

소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 연료분사압력 변이에 따른 액적의 공간분포 특성

정훈* · 김정수**

Spatial Distribution Characteristics of Small LRE-injector's Spray-droplet According to the Variation of Fuel-injection Pressure

Hun Jung* · Jeong Soo Kim**

ABSTRACT

Dual-mode Phase Doppler Anemometry (DPDA) was used to scrutinize the spatial distribution characteristics of spray emanating from a small Liquid-Rocket Engine (LRE) injector. Droplet size and velocity were measured according to the variation of injection pressure along the plane normal to the spray stream and then the spray characteristic parameters such as Arithmetic Mean Diameter (AMD), Sauter Mean Diameter (SMD), number density, span of drop size distribution, and volume flux were deduced for an investigation of spray breakup characteristics. As the injection pressure increases, the number density, span, and volume flux of spray droplets become higher, whereas the AMD gets smaller.

초 록

소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 공간분포 특성 규명을 위해 이중모드 위상도플러속도계(DPDA)를 이용한다. 분사압력 및 분무확산방향 이동거리를 변화시켜 분무액적의 크기, 속도 등을 측정하고, 산술평균직경(AMD), Sauter 평균직경(SMD), 수밀도, 스펠(span of drop size distribution), 그리고 체적 유속(volume flux) 등의 분무 매개변수를 도출하여 인젝터 분무의 분열특성을 고찰한다. 분사압력이 증가함에 따라 분무액적의 수밀도, 스펠, 그리고 체적 유속은 증가하지만, AMD는 감소하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector(인젝터), Spray Droplet(분무액적), Spatial Distribution(공간분포), Atomization(미립화), DPDA(이중모드 위상도플러속도계)

† 2008년 9월 11일 접수 ~ 2008년 10월 17일 심사완료

* 정회원, 순천대학교 기계공학과 대학원

** 종신회원, 순천대학교 기계우주항공공학부
연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

1. 서 론

단일액체추진제(liquid-monopropellant) 로켓엔

진은 높은 비추력(specific impulse), 용이한 추력 조절(throttling), 플룸(plume)/배기가스(smoke)에 의한 낮은 오염성, 추력실(thrust chamber)의 경량화, 장기간의 추진제 저장성 등의 장점으로 오랜 시스템 운용이 요구되는 우주비행체 추진 시스템의 속도, 자세(attitude) 제어 및 궤도(trajecory) 기동 등에 활용되어 왔다[1,2]. 액체 로켓엔진의 성능은 연료의 연소특성에 크게 의존한다. 또, 연소특성은 미립화 연료의 공간분포 특성에 지배적인 영향을 받으므로 인젝터 분무에 의한 연소실내 연료 미립화 및 공간분포 특성에 대한 평가시험은 연소실 설계를 포함한 엔진 개발과정에서 필수단계이다[1,3-5]. 또한, 이러한 핵심기술은 로켓 선진국으로부터의 기술이전이 어렵기 때문에 추진제 분사시스템에 대한 독자적인 설계기술보유는 추진기관 개발을 위하여 필연적으로 요구된다.

Ryan 등[3]은 충돌형 액체 제트(jet)의 미립화 특성을 제트의 속도 및 유동조건(충류/난류), 오리피스(orifice) 직경, 충돌각(impingement angle)에 따라 파악하였다. 전하주입소자(Charge Injection Device, CID) 카메라로 순간이미지를 획득하여 분열길이(breakup length)를 측정하고, 연소불안정(combustion instability) 현상을 유발할 수 있는 요소 중의 하나로 판단되는 표면파(surface wave)와 액사(liquid ligament) 분열에 대한 주기적 특성을 관찰하였다. 또, 위상도플러 입자분석기(Phase Doppler Particle Analyzer, PDPA)로 액적의 속도와 크기를 측정하여 이론(linear stability-based theory)에 의한 예측과 측정값이 서로 잘 맞는 것을 확인하였다.

Haenlein[4]은 제트의 분열(disintegration) 및 미립화 과정에 대한 규명을 위해 액체의 물리적 물성치가 제트의 분열에 미치는 영향을 액체 종류, 제트 직경, 그리고 속도를 변화시켜 수행하였다.

