

다단분사를 적용한 바이오디젤 연료의 분무 미립화 특성

박수한¹⁾ · 김형준¹⁾ · 김세훈¹⁾ · 이창식^{*2)}

한양대학교 기계공학부¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

Spray-atomization Characteristics of Biodiesel Fuel with Multiple Injection

Su Han Park¹⁾ · Hyung Jun Kim¹⁾ · Se Hun Kim¹⁾ · 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 11 June 2009 / Accepted 15 January 2010)

Abstract : This study deals with the investigation about the effect of the pilot and split injection strategies on the spray-atomization characteristics of biodiesel fuel derived from a soybean oil. Experimental results were compared with the calculation results obtained from the numerical analysis. Fuel properties of biodiesel according to the variation of the fuel temperature were inserted to the fuel library in the KIVA code. The amount of fuel injection is divided into equal mass for each split and main injection. In this work, the pilot injection strategy can be achieved by the amount of fuel injection shortly before the start of the main injection. A spray tip penetration, radial distance and spray area were measured for the analysis of macroscopic spray characteristics. In addition, the local and overall droplet size distribution were calculated by using KIVA-3V code to study the effect of split and pilot injection on the atomization performance under high ambient pressure. From these studies, the experimental results showed the multiple injection induced the decrease of the spray tip penetration due to the reduction and division of the spray momentum compared to single injection. In the atomization performance, the droplet size increased in the case of the multiple injection a little. Moreover, the SMD slightly increased as the fuel droplets goes through the axial direction. The spray behavior of numerical results were well predicted the experimental multiple spray characteristics of biodiesel fuel.

Key words : Biodiesel(바이오디젤), Spilt injection(스플릿 분사), Pilot injection(파일럿 분사), Sauter mean diameter(Sauter 평균 지름, SMD), Spray tip penetration(분무 도달 거리), Atomization(미립화)

Nomenclature

B100 : biodiesel fuel
D100 : diesel fuel
 P_{amb} : ambient pressure (MPa)
 P_{inj} : injection pressure (MPa)
SOE : start of energizing (ms)
T : temperature (°C)
 t_{asoe} : time after the start of energizing (ms)

1. 서론

디젤엔진은 압축행정 말기에 연소실 내부로 연료가 직접 분사되기 때문에 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 형성되어 연료가 농후한 영역에서는 입자상물질(Particulate Matter, P. M.)이, 이론 공연비 영역에서는 질소산화물(NO_x)이 생성되는 문제점이 있다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 디젤엔진의 배기가스 저감을 위해 다단 분사,¹⁾ 고압 분사, 배기 재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR), 분사시기 최적화, 균일 예혼합 연소(Homogeneous Charge Com-

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

pression Ignition, HCCI), 합산소 연료 사용²⁾ 등 많은 방법으로 연구를 수행하고 있다. 그 중 다단 분사 방법의 하나인 스플릿(split) 분사는 soot 배출량의 증가 없이 질소산화물을 저감할 수 있는 방법으로 최근 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁾ 스플릿 분사 혹은 파일릿 분사는 주변 공기를 효율적으로 이용할 수 있으며 연소실 내에서의 연소압력 및 연소온도를 낮출 수 있어 질소산화물의 배출을 제어할 수 있으며, 나아가 연소소음을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

Park⁴⁾ 등은 커먼레일 방식의 디젤 분사 시스템에서 스플릿 분사가 분무 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 연료를 동일한 양으로 2회 분사하는 스플릿 분사는 주변 기체 유동의 영향으로 인해 주 분사의 분무 도달 거리가 다소 증가하게 하고, 액적과 주변 기체와의 상대속도가 감소하게 됨에 따라 SMD(Sauter mean diameter)는 다소 증가하는 것으로 보고하였다. Nehmer⁵⁾ 등은 스플릿 분사가 NOx와 soot 발생에 미치는 영향에 관해 연구하였으며, NOx 및 soot를 저감할 수 있다고 발표하였다. Hencin⁶⁾ 등은 주 분사 전 소량의 연료를 분사하는 파일릿 분사의 분사 특성을 연구하기 위해 분사울 실험 장치와 단기통 디젤 실험엔진을 이용하여 인젝터의 니들 리프트(needle lift), 커먼레일의 연료 압력, 분사울 등에 관한 연구를 수행하였다. Hencin 등은 파일릿 분사에 의한 압력파동은 주 분사 시 니들의 움직임 등에 영향을 거의 주지 않는 반면, 주 분사에 의해 발생하는 압력 파동은 후 분사에 영향을 주어 주 분사와 후 분사의 간격에 따라 니들의 개폐에 영향을 주는 것으로 보고하였다. Kim⁷⁾ 등은 순수 바이오디젤 연료를 이용하여 스플릿 분사 방식이 배기 배출 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 스플릿 분사를 하였을 경우, 최대 연소 압력 및 열 발생율의 감소로 인해 질소산화물의 배출을 저감할 수 있다고 보고하였다.

