

바이오 디젤 연료의 고압 분무 특성

홍 창 호¹⁾ · 최 옥¹⁾ · 최 병 철²⁾ · 이 기 영³⁾

전남대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 전남대학교 기계시스템공학부²⁾ · 전남대학교 응용화학공학부³⁾

Characteristics of High Pressure Bio-diesel Fuel Spray

Chang-ho Hong¹⁾ · Wook Choi¹⁾ · Byung-chul Choi²⁾ · Gi-young Lee³⁾

¹⁾Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾School of Mechanical System Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

³⁾School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 9 July 2002 / Accepted 29 January 2003)

Abstract : Spray characteristics of conventional diesel fuel and bio-diesel fuel(methyl-ester of soybean oil) were compared, in terms of spray tip penetration and spray angle, by using a commercial high pressure common rail injection system for light-duty DI Diesel engines. The experiments were carried out under the non-evaporating condition at ambient density(8.8, 15.6 kg/m³) and injection pressure(75, 135 MPa). The experimental method was based on a laser sheet scattering technique. Spray tip penetrations of bio-diesel fuel were longer, on the whole, than those of conventional diesel fuel, except for lower injection pressure(75 MPa) under lower ambient density(8.8 kg/m³). But spray near angle and spray far angle of bio-diesel fuel were smaller than those of conventional diesel fuel, implying spray angle is related to the growth rate of spray tip penetration. The experimental results of spray tip penetration agreed well with the calculated values by the Wakuri et al.'s correlation based on the momentum theory.

Key words : Common rail injection system(커먼레일 분사 시스템), Bio-diesel fuel(바이오 디젤유), Spray(분무), Spray tip penetration(분무 선단 관통거리), Spray angle(분무각)

1. 서론

기존 기계식 시스템에 비해 고압 분사에 의한 양질의 혼합기 형성이 가능하고, 전자제어 장치를 이용한 최적의 분사시기 및 분사량 조절을 통해 엔진 시스템의 효율 향상에 기여하고 있기 때문에, 최근 출시되는 디젤 엔진 자동차는 전자제어장치가 장착된 Common Rail Injection System을 지향하는 추세이다. 그러나, 디젤 엔진의 연소 특성상 대도시의 환경 오염의 원인이 되는 NOx와 PM의 배출 문제는 여

전히 문제점으로 남아 있다.

이를 위한 대책의 한 방법으로, 다양한 대체 연료에 관한 연구가 이루어지고 있다. 그 중, 동·식물유의 메틸 에스테르화 반응에 의하여 만들어지는 바이오 디젤유는 자원 재활용이 가능한 청정 연료로서, 연료 중 산소 성분을 함유하고 있는 합산소 연료이다. 바이오 디젤유는 디젤유에 비해 공해 물질의 배출이 적어 자동차용 대체 연료로 다양한 연구가 시도되고 있으나, 아직까지 고압 분사 시스템에 적용한 예는 없다.^{1,2)}

본 연구는 고출력, 저공해를 동시에 달성할 수 있는 커먼 레일 시스템에서, 디젤 대체연료로서 식용

* To whom correspondence should be addressed.
bcchoi@chonnam.ac.kr

유를 에스테르화하여 제조한 바이오 디젤유의 분무 특성을 파악하는데 목적이 있다. 실험에 적용한 변수는 분위기 밀도와 분사압력이며, 이들의 변화에 따른 분무의 외형적인 특성 중 분무관통거리, 분무 각 등에 대해 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

전체 실험장치의 구성도를 Fig. 1에 나타내며, 각각의 장치에 관한 설명은 다음과 같다.

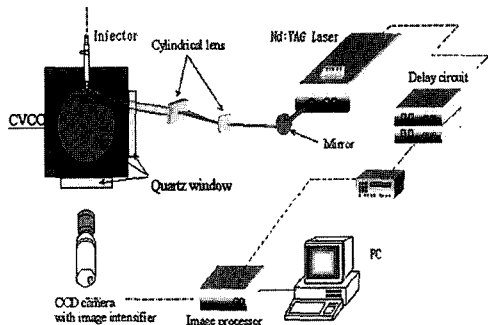


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.1 실험장치

2.2.1 고압분사장치

본 연구에 사용된 고압분사 시스템은 5-hole mini sac type 노즐(0.168mm, nozzle volume=27cc)과 커먼 레일 (common rail), 그리고 Bosch의 CP3 펌프로 구성되어 있다. 펌프에서 가압되어 나오는 연료는 서지 탱크(785cm³)에 저장된 후, 서지 탱크에 부착된 레귤레이터를 이용하여 일정압력을 유지하여, 2차로 커먼 레일에 공급되는 구조로 되어 있다. 분사압력은 자유롭게 변화시킬 수 있으나, 본 실험에서는 저압에서의 유량계수 변동을 고려하여 70MPa 이상에서만 사용하였다.

