

이중모드 위상도플러 속도계측기법에 의한 소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 가시화

정훈* · 김정수† · 배대석** · 권오봉**

A Visualization of the Spray from Small Liquid-rocket Engine Injector by Dual-mode Phase Doppler Anemometry

Hun Jung, Jeong Soo Kim, Dae Seok Bae, and Oh Boong Kwon

Abstract. A focus is given to the breakup behavior of spray droplets issuing from a nonimpinging-type injector. The analysis has been carried out experimentally by means of the dual-mode phase Doppler anemometry (DPDA). Spray characteristic parameters in terms of axial velocity, mean diameter, velocity fluctuation, and span (width of the size distribution) of droplets are measured down the geometric axis of a nozzle orifice and on the plane normal to the spray stream with the injection pressure variations. As the injection pressure increases, the velocity and its fluctuation become higher, whereas the droplet sizes get smaller. It is also shown that the magnitudes of those parameters are smoothed out by dispersion when the droplets move downstream as well as outwardly. The atomization process is significantly influenced by the injection pressure rather than the traveling distance in the experimental condition presented.

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

기호설명

D_{10} : arithmetic mean diameter (AMD)
 D_{32} : Sauter mean diameter (SMD)
 D_i : diameter of the size class i
 $D_{V(x)}$: diameters below which (x)% of the total volume
 d_o : orifice diameter
 l : orifice length
 N : total number of droplets
 ND : non-dimensional
 N_i : number of size classes
 n_i : number of droplets in each size class
 P_{inj} : injection pressure

$Span$: width of size distribution
 u : axial mean velocity
 u_{rms} : axial velocity fluctuation
 x, y, z : cartesian coordinates

1. 서 론

하이드라진(hydrazine, N_2H_4)을 단일추진제로 사용하는 소형 액체로켓엔진(liquid rocket engine)은 인공위성 등과 같은 우주비행체의 속도, 자세(attitude) 제어 측면에 있어 많은 장점을 제공한다⁽¹⁾. 이 로켓엔진의 구조적 형상은 비교적 단순하지만, 인젝터 분무의 미립화 과정 및 분열거동은 메커니즘이 매우 복잡하여 그에 대한 수치적 해석이 용이하지 못하다. 또한, 로켓엔진을 포함한 항공우주산업과 관련된 시스템은 막대한 개발비용과 고도의 신뢰도가 요구되는 만큼 반복실험에 의한 검증이 필요하다. 연소실 연소특성이 액체로켓엔진의 성능을 결정하게 되므로, 연소성능에 막대한 영향을 미치는

†부경대학교 기계공학과
 E-mail : jeongkim@pknu.ac.kr
 *부경대학교 대학원 에너지시스템공학과
 **부경대학교 기계공학과

연료(혹은 추진제)의 분열거동(breakup behavior)에 대한 연구는 반드시 필요하다⁽²⁾.

Heidmann 등⁽³⁾은 충돌형 인젝터 분무에 대한 연구에서 액막(liquid sheet) 표면에서 나타나는 파동(ruffle)을 관찰하고, 액사(ligament) 및 액적의 주기적 흘림현상(shedding phenomenon)을 확인하였다. 또, Ryan 등⁽⁴⁾은 제트의 속도/유동조건, 오리피스 직경, 충돌각(impingement angle) 등에 따라 액체제트의 미립화 특성을 실험적으로 연구하여, 표면파(surface wave) 및 액사 분열에 대한 주기적 특성을 고찰하였다.

Marchione⁽⁵⁾ 등은 이중모드 위상도플러속도계(Dual-mode Phase Doppler Anemometry, DPDA)와 고속카메라를 이용하여 압력선회식 분사기(pressure swirl atomizer)에서 분사된 분무의 평균직경, 속도, 분무각 등을 측정하고, 분무의 요동(oscillation) 특성을 관찰하였다.