한편, 바이오디젤은 대두유, 코코넛유, 팜유 등의 바이오매스로부터 생산 가능한 연료로써, 세탄가가 높아 자착화성이 우수하며 연료 내 산소를 함유하고 있어 연소 작용이 활발하여 입자상물질 및 미연 탄화수소의 배출이 낮은 장점이 있다. 또한, 디젤연

료와 물성이 비슷하여 기존 디젤엔진의 별도 개조 없이 바로 적용할 수 있으므로 화석연료의 고갈 및 에너지 수급 불균형으로 인한 에너지 불안정의 문제를 해결 할 수 있다. 이러한 바이오디젤 연료에 대한 연구 또한 최근 활발히 진행되고 있다.

Lee 등⁸⁾은 디젤연료에 혼합되는 바이오디젤 연료의 비율이 높아질 경우, 점도, 밀도 및 표면장력은 증가하지만, 분무 도달 거리는 큰 차이가 없음을 보고하였다. 또한, 혼합비율의 증가는 착화지연시간을 짧게 하고, 최고 연소압력을 증가시킴으로 인해, 탄화수소(HC)는 감소하고, 질소산화물은 증가하였음을 보고하였다. 이 외에도 많은 연구자들이 바이오디젤 연료의 연소 및 배기특성에 대한 연구를 발표한 바 있다.^{9,10)}

디젤엔진의 유해 배기 배출물 저감을 위해 합산소 연료 사용 및 다양한 분사 전략 등을 이용한 많은 연구들이 수행되고 있으나, 바이오디젤 연료의 다단 분사(스플릿 분사, 파일릿 분사)에 의한 분무 및 미립화 특성에 대한 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다. 현재 디젤엔진은 연소 진동/소음의 저감 및 배기가스 저감을 위해 다단 분사가 적용되고 있는 반면 최근까지의 바이오디젤 연료 적용 엔진 실험 및 분무 특성에 관한 실험은 단일 분사에 의한 것이 대부분이었다. 연소 현상, 배기 가스 특성에서 단일 분사와 다단 분사는 큰 차이를 보이기 때문에 이를 분석하기 위해서는 분무 및 미립화 특성에 관한 연구가 선행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 바이오디젤 연료의 고압 다단 분사 시 연소 및 배기 특성에 관한 연구를 분석하기 위한 기초 연구로 분무 특성을 실험적으로 구하고, 분무 및 미립화 특성에 대한 수치해석 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 바이오디젤 연료를 디젤 엔진에 직접 적용하기 위한 분무의 거시적·미시적 특성을 다양한 다단분사에 대하여 실험과 수치해석 방법으로 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 바이오디젤 연료의 스플릿 분사 및 파일릿 분사에 의한 분무 특성을 알아보기 위해

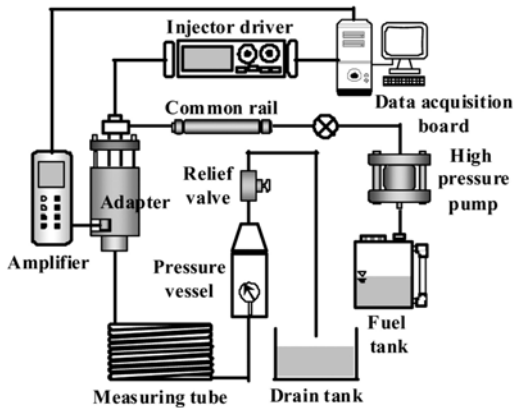


Fig. 1 Schematic of the injection rate measuring system

Fig. 1과 같은 분사율 측정 장치로부터 분사율 데이터를 취득하였다. 분사율 측정 장치는 바이오디젤로 가득 채워진 5m 길이의 측정관과 관내 압력변화를 측정하기 위해 최고 20MPa까지 측정할 수 있는 압력 센서(Kistler, 601A), 데이터 취득을 위한 DAQ 보드(National Instrument, NI6013) 등으로 구성하였다.

