고온 고압 분위기 조건에서 바이오 디젤과 DME의 혼합비에 따른 분무특성에 관한 연구

방승환* · 전문수** · 이창식†

An Experimental Investigation on Spray Behavior of Biodiesel and DME on Blended Ratio in High Temperature and Pressure Ambient Conditions

Seung Hwan Bang, Mun Soo Chon, Chang Sik Lee

Key Words: Biodiesel(바이오디젤), Blending ratio(혼합비), Dimethyl ether(DME), Injection rate(분사율), Spray tip penetration(분무도달거리), Spray cone angle(분무각)

Abstract

The objective of this work is to analyze the macroscopic behavior of spray and injection characteristics on the DME blended biodiesel at different mixing ratios by using spray visualization and injection rate measurement system. The spray images were analyzed to a spray tip penetration, a spray cone angle and a spray area distribution at various mixing ratio of DME by weight. The influence of different injection pressure and ambient pressure on the fuel spray characteristics are investigated for the various injection parameters. In order to analyze the injection characteristics of test fuels, the fuel injection rate is measured at various blending ratio. The variation of viscosity of the blended fuel by the mixing of DME fuel shows the improved effect of spray developments. Also, it was found that the injection quantities of high blended ratio were larger than that of lower blended fuel. Also, higher blending fuel showed a faster evaporation than that of mixing ratio of test fuel because kinetic viscosity was changed by blending ratio.

기호설명

P_{inj} : 연료분사압력
P_{amb} : 체임버 분위기압력
t_{eng} : 인젝터 통전시간

(2009년 12월 28일 접수~2010년 2월 23일 심사완료, 2010년 3월 27일 게재확정)
*한양대학교 대학원 기계공학과
**충주대학교 에너지시스템공학과
†이창식, 회원, 한양대학교 기계공학부(소속)
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-8970

1. 서 론

화석연료의 고갈과 지구환경 보전의 문제가 국제사회의 큰 문제점으로 떠오르면서 대체연료에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 더욱이 자동차 배출가스에 대한 세계적 규제 강화는 배기가스의 저감에 대한 중요한 문제로 떠오르고 있다. 이에 따라 열기관 중에서 상대적으로 높은 열효율을 가진 디젤기관의 연구가 활발하게 이루어 지고 있다. 디젤기관에서 스모크를 비롯한 입자상 물질 등의 저감을 위한 친환경 연료로 바이오디젤의 적용 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 또 다른 대체연료로 기대되는 착화성과 기화성이 높은 DME연료의 연구가 진행되어 왔다.

바이오디젤은 이산화탄소 배출에 대한 재회수의 장점

과 기존 디젤엔진을 큰 수정 없이 사용 할 수 있는 장점이 있어서, 친환경연료로 많은 연구가 진행되고 있다[1-4]. 그러나, 바이오 디젤의 저온 에서의 응결성은 연료의 공급과 엔진내의 분사 유동에 단점으로 작용하고 있다[5].

한편, 바이오 매스를 통하여 생산이 가능한 친 환경 연료인 DME는 높은 착화성과 기화 특성으로 디젤연료의 대체 연료로 연구가 이루어지고 있다[6-10]. 그러나 DME연료의 높은 탄성율과 낮은 점도는 연료공급계의 마멸과 유동에 악영향을 끼치고 있어 윤활첨가제를 혼합하는 등의 대책이 필요한 것으로 지적되고 있다[11].

본 연구에서는 친환경 연료인 바이오 디젤과 DME의 연료를 혼합하여 혼합연료의 분사특성을 파악하고, 다양한 분사조건에서의 연료의 분무특성을 분석하여 엔진 적용에 필요한 연료 분사 및 미립화 특성을 규명한 연구이다.

2. 실험장치

혼합연료의 분사율 및 분무 실험을 위하여 연료공급장치, 고온 고압 체임버, 분사율측정 장치, 레이저 및 가시화촬영장치 등으로 다음과 같이 구성하였다.

2.1 연료공급장치

커먼레일에 연료를 공급하기 위한 최대 100 MPa까지 가압할 수 있는 공압식 고압펌프(Haskel, DSTV-150)를 사용하여 레귤레이터를 사용하여 공기의 유량조절 통하여 연료의 유동량을 조절하였으며, 커먼레일 라인에 설치된 피에조식의 압력센서로 커먼레일안의 압력을 측정하여 연료공급시 일정한 연료의 압력을 유지할 수 있게 하였다.

