

위상 도플러 입자 분석기(PDPA)를 이용한 가솔린 포트 인젝터의 입자 크기 및 속도 프로파일에 관한 연구

김효진¹ · 조 현¹ · 삭다 통차이¹ · 임옥택^{2,†}

¹울산대학교 대학원 기계공학부, ²울산대학교 기계공학부

A Study on the Particle Size and Velocity Profile on a Gasoline Port Injector Using a Phase Doppler Particle Analyzers (PDPA)

HYOJIN KIM¹, HYUN JO¹, SAKDA TONGCHAI¹, OCKTACKE LIM^{2,†}

¹Grad. School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 57 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

²School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 57 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

†Corresponding author :
otlim@ulsan.ac.kr

Received 31 May, 2017

Revised 26 June, 2017

Accepted 30 June, 2017

Abstract >> This study is to investigate particle size and velocity profile of gasoline port injector using Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA). In this experiment, a GV 250 Delphi port injector used for motorcycles was used for liquid injection. The injector consists of four holes and has a static flow rate of 2.13 g/s. The fuel used in the injection was N-heptane, which is similar to gasoline, as an alternative fuel. The test fuel was injected at an atmospheric temperature of 20°C and an open atmosphere of 1 atm. The injection time was 10 ms and the injection pressure was 3.5 bar in PDPA experiment. The experimental target position was fixed at 30, 50 and 75 mm from the nozzle tip and data were collected for a total of 10,000 samples. The experimental results show that the length diameter (D_{10}), the Sauter mean diameter (D_{32}), and the mean droplet velocity (MDV) are 45-54 μm , 99-115 μm and 15-21 m/s, respectively.

Key words : Phase Doppler Particle Analyzers (PDPA, 위상 도플러 입자 분석기), Gasoline port injection(가솔린 포트 인젝션), biodiesel(바이오디젤), Gasoline(가솔린), Sauter Mean Diameter (SMD, Sauter 평균입경), Spray Characteristics(분무특성)

1. 서론

현재 우리나라는 2020년 온실가스에 대하여 배출 전망치 대비 34%를 감축하고자 하는 목표를 세우고 다양한 감축 정책을 펼치고 있다. 그중 특히 수송부

문은 국내 에너지부문 온실가스 배출량의 20% 이상을 차지하며, 이 중 약 95% 정도가 도로에서 운행되는 자동차로부터 배출되고 있다. 이륜자동차는 자동차 등록대수에 약 10% 정도에 불과하지만 교통량 증가에 따른 보조 이동수단으로서 사용이 증가하고

있다. 이에 배기 규제 대응과 관련하여 엔진의 최적화 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 그러나 연소 특성의 향상 및 배출물 저감을 위해서는 연료의 미립화 특성의 개선과 증발 성능 향상이 매우 중요하다. 연료입자의 미립화는 공기와 연료의 혼합물을 촉진시키는 유효한 수단으로 대두되고 있으며, 연료입자의 미립화를 촉진시키는 방법으로 노즐 분공경의 감소 등 여러 가지가 제시되고 있다. 연소실 내에 최적 혼합기를 만들어주기 위한 분무 구조 및 미립화 특성의 해석은 연료 분사기 및 연소실의 설계 기술과 더불어 반드시 수반되어야 한다²⁻⁶⁾. 본 실험에서 사용된 Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA)는 가솔린뿐만 아니라 다양한 분사기의 미립화 성능에 대한 연구가 이루어지고 있어 중요한 실험 방법의 하나로 인식되고 있다⁷⁾.

이에 본 연구에서는 이륜차에 사용되는 가솔린 포트 인젝터의 분무 가시화 실험으로 분무 발달 과정과 분무각을 측정하여 거시적 분무 특성을 확인하고 PDPA 시스템을 이용하여 평균 액적 직경과 액적의 속도 등을 측정하여 미립화 특성을 파악함으로써 미시적 분무 특성을 확인하여 인젝터의 분무 구조를 실험적으로 해석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 분사 시스템 및 가시화 실험장치