2.2.2 레이저 광원 (Nd:YAG laser)

가시화를 위한 광원으로는 Nd:YAG laser(Surelite I, Continuum Ltd.)를 사용하였다. Cylindrical lens를 사용해 만든 sheet beam을 이용하여, 분무의 순간 단면 정보를 파악하였으며, 레이저와 ICCD의 순간 동기에는 디지털 펄스 발생기(DG535, Stanford Research)를 사용하였다.

2.2.3 Intensified CCD

본 실험에서는 ICCD (PI-MAX, 512×512, Princeton Instrument)를 사용하여 분무 화상을 취득하였다. 분무 자체가 고속이기 때문에 Intensifier의 증폭을 이용하는 편이 유리하나, 분무 자체의 산란광만으로도 충분하였으며, 촬영 시 배경광에 의한 노이즈의 발생을 최소화하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 실제 기관과 유사한 분위기 조건 (고온·고압 상태에 상응하는 상온 상태에서의 분위기 밀도 조건)을 재현하기 위하여, 고압용기 내의 분위기 밀도와 연료의 분사압력을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

Table 1에 실험 조건을 나타낸다.

Table 1 Experimental conditions

Injection system	Common-rail injection system
Nozzle	5 hole mini-sac type (Bosch)
Hole diameter (mm)	0.168
Fuel	Diesel fuel Bio-diesel fuel
Injection pressure (MPa)	75, 135
Ambient gas	N ₂
Ambient density (kg/m ³)	8.8, 15.6
Ambient temperature (K)	303

2.2.1 바이오 디젤유

동, 식물유를 디젤유로 사용하기 위한 방법으로는 가열법, 희석법, 열분해법, Microemulsion 법, 에스테르화법 등이 있는데, 이 중 본 실험에서는 사용하지 않는 식용유를 에스테르화법으로 바이오 디젤유를 제조하여 사용하였다.

Fig. 2는 메틸 에스테르화 법을 이용하여 바이오 디젤유를 제조하는 방법을 간략히 나타내고 있다.

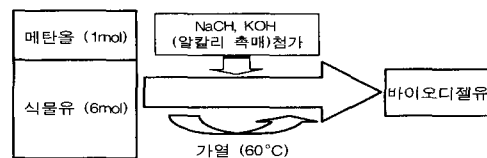


Fig. 2 Manufacturing process of bio-diesel fuel by esterification

Table 2 Properties of the tested fuels at 30 °C

Fuel	Density [kg/m ³]	Viscosity [mm ² /s]
D100	821	3.20
B100	870	4.65

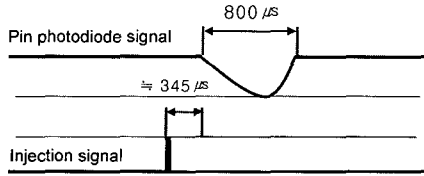


Fig. 3 Injection delay diagram

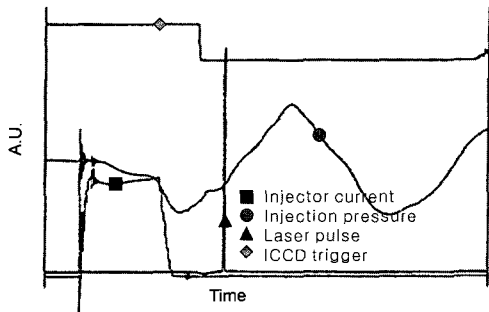


Fig. 4 Typical signal histories of the employed experimental setup

Table 2는 실험 시 사용된 연료의 특성을 나타내고 있다. 점도의 측정은 일본 RION사의 VT-03 Viscometer를 사용하여 측정하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 인젝터의 분사지연 특성을 나타내고 있다. 분사지연 시간은 인젝터의 끝단에 설치된 핀 포토 디텍터 (Pin Photo Detector)를 이용하여 측정하였다. ECU로부터 분사신호를 인젝터에 가한 후, 약 345 μ s 정도의 지연 후에 분사가 시작되었다.

