

DME 연료의 분무 특성에 관한 연구

이 상 훈¹⁾ · 전 문 수^{2)*}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한국교통대학교 에너지시스템공학과^{2)*}

Fuel Spray Characteristics of Dimethyl Ether

Sang Hoon Lee¹⁾ · Mun Soo Chon^{2)*}

¹⁾Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{2)*}Dept. of Energy System Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation, Chungju, Chungbuk 380-720, Korea

(Received 2013. 10. 24 / Accepted 2013. 11. 15)

Abstract : This paper describes the atomization characteristics, as well as the velocity and size distribution, of DME spray based on common-rail injection system. To analyze the possibility of using DME fuel as an alternative fuel of diesel, spray atomization characteristics were investigated. For this investigation, two-dimensional phase Doppler analyzer system was used to obtain droplet size and velocity distribution simultaneously. Velocity and droplet size measurements were performed at various injection pressures. Results showed that increasing pressure from 25MPa to 50MPa leads to higher spray droplet velocities and smaller droplet diameter but injection pressure above 40MPa, no significant reduction was observed. With the droplet velocity and SMD comparison between diesel and DME fuel, it can be observed that DME has smaller SMD and droplet velocity due to its low surface tension.

Key words : Dimethyl ether(DME, 디메틸 에테르), Spray atomization(분무 미립화), Phase Doppler particle analyzer(PDPA, 위상 도플러 입자 분석기), Sauter mean diameter(SMD, Sauter 평균입경)

1. 서 론

최근 강화되는 배기 규제를 만족시키기 위한 노력으로 다양한 종류의 청정 연료를 이용한 에너지 개발에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다. 자동차용 엔진에 적용되는 디젤 연료는 연소 특성상 질소 산화물(NOx)과 입자상 물질(particulate matter, PM) 등 유해 배기 가스가 생성되어 이에 대한 근본적 해결책으로 대체 연료에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히, 함 산소 연료인 dimethyl ether(DME)는 연소 과정시 유해 배기 가스 생성 저감이 가능하며 높은 세탄가를 가지므로 디젤의 대체 연료로 주목받고 있지만, 낮은 점도와 부식성 및 대기압 하에서 기체라는 특성상 연료 보관 및 공급라인의 개선이 요구된다.1-2)

DME 연료의 디젤의 대체 연료로서 적용시키기 위한 노력으로 Lee⁽³⁾ 등은 DME 연료의 인젝터 노즐 홀 직경 변화에 따른 분무 특성에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 DME 연료의 낮은 발열량을 해결하기 위해 노즐 홀 직경 및 오리피스 홀의 직경을 증대시킨 인젝터를 적용하여 분무 특성을 실험적으로 분석하였으며, 홀 증대에 따른 분사량 증가는 연료의 운동량을 증가시켰으며, 이로 인한 분무 도달거리 향상 및 분무 발달 속도가 증가하는 경향을 도출하였다. 그러나 이러한 연구들은 분사 시간 경과에 따른 미립화 특성을 구체적으로 분석한 데이터를 제공하지 않아 연소 시스템 설계에 필요한 시간 변화에 따른 미립화 특성을 제시하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 DME 연료의 Diesel 분사 시스템에 적용시키기 위한 노력으로 DME와 Diesel 연료의 미립화 특성을 PDPA 시스템을 이용하여 분사 시간

*Corresponding author. E-mail : mschon@ut.ac.kr

경과에 따른 분무 액적의 속도와 평균 분무 입경 (Sauter mean diameter, SMD) 측정을 수행하여 미립화 특성을 실험적으로 규명하였으며, 그 분포를 비교·분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 분사 압력에 대한 Diesel 연료 및 DME 연료의 분무 미립화 특성을 비교·분석하기 위하여 노즐의 지름이 0.119mm인 커먼레일식 9공 인젝터를 사용하여 Fig. 1과 같이 커먼레일 방식의 고압 분사 장치 및 위상도플러 입자분석 시스템(PDPA, phase Doppler particle analyzer)을 이용하여 통전시간(Taose)에 대한 분무 액적의 속도 및 크기 분포를 취득하였다.⁽²⁾

또한 디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 575)를 이용하여 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)에서 발생하는 인젝터 분사 신호와 PDPA 시스템의 신호 분석기를 동기화하여 인젝터의 분사와 동시에 분무 액적에 대한 데이터 취득이 가능하도록 실험 장치를 구성하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

