 80MPa로 일정하게 한 후 바이오디젤의 혼합비에 따른 분사량과 분사시간과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 분사량이 동일한 경우, 분사시간은 연료의 혼합비와 무관하게 동일한 경향을 보였다.

분사 압력이 분사율 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분무 및 연소특성이 디젤 연료와 비슷한 BD20 연료를 사용하여, 분사량이 각각 6mg, 10mg인 경우 분사율 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 분사 압력이 20MPa 증가할수록 최대 분사율은 12%, 기울기는 40% 증가하는 반면 분사시간은 10% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 동일한 양의 연료를 분사할 때 분사 압력이 증가할수록 높은 압력으로 인해 분사 초기에 많은 양의 연료가 분

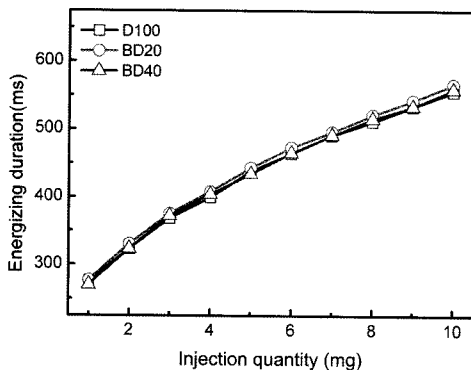


Fig. 4 Comparison of energizing duration between diesel and biodiesel($P_{inj}=80MPa$)

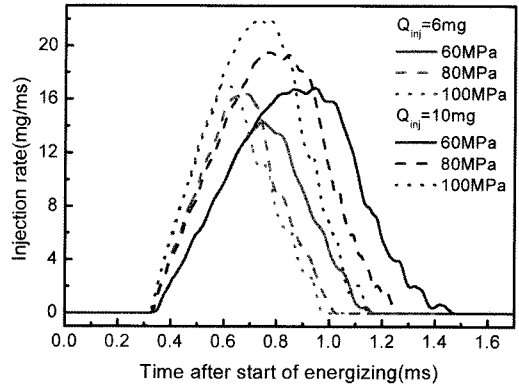


Fig. 5 Comparison of injection rate of biodiesel with diesel according to injection pressure(Mixture ratio=20% , $P_{amb}=2MPa$)

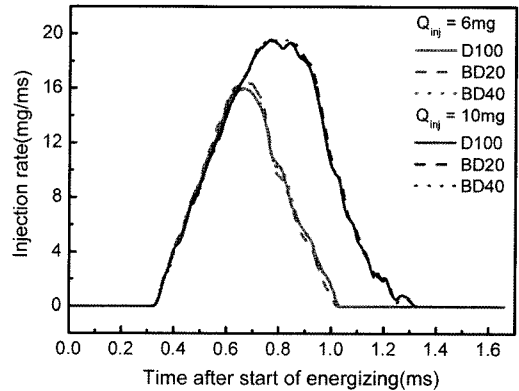


Fig. 6 Comparison of injection rate of biodiesel and diesel according to mixture ratio($P_{inj}=80MPa$, $P_{amb}=2MPa$)

사되어 분사시간이 감소하기 때문이라 판단된다.

Fig. 6은 바이오디젤의 혼합비가 분사율 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 분사량이 각각 6mg, 10mg인 경우의 분사율을 측정하여 비교한 것이다. 이 선도에 나타난 바와 같이 바이오디젤의 혼합비가 증가하여도 최대 분사율과 분사 시간은 차이가 없는 동일한 경향을 보였다. 이러한 분사율 특성으로 인해, 기존의 디젤 엔진에 바이오디젤을 혼합한 연료를 적용하여도 분사 특성에는 변화가 없는 것으로 볼 수 있다.