2.2 고온 고압 체임버

체임버의 크기는 443×467×500 mm의 크기로 제작하였고, 4면에 광학창을 만들어 투명 석영판으로 고정하였으며 크기는 직경 130 mm로 체임버 내부를 관찰할 수 있게 만들었다. 체임버 상단에는 인젝터를 고정 할 수 있게 어댑터를 설치하였다. 체임버내부에 가열코일을 설치하여 내부 온도가 600 K까지 높일 수 있게 제작하였으며, 고온의 체임버 온도가 인젝터로의 열전도를 막기 위해 어댑터에 냉각장치를 설치하였고, 체임버 측면에 온도 및 압력센서를 설치하였다.

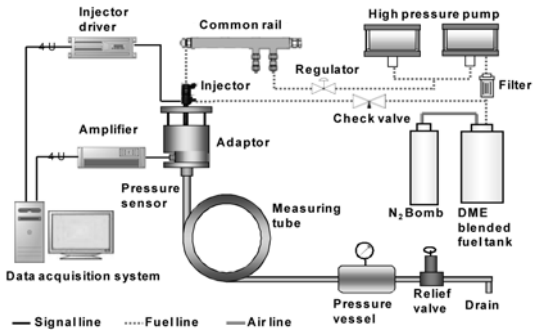

Fig. 1 Schematic of fuel injection rate apparatus

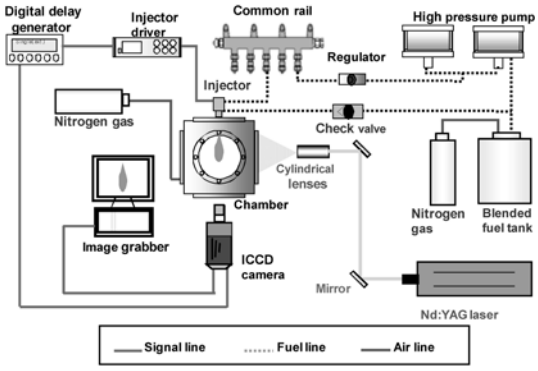

Fig. 2 Schematic of spray visualization system

2.3 분사율 측정장치

고압 디젤 인젝터의 분사율을 측정하기 위하여 일정 압력의 관내에 연료를 분사하는 분사율 측정장치를 Fig. 1과 같이 제작하여 사용하였다. 인젝 터는 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200)에 의해 전류 신호를 받아 연료를 분사하고, 분사된 연료는 관내에 설치된 압력센서(KISTLER, 4067A)를 통해 압력변동이 측정되며, 측정된 신호는DAQ Board(National Instrument, NI 6013)를 통해 변화되어 컴퓨터에 저장 된다.

2.4 가시화 촬영장치

분무의 거동을 촬영하기 위하여 더블 셔터 기능이 있는 ICCD카메라를 사용하여 연속된 영상을 촬영할 수 있게 하였고, 촬영광원은 Dual Nd-YG Laser를 사용하여 연속된 정지영상을 취득할 수 있게 하였다. ICCD카메라와 인젝터 드라이버와 분무의 동기화를 위해 Delay Generaor(Berkely 550)를 사용하였으며 노출시간은 50 us로 하여 Fig. 2와 같이 분무의 가시화 촬영을 위한 장치를 구성하였다.

Table 1 Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Injector nozzle	Min-sac type, Single hole D=0.3 mm, L/D=2.67
Ambient pressure (P_{amb})	0.1, 1, 2, 4 MPa
Tube preassure	4 MPa
Ambient temperature	600K
Fuel temperature	320 ~ 400K
Energizing time (t_{eng})	1.0 ms
Mixing ratio (%) (DME : Biodiesel)	0 : 100 (Bio) 25 : 75 (B75) 50 : 50 (B50) 75 : 25 (B25) 100 : 0 (DME)

3. 실험방법

3.1 분사율 측정

분공경 0.3 mm의 mini-sac 형상 단공노즐을 인젝터에 장착하여 관내에 고정한 후, 관내의 압력을 4 MPa까지 증가시킨 상태에서 연속된 100번의 연료를 분사해 관내의 압력 변동값을 측정한 후 평균값을 결정하였다. Delay generator 를 사용하여 인젝터 드라이버에서 발생하는 분사신호와 절대압력센서에의 신호를 동기화하여 DAQ보드를 통해 아날로그신호를 디지털 신호로 전환하여 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 데이터를 측정된 실험연료의 평균 1회 분사량 값을 사용하여 질량변동률로 정리하였다. 각 연료의 분사량은 밀폐된 용기 안에 조건별로 1000회의 연속된 연료분사후의 질량을 측정하여 1회 평균 분사량 값을 결정하였으며, 실험오차를 줄이기 위해 각각의 조건을 5회씩 실시하여 평균값을 사용하였다. 실험 조건은 Table 1와 같이 하였으며 실험 연료의 기본 물성치는 Table 2와 같다.

