

바이오 디젤 연료의 분무 거동 및 미립화 특성

서현규¹⁾ · 박성욱¹⁾ · 권상일²⁾ · 이창식^{*3)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 국립환경연구원²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuels

Hyun Kyu Suh¹⁾ · Sung Wook Park¹⁾ · Sang Il Kwon²⁾ · Chang Sik Lee^{*3)}

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

²⁾NIER, Environmental Research Complex, Kyungseo-Dong, Seo-Gu, Incheon 404-170, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 19 March 2004 / Accepted 1 September 2004)

Abstract : This work was conducted to figure out the atomization characteristics of three types of bio-diesel fuels using a common-rail injection system. The process of spray development was visualized by using a spray visualization system composed of a Nd:YAG laser and an ICCD camera. The spray tip penetrations were analyzed based on the frozen images from the spray visualization system. On the other hand, the microscopic atomization characteristics such as the distributions of SMD and axial mean velocity were measured by using a phase Doppler particle analyzer system. It is revealed that the sprays of the bio-diesel fuels have larger SMD than that of diesel fuel mainly due to high viscosity of bio-diesel. Different characteristics of bio-diesel fuels were also measured in spray tip penetrations according to the fuels and mixing ration.

Key words : Bio-diesel fuel(바이오 디젤 연료), Common-rail injector(코먼레일식 인젝터), SMD(Sauter 평균 입경), PDPA(위상 도플러 입자 분석기), Spray tip penetration(분무 도달 거리)

Nomenclature

- L_z : axial distance from injector tip
- L_R : radial distance from the injector axis
- P_{inj} : injection pressure
- P_{amb} : ambient pressure
- T_{aso} : time after start of injection

1. 서론

최근 세계적으로 지구 온난화의 주요 원인인 CO₂ 배출량을 줄이기 위해 연비 저감과 대체 연료에 대

한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 디젤 엔진의 경우, 주요 배출물로 알려진 NO_x와 PM은 인체에 미치는 영향이 상당히 위협적이어서 NO_x와 PM의 동시 저감이 필요하다. 디젤 엔진에서 배출물을 저감시키기 위한 노력의 일환으로 기존의 디젤 연료에 비해 유황 성분이 적고 합산소 연료인 바이오 디젤 연료가 주목을 받고 있다. 바이오 디젤 연료는 동물이나 식물의 기름에서 생산이 가능한 재생 연료로서 디젤 엔진의 효율적인 대체 연료로 사용될 것으로 기대되고 있다.

바이오 디젤 연료의 연소와 배출물에 대한 연구로는 유채유 20%와 디젤 80%를 혼합하여 사용할 경우 매연 감소에 효과가 있다고 Reece 등¹⁾이 발표

*To whom correspondence should be addressed.
cslee@hanyang.ac.kr

하였고, Goering 등²⁾은 식물성 연료 11개에 대한 연소 실험에서 디젤 연료의 대체 연료로의 가능성을 입증하였다. Yoshimoto 등³⁾과 류 등⁴⁾은 바이오 디젤 연료를 사용하는 디젤 엔진에 EGR을 적용하여 NO_x와 Smoke 등의 배기 배출물 저감에 대해 연구하였다. IDI 디젤 기관에서 바이오 디젤 연료를 사용하였을 경우 유 등⁵⁾은 토크와 출력은 비슷하나 CO가 크게 감소한 것으로 보고하였다.

그 외에도 폐식용유와 지방 조식을 사용한 바이오 디젤 연료의 생산에 대하여 Alcantara 등⁶⁾이 연구하였고, 미강유를 디젤 기관의 대체연료로 사용하였을 경우 오 등⁷⁾은 함산소량이 증가할수록 매연이 줄고 출력은 동일하다고 보고하였다. 분무 미립화에 관한 연구로서는 주 등⁸⁾이 고점성의 미강유를 초음파 발진장치를 이용하여 분무할 경우 분무의 미립화가 개선된다고 발표하였다.