분무 발달 과정 및 분무각을 측정하기 위하여 구축한 분사 시스템 및 가시화 실험장치는 Fig. 1과 같

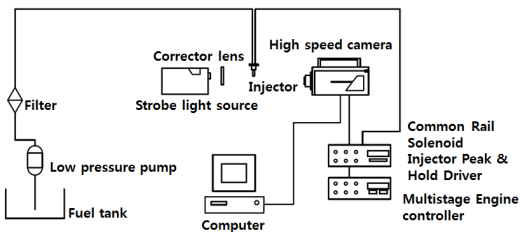


Fig. 1. Schematic diagram of spray visualization system

이 구성되었다. 구축한 분사 시스템은 연료 분사 시스템, 인젝터 드라이버 및 분무 촬영 시스템으로 구성되어 있다. 인젝터 드라이버를 사용하여 연료 분사량 및 분사 시기를 제어하였다. 광원으로는 할로겐 광원을 사용하였으며 분무 이미지를 획득하기 위하여 고속 촬영 카메라와 Photron FASTCAM Viewer를 이용하여 분무 발달 과정 이미지를 취득하였다. 인젝터 드라이버를 이용하여 인젝터에 입력하는 Injection Signal과 고속 촬영 카메라에 입력하는 Camera Trigger를 동시에 입력하여 분무형상을 촬영한다. Fig. 2는 실제 실험 장치의 모습을 나타낸다.

본 실험에서 사용한 인젝터는 GV 250 DELPI 인젝터이며 자세한 제원은 Table 1과 같다.

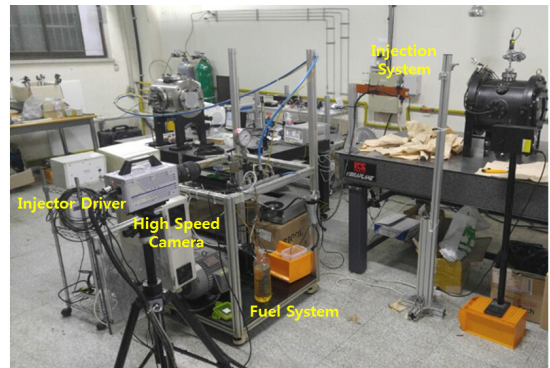


Fig. 2. Picture of spray visualization system

Table 1. Specifications of the Injector

Parameter	Value
System fuel pressure (kPa)	300.0±0.2%
Set point pulse width/period (ms)	2.0/10.0
Set point flow rate (g/s)	0.340±5%
Static flow rate (g/s)	1.969±5%
Coil resistance	12.0±0.6 Ohms
Minimum operating voltage - max individual	6.5 V
Minimum operating voltage - max. subgroup mean	6.0 V
Tip leak rate (N2) - max. (cc/min)	0.6
Set point durability flow shift - individual (%)	±10%
Static durability flow shift - individual (%)	±10%
Durability test fuel	NAE10
Durability test fuel temperature (Degree C)	24±2
Number of holes	4
Hole diameter (mm)	0.2

2.2.2 PDPA 실험 장치

분무 미립화 특성인 입경과 분무 속도를 측정하기 위한 PDPA 시스템은 Fig. 3과 같이 구성하였다. Fig. 4는 실제 실험장치의 모습을 나타낸다.

디지털 신호 발생기를 이용하여 인젝터 분사 신호와 PDPA 시스템의 신호 분석기를 동기화하여 분사 후 시간의 경과에 따른 분무 미립화 특성을 취득하였다. PDPA 시스템에 사용된 레이저의 제원은 아래의 Table 2와 같다.

