

직접분사방식 추력기 노즐오리피스로부터 발생하는 분무입자의 발달특성

김진석* · 정 훈* · 김정수** · 박 정** · 김성초***

Evolutionary Feature of Spray Droplets Exiting from a Direct-Injection Type Thruster Nozzle-Orifice

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

ABSTRACT

Spray characteristic parameters such as droplet mean velocity, diameter, and volume flux are measured at various locations of spray in order to investigate the evolutionary feature of droplets exiting from a direct-injection type thruster nozzle-orifice. The experimental results indicate that the large droplets with high velocity at the center of upstream are broken-up into smaller droplets with low velocity due to their continuous momentum loss to surrounding air along with spray evolution toward downstream. Also it is found that the high volume flux expands its distribution in radial direction as a results of spray spreading and dispersion.

초 록

직접분사방식 추력기 노즐오리피스로부터 분사되는 분무입자의 발달특성을 연구하기 위해 분무의 다양한 위치에서 평균속도, 직경, 그리고 부피유속과 같은 분무특성인자들을 측정한다. 실험 결과로부터, 고속의 큰 직경을 갖는 분무 입자들이 주변 공기로의 운동량 손실로 인해 하류로 이동함에 따라 저속의 작은 입자로 분열한다. 또, 분무 확산 및 분산에 의해 높은 부피유속의 영역이 반경방향으로 넓게 확장된다.

Key Words: Liquid-thruster(액체추력기), Injector(인젝터), Dual-mode Phase Doppler Anemometry (이중모드 위상도플러속도계), Spray Spreading(분무확산)

1. 서 론

액체추진제 추력기는 최소추력 발생능력 및 추진제의 오랜 저장성 등의 장점으로 인해, 장기간의 시스템 운용이 요구되는 인공위성의 속도 및 자세제어에 활용된다. 연소실내에서 인젝터에 의해 발생하는 연료 미립화(atomization) 특성에 대한 정확한 예측은 추력기 설계 및 개발과정에

* 순천대학교 기계공학과 대학원

** 부경대학교 기계공학부

*** 순천대학교 기계우주항공공학부

연락처, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

서 필수 단계이다. 또, 이러한 추진기관 개발을 위한 핵심기술은 로켓 선진국으로부터의 기술이전이 어렵기 때문에 추진제 분사시스템에 대한 독자적인 설계기술 확보가 요구된다.

본 연구에서는 이중모드 위상도플러속도계 (Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)를 이용하여 직접분사방식 노즐오리피스로부터 분사되는 분무의 특성인자들을 3차원 공간에서 계측하고 그 결과를 통해 분무분열 및 확산거동의 거시적 양태를 고찰한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 인젝터는 Fig. 1과 같이 중심축으로부터 30°의 경사각(canted angle)을 갖는 8개의 노즐오리피스로 구성된다. 각 노즐오리피스는 방전가공(Electrical Discharge Machining, EDM)에 의해 제작되었으며, 길이-직경비가 1.67이다(L=0.254 mm, d=0.152 mm).