디젤 기관에서의 바이오 디젤 연료에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 바이오 디젤 연료의 사용에 따른 분무 미립화의 영향에 대하여는 연구 수행이 미흡하여 더욱 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 코먼 레일식 고압 분사 시스템을 사용하여 채종유, 현미유, 대두유 세가지 종류의 바이오 디젤 연료의 분무를 분사 압력과 혼합비에 따라 가시화하고, 분무의 속도와 SMD등의 분무 미립화 특성을 일반 디젤 연료와 비교하여 바이오 디젤 연료의 미립화 특성을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 고압 분사 시스템 및 가시화 실험 장치

연료를 고압으로 분사하기 위한 분사 시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 고압의 연료를 안정적으로 코먼레일로 공급하기 위하여 두 개의 고압 연료 펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하였으며, 펌프로 공급되는 압축 공기의 압력을 이용하여 코먼 레일 내의 압력을 조정하였다.

코먼 레일식 고압 분사 시스템에서 일반 디젤 연료와 세가지 종류의 바이오 디젤 연료의 분무 발달 과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템은 Fig. 1과 같

이 구성하였다. 광원으로는 Nd:YAG레이저를 사용하였고, 광학계로부터 형성된 레이저 시트빔을 이용하여 분무의 단면을 가시화 하였다. 또한 ICCD 카메라와 이미지 그래버를 이용하여 분무 이미지를 취득하였다. 분무의 가시화 시스템의 구체적인 제원은 Table 1에 나타나 있다.

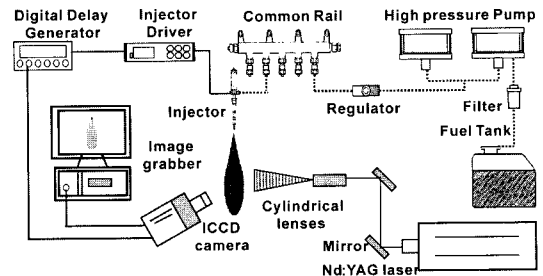


Fig. 1 High-pressure pump and spray visualization system

Table 1 Specifications of the spray visualization system

Spray visualization system	Light source	Nd:YAG laser
	Wave length	532nm
	Laser power	270mJ(max)
	Beam thickness	1mm
	Resolution	1280(H)×1024(V)

2.1.2 PDPA 실험 장치

코먼 레일식 고압 분사 시스템의 분무 미립화 특성인 입경과 분무 속도를 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 PDPA시스템을 구성하였다. 실험 장치는 고압 분사가 가능한 연료 분사 장치와 PDPA시스템으로 구성된다. 분사 후 시간의 경과에 따른 입경 및 속도를 취득하기 위해, 디지털 신호 발생기를 이용하여 분

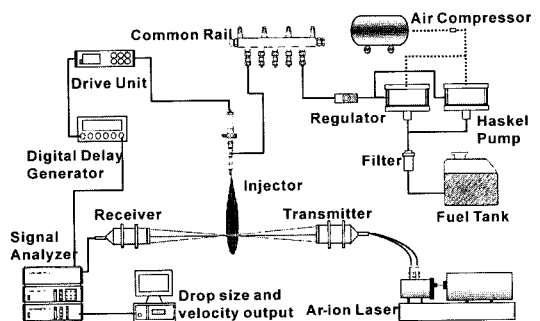


Fig. 2 PDPA system

무시 인젝터와 PDPA시스템의 신호 분석기를 동기 하였다.

2.2 실험 방법

본 실험에 사용된 인젝터는 노즐의 지름이 0.3mm이고 직경비(L/D)가 2.67인 코먼 레일식 단공 인젝터이며, 가시화 실험 조건은 분사 압력은 40MPa, 60MPa, 80MPa, 분사 기간(인젝터 솔레노이드 통전 기간)은 1.0ms, 가시화 촬영은 0.2ms부터 2ms까지 0.2ms간격으로 실험하였다.

바이오 디젤과 일반 디젤의 동일 분사 압력에서 분사되는 연료량을 비교하기 위하여 분사량을 측정 하였다. 분사 압력 60MPa과 인젝터 솔레노이드 통전 기간 1.0ms에서 100회 분사된 양을 정밀 저울로 측정하였으며, 실험의 정확도를 높이기 위하여 5회 반복 실험하여 평균하였다.