본 연구를 위해 PDPA 시스템의 레이저 세기, PMT voltage, Burst threshold의 최적 값을 도출하기 위하여 calibration을 수행하였다. 일반적으로 레이저 세기와 PMT voltage 값은 액적의 레이저 빛 산란 정도에 영향을 미치기 때문에 액적 분포의 재현성 및 신뢰성 측면을 위해 고려되어야 할 변수이다. 레이저 세기와 PMT

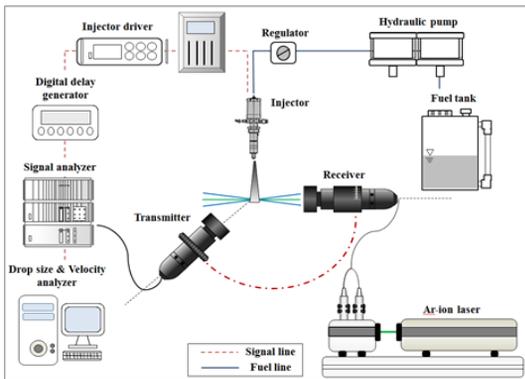


Fig. 1 Schematics of a PDPA system

voltage값이 상승하면 산란된 빛에 대한 신호 크기가 상승하면서 작은 액적들에 의한 신호 크기 및 노이즈 값이 상승한다는 단점이 있다. 따라서 레이저 세기와 PMT voltage 값에 대한 적절한 Burst threshold 값이 요구된다.⁽⁴⁾ 일반적으로 10um 이하의 작은 액적들에 대한 Burst threshold값은 30mV에서 50mV이 요구되고, 액적의 크기가 커질수록 100mV 이상의 Burst threshold 값이 요구된다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 약 4um의 액적을 갖는 액적 생성기를 이용하여 액적의 평균 입경(D₁₀), SMD값(D₃₂) 및 액적의 크기 분포 곡선을 기준으로 적절한 값을 도출하였다.

Fig. 2는 레이저의 세기와 PMT voltage값의 변화에 대한 액적의 평균 입경(D₁₀), SMD값(D₃₂)를 측정하여 나타낸 결과이다.

레이저 출력은 300mW에서 900mW까지 100mW 단위로, PMT voltage는 350mV에서 500mV까지 50mV 단위로 상승시키면서 액적을 취득하였다.

레이저 출력과 PMT voltage값에 따라 액적 생성기의 평균 입경이 2um에서 8um까지 변화하는 결과를 보였다. 특히 레이저의 출력과 PMT voltage 값이 커질수

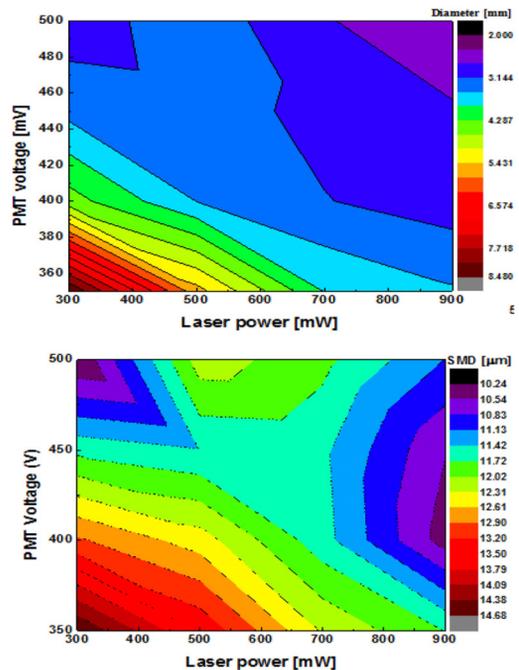


Fig. 2 Effect of PMT voltage and Laser power on the result of obtained droplet diameter and SMD

록 작은 입자의 취득이 용이하기 때문에 평균 입경이 더욱 작아지며, data rate 역시 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 취득되는 액적의 수가 많아질수록 노이즈의 세기도 증가했으며 이로 인한 Burst efficiency 값이 감소하는 경향을 보여주었다.

Fig. 2의 결과에 따라 본 연구에서는 레이저 출력 600mW, PMT voltage 430mV 값이 가장 액적 생성기의 액적과 근접한 크기로 판단하였고, 위 조건에 대한 최적의 Burst threshold 값을 선정하기 위해 Fig. 3과 같이 Burst threshold 값을 30mV에서 110mV까지 10mV 단위로 변화시키면서 액적을 취득하였다.