Fig. 2는 바이오디젤 연료의 분무 발달 과정과 단 분사에 의한 분무 특성을 가시화하기 위해 구성한 실험 장치이다. 본 연구에서는 4MPa 이상의 압력까지 가압이 가능한 고압 체임버를 이용하여 분위기 압력을 형성하였으며, 메탈-할라이드 램프를 광원으로 하는 고속 카메라(Photron, Fast cam-APX RX)와 영상 취득 및 저장 장치가 장착된 컴퓨터를 이용하여 가시화 실험 장치를 구성하였다.

분사율 측정 및 분무 가시화 실험은 분공 직경이 0.3mm, 오리피스 깊이가 0.8mm인 단공 인젝터를 사용하였다.

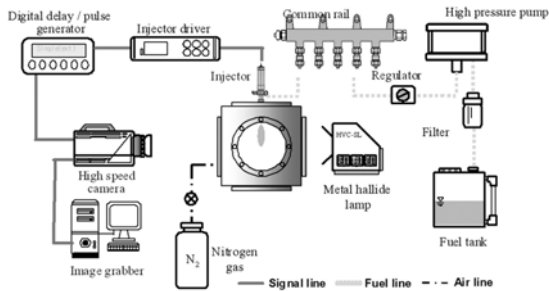


Fig. 2 Schematic of the visualization system of biodiesel fuel

2.2 실험방법

본 연구에서는 대두유를 이용하여 제조된 바이오디젤을 사용했으며, 20°C에서 바이오디젤 연료의 밀도는 870kg/m³, 동점도는 6.95mm²/s, 표면장력은 34.38 dyne/cm이다. 밀도 및 점도는 비중계와 점도계(Brookfield, LVT and ULA-36)를 이용하여 각각 측정하였으며, 표면장력은 표면장력계(Itoh, 514-B2)를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 스플릿 분사는 각각 0.5ms 동안 분사하였으며, 파일럿 분사는 0.2ms와 0.8ms의 통전시간으로 나누어 분사하였다. 스플릿 분사 사이의 간격과 파일럿 분사와 주 분사 사이의 간격은 2ms로 하였으며, 단 분사의 실험 결과는 단일 분사의 결과와 비교·분석하였다. 단일 분사의 통전시간은 1.0ms로 고정하였으며, 바이오디젤 연료의 단일 분사 분무 특성은 디젤연료의 결과와 비교하였다. 분사압력은 120MPa, 분위기압력은 3MPa로 하였으며, 정확한 실험을 위해 1회 측정시마다 고압 체임버 내의 잔류 가스 및 연료를 배기 밸브를 통해 배출하였다.

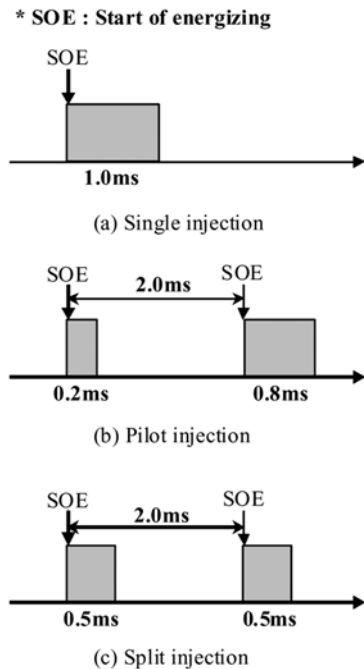


Fig. 3 Definition of injection timings for multiple injection strategies

3. 바이오디젤의 분무 모델

본 연구에서는 바이오디젤 연료의 고압 다단 분사에 의한 실험결과를 KIVA-3V 코드로부터 얻어진 해석 결과와 비교·분석하였다. KIVA-3V 코드 내에 바이오디젤 연료를 적용하기 위해 Park 등¹¹⁾에 의해 측정된 바이오디젤 연료의 온도에 따른 밀도와 점도를 연료 라이브러리에 추가하였다. 인젝터 노즐 내부의 유동을 해석하기 위해 노즐 유동 모델¹²⁾을 적용하였으며 노즐 입구에서의 캐비테이션 현상을 고려한 초기 액적의 지름과 속도를 액적 분열 모델의 초기 조건으로 설정하였다. 또한, 노즐 출구에서의 고압 분사되는 액적들의 분열 현상을 예측하기 위하여 KH-RT(Kelvin-Helmholtz & Rayleigh-Taylor) 복합 액적 분열 모델¹³⁾을 이용하여 바이오디젤 연료의 고압 다단분사에 의한 분무 특성을 예측하였다. 액적 분열 모델에서의 분열 상수는 실험결과와 비교하여 타당성을 검증한 후 결정하였으며, 분사울 실험 장치로부터 얻어진 분사울과 분사량을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분무 발달 과정

디젤 및 바이오디젤의 단일 분사에 의한 분무 발달과정과 바이오디젤 연료의 스플릿 및 파일럿 분사에 의한 분무 발달 과정을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 디젤 단일 분사는 바이오디젤에 비해 분무각이 다소 크고, 분무 도달 거리는 유사한 것을 확인할 수 있었다.

