분위기 조건이 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 분무 거동 및 미립화 특성에 미치는 영향

박수한* · 김형준* · 서현규* · 전문수** · 이창식†

Effect of Ambient Conditions on the Spray Behavior and Atomization Characteristics of Biodiesel-ethanol Blended Fuels

Su Han Park, Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh, Mun Soo Chon and Chang Sik Lee

Key Words: Biodiesel(바이오디젤), Biodiesel-ethanol blended fuel(바이오디젤-에탄올 혼합연료), Spray characteristics (분무 특성), Ambient temperature (주위 온도), Ambient pressure (주위 압력)

Abstract

The aim of this work is to investigate the effect of ambient conditions on the spray behavior of biodiesel-ethanol blended fuels. In order to analyze the spray behavior, spray tip penetration and spray cone angle were obtained from the visualization system and the effects of ethanol blending are compared macroscopic characteristics with the numerical results. It was reveled that the ethanol contents in biodiesel-ethanol blended fuels affect the spray tip penetration a little and increased the spray cone angle. Increased ambient pressure induced the decrease of the spray tip penetration, and the increased ambient temperature lead to the increase of the spray tip penetration. In addition, the increased ambient temperature promoted the vaporization and atomization of spray with the effect of increasing ethanol fuel.

1. 서 론

바이오디젤 연료는 재생식물로부터 생산이 가능한 함산소 연료로서, 디젤엔진의 연소실 내에서 완전 연소를 가능하게 하여 입자상 물질(particulate matter, P.M.)과 같은 배기 배출물 저감에 우수한 특성을 가지고 있다. 대체연료로 기대되는 바이오디젤은 여러 연구자들에 의해 미래 대체 에너지로써의 가능성이 입증되었으며 저온 성능 향상을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

Lee 등[1] 은 바이오디젤을 디젤엔진에 적용하였을 경우 HC 및 CO의 배출량은 감소하는 반면 연료 내에 함유된 산소로 인해 NO_x 배출량은 다소 증가하는 것으로 보고 하였다. 또한 바이오디젤과 디젤의 혼합연료에서 바이오디젤의 함유량이 증가할수록 착화지연기간은 짧아지는 것으로 지적하였다. Yoshimoto 등[2] 은 바이오디젤의 유화 연료와 EGR적용에 따른 NO_x 및 매연 저감에 대한 연구를 수행하였고, Oh 등[3]은 미강유(쌀겨에서 추출한 오일로부터 제조된 바이오디젤)를 디젤기관에 적용할 경우 혼합비 증가에 따른 매연저감에 관하여 보고하였다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 바이오디젤은 연료의 산화안정성과 저온유동성이 디젤연료에 비해 나쁘므로 쉽게 변질되거나 저온 시동성 악화를 유발하는 등의 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 순수한 바이오디젤에 디젤 및 에탄올 등을 혼합한 연료에 대한 연구가 진행되고 있다. 바이오디젤과 달리 에탄올 연료는

(2008년 10월 9일 접수 ~ 2008년 12월 1일 심사완료)
*한양대학교 대학원 기계공학과
**충주대학교 에너지시스템공학과
†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

낮은 세탄가와 낮은 점성계수를 가지며 연료가 결정화되는 온도 또한 매우 낮아 바이오디젤과 에탄올을 혼합할 경우 각각의 연료가 가지는 단점을 보완하면서 바이오디젤의 저온 유동성 단점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다. Shudo 등[4]은 바이오디젤의 저온 유동성을 개선하기 위해 에탄올 혼합연료에 대한 실험을 수행하였다. 그들은 약 10%의 에탄올 혼합으로 약 30%의 저온 유동성을 개선할 수 있다고 보고하였으며 연료 분사시기의 지각을 통해 별다른 열효율의 손실 없이 NO_x와 Smoke의 동시저감이 가능하다고 보고하였다. Chen 등[5]은 에탄올과 디젤 혼합연료를 이용한 연소 및 배기실험을 수행하였으며 상 분리를 방지하기 위해 바이오디젤을 첨가제로 사용하였다. 디젤-에탄올 혼합연료에서 에탄올 함유량의 증가는 착화지연기간의 증가와 연소기간의 감소를 가져오며 최고 연소 압력을 증가시킨다. 또한 에탄올-디젤 혼합연료의 사용으로 P.M과 smoke의 동시저감이 가능한 것으로 보고하였다. 이와 같은 바이오디젤-에탄올 혼합연료에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으나 혼합연료의 분무 특성, 미립화 및 증발특성에 대하여는 더욱 체계적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