Fig. 3는 레이저 세기 600mW, PMT voltage 430mV에서 Burst threshold 값의 변화에 대한 Diameter exception의 개수를 나타낸다. Burst threshold 값이 커질수록 Diameter exception의 개수가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 Burst threshold 값의 상승으로 인해 작은 액적들로 인한 노이즈 값의 제거로 인한 결과로 판단된다.

Fig. 4은 30mV, 110mV의 Burst threshold에 대한 액적의 편차 분포를 나타낸다. 액적의 편차는 이론적으로 0으로 수렴할수록 균일함을 나타내며, 액적의 크기 역시 경계 값 안에 균일하게 들어올수록 PDPA 결과의 정확성이 높은 것으로 판단한다.

Burst threshold 값이 30mV와 110mV를 비교해 보면 110mV 일 때, 액적 편차의 분포가 0으로 수렴하고 취득 가능한 액적들이 경계값 내에 균일하게 분포함을 알 수 있다. 또한 대부분의 액적들이 5%의 편차 범위 내에 들어오는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 3의 Diameter exception 역시 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 위의 결과로부터 레이저 세기 600mW,

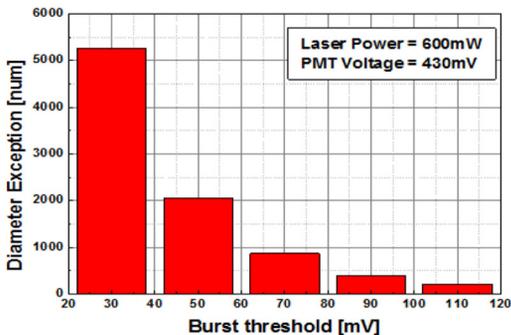


Fig. 3 Effect of Burst threshold on the result of diameter exception number

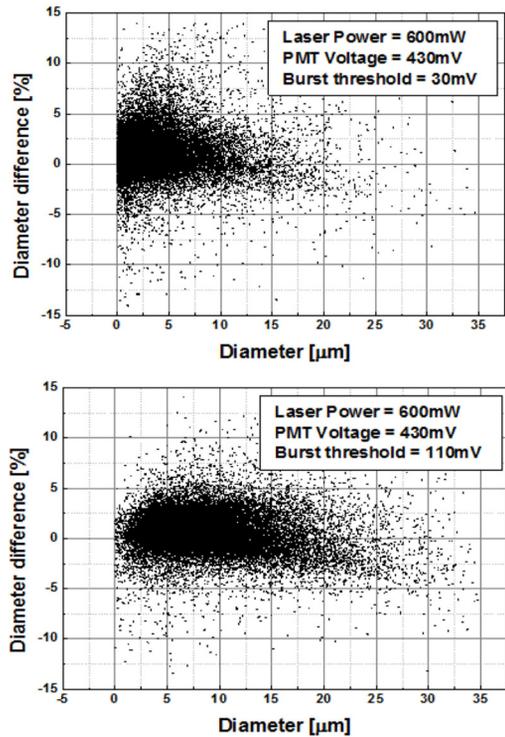


Fig. 4 Droplet distribution of different Burst threshold values

PMT voltage 430mV에서 적절한 Burst threshold 값은 110mV라고 판단하였으며, 본 조건에서 실험을 수행하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

Diesel 및 DME 분무의 미립화 특성을 분석하기 위해 대기 조건에서 ($P_{amb} = 0.1\text{MPa}$, $T = 25^\circ\text{C}$) 액적의 크기 및 속도분포를 분사 시간(T_{asoc})에 대해 취득하였다. PDPA 측정을 위한 분사 압력은 장비의 측정 능력을 고려하여 25MPa에서 60MPa로 5MPa 단위로 상승시키면서 분사하였으며, 레이저의 출력 및 PMT voltage, Burst threshold 값은 앞의 calibration 결과와 같이 600mW, 450mV, 110mV에서 실험을 수행하였다. 또한 PDPA 측정 위치는 인젝터의 축 방향으로 노즐 팁 기준 약 100mm 하류 부근에서 측정하였다. 각 측정에서 측정 데이터는 유효 액적 개수가 3만개가 될 때까지 수행하였으며, 경향성 비교를 위해 0.1ms 단위로 액적을 평균하여 경향성을 비교하였다. 자세한 실험 조건은 Table. 1에 정리하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 디젤 분무의 미립화 특성