실험에 사용된 연료는 총 4가지 종류로서 일반 디젤 연료와 바이오 디젤 연료의 분무 미립화 특성을 비교하기 위하여 혼합비를 변화해 가며 실험을 수행하였다. 본 연구에서 바이오 디젤과 일반 디젤과의 혼합은 체적비를 기준으로 하였으며, 예를 들어 채종유 20%(Seed-gathering oil 20%)란 채종유에서 추출한 오일 20%와 일반 디젤 80%를 체적 기준으로 혼합한 연료를 나타낸다. 실험에 사용된 바이오 디젤유의 종류는 채종유(Seed-gathering oil), 현미유(Unpolished rice oil), 대두유(Soybean oil)의 세종류이며, 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다.

PDPA 시스템의 데이터는 두 개의 채널이 동시에 취득한 데이터가 30000개가 되도록 하였으며, 2μm에서 100μm로 유효 입경의 범위를 고정하였다. 레

이저의 출력은 데이터의 출력율과 산란 등을 고려하여 1W로 실험을 수행하였고 분사압력은 60MPa로 고정하여 실험하였다. 또한 PDPA 실험의 측정점 Fig. 3과 같이 인젝터 축 방향 하류 10mm에서 70mm까지 10mm간격으로, 반경 방향의 경우 최대 12mm까지 2mm 간격으로 측정하였다.

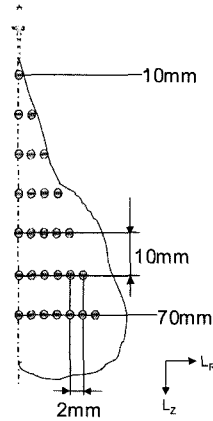


Fig. 3 Test points for PDPA measurements

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 혼합비에 따른 동점도 변화와 분사량

바이오 디젤유는 일반 디젤유에 비하여 점도가 높아 연료 분무의 미립화가 잘 되지 않는다. 동점도가 높은 연료의 경우 대체로 표면 장력 또한 높게 되는데, 이로 인해 연료 미립화 성능이 나빠지기도 한다. 따라서 본 연구에서는 연료의 종류 및 혼합비에 따른 동점도를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 음영 영역은 석유 사업법에 명시된 자동차용 경유의 품질 기준이다. 동점도의 측정은 석유 사업법의 품질 기준과 비교하기 위해 40°C에서 측정하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 혼합비가 증가할수록 바이오 디젤유의 동점도는 증가하는 경향을 나타내었다. 현미유와 대두유의 경우에는 혼합비가 증가하여도 석유 품질 기준을 만족하였으나, 채종유의 경우에는 35% 이상에서는 품질 기준을 벗어나는 것으로 나타났다. 채종유의 혼합비의 증가에 따른 급격한 동점도 증가는 연료의 표면 장력 또한 증가시켜 분무의 미립화를 방해하는 요소로 작용할 것으로 판단된다.

Table 2 Experimental conditions

Injection system	Common-rail	
Number of holes	1	
Hole diameter	0.3mm	
Injection duration	1ms	
Injection pressure	40MPa, 60MPa, 80MPa	
Ambient pressure	0.1MPa	
Mixture ratio	Diesel	100%
	Seed-gathering oil	20%, 40%
	Unpolished rice oil	
	Soybean oil	

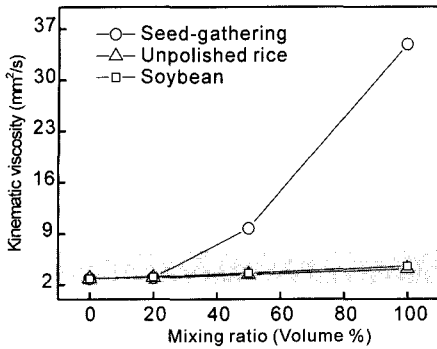


Fig. 4 Effect of mixing rate on kinematic viscosity of bio-diesel fuels

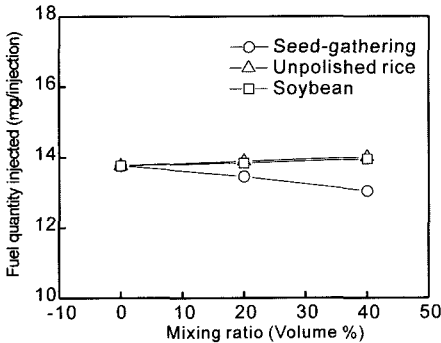


Fig. 5 Injected fuel quantity at different mixing ratio ($P_{inj} = 60MPa$)