본 연구에서는 바이오디젤과 에탄올의 혼합연료를 이용하여 분위기 온도 및 압력조건에 따른 분무의 미립화 특성에 대하여 실험하고 이에 따른 결과를 수치해석 결과와 비교분석하였다. 또한 분위기 온도에 따른 혼합 연료의 미립화 및 증발특성을 해석하여 온도의 영향을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 바이오디젤과 에탄올 혼합연료의 분위기 조건에 따른 분무 거동을 분석하기 위해 분공 직경(diameter, D) 0.3 mm, 오리피스 깊이(orifice length, L) 0.8mm인 단공 노즐(L/D=2.87)의 인젝터를 사용하는 Fig. 1과 같은 가시화 장치를 구성하였다. 가시화장치는 고압펌프(Haskel, HSF-300)와 커먼레일로 이루어진 연료 공급 부분과 고압 챔임버와 고속카메라(Photron, Fastcam-APX RS)로 이루어진 영상 가시화 장치, 영상 취득 및 저장 장치가 장착된 컴퓨터로 구성하였다. 메탈-할라이드 램프(Photron, HVC-SL)는 고속카메라의 광원으로 사용되었으며, 가열 장치 및 질소가스를 이용하여 고압 체임버 내의 분위기 온도 및 압력을 각각 변화시켰다.

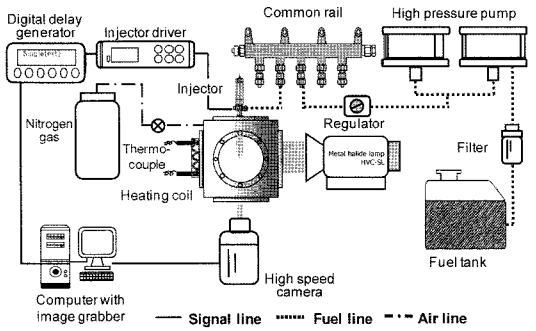


Fig. 1 Schematic of the visualization system

Table 1 Fuel properties and composition ratio

		BD100	BE10	BE20	BE30
Density (kg/m^3)		870	863	860	850
Dynamic viscosity(mPa·s)		6.05	4.64	3.68	3.22
Kinematic viscosity(mm^2/s)		6.95	5.38	4.28	3.79
Composition (%)	Biodiesel	100	90	80	70
	Ethanol	0	10	20	30

디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)를 이용하여, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)에서 발생하는 인젝터 분사 신호와 고속 카메라(Photron, Fastcam-APX RS)를 동기화하였다. 한편 BOSCH법[6]을 기본 원리로 하는 분사율 장치를 이용하여 분사지연기간 및 분사기간 등의 분사율 특성을 분석하였다.

2.2 실험 방법

Table 1은 본 연구에 사용된 연료의 물성치(밀도, 절대점도, 동점도) 및 연료 조성비를 나타낸 것이다. Table 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 100% 바이오디젤 및 바이오디젤에 에탄올 연료를 10%씩 증가시켜 30%까지 혼합한 연료를 사용하였다. 혼합연료의 밀도 및 점도는 다이얼식 점도계(Brookfield, LVT and ULA-36)와 비중계를 사용하여 각각 측정하여 구하였다.