Table 3 Specifications of spray visualization system

LASER	Light source	Nd:YAG laser
	Wave length	532 nm
	Beam thickness	~1 mm
ICCD camera	Scan area	8.6 mm×6.9 mm
	Resolution	1280(H)×1024(V)

3.2 가시화 촬영 및 측정

본 실험의 바이오 디젤과 DME혼합연료의 분무의 발달과정을 측정하고자 ICCD카메라와 광원으로 Dual Nd-YAG 레이저를 사용하여 연속된 사진을 측정할 수 있게 하였다. 디지털신호발생기(Berkely Nucleonics, Model-555)를 사용하여 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)에서 발생하는 인젝터 분사신호와 ICCD카메라의 영상캡처 신호를 동기화 하였고 카메라 렌즈는 105 mm(UV-Nikkon, f/4.5)의 렌즈를 사용하여 정지된 분무의 영상을 얻을 수 있게 하였다. 촬영된 영상은 영상측정프로그램 을 사용하여 실제분무와 가장 유사한 이미지의threshold값을 정하여 분무길이, 분무각, 단면적을 측정하였다. Table 3은 가시화 측정을 위한 ICCD카메라와 레이저의 실험조건 상태를 나타낸 것이다.

4. 고찰 및 결과

4.1 분사율 측정결과

혼합연료에 따른 분사율을 분석하여 보면 연료의 혼합조성의 변화에 따라 분사율이 다른 결과를 보여주는 것을 볼 수 있었다. 분사지연은 인젝터 신호의 시작점을 기준점으로 하여 연료가 분사되어 압력신호가 발생하는 기간으로 정의 하였다. Fig. 3의 분사율 곡선을 보면, 분사 지연구간은 미세하게 차이를 나타내었다. DME의 혼합비가 적을수록 분사지연이 시간이 증가하는 경향을

Table 2 Test fuels properties

Property	Diesel	Bio	B75	B50	B25	DME
Density (kg/m^3)	838	886	876	819	800	667
Viscosity (cSt, 40°C)	2.48	4.6	1.3	0.55	0.25	0.185
Vapor pressure(MPa)	0.0023	0.0023	1.40	2.81	4.20	5.6
Bulk modulus of elasticity (N/m^2)	14.9 E+08	19.1 E+08	-	-	-	6.37 E+08

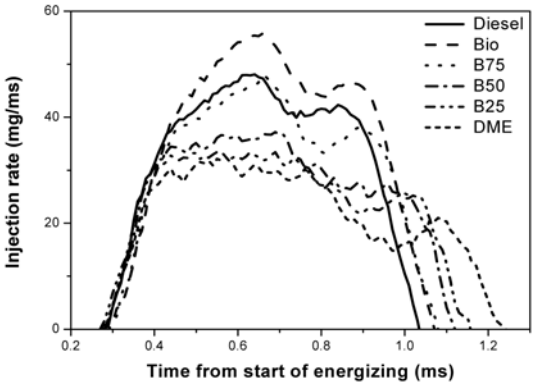

Fig. 3 Comparison of injection rate (P_{inj} =60MPa, t_{eng} =1.0 ms)

보여주었는데, 이는 연료의 점성이 노즐의 흐름에 영향을 주어 나타나는 현상으로 판단된다. 초기 분사 기간을 지난 후, 연료의 분사율은 DME의 혼합비가 적을수록 빠르게 증가하는 경향을 보여주고 있었으며, 통전신호 후 약 0.4 ms인 구간에서부터 혼합비에 따른 연료의 다른 분사발달경향을 내기 시작하였다. 순수한 바이오 디젤의 경우가 제일 큰 분사율 값을 나타내었으며, DME의 혼합비가 증가함에 따라 최고치 값이 감소하는 경향을 보여주었다. 이것은 연료의 밀도차의 영향으로 시간에 따른 연료의 분사량의 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 밀도가 높은 연료일수록 단위시간당 많은 양의 연료의 분사로 인해 발생된 결과라 판단된다. 분사기간은 인젝터에 전달한 통전시간보다 길게 나타났으며, DME의 혼합비가 증가할수록 더욱 증가하는 결과를 나타나고 있다. 이는 DME연료의 압축성이 분사후반에 영향을 주어 압축된 연료가 분사후반에 나타나는 현상으로 예측된다. 분사후반의 분사량의 감소기울기는 DME의 혼합비가 작을수록 급격히 감속하는 경향을 보여주었다. 분사초기의 역현상으로 실험한 연료의 밀도가 분사후반의 분사율 경향에 동일하게 작용하여 나타나는 결과로 생각된다.