3.2 분무의 발달 과정

Fig. 7은 바이오디젤의 혼합비에 따른 분무의 발달 과정을 분사 시작 후 경과 시간(T_{soli})에 따라 나

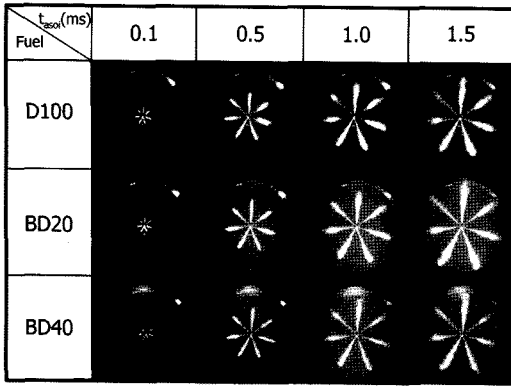


Fig. 7 Comparison of spray development process between diesel and biodiesel ($P_{inj}=80\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$)

타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 혼합비에 관계없이 바이오디젤의 분무 발달 과정은 시간경과에 따라 디젤 연료와 큰 차이 없이 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 분무 도달 거리

분무 도달 거리는 실제 엔진에 적용 할 때 연소실 크기를 결정하고 연소 현상을 예측하는데 중요한 분무 특성 중 하나이다.

Fig. 8은 가시화 실험 결과로부터 얻은 분무 도달 거리를 여러 가지 분사 압력에 대하여 나타낸 선도이다. 이 선도에 나타난 바와 같이 분사 압력이 증가할수록 바이오디젤의 분무 도달 거리는 연료의 혼합비에 관계없이 증가하는 경향을 보였으며, 분사 초기에는 도달 거리가 급격히 증가하지만 그 증가

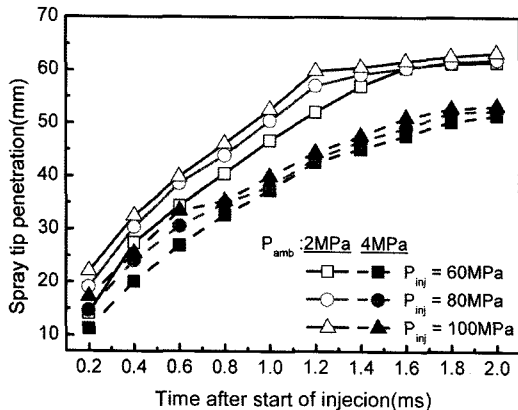


Fig. 8 Effect of injection pressure on the spray tip penetration (Mixture ratio=20%)

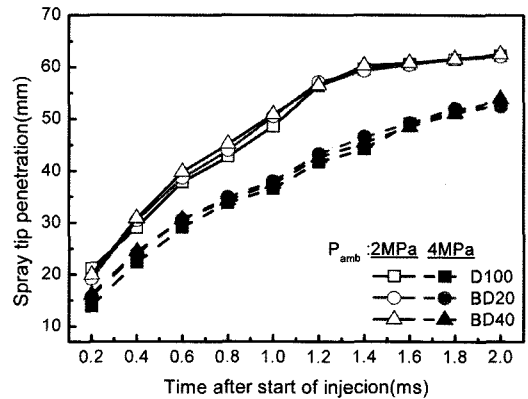


Fig. 9 Effect of mixture ratio on the spray tip penetration ($P_{inj}=80\text{MPa}$)

폭은 시간이 지날수록 감소함을 확인할 수 있었다. 또한, 분위기 압력이 2MPa 증가할수록 분무 도달 거리는 16% 감소하였는데, 이는 고압의 분위기 조건의 영향으로, 연료분무 속도가 주변 기체의 항력 때문에 저하되어, 운동량이 감소한 결과로 판단된다.

