

소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 분사압력 변이에 따른 미립화 특성

정 훈* · 김진석* · 김정수** · 박정***

Atomization Characteristics of Small LRE-Injector Spray According to Injection Pressure Variation

Hun Jung* · Jin Seok Kim* · Jeong Soo Kim** · Jeong Park***

ABSTRACT

Atomization characteristics of small LRE-injector spray are investigated by using dual-mode phase Doppler anemometry (DPDA). Velocity, size, number density, and volume flux were measured at various injection pressures along the radial distance to make a close inquiry into spatial distribution characteristic of spray droplets. As the injection pressure increases, the velocity, turbulence intensity, number density, and volume flux of spray droplets become higher, whereas the droplet size (D_{10} or D_{32}) gets smaller. Also, velocity and volume flux are proportional to Sauter mean diameter (SMD, D_{32}).

초 록

이중모드 위상도플러속도계(Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)를 이용하여 소형 액체 로켓엔진 인젝터 분무의 미립화 특성을 고찰하였다. 분무액적의 반경방향 이동에 따른 속도, 크기, 수 밀도, 부피플럭스 등을 다양한 분사압력에서 측정하여 인젝터 분무의 공간분포 특성을 규명한다. 분사 압력이 증가함에 따라 분무액적의 속도, 난류강도, 수밀도, 그리고 부피플럭스는 증가하지만, 산술평균 직경(D_{10})과 분무액적의 증발율에 대한 척도인 Sauter Mean Diameter(D_{32})로 표현되는 액적의 크기는 감소하였다. 또, 속도와 부피플럭스는 Sauter 평균직경(Sauter mean diameter, SMD)에 비례하는 것을 알 수 있었다.

Key Words: Dual-mode Phase Doppler Anemometry(이중모드 위상도플러속도계), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector(인젝터), Spray Droplet(분무액적), Atomization(미립화)

* 순천대학교 기계공학과 대학원
** 순천대학교 기계우주항공공학부
*** 부경대학교 기계공학부
연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

1. 서 론

단일액체추진제 로켓엔진은 간결한 시스템 구조, 저렴한 개발비, 플룸(plume)에 의한 낮은 오

염성 등의 장점으로 오랜 시스템 운용이 요구되는 우주비행체 추진 시스템의 속도/자세 (attitude) 제어에 활용되어 왔다. 로켓엔진의 성능은 액체연료의 연소특성에 크게 의존하므로 인젝터 분무에 의한 연소실내 연료 미립화 특성 및 공간분포에 대한 정확한 예측 및 평가시험은 연소실 설계를 포함한 엔진의 개발과정에서 필수단계이다[1].

본 연구에서는 소형 액체로켓엔진에 장착되는 인젝터의 분사압력 변이에 따른 분무 미립화 특성을 규명하기 위해 이중모드 위상도플러속도계 (Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)를 이용하여 분사압력 및 반경방향 변이에 따른 분무거동을 고찰한다.

2. 실험 장치

분무발생장치(injector로 도시)와 DPDA로 구성되는 실험장치를 Fig. 1에 보인다. DPDA는 Ar-Ion 레이저, 분광신호 발생기(transmitter), 송광부(transmitting probe), 확대렌즈(expander), 수광부(receiving probe), 신호검출기(detector unit), 신호처리기(flow & particle processor) 및 모터 제어부(steping motor controller)를 포함한 3차원 이송장치(3D traverse), 그리고 시스템의 제어와 모니터링(monitoring)을 위한 컴퓨터로 구성된다. DPDA는 Standard-PDA와 Planar-PDA를 결합하여 네 개의 레이저 빔 성분으로 2차원 속도성분을 측정하며, 입자의 궤적(trajecory)에 대한 모호성을 제거하여 액적 크기 측정에 대한 정확도를 높인 것이다[2]. 송/수광부의 초점거리(focal length)는 500/400 mm이고, 본 실험과 같이 수밀도가 높은 조건에서는 프린지(fringe)에 중속하는 측정부피를 줄이는 것이 계측에 유리하므로[1] 송광부에 확대비 1:1.98의 확대렌즈를 장착한다. 일반적으로 분무액적 측정에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 충분한 수의 데이터를 획득하여야 하며, 그 신뢰도를 95% 이상으로 높이기 위해 5,500개 이상의 데이터를 수집한다[1]. 본 실험에서는 각 측정지점에서 10초 동안 최대 10,000개의 데이터를 획득하여 평균을