본 연구그룹은 선행연구로, 추진제 분사압력이 인젝터 분무의 분열거동에 미치는 영향을 인젝터 노즐 오리피스의 중심축을 따라서 조사한 바 있다. DPDA로 액적의 속도, 크기 등을 측정하여 액적이 분무하류로 진행할 때, 분사압력에 종속하는 속도가 역전되는 현상을 확인하였다. 또, Nd:Yag 레이저를 이용한 분무가시화를 통하여 인젝터 유동에서 나타나는 흘림현상을 관찰하고, 비간섭적 방법에 의한 분사각 관련 인젝터 성능평가기법을 수립하였다⁽⁶⁾. 고정된 분사축방향 위치에서 분무 확산방향으로의 공간분포 특성을 조사한 연구에서는, 실험수행 조건에서의 Sauter 평균직경(D_{32})에 대한 수밀도, 속도, 체적유속 등의 상관관계를 도출하였다⁽⁷⁾. 이에 더하여 본 연구에서는, DPDA 계측을 통해 분사축방향 및 분무확산방향으로의 분무 이동거리와 분사압력 변이에 따른 분무액적의 분열거동을 규명한다.

2. 실험장치 및 방법

DPDA, 인젝터, 그리고 인젝터 분무발생장치(Injector Spray Generation System, ISGS)로 구성되는 실험장치를 Fig. 1에 보인다.

DPDA는 Ar-Ion 레이저, 송/수광부, 신호검출기 및 처리기, 3차원 이송장치, 그리고 PC 등으로 구성된다. 그 구동체계는 송광부에서 조사된 2쌍의 레이저 빔에서 발현되는 도플러(Doppler) 신호를 수광부에서 획득하고 신호처리기에서 그 신호를 분석하는 방식이다. 레이저 빔의 교차각을 증가시키면 액적의 크기에 대한 감

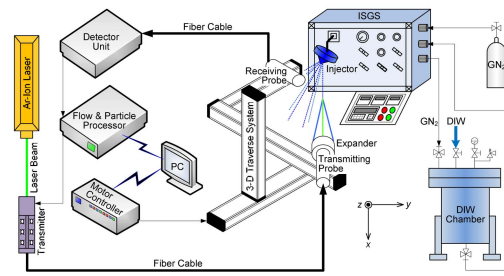


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 1. Experimental Conditions

| | |
|-----------|---|
| P_{inj} | 17.2, 27.6 bar |
| x | 100, 200 mm |
| y, z | 0, $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ mm |
| l/d_o | 1.67 ($l=0.25$ mm, $d_o=0.15$ mm) |

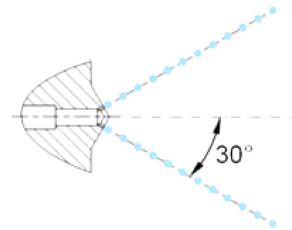


Fig. 2. Configuration of an injector employed in the experiment.

도가 높아지고 높은 수밀도 조건에서의 측정에 유리하므로⁽⁸⁾, 송광부에 확대비 1.98의 확대렌즈를 장착하였다. 또, 각 측정지점에서의 최대 데이터 획득개수와 시간을 각각 10,000개와 10초로 제한하여 분무액적의 크기측정에 대한 신뢰도를 높였다⁽⁹⁾.

3차원 이송장치를 이용하여 분사축방향(x)과 분무확산방향(y, z) 위치를 변화시켜 실험을 수행하였으며, 확산방향 원점은 오리피스의 중심축($y=z=0$)을 가상으로 정의하였다. 계측을 수행한 위치 및 분사압력을 Table 1에 나타낸다. 실제 추력기의 성능기준이 3.4~27.6 bar의 추진제 주입압력에서 균준화 되므로, 해당 압력구간 가운데 DPDA 측정이 용이하였던 17.2 bar와 최고압력인 27.6 bar에서의 계측결과를 본 논문에 기술한다. 분사축방향 거리 또한 분무분열이 적절히 발달되는 지점 이후