Fig. 4는 실험장치의 작동 타이밍 선도를 나타낸 것이다. 인젝터의 분사지연에 맞춰 디지털 펄스 발생기 (DG 535)에서 분사지연시간만큼 신호를 지연시키면서, ICCD와 Nd:YAG 레이저를 동기시키는 구조이다.

2.3 영상의 취득 및 분석

가시화 방법으로 평면 레이저 단면광 (Laser Sheet Beam)을 이용한 Mie 산란법을 이용하였다.³⁾

단발 분사의 경우, 재현성의 확보가 어렵고 연속 분사와는 다른 경향을 나타낼 가능성이 있다. 반면, 고속의 연속 분사의 경우도 마찬가지로 가시화 영역이 흐려지거나, 지나치게 강한 산란광으로 인해 영상 취득에 어려움을 겪을 수 있기 때문에, 분사 주기를 2Hz 정도로 제한하여 가시화 영역을 확보하였다. 이전 단계에서 분사된 분무의 운동량에 의해 정적인 유동장에 변화를 가져올 수 있기 때문에, 본 실험에서는 각 실험 조건 당 버스트 캡처(Burst Capture) 모드로써 총 4회 분사하였으며, 그 중 두 번째 영상을 일관되게 결과로서 선정하였다. 분사기간은 1.0ms로 설정하였으며, 영상은 50 μ s 간격으로 취득하였다.

분무 선단 관통거리 및 분무각을 나타내기 위하여 각 영상은 Fig. 5와 같이 처리하였다. 각 해석 조건 당 8장의 영상을 평균하여 결과를 산출하였다. 분무의 영역별 구분에는 Fujimoto의 모델⁴⁾을 이용하였다. 분무 관통거리는 노즐 팁으로부터 분무 선단까지의 거리로 하였고, 분무 근거리 각은 노즐경의 10~50배 되는 지점에서 측정하였으며, 분무 원거리 각은 각 해석 조건 당 분무 관통거리의 70% 지점에서의 분무각으로 정의하였다.

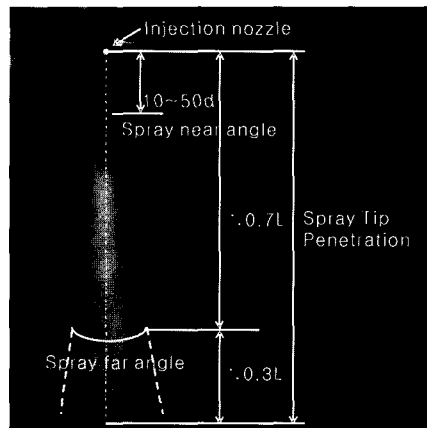


Fig. 5 Definition of the spray tip penetration, spray near angle and spray far angle

3. 결과 및 고찰

3.1 고압 분위기 내에서의 분무 형상

본 연구에서는 분위기 밀도와 분사압력이 바이오

디젤 고압 분무 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 분위기 밀도 $\rho_a=8.8, 15.6\text{kg/m}^3$ 인 상태에서 분사 압력을 각각 75, 135MPa로 설정하고, 그 때의 분무 선단 관통거리, 분무각을 측정하였다.

Fig. 6, Fig. 7은 분위기 밀도 $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 에서 분사 압력을 각각 75MPa, 135MPa로 분사한 경우, 디젤유의 분무 형상을 촬영한 사진이다. 분사 압력이 증가할수록 하류의 분무 폭이 증가하며, 일정 거리에 대한 분무 선단 도달 시간이 짧아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8, Fig. 9는 분위기 밀도 $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 에서 분사압력이 각각 75, 135MPa 인 경우의 바이오 디젤유 분무 형상을 촬영한 사진이다. 특징적인 현상으로는, 디젤 분무에 비해 분무의 중심부에 연료 수밀도가 높은 영역이 빈번하게 나타났는데, 이러한 현상은 연료의 점도가 기존의 디젤유에 비해 상대적으로 높아 연료의 분산이 잘 이루어지 않음을 그 원인