3. 액적 분열 및 증발 모델

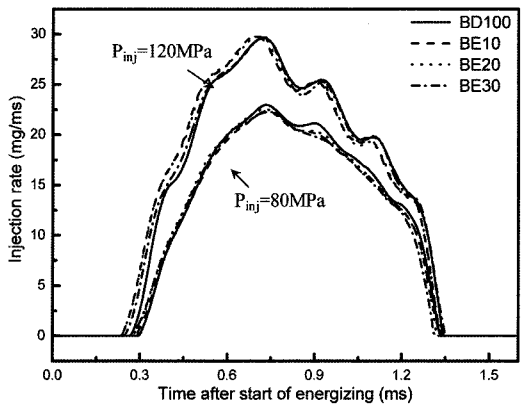
본 연구에서는 KIVA-3V로부터 얻어진 수치해석 결과를 실험결과와 비교분석하였다. KIVA 코드내의 바이오디젤과 혼합연료들을 연구에 적용하기 위하여 Yoon

등[7]에 의해 측정된 바이오디젤 연료의 온도에 따른 밀도와 점도를 연료 라이브러리에 추가하였다. 고압 디젤 인젝터의 노즐내부 유동을 해석하기 위하여 노즐 유동 모델[8]을 적용하였으며 노즐입구에서의 캐비테이션 현상을 고려한 초기 액적의 지름과 속도를 액적분열 모델의 초기 조건으로 설정하였다. 또한 노즐출구에서의 고압 분사에 의하여 분사되는 액적들의 분열 현상을 예측하기 위하여 1차, 2차 분열이론을 결합한 KH-RT (Kelvin-Helmholtz & Rayleigh-Taylor) 복합액적분열 모델[9]을 적용하여 계산을 수행하였다. 액적분열 모델에서의 분열상수는 실험결과와 비교하여 타당성을 검증한 후 결정하였다. 분위기 온도에 따른 분무의 증발특성을 비교하기 위하여 Lumped-body 이론[10]을 기본으로 하여 단일액적의 내외부간 열전달을 고려한 증발 모델을 사용하여 해석하였다.

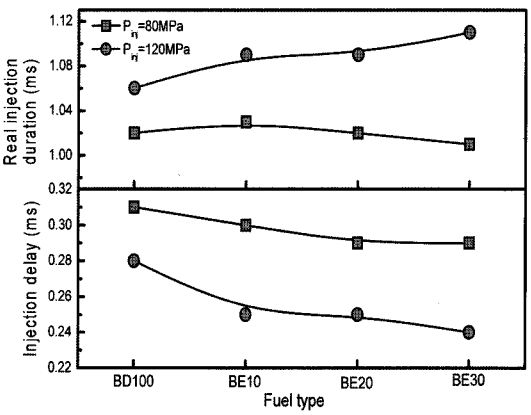
4. 실험결과 및 고찰

4.1 에탄올 함량에 따른 혼합연료의 분무특성

Figure 2는 바이오디젤과 에탄올의 혼합연료에서 에탄을 혼합비율에 따른 분사율 특성을 나타낸 것이다. 시험 연료의 분사량은 연료를 3000회 연속 분사하여 측정한 값을 평균하여 얻은 값을 이용하였다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 바이오디젤 및 혼합연료는 대체로 유사한 분사율 형태를 나타내었다. Fig. 2(b)에서는 분사압력 및 에탄올 함유량의 증가로 인해 분사 지연 기간이 짧아지는 현상을 확인할 수 있었다. 분사지연기간은 분사율 측정 결과로부터 얻을 수 있었으며, 인젝터 신호의 입력시간과 분사율이 최초로 증가하는 시점사이의 시간 간격으로 정의하였다. 또한 에탄올 혼합비율의 증가에도 불구하고, 분사율의 최대치는 변화가 없었다. 분사지연 기간 및 실제 분사기간에 대한 정량적인 분석은 Fig. 2(b)에 나타내었다. 분사압력의 증가는 분사시간을 길게 하였으며 분사 지연기간은 짧게 하였다. 이것은 분사압력이 증가함에 따라 인젝터 니들을 빠르게 열어주게 되고, 이로 인해 분사 지연 기간이 짧아지면서 실제 분사 기간이 길어진 결과이다. 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 80 MPa 분사압력에서는 실제 분사 기간 및 분사 지연 기간이 거의 일정하였으나 분사압력 120 MPa에서는 실제 분사 기간은 증가하고 분사 지연 기간은 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 에탄올 혼합비율이 증가함에 따른 절대 점성 계수의 감소가 분사압력