4.2 가시화 측정 결과

Figure 4는 분사압력과 분위기압력에 따라 측정하여 분무의 경계만을 화상 처리한 그림이다. 각각의 연료를 분사압력과 분위기 압력의 변화를 주어 연료분사 후 0.2, 0.5, 1.0 ms의 분무영상을 비교하였다. 분무의 발달 경향을 보면, 분사압력을 40 MPa로 대기압에 분사한 경우 연료분무는 DME의 혼합비 따른 차이를 쉽게 구별할 수 있었다. 분사초기의 분무의 형상은 DME의 혼합비가 증가할 수록 같은 측정시간에 도달거리가 짧게 나타나는 분무의 발달과정을 보여 주었으면, 바이오 디젤인 경우 도달거리가 긴 모양으로 분사되었다. 분무의 폭은 DME의 혼합비가 높은 경우가 더 큰 폭으로 연료가 분사되는 것을 보여주었다. 분위기 압력만 1 MPa로 증가시켰을 경우에는 대기압보다 분무의 발달속도는 크게 감소되었으며, 혼합비에 따른 차이가 크게 줄어들었다. 분무의 형상은 전체적으로 비슷한 발달 형상을 보여주었으며, 분무폭의 차이도 많이 감소하였다. 분위기 압력만을 고정하고, 분사압력을 60 MPa로 30% 증가 시켰을 경우, 분무의 발달속도는 약간 증가하였으나, 연료의 분무형상의 변화는 큰 차이가 없었다. 혼합연료간의 분무발달 정도가 분사압력의 차로 조금 증가하였으나 분무

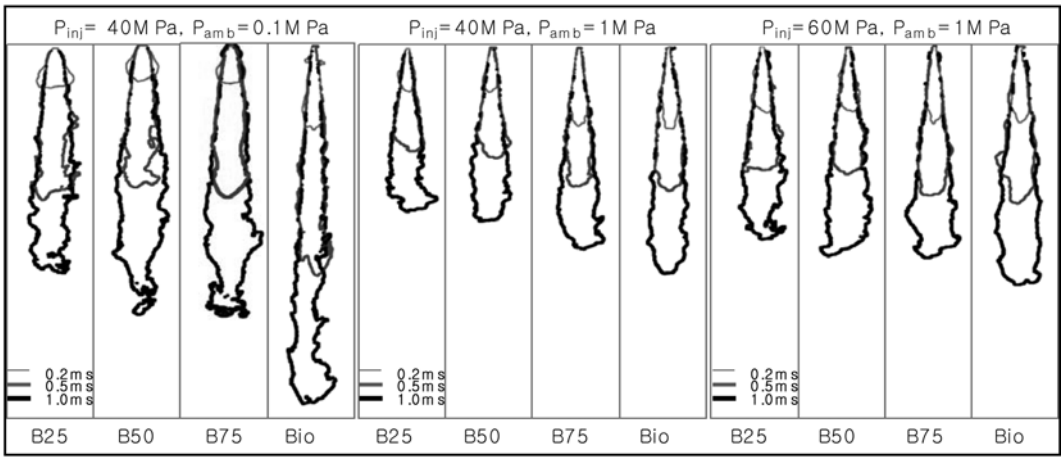

Fig. 4 Spray development at different injection and ambient pressure

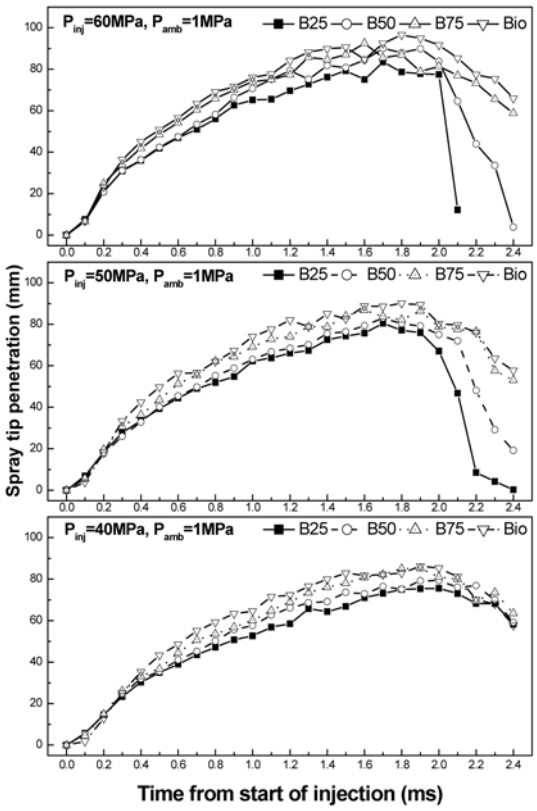

Fig. 5 Comparison of spray tip penetration according to different injection pressure

