인젝터 통전기간이 바이오디젤 연료 미립화에 미치는 영향

서현규* · 박수한* · 이창식†

Effect of Injector Energizing Duration on the Atomization Characteristics of Biodiesel Fuel

Hyun Kyu Suh, Su Han Park and Chang Sik Lee

Key Words: Arithmetic mean diameter(AMD), Biodiesel fuel(바이오 디젤 연료), Injection rate(분사율), Sauter mean diameter(SMD)

Abstract

This study investigates the influence of energizing duration on the fuel atomization characteristics of biodiesel injected through a high pressure common-rail injector. In order to analyze the effect of energizing duration on the fuel injection rate performance, the injection rate of biodiesel fuel is obtained from the pressure variation in the tube filled with fuel in injection measuring system. On the other hand, the atomization characteristics of biodiesel was measured and compared in terms of Sauter mean diameter(SMD), arithmetic mean diameter(AMD), droplet mean velocity, and detected droplets number by applying a phase Doppler particle analyzer(PDPA). It was revealed that the injection mass and maximum injection rate increase with increase of the energizing duration. Moreover, the increase of energizing duration improves the atomization performance of biodiesel fuel because it induces higher droplets momentum and velocity.

기호설명

AMD	: Arithmetic mean diameter
SMD	: Sauter mean diameter
PDPA	: Phase Doppler particle analyzer
t	: Time
P	: Pressure
Z	: Distance from the nozzle
V	: Velocity
eng	: Energizing
inj	: Injection

1. 서 론

(2007년 6월 12일 접수 ~ 2007년 6월 19일 심사완료)
*한양대학교 대학원 기계공학과
†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

높은 열효율과 넓은 운전 적용 범위를 가진 디젤 엔진은 많은 장점에도 불구하고, 활용 자원의 한정과 환경 오염의 문제를 유발하고 있다. 이를 해결하기 위한 디젤 대체 연료 연구에 대한 필요성이 더욱 부각되고 있다. 여러 가지 대체 연료 중 바이오디젤은 연료 성분 내의 11~15% 함유된 산소가 연료와 공기의 산화과정을 촉진시켜 연소 개선, 높은 열효율, 연비 향상 등의 장점을 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 인하여, 함산소 바이오 디젤 연료의 디젤 엔진 적용 가능성에 대하여 국·내외에서 많은 연구들이 수행 되었다[1-2].

디젤 연료와 물성치가 다른 바이오 디젤 연료의 점성과 밀도의 변화에 관한 연구를 Tate 등[3, 4]이 온도의 변화에 따라 연구하였으며, Reece 등[5]은 20%의 바이오디젤 연료 체적 혼합비에서 배기 배출물 감소의 효과가 있다고 발표하였다. 이와 비슷하게, Yoon 등[6]은 직접분사식 디젤 엔진에서 바이오 디젤 연료의 혼합비에 따

른 연소 및 배출물 특성을 실험적으로 연구하였다. Yoshimoto[7]등은 바이오디젤의 유화 연료와 EGR적용에 따른 NO_x및 매연 저감에 대하여 연구하였고, Lee 등[8]은 커먼 레일 디젤엔진에서 바이오 디젤의 분사 및 연소특성을 연구하여 대체 연료로의 가능성을 입증하였다. 그리고, Oh[9]등은 미강유를 디젤기관에 적용할 경우 함산소량이 증가에 따른 매연저감에 관하여 발표하였다.

디젤 엔진에서 연료의 분사가 엔진의 연소 및 배기 특성에 미치는 영향이 크기 때문에 바이오 디젤 연료의 디젤 엔진 적용 가능성의 연구는 연료의 분사 및 미립화에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다. 이와 같은 이유로, 바이오 디젤의 종류에 따른 분무 미립화 특성과 분무 거동에 대한 연구를 Suh 등[10]이 연구하였다.

바이오 디젤 연료의 디젤 엔진 적용성에 관한 많은 연구가 활발히 진행되었음에도 불구하고, 연료의 미립화에 대한 연구는 아직 미약하며, 특히 인젝터 통전기간에 따른 미립화 특성은 아직 규명되지 않은 부분이 많다.