(a) Injection rate profile



(b) Injection duration and injection delay

Fig. 2 Injection rate characteristics according to contents of ethanol fuel (P_{amb}=4.0 MPa, t_{eng}=0.8 ms)

의 증가로 인한 빠른 니들의 열림 현상과 함께 분사지연기간이 짧아지고 이로 인하여 실제 분사기간을 길게 한 것으로 판단된다. 또한, 에탄올 혼합비율 증가에 따른 점성계수의 감소는 노즐 오리피스 내에서 연료와 오리피스 벽면사이의 마찰력을 감소시키는 결과를 주어 분사지연기간이 짧아지는 것으로 판단된다.

Figure 3은 분무 도달 거리 및 분무각에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 분무 도달 거리는 노즐 팁과 분사된 연료의 가장 먼 지점사이의 거리로, 분무각은 노즐팁과 분사된 연료의 최외곽선 사이의 각으로 정의하였다. Fig. 3(a)에서 도달 거리는 에탄올 연료의 혼합비율에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Hiroyasu 등[11]에 의한 식(1)~(3)에 의하면 연료분무의 액적 분열 시간은 연료의 밀도에 비례하며, 액적 분열 시간 이전의 분무 도달 거리는 연료 밀도에 반비례하고, 이후에는 연료

물성치에 무관함을 보였다. 이에 따라 액적 분열 시간이 거의 동일한 네 가지 실험연료(BD100-0.098 ms, BE10-0.097 ms, BE20-0.097 ms, BE30-0.096 ms)는 연료의 물성치와 무관하게 유사한 분무 도달 거리를 갖게 되는 것으로 판단된다.

$$S = 0.39\left(\frac{2\Delta P}{\rho_l}\right)^{0.5} t \quad (0<t\le t_b) \tag{1}$$

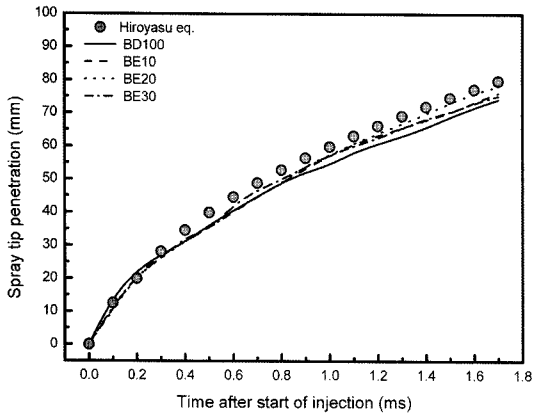
$$S = 2.95\left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25} (Dt)^{0.5} \quad (t\ge t_b) \tag{2}$$

$$t_b = 28.65\frac{\rho_l D}{(\rho_a \Delta P)^{0.5}} \tag{3}$$

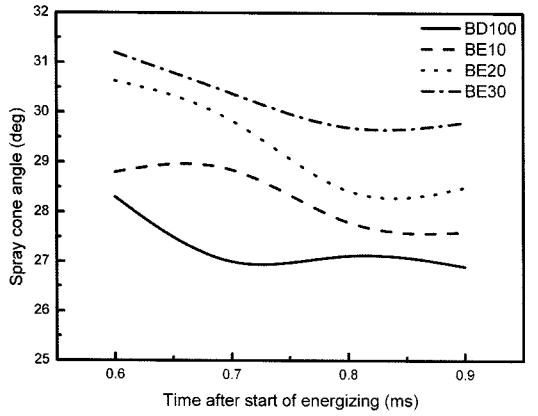
한편 분사 후 0.9~1.0 ms 이후에는 각 연료간 분무 도달 거리의 차이가 생기기 시작하는데, 이 지점은 실제 분사가 거의 끝난 시기로 액체 연료의 관성과 운동량에 의한 영향 보다 주위 공기에 의한 공기역학적인 항력에 의한 영향을 많이 받는 영역이다[12]. 이 영역에서는 점성계수가 높은 바이오디젤 연료의 분무 도달 거리가 다소 짧아지는 경향을 나타내었다. Fig. 3(b)는 바이오디젤과 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분무각 특성을 나타낸 것이다. 분무각은 분사 후 대체로 감소하는 경향을 나타냈으며 에탄올 혼합비율이 증가함에 따라 분무각 역시 증가하는 특성을 나타내었다. 이것은 실험식 $\theta \propto (\rho_a/\rho_l)^{0.26}$ [11]에서 알 수 있는 바와 같이, 분무각은 분사되는 액체 연료의 밀도에 반비례하는 특성과 일치하는 결과이다.

