

준 3차원 공간분포 계측에 의한 액체 추력기 인젝터의 분무거동 해석

김진석* · 정 훈* · 김정수** · 김성초**

An Analysis on Spray Behavior of Liquid-thruster Injector through Pseudo-3D Distribution Measurement

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

ABSTRACT

Atomization characteristics and spatial distribution of the spray emanating from an injector of liquid-propellant thruster are investigated by using dual-mode phase Doppler anemometry (DPDA). Spray characteristic parameters such as the mean velocity, Sauter mean diameter (SMD), and velocity fluctuation are measured at various locations along the spray axis as well as on the radial direction. Those data are quantified in radial profile and also used to scrutinize the correlation between diameter and turbulence intensity of spray droplets. For the better visual grasp, dynamic behavior of spray droplets along the spray stream is presented through the velocity vectors projected on the plane of geometric axis of nozzle orifice and radial coordinate.

초 록

액체추진제 추력기 인젝터로부터 발생하는 분무의 미립화 특성과 공간 분포를 파악하기 위해 이중모드 위상도플러속도계(DPDA)를 사용한다. 평균속도, Sauter 평균직경, 그리고 속도섭동과 같은 분무특성 인자들을 다양한 분무축 및 반경방향 위치에서 계측한다. 이러한 데이터를 반경축상에 정량화하고 직경과 난류강도와의 상관관계를 밝히는데 사용한다. 분무 동적거동의 가시적 이해를 돕기 위해, 노즐 오리피스의 기하학적 축과 반경방향에 이르는 좌표에 분무입자들의 속도벡터를 도식화한다.

Key Words: Liquid-thruster(액체추력기), Injector(인젝터), Spray Behavior(분무거동), Dual-mode Phase Doppler Anemometry(이중모드 위상도플러속도계), Disintegration(분열)

1. 서 론

액체추진제 연소기내에서 분사되는 연료의 분무 거동에 대한 명확한 이해는 새로운 액체로켓 엔진의 설계인자 도출을 가능하게 한다. 인젝터 미립화 특성은 추력기 시스템의 심각한 고장을 초래하는 불안정성과 밀접한 관계가 있다. 따라

* 순천대학교 기계공학과 대학원

** 순천대학교 기계우주항공공학부

연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

서, 분무 분열거동을 연구하고 인젝터 최적 설계 조건을 찾는 것은 액체로켓엔진 개발에서 고려해야 할 우선과제 중의 하나이다.

본 연구팀은 단일액체추진제 추력기 인젝터로부터 발생하는 분무의 분사압력 및 축방향 변이에 따른 분무특성 뿐만 아니라 노즐가공오차에 의한 분열변화에 대해 가시화하고 정량적으로 계측한 바 있다[1]. 이에 대한 후속 연구로, 분무의 준 3차원 공간분포특성을 고찰하기 위해 이중모드 위상도플러속도계(Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)를 이용하여 분무 입자의 속도, 난류강도(turbulence intensity), 그리고 Sauter 평균직경(Sauter mean diameter, SMD)을 반경 및 축방향의 다양한 위치에서 계측한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 인젝터는 중심축으로부터 30°의 경사각(cant angle)을 갖는 8개의 노즐 오리피스로 구성되도록 방전가공(electrical discharge machining, EDM)에 의해 제작되었으며, 그 형상은 Fig. 1과 같다. 각 노즐 오리피스의 직경(d_o)은 0.152 mm이다.

실제 액체추력기의 연료로 사용되는 하이드라진(N_2H_4)은 독성 및 폭발성 등의 위험요소로 인해 실험실 단위의 연구에서 취급하기에 많은 제약이 따른다. 따라서 이와 물성치가 유사한 이온이 제거된 물(deionized water, DIW)을 사용하였으며 Table. 1에 그 특성을 비교하였다. 질소가스(gaseous nitrogen, GN_2)에 의해 압력챔버에서 가압된 DIW는 분무발생장치의 각종 밸브 및 필터를 거쳐 최종적으로 인젝터에서 분사된다.