2.2 실험 방법

본 실험에서 분무 발달 과정 및 분무각을 측정하

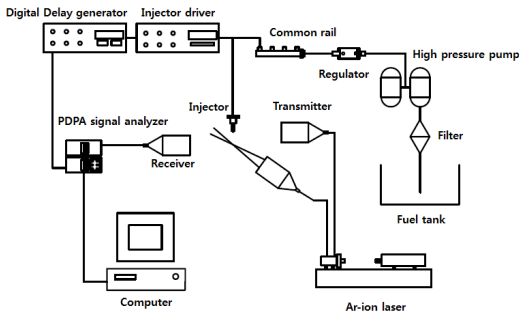


Fig. 3. Schematic diagram of PDPA system

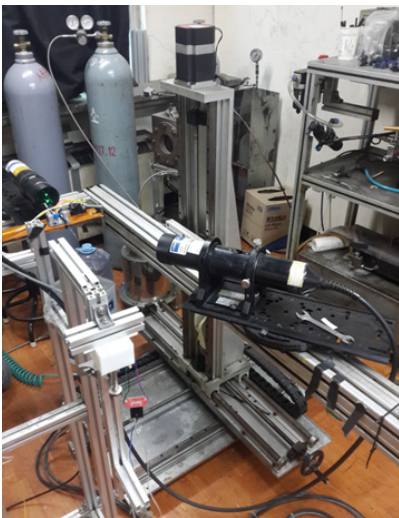


Fig. 4. Picture of PDPA system

기 위하여 인젝터 분무 가시화 실험 조건을 Table 3과 같이 설정하였다. 분무 가시화 실험조건은 인젝터 분사 압력이 7 bar이며 전압은 12 V, 전류는 2 A, Light Source는 Halogen, High Speed Camera 속도는 10,000 fps를 설정하였다. 인젝터의 분사 기간은 1 ms로 설정하고 실험의 정확도를 높이기 위해 총 20회 반복 실험하여 평균하였다.

또한 분사 시뮬레이션을 실시하고 실제 실험과 비교하기 위하여 STAR-CCM+ 소프트웨어를 사용하였으며 자세한 설정 값은 Table 4와 같다. 분사 기간은 1 ms, 분사 압력은 7 bar, 분사 온도는 298 K, 유량은 2 g/s로 입력하였고 분무 길이를 확인하기 위하여 분무 각을 직접 입력하여야 하므로 12°로 설정하였다.

분무 입경 및 속도의 측정을 위한 데이터는 두 개의 채널에서 동시에 취득한 데이터가 10,000개가 되도록 하였으며, 2 μm에서 200 μm로 유효 입경의 범위를 측정하였다. 자세한 PDPA 실험 조건은 아래의 Table 5와 같다. 레이저의 출력은 데이터 취득율과 산란 등을 고려하여 전압 12 V, 전류 2 A로 일정하게 실험을 수행하였다. 분사 압력은 PDPA 시스템의 측정성능을 고려하여 유효한 데이터를 취득하기 위하여 3.5 bar로 일정하게 하였다. 또한, 측정 위치는 인젝터 축 방향으로 각각 30 mm, 50 mm 75 mm

Table 2. Specifications of the pdpa system

Light source	Ar-ion laser	
Wave length (nm)	514.5	
Collection angle (°)	30	
Focal length (mm)	Transmitter	500
	Receiver	500

Table 3. Operating parameters of spray visualization experiment

Parameter	Value
Injection Pressure	7 bar
Voltage	12 V
Current	2 A
Light Source	Halogen
High Speed Camera Frame	10,000 fps
Injection Duration	1 ms

Table 4. The simulation conditions and parameters for numerical analysis

Parameter	Value
Space	Three dimensional
Material Model	Multi components gas O ₂ , N ₂
Idial Gas	
Droplet Break Model	Eddy Break-up
Viscous Regime Type	Turbulent
Turbulence Regime solver	Realizable two layer K-Epsilon Turbulence
Cell quality Remediation	
Gravity	
Two layer all y+ treatment	
Lagrangian Multiphase	
Particle Type	Material particles
Material	Liquid Octane (C ₈ H ₁₈)
Eddy Breakup	
Reitz-Diwakar Breakup	
Primary Atomization	LISA Atomization
Droplet Evaporation	Multi Component Droplet Evaporation Model
Two way coupling	
Impingement Heat Transfer	
Residence Time	
Turburent Dispersion	

Table 5. Operating parameters of PDPA experiment

Parameter	Value
Injection Pressure	3.5 bar
Voltage	12 V
Current	2 A
Injection Duration (T _{ID})	10 ms
T _{amb}	20 °C
P _{amb}	ATM
Injection delay	4.5 ms
Target position	30, 50, 75 mm
Sample	10,000 samples

위치에서 측정하였다. 인젝터의 분사 기간은 4.5 ms로 설정하고 실험의 정확도를 높이기 위해 총 5회 반복 실험하여 평균하였다.

3. 실험결과

3.1 분무 발달 과정

분무 도달 거리는 실제 엔진의 연소실 크기 및 현상을 예측하기 위하여 사용되는 굉장히 중요한 분무 특성 중 하나이다. Fig. 5는 실제 분사 실험과 시뮬레이션을 비교한 결과이다. 시뮬레이션 상의 가솔린 인젝터 분무시 Spray penetration 값은 54.9 mm에 도달하였다. 이는 실제 실험의 평균값 55.5 mm와의 오차율이 약 -1.1%이며 시뮬레이션 값과 실험 값을 비교시 매우 근사함을 알 수 있다. 실제 실험은 다공홀 인젝터로 실시하였지만 평평한 면에 정방향으로 4개의 노즐홀이 존재하여 같은 방향으로 분사를 하기 때문에 단공홀로 가정하여도 같은 결과를 나타내었다.