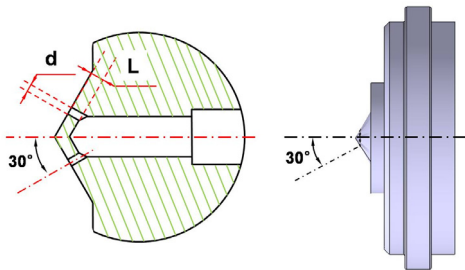


Fig. 1 Configuration of the Injector employed in Experiment

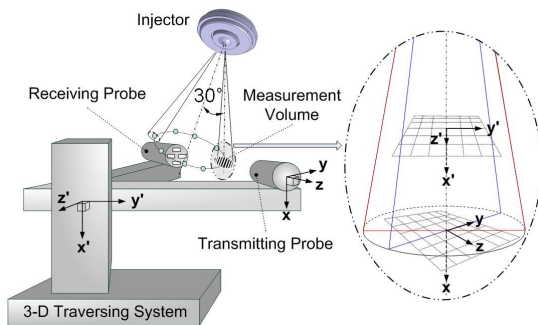


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Setup

DPDA 계측장치와 인젝터(Injector)로 간략하게 표현된 실험 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 질소가스(Gaseous Nitrogen, GN2)에 의해 압력챔버(pressure chamber)에서 가압된 이온이 제거된 물(Deionized Water, DIW)은 분무발생장치 내의 각종 밸브 및 필터를 거쳐 인젝터 노즐오리피스로부터 분사된다. 실제 액체추진제 추력기의 연료로 사용되는 하이드라진(N₂H₄)은 독성 및 폭발 등의 위험요소가 따르기 때문에 이와 물성치가 유사한 DIW를 작동유체로 사용한다 [1]. 27.6 bar의 분사압력에서 발생하는 8개의 분무중 하나를 지면에 수직으로 분사되도록 고정하여 계측을 수행한다. 노즐오리피스 출구면 중심의 수직, 수평, 깊이 방향을 각각 x, y, z라 할 때, 측정부피(measurement volume)는 수직 방향(노즐 오리피스의 기하학적 중심축, x)을 따라 오리피스 출구로부터 50 mm 간격($\Delta x/d=328$)으로 200 mm까지 이동한다. 또, (y,z) = (0,0)을 중심으로 10×10 mm² (y=±5 mm, z=±5 mm)의 범위에서 측정부피를 반경방향으로 1 mm($\Delta y/d=\Delta z/d=6.56$)씩 이동시킴으로써 3차원 공간에서의 DPDA 계측이 완성된다. 측정부피를 트랜스미팅 프루브(transmitting probe)에 의해 형성되는 좌표(x, y, z)상에 위치시키기 위해 Eq. 1의 좌표변환식을 이용하여 3차원 이송장치(3-D traversing system)에 새로운 좌표(x', y', z')를 적용한다.

$$\begin{bmatrix} y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

각 측정 위치에서 10초 동안 최대 10,000 개의 분무입자를 획득하여 계측에 대한 신뢰도를 확보하였다. 본 실험에서, 분무액적의 직경과 같은 스칼라량(scalar quantity)은 3차원 공간분포 정보의 획득이 가능하나(spatially 3-dimensional), 속도 및 부피플럭스와 같은 벡터량(vector quantity)의 경우 2D-PDA의 사용으로 인한 기능상의 한계로 깊이(z)방향 성분의 계측이 불가능하므로(vectorially 2-dimensional) 준 3차원(pseudo-3D) 공간분포 계측이라 칭할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

노즐오리피스로부터 분사되는 분무입자들의 수직/수평방향 속도벡터 합($\vec{u} + \vec{v}$)과 등SMD 표면(iso-surface of Sauter Mean Diameter)을 Fig. 3에 도시한 바와 같이 3차원 공간에 나타내었으며, x축을 3/10로 축소시켰다. $x/d=328$ 위치에서 중심과 외곽간의 분무입자 속도 차이가 하류의 그것 보다 큰 이유는 노즐 출구 근처에 큰 운동량을 갖는 분무입자들에 존재하기 때문이다. 상류/중심에서 높은 속도의 분무입자가 하류로 이동하는 동안 주변 공기와의 운동량 교환으로 인해 감소된다. 따라서, 분무 미립화에 의해 상류에서 하류로 이동함에 따라 분무입자들의 평균속도 및 직경이 감소하여 먼 하류에서는 반경방향(y-z plane)의 균일한 분포를 보인다. 또, 90 μm 의 SMD 값을 갖는 등표면이 상류에서 하류로 이동할수록 그 영역이 반경방향으로 확장되는 것이 그림에서 뚜렷이 관찰되는데, 이는 큰 액적들과 좁은 폭을 갖는 상류의 분무가 확산(spreading) 및 분산(dispersion)에 의해 분무폭이 증가하면서 중심축 근처에 있는 상대적으로 큰 입자들이 외곽으로 이동한 결과이다.