Fig. 1 Configuration of the Injector used in the Experiment

Table 1. Physical Properties of 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	387.0	1.01	0.90	66.7×10^{-3}

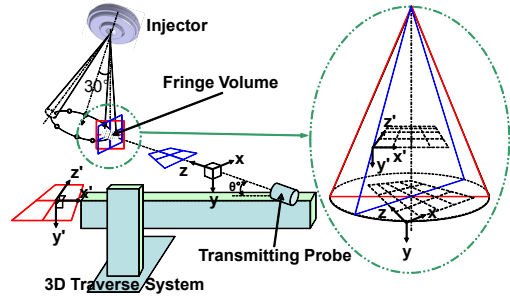


Fig. 2 Schematic Diagram of Data Acquisition for DPDA

27.6 bar의 분사압력에서 발생하는 8개의 분무 중 하나를 지면에 수직으로 분사되도록 고정하였다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 반경, 분무축, 깊이 방향을 각각 x , y , z 라 할 때, 분무축 방향을 따라 노즐 오리피스 출구로부터 200 mm 까지 50 mm 간격($\Delta y/d_o=328$)의 네(4) 위치에서 유동방향(streamwise) 좌표(x - z) 이동을 통해 DPDA 계측을 수행한다. 이때, 유동방향 계측 범위는 분무축을 중심으로 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ($x = \pm 3 \text{ mm}$, $z = \pm 3 \text{ mm}$)의 영역이며, $(x, z) = (0, 0)$ 인 위치로부터 시계방향 나선을 그리며 1 mm씩 이동한다. 측정블럼(fringe volume)을 트랜스미팅 프루브(transmitting probe)에 의해 형성되는 좌표(x , y , z)상에 위치시키기 위해 3차원 이송장치에 새로운 좌표(x' , y' , z')를 적용한다. 측정된 분무액적 직경의 신뢰도를 높이기 위해 10초동안 최대 10,000 개의 분무입자 데이터를 획득 하였다[2].

3. 실험 결과 및 고찰

8개의 노즐 오리피스중 미립화가 활발한 하나의 노즐 오리피스를 선정하여 분무축(y) 및 유동방향(x - z)을 따라 DPDA 계측을 수행한 후 분무 미립화 특성에 대해 정량적으로 고찰한다.

분무의 깊이방향 중심($z/d_o=0$)에서 반경방향

(x) 및 분무축방향(y) 변이에 따른 분무 입자의 축방향 평균속도를 Fig. 3에 나타낸다. 모든 분무축방향 위치에서 가장 높은 속도분포는 반경방향 중심($x/d_0=0$) 근처에서 관찰된다. 상류($y/d_0=328$)의 중심($x/d_0=0$)에서 50.3 % 속도인 분무입자가 하류($y/d_0=1312$)로 이동하는 동안 주변 공기와의 운동량 교환으로 인해 24.3 % 까지 감소한다. 이때, 상류에서는 분무중심과 외곽에서의 속도차이가 현저한 반면, 하류에서는 그 차이가 작다.

SMD 분포를 Fig. 4에 도식화하였다. 반경방향 중심 근처에서의 SMD는 축방향의 하류로 이동할수록 주변기체와의 상호작용에 의한 분무미립화로 인해 감소하는 경향이 관찰된다. 그러나, 상류($y/d_0=328$) 중심($x/d_0=0$)에서 측정된 SMD 값은 그와 같은 경향에서 벗어나고 있는데, 이는 분무의 미립화가 충분히 발생하기 이전의 액체 덩어리(ligament)나 찌그러진 형상의 분무 입자에 기인하는 오류 도플러 신호에 의한 결과로 판단된다[1]. 분무의 외곽에서는 하류로 이동할수록 오히려 그 크기가 증가하는 것처럼 관찰되