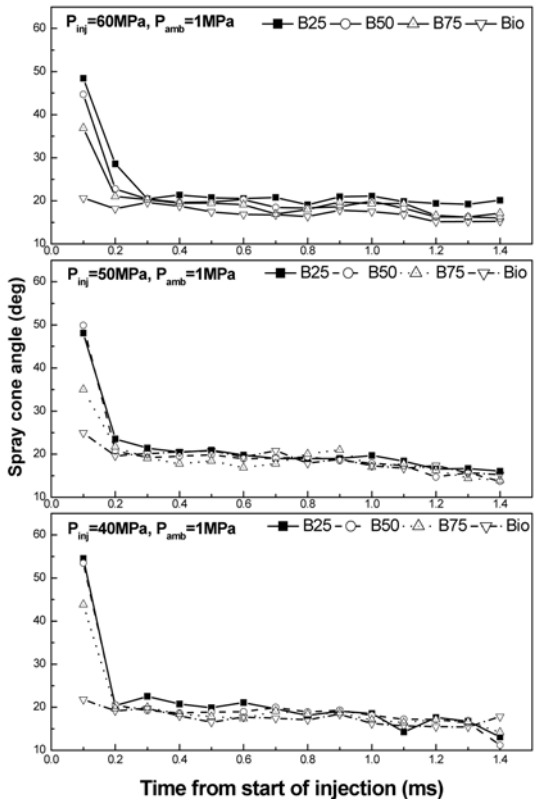

Fig. 6 Comparison of spray cone angle according to different injection pressure

의 폭과 크게 변화가 없었다.

4.2.1 연료분사압력에 따른 변화

Figure 5는 분위기 압력을 1 MPa로 고정하고, 연료의 분사압력 변화에 따른 분무의 도달거리를 라 비교한 것으로서, 분사압력의 증가에 따라 모든 실험연료들은 도달거리가 약간의 차이를 두고 증가하는 경향을 보여주었다. 연료의 혼합비에 따른 분무도달거리는 연료분사의 초기구간(t=0.3 ms)에서는 분무연료의 도달거리의 차가 거의 없는 경향을 보여주었다. 분사초기영역에서는 연료의 물성치에 영향을 미치는 DME의 혼합비가 분무의 도달거리에 큰 영향을 주지 않는 구간으로 판단된다. 그러나 분사 중반부터는 연료별 특성이 나타나기 시작한다. 낮은 밀도와 증발성이 강한 DME의 혼합비가 증가함에 따라 분무의 도달거리는 조금씩 감소하는 경향을 보여주었다. 순수 바이오 디젤의 경우가 가장 긴 분무도달거리를 보여 주었다. 분사 후반에서는 분사압력의 증가에 따라 분무 도달거리도 증가하였으나, 혼합연료의 경우 분무선단의 액적들이 증발되어 분무길이가 급격히 감소하는 현상이 나타나기 시작하였다. 분사압력의 증가로 분사후반에 분무선단에서의 증발이 가속되어 DME혼합비가 많은 연료가 순수 바이오 디젤에 비해 짧은 분무도달거리를 보여 주는 것으로 판단된다.

Figure 6의 분사압력의 변화에 따른 고온의 분위기 조건일때의 분무각 변화를 비교하여 보면, 연료의 분무각은 분사압력이 증가할수록 미세하게 감소하는 경향을 보여주었다. DME의 혼합비에 따른 변화는 고온 고압에서는 차이가 작게 나타났다. 노즐 팁으로부터 노즐지름의 60배 떨어진 곳에서 측정한 분무각의 변화는 물성치에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 다만, 분사초기에서의 분무각은 DME의 혼합비가 높을수록 크게 나타나는 경향을 보여 주었다. 분무각은 분사 후 0.2 ms 구간구간부터 감소하여 안정화 하는 결과를 보여 주었다. 이는 고온 고압의 분위기 조건에서는 분무각은 연료의 혼합비에 따른 밀도, 점도 등의 특성보다는 분위기 압력에 의한 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