4.2 분위기 압력에 따른 분무 특성

주위 기체에 의한 공기역학적인 저항의 크기는 분무 도달 거리를 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. Fig. 4는 BD100과 BE30의 주위 기체의 압력에 따른 분무 도

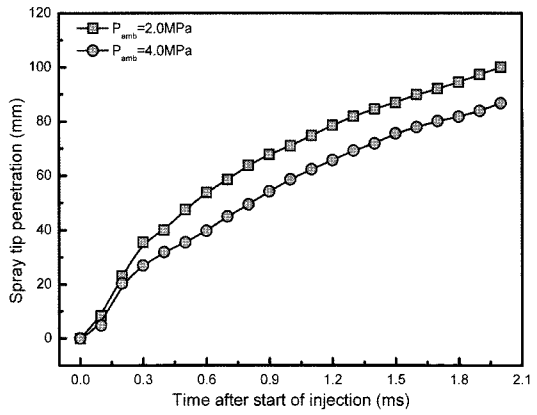


(a) Spray tip penetration

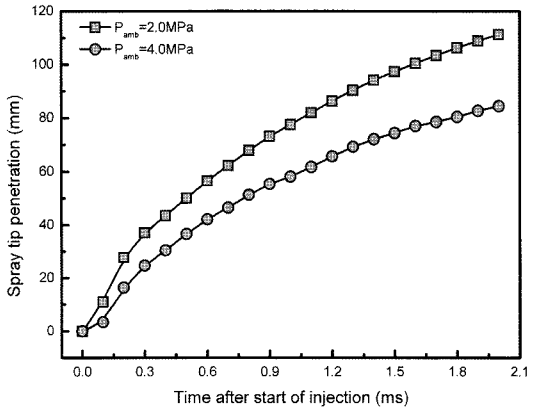


(b) Spray cone angle

Fig. 3 Effect of the ethanol contents on the macro- scopic spray characteristics (P_{inj}=120 MPa, P_{amb}=4.0 MPa, t_{eng}=0.8 ms)



(a) BD100



(b) BE30

Fig. 4 Effect of the ambient gas pressure on the spray tip penetration of BD100 and BE30 (P_{inj}= 120 MPa, t_{eng}=1.2 ms, T_{amb}=300K)

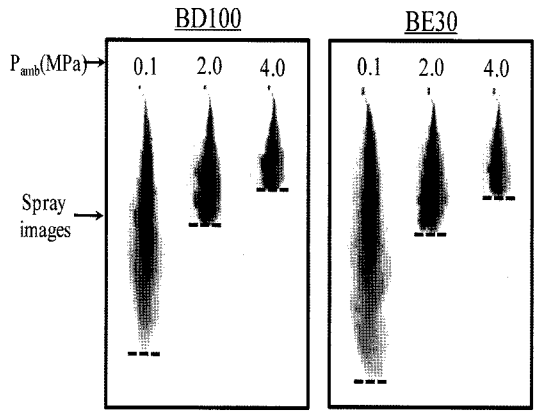


Fig. 5 Comparison of the spray images due to the variation of the ambient pressure (P_{inj}=120 MPa, t_{eng}= 1.2 ms, t_{asoi}=0.5 ms)

달 거리의 특성을 나타낸 것이다.