분사 압력이 80MPa의 경우, 분위기 압력을 일정하게 한 경우 바이오디젤의 혼합비에 따른 분무 도달 거리를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 분사 압력이 동일한 경우 바이오디젤의 혼합비에 따라 분무 도달 거리의 차이는 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기존 디젤 엔진에 바이오디젤을 혼합한 연료를 사용할 경우 분무 및 증발 특성을 개선하면 디젤 연료와 같은 성능인자를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 분무각

연료의 분사 압력과 분위기 압력이 분무각에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 분사 압력이 증가할수록 분사 초기의 분무각은 감소하지만, 이후 분위기 압력의 영향으로 인하여 혼합비나 분사 압력과는 상관없이 일정한 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 분사 초기에는 연료가 높은 운동량을 가지고 있으나 이후 분위기 항력으로 인해 일정한 운동량을 가지게 되기 때문이라 판단된다.

Fig. 11은 바이오디젤의 혼합비의 영향을 알아보기 위해 분사 압력을 80MPa로 일정하게 한 후 바이오디젤의 혼합비에 따른 분무각의 변화를 나타낸

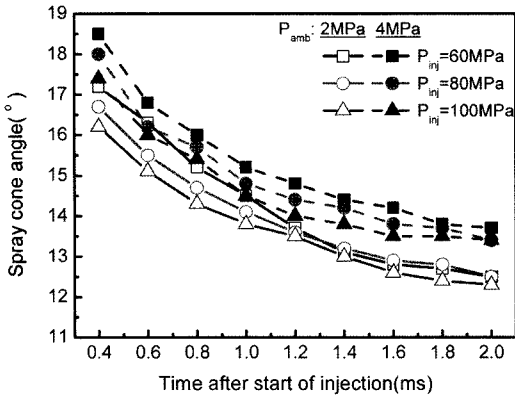


Fig. 10 Effect of injection pressure on the spray cone angle (Mixture ratio=20%)

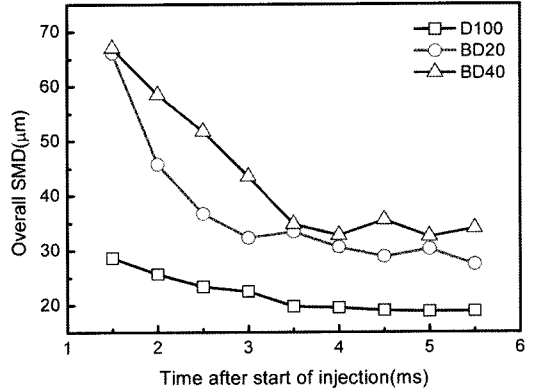


Fig. 12 Overall SMD distributions according to time after start of injection

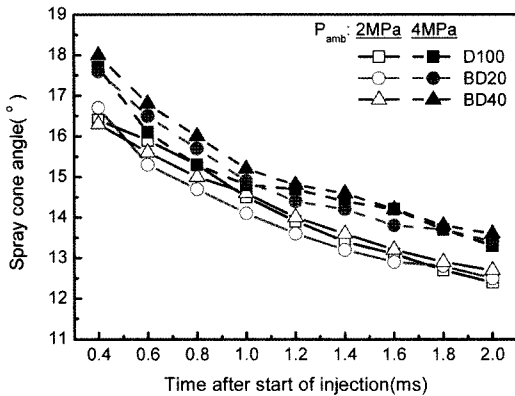


Fig. 11 Effect of mixture ratio on the spray cone angle ($P_{inj}=80MPa$)

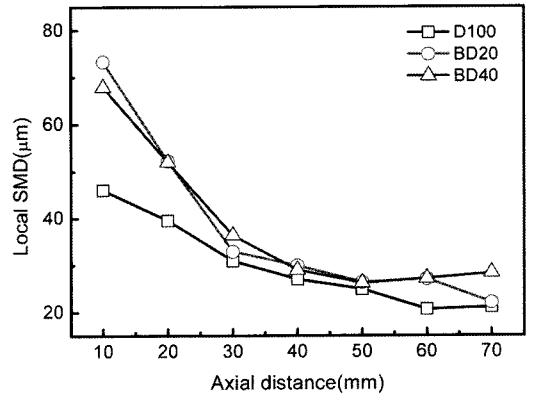


Fig. 13 Local SMD distributions according to axial distance

것이다. 그림에서 보는바와 같이 분무각은 바이오디젤의 혼합비에 따라 차이를 보이지는 않았으며, 바이오디젤의 혼합비보다는 분사 압력이나 분위기 압력의 영향을 더 많이 받음을 확인할 수 있었다.