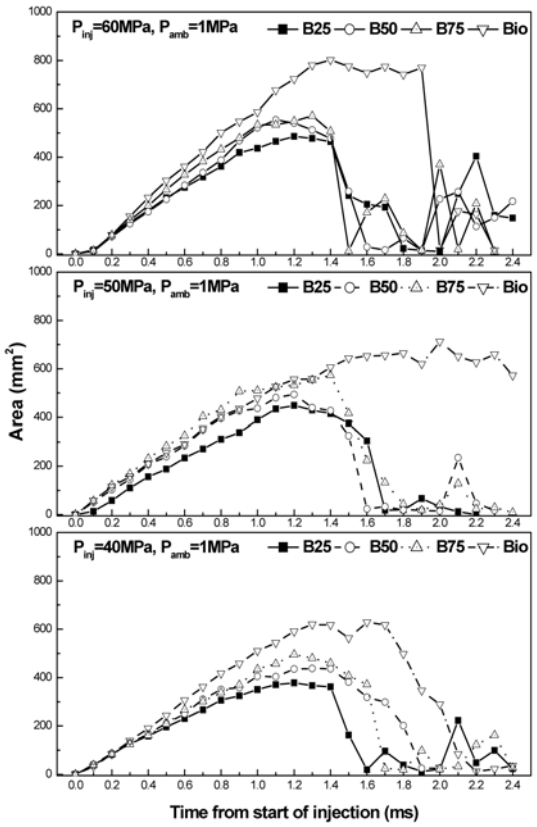

Fig. 7 Comparison of spray area according to different injection pressure

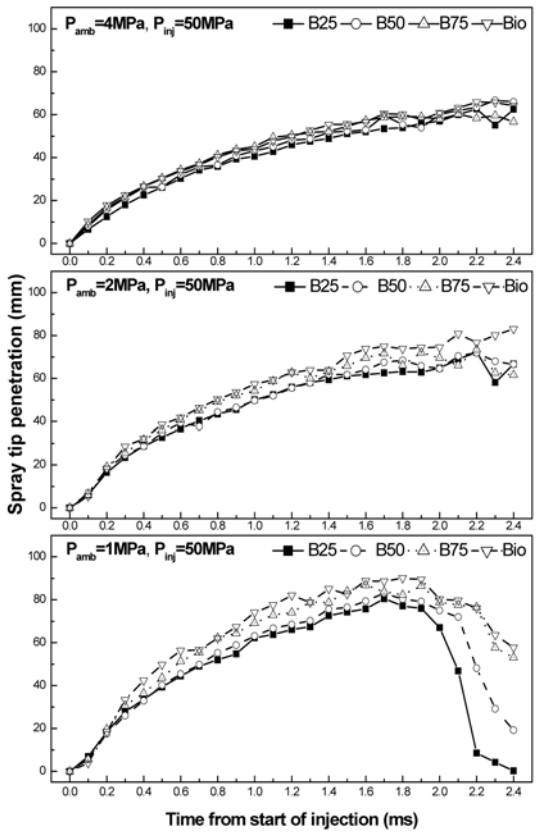

Fig. 8 Comparison of spray tip penetration according to different ambient pressure

Figure 7은 분사압력의 증감에 따른 분무 단면적의 변화를 비교한 그래프이다. 액적들의 반사광에 의해 가시광선 레이저 광원으로 찍은 분무 사진을 통하여 비교한 결과를 보면, 분무의 단면적은 분사압력이 증가함에 따라 단면적은 시간에 따라 증가하는 하였고, 연료 분사후반(t=1.4 ms)에서는 단면적의 증가가 감소하는 것으로 나타났다.

이는 고온 고압의 분위기 조건에 의해 분무가 증발이 발생하여 비증발장 조건과는 다른 분무의 발달과정을 보여주고 있었다. DME의 혼합에 따른 변화를 비교하여 보면, 혼합비의 감소에 따라 분무의 단면적은 증가하는 경향을 보여주었다. 분무의 도달거리와 분무각의 차이가 단면적의 변화에 영향을 주었다고 판단된다. 단면적이 증가는 혼합비에 따라 다소 증가 하였다. 그리고, DME의 혼합비가 증가할수록 분무후반부(t=1.4 ms)에서 단면적이 급격이 감소하는 정도가 크게 나타났다. 이는 고온의 분위기 조건과 고압분사에서 연료들이 분무후반에 급격히 증발하는 결과를 보여 준 것으로 판단된다.

4.2.2 분위기 압력에 따른 변화

연료의 분위기 압력의 변화에 따른 결과를 비교하여 보면 분무의 발달과정은 분위기 압력의 변화에 따라 크게 다름을 보여주고 있다.

Figure 8은 분위기 압력의 증가에 따른 분무의 도달거리를 보여준 그래프로, 분위기압력이 증가함에 따라 분무의 도달거리가 급격하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, DME의 혼합비가 증가할수록, 고압의 분위기 조건일 때, 시간에 따른 분무 도달거리는 감소하는 경향을 나타내어 주었다. 분위기압력이 1 MPa인 경우를 보면, 분무의 초기(0.3 ms) 까지는 연료별 차이 없이 증가하다가 분무중반부터 DME의 혼합비 차이에 따라 분무의 발달이 다르게 나타났으며, 분무후반부로로 갈수록 혼합연료의 분무도달거리는 급격히 감소하는 경향을 보여 주었다. 분위기압력을 2, 4 MPa로 증가 하였을 경우 연료의 분무발달을 비교하여 보면, 연료의 특성에 따른 큰 차이 없이 분무의 발달이 진행되는 것으로 나타났다.