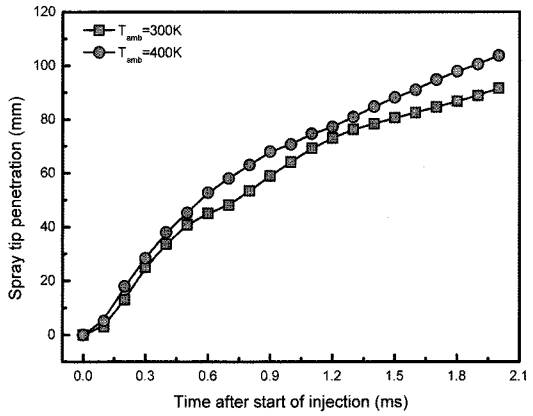
그림에서 보는 바와 같이, 분위기 압력의 증가는 두 연료의 분무 도달 거리의 감소를 가져왔으며 이것은 증가한 분위기 압력으로 인해 주위 기체의 밀도가 증가하게 되어($\rho_{amb} \propto P_{amb}$) 분사된 연료의 분무 발달을 억제하기 때문이다.

Figure 5는 분사압력과 통전기간이 각각 120 MPa, 1.2 ms 일 때 분사 후 시간 0.5 ms에서 BD100과 BE30의 분위기 압력에 따른 분무 영상을 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과와 같이 분위기 압력의 증가는 분무 도달 거리를 감소시키고 분무각을 증시키는 것을 확인할 수 있었다.

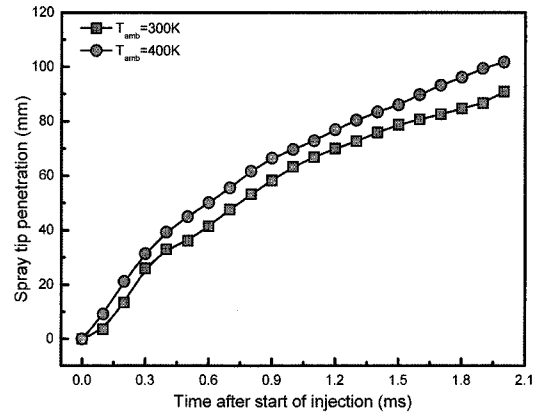
4.3 분위기 온도에 따른 분무 특성

분위기 온도의 변화는 고압 체임버 내의 기체 밀도 증감에 영향을 주며, 이것 역시 인젝터 노즐로부터 분사되는 연료의 분무 도달 거리에 영향을 미친다. Fig. 6은 분위기 온도를 300K에서 400K으로 증가시켰을 때, BD100과 BE30의 분무 도달 거리를 비교한 것이다. 분위기 온도의 증가는 분무 주위 기체 밀도의 감소($\rho_{amb} \propto T_{amb}$)를 가져오고 이러한 영향으로 액체 연료의 분무와 주위 기체 사이의 공기역학적인 저항력은 감소하게 된다. 이로 인해 분무 도달 거리는 다소 길어지게 되었다. 그리고 BD100과 BE30의 분사 시작 후 시간과 분위기 온도 증가에 따른 분사형태는 유사하였다.

Figure 7은 분무 주위 기체 온도의 변화에 따른 BD100과 BE30의 분무 영상을 수치해석 결과와 비교한 것이다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 주위 온도의 증가에 따른 분무 도달 거리 증가를 나타내는 실험



(a) BD100



(b) BE30

Fig. 6 Effect of the ambient gas temperature of BD100 and BE30 on the spray tip penetration (P_{inj}=80 MPa, P_{amb}=2.0 MPa, t_{eng}=1.2 ms)

