

# 액체추진제 추력기 인젝터 분무액적의 2차원 공간분포

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

## Two-Dimensional Distribution of Spray Droplets Emanating from an Injector of Liquid-Propellant Thruster

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

### ABSTRACT

Two-dimensional distribution characteristics on the spray droplets emanating from an injector employed in a liquid-propellant thruster are investigated through dual-mode phase Doppler anemometry (DPDA). Spray-breakup characteristic parameters such as spray droplet velocity, turbulent intensity, Sauter mean diameter (SMD), number density, and volumetric flux are quantified to scrutinize the macroscopic behavior of injector-spray breakup. The present study will be able to contribute to the comprehension for performance features of the thruster in current use and to the design engineering of a brand-new thruster as well.

### 초 록

액체추진제 추력기에 사용되는 인젝터 분무액적의 2차원 공간분포 특성을 이중모드 위상도플러속도계(dual-mode phase Doppler anemometry, DPDA) 기법을 적용하여 고찰하였다. 분무액적의 속도, 난류강도, Sauter 평균직경(Sauter mean diameter, SMD), 수밀도, 그리고 체적플럭스 등의 분무분열특성 매개변수 변이를 정량화하여 인젝터 분무의 거시적 거동을 규명한다. 본 연구는 추력기의 성능특성 이해는 물론 새로운 추력기의 설계기반 구축에 기여할 수 있을 것이다.

Key Words: Liquid-Propellant Thruster(액체추진제 추력기), Injector(인젝터), Spray Droplet(분무액적), Atomization(미립화), Spray-Breakup(분무분열), Dual-mode Phase Doppler Anemometry(이중모드 위상도플러속도계)

\* 순천대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부  
\*\*\* 부경대학교 기계공학부  
\*\*\*\* (주)한화, 천안공장  
\*\*\*\*\* (주)한화, 대전공장  
연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

### 1. 서 론

저렴한 개발비 및 장기간의 안정적인 추진제 저장성 등의 장점을 갖는 액체추진제 추력기는 오랜 시스템 운용시간이 요구되는 우주비행체

추진시스템의 속도 및 자세(attitude) 제어에 주로 활용된다[1]. 액체추진제 추력기의 성능은 연소실내로 추진제를 분사하는 인젝터(injector)의 성능에 크게 의존한다[2]. 따라서 인젝터 분무에 의한 연소실내 연료 미립화 특성(atomization characteristics) 및 공간상의 분포(spatial distribution)에 대한 정확한 예측 및 평가를 위한 시험은 인젝터 설계 및 개발과정에서 필수단계이다. 또한, 추진기관 개발을 위한 핵심기술은 로켓 선진국으로부터의 기술획득이 어렵기 때문에 추진제 분사시스템의 자국설계기술보유가 필수적이다.

액체추진제 추력기 인젝터의 미립화 성능평가를 위해 분사압력변화 및 분무입자의 축방향 이동에 따른 속도, 난류강도(turbulent intensity,  $TI$ ), Sauter 평균직경(Sauter mean diameter,  $SMD$ ), 그리고 수밀도(number density) 등의 분열특성 매개변수(parameter)들을 정량적으로 관찰한 바 있다[3].

본 연구에서는 2차원 속도성분 측정이 가능하며, 정규 빔 효과(Gaussian beam effect)를 없애 구형검증(spherical validation) 능력을 향상시킨 이중모드 위상도플러속도계[4]를 이용하여 액적의 평균속도,  $TI$ ,  $SMD$ , 수밀도, 그리고 체적플럭스(volumetric flux) 등에 대한 변이를 정량화하여 인젝터 분무액적의 2차원 공간분포특성을 고찰한다.

## 2. 실험장치

Figure 1에 도시한 실험장치는 분무발생장치(Injector-Spray Generation System, ISGS)와 DPDA로 구성되며, ISGS는 간략하게 인젝터로 표시된다. DPDA 시스템은 Ar-Ion 레이저, 분광신호발생기(transmitter), 송광부(transmitting probe), 확대렌즈(expander), 수광부(receiving probe), 신호검출기(detector unit), 신호처리기(flow & particle processor), 3차원 이송장치(3D traverse system) 및 모터 컨트롤러(steping motor controller), 시스템 측정 제어를 위한 컴

퓨터 등으로 구성된다. 송/수광부의 초점거리는 500/400 mm이고, 송광부에 확대비 1:1.98의 확대렌즈를 장착해 측정볼륨을 줄인다.