또한, 바이오디젤 연료의 스플릿 분사의 경우 두 번째 분사가 시작될 때, 첫 번째 분사에 의한 바이오디젤은 여전히 남아 있지만, 파일럿 분사의 경우 두 번째 분사가 시작될 무렵 첫 번째 분사에 의한 바이오디젤 분무는 짧은 분사기간과 증발 등에 의해 거의 사라졌음을 확인할 수 있었다. 또한, 파일럿 분사의 경우 첫 번째 분사의 통전 기간이 짧아 분사되는 연료의 양이 아주 작음을 알 수 있으며, 주 분사 전까지는 분무 발달 역시 미약한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4에 대한 정량적인 분석은 Fig. 6~8에 나타내었다.

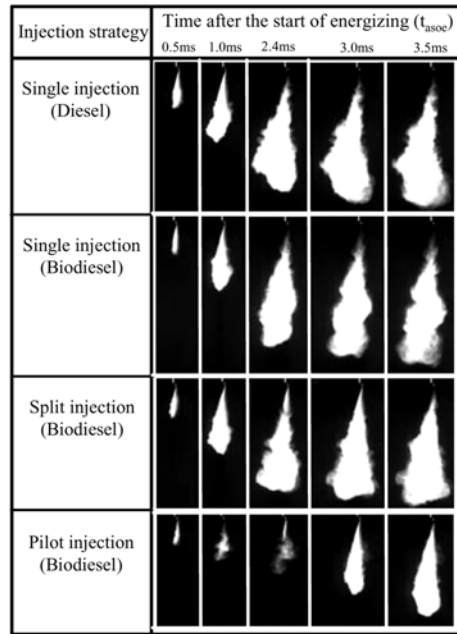


Fig. 4 Spray development process of biodiesel fuel according the various injection strategies ($P_{inj}=120$ MPa, $P_{amb}=3.0$ MPa)

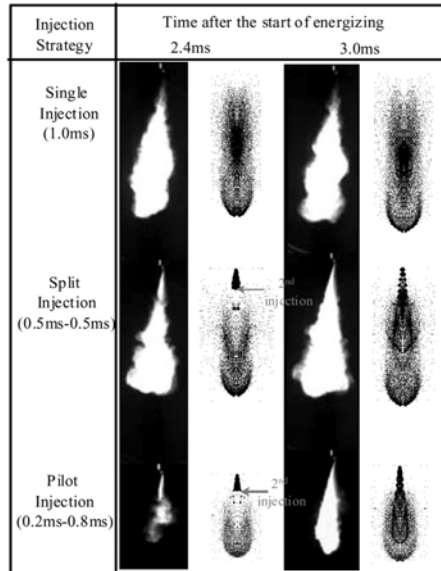


Fig. 5 Comparison between the experimental and numerical results of multiple injection of biodiesel fuels ($P_{inj}=120$ MPa, $P_{amb}=3$ MPa)

Fig. 5는 KIVA-3V 코드를 이용한 수치해석 결과를 실험에 의한 분무 영상과 비교한 것이다. Fig. 5에

서 보는 바와 같이 단일 분사의 경우, 분사가 끝난 후 시간이 흐를수록 액주 주변에 작은 액적들이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이것은 분사 말기 색 체적(sac volume)내에 남아 있던 잔류 연료들이 낮은 속도로 분사되어 노즐 팁 부근에서 분열이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 수치해석 결과는 대체로 실험결과의 분무 형태와 분무 발달 과정을 정확히 예측하였다. 또한, 통전 후 2.4ms에서는 스플릿과 파일럿의 주 분사가 시작되고, 3.0ms에서도 주 분사가 진행되는 것을 실험과 해석결과에서 확인할 수 있었다.