Fig. 5는 분사 압력 60MPa, 분사 기간 1.0ms에서 바이오 디젤유의 분사량을 측정하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 현미유와 대두유의 경우에는 일반 디젤과 분사량이 큰 차이가 없었으나 채종유의 경우에는 분무량이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 급격히 증가된 점도가 노즐 표면과의 마찰력을 증가시켜 분사 속도를 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 분무 발달 과정

Fig. 6은 분사압력 60MPa인 경우에 바이오 디젤 연료의 혼합비와 종류에 따른 분무의 발달 과정을 나타낸 것이다. 그림에서 같이 동일한 분사 압력에서 혼합비 20%인 경우의 바이오 디젤 연료의 분무 발달 과정은 일반 디젤 연료와 분무 도달 거리를 비롯하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

반면, 혼합비가 40%로 증가하였을 경우에는 분

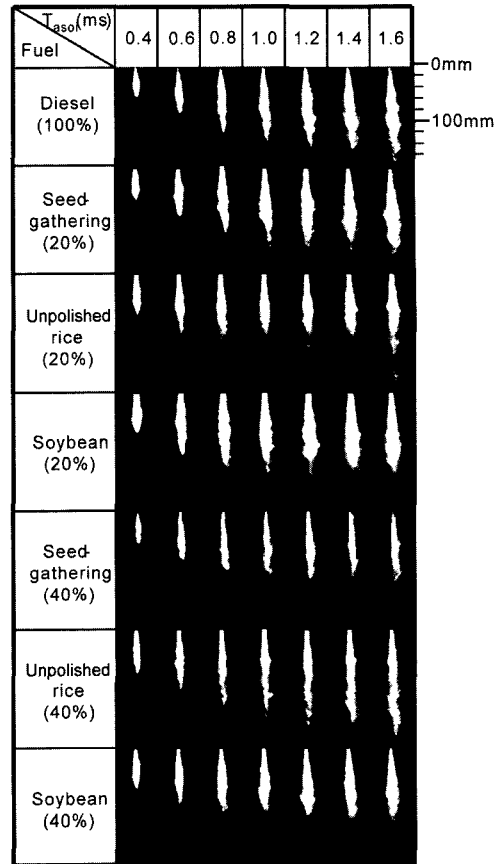


Fig. 6 Effect of fuel composition on the spray developments

무의 발달 과정이 상당한 차이를 보였다. 실험에 사용된 현미유의 경우에는 일반 디젤 연료와 비교하여 분무 도달 거리의 차이는 없었으나, 분무의 발달 과정이 매우 불안정한 정맥류형 파형을 보였다. 또한 대두유의 경우에는 시간이 경과할수록 분무 도달 거리의 증가폭이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 채종유의 경우 혼합비가 40%가 되면, 다른 연료에 비해 분무의 발달이 현저하게 느린 것으로 나타났다. 이는 높은 점도로 인해 분사 연료량이 적고, 분사 속도 또한 낮기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 연료의 분사 압력이 분무 선단의 도달 거리에 미치는 영향을 분석한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 분사 압력이 증가할수록 바이오 디젤 연료의 분무 도달 거리는 연료의 종류에 무관하게 증가하는 경향을 보였다. 또한 분사 초기에는 도달 거리가 급격히 증가하며, 그 증가폭은 시간의 경과