DPDA 측정은 1.72와 2.76 MPa의 분사압력에서 인젝터 노즐출구로부터 축/반경방향 위치(축방향: 60, 140, 220 mm/반경방향: 분무축으로부터 1 mm 간격)를 변화시켜 수행하였다.

실험에 사용된 인젝터는 5 Newton급 추력기에 장착되는 것으로 방전가공으로 제작하였으며 그 형상을 Fig. 2에 보인다. 지름이 0.406 mm인 8개의 노즐은 인젝터 중심축과 30° 엇각(cant angle)을 이루고 있으며 실험시 편의를 위해 Fig. 2(b)와 같이 가상의 번호를 각각의 노즐에 부여한다. 실제 액체추진제 추력기의 연료로 사용되는 하이드라진( $N_2H_4$ )은 독성 및 폭발성 등의 위험요소로 인해 실험실 단위에서의 취급에 많은 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는  $N_2H_4$ 와 물성치가 매우 유사한 이온이 제거된 물(deionized water, DIW)을 작동유체로 사용한다. 챔버(chamber) 내의 DIW는 질소가스로 가압되

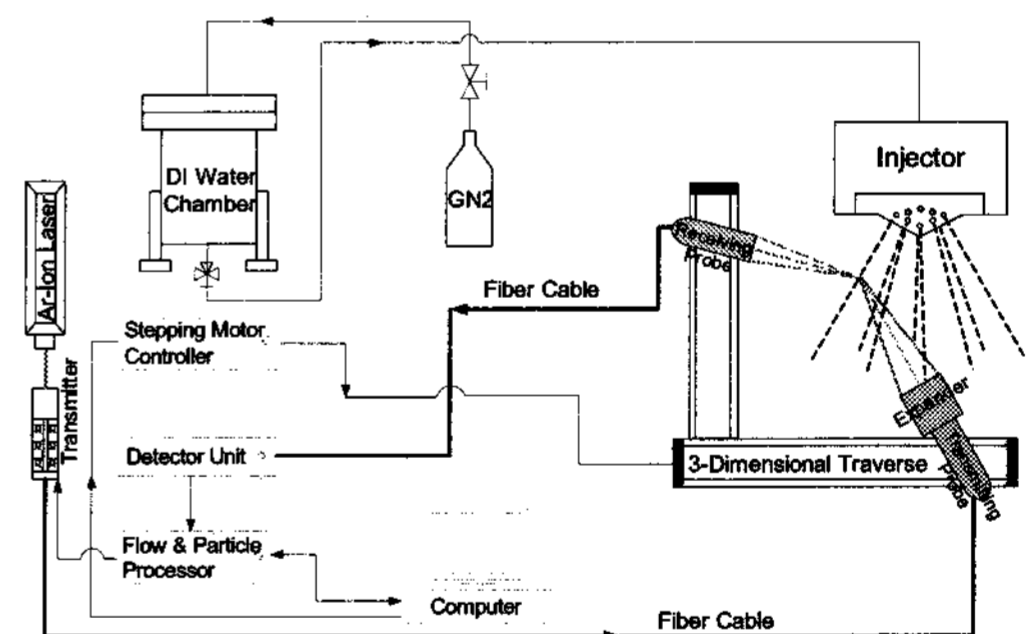


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

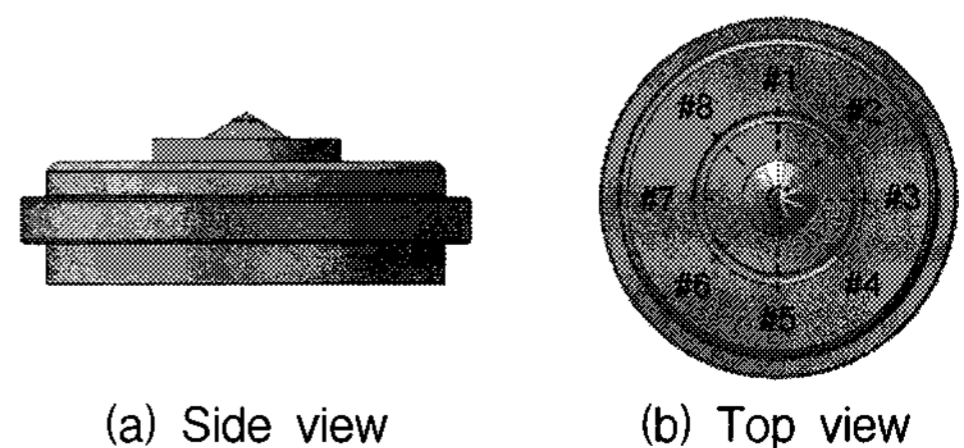


Fig. 2 Configuration of the injector

며 일련의 밸브와 필터를 지나 인젝터에서 분사된다.