4.2 다단분사에 따른 바이오디젤의 분무 특성

바이오디젤 연료의 단일 분사 및 다단 분사에 의한 분무 도달 거리를 Fig. 6에 나타내었다. 바이오디젤 연료의 단일 분사는 디젤 연료의 단일 분사 결과와 비교하였으며, 통전 후 시간에 따른 분무 도달 거리의 차이는 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.¹⁴⁾ 바이오디젤 연료의 스플릿 분사의 경우 첫 번째 분사 기간이 0.5ms로 단일 분사(1.0ms) 보다 짧기 때문에 통전 후 약 1.7~1.8ms 이후부터 분무 도달 거리의 증가율이 감소하기 시작했으나, 통전 후 2.0ms부터 시작된 두 번째 분사로 인해 꾸준히 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 주 분사가 시작될 때 스플릿 분사에 의한 바이오디젤 연료가 잔류하고 있었기 때문에 전체적인 분무 도달 거리는 감소하지 않은 것으로 판단된다. 반면, 파일럿 분사의 경우 파일럿 분사의 통전기간이 0.2ms로 짧아 인젝터의 니들(needle)이 완전히 개방되지 못한 상태에서 분사하였으며, 이로 인해 분무 도달 거리 역시 다른 분사 방식에 비해 상당히 짧은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 주 분사가 시작되는 2.0ms 이후에는 분사 지연 시간(약 0.3ms)이 지난 후 분무 도달 거리는 급격히 증가하여 통전 후 5.0ms가 될 무렵에는 단일 및 스플릿 분사에 의한 바이오디젤 연료의 분무 도달 거리와 가까워진 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 통전 후 시간에 따른 반경 방향 최대거리에 대한 결과를 비교한 것이다. 네 가지 실험에서 분사 직후 반경방향의 발달은 급격히 이루어졌으나 통전 후 1.0ms 이후부터 약 13~16mm 사이의 값으로 수렴하였다. 반면, 파일럿 분사의 경우 첫 번째 분사

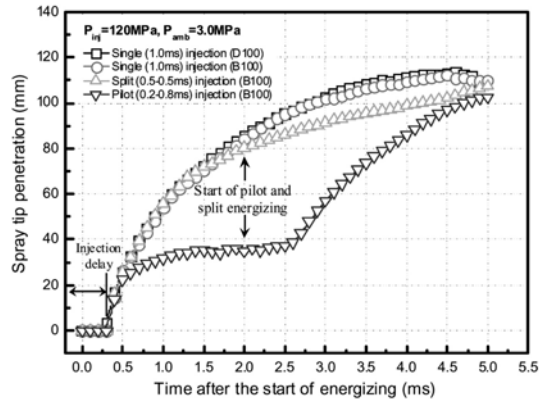


Fig. 6 Comparison of the spray tip penetration of biodiesel fuel using the multiple injection strategies ($P_{inj} = 120\text{MPa}$, $P_{amb} = 3.0\text{MPa}$, D100 - diesel fuel, B100 - biodiesel fuel)

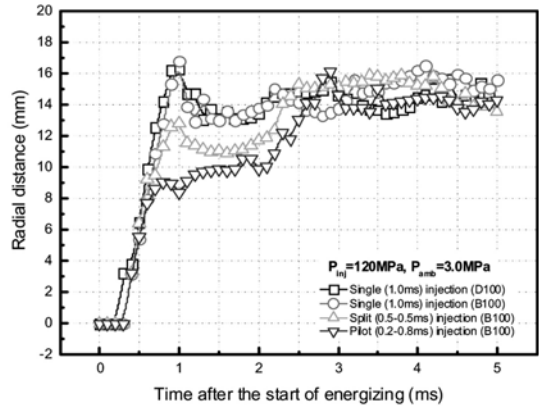


Fig. 7 Comparison of the radial distance of biodiesel fuel using the multiple injection strategies ($P_{inj} = 120\text{MPa}$, $P_{amb} = 3.0\text{MPa}$, D100 - diesel fuel, B100 - biodiesel fuel)

에서의 분사량 및 운동량의 낮기 때문에 다른 경우에 비해 분무의 확산이 크지 않았다. 그러나 통전 후 2.0ms 이후 주 분사의 영향으로 반경 방향 발달이 크게 증가하여 다른 연료와 비슷한 영역에서 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 단일분사의 경우 통전 후 시간 1.0ms 이후 반경 방향 거리가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 분사가 끝나게 되어 인젝터로부터 운동량의 전달이 끝났으며 분무 외곽에서의 분열과 증발 등의 영향으로 판단된다. 스플릿분사는 단일 분사보다 빨리 분사가 끝나고, 통전기간이 반경 방향 최대값이 낮고, 조기에 감소하기 시작하였다.