따라서, 본 연구에서는 고압 분사식 디젤 인젝터의 통전 기간이 바이오 디젤 연료의 미립화 특성에 미치는 영향을 다양한 실험 조건에서 분무의 입경과 속도 특성을 측정하여 축 방향 거리에 따른 입경분포, 입자수 분포 등을 실험적으로 구하여 이들 결과를 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 고압분사 디젤 인젝터에서 함산소 바이오 디젤 연료의 통전기간이 연료의 분사 및 미립화 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하기 위하여 Figure 1과 같은 실험장치를 사용하였다.

분사 특성은 최대 분사율이나 분사지연 기간에 영향을 받으므로, 바이오디젤의 연료 분사율 특성을 분석하기 위하여, Bosch[11]가 제안한 분사율 특성 장치를 이용하여 통전기간이 바이오디젤의 분사율에 미치는 영향을 실험적으로 연구 분석하였다.

바이오디젤 연료의 분무미립화 특성 측정을 위하여, 위상 도플러 입자 분석기(phase Doppler particle analyzer) 장치를 이용하여 분무 액적의 평균 크기와 속도를 비교 측정하였다. 본 실험에 사용된 위상 도플러 입자 분석기는 Figure 1에 나타난 바와 같이 광원으로 Ar-ion 레이저, 트랜스미터, 수광부 와 데이터 저장 장치로 구성이 된다. 위상 도플러 입자 분석기의 구체적인 제원

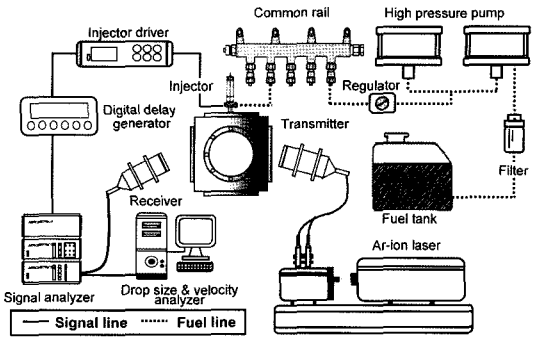


Figure 1. Schematics of droplet measuring system

Table 1. Specification of phase Doppler particle analyzer

Light source	Ar-ion
Wave length	514.5nm, 488nm
Focal length	500mm for transmitter and receiver
Collection angle	30°

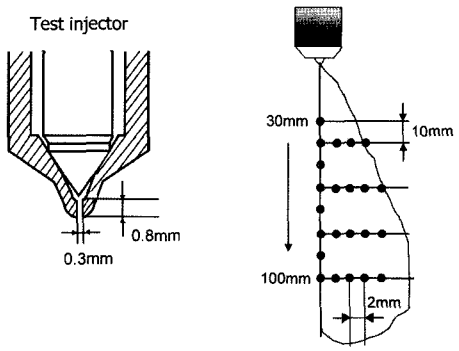


Figure 2. Test nozzle and droplet measuring points

을 Table 1에 나타내었다.

바이오디젤 연료의 고압 분무를 위하여 Figure 2에 나타난 바와 같이 노즐의 지름이 0.3 mm인 미니색 형태(mini-sac type)의 단공형 디젤 인젝터를 사용하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험방법

본 실험에는 실험연료로 대두유(soybean)로 부터얻은 바이오디젤을 사용하였다. 바이오 디젤 연료의 분사율 특성을 측정하기 위한 분사율 측정 장치는 관내에 설치된 압력센서가 연료로 가득찬 긴관 내의 연료 압력의 변화를 측정하여 분사율을 측정하는 것으로, 분사 시 관내의 압력은 4MPa로 일정하게 유지하며 1,000회의 분

Table 2. Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Injection pressure	60MPa
Ambient pressure	0.1MPa (for droplet measuring) 4MPa (for injection rate)
Ambient temperature	293K
Energizing duration	0.3 ms ~ 1.0 ms (for injection rate) 0.3 ms, 0.6 ms, 0.9 ms (for droplet measuring)
Number of injection	1000

사결과를 평균하여 합산하였다.