Heidmann 등[5,6]은 충돌형 인젝터 분무에 대한 불안정성을 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 제트의 불규칙성(irregularity) 및 액막(liquid sheet)과 공기의 상호작용으로 액막 표면에 파동

(ruffle)이 나타남을 관찰하고, 액막의 가장자리에서 생성되는 액사와 액적(drop)의 주기적 흘림현상(shedding phenomenon)에 대한 주파수를 측정하였다. 또, 오리피스 내부 유동에서의 공동현상(cavitation)에 의해 제트의 불규칙성이 나타날 수 있음을 시사하였다. 분사된 제트는 노즐 오리피스 출구 근처에서는 액체 덩어리 형태를 가지고 하류로 이동하면서 제트 표면에 파동이 형성된 후 액적이 생성되었으며, 제트 표면의 파동은 유체의 속도에 비례하고 점도(viscosity)에 반비례 하였다.

소형 액체로켓엔진 인젝터의 연료분사 압력이 분무분열 특성에 미치는 영향에 대한 연구에서 김진석 등[7]은, 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV) 계측으로 순간평면 이미지를 획득하여 분무거동(spray behavior)을 관찰하고, 이중모드 위상도플러속도계(Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)를 이용하여 액적의 속도, 크기 등과 같은 분열특성 매개변수(parameter)를 분무액적의 축방향 이동거리에 따라 정량적으로 측정하여 인젝터의 미립화 성능을 고찰하였다. 크게 두(2) 영역의 미립화 양식(primary/secondary breakup regime)으로 구분되는 인젝터 분무에 유동의 주기적 흘림현상이 존재함을 보이고, 분무액적의 초기속도는 분사압력에 비례하지만 액적이 하류로 진행하면서 분사압력에 종속하는 속도가 역전되는 현상이 나타남을 확인하였다[7].

본 연구에서는 선행연구[1,7]에 더하여, 소형 액체로켓엔진에 장착되는 인젝터의 분사압력 변이에 따른 분무확산방향 공간분포 특성을 규명한다. 분무액적의 속도, 크기, 수밀도, 스펠(span of drop size distribution, S), 체적 유속(volume flux) 등과 같은 분무 분열특성 매개변수를 고정된 분사축방향(주 유동방향) 위치에서 수평방향(분무확산방향) 이동거리를 변화시키며 DPDA를 이용하여 계측하고, 실험에 사용된 인젝터의 분무분열 거동을 고찰한다. 또, 분무액적의 Sauter 평균직경(SMD, D_{32})에 대한 AMD(Arithmetic Mean Diameter, D_{10}), 수밀도, 그리고 분사축방

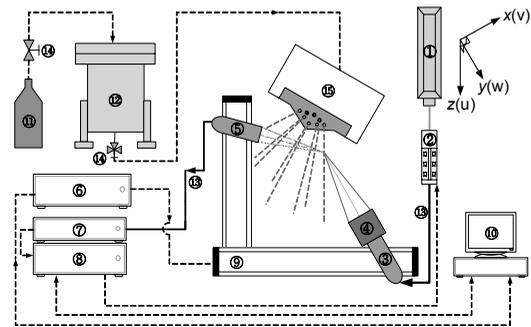
향 평균속도 및 체적 유속 등의 상관관계를 도출한다.

2. 실험장치 및 방법

인젝터로 간략하게 도시된 분무발생장치와 DPDA로 구성되는 실험장치를 Fig. 1에 보인다. 본 실험에 적용된 DPDA는 Standard-PDA와 Planar-PDA를 결합하여 네(4) 개의 레이저 빔 성분으로 2차원 속도성분을 측정하며, 입자의 궤적(trajectory)에 대한 모호성을 제거하여 액적 크기 측정에 대한 정확도를 높인 것이다[8,9]. 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(motor controller)를 포함한 3차원 이송장치(3-D traverse system), 그리고 컴퓨터로 구성된다. 송/수광부의 초점거리(focal length)는 500/400 mm이고, 본 실험과 같이 수밀도가 높은 조건에서는 프린지(fringe) 형상에 종속하는 측정부피(measurement volume)를 줄이는 것이 측정에 유리하므로[10] 송광부에 확대배 1:1.98의 확대렌즈를 장착한다. 측정부피를 줄임으로써 나타나는 정규빔 효과(Gaussian beam effect)에 의한 오차는 Dual-mode PDA로 극복할 수 있다[8,11].