### 3. 결과 및 고찰

인젝터 분무의 미립화 특성에 관한 정량적인 고찰을 위해 8개의 노즐 가운데 #4 노즐로부터 분사된 액적의 속도 및 직경 등을 DPDA로 측정하였다.

Figure 3은 분무압력 변이에 따른 액적의 분무축방향 속도분포를 나타낸다. 분무액적의 축방향 속도성분은 상류(60 mm)에서 하류(140, 220 mm)로, 분무중심에서 외곽(반경방향)으로 진행할수록 감소하며, 분무축을 중심으로 대칭으로 분포한다. 주변기체로의 운동량 손실과 분무확산에 따른 반경방향 속도성분의 증가로 인하여 분무 외곽에서의 속도는 중심에서의 그것보다 줄어

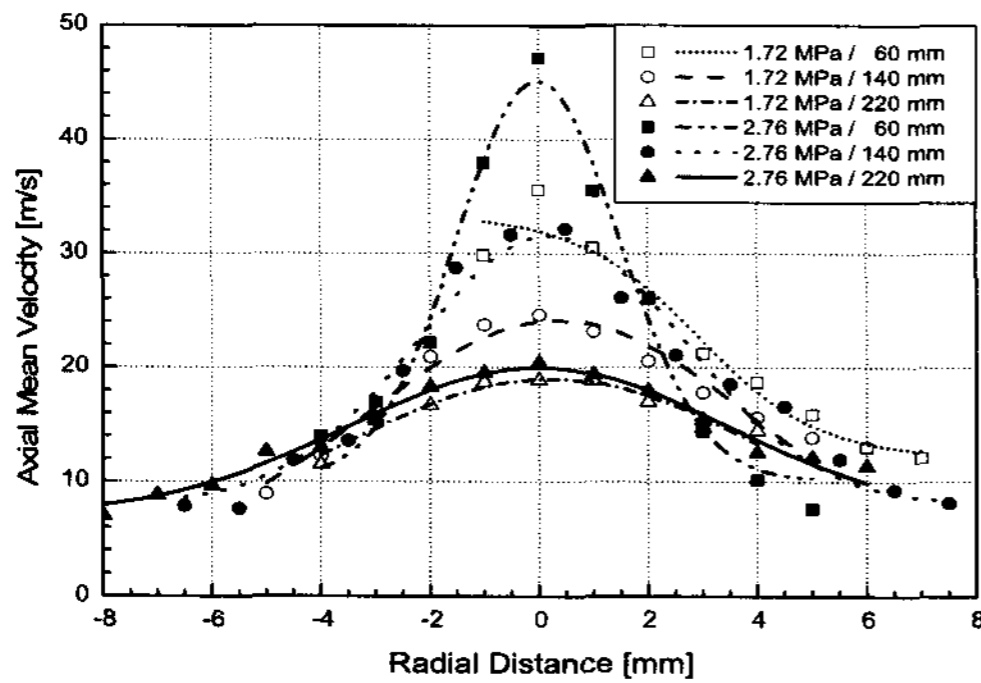


Fig. 3 Axial velocity distribution

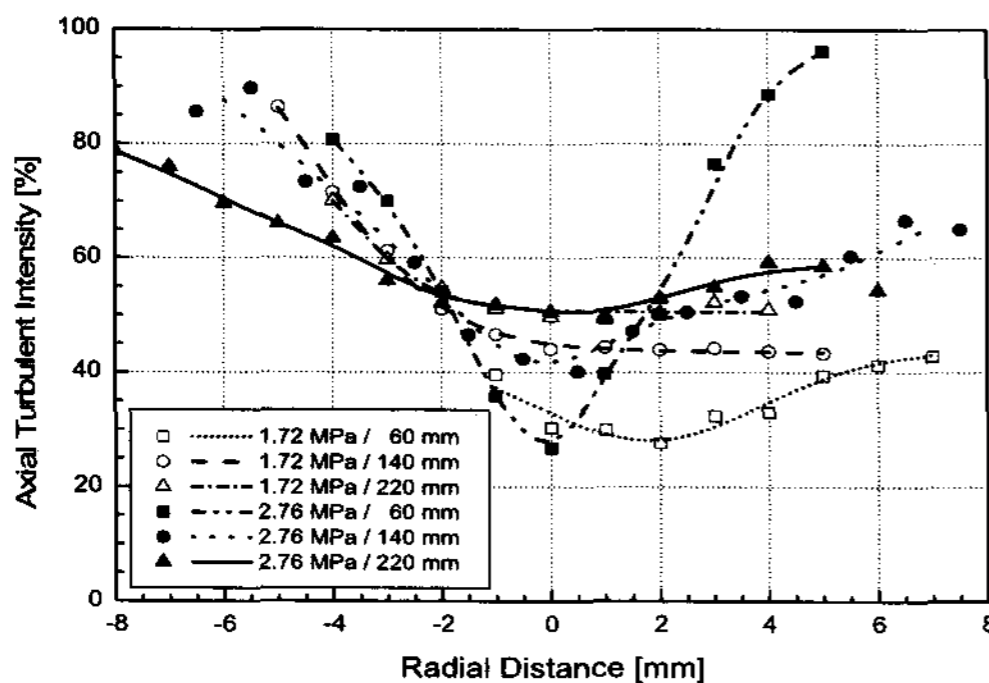


Fig. 4 Axial turbulent intensity distribution

게 된다. 또, 분무압 차이에 의한 분무상류(60 mm)에서의 속도차이는 하류로 진행하면서 점점 줄어들게 되는데 이는 분무압에 따른 액적의 미립화 정도, 그리고 미립화 액적과 주변기체간의 운동량 교환 등에 종속한다[3].

Figure 4에 평균속도에 대한 섭동속도(velocity fluctuation)의 백분율로 정의되는  $TI$ 를 보인다.  $TI$ 는 분무의 상류보다 하류에서 강하고 분무의 곁으로 갈수록 증가하는데, 이는 하류/외곽으로 이동함에 따라 크기가 줄어드는 액적들이 난류 전단층(shear layer) 확대에 의한 무질서도(randomness) 증가의 영향을 받기 때문이다.

분무액적의 SMD 분포를 Fig. 5에 도시한다. 액적의 표면적에 대한 체적의 비로 정의되는 SMD는 열전달량을 결정하는 면적에 대한 증발될 액적질량의 비와 직접적으로 관계하므로 분사된 DIW의 증발율에 대한 척도이다. 고압으로 분사된 분무가 저압에서의 분무보다 노즐출구에