3.2 분무 특성

아래의 Fig. 6은 분무 가시화 실험 중 분무 도달 길이 및 분무각을 측정하여 분석한 것이다. 20회 분무 결과 데이터를 수집하고 평균값을 산출한 결과 Spray penetration의 평균 값은 55.5 mm, Spray cone angle의 평균 값은 8.8°를 나타내었다.

위의 실험은 대기 중에서 분사를 실험하여 분석한 결과이다. 실험 환경을 조성할 때 실제 엔진의 분사 환경을 모사하여 실시하면 고압의 분위기 조건의 영향으로, 연료 분무 속도가 주변 기체의 항력

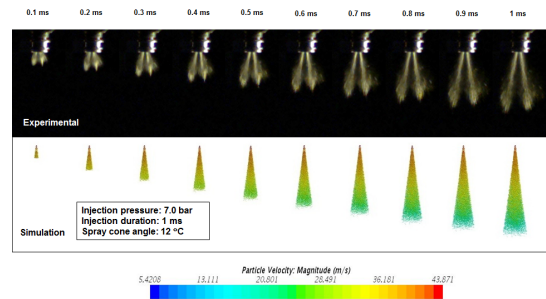


Fig. 5. Simulation and Experimental Comparison of Spray Development Process

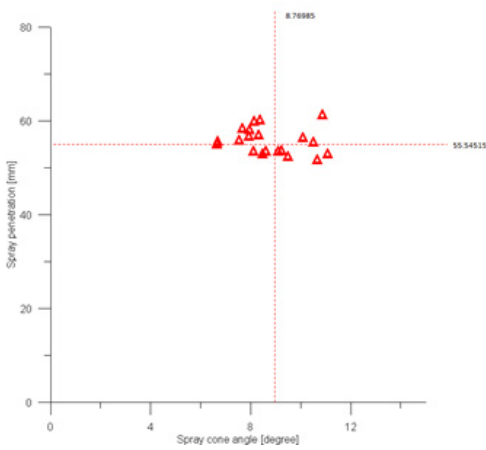


Fig. 6. The experimental results of spray penetration length and spray angle

때문에 저하되어 운동량이 감소된다. 따라서 Spray penetration은 감소하고 Spray cone angle은 증가할 것으로 예측된다.

3.3 미립화 특성

Fig. 7은 전체 분무의 입경의 크기에 따른 분무 미립화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각각 30 mm, 50 mm, 75 mm 지점의 직경과 SMD를 측정 한 결과를 나타낸다. D_{10} 은 각각 30 mm, 50 mm, 75 mm에 대해 54.5 μm , 49.5 μm , 45.9 μm 를 나타내었고 SMD (D_{32})는 각각 114.7 μm , 106.4 μm , 99.4 μm 로 측정되었다.

아래의 Fig. 8은 30 mm, 50 mm 및 70 mm 세 위치에서의 직경을 막대그래프로 나타낸 것이다. 액적의 크기 분포는 Spray momentum이 영향을 미쳐 인젝터 팁에서 거리가 멀어질수록 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 10 ms 분사시 축 방향에 대하여 30 mm, 50 mm 및 70 mm 세 위치에서의 속도를 분석한 결과를 나타내었다. 시간에 따른 위치의 속도를 분석하였을 때 평균 액적 유속(MDV)은 각각 21.5 m/s, 19.0 m/s, 15.5 m/s로 측정되었다.

아래의 Fig. 10은 30 mm, 50 mm 및 70 mm 세 위

치에서의 평균 액적 속도를 막대그래프로 나타낸 것이다. 평균 액적 속도의 분포는 점도와 밀도로 인하여 인젝터 팁에서 거리가 멀어질수록 속도 분포가