분광신호 발생기에서 방사된 네(4) 개의 레이저 빔이 교차하여 Fig. 2와 같이 측정부피가 형성되며[9], 본 실험의 조건에서는 $\delta_x=0.12$, $\delta_y=1.55$, $\delta_z=0.12$ mm이다. 녹색($\lambda_{st}=514.5$ nm) 빔과 청색($\lambda_{pl}=488$ nm) 빔에 의해 형성되는 측정부피 내의 프린지 개수는 각각 35개이며, 송광부와 수광부의 엇각(scattering angle)인 φ 는 35° 이다.

분무액적의 직경 측정에 대한 신뢰도가 95% 이상이 되기 위해서는 약 5,500개 이상의 데이터를 수집해야 한다[12]. 이에 따라, 본 실험에서는 각 측정지점에서 최대 데이터 획득 개수와 시간을 10,000개와 10초로 각각 제한하였다. 3차원



①Ar-Ion laser ②Transmitter ③Transmitting probe
④Expander ⑤Receiving probe ⑥Motor controller
⑦Detector unit ⑧Flow & particle processor
⑨3-D traverse system ⑩Computer ⑪N₂
⑫DIW chamber ⑬Fiber cable ⑭Valve ⑮Injector

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

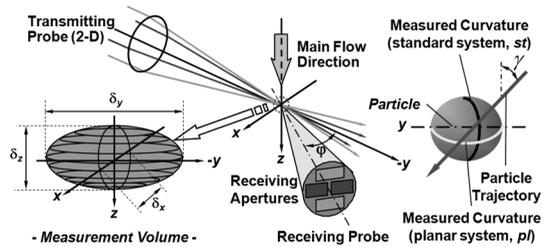


Fig. 2. Formation of measurement volume in DPDA

이송장치를 이용하여 인젝터 출구면(face)으로부터 분사축방향으로 100 mm($z/d_o=656$, d_o =orifice diameter)의 지점에서, 분사압력(1.72, 2.07, 2.76 MPa)과 분무확산방향 위치($x=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ mm, $x/d_o=0, \pm 6.6, \pm 13.1, \pm 19.7, \pm 26.2$ 에 각각 해당)를 변화시켜 측정하였으며, 분무확산방향 원점은 노즐 오리피스의 중심축(z)으로 정의하였다. 분사축방향 거리 100 mm는 분무분열이 적절히 이루어지고 있는 위치임에 반하여, 이보다 상류 혹은 노즐 출구 근처에서는 액주(liquid column) 혹은 액사가 지배적으로 존재하여[1,6] 분무액적 크기 측정에 대한 오류 도플러 신호가 발생할 수 있다.

실험에 사용된 인젝터는 5뉴턴급 소형 액체로켓엔진에 장착되는 것으로, 인젝터의 노즐 오리피스는 방전가공(Electrical Discharge Machining, EDM)으로 제작하였으며 그 모델형상을 Fig. 3에

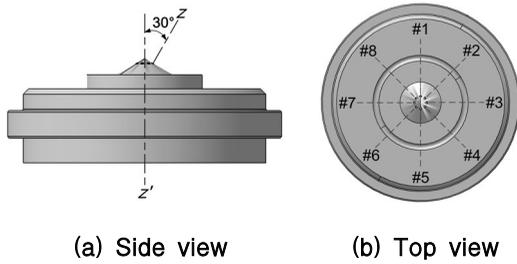


Fig. 3 Configuration of the injector employed in experiment

Table 1. Comparison of fluid properties between H_2O and N_2H_4

	Melting point [K]	Boiling point [K]	Density [g/ml]	Viscosity [cP]	Surface tension [N/m]
H_2O	273.2	373.2	1.00	0.89	72.0×10^{-3}
N_2H_4	274.0	386.7	1.01	0.90	66.7×10^{-3}

보이고 있다. 직경(d_o) 0.15 mm를 갖는 8개의 노즐 오리피스는 인젝터 중심축(z')과 30°의 엇각(cant angle)을 이루고 있으며, 실험시 편의를 위해 각각의 노즐 오리피스에 Fig. 3(b)와 같이 가상의 번호를 부여한다. 실제 단일액체추진제 로켓엔진의 연료로 사용되는 N_2H_4 (hydrazine)[13]는 독성, 폭발성 등의 위험요소로 인해 취급에 많은 제약이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 N_2H_4 와 물성치가 매우 유사(Table. 1)하고, 고압 실험환경에서의 정전기 등에 의한 미립화 액적의 이상거동을 방지할 수 있는 이온이 제거된 물(Deionized Water, DIW)을 작동유체로 사용한다. DIW는 질소가스(GN_2)로 가압되며 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인젝터에서 분사된다.