분무 깊이방향의 다양한 위치에서 측정된 SMD

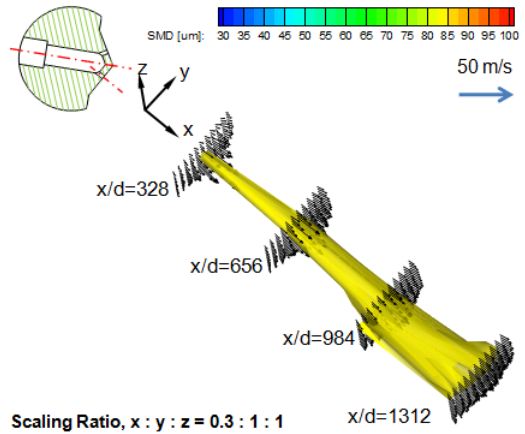


Fig. 3 2-D Velocity Vectors of Droplets ($\vec{u} + \vec{v}$) along with Iso-surface of SMD for 90 μm

와 수직 방향 4위치($x/d=328, 656, 984, 1312$)에서의 분무입자 산술평균직경분포(Arithmetic Mean Diameter, AMD)를 Fig. 4에 도시한다. 분무액적의 표면적(cm^2)에 대한 체적(cm^3)비의 함수인 SMD는 액적의 증발율에 대한 척도로서 열전달과 질량전달에 관계한다. 분무액적이 수평방향 중심의 상류에서 하류로 이동할수록 분무분열에 의해 SMD가 감소한다. 또, 깊이 방향 중심면에