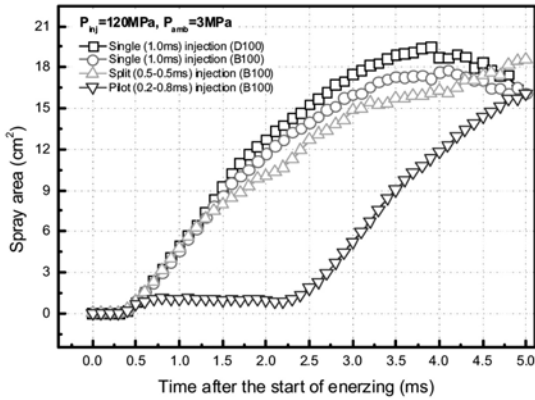
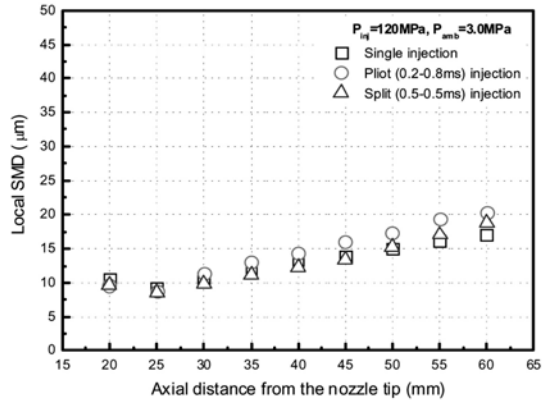


Fig. 8 Spray area of biodiesel spray at various injection strategies ($P_{inj}=120\text{MPa}$, $P_{amb}=3.0\text{MPa}$, D100 - diesel fuel, B100 - biodiesel fuel)

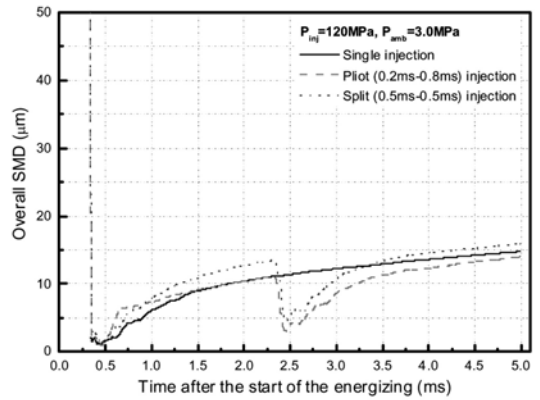
Fig. 8은 바이오디젤 연료의 분사 방식에 따른 분무 면적을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 바이오디젤 연료의 분무 면적은 디젤보다 다소 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 디젤과 바이오디젤의 분무 도달 거리는 유사하지만, 높은 연료 밀도를 가지는 바이오디젤 연료의 분무각이 작아졌기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 다단 분사 중 스플릿 분사는 낮은 분무 도달 거리로 인해 분무 면적 역시 작게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 통전 후 4.5ms 이후 단일 분사에 의한 분무 면적 보다 커지는 것은 통전 후 2.0ms부터 시작된 두 번째 분사에 의한 영향으로 분무 운동량이 단일 분사 보다 오래 지속되었기 때문인 것으로 판단된다. 파일럿 분사의 경우 분무 도달 거리의 결과와 마찬가지로 짧은 첫 번째 분사로 인해 통전 후 초기에는 낮은 분무 면적을 나타내는 반면, 주 분사가 시작된 이후에는 분무 면적 역시 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 다단분사에 의한 바이오디젤 연료의 미립화 특성

Fig. 9는 KIVA-3V의 다양한 분무 해석 모델(노즐 유동 모델, 복합 액적 분열 모델 등)을 이용하여 바이오디젤의 고압 다단 분사 시 Local & Overall SMD와 같은 미립화 특성을 수치해석 결과를 보여주고 있으며, Fig. 9(a)는 축 방향 거리에 따른 SMD 분포를 나타낸 것이다. 다단 분사를 했을 경우, 단일 분사에 비해 약간 높은 SMD 값을 나타내는 것을 확인



(a) Local SMD



(b) Overall SMD

Fig. 9 Calculated droplet size distribution of multiple injection strategies of biodiesel fuel using KIVA-3V ($P_{inj} = 120\text{MPa}$, $P_{amb} = 3.0\text{MPa}$)

할 수 있다. 이것은 다단 분사의 경우 먼저 분사한 바이오디젤 분무가 주변 기체의 유동에 영향을 주게 되고, 두 번째 분사되는 분무와 주변 기체 사이의 상대속도가 감소했기 때문인 것으로 판단된다.⁴⁾