3.5 미립화 특성

Fig. 12는 바이오디젤의 혼합비가 분무 미립화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분사 시작 후 전체 분무의 SMD 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 전체 분무의 SMD는 특정 시간에 각 측정점을 지나는 입자들을 평균하여 구하였다. 디젤 연료의 경우 약 1.5ms 이전에 미립화가 완료되어 이후로는 거의 변화가 없으나 바이오디젤을 혼합한 연료의 경우 약 3ms 이후에 미립화가 완료되었다. 연료 액적의 분열과 미립화는 표면장력에 큰 영향을 받기 때문에

상대적으로 높은 표면장력의 바이오디젤은 미립화에 좋지 않은 영향을 주어 결과적으로 큰 SMD 값을 가지는 것으로 판단된다.

이러한 경향은 분사 압력이 60MPa인 경우, 축 방향 거리에 따른 분무 입경의 크기를 측정된 결과인 Fig. 13에서도 동일하다. 인젝터 니들 근처의 축 방향 상부에서 바이오디젤이 혼합된 연료의 경우의 SMD는 디젤 연료의 SMD와 50% 차이를 보였으나, 축 방향 길이가 증가할수록 SMD 차이는 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

입경의 크기에 따른 액적의 SMD분포를 축 방향 50mm 지점에서 측정하여 Fig. 14에 나타내었다. 11 μm 이하의 지름을 가진 액적의 개수는 디젤 연료가 바이오디젤이 혼합된 연료보다 20% 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 바이오디젤의 높은 점도가 미립화를 방해할 뿐만 아니라, 분사된 연료와 주위 공기

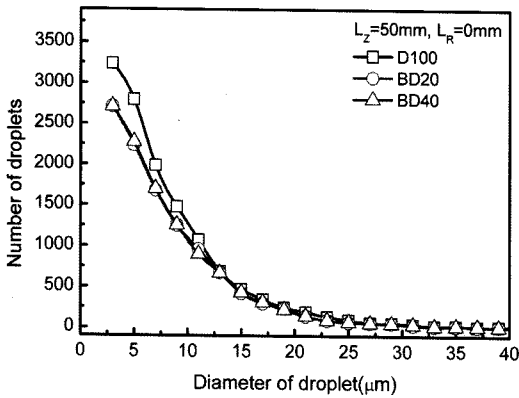


Fig. 14 Number of droplets distribution according to diameter of droplet

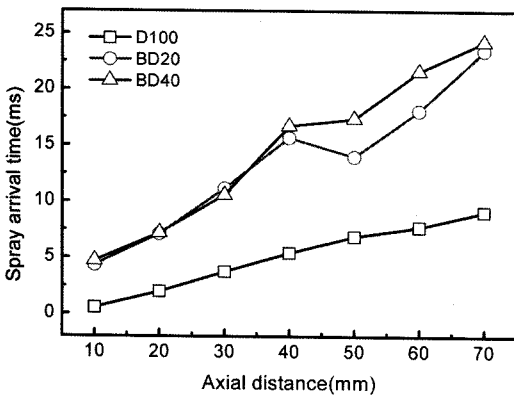


Fig. 15 Spray arrival time according to axial distance

유동과의 마찰계수가 증가하여 동일한 분사 압력에서 분사 유량이 감소하는 결과라고 판단된다. 그러나, 11 μm 이상의 지름을 가지는 액적의 경우는 연료에 상관없이 비슷한 입자수를 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, 20 μm 이상에서 그 입자수가 급격히 감소하였다.