분무 액적의 직경 및 분사 속도를 측정하기 위하여 레이저의 산란 정도와 데이터 취득율을 고려하여 60MPa의 분사압력과 700 mW의 출력에서 실험을 수행하였다. 바이오디젤 연료의 분사를 위해서는 일정량의 전류를 솔레노이드에 공급하여 하고, 이 전류는 인젝터의 니들(needle)을 들어 올려 인젝터 내부와 외부의 압력차에 의하여 sac volume내의 연료가 분사되게 된다. 통전기간(energizing duration)은 니들을 들어올리기 위해 솔레노이드에 전류를 공급하는 시간으로, 인젝터 통전기간이 연료의 분사 및 미립화 특성에 미치는 영향을 통전기간을 0.3 ms부터 0.9 ms까지 0.3 ms간격으로 실험하였다. 실험 데이터는 두 개의 레이저 채널이 동시에 취득한 측정치가 50,000개가 되도록 고정하였으며, 측정 입경의 유효범위는 2 μm에서 80 μm로 설정하였다. 또한, 시간의 변화에 따른 액적의 입경과 속도 측정을 위해, 신호 분석기와 인젝터 드라이버, 디지털 신호 발생기를 동기화하여 실험하였다.

PDPA실험의 측정점은 Figure 2와 같이 분무의 축 방향으로 30 mm부터 100 mm까지 10 mm 간격으로, 반경 방향으로는 2 mm 간격으로 측정하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인젝터 통전기간에 따른 분사특성

Figure 3은 통전 기간에 따른 바이오디젤 연료의 분사량을 측정한 것이다. 분사량 측정을 위하여 약 0.05 ms 간격으로 1,000회의 연료 분사를 하였다. 실험 결과 인

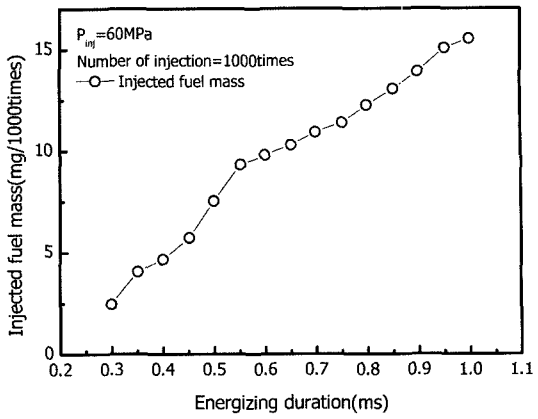


Figure 3. Injected fuel mass according to the energizing duration

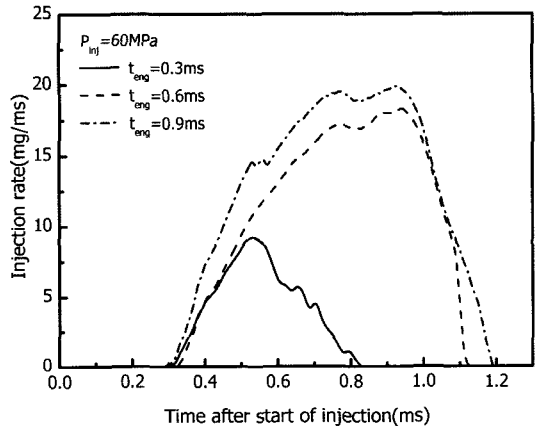


Figure 4. Effect of energizing duration on the fuel injection rate

젝터의 통전기간이 길어질수록, 노즐의 열림 시간이 길어져 분사량이 증가하는 특징을 보였다.

통전기간에 따른 분사량 결과를 바탕으로 바이오디젤 연료의 분사율 특성을 비교 연구하여 Figure 4에 나타내었다. 통전기간이 증가할수록 연료의 최대 분사율 값은 높아지는 경향을 보였다. 통전기간이 0.3 ms의 경우에는 분사율의 값이 다른 두 경우에 비하여 낮은 것으로 나타났는데, 이는 짧은 통전기간과 낮은 분사압력으로 인하여 바이오 디젤 연료의 분사가 완전히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

3.2 통전기간에 따른 분무 미립화 특성

디젤 연료 분사용 고압 인젝터의 통전기간에 따른 바이오 디젤 연료의 분무 미립화 특성을 실험적으로 분석하기 위하여 위상 도플러 입자 분석기(PDPA)를 이용하