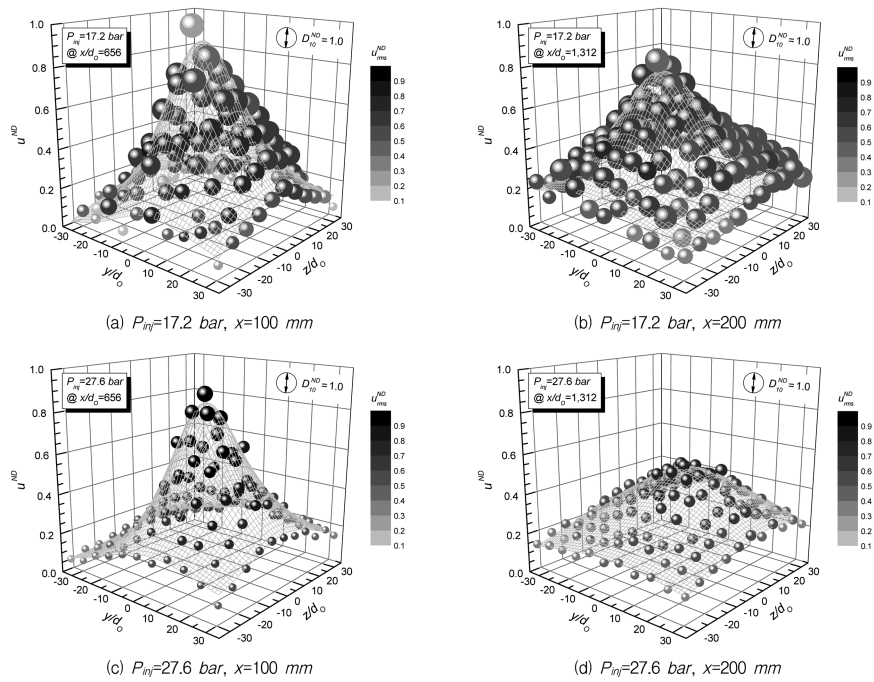


Fig. 3. Distributions of normalized spray characteristic parameters: u , D_{10} , and u_{rms} .

Table 2. Indication of the maximum values of each parameter for normalization

| Parameter | Value | P_{inj} | Location |
|---------------|--------------|-----------|------------|
| u_{max} | 48.7 m/s | 17.2 bar | $x=100$ mm |
| $u_{rms,max}$ | 15.1 m/s | 27.6 bar | $x=100$ mm |
| $D_{10,max}$ | 64.7 μ m | 17.2 bar | $x=100$ mm |

로 선정되었다⁽⁶⁾.

실험에 사용된 인젝터는 추진제가 직접 분사되는 비충돌형(nonimpinging type)이며, Fig. 2에 보인 것처럼 오리피스는 인젝터 중심축과 30°의 경사각을 가지고 총 8개로 구성된다. 오리피스의 길이-직경비(l/d_0)는 1.67이다. 우주비행체 등의 단일액체추진제로 자주 사용되는 하이드라진은 독성, 폭발성 등의 위험요소로 인해 실험실 단위에서의 취급에 제약이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 하이드라진과 물성치가 매우 유사하고⁽¹⁰⁾, 고압 실험환경에서의 정전기 등에 의한 미립화 액적의 이상 거동을 방지하기 위해 이온이 제거된 물(Deionized Water, DIW)을 작동유체로 사용한다. DIW는 기체질소로 가압되며 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인

젝터에서 분사된다.

3. 실험결과 및 고찰

소형 액체로켓엔진 인젝터의 8개 노즐 오리피스 가운데 활발한 미립화가 진행되는 오리피스의 기하학적 중심축 및 분무확산방향을 따라 DPDA로 분무특성 매개변수를 계측한다.

DPDA로 측정된 분무액적의 축방향 속도(u), 평균직경(D_{10}), 속도에 대한 섭동(fluctuation, u_{rms})을 Fig. 3에 나타낸다. 각각의 매개변수는 용이한 비교를 위하여 Table 2에 보인 값으로 무차원화 하였다.

속도는 분무중심에서 외곽방향으로 그 크기가 감소하고, 저압(17.2 bar)과 고압(27.6 bar) 모두 상류($x=100$ mm)가 하류($x=200$ mm)보다 속도 감소율이 크다. 또, 상류의 큰 속도는 하류에서 전반적으로 작아지고, 고압과 저압간의 속도가 하류에서 역전되는 현상은 초기 미립화 능력 차이에 기인하여 상대적으로 작은 관성력(액경)을 갖는 고압이 저압보다 주변기체에 의한 공기역학적 저항을 많이 받기 때문이다⁽⁶⁾.