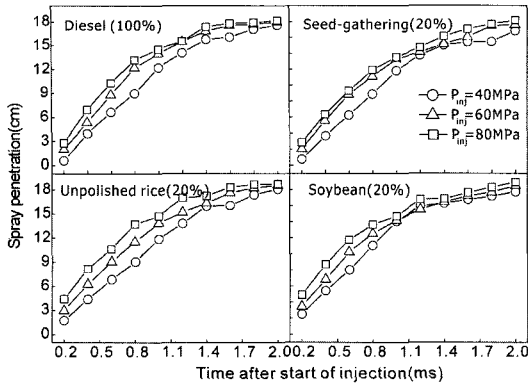


Fig. 7 Effect of injection pressure on spray tip penetrations ($P_{amb} = 0.1\text{MPa}$, Mixing ratio = 20%)

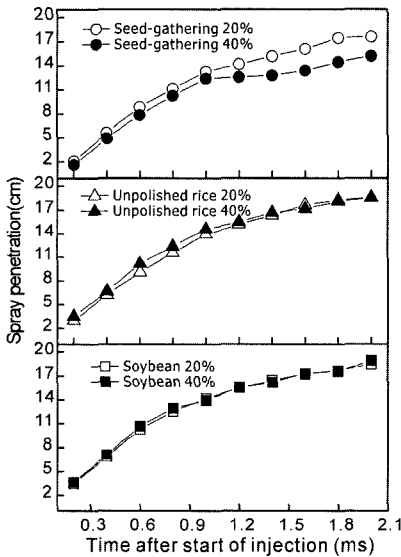


Fig. 8 Effect of mixing ratio on spray tip penetrations ($P_{inj} = 60\text{MPa}$, $P_{amb} = 0.1\text{MPa}$)

에 따라 점차 감소되는 경향을 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이, 혼합비가 20%인 경우에는 바이오 디젤의 종류가 분무 선단의 도달 거리에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

분사압력 60MPa인 경우 바이오 디젤 연료의 혼합비에 따른 분무 도달 거리를 Fig. 8에 나타내었다. 채종유의 경우에는 혼합비가 증가할수록 분무 도달 거리가 짧아지는 경향을 보였으며, 다른 두 종류의 바이오 디젤 연료의 혼합비 증가에 따른 분무 도달 거리는 큰 차이를 보이지 않았다. 채종유의 경우 혼합비가 40%가 되면, 급격한 점도의 증가로 인해, 노

즐과의 마찰력이 커지게 되며, 분사 속도와 분사량이 감소하기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 보인다. 또한 이러한 점도의 영향은 분무 발달과정에서 나타난 경향과도 일치하는 것으로 판단된다.

3.3 분무 입경과 속도 측정 결과

Fig. 9는 분사압력 60MPa, 혼합비 20%인 경우, 축방향과 반경방향 거리에 따른 분무 속도와 입경의 분포를 PDDA 시스템을 이용하여 측정된 결과이다. 전체적으로 축방향 거리에 따른 분무 속도의 경향은 디젤 연료가 가장 빠른 속도의 값을 가졌고, 바이오 디젤 연료의 분무 속도는 분무 초기에 높은 값이 축방향 거리 20mm 지점 상류에서 급격히 감소하고 하류에서는 거의 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 축방향거리 60mm 지점에서 측정된 반경방향 거리 따른 분무 속도의 경향 역시 동일한 경향을 보였는데 디젤 연료의 속도가 가장 높은 값을 나타내었고 모든 연료가 반경방향 거리가 증가함에 따라 속도가 감소하였다.

SMD 분포의 경우에는, 바이오 디젤의 SMD가 일반 경유보다 큰 것으로 나타났으며, 특히 축방향 상류와 반경방향 분포에서 큰 차이를 보였다.

일반적으로 연료의 동점도가 커지게 되면 표면장력이 커지게 된다. 바이오 디젤 연료의 경우에는 동점가가 커지게 되면, 분사시 노즐 표면과의 마찰력이 커지게 되므로 분사 속도가 저하하게 된다. 또한 표면장력이 커지게 되면 미립화를 방해하는 요