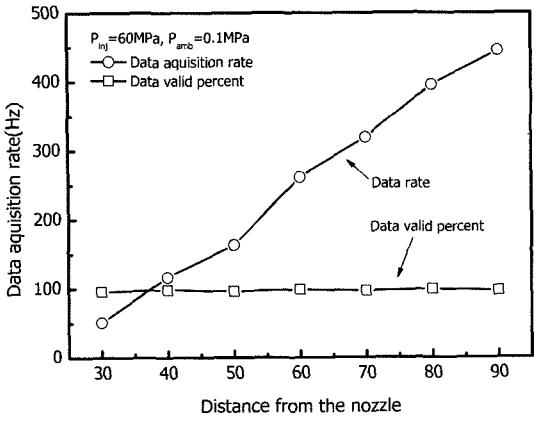


Figure 5. Data acquisition rate and valid percent

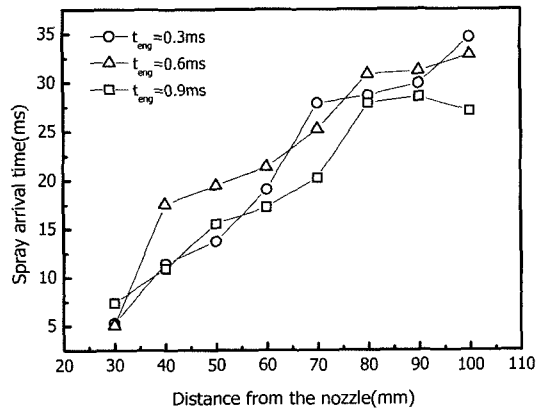


Figure 6. Comparison of spray arrival time at each measuring points

여 연구를 수행하였다.

바이오 디젤 연료의 미립화 특성을 정확히 파악하기 위해서는 실험 결과에 대한 신뢰성이 반드시 고려되어야 한다. 이와 같은 이유로 PDPA 실험의 Data acquisition rate과 Valid percent를 Figure 5에 나타내었다. 노즐로부터의 거리가 가까울수록, 분무의 밀도가 높아서 Data acquisition rate은 낮았으나, 거리가 멀어질수록 신뢰성이 높은 Data rate을 보였다. 또한, 취득된 실험결과의 유효성을 나타내는 Valid percent는 모든 경우에 96 퍼센트 이상으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 본 연구의 미립화 실험 결과는 신뢰성이 높다고 판단된다.

Figure 6은 통전기간에 따른 바이오디젤 연료의 PDPA 실험의 각 측정 점에서의 분무 도달 시간을 나타낸 것이다. 통전기간이 0.3ms의 경우에는 분무의 발달 자체가 완전하지 않아 실험 결과의 값이 불안정하게 나타났으나, 다른 두 경우에는 분사율 측정 결과와 같이 통전기간이 길수록, 동일 지점까지의 분무도달이 빨라지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분사 연료의 속도와도 관련이 있다. 연료의 분사율 결과에서 나타난 바와 같이 연료의 체적 평균 속도(Volumetric mean velocity)는 다음과 같이 표현된다.

$$U_m = \dot{m}'/\rho_f A \qquad (1)$$

여기서 연료의 질량 유동율($\dot{m}$)은 연료의 분사량과 비례관계에 있어, 연료의 분사량이 증가하면 질량 유동율이 증가하게 되어 체적 평균 속도가 증가하게 된다. 결과적으로, 연료의 분사량이 증가하면 분무 속도가 증가하게 되고, 액적의 분열이 활발해져 분무의 미립화가 촉진될 것으로 예상된다.

Figure 7은 바이오디젤 연료 SMD(Sauter mean diameter, D_{32}) 의 축 방향 거리에 따른 분포를 나타낸 것이다. 통전기간이 길어질수록, 연료의 미립화가 활발해지는 것으로 나타났으나, 0.3 ms의 경우에는 0.6 ms와 거의 동일한 SMD분포를 보였다. 이는 teng = 0.3 ms인 경우에는 인젝터의 니들의 개폐가 완전하지 않아 분무의 발달이 완전하지 않았고, 동일 측정점에서 분무의 정체로 인하여 SMD가 큰 분포를 보인 것으로 판단된다. 일반적으로 액적의 분열은 Weber수($We=\rho V^2 D/\sigma$)와 깊은 관련이 있는데, 통전기간이 길어지면, 많은 양의 연료가 분사되므로, 분사 초기의 인젝터 주위의 연료 액적의 크기가 커지게 된다. 이는 액적의 운동량과 분사속도 및 주위 공기와의 마찰을 증가시켜 액적의 분열이 활발해져서 분무의 발달과 함께 미립화 성능이 우수해지는 것으로 사료된다.

