

## 액체로켓엔진 인젝터의 분무 분열특성

정훈\* · 김진석\* · 김정수\*\* · 김성초\*\* · 박정\*\*\* · 장기원\*\*\*\*

## Spray Breakup Characteristics of LRE Injector

Hun Jung\* · Jin Seok Kim\* · Jeong Soo Kim\*\* · Sungcho Kim\*\* · Jeong Park\*\*\* · Ki-Won Jang\*\*\*\*

### ABSTRACT

Spray characteristics of an injector employed in liquid rocket engine is investigated by Particle Image Velocimetry and Dual-mode Phase Doppler Anemometry measurements. Instantaneous plane images captured by PIV technique are examined in order to judge a pass-fail criteria of spray injection performance. DPDA technique is also applied in order to measure the velocity and diameter of spray droplets. The eternal objective of this study is to evaluate an injector performance which may be utilized for the design of brand-new ones through the clear understanding of spray characteristics.

### 초 록

PIV 및 DPDA 측정을 통해 액체로켓엔진 인젝터의 분무특성에 대한 연구를 수행하였다. 분무거동에 대한 합격-불합격 여부를 판단하기 위해 PIV 기법에 의해 순간평면이미지를 촬영하고, DPDA를 통해 분무액적의 속도 및 직경을 측정하였다. 분무특성에 대한 명확한 이해를 바탕으로 향후 사용될 인젝터의 설계변수 도출 및 성능 평가가 본 연구의 궁극적인 목적이다.

**Key Words:** Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector(인젝터), Spray Droplet(분무액적), Atomization(미립화), Particle Image Velocimetry(PIV, 입자영상유속계), Dual-mode Phase Doppler Anemometry(DPDA, 이중모드 위상 도플러속도계)

### 1. 서 론

저렴한 개발비, 간결한 시스템 구조, 장기간의 안정적인 추진제 저장성 등의 장점을 갖는 액체

로켓엔진(Liquid Rocket Engine, LRE)은 낮은 추력(thrust) 및 임펄스비트(impulse bit), 장기간의 시스템 운용이 요구되는 인공위성의 속도 및 자세(attitude) 제어에 주로 활용된다. 인젝터에 의한 연소실내 연료의 미립화(atomization) 특성 및 공간분포(spatial distribution)에 대한 정확한 예측과 압력변화에 따른 분무패턴 및 연료 유량을(flow rate) 시험은 인젝터 설계 및 개발과정에서의 필수 단계이다.

\* 순천대학교 기계공학과 대학원

\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부

\*\*\* 부경대학교 기계공학부

\*\*\*\* (주)한화, 대전공장

연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

분무의 미립화 특성 규명에 대한 많은 연구가 진행되었다. Xianguo 와 Jihua[1]는 PDA 계측을 통해 환상액체제트(annular liquid jet)의 액적 수밀도(droplet number density), Sauter Mean Diameter(SMD), 속도 등을 측정하여 분무특성을 고찰하였다.

본 연구는 인젝터 분사압력 변화에 따른 분류(spray stream)의 거동특성을 PIV 기법으로 획득한 순간이미지(instantaneous image)를 통해 거시적으로 살펴본다. 또한, 실제 인젝터 성능평가에 사용되는 치구의 설계 도면을 바탕으로 순간 이미지에 중첩시켜 인젝터 가공의 합격여부를 판단한다. DPDA 측정으로 액적의 속도, 직경을 측정하여 실험에 사용된 인젝터의 성능 평가 및 미립화 양식(regime)에 대한 검증은 시도한다.

## 2. 실험 장치

실험장치 구성은 Fig. 1과 같다. PIV, DPDA, 분무발생장치(Injector Spray Generation, ISG)로 구성되며 ISG는 간략하게 인젝터로 대표한다.