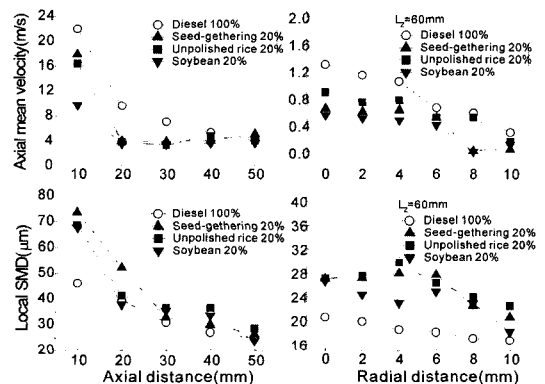


Fig. 9 Local distributions of axial mean velocity and SMD

인이 된다. 이러한 이유로 Fig. 9에 나타난 바와 같이 동일 측정점에서 바이오 디젤 연료의 축 방향 속도는 낮고 SMD는 큰 경향을 보이는 것으로 보인다.

Fig. 10은 노즐 팁으로부터 30mm 하류에서 분사 시작 후 시간의 경과에 따른 축 방향 속도와 입경의 분포를 나타낸 것이다. 축 방향 거리 30mm 지점에서 분사 시작 후 시간의 경과에 따라 가장 높은 속도의 입경을 가진 연료는 PDPA 실험 결과와 동일하게 디젤 연료로 나타났다. 속도 분포를 비교한 결과 디젤 연료에서 다른 연료와는 달리 약 0~20ms 정도의 속도를 가진 입자가 조밀하게 분포하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 점도와 관련이 있는 것으로 생각된다. 액체의 점도가 커지면 레이놀즈수가 감소하고 인젝터 팁으로부터의 분사된 액주나 액막의 안정화를 가져와 미립화를 방해하고 입경이 커진다고 판단된다. 이러한 결과는 축 방향 거리 30mm 지점의 입경 분포에서도 볼 수 있는데, 바이오 디젤 연료의 측정 입경수가 적은 것은 높은 점도와 밀도로 인하여 분사된 액체와 주위 공기 유동과의 마찰계수가 증가하고 따라서 동일한 분사압력에서 분사 유량이 감소하는 결과라고 생각된다.

전체 분무의 혼합비와 시간에 따른 SMD의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 전체 분무의 SMD는 특정 시간에 각 측정점들을 지나는 입자들을 평균하여 구하였다. 분사 시작 후 미립화가 진행됨에 따라 SMD는 감소하는 경향을 보였으며 혼합비가 증가할수록 전체 SMD의 크기는 다소 높은 경향을 보였

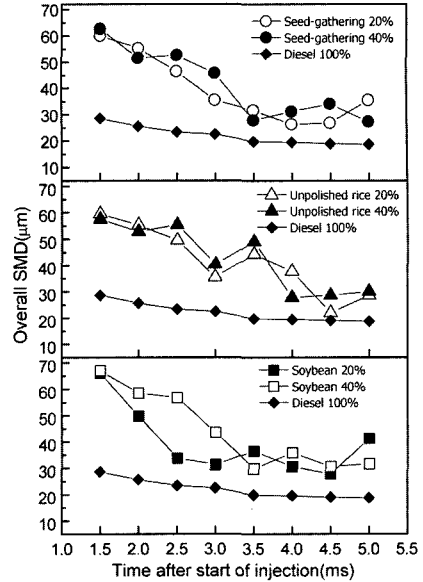


Fig. 11 Effect of mixing rate on the transient characteristics of fuel atomization ($P_{inj} = 60\text{MPa}$, $P_{amb} = 0.1\text{MPa}$)

다. 이는 바이오 디젤 연료의 혼합비가 증가할수록 점도도 높아지고 표면장력이 증가하여 분무의 미립화를 방해하여 전체 SMD가 큰 값을 가지는 것으로 판단된다.