액적의 평균직경은 중심에서 외곽방향으로 감소하지

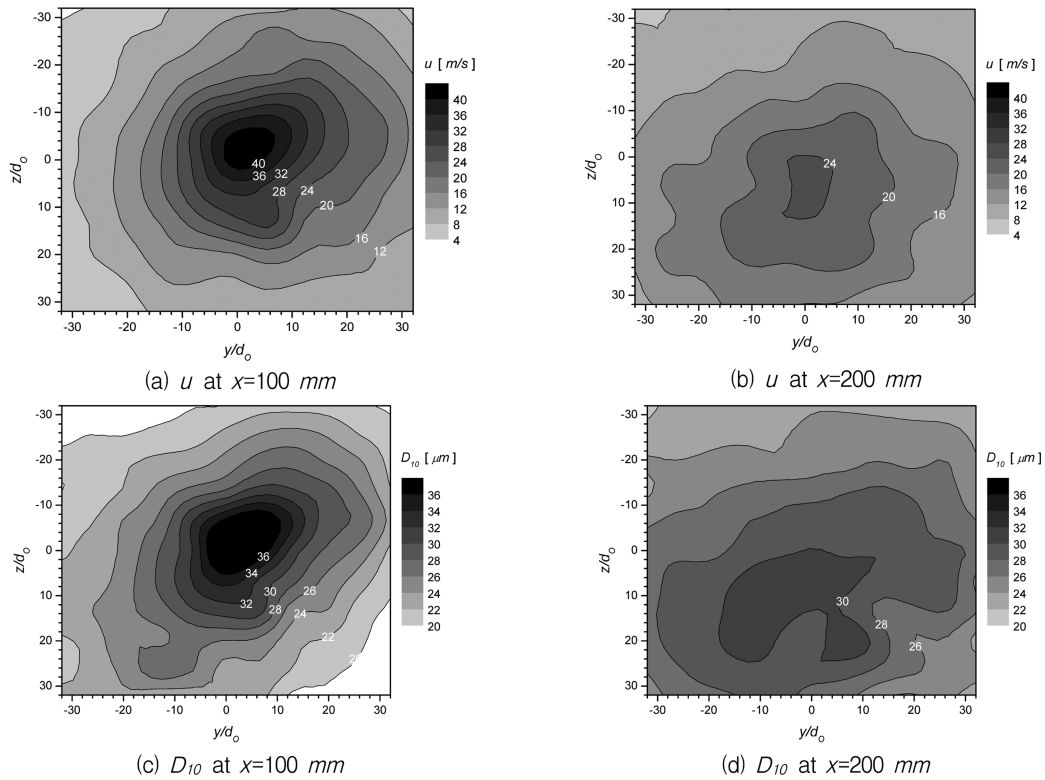


Fig. 4. Cross-sectional distributions of u and D_{10} at the varying x locations ($P_{inj} = 27.6 \text{ bar}$).

만, 분사축방향을 따라서는 크기 감소가 명확하지 않다. 다만, 큰 액적과 좁은 분무폭을 갖는 상류의 분무가 하류에서는 분무각의 확산(spreading)에 의해 중심축 근처에 있는 큰 입자들이 외곽으로 이동한다. 반면, 분사압력이 증가하면 액적의 크기는 확연하게 감소된다.

분무액적의 속도에 대한 섭동은 속도의 분포영역이 넓어질수록 커지게 되므로, 상대적으로 미립화가 양호한 분무의 중심이 외곽보다 섭동성분이 클 것이다. 고압은 이와 상충하는 경향을 보이는 반면, 저압에서는 분무의 중심에서 섭동의 크기가 다소 작고, 외곽방향으로 증가 후 감소한다. 저압 중심부에서의 섭동성분이 작은 것은 미립화 액적의 상대적인 부재에 의한 결과로 사료된다.

Figure 4에 27.6 bar로 분사된 액적의 속도와 Eq. (1) 과 같이 정의되는 D_{10} 의 분포를 축방향 위치에 따라 y - z 평면상에 도시한다.