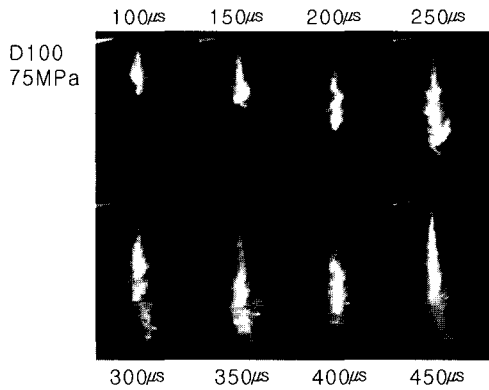


Fig. 6 Photographs of diesel spray(Pinj=75MPa)

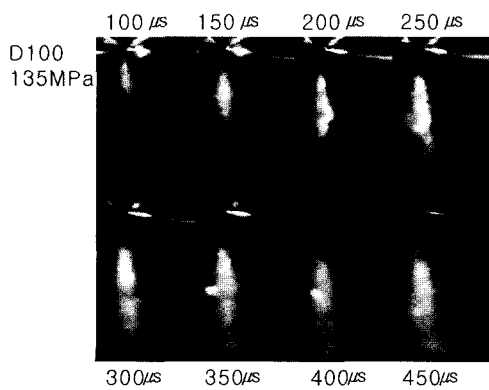


Fig. 7 Photographs of diesel spray(Pinj=135 MPa)

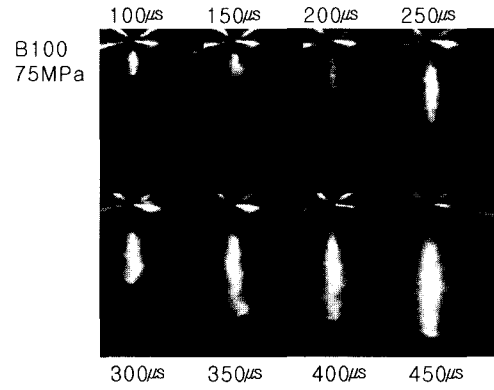


Fig. 8 Photographs of bio-diesel spray(Pinj=75 MPa)

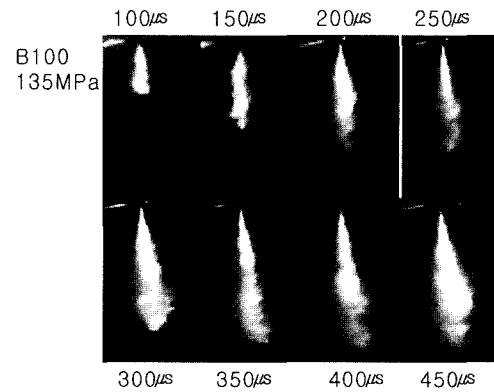


Fig. 9 Photographs of bio-diesel spray(Pinj=135 MPa)

으로 들 수 있다. 다만 연료 수밀도가 높은 중심부 주변에는 액적의 비산이 두드러졌다.

3.2 분위기 밀도에 따른 분무 형상

Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12는 분위기 밀도의 변화에 따른 분무 선단 관통거리, 분무 근거리 각 및 원거리 각의 변화를 각각 나타내고 있다.

Fig. 10은 분위기 밀도 $\rho_a=8.8, 15.6\text{kg/m}^3$ 하에서, 디젤유와 바이오 디젤유의 분무 선단관통거리의 발달과정을 나타내고 있다. $\rho_a=8.8\text{kg/m}^3$ 에서는 디젤유의 분무 선단 관통거리 발달이 빠른 반면, $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 에서는 바이오 디젤유의 경우가 더 빠르게 성장하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 원인으로는 두 연료의 밀도차이를 들 수 있다. 바이오 디젤유의 밀도는 870kg/m^3 인 반면, 디젤유의 밀도는 821kg/m^3 이다. 분사 속도가 대략 연료 밀도의 제곱근에 반비례($V_{inj} \propto 1/\sqrt{\rho_l}$) 한다고 하면, 분위기 밀도가 낮

은 $\rho_a=8.8\text{kg/m}^3$ 에서는 $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 인 경우에 비해 분사 후기에 분무 선단에서 항력을 덜 받기 때문에, 디젤 분무의 선단관통거리 증가로 이어졌으리라 추측할 수 있다. $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 에서 바이오 디젤 분무가 더 빠르게 성장하는 원인은, 분위기 밀도가 높은 경우, 분무 선단속도가 빠를수록 분위기와의 운동량 교환속도가 빨라져 약 $250\mu\text{s(ASI)}$ 이후에는 분무 성장속도가 급감하기 때문이다. 따라서, 약 $250\mu\text{s(ASI)}$ 까지는 거의 비슷한 속도로 성장하지만, 그 이후부터는 바이오 디젤유 분무의 성장이 앞서가기 시작한다.