4. 결론

코먼 레일식 고압 디젤 인젝터를 이용하여 디젤 연료와 바이오 디젤 연료의 종류에 따른 분무 미립화 특성에 대한 실험 결과로부터 바이오 디젤 연료

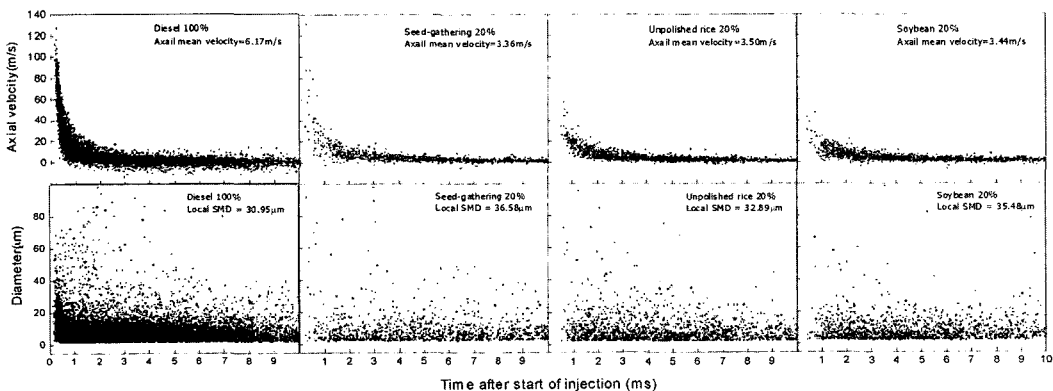


Fig. 10 Velocity and diameter distribution according to the time after start of injection ($L_z = 30\text{mm}$, $L_R = 0\text{mm}$)

는 높은 점도로 인해 일반 디젤보다 미립화가 어려운 것으로 나타났으며, 본 연구의 구체적인 결론은 다음과 같다.

- 1) 현미유와 대두유 혼합 연료의 경우, 연료의 동점도는 디젤 엔진에 적용 가능한 것으로 나타났다. 그러나 상용 디젤에 채종유를 혼합할 경우, 동점도가 급격히 증가하였다. 이러한 고점도로 인해 연료의 분사량이 채종유 40% 혼합일 경우에는 상용 디젤 보다 5.2% 감소하였다.
- 2) 채종유를 40% 혼합하였을 경우 분사 말기에 분무 도달 거리가 상용 디젤에 비해 14%정도 짧아지는 경향을 보인 반면 다른 두 종류의 바이오 디젤 연료는 큰 차이를 보이지는 않았다.
- 3) 바이오 디젤 연료는 일반 디젤 연료에 비해 높은 점도로 인해 속도가 낮고, 입경이 큰 것으로 나타났다. 또한 혼합비가 증가할수록 일반 디젤과의 차이가 더 커졌다.

후 기

이 논문은 한양대학교 연구 특성화 사업 (HY-2003-T)의 지원에 의하여 연구되었으며, 연구를 지원하여 주신 한양대학교에 감사드립니다.

References

- 1) D. L. Reece and C. L. Peterson, "A Report on the Idaho on-road Vehicle Test with RME and Neat Rapeseed Oil as an Alternative to Diesel Fuel," ASAE 93-5018, 1993.
- 2) 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.
- 3) Y. Yoshimoto and H. Tamaki, "Reduction of NOX and Smoke Emissions in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion Combined with EGR," SAE 2001-01-0649, 2001.
- 4) J. H. Ryu, M. D. Eom, T. W. Lee, S. B. Lee, S. M. Kim, C. S. Lim, K. H. Kim, S. Y. Jung and C. S. Jung, "A study on the Exhaust Emission Reduction Characteristics by using of Biodiesel Fuel in the Compressed Ignition Engine," Spring Conference Proceeding, Vol. I , KSAE, pp.526-531, 2002.
- 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, 2003.
- 6) R. Alcantara, J. Amores, L. Canoira, E. Fidalgo, M. J. Franco and A. Navarro, "Catalytic Production of Biodiesel from Soy-bean oil, Used Frying Oil and Tallow," Biomass and Bioenergy, Vol.18, pp.515-527, 2000.
- 7) Y. T. Oh, S. H. Choi and S. W. Kim, "A Study on Characteristics of Rice Bran Oil as an Alternative Fuel in Diesel Engine(1)," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.15-22, 2002.
- 8) E. S. Ju, S. Y. Jeong, D. W. Kang and J. C. Kim, "A Study on the Atomization of a Highly Viscous Biodiesel Oil," Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, Vol.5, No.5, pp.146-153, 1997.