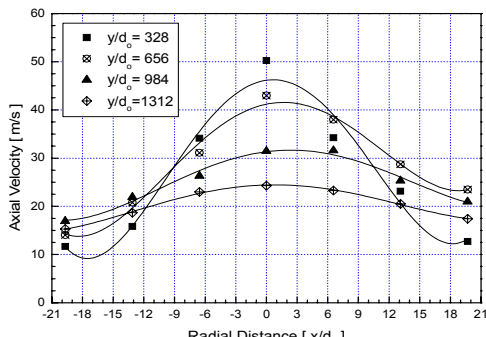


Fig. 3 Axial Velocity Distribution

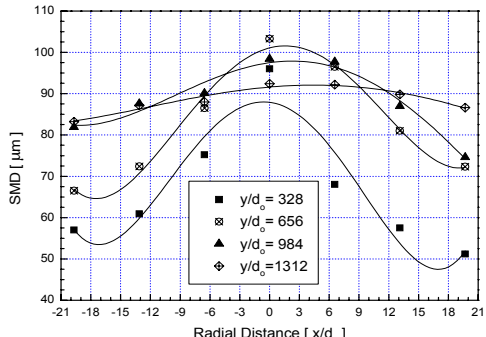


Fig. 4 SMD Distribution

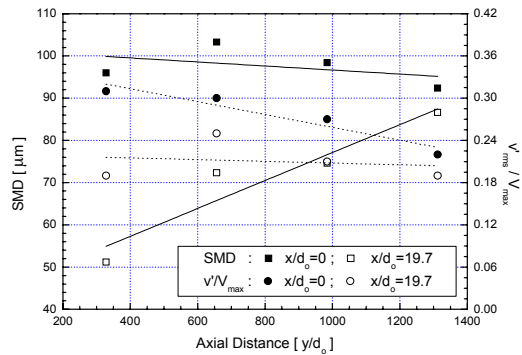


Fig. 5 SMD and Turbulence Intensity according to Axial Distance Variation

고 있다. 이는 큰 액적들과 좁은 폭을 갖는 상류의 분무가 하류로의 이동과 함께 확산(diffusion) 및 분산(dispersion)에 의해 분무폭이 증가하면서 중심축 근처에 있는 상대적으로 큰 입자들이 중심축 외곽으로 이동하기 때문이다. 하류로 갈수록 입자크기의 반경방향 분포가 균일해지는 경향 또한 중심축 근처에 있는 액적의 미립화와 이들 액적의 외곽으로의 이동에 의한 동시적 결과이다.

분무축방향 변이에 따른 SMD와 난류강도 분포를 Fig. 5에 보인다. 노즐 오리피스 출구에서 하류로 지속되는 분무 중심($x/d_0=0$)에서 SMD와 난류강도는 모두 감소하고 외곽에서의 값들보다 크지만, 전술한 바와 같은 이유에 의해 외곽에서의 SMD는 확연히 증가하는 것처럼 보인다. 또, 하류로 이동하면서 미립화된 분무 중심부 영역의 액적들은 주변기체에 의한 소산작용(dissipation)으로 인하여 난류강도가 감소하게 된다.

다양한 분무축방향 및 반경방향 위치에서 측정분포를 지나는 분무입자들의 노즐 오리피스 중심축(y)에 대한 순간 각도 변이를 Fig. 6에 보인다. 각 그림의 분무입자 순간 정보는 초기 데이터 획득으로부터 100 ms 동안 측정된 것이다. 따라서 획득된 순간 데이터의 개수는 각 위치에서의 데이터 획득률(data rate)을 의미하며, 이를 Table. 2에 제시한다. 상류의 중심(Fig. 6 (a))에서 1 kHz 이상의 높은 데이터 획득률을 보였으며 분무축에 평행한 0° 근처에서 활발한 각도변이