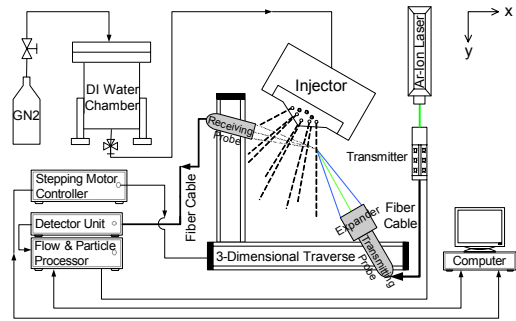


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Setup

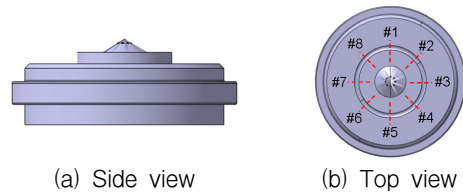


Fig. 2 Injector Configuration

취하였다. 3차원 이송장치를 이용하여 인젝터 출구면(face)으로부터 분무축방향으로 100 mm($y/d_0=656$) 지점에서 분사압력(1.72, 2.07, 2.76 MPa)과 반경방향 위치(0, $\pm 1(x/d_0=6.6)$, $\pm 2(x/d_0=13.1)$, ± 3 mm($x/d_0=19.7$))를 변화시켜 측정하였다.

실험에 사용된 인젝터는 5 뉴턴급 (Newton-class) 추력기에 장착되는 것으로 방전가공(Electrical Discharge Machining, EDM)으로 제작하였으며 그 형상을 Fig. 2에 보인다. 직경(d_0) 0.15 mm를 갖는 8개의 노즐 오리피스는 인젝터 중심축과 30°의 엇각(cant angle)을 이루고 있으며 실험시 편의를 위해 각각의 노즐 오리피스에 Fig. 2(b)와 같이 가상의 번호를 부여한다. 실제 단일 액체추진제 추력기의 연료로 사용되는 N_2H_4 (hydrazine)[3]는 독성, 폭발성 등의 위험요소로 인해 취급에 많은 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 N_2H_4 와 물성치가 매우 유사하고, 고압 실험환경에서의 정전기에 의한 미립화 액적의 이상거동을 방지하기 위하여 이온이 제거된 물 (Deionized Water, DIW)을 작동유체로 사용한다. DIW는 질소가스(GN_2)로 가압되며 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인젝터에서 분사된다.

3. 결과 및 고찰

8개의 인젝터 노즐 오리피스 가운데 #3 노즐 오리피스에서 분사된 분무액적의 속도, 크기 등을 DPDA로 측정하였다.

분무액적의 축방향 속도와 난류강도(TI)를 Fig. 3에 나타낸다. 오리피스 타입의 노즐인 경우 분무축($x/d_0=0$)을 중심으로 분무특성 매개변수(parameter)가 대칭으로 나타나는 것이 일반적이지만, 본 실험의 결과는 완전한 대칭특성을 보이지 않는다. 이는 본 실험에 사용된 인젝터의 노즐 오리피스가 EDM에 의해 제작되어 오리피스 단면이 완전한 원형을 이루지 않고, 오리피스 내부의 표면거칠기 등이 균일하지 않아 발생한 결과로 사료된다. 분무액적의 축방향 속도는 분무 중심에서 외곽으로 진행하면서 주변기체로의 운동량 손실로 인해 감소하고, 중심에서 분사압력