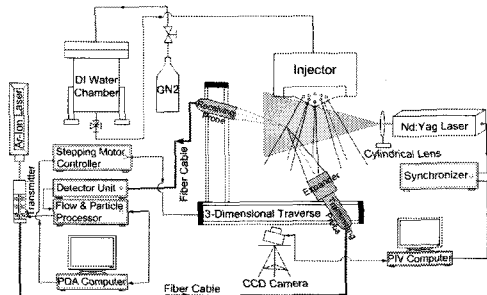


Fig. 1 Schematic Diagram of the Experimental Setup

PIV 시스템은 Double-head Nd:Yag 레이저, 원통형(cylindrical) 렌즈, CCD 카메라, 컴퓨터 및 동기화장치(synchronizer)로 구성된다. 최대 120 mJ 출력의 Nd:Yag 레이저 빔(beam)은 원통형 렌즈를 지나 평면(sheet) 형태로 조사되며 펄스지속시간(pulse duration)은 8 ns 이다. CCD 카메라는 1280×1024 픽셀의 해상도를 가지며, 초점거리(focal length) 600 mm 렌즈가 장착된다.

DPDA 시스템은 Standard-PDA와 Planar-PDA 시스템을 하나의 수광부(receiving probe)에 조합한 것으로, 액적 거동(trajecory)에 의해 유발되는 Gaussian beam 효과를 제거하여 구형검증(spherical validation) 능력을 크게 향상시킨 것이다[2]. Ar-Ion 레이저, 신호발생기(transmitter), 송광부(transmitting probe), 확대경(expander), 수광부, 신호검출기(detector unit), 신호처리기(flow & particle processor), 3차원 이송장치(traverse) 및 모터 컨트롤러(steping motor controller), 컴퓨터로 구성된다. 송광부와 수광부의 초점거리는 각각 500, 400 mm 이고 송광부에 확대비 1:1.98의 확대경을 장착하여 측정불륨을 줄였다. Edwards 와 Marx[3]는 본 실험과 같이 수밀도가 높은 조건에서 측정불륨을 줄이는 것이 유일한 방법이라고 제안하였다. 측정불륨을 줄임으로써 증대되는 Gaussian beam 효과는 DPDA 시스템으로 극복할 수 있다[2].

분무액적 직경 측정에 대한 신뢰도를 95% 이상으로 높이기 위해서는 5,500 개 이상의 데이터를 획득해야 하므로[4] 분류 중심축을 따라 각 측정 지점마다 10,000 개씩 획득하였다.

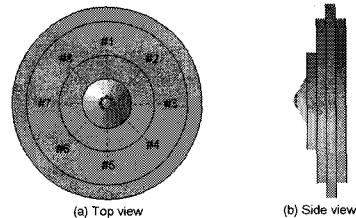


Fig. 2 Configuration of the Injector

Figure 2는 방전가공(electro-discharge machining)으로 제작한 인젝터이다. 인젝터에는 직경 16/1000 inch 의 8개 노즐이 중심축과 30° 엇각(cant angle)을 이루고 있으며 가상의 변호가 주어진다. 실제 LRE에 사용되는 하이드라진( $N_2H_4$ )은 독성, 폭발성 등의 위험요소로 인해 실험실 단위 연구에서 취급하기에 많은 제약이 따른다. 따라서 물성치가 유사한 이온이 제거된 물(deionized water, DIW)을 작동유체(working fluid)로 사용한다. DIW는 질소가스( $GN_2$ )로 가

압되어 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인젝터에서 분사된다.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은 2번 노즐의 압력에 따른 분무거동을 파악하기 위해 PIV로 획득한 순간 분무 이미지이다. 이미지는 인젝터 면(face)으로부터 수직으로 33 mm 이다. 비간섭적(non-intrusive)으로 분무거동을 관찰할 수 있었으며, 2번 노즐의 분무거동은 모든 압력에서 합격범위이고 흘림(shedding) 현상이 보인다. 고압일수록 미립화가 활발하게 진행되는 것을 볼 수 있다.