3. 실험결과 및 고찰

8개의 인젝터 노즐 오리피스 가운데 #3 노즐 오리피스에서 분사된 분무액적의 속도, 크기 등의 분무특성 원시변수가 DPDA로 측정된다. 일반적으로 오리피스 타입의 노즐은 분무축

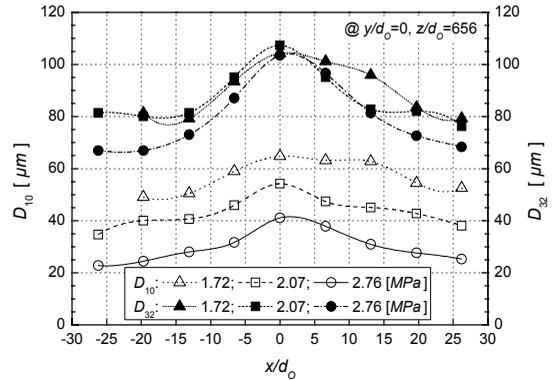


Fig. 4. Distribution of D_{10} and D_{32} along x/d_o at $y/d_o=0$ and $z/d_o=656$

(z -axis)을 중심으로 분무특성 매개변수가 유사 대칭성을 보이게 된다. 본 실험의 결과 또한 비슷한 양상을 보이고 있으며, 완전한 대칭특성을 보이지 않는 것은(Figs. 4-6 참조) 실험에 사용된 인젝터의 노즐 오리피스가 EDM으로 가공되어 오리피스 단면이 완전한 원형을 이루지 않고, 균일하지 않은 오리피스 내부의 표면거칠기(surface roughness), 오리피스 내부 유동에서 발생하는 공동현상(cavitation)[6] 등으로 인해 제트 혹은 분무의 대칭성이 깨져서 발생하는 결과이다.

일반적으로 산술평균직경(D_{10})은 길이(직경) 등에 대한 기초정보만을 제공하므로 분무액적의 증발율에 대한 척도[1]인 Sauter 평균직경(D_{32})을 Fig. 4에 함께 도시하여, 분사압력과 분무확산방향 위치에 따른 액적크기 변화에 대한 판단을 용이하게 하였다. D_{10} 과 D_{32} 는 다음의 Eqs. (1), (2)와 같이 정의된다.