Fig. 5는 연료 분사 압력 50MPa, 인젝터 통전 기간 1.0ms에서 노즐 팁으로부터 축방향으로 100mm 지점에서 통전 후 시간(T_{asoe})에 따른 디젤 분무의 속도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 분사 초기의 분무 선단의 최고 속도는 약 60m/s로 나타났으며 시간이 지날수록 분무의 속도는 0으로 수렴하는 결과를 확인 할 수 있었다. 특히 통전 기간인 니들이 움직이는 구간(약 1.7ms ~ 2.7ms)에서 분무 선단의 최고 속도 분포를 나타냈으며, 니들이 닫힘과 동시에 속도가 급격하게 감소하는 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 6는 분사압력 변화에 대한 디젤 분무의 속도 분포를 평균하여 비교한 결과이다.

분사 압력이 상승할수록 분무 선단이 측정 위치인 100mm에 도달하는 시간은 단축되었으며 분무 선단의 최고 속도가 상승하는 경향을 확인 할 수 있었다. 이는 분사압력 상승으로 인한 액적의 모멘텀 증가로 인한 결과로 판단된다.

Fig. 7와 Fig. 8은 각각 분사 압력에 대한 디젤 분무의 SMD 및 액적의 크기 분포를 나타낸다. 분사 압력

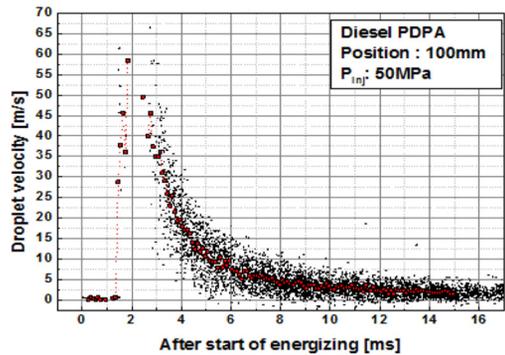


Fig. 5 Droplet velocity distribution of diesel fuel

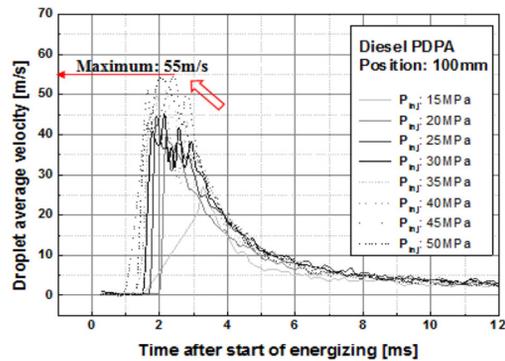


Fig. 6 Droplet velocity distribution at different injection pressures using diesel fuel Droplet velocity distribution of diesel fuel

Table 1. Test conditions for PDPA measurement

Injection system	
Test fuel	DME, Diesel
Injection pressure (MPa)	25, 30, 35, 40, 45, 50
Ambient pressure (MPa)	0.1
Energizing duration (ms)	1.0
Injection system	
Laser Wavelength (nm)	514.5
Laser Power (mW)	600
Transmitting optic (mm)	250
Receiver optic (mm)	250
Beam intersection angle (deg.)	150
PMT voltage (mV)	450
Burst Threshold (mV)	110
SNR	High

이 상승 할수록 SMD 값은 감소하는 경향을 나타났으며, 특히 분사 압력 40MPa 이상에서는 SMD가 약 30um의 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 액적의 크기 분포는 정규 분포 곡선으로 대부분의 액적이 20um의 크기를 갖는 것을 확인 할 수 있었고, 분사 압력 증가에 따라 액적 크기의 분포는 왼쪽으로 이동함을 확인할 수 있었다. 즉 분사 압력 증가로 인해 20um이상의 액적들이 더욱 미립화가 진행되어 18 ~ 20um 사이의 액적 수가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 DME 분무의 미립화 특성

Fig. 9는 전술한 디젤 분무의 미립화 특성과 동일 조건에서 DME 분무의 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 분사 초기 분무 선단의 속도는 약 45m/s로 측정되었고, 시간이 지날수록 0으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다.