에 비례한다. 그러나, 분사압력에 따른 액적의 미립화 정도, 그리고 미립화 액적과 주변기체간의 운동량 교환 등에 종속하여 외곽으로 가면서 속도역전 현상이 관찰된다. TI 는 분사압력에 비례하여 증가하고 고압(2.76 MPa)에서는 분무의 중심에서 외곽으로 이동하면서 감소하며, 저압(1.72, 2.07 MPa)에서는 증가후 감소하는 현상이 관찰된다. 고압으로 분사된 분무는 저압보다 활발한 미립화로 인해 상대적으로 많은 섹동성분이 존재하기 때문에 분무의 중심에서 저압보다 큰 섹동성분이 존재하며, 외곽으로 이동하면서 미립화의 포화로 인해 균일한 크기/속도를 가진 분무가 지배적으로 존재하여 그 크기가 줄어든다. 반면, 저압으로 분사된 분무는 중심에서 외곽으로 이동하면서 여전히 미립화가 일어나 섹동성분이 증가하는 것이며, 미립화의 포화상태에 다다른(1.72 MPa: $x/d_0=20$ /2.07 MPa: $x/d_0=5$) 이

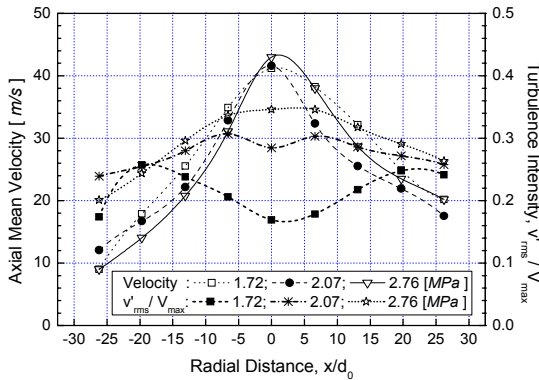


Fig. 3 Distributions of Axial Mean Velocity and Axial Turbulence Intensity

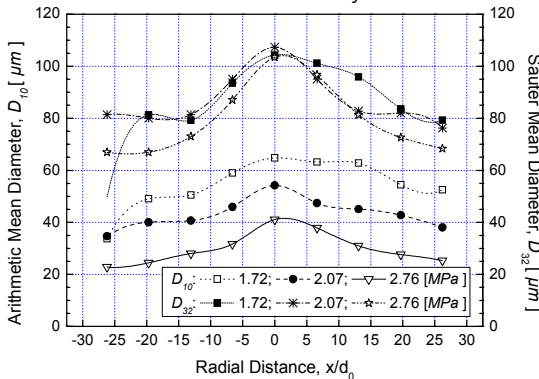


Fig. 4 Comparison of D_{10} and D_{32}

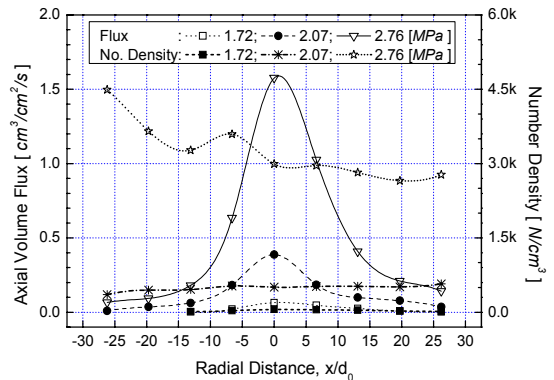


Fig. 5 Distributions of Axial Volume Flux and Number Density

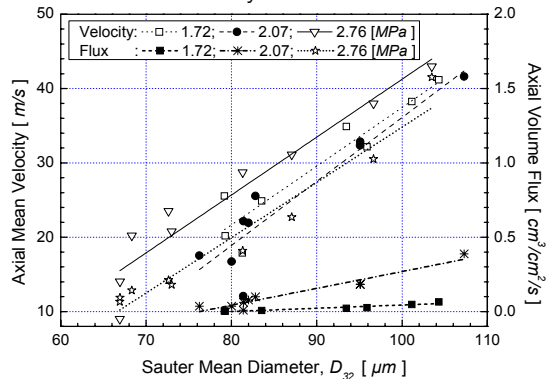


Fig. 6 Correlation between D_{32} and Axial Mean Velocity/Axial Volumetric Flux

후 그 크기가 감소한다.