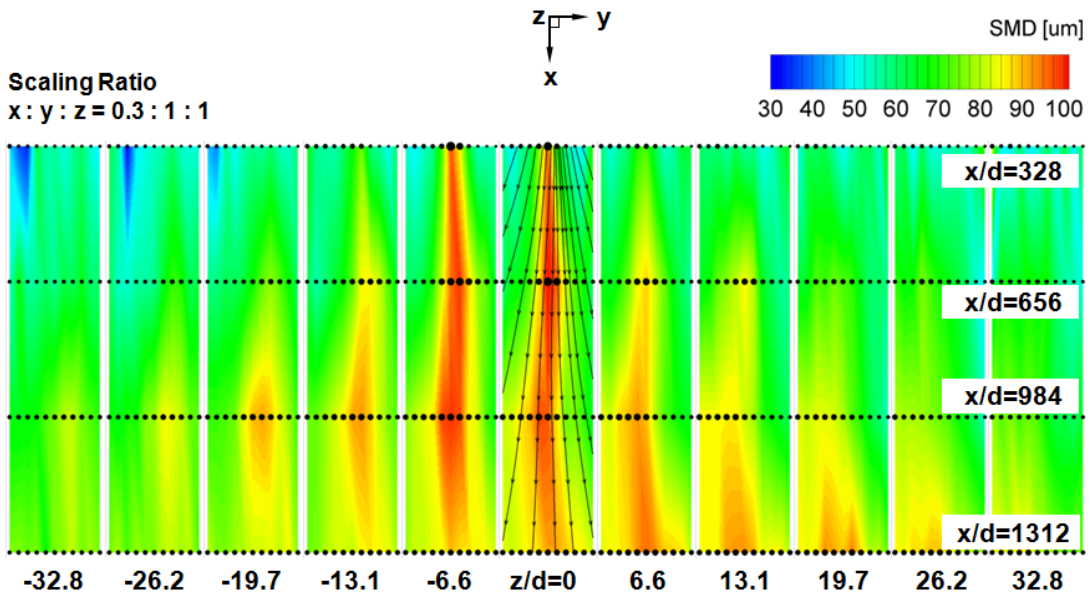


Fig. 4 Sectional View of SMD with Streamline at the Center of Depth Direction

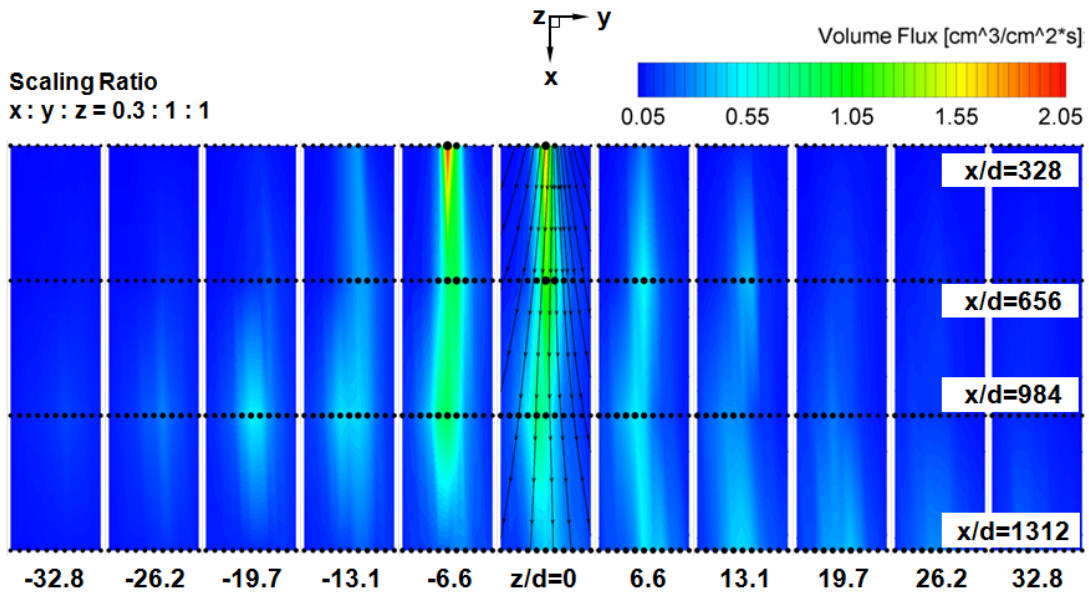


Fig. 5 Sectional View of Volume Flux with Streamline at the Center of Depth Direction

서의 유선(streamline) 분포를 통해 큰 직경의 분무입자가 분열에 의해 반경방향의 외곽으로 확산되어 가는 것을 확인 할 수 있다.

단위시간(sec.)동안 반경방향(y-z plane)의 단위면적(cm^2)을 지나는 분무액적 부피(cm^3)로 정의되는 부피유속(volume flux)의 공간분포를 Fig. 5에 보인다. 부피유속은 분무확산과 액적의 미립화에 의해 상류/중심에서 하류/외곽으로 진행할수록 감소하는 경향이 확연히 관찰된다. $z/d=-6.6$ 평면의 중심이 $z/d=0$ 평면의 중심보다 더 높은 부피유속을 나타내는 이유는, 노즐벽면에 대한 유동 유입각의 차이, 가공에 기인하는 노즐 형상의 비대칭성, 그리고 노즐내부의 표면 거칠기 등과 같은 교란 요인에 의해 야기된 분무의 비대칭성 때문인 것으로 판단된다[2].

4. 결 론

액체추진제 추력기 인젝터로부터 발생하는 분무의 분열 및 확산거동을 고찰하기 위해 수직 및 수평방향 속도(u,v), 산술평균직경(AMD), Sauter 평균직경(SMD), 그리고 부피유속 등의

분무특성 인자들을 이중모드 위상도플러속도계(DPDA)를 사용하여 계측하고, 분무액적의 미립화에 따른 분무폭 증가 거동을 3차원 공간에 도시하여 고찰하였다.

본 연구를 통한 분무 특성 인자들의 공간분포 특성 파악은 인젝터 성능 향상과 설계에 대한 이론적 기반을 제공할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- Schmidt, E. W., Hydrazine and Its Derivatives: Preparation, Properties, Applications, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2001
- 김진석, 김정수, "준 3차원 공간분포 계측에 의한 액체추력기 인젝터 연료분무의 분열 및 확산 거동에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2007, pp.9-17