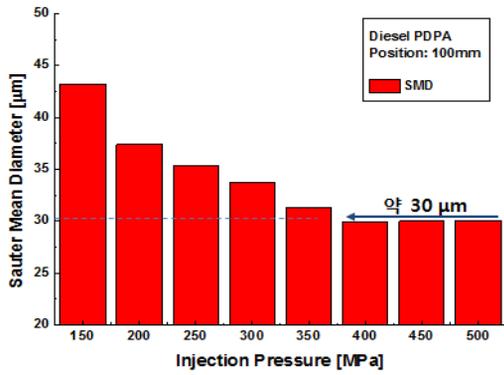


Fig. 7 A comparison of Droplet SMD at different injection pressures using diesel fuel

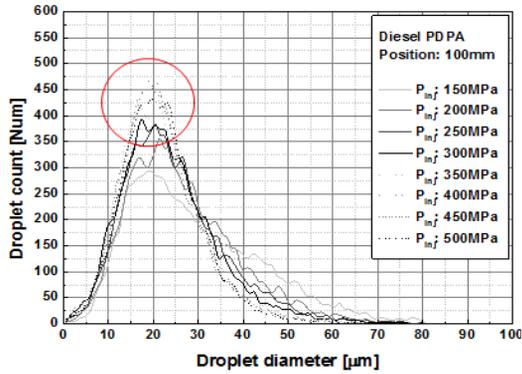


Fig. 8 Droplet velocity distribution at different injection pressures using diesel fuel

Fig. 10은 분사 압력 상승에 대한 DME 분무의 속도 분포를 나타낸다. 디젤 분무의 미립화 특성 측정 결과와 동일하게 연료의 분사압력 상승에 따라 DME 분무 선단의 최고 속도는 증가하고 있으며, Fig. 11에 나타난 디젤 분무와 DME 분무의 속도 분포 비교 결과에서 확인할 수 있듯이 그 상승 크기는 디젤 분무에 비해 약 15m/s 정도 작게 나타났다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 연료 분사 압력 상승에 대한 DME 분무의 SMD 및 diesel 연료의 결과와의 비교를 나타낸다. 디젤 연료의 측정 결과와 다르게 연료분사 압력 상승에 대한 SMD의 감소 현상은 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 대체적으로 약 10 μ m 내외의 SMD를 갖는 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 이유는 DME 연료의 우수한 기화 특성 및 낮은 분무 선단의 속도 분포로 인해 분사 시작부터 충분한 미립화가 진행된 결과로 판단된다.

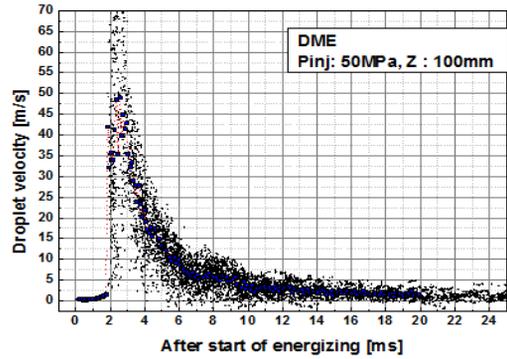


Fig. 9 Droplet velocity distribution of DME fuel

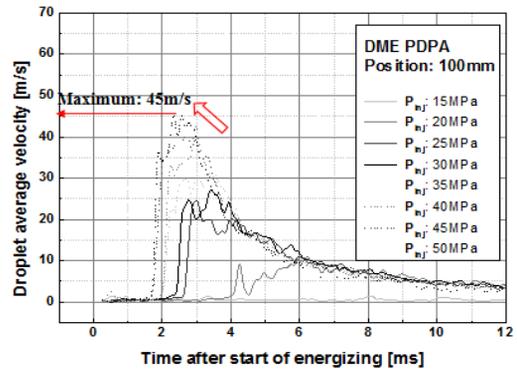


Fig. 10 Droplet velocity distribution at different injection pressures using DME fuel

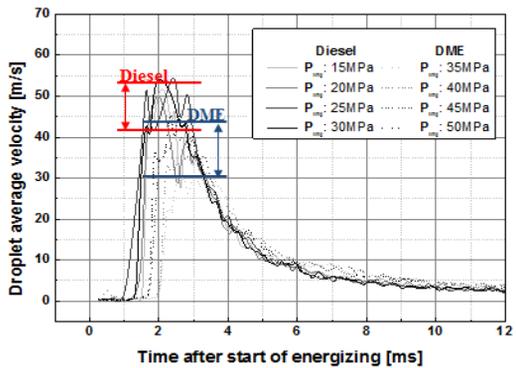


Fig. 11 A comparison of droplet velocity distribution between diesel and DME fuels