$$D_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i \quad (1)$$

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2} \quad (2)$$

여기서, 하첨자 i 는 직경군(class) 분류인자, N 은

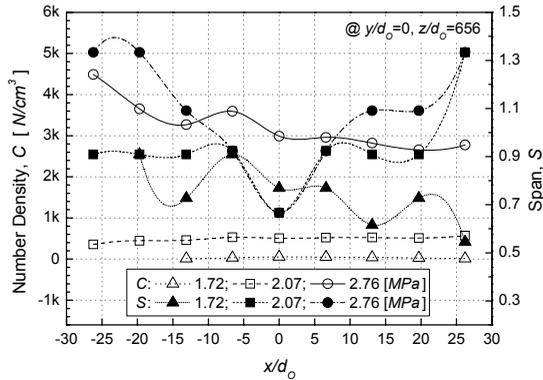


Fig. 5. Distribution of droplet number density and span

입자의 총개수, N_i 는 액적군의 수, n_i 는 i -class 액적의 개수, D_i 는 i -class 액적의 대표직경이다. 오리피스 노즐의 분무에서 미립화 정도는 일반적으로 분사압력에 비례한다. 그림에서 D_{10} 은 고압으로 분사된 경우 저압의 그것보다 확연히 작고, 중심에서 외곽으로 이동하면서 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 반면, D_{32} 의 경우, 외곽으로의 이동에 따른 분포는 D_{10} 과 유사하지만 분사압력 변이에 대한 경향은 다소 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 정의에 의하면, D_{32} 는 큰 액적의 직경군이 그 값에 직접적인 영향을 미치며[14] 증발 시상수(evaporation-time constant)를 통하여 액적의 증발과정을 지배한다. 저압(1.72 및 2.07 MPa)의 경우, 관심영역에서는 미립화가 충분히 덜 된 큰 크기의 액적이 다수 존재하여 분사압력에 대한 D_{32} 의 종속성이 적은 것으로 판단되며, 반면에 고압(2.76 MPa)에서는 외곽으로 이동하면서 저압의 분무들보다 일찍 미립화되어 그 크기가 현격히 줄어드는 사실이 관찰된다. 또, 분무중심 영역에서 외곽으로 이동하면서 감소하는 D_{32} 와 D_{10} 의 차이는 액적의 미립화와 액적의 균일화 과정에 대한 척도라 할 수 있다.

분사압력 및 수평방향 위치에 따른 수밀도와 분무액적 크기분포의 스패를 Fig. 5에 도시한다. 스패는 다음 식으로 표현된다.

$$S = \frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}} \quad (3)$$

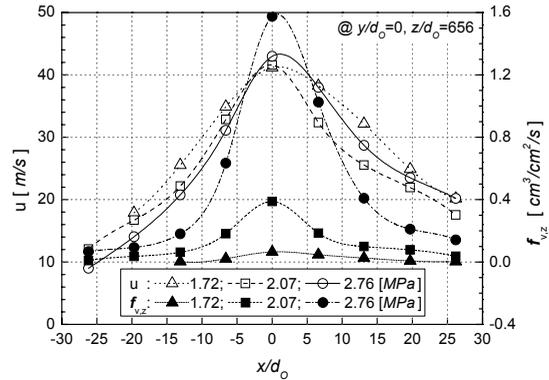


Fig. 6. Distribution of droplet vertical mean velocity and volume flux

여기서, $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$, $D_{V0.9}$ 는 측정된 액적의 총 부피 중 10, 50, 90%를 각각 점유하는 액적군의 최대직경들을 의미한다. 따라서 스패는 액적 크기의 분포폭(width of size distribution)에 대한 지표이다. 수밀도는 미립화가 활발한 고압에서 저압보다 높지만, 동일한 압력에서 중심축으로부터의 거리에는 크게 영향을 받지 않는데 이는 분무확산에 의한 수밀도의 저하와 미립화에 의한 증가가 서로 상쇄되기 때문이다. 2.76 MPa에서 수밀도가 비대칭적 특성을 보이는 것은 전술한바와 같이 EDM에 의한 오리피스 내부의 매끄럽지 못한 가공완성도와 미세한 기하학적 비대칭성이 저압보다는 고압의 분무에 상대적으로 큰 영향을 미쳐 오리피스 출구로부터 분무패턴의 대칭성이 깨지기 때문에 발생하는 결과이다. 스패는, 분사압력의 증대와 함께 증가하고, 고압(2.76 MPa)에서는 분사중심축으로부터 멀어질수록 커지는데 이는 활발한 분무분열로 인해 큰 액적과 미립화된 작은 액적이 공존하여 액적의 크기분포가 넓어지기 때문이다. 저압(1.72 MPa)으로 분사된 분무는 저조한 미립화로 인해 분무 확산방향 위치에 따라 불규칙한 성향 또한 그림에서 관찰된다.

분무액적의 분사축방향 평균속도(u)와 단위시간(s)당 단위면적(cm^2)을 통과하는 액적의 부피(cm^3)를 나타내는 체적 유속을 Fig. 6에 나타낸다. 분사축방향 체적 유속은 다음의 식으로 계산된다.

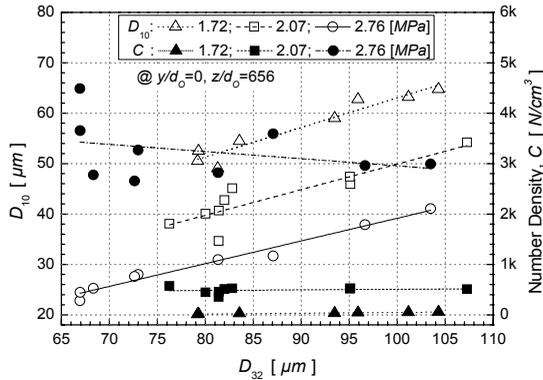


Fig. 7. Correlation between D_{32} and D_{10} /droplet number density

$$f_{v,z} = \frac{\pi}{6\Delta t} \sum_{i=1}^n \frac{D_i^3 \cos \gamma_i}{A_{z,D_i}} \quad (4)$$