Fig. 11에 나타낸 분무 근거리 각은 분위기 보다는 분사 조건, 즉 노즐이나 분사 압력 등의 영향을 나타내기 때문에, 전반적으로 그 차이는 크지 않다. 따라서, 연료의 종류나 분위기 밀도는 분무 근거리 각에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 12의 원거리 각은 분위기의 영향을 직접적으로 표현하는 변수로서, 분무 구조의 천이가 나타나

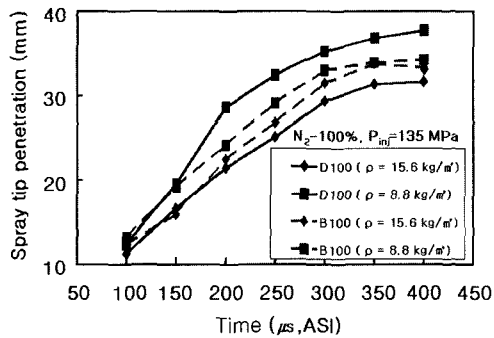


Fig. 10 Spray tip penetration versus ambient density

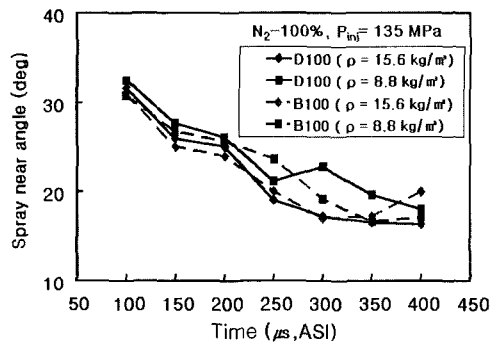


Fig. 11 Spray near angle versus ambient density

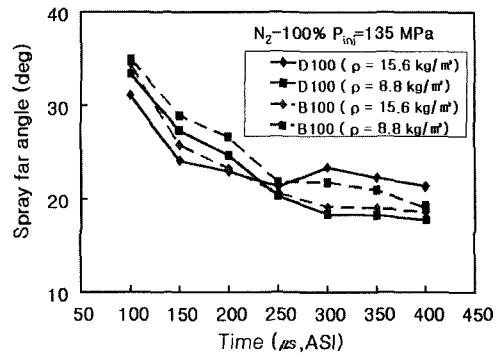


Fig. 12 Spray far angle versus ambient density

는 약 $250\mu\text{s(ASI)}$ 를 전후로, 분무 각의 경향이 분위기 밀도에 대하여 역전된다. 즉, $250\mu\text{s(ASI)}$ 이전에는 연료에 관계없이 $\rho_a=8.8\text{kg/m}^3$ 인 경우의 분무 각이 크지만, 그 이후에는 $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 인 경우의 분무각이 더 커지며, 정상 상태 분무의 분위기 밀도에 대한 일반적인 경향과 일치하게 된다.⁵⁾ $250\mu\text{s(ASI)}$ 이후의 연료의 종류에 따른 경향을 살펴보면, Fig. 10의 분무 선단 관통거리에 대한 경향과는 반대로, $\rho_a=8.8\text{kg/m}^3$ 에서는 바이오디젤유의 분무각이 더 큰 반면, $\rho_a=15.6\text{kg/m}^3$ 에서는 디젤유의 분무각이 더 커진다. 따라서, 이러한 원인을 분무 선단 관통거리의 변화에서 추론할 수 있으리라 판단된다. 즉, 분무의 축방향 성장속도가 둔화될수록 분무 선단의 폭은 커지기 때문에, Fig. 10에서 나타난 분무 선단 관통거리의 경향과는 반대의 현상이 나타나는 것으로 추측된다.

3.3 분사 압력에 따른 분무 형상

분무 선단 관통거리는 실제 엔진에 적용 시 연소실의 크기를 결정하고 연소 현상을 예측하는데 있어 중요한 분무 특성의 하나이다. 대체적으로 분사 압력이 증가할수록, 분무 관통거리는 빠르게 증가하는 경향을 보인다. Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15는 분사 압력 $P_{inj}=75\text{MPa}$ 과 135MPa 에 대한 바이오 디젤유와 디젤유의 분무 선단 관통거리, 분무 근거리 각 및 원거리 각의 변화를 각각 나타내고 있다.