결과와 수치해석의 결과는 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 수치해석 결과에서는 주위 기체의 온도가 300K인 경우 분무 하류에서 분무 진행 반대방향의 와류 현상을 뚜렷이 확인할 수 있다. 반면 주위 기체의 온도가 400K으로 증가하였을 경우 분사된 연료가 주위 기체 온도(T_{amb}= 400K)의 영향을 받아 분무 하류에서 액적의 온도가 증가하였다. 이에 따라 증가한 액적의 온도에 의한 동점성 계수와 표면장력의 감소로[7] 액적의 분열은 활발히 일어나게 되고 액적의 증발이 일어나게 되어 와류현상에 의한 꼬리부분의 발달정도가 희미하게 관찰되었다. 한편 주위 기체 온도 400K에서 BE30은 BD100에 비해 분무 하류에서 분열횟수가 더 증가하여 미립화된 액적이 좌우의 주위 기체에 의하여 반경방향으로 분열된 액적의 진행이 활발히 일어나게 된다. 이것

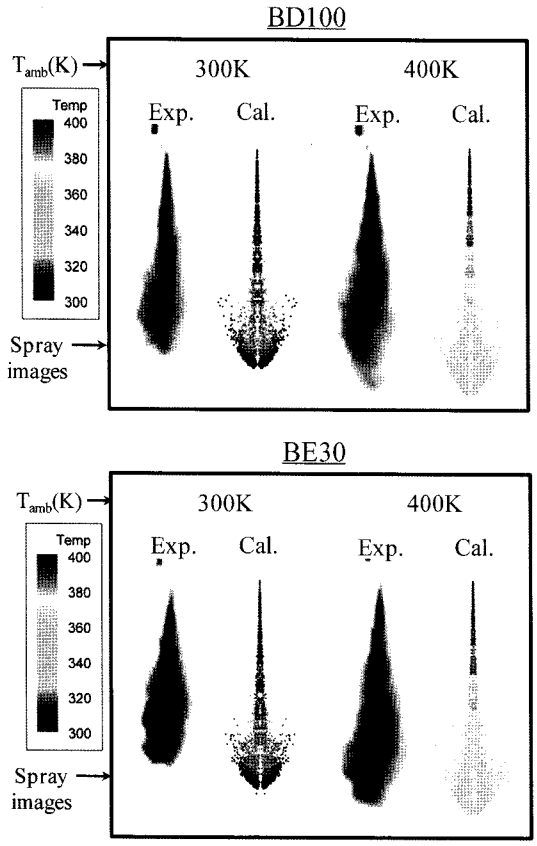


Fig. 7 Comparison of the spray images between experimental and numerical results of BD100 and BE30 at two ambient gas temperatures (P_{inj}=80 MPa, P_{amb}=2.0 MPa, t_{eng}=1.2 ms, t_{asoi}=0.5 ms)

은 BE30이 BD100보다 연료 액적의 표면장력 및 밀도와 동점성 계수가 낮아, 2차 분열 모델인 RT모델에서의 액적의 가속도와 파장에 영향을 미치게 되어, 분열 횟수를 증가시켰기 때문으로 판단된다.

주위 기체의 온도 변화에 따른 분무 특성을 명확히 분석하기 위해, 수치해법을 이용하여 SMD(Sauter mean diameter) 및 연료의 증발량 구하여 Fig. 8에 나타내었다. SMD는 전체의 측정영역에서 동일한 시간의 연료 액적의 크기를 평균한 값을 의미한다. Fig. 8에서 확인할 수 있는 바와 같이 BE30은 BD100에 비해 작은 SMD값을 가지며 BD100 및 BE30은 주위 기체의 온도가 증가함에 따라 다소 작아지는 경향이 확인되었다. 주위 기체 온도의 증가에 따라 연료 증발량은 증가하였으며 BE30의 경우가 연료 내에 포함된 에탄올의 영향으로 BD100보다 증발량이 약간 더 크게 나타났다.