혼합비에 따른 각 측정점까지의 분무 도달 시간과 축 방향 거리와의 관계를 측정하여 Fig. 15에 나타내었다. 바이오디젤이 디젤 연료에 비교하여 각 측정점까지 도달 시간이 더 오래 걸리는 것을 확인되었고, 그 차이는 축 방향 거리가 길어질수록 점차 증가하였다. 이러한 경향은 연료 분사 시 인젝터 노즐 내에서 바이오디젤의 높은 점성과 밀도로 인해 연료와 노즐 벽면 사이의 마찰이 증가하여 분무 도달 시간에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, BD20과 BD40은 동일한 경향을 보이므로,

바이오디젤의 혼합비는 도달 시간에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 커먼레일식 분사시스템에서 바이오디젤의 분사율 및 분무 발달 과정을 분석하고 분무의 미립화 특성을 실험하여 디젤 연료와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바이오디젤의 혼합비에 따른 분사율 특성은 디젤 연료와 차이를 보이지 않았으나, 분사 압력이 20MPa 증가할수록 바이오디젤과 디젤 연료의 최대 분사율은 12% 증가하였으나, 분사시간은 10% 감소하였다.
- 2) 분사시작 후 경과 시간에 따른 연료의 분무 발달 과정은 바이오디젤의 혼합비에 관계없이 동일하였다.
- 3) 분무 도달 거리 및 분무각은 바이오디젤의 혼합비의 영향은 매우 적으며, 분사 압력이나 분위기 압력에 따른 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.
- 4) 분무 액적의 SMD는 바이오디젤을 혼합한 연료가 디젤 연료보다 증가하였으나, 11 μm 이하의 크기를 가진 액적의 개수는 16% 감소하였다. 이는, 바이오디젤의 높은 점성과 밀도로 인해 액적의 분열과 미립화를 저해하기 때문이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 ECO-STAR project(무·저공해 자동차 사업단) 및 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수 실험실 지원 사업으로 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 관계 기관에 감사드립니다.

References

- 1) A. S. Ramadhas, S. Jayaraj and C. Muraleedharan, "Characterization and Effect of Using Rubberseed Oil as Fuel in the Compression Ignition Engines," Renewable Energy, Vol.30, No.5, pp.795-803, 2004.
- 2) S. H. Yoon, S. G. An, M. Y. Kim, S. I. Kwon

- and C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel in a DI Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.698-704, 2005.
- 3) C. E. Goering, A. Schwab, M. Dougherty, M. Pryde and A. Heakin, "Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils," Transactions of the ASAE, Vol.25, pp.1472-1483, 1982.
 - 4) C. S. Lee, S. W. Park and S. I. Kwon, "An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels," Energy & Fuels, Vol.19, pp.2201-2208, 2005.
 - 5) K. H. Ryu, Y. J. Yun and Y.T. Oh, "The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.72-78, 2003.
 - 6) C. A. Sharp, S. A. Howell and J. Jobe, "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engines, Part I Regulated Emissions and Performance," SAE 2000-01-1967, 2000.
 - 7) R. E. Tate, K. C. Watts, C. A. W. Allen and K. I. Wilkie, "The Viscosities of Three Biodiesel Fuels at Temperatures up to 300°C," Fuel, Vol.85, pp.1010-1015, 2006.
 - 8) R. E. Tate, K. C. Watts, C. A. W. Allen and K. I. Wilkie, "The Density of Three Biodiesel Fuels at Temperatures Up to 300°C," Fuel, Vol.85, pp.1004-1009, 2006.
 - 9) H. K. Suh, S. W. Park, S. I. Kwon and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Biodiesel Fuels," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.23-29, 2004.
 - 10) W. Bosch, "The Fuel Rate Indicator : A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection," SAE 660749, 1966.