Fig. 13은 분사압력에 따른 분무 선단 관통거리의 변화를 나타내고 있다. 바이오 디젤 분무의 경우, 디젤 분무에 비해 중심부에 높은 수밀도를 가진 영역

이 존재하며, 그 주위에 액적이 넓게 비산되어 있다. 따라서, 분무 선단부가 받는 항력은 전반적으로 디젤 연료 분무에 비해서 적어지므로 분무 선단관통 거리가 증가할 수 있다. 특히, 분위기 항력이 크고, 운동량 교환이 활발한 분사압력이 높은 경우가 이러한 경향을 잘 반영하고 있으나, 연료에 따른 정량적인 차이는 크지 않다.

Fig. 14에서 분사 압력에 따른 분무 근거리 각의 변화를 살펴보면, Fig. 11의 결과와 유사하게, 분위기 밀도보다는 분사 압력(분사 속도)의 영향을 더 많이 받고 있다. 따라서 분사 압력이 증가할수록 분무 초기각은 감소하지만, 연료에 관계없이 시간의 경과에 따른 변화가 불규칙하므로, 명확하게 경향을 유추하기는 어렵다.

Fig. 15에서 분무 원거리 각의 변화를 살펴보면, 선단 속도가 빠른 200 μ s(ASI) 이전에는 $P_{inj}=135$ MPa인 경우의 분무 원거리 각이 분사 속도가 느린 $P_{inj}=75$ MPa의 경우보다 작은 경향을 보이며, 분사 압력에 관계없이 바이오 디젤 분무의 각은 디젤 분

무에 비해 크다. 그러나, 그 이후에는 분사 압력에 관계없이 디젤 분무의 값이 더 커진다. 200 μ s(ASI) 이전에 바이오 디젤유의 분무 원거리 각이 더 큰 이유는, 바이오 디젤유의 높은 밀도로 인해 분사 속도가 디젤 분무에 비해 다소 낮기 때문이다. 그러나, 200 μ s(ASI) 이후에서 나타나는 경향의 역전은, Fig. 10에서 언급하였듯이, 디젤 분무의 빠른 운동량 교환 속도에 비례하는 분무 선단관통거리의 성장속도 저하와 관련이 있을 것으로 분석된다.

이상과 같이 분사압력이 증가할수록 분무 근거리 각이나 원거리 각은 두 연료 모두에 대해 감소하는 경향을 보인다. 그러나, 디젤 분무에 비해서 바이오 디젤 분무는 반경 방향으로 작은 액적들의 비산이 크기 때문에, 실제 분무가 차지하는 영역에 비해 다소 낮게 측정된 면이 있다.

Fig. 16은 실험에서 얻어진 분무 선단 관통거리와 Wakuri⁶⁾ 등이 디젤 연료에 대하여 제안한 분무 선단 관통거리 이론식과 비교 검토한 결과이다. Wakuri 등은 운동량 이론을 기초로 하여 분무 선단 관통거리를 다음과 같이 제안하였다.

$$S = \left(\frac{C_d \rho_l}{\rho_a} \right)^{0.25} \left(\frac{u d_0 t}{\tan \theta} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$u = C_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_l}} \quad (2)$$

실험을 통해서 얻어진 분무 선단관통거리는 Wakuri 등이 운동량 이론을 기초로 하여 제안한 이론식의 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 분위기 밀도가 높을수록 실험값과 계산값의 경향은 보다 잘 일치하였다.