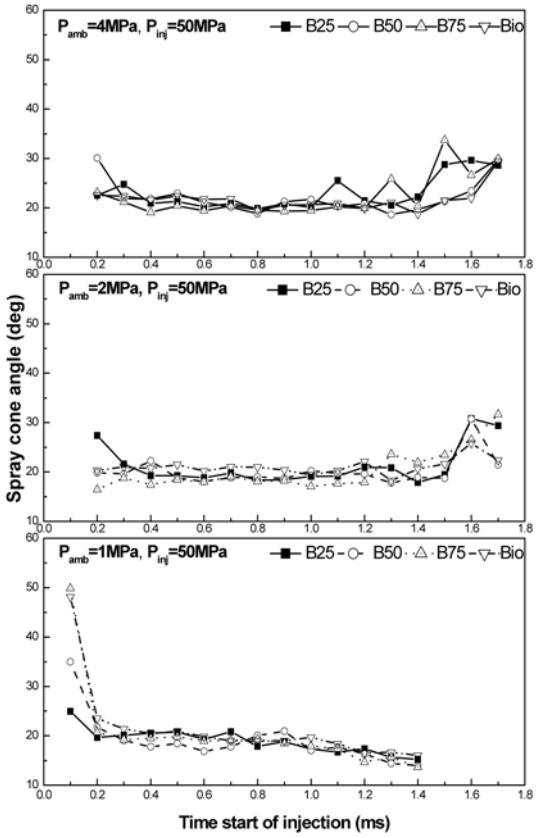

Fig. 9 Comparison of spray cone angle according to different injection pressure

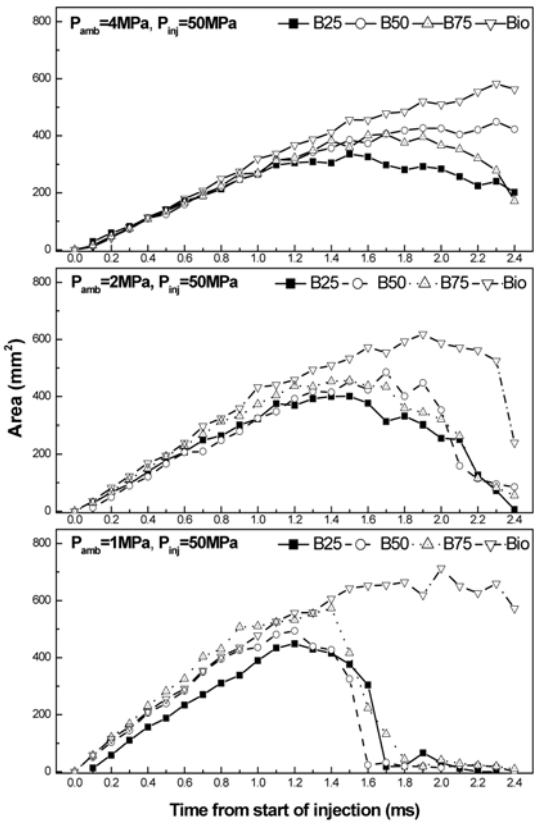

Fig. 10 Comparison of spray area according to different ambient pressure

이는 분위기압이 증발 압보다 크게 증가함에 따라 DME연료의 증발이 감소하고 액체상태로 존재하면서 바이오디젤과 비슷한 액적의 분열상태로 발전하여 분무의 발달에 영향을 작게 준 것으로 판단된다.

Figure 9는 분위기 압력에 따른 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 분위기 압력이 대기압의 경우 DME 혼합비에 따른 분사각의 차이를 쉽게 비교 할 수 있었으나, 분위기 압력이 1, 2, 4 MPa로 증가할수록 혼합비가 증가할 수록 분무각이 커지는 경향을 판별할 수 있었으나, 연료의 분무각의 차이가 감소하는 경향을 보여 주었다. 분위기 압력의 증가는 모든 연료의 분무각의 증가에 영향을 주었으나, 각각의 혼합 연료의 확연한 차이는 구분하기가 힘들었다. 이는 분위기 압력의 증가로 인해 DME의 증발 특성에 의한 분무각의 차이가 감소하여 혼합연료간의 차이가 적어진 것으로 판단된다. 분위기 압력의 증가함에 따라 연료의 분무각은 다소 증가하였지만 연료의 혼합비에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다. 이는 고압의 분위 기 조건에서 DME의 미립화 경향이 다소 감소하여 분무각의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Figure 10은 분위기 압력의 영향에 따른 분무 단면적의 발달과정을 비교한 그래프이다. 이 선도에서 분위기 압력의 증가로 인하여 분무의 발달속도가 감소함에 따라 분무의 단면적 또한 감소하는 결과를 나타내었으며, 시간에 따른 분무단면적의 발달은 1 MPa 분위기 조건일수록 빠르게 증가하는 경향을 보여주었으나, 분무 중반 이후 DME가 혼합된 연료들에서 빠른 증발로 인하여 분무의 단면적이 감소하는 결과가 나타났다. 분위기 압력이 2, 4 MPa로 증가함에 따라 분무의 단면적은 시간에 따라 증가하였으며, 혼합연료인 경우도 같이 증가하는 결과를 보여주었다. 주위의 압력이 증가함에 따라 증발할 수 있는 DME량이 감소하면서 보다 넓은 범위로 발달해 나감에 따라 단면적이 증가하는 결과를 보여준 것으로 판단된다.