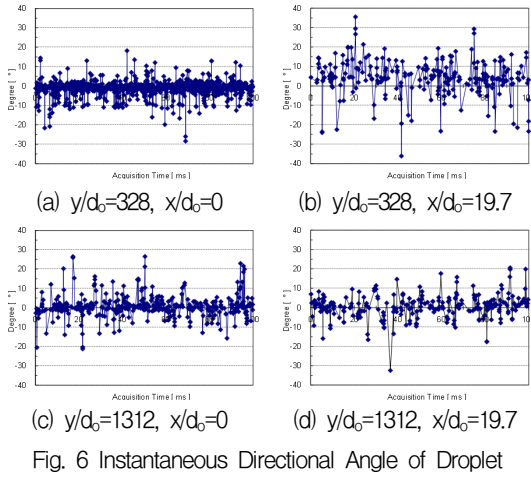


Fig. 6 Instantaneous Directional Angle of Droplet

Table 2. Number of Data Acquired within 100 ms

	$x/d_0=0$	$x/d_0=19.7$
$y/d_0=328$	1051 ea	250 ea
$y/d_0=1312$	392 ea	261 ea

가 있음을 보인다. 분무 하류나 외곽으로 진행함에 따라 데이터 획득율은 전체적으로 감소하였다. 상류 외곽(Fig. 6 (b))의 경우, 순간 각도 변이 폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 평균값이 양의 방향으로 다소 치우침으로써 우측 외곽으로 확산되는 분무의 거시적 양태를 입증한다. 그러나, 이러한 치우침이 하류 외곽(Fig. 6 (d))에서 뚜렷이 관찰되지 않는 이유는 동일한 반경방향의 위치(x)라 하더라도 분무축에서 벗어나는 각은 상류보다 작기 때문이다.

노즐 오리피스로부터 분사되는 분무입자들의 평균 속도 및 SMD를 3차원 공간에 Fig. 7과 같

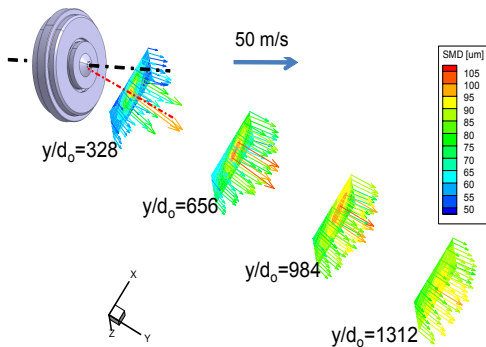


Fig. 7 Dynamic Behavior and SMD Variation of Droplets along the Injector-spray Stream

이 가시화한다. 노즐 출구에 근접한 $y/d_0=328$ 위치에서는, 중심축과 외곽에서 큰 속도 차이를 보이나 하류에서는 상대적으로 균일한 속도 분포가 관찰된다. 또한 상류에서 좁게 분포하던 높은 SMD가 하류로 이동함에 따라 점차 넓은 영역으로 확대되는데 이는 분무입자들의 미립화와 분무확산 거동을 대변하는 것이다.

4. 결 론

단일액체추진제 추력기 인젝터로부터 발생하는 분무 거동을 해석하기 위해 이중모드 위상도플러 속도계(DPDA)를 이용하여 측정하고 준 3차원적 분무 특성을 조사하였다.

분무축(y)을 중심으로 분무 특성 인자들의 반경방향 분포를 관찰하였으며, 분무입자가 노즐 오리피스로부터 하류로 이동함에 따라 속도와 직경이 감소하는 동시에 난류강도도 감소함을 관찰할 수 있었다. 분무액적의 확산에 따른 분무 폭의 증가 및 동력학적 거동을 준3차원 공간에서 가시화하여 관찰하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 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, 2007, FEDSM2007-37105
- Yeshayahou, L. Valery, S., Valery, N., and Yuri, N., "Modified Vaporizer for Improved Ignition in Small Jet Engine," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 828~834