여기서, $f_{v,z}$ 는 분사축방향 체적 유속, Δt 는 분무액적이 측정단면(송광부와 수광부에 의해 형성되는 측정부피가 $x-y$ 평면에 투영된 면적, A_z)을 통과하는 시간(transit time), γ_i 는 i -class 액적의 궤적과 측정단면이 이루는 엇각이다. 이때 $A_{z,D_i}/\cos \gamma_i$ 는 i -class 액적이 측정단면 A_z 를 통과하는 면적이 된다. 분사축방향 속도(u)는 액적 운동량의 확산(momentum diffusion)으로 인해 분무중심에서 외곽방향으로 그 크기가 감소한다 [15,16]. 또, 압력변이에 대한 축방향 속도변화가 그리 뚜렷하지 않은 이유는 분사압력이 높아지더라도 분무확산이 커져 분사축 수직방향으로의 속도성분(v , w) 증가율이 분사축방향의 속도 증가율을 압도하기 때문이다. 체적 유속은 압력이 높아짐에 따라 증가하며, 분무중심에서 외곽방향으로는 감소한다. 분사압력이 1.72 MPa에서 2.07, 2.76 MPa로 증가할 때, 수밀도는 수십배씩 증가(Fig. 5 참조)하지만 D_{32} (혹은 D_{10})의 감소율은 수밀도의 변화율에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에(Fig. 4 참조) 미립화가 활발한 고압이 저압보다 체적 유속이 크게 나타난다. 즉, 분무액적의 부피(혹은 크기) 감소보다 그 수의 증가가 체적 유속에 지배적인 영향을 미치는 것이다. 반면에 중심에서 외곽방향으로 감소하는 부피플럭스

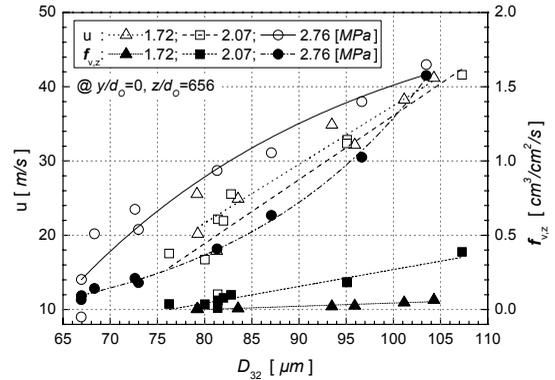


Fig. 8. Correlation between D_{32} and vertical mean velocity/volume flux

Table 2. Correlational equations of spray parameters as a function of D_{32}

Pressure	Equation
1.72 [MPa]	$D_{10} = 0.58 \times D_{32} + 4.4$
	$C = 1.6 \times D_{32} - 108$
	$u = 0.8 \times D_{32} - 41.5$
	$f_{v,z} = 0.002 \times D_{32} - 0.2$
2.07 [MPa]	$D_{10} = 0.51 \times D_{32} - 0.9$
	$C = 1.2 \times D_{32} + 386$
	$u = 0.9 \times D_{32} - 50.0$
	$f_{v,z} = 0.01 \times D_{32} - 0.9$
2.76 [MPa]	$D_{10} = 0.45 \times D_{32} - 5.9$
	$C = -14.2 \times D_{32} + 4373$
	$u = -361e^{-(D_{32}/30.2)} + 53.4$
	$f_{v,z} = 0.15e^{((D_{32}-50.3)/21.3)} - 0.2$

는 수밀도의 변이보다 분무액적의 크기에 종속하는 사실이 관찰된다.