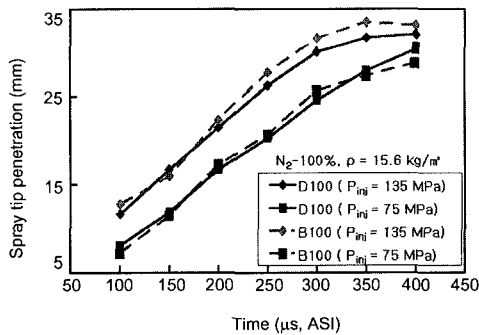


Fig. 13 Spray tip penetration versus injection pressure

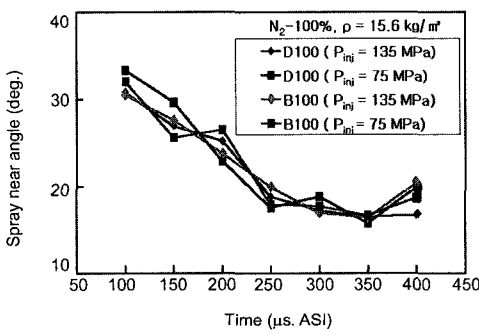


Fig. 14 Spray near angle versus injection pressure

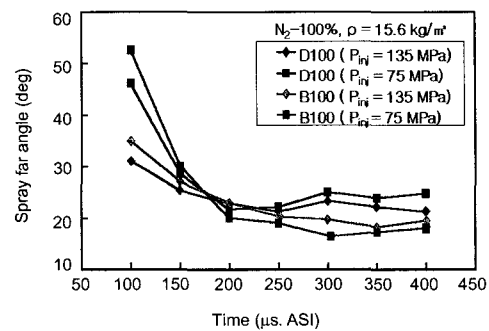


Fig. 15 Spray far angle versus injection pressure

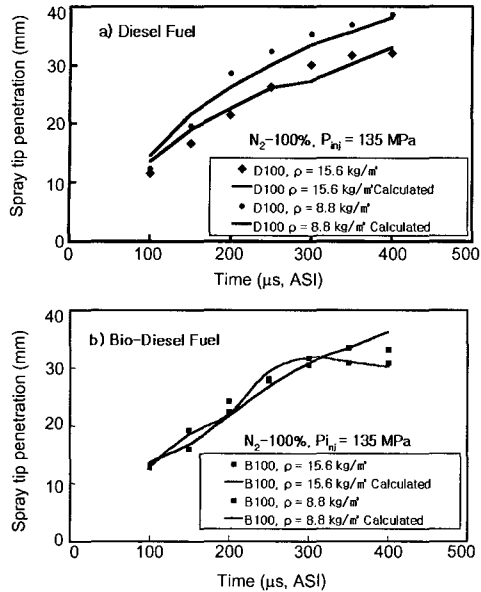


Fig. 16 Comparison between calculated and measured spray tip penetration

4. 결론

디젤유 대체 연료로서 식용유를 에스테르화하여 제조한 바이오 디젤유의 고압 분무 특성을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바이오 디젤유 고압 분무의 선단 관통거리의 발달 경향은 상용 디젤유 고압분무의 경향과 유사하지만, 분위기 밀도 8.8kg/m³에서는 디젤 분무가, 15.6kg/m³에서는 바이오 디젤 분무의 관통거리가 더 빠르게 발달하는 경향을 나타내었다.
- 2) 분무 근거리 작은 분위기 밀도 보다는 분사압력에 주로 좌우되며, 분사 압력이 증가할수록 연료에 관계없이 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 분위기 밀도의 증가에 따라 분무 원거리 작은 연료에 관계없이 커지는 경향을 보이지만, 분위기

밀도 8.8kg/m³에서는 바이오 디젤 분무가, 15.6 kg/m³에서는 디젤 분무의 경우가 더 커지는 경향을 나타내었다.

- 4) 분무 관통거리 예측 결과는 Wakuri 등이 운동량 이론을 기초로 하여 제안한 이론식과 비교적 잘 일치하였으며, 분위기 밀도가 높을수록 실험값과 계산값은 보다 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 2000년도 산학협력연구비(2000-30700-005-1)로 수행하였다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) H. Hiroyasu, "Mechanism of Diesel Spray and its Combustion," JSME 9834484, 1998.
- 2) W. J. Na, "Development of Production Technology for Biodiesel Fuel and Feasibility Test of Biodiesel Engine," MOCIE, 1995.
- 3) W. Choi, B. C. Choi, "An Investigation of Methanol and Methanol Blended Sprays Using Laser Scattering Images," KSME Int. J., Vol.15, No.12, pp.1699-1710, 2001.
- 4) H. Fujimoto, T. Dan, S. Takagishi, J. Senda, "Spray Characteristics of High-Pressure Diesel Spray," ILASS-Korea 1995-7, pp.126-131, 1995.
- 5) J. D. Naber, D. L. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE 960034, 1996.
- 6) Y. Wakuri, M. Fujii, R. Tsuneya, "Studies on the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine," Bulletin of JSME, Vol.3, No.9, pp.123-130, 1960.