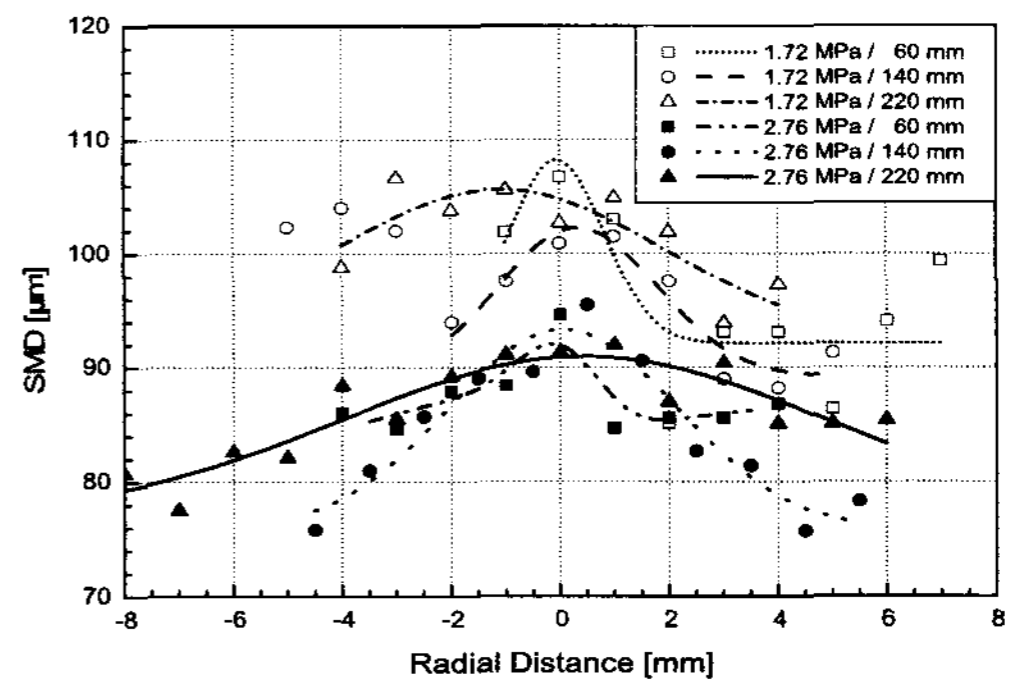


Fig. 5 SMD distribution

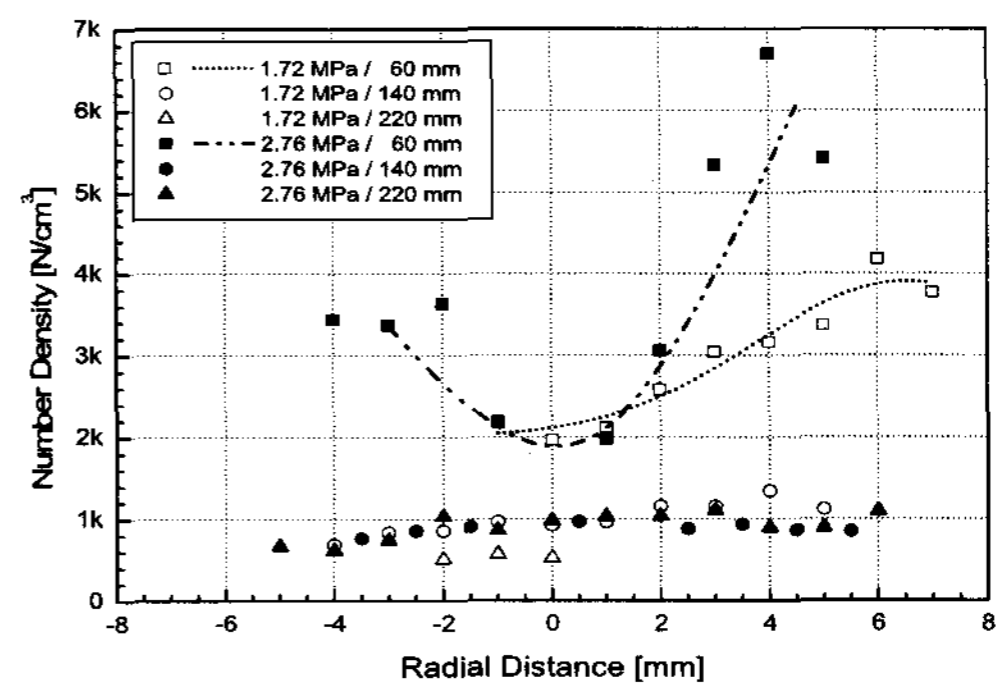


Fig. 6 Number density distribution

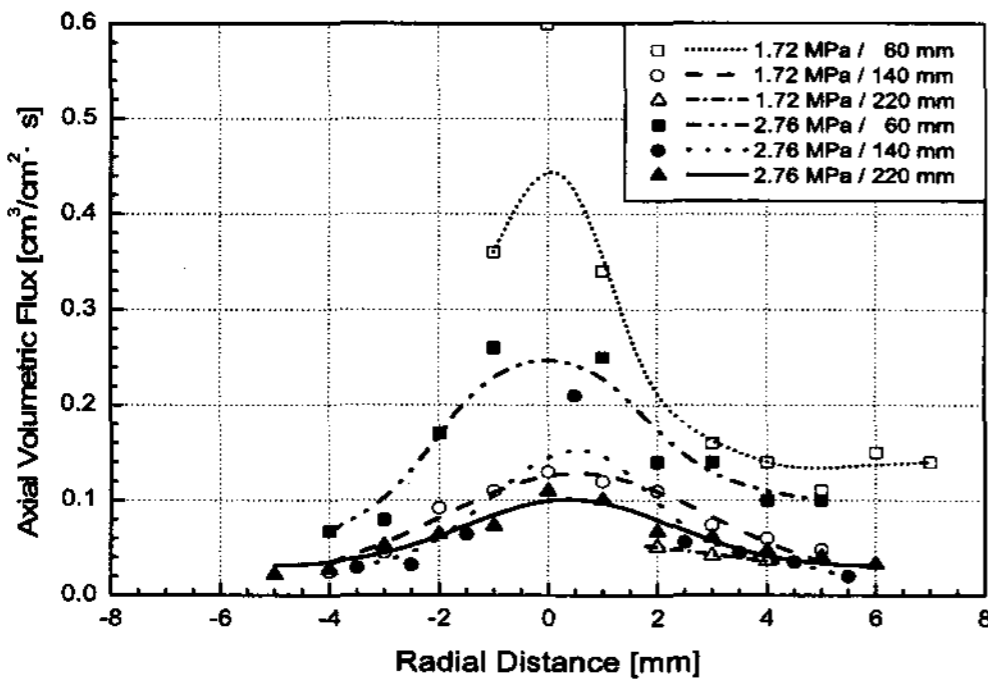


Fig. 7 Axial volumetric flux distribution

서의 압력강하(pressure drop)가 더 크기 때문에 상대적으로 활발한 미립화가 발생하여 SMD는 더 작다. 축방향 이동에 따른 SMD 변화는 크지 않으나, 외곽으로 갈수록 SMD는 감소한다.

Figure 6은 액적 수밀도의 분포를 도시한 것이다. 고압에서 미립화 성능이 우수하므로 저압보다 많은 수의 액적이 단위부피( $cm^3$ ) 내에 분포하고 있음이 상류에서 확인되나, 미립화가 충분히 진행된 하류에서는 분사압력과 반경방향 진행거리의 상관없이 유사함을 관찰할 수 있다.

단위시간(sec)당 단위면적( $cm^2$ )을 통과하는 체적량을 나타내는 체적플럭스를 Fig. 7에 보인다. 저압보다 고압에서 더 작은 분포를 보이며 하류로 가면서 그 차이는 줄어든다. 분무각의 확산으로 인해 분무후류와 외곽으로 갈수록 체적플럭스는 일반적으로 감소하지만 압력에 따라 상반된 경향을 갖는 액적속도와 체적 (혹은 SMD)의 곱에 관계하므로 압력변이에 따른 일반적인 경향을 찾을 수는 없다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액체추진제 추력기 인젝터로부터 발생하는 분무의 2차원 공간분포에 대한 이해를 목적으로 DPDA 계측을 수행하였다. 인젝터 노즐분무의 분열특성을 분사압력과 분무액적의 진행거리(축/반경방향)에 따라 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기속도는 분사압력에 비례하며, 분무축의 하류와 외곽(반경방향)으로 진행할수록 분무액적의 크기는 감소한다.