특히, Fig. 13에 나타난 동일 분사 조건에서 디젤 분무와 DME 분무의 SMD 값의 비교에서 알 수 있듯이, DME의 SMD 값은 약 10 μ m로 Diesel의 약 30 μ m 비해 30% 수준인 것으로 나타났다. 이와 같은 DME 연료의

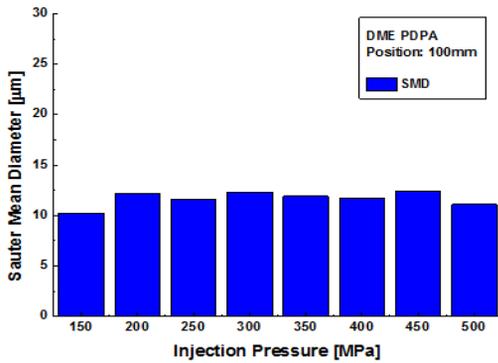


Fig. 12 A comparison of Droplet SMD at different injection pressures using DME fuel

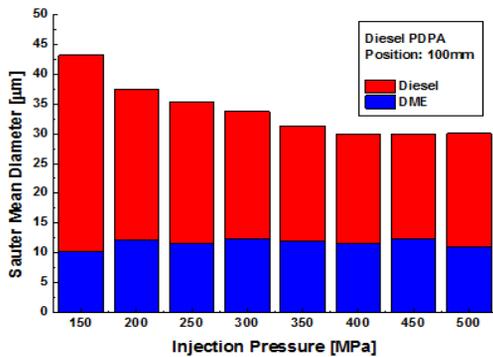


Fig. 13 A comparison of droplet SMD between diesel and DME fuels

작은 SMD 특성은 낮은 점도와 표면 장력, 그리고 빠른 증발 특성으로 인한 영향으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 DME 연료의 디젤 엔진 적용 가능성을 평가를 위해 커먼레일을 이용한 다양한 분사 조건에서 DME와 Diesel 연료의 분무 미립화 특성을 실험적으로 규명하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Diesel 연료의 PDPA의 액적의 속도 분포 결과, 50MPa로 분사하는 Diesel 연료의 초기의 분무 선단의 최고속도는 60m/s로 나타났으며 니들이 닫힘에 따라 분무의 속도는 0m/s로 수렴하는 결과를 확인할 수 있었다. 특히 통전기간인 니들이 움직이는 구간에서 분무 선단의 최고 속도를 나타냈으며, 니들

이 닫힘과 동시에 속도가 급속히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

- 2) 분사압력 상승에 대한 Diesel 연료의 SMD 값이 감소하는 경향을 나타냈으며, 특히 분사압력 40MPa 이상의 압력에서는 SMD가 30µm의 값으로 수렴하는 경향을 나타내었다.
- 3) 동일 분사 조건에서 DME와 Diesel 연료의 속도분포 및 SMD 비교를 통해 DME 연료의 분무 선단의 속도가 약 15m/s 느린 것을 확인할 수 있었으며, SMD 값은 약 30% 수준으로 작은 것을 확인할 수 있었다.

Acknowledgement

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

References

- 1) J. P. Cha, S. H. Park, C. S. Lee, S. W. Park, "Study on Spray Exhaust Emission Characteristics of DME-Biodiesel Blended Fuel in Compression Ignition Engine", Journal of KSME, Vol. 35, No. 1, pp.67-73, 2011.
- 2) J. H. Park, S. H. Park, S. W. Park, C. S. Lee, "Study on the Injection Characteristics and the Distribution of Droplet Size and Velocity for DME fuel in a Common-rail Injection System", Journal of Transactions of KSAE, Vol. 30, No. 2, pp. 148-148, 2010.
- 3) S. J. Lee, O. T. Lim, "An Investigation on the Spray Characteristics of DME with Variation of Nozzle Holes Diameter using the Common Rail Fuel Injection System", Journal of Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 4, pp. 1-7, 2013.
- 4) J. Lacoste, C. Crua, M. Heikal, D. Kennaird, "PDA Characterisation of Dense Diesel Sprays Using a Common-Rail Injection System", SAE, 2003-01-3085, 2003.
- 5) R. Payri, L. Araneo, J. Shakal, V. Soare, "Phase Doppler Measurement: System Set-up Optimization for Characterization of a Diesel Nozzle", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22. pp. 1620-1632, 2008.