산술평균직경(D_{10})과 분무액적의 증발율에 대한 척도[1]인 SMD(D_{32}) 변이를 Fig. 4에 도시하여, 분사압력/반경방향 이동거리에 따른 액적의 크기 변이 판단을 용이하게 하였다. 전술한 바와 같이 미립화 정도는 분사압력에 비례하므로 D_{10} 은 고압으로 분사된 분무가 저압의 그것보다 작게 나타나며, 중심에서 외곽으로 이동하면서 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 반면, D_{32} 는 반경방향 위치에 따른 특성은 D_{10} 과 같지만 분사압력 변이에 대한 경향은 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 미립화가 충분히 발달하지 못한 영역($x/d_0=0\sim\pm 15$)은 해당 공간 내에 불규칙한 크기/형상을 가지는 액적이 다수 존재하여 분사압력에 상관없이 그 크기가 크거나 비슷하게 나타나는 것이며, 그 이후 2.76 MPa은 저압의 분무들보다 일찍 미립화 포화상태에 이르러 그 크기가 줄어든 것이다. 이는 D_{32} 가 D_{10} 보다 액적의 크기에 민감하기 때문이다.

분무액적의 부피플럭스와 수밀도를 Fig. 5에 나타낸다. 부피플럭스는 고압에서 저압으로, 분무중심에서 외곽으로 가면서 감소하며, 수밀도는 저압보다 고압에서 그 수가 더 많고, 반경방향 거리에는 크게 영향을 받지 않는 것이 그림에서 관찰된다. 2.76 MPa에서 비대칭적 특성을 보이는 것은 전술한 바와 같이 EDM에 의한 오리피스 내부의 매끄럽지 못한 가공완성도 등에 의해 발생하는 현상이라고 사료된다. 분사압력이 1.72에서 2.07, 2.76 MPa로 증가할 때 수밀도는 약 10배, 50배 증가하지만 D_{32} (or D_{10})는 수밀도의 변이에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 미립화가 활발한 고압이 저압보다 큰 부피플럭스가 나타나는 것이다. 즉, 분무액적의 부피(크기) 감소보다 그 수의 증가가 부피플럭스 크기에 지배적으로 영향을 미치는 것이다.

Figure 6에 D_{32} 와 평균속도/부피플럭스의 상관관계를 도시한다. 평균속도와 부피플럭스는 D_{32} 에 비례하며, D_{32} 는 고압의 분무가 저압의 그것보다 넓은 범위에 걸쳐 분포한다. 고압에서 부피플럭스가 D_{32} 변이에 따라 현저히 증가하는 것은 저압에서보다 높은 수밀도를 갖기 때문이다.

4. 결 론

소형 단일액체로켓엔진 인젝터 분무의 분사압력 변이에 따른 미립화 특성 규명을 위해 DPDA를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 연구결과에 따른 주요특성을 다음과 같이 정리한다.

분무액적의 축방향 속도, TI , 수밀도, 부피플럭스는 분사압력에 비례하고, 분무중심에서 외곽으로 이동하면서 감소한다. 외곽으로 이동하면서 고압과 저압간의 속도역전 현상이 나타나며, TI 는 고압(2.76 MPa)에서 외곽으로 이동하면서 그 크기가 바로 감소하지만, 저압(1.72, 2.07 MPa)에서는 일정지점까지 증가한 후 감소한다. D_{10} 은 분사압력이 높을수록 그 크기가 감소하였으며, D_{32} 는 분무중심에서는 분사압에 따른 경향성이 불분명 하지만, 외곽으로 이동하면서 고압으로 분사된 분무가 저압의 분무보다 작아진다. 또한, 평균속도와 부피플럭스는 D_{32} 에 비례한다.

후 기

이 논문은 2008년도 교육과학기술부의 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

1. 정훈, 김정수, 김성초, 박정, "소형 액체로켓엔진 인젝터의 분무 분열특성에 대한 연료분사압력의 영향," 한국추진공학회지, 제11권, 제3호, 2007, pp.50-57
2. 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
3. Schmidt, E. W., Hydrazine and Its Derivatives, 2nd Ed., A John Wiley & Sons, Inc., 2001