5. 결 론

고온 고압의 분위기 조건에서의 DME를 혼합한바이오디젤의 분무 특성을 실험적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 혼합비에 따른 연료의 분사율 특성을 비교하여 보면, DME의 혼합비가 증가 할수록 분사율의 값은 감소하는 경향은 혼합비에 따른 연료 밀도차에 따른 영향으로 판단 되어지며, 같은 통전시간에 따른 실제분사기간은 증가하는 경향은 DME연료의 높은 압축성의 영향을 받은 것으로 판단되어진다. 분사지연기간은 연료의 점성도의 변화에 따라 혼합비가 감소 할수록 점성도의 증가함에 따라 분사지연기간이 증가하는 경향을 나타내었다.

2. 분무의 발달과정은 연료분사 시작 후 0.6 ms까지 구간에서는 분무가 급격히 증가함을 보여주었으며, 분사 압력증가와 분위기 압력이 감소함에 따라 분무 선단이 도달거리는 증가하였다. 고온 고압의 분위기 조건에서의 분무 길이의 변화는 연료의 혼합의 영향에는는 다소간의 차이를 보이면 발달하였으나 그 차이가 크게 나타나지 안았고, 분사압력과 분위기 압력이 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다.

3. 분무각은 분위기 압력의 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 분무각은 t=0.4 ms 부근까지는 급격히 감소하다가 이후 영역에서는 완만한 분무각을 나타내었다. 고압의 분위기 조건에서의 연료의 혼합비에 따른 변화는 작게 나타났으며, 연료의 물성치보다 분위기의 압력이 큰 영향을 주는 것으로 결론을 얻었다.

4. 분무의 단면적 변화는 분위기 압력의 감소에 따라 증가하는 경향을 보여주었고, DME연료의 혼합비가 작을수록 시간에 따른 분무의 단면적이 증가하는 경향을 나타내었다. DME혼합비의 증가는 분무의 후반에 빠른 증발에 영향을 주어 분무의 단면적이 감소하는 결과를 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-314-D00056)으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) 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, 2006, pp.2201~2208.

(2) Y. Yoshimoto and H Tamaki, “Reduction of NOx and Smoke Emission in a Diesel engine Fueled by Biodiesel Emulsion Combined with EGR”, SAE No. 2001-01-0649, 2001.

(3) Alam, M. Song, J. Acharya, R. Boehman, A. Miler, K., “Combustion and emission performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engines,” SAE Tech. No. 2004-01-3024, 2004.

(4) 권상일, 이창식, “바이오디젤 사용에 따른 경유승용차의 나노입자 배출특성 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol.12, No.1, 2007년, pp.65~70.

(5) S. H. Park, S. H. Yoon, H. K. Suh and C. S. Lee, “Effect of the Temperature Variation on Properties of Biodiesel and Biodiesel-Ethanol Blends Fuels”, Oil & Gas Science and Technology, Vol. 63 , No. 6, pp. 737-745, 2008.

(6) Kapus, P. and Ofner, H., “Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesel Operated on Dimethyl Ether”, SAE No.950062, 1995.

(7) M. Y. Kim, S. H. Bang and C. S. Lee, “Experimental investigation of spray and combustion characteristics of dimethyl ether in a common-rail diesel engine”, Energy & Fuels, Vol. 21, pp.793~800, 2007.

(8) S. H. Bang, B. W. Ryu and C. S. Lee, “An experimental investigation on the spray characteristics of DME blended biodiesel”, SAE, NO. 2007-01-3631, 2007.

(9) M. Y. Kim, S. H. Yoon, B. W. Ryu, C. S. Lee, “Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system”, Fuel, Volume87, PP 2779~2786, 2008.

(10) 김형준, 박수한, 이창식, “고압 분사 인젝터의 분사 시기에 따른 DME 분무특성에 관한 실험 및 해석적 연구”, 한국액체미립화학회지, Vol.14, No.3, 2009년, pp.109~116.

(11) S. Kajitani, Z. Chen, L., M. Konno and K. T. Rhee, “Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Operated with DME,” SAE No. 972973, 1997.