반경방향 거리에 따른 SMD의 분포를 Figure 8에 나타

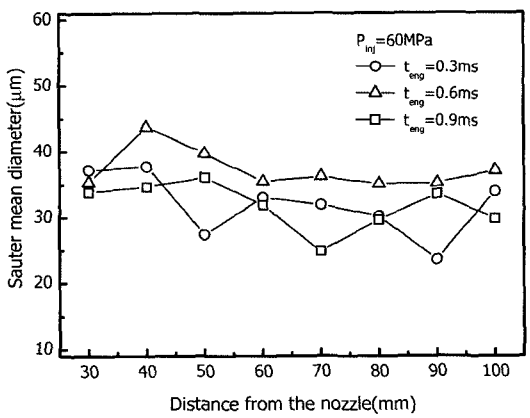


Figure 7. Local SMD distributions according to the axial distance

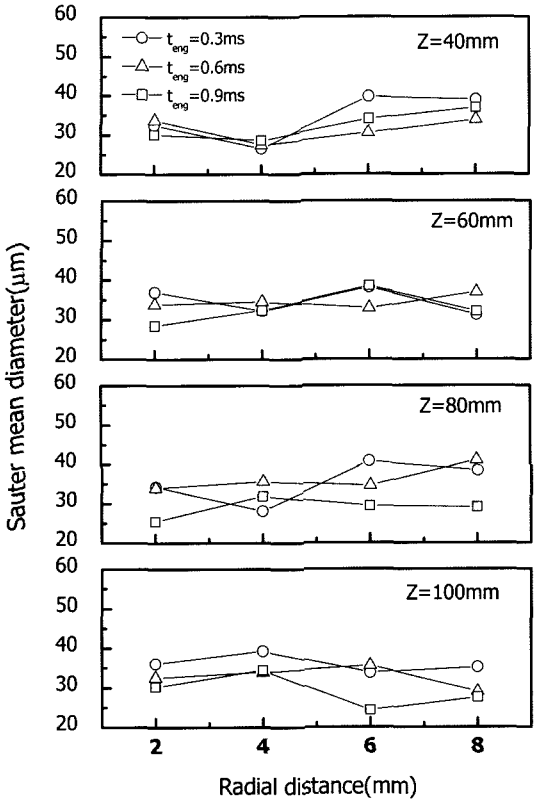
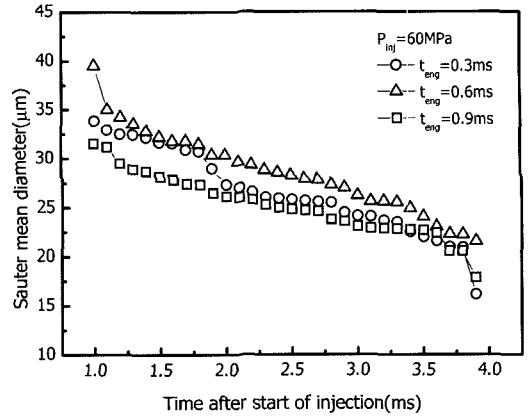


Figure 8. Local SMD distributions according to the radial distance

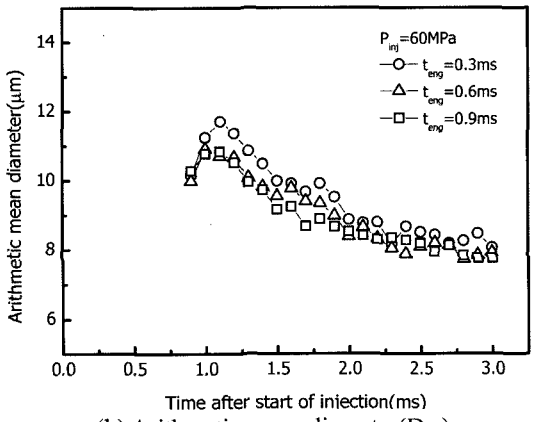
내었다. 반경방향 거리가 증가할수록, 바이오 디젤 연료의 SMD는 모든 통전 기간의 경우에 25 μm에서 40 μm 정도의 값으로 거의 일정하거나 약간 증가하는 경향을 보였다. 이로 미루어 보아, 반경방향의 거리 변화가 분무 미립화에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