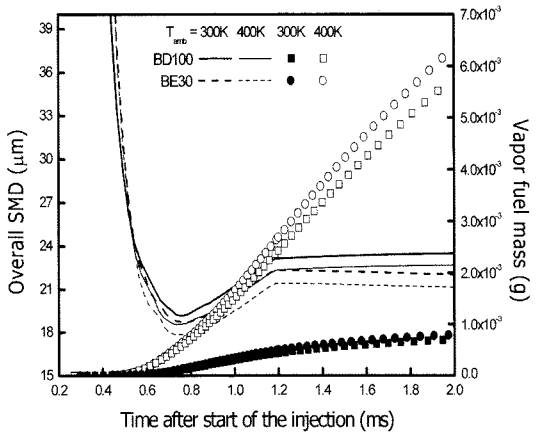


Fig. 8 Calculated overall SMD characteristics and vapor fuel mass characteristics of BD100 and BE30 (P_{inj}=80 MPa, P_{amb}=2.0 MPa, t_{eng}=1.2 ms, line : Overall SMD, symbol : Vapor fuel mass)

5. 결 론

본 연구에서는 바이오디젤과 바이오디젤-에탄올 혼합연료의 분위기 조건에 따른 분무 거동 특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바이오디젤-에탄올 혼합연료에서 에탄올의 함유량이 증가할수록 혼합연료의 분사 지연 기간은 짧아지고 실제 분사 기간은 증가하였다. 또한 혼합연료에서 에탄올의 함량은 분무 도달 거리의 변화에는 그다지 영향을 미치지 않으며 분무각을 증가시키는 결과를 나타내었다.

2. 주위 기체 압력의 증가는 바이오디젤 및 에탄올 혼합연료의 분무 도달 거리를 억제하였다. 또한 주위 기체 온도의 증가는 분무 도달 거리를 증가시켰다. 주위 기체의 온도와 압력의 변화에 따른 BD100 및 BE30의 분무 형태의 변화 양상은 대체로 유사한 결과를 나타내었다.

3. 수치해석 결과를 통해, 주위 기체 온도의 증가는 분사된 연료 액적의 점성계수 및 표면장력을 감소시켜 분무 하류에서의 미립화가 촉진됨을 확인할 수 있다. 바이오디젤연료에 에탄올을 혼합하였을 경우, 연료의 증발량이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무저공해 자동차 사업단)와 2008년 정부재원으로 한국 학술 진흥 재단의

지원(KRF-2008-314-D00056)을 받아 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

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, 2005, pp. 2201~2208.

(2) Y. Yoshimoto and H. Tamaki, "Reduction of NOx and smoke emissions in a diesel engine fueled by biodiesel emulsion combined with EG", SAE technical paper, 2001, SAE2001-01-0649.

(3) 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)", Transaction of KSAE, Vol. 10, No. 2, 2002, pp. 15~22.

(4) T. Shudo, A. Fujibe, M. Kazahaya, Y. Aoyagi, H. Ishii, Y. Goto and A. Noda, "The cold flow performance and the combustion characteristics with ethanol blended biodiesel fuel", SAE technical paper, 2005, SAE 2005-01-3707.

(5) H. Chen, S. J. Shuai and J. X. Wang, "Study on combustion characteristics and PM emission of diesel engines using ester-ethanol-diesel blended fuels", Proceeding of the combustion institute, Vol. 31, 2007, pp. 2981~2989.

(6) W. Bosch, "The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", SAE technical paper, 1966, SAE660749.

(7) S. H. Yoon, S. H. Park and C. S. Lee, "Experimental investigation on the fuel properties of biodiesel and its blends at various temperatures", Energy & Fuels, Vol. 22, No. 1, 2008, pp. 652~656.

(8) C. K. Sarre, S. C. Kong and R. D. Reitz, "Modeling the effects of injector nozzle geometry on diesel sprays", SAE Technical Paper Series, 1999, SAE1999-01-0912.

(9) T. F. Su, M. A. Patterson, R. D. Reitz and P. V. Farrel, "Experimental and numerical studies of high pressure multiple injection sprays", SAE Technical Paper Series, 1996, SAE960861.

(10) A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler, "KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays", Los Alamos Report, 1989, LA-11560-MS, pp. 12~20.

(11) H. Hiroyasu and M. Arai, "Structures of fuel sprays in diesel engines", SAE technical paper, 1990, SAE900475.

(12) I. V. Roisman, L. Araneo and C. Tropea, "Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 33, 2007, pp. 904~920.