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

Fig. 3에서 기술한 바와 같이 속도와 평균직경은 분무

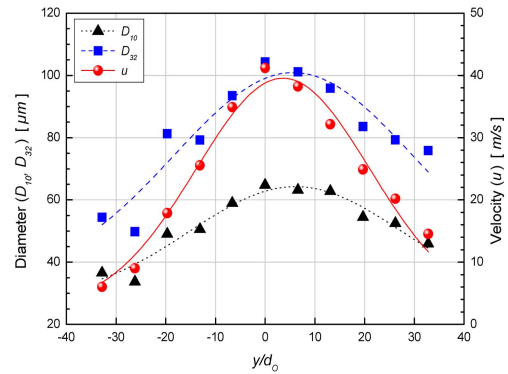


Fig. 5. Comparison between profiles of D_{10} , D_{32} , and u ($P_{inj} = 17.2 \text{ bar}$, $x = 100 \text{ mm}$).

의 확산에 의하여 중심에서 외곽방향으로 그 크기가 감소하고, 분무의 중심부는 상류가 하류보다 큰 속도와 평균직경 값을 가지는 것이 정량적으로 확인된다. 분무가 장거리에서의 속도와 크기가 상류보다 하류에서 오히려 커지는 것은 분무의 확산과 그에 따른 분무폭이 증

가하여 나타나는 결과이다. 또, 동일한 축방향 위치에서의 속도와 평균직경이 보이는 각각의 단면분포 양상이 흡사한 것은 주변기체와의 상호작용에 의한 액적의 속도 감소율이 액적의 질량(혹은 크기)에 따라 갖게 되는 관성력의 크기에 영향을 받고 있음을 보여주는 결과이다⁽⁶⁾. 액적의 크기와 속도가 갖는 상관도에 대한 용이한 이해를 위하여 Fig. 5에 분사압력 17.2 bar, 축방향위치 $x=100\text{ mm}$ 에서의 D_{10} , D_{32} , 그리고 속도를 함께 도시한다. 액적의 증발율에 대한 척도인 D_{32} 는 다음과 같이 정의된다.

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

그림에서 각각의 매개변수가 반경방향 분포에서 유사 경향성을 가지는 것이 재차 확인되고, D_{32} 는 그 정의에 따라 D_{10} 보다 큰 값을 가진다.

스팬(Span)과 Spherical Validation을 Fig. 6에 보이며, 분사압력과 축방향 거리는 Fig. 4와 동일하다. 스패는 분무액적의 크기분포에 대한 범위를 나타내고, 다음의 Eq. (3)과 같이 정의된다.

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

분사중심축으로부터 멀어질수록 상류와 하류 모두 그 값이 커지는데 이는 분무분열로 인해 큰 액적과 미립화된 액적이 공존하여 액적의 크기분포도가 넓어지기 때문이다. 분무액적의 분열과정에 의하여 하류중심부가 상류의 그곳보다 큰 값을 가지지만, 확산거동의 영향으로 하류는 중심과 외곽간의 차이가 크지 않다.

PDA(또는 PDPA)는 측정부피를 지나는 입자 혹은 액적에 의하여 변형된 도플러 신호를 분석하여 속도와 크기를 계산하게 된다. 속도는 물체가 측정부피를 통과하는 시간에 따라 간단하게 측정되지만, 크기는 위상차(phase difference)를 이용하여 계산한다. 또한, 입자가 구형임을 가정하고 입자의 크기를 도출하게 되므로, 쪼