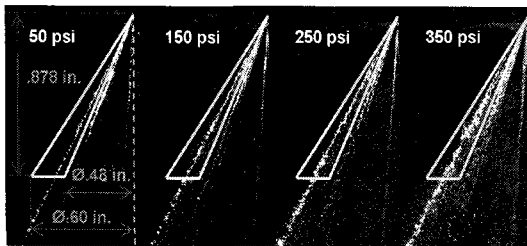


Fig. 3 Instantaneous Images of Spray

정량적인 고찰을 위해 DPDA로 2번 노즐 액적의 속도 및 직경을 분무축 방향으로 250, 300, 350, 400 psi 에서 인젝터 면으로부터 220 mm 하류까지 5.5 mm 간격으로 측정했다.

Figure 4는 액적의 속도분포를 나타낸다. 음영 부분(~16.5 mm)에서 속도가 증가하는 등의 비정상적인 속도 패턴을 보이는데 측정오차로 간주한다. 이는 출구 근처에서는 액적의 형상과 크기가 불규칙하고, 덩어리 형태의 리거먼트(ligament)가 지배적으로 존재하여 측정시 상당한 도플러 신호 오차가 발생하기 때문이다. 속도는 고압일수록 높고 모든 압력에서 하류로 갈수록 줄다가 120 mm 이후에서 역전된다. 높은 운동에너지를 갖는 고압분무가 더 많은 에너지를 주변으로 전달하기 때문이다.

평균속도와 섭동속도의 비인 난류강도(turbulent intensity)를 Fig. 5에 보였다. 난류강도 역시

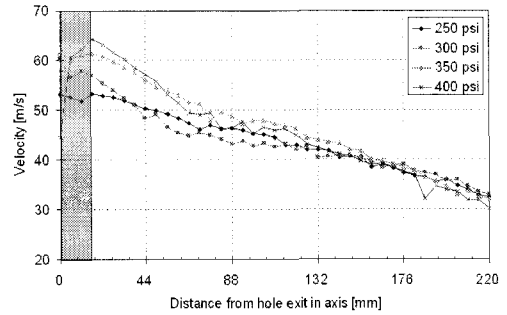


Fig. 4 Velocity Distribution for Each Pressure

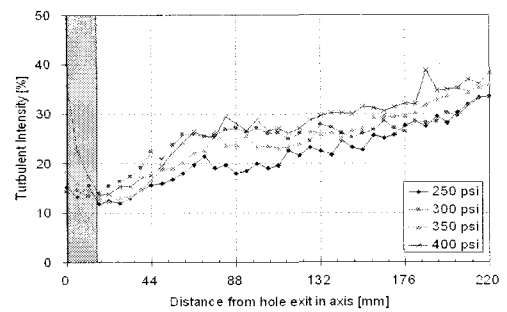


Fig. 5 Turbulent Intensity Distributions

고압에서 높고, 평균속도에 영향을 크게 받아 하류로 갈수록 증가한다[1].

SMD 분포를 Fig. 6에 보였다. Fig. 4, 5 보다 넓은 측정오차 영역(~49.5 mm)이 존재하였고, 진한 음영으로 표시하였다. SMD는 액적의 표면적에 대한 체적의 비로서 분사된 액적의 증발속도를 상대적으로 나타내줄 수 있다[5]. 250 psi를 제외하고는 약 120 mm(연한 음영) 이후로 직경 감소 현상이 거의 나타나지 않는다. 250 psi 에서는 1차분열이 충분치 않아 액적이 크기 때문에 미립화가 오래 진행되는 것으로 판단된다.

Figure 7은 액적의 공간분포도(concentration)이다. 하류로 갈수록 단위부피당( $\text{cm}^{-3}$ ) 액적수가 감소하다가 약 120 mm 이후 일정해지며, 고압으로 분사된 분무의 미립화 능력이 더 우수하기 때문에 저압보다 많은 액적이 분포한다.