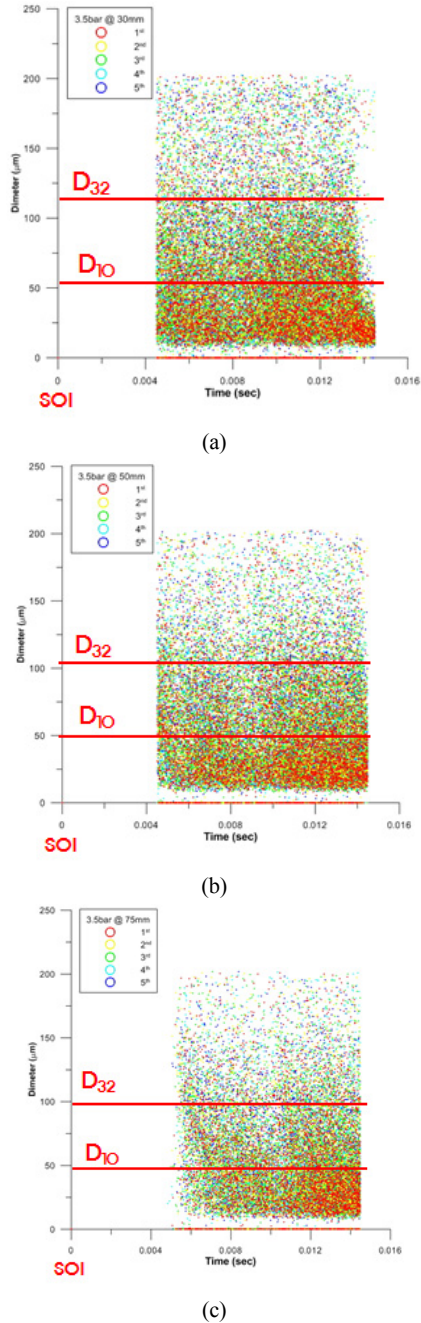


Fig. 7. Diameter real time at 3 positions (TID = 10 ms) (a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm

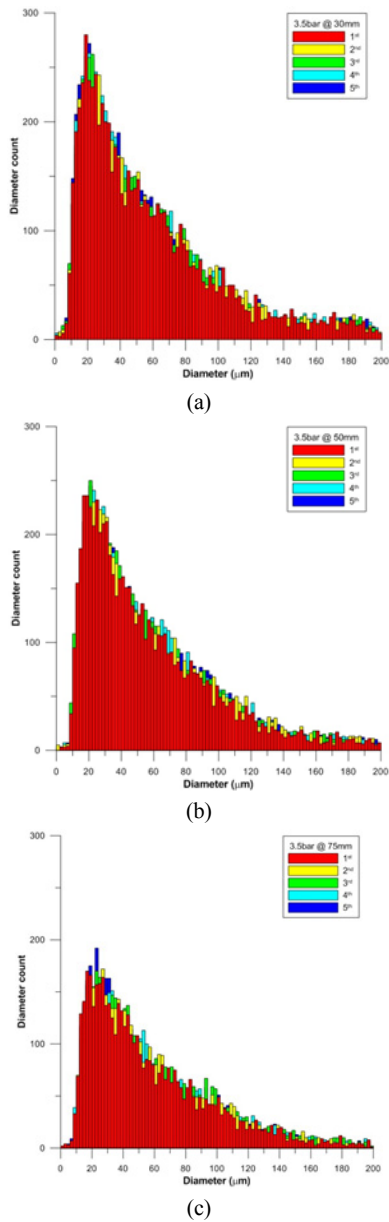


Fig. 8. Diameter histogram at 3 positions
(a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm

감소함을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 분사 시간에 따른 SMD (D_{32})의 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과를 비교한 것을 나타낸다. 작게는 1 μm 에서 크게는 2.5 μm 가 차이나는 것을 확인할 수 있고 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과가 매우 근사함을 알 수 있다.

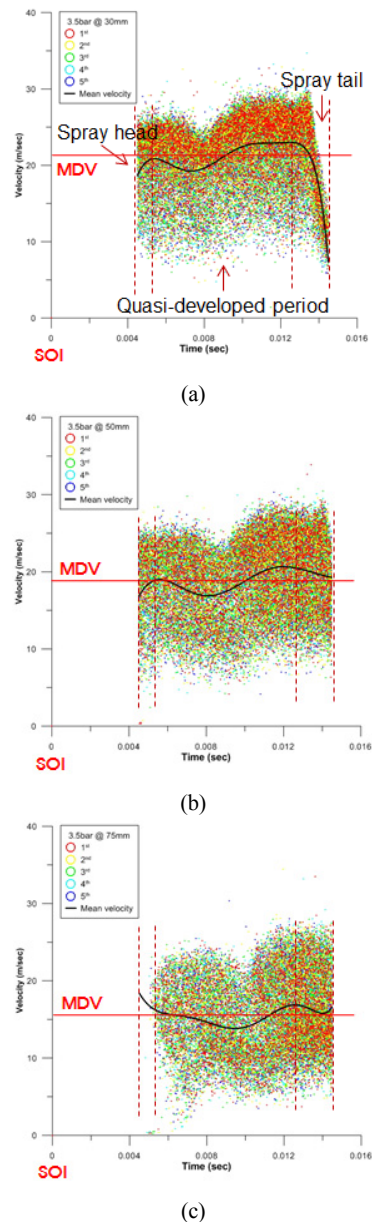


Fig. 9. Velocity real time at 3 positions (TID = 10 ms)
(a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm

Fig. 12에서는 30 mm 지점에서의 시간에 따른 평균 액적 속도 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 평균 값을 나타낸 결과에서 실제 실험결과 21.5 m/s와 근사한 결과를 나타내고 있다.

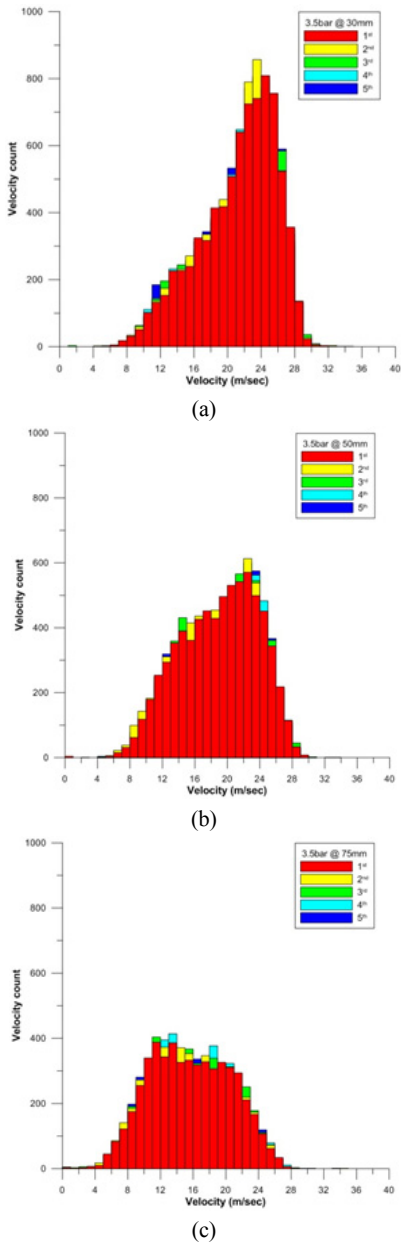


Fig. 10. Velocity histogram at 3 positions (a) 30 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm

4. 결론

본 연구는 현재 상용되는 가솔린 포트 인젝터로 분사된 분무의 입자 크기와 속도 프로파일 등 분무 특성을 고찰하기 위하여, 대기 중에 연료를 분사하

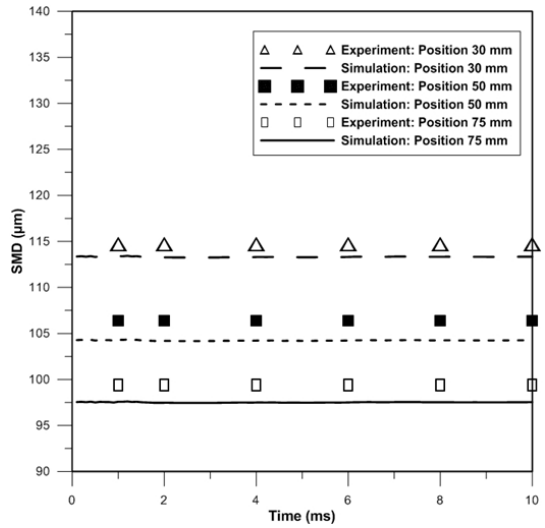


Fig. 11. Sauter mean diameter (D_{32}) for injection time 10 ms [experiment & simulation]