또한, 노즐팁으로부터 축 방향으로 멀어질수록 SMD는 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 높은 분위기 압력에 의해 분무 중심에서 액적 사이의 합착 및 충돌이 활발히 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9(b)는 바이오디젤의 분무 영역 전체에서 동일한 시간에 측정되는 연료 액적의 크기를 평균한 값을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 분사 초기 SMD는 급격히 감소한 후에 차츰 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다단 분사의 경우, 다단

분사가 시작된 후(2.0ms), 급격히 감소한 후 다시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째 분사 후, 파일럿 분사가 스플릿 분사 보다 낮은 SMD 값을 가지는 것은 두 번째 분사의 통전기간이 더 길게 되어 분사되는 연료와 주변 기체사이의 상대속도 차가 크기 때문이다.¹⁵⁾ 통전 후 전체 시간에서 다단 분사는 단일 분사보다 다소 높은 SMD 값을 가졌으며, 이는 단일 분사에 비해 다단 분사는 첫 번째 분사에 의해 주변 기체와의 상대속도가 감소하기 때문에 액적분열이 적게 일어난 것으로 판단된다.

4.4 다단분사에 의한 바이오디젤 분무의 흡광특성

Fig. 10은 통전 후 시간 2.4ms와 3.5ms에서 분사 전략에 따른 바이오디젤 분무 영상의 강도(light intensity of spray image)에 대한 등고선을 나타낸 것이다. 그림에서 붉은색으로 갈수록 강한 빛 강도를 나타내며, 푸른색으로 갈수록 약한 빛 강도를 나타낸다. 높은 빛의 강도는 분사된 연료의 액적밀집도가 높은 것을 의미하며, 낮은 것은 미립화 및 증발 등의 영향으로 액적 밀집도가 상대적으로 낮음을 의미한다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 분무의 외주의 빛 강도는 중심보다 낮은 것으로 나타났으며 이것은 분무외곽은 주변 기체와의 마찰 등으로 인해 미립화가 더 잘 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 바이오디젤 단일 분사의 경우는 스플릿 및 파일럿 분사보다 분사가 빨리 끝나게 되어 통전 후 3.5ms 경과 시 분무 외곽부터 빛 강도가 약해지는 것을 확인할 수 있었다. 스플릿 분사와 파일럿 분사를 비교했을 경우, 주 분사가 시작될 무렵 스플릿 분사는 첫 번째 분사에 의한 분무가 여전히 남아있어 일정수준의 빛 강도를 나타내지만, 파일럿 분사의 경우 첫 번째 분사 기간과 분사량이 아주 작아 빛 강도가 나타나는 영역이 작을 뿐만 아니라, 강도도 낮은 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 바이오디젤의 분사방법에 따른 빛의 강도 특성으로부터 스플릿 분사 및 파일럿 분사를 적용하였을 경우 단일분사를 적용했을 때 보다 오랜 기간 동안 분무의 밀집도를 균일하게 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 분무는 외곽에서부터 주변기체와의 혼합 등으로 인해 밀집도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

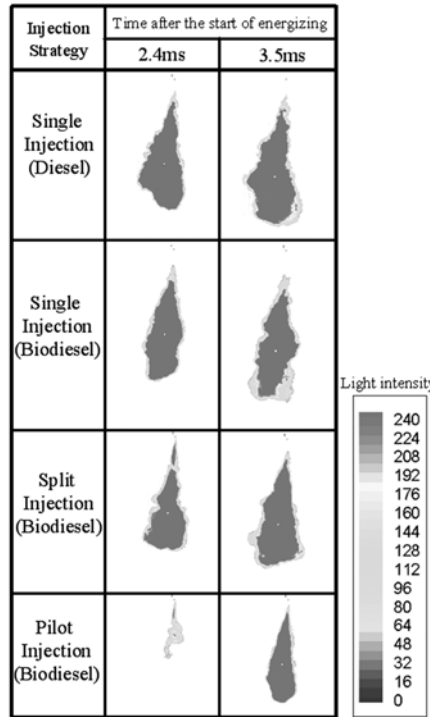


Fig. 10 Contour plot of the light intensity according to the injection strategies of biodiesel fuel ($P_{inj} = 120\text{MPa}$, $P_{amb} = 3\text{MPa}$, $t_{asoc} = 2.4\text{ms}, 3.5\text{ms}$)