- (2) 액적의 크기 변화는 축방향 진행거리보다 분사압력에 더 크게 영향을 받는다.
- (3) 액적의 평균속도, SMD, 난류강도, 수밀도, 그리고 체적플럭스 등의 분무액적 분열특성 매개변수가 분무축에 대칭으로 분포한다.

#### 후 기

이 논문은 교육인적자원부의 2007년도 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

1. 정훈, 김정수, 김성초, 박정, "소형 액체로켓 엔진 인젝터의 분무 분열특성에 대한 연료분사압력의 영향," 한국추진공학회지, 제11권, 제3호, 2007, pp.50-57
2. 이광진, 문덕용, 김유, "F-O-O-F 충돌형 injector의 분무특성 및 혼합성능에 관한 실험적 연구," 한국추진공학회지, 제3권, 제3호, 1999, pp.1-8
3. Kim, J. S., Kim, J. S., Jung, H., Park, J., Kim, S., and Jang, K. W., "A Study on the Spray Characteristics of a Liquid-Propellant Thruster Injector by PIV/PDA Optical Measurements," 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, USA, 2007
4. Tropea, C., Xu, T. -H., Onofri, F., Gréhan, G., Haugen, P., and Stieglmeier, M., "Dual-mode Phase-Doppler Anemometer," Particle and Particle Systems Characterization, Vol. 13, No. 2, 1996, pp.165-170