바이오디젤 연료의 시간에 따른 분무미립화 특성을 분석하기 위하여 분사시작 후 경과 시간(t_{asoi})에 따른 SMD와 AMD(arithmetic mean diameter, D_{10})을 Figure 9에 나타내었다. 측정점에 따른 분무 액적의 미립화 특성과는 달리, 시간에 따른 SMD와 AMD의 변화는 상당히 안정적인 감소의 경향을 보였다. 반면에, 통전기간에 따른 액적 지름의 분포는 측정 점의 결과와 동일하게 긴 통전기간이 분무 미립화를 촉진하는 것으로 나타났다.

Figure 10은 분사 시작 후 경과 시간에 따른 분무 속도의 분포를 비교한 결과이다. Figure 5와 6에서 예상한 바와 같이, 짧은 통전 기간이 분사 초기에 느린 분무 속도로 나타났다. 분사 시작 후 시간이 경과할수록 분무의 속도가 점차 감소하는 것으로 나타났고, 약 1.5 ms 이후에는 5 m/s 정도의 거의 일정한 속도 분포를 가졌으나,



(a) Sauter mean diameter(D_{32})



(b) Arithmetic mean diameter(D_{10})

Figure 9. Overall droplet SMD distributions

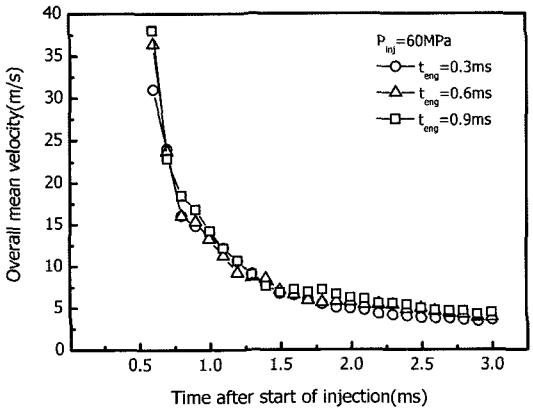


Figure 10. Overall droplets mean velocity distributions

통전기간이 길수록 다소 높은 속도 분포를 보였다. 이는 인젝터의 통전기간이 지나면, 연료의 분사가 완료되어 더 이상의 연료가 분사되지 않고, 이에 따라 분사된 연

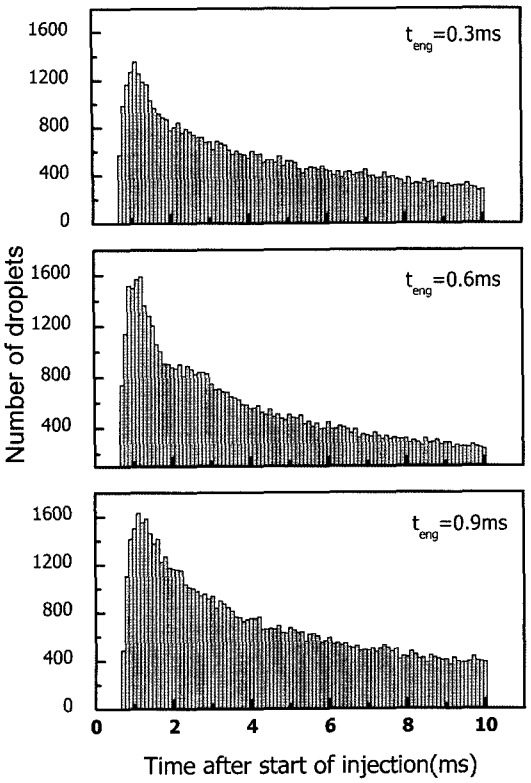


Figure 11. Distributions of detected droplets number

료들은 빠르게 운동성을 잃어버리게 되어 분무의 속도가 점차 감소한 결과로 사료된다. 또한, 액적의 미립화가 빠르게 진행되어 작고 느린 액적들이 많이 분포한 결과로도 판단된다.