5. 결론

본 연구에서는 바이오디젤 연료의 고압 다단 분사가 분무 및 미립화 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 축 방향 및 반경 방향 분무 도달 거리, 분무 면적, 액적 평균 크기(local and overall SMD) 등을 통해 실험적, 해석적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바이오디젤을 스플릿 분사했을 경우 분무 도달 거리와 반경 방향 거리가 다소 짧지만, 분무 후반부로 갈수록 그 차이는 줄어든다. 또한, 스플릿 분사에 의한 분무 면적은 단일 분사 보다 더 오래 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 바이오디젤을 파일럿 분사했을 경우 초기의 짧은 파일럿 분사로 인해 초기 분무 도달 거리, 반경 방향 거리 및 분무 면적은 단일 분사와 큰 차이를 보였으나, 주 분사 시작 후 급격히 증가하여 분사 후반부에서 그 차이는 현저하게 저하하였다.
- 3) 바이오디젤의 단일 분사 및 다단 분사에서 분위

기 압력이 높을 경우($P_{amb}=3.0MPa$) 분사된 연료 액적 간 활발한 충돌 및 합착 작용으로 인해 노즐 팁으로부터 멀어질수록 SMD는 다소 증가하였다. 또한, 다단 분사의 경우 첫 번째 분사의 주변 기체에 미치는 영향으로 인해 주 분사에 의한 분무 액적과 주변 기체 사이의 상대속도 감소로 단일 분사에 비해 다소 높은 SMD를 가졌다.

- 4) 바이오디젤 분무의 빛 강도 분석으로부터 다단 분사를 적용했을 때, 단일분사에 비해 균일한 분무 밀집도를 오랜 기간 동안 유지할 수 있었으며, 분무는 외주에서부터 밀집도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.
- 5) 위와 같은 연구결과로부터 바이오디젤 연료 역시 연료 공급 및 유동에 관한 단점에 해결된다면 기존 디젤엔진에 다단 분사 전략을 직접 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해 자동차 사업단)와 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다. 또한 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) R. D. Reitz, "Controlling DI Diesel Engine Emissions Using Multiple Injections and EGR," *Combustion Science and Technology*, Vol.138, pp.257-278, 1998.
- 2) A. K. Agarwal, "Biofuels(Alchols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines," *Prog. Energy Combustion Science*, Vol.33, pp.233-271, 2007.
- 3) A. K. Babu and G. Devaradjane, "Control of Diesel Engine Pollutants by Split Injection Method Using Multi-zone Model," SAE 2001-28-0007, 2001.
- 4) S. W. Park, H. K. Suh and C. S. Lee, "Effect of a Split Injection on Spray Characteristics for a Common-rail Type Diesel Injection System," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.6, No.4, pp.315-322, 2005.
- 5) D. A. Nehmer and R. D. Reitz, "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine," SAE 940668, 1994.
- 6) N. A. Henein, M. C. Lai, I. P. Singh, L. Zhong and J. Han, "Characteristics of a Common Rail Diesel Injection System under Pilot and Post Injection Modes," SAE 2002-01-0218, 2002.
- 7) M. Y. Kim, S. H. Yoon and C. S. Lee, "Impact of Split Injection Strategy on the Exhaust Emissions and Soot Particulates from a Compression Ignition Engine Fueled with Neat Biodiesel," *Energy& Fuels*, Vol.22, No.2, pp.1260-1265, 2009.
- 8) 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.
- 9) Y. Zhang and A. L. Boehman, "Impact of Biodiesel on NO_x Emissions in a Common Rail Direct Injection Diesel Engine," *Energy& Fuels*, Vol.21, pp.2003-2012, 2007.
- 10) 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 Proceeding, KSAE*, pp. 698-704, 2005.
- 11) 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.
- 12) C. K. Sarre, S. C. Kong and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays," SAE 1999-01-0912, 1999.
- 13) T. F. Su, R. D. Patterson, R. D. Reitz and P. V. Farrell, "Experimental and Numerical Studies of High Pressure Multiple Injection Sprays," SAE 960861, 1996.
- 14) S. H. Park, H. J. Kim, H. K. Suh and C. S. Lee, "A Study on the Fuel Injection and Atomization Characteristics of Soybean Oil Methyl Ester (SME)," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.30, pp.108-116, 2009.
- 15) H. K. Suh, S. H. Park and C. S. Lee, "Effect of Injector Energizing Duration on the Atomization Characteristics of Biodiesel Fuel," *Journal of ILASS-Korea*, Vol.12, No.2, pp.108-114, 2007.