Figures 7, 8에 D_{32} 에 대한 D_{10} 과 수밀도 그리고 분사축방향 평균속도와 체적 유속의 상관관계를 도시하고, 그 결과식(선형 혹은 지수 함수식)을 Table 2에 요약하며, 본 논문에 보인 분무 특성 매개변수는 압력에 따라 비선형적으로 변화하므로, 각각의 결과식은 데이터의 경향에 따라 최적화된 curve fitting 방법을 사용하여 도출한 값이다. D_{10} 은 D_{32} 에 선형적으로 종속하지만 압력의 증가에 따라 그 기울기가 다소 감소한다. 수밀도는 고압에서 D_{32} 에 반비례하며 저압에서

의 상관도는 매우 낮다. 축방향 속도와 체적 유속의 경우 저압에서는 D_{32} 와 선형적 상관도를 갖고, 고압에서는 지수함수로 표시되는 비선형성이 관찰되나 v , w 속도성분 및 분사축 수직방향으로의 체적 유속 성분이 배제된 상태에서 이상관도를 일반화시킬 수 없는 것으로 사료된다.

4. 결 론

소형 단일액체로켓엔진 인젝터 분무의 연료분사압력 및 분무확산방향으로의 이동에 따른 액적의 공간분포특성 규명을 위해 DPDA를 이용한 실험적 연구를 수행하였다.

실험에 사용된 인젝터 노즐 오리피스스의 형상, 가공완성도, 오리피스 내부의 공동현상 등에 기인하여 분무특성 매개변수는 분무축을 중심으로 완전한 대칭성을 갖지 않는다는 사실이 관찰되었다.

분무액적의 수밀도, 스팬, 분사축방향 체적 유속은 분사압력 변이에 비례하여 증가하였다. D_{10} 은 분사압력이 높을수록 그 크기가 작아졌으나, 분사축방향 속도와 D_{32} 는 분사압력에 대해 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다.

분무중심에서 외곽으로 이동함에 따라 D_{10} , D_{32} , 속도, 체적 유속은 감소하였지만, 수밀도와 스팬은 분사축 수직방향으로의 이동에 크게 영향을 받지 않았다.

D_{32} 의 함수로 표시되는 상관도 해석에서, D_{10} 은 D_{32} 에 선형적으로 종속하지만 압력의 증가에 따라 그 기울기가 다소 감소했으며, 수밀도의 경우, 고압에서 D_{32} 에 반비례하며 저압에서의 상관도는 매우 낮았다.

후 기

이 논문은 2007년도 순천대학교 공과대학학술재단 연구비에 의하여 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. Sutton, G. P., "Rocket Propulsion Elements," 7th Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, pp.241-267
3. Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S., and Santoro, R. J., "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 1, 1995, pp.135-145
4. Haenlein, A., "Disintegration of a Liquid Jet," NACA TM 659, 1932
5. Heidmann, M. F., Priem, R. J., and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets," NACA TN 3835, 1957
6. Heidmann, M. F. and Humphrey, J. C., "Fluctuations in a Spray Formed by Two Impinging Jets," NACA TN 2349, 1951
7. 김진석, 김정수, 김성초, 박정, "액체추진제 추력기의 인젝터 분무 거동에 대한 실험적 연구," 한국항공우주학회지, 제35권, 제9호, 2007, pp.799-804
8. 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
9. Albrecht, H. -E., Borys, M., Damaschke, N., and Tropea, C., "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques," Springer, Berlin, 2003, pp.167-490
10. Edwards, C. F. and Marx, K. D., "Analysis of the Ideal Phase-Doppler System: Limitations Imposed by the Single-Particle

- Constraint," *Atomization and Sprays*, Vol. 2, No. 3, 1992, pp.319-366
11. Zhang, Zh. and Ziada, S., "PDA Measurements of Droplet Size and Mass Flux in the Three-Dimensional Atomisation Region of Water Jet in Air Cross-Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 28, No. 1, 2000, pp.29-35
 12. Lefebvre, A. H., "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corp., New York, 1989, pp.367-409
 13. Schmidt, E. W., "Hydrazine and Its Derivatives: Preparation, Properties, Applications," 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001
 14. McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., "Interlaboratory comparison of Phase Doppler Measurements in a Research Simplex Atomizer Spray," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 10, No. 3, 1994, pp.402-409
 15. 정훈, 김진석, 김정수, 박정, "소형 액체로켓 엔진 인젝터 분무의 분사압력 변이에 따른 미립화 특성," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2008, pp.125-128
 16. 김진석, 정훈, 김정수, 김성초, "준 3차원 공간분포 계측에 의한 액체 추력기 인젝터의 분무거동 해석," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2008, pp.141-144