Figure 4, 5, 6, 7 모두 흘림현상에 의한 파동이 관찰되는데 약 120 mm 내외에서 파동강도가 감소하는 것으로 보아 120 mm 전후에서 미립화가 완전하게 이루어진 것으로 판단된다.

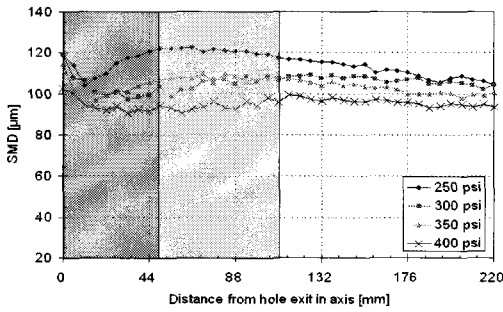


Fig. 6 SMD Distribution for Each Pressure

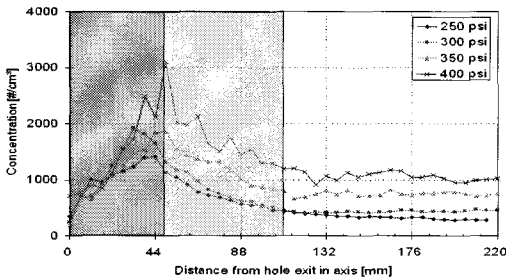


Fig. 7 Concentration Distribution for Each Pressure

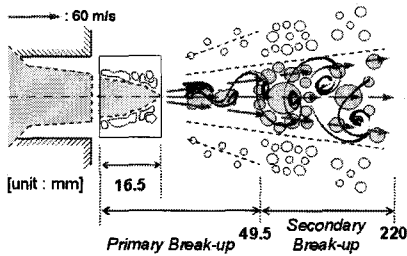


Fig. 8 Schematic of Spray Breakup with velocity vector and shedding phenomenon

Baumgarten 등[6]의 결과를 바탕으로 분무 분열에 대한 개략도를 Fig. 8에 도시하였다. 직경 측정이 어려운 영역 49.5 mm 까지를 1차, 그 이후 지역은 2차 분열영역이라 하였다. 홀림현상은 상류에서 강하고 주기가 짧으며, 하류로 가면서 약해지고 주기가 길어진다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 액체로켓엔진 인젝터의 압력에 따른 분무특성을 연구하였다. PIV 기법으로 순간평면 이미지를 획득하여 분무의 거동에 따른 인젝터 성능을 판단하고, DPDA를 통해 액적의 속도, 직경을 측정하여 난류강도, SMD, 공간 분포도 특성을 정량적으로 고찰하였다. PIV, DPDA 실험 모두에서 홀림현상이 관찰되었다.

120 mm 전후에서 공기역학적, 수력학적인 미립화가 정점에 이른다.

#### 후 기

이 논문은 교육인적자원부의 2006년도 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

1. Xianguo, L. and Jihua, S., "Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15(1), 1999, pp.103-110
2. Tropea, C., Xu, T. -H., Onofri, F., Gréhan, G., Haugen, P., and Stieglmeier, M., "Dual-mode Phase-Doppler Anemometer, Part. Part. Syst. Charact. 13, 1996, pp.165-170
3. Edwards, C. F. and Marx, K. D., "Analysis of the Ideal Phase-Doppler System: Limitations Imposed by the Single-Particle Constraint," *Atom. and Sprays*, Vol. 2, 1992, pp.319-366
4. Bowen, I. G. and Davies, G. P., *Shell Research Ltd., Rept. ICT 28, London, 1951*
5. 임병직, 문일윤, 서성현, 한영민, 최한석, "고밀도 탄화수소계 연료의 분무 및 연소특성," *한국추진공학회지*, Vol. 10(4), 2006, pp.26-33
6. Stiesch, G., *Modeling Engine Spray and Combustion Processes*, Springer, 2003