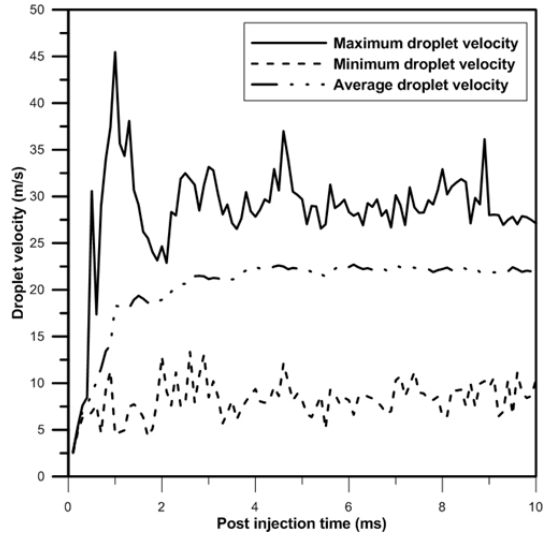


Fig. 12. Gasoline spray droplet velocity for injection time 10 ms

여 분무 특성을 관찰하고 해석하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 20회 분무 결과 데이터를 수집하고 평균값을 산출한 결과 Spray penetration의 평균 값은 55.5 mm, Spray cone angle의 평균 값은 8.8°를 나타내었다. 실제 엔진의 분사 환경을 모사하여 실시하면 고압의 분위기 조건의 영향으로, 연료 분무 속도가 주변 기체의 항력 때문에 저하되어 운동량이 감소되므로

Spray penetration은 감소하고 Spray cone angle은 증가할 것으로 예측된다.

2) D_{10} 은 각각 30 mm, 50 mm, 75 mm에 대해 54.5 μm , 49.5 μm , 45.9 μm 를 나타내었고 SMD (D_{32})는 각각 114.7 μm , 106.4 μm , 99.4 μm 를 나타내었다. 액적의 크기 분포는 Spray momentum이 영향을 미쳐 인젝터 팁에서 거리가 멀어질수록 줄어드는 것을 알 수 있다.

3) 10 ms 분사시 축 방향에 대하여 30 mm, 50 mm 및 70 mm 세 위치에서의 속도를 분석한 결과를 속도를 분석하였을 때 평균 액적 유속(MDV)은 각각 21.5 m/s, 19.0 m/s, 15.5 m/s를 나타내었다. 평균 액적 속도의 분포는 점도와 밀도로 인하여 인젝터 팁에서 거리가 멀어질수록 속도 분포가 감소함을 알 수 있다.

4) 본 연구에 사용된 가솔린 포트 인젝터는 현재 사용되는 인젝터이며 시판되는 이륜차에도 장착되고 있는 인젝터이다. 분무 가시화 실험으로 거시적 분무 특성을 확인하고 PDPA 시스템을 이용하여 미립화 특성을 파악함으로써 미시적 분무 특성을 확인하여 실험의 결과값을 인젝터 설계시 실제 사용 가능한 기준으로 사용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업(No. KNRF-2017042183), 환경부에서 시행한 환경기술개발사업 및 한양대학교 기계

공학부 박성욱 교수님과 연소기관 및 에너지변환 연구실(Combustion & Energy Conversion Laboratory)의 지원을 받아 진행된 연구개발결과 성과이며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

References

1. J. Oh, Y. Jeong, J. Kang, A. Jung, and Y. Park, "A Development of GHG Emission Factor for Motorcycle Vehicles", KSAE 2013 Annual Conference, KSAE13-A0503.
2. H. K. Suh, S. W. Park, S. I. Kwon, and C. S. Lee, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuels", Transaction of KSAE, Vol. 12, No. 6, 2004, pp. 23-29.
3. B. K. Song, K. S. Jung, W. T. Kim, S. J. Kang, and B. J. Rho, "Spray Characteristics of High-Pressure Injectors for Gasoline Direct Injection", KSAE 1999 Fall Conference, 99380157.
4. Y. T. Seo, H. K. Suh, S. H. Bang, and C. S. Lee, "A Study on the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail Injection System", 2006 Fall Conference Proceeding of KSAE, KSAE06-F0089, 2006, pp. 570-575.
5. Y. T. Seo, H. K. Suh, and C. S. Lee, "A Study on the Injection Characteristics of Biodiesel Fuels Injected through Common-rail Injection System", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 5, 2007, pp. 97-104.
6. Y. T. Seo, H. K. Suh, and C. S. Lee, "Spray and Combustion Characteristics on Biodiesel Blends with Diesel Fuel according to Split Injection System", 2007 Spring Conference Proceeding of KSAE, KSAE07-S0098, 2007, pp. 638-643.
7. B. Song, W. Kim, and S. Kang, "Spray Behavior and Atomization Characteristics of Dual Stream Gasoline Injectors", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, 2005, pp. 112-120.