Figure 11은 분사 시작 후 경과 시간에 따른 각 통전기간의 액적의 측정 개수를 비교한 것이다. 비교 결과, 통전기간 0.3 ms 와 0.6 ms의 경우에는 측정 개수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나, 0.9 ms로 증가할 경우에는 액적의 측정 개수가 증가는 것으로 나타났다. 이는 일정한 측정 체적 내에 많은 수의 액적이 분포하고 있다는 것으로, 이로 미루어 보아, 동일한 분사 조건에서 인젝터의 통전 기간이 길어질수록, 바이오 디젤의 연료 분사 및 미립화 특성이 개선된다고 판단된다.

4. 결 론

커먼레일용 고압 분무 인젝터를 이용하여, 통전기간이 함산소 바이오디젤 연료의 분사 및 미립화 특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 인젝터의 통전기간이 길어질수록, 노즐의 열림시간이 길어져 많은 양의 연료를 분사하게 되므로 바이오디젤 연료의 최대 분사율 값은 높아지는 경향을 보였다.

2) 인젝터의 통전기간이 길수록, 동일 지점까지의 분무도달이 빨라지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분사 연료의 속도와도 관련이 있으며, 결과적으로 빠른 분무 속도의 영향으로 분무의 미립화가 촉진될 것으로 예상된다.

3) 통전기간이 길어지면, 많은 양의 연료가 분사되므로. 분사 초기의 인젝터 주위의 연료액적의 크기가 커지게 된다. 이는 액적의 운동량과 분사속도 및 주위 공기와의 마찰을 증가시켜 액적의 분열이 활발해져서 분무의 발달과 함께 미립화 성능이 우수해지는 것으로 사료된다.

4) 분사 시작 후 시간이 경과할수록 분무의 속도가 점차 감소하는 것으로 나타났고, 약 1.5 ms 이후에는 5 m/s 정도의 거의 일정한 속도 분포를 가졌다.

5) 이와 같은 결과로부터, 동일한 분사 조건에서 인젝터의 통전 기간이 길어질수록, 바이오 디젤의 연료 분사 및 미립화 특성이 개선된다고 판단된다.

후 기

본 연구는 교육 인적 자원부, 산업 자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수 실험실 지원 사업 및 환경부 ECO-STAR Project(무·저공해 자동차 사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) K. H. Ryu, Y. J. Yun, Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, NO.1, 2003, pp.72-78.

(2) A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, "Characterization and effect of using rubberseed oil as fuel in the compression ignition engines", Renewable Energy, Vol. 30, No. 5, 2004, pp.795-803.

(3) R. E. Tate, K. C. Watts, C. A. W. Allen, K. I. Wilkie, "The Viscosities of Three Biodiesel Fuels at Temperatures up to 300°C" Fuel 85, 2006, pp.1010-1015.

(4) R. E. Tate, K. C. Watts, C. A. W. Allen, K. I. Wilkie, "The Density of Three Biodiesel Fuels at Temperatures up to 300°C" Fuel 85, 2006, pp.1004-1009.

(5) 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", 1993, ASAE 93-5018.

(6) S. H. Yoon, S. G. An, M. Y. Kim, S. I. Kwon, C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel in a DI Diesel Engine", Fall Conference Proceeding, Vol.1, KSAE, 2005, pp.698-704.

(7) Y. Yoshimoto and H. Tamaki, "Reduction of NOx and Smoke Emissions in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion Combined with EGR", SAE technical paper, 2001, 2001-01-0649.

(8) C. S. Lee, S. W. Park, S. I. Kwon, "An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels", Energy & Fuels, 19, 2005, pp.2201-2208.

(9) Y. T. Oh, S. H. Choi amd 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, 2002, pp.15-22.

(10) H. K. Suh, S. W. Park, S. I. Kwon, C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Biodiesel Fuels", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.12, No.6, 2004, pp.23-29.

(11) W. Bosch, "The Fuel Rate Indicator : A New Measurement Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection", SAE technical Paper, 1966, 660749.