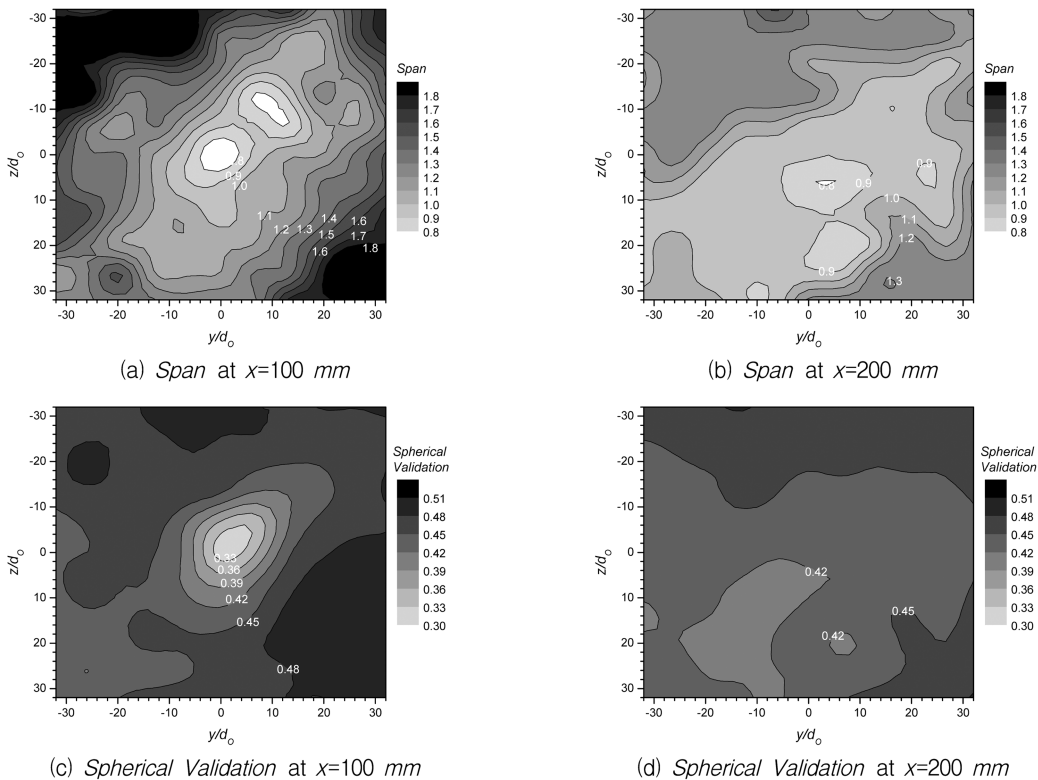


Fig. 6. Cross-sectional distributions of Span and Spherical Validation at the varying x locations ($P_{inj}=27.6\text{ bar}$).

그러짐이 심한 액적은 크기 계산 과정에서 제외되어야 한다. 이와 같이, 액적의 크기를 계산하기 위하여 사용되는 데이터의 수가 전체 버스트(burst) 신호에 대하여 갖는 비율을 지칭하는 *Spherical Validation*은 다음의 Eq. (4)와 같이 표현되며, 본 실험에서는 95% 이상의 구형도를 가지는 액적들만을 유효한 데이터로 간주하여 직경계산에 포함시켰다.

$$Spherical\ Validation = \frac{Valid\ Diameter\ Sample}{Valid\ Bursts} \quad (4)$$

*Spherical Validation*은 분무의 중심에서 외곽방향으로 비율이 커지고, 상류보다 하류에서 그 값이 크고 균일화된 것을 그림에서 확인할 수 있다. 이는, 분무의 분열거동에 의하여 구형에 가까운 액적의 수가 점차적으로 증가되고 있음을 의미한다. 또, 속도, 평균직경, 스펠이 보였던 경향과 유사성이 나타나는 것으로 보아 *Spherical Validation*이 분무액적의 미립화도 판별을 위한 척도로 이용될 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

소형 액체로켓엔진에 장착되는 인젝터 분무의 분사압력 및 이동거리에 따른 액적의 분열거동에 대한 고찰을 위하여 DPDA를 이용하였다.

분무액적의 속도, 평균직경, 그리고 속도에 대한 섭동 성분은 상류에서 하류로, 중심에서 외곽으로 이동하면서 그 값들이 감소하는 것이 관찰되었다. 스펠(*Span*)과 *Spherical Validation*은 분무의 중심에서 외곽으로 그 값이 커지고, 상류보다 하류에서의 크기가 전반적으로 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또, 본 연구에서 고찰한 모든 분무특성 매개변수는 액적의 미립화 과정 및 확산거동에 의하여 하류에서 균일화되는 양상이 나타났으며, 분사축방향 이동거리보다는 분사압력이 액적의 미립화에 지배적인 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Kim, J. S., Park, J., Kim, S., Choi, J. and Jang, K. W., 2006, "Test and Performance Evaluation of Small

Liquid-monopropellant Rocket Engines", 42nd AIAA /ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit", AIAA-2006-4388.

- 2) Law, C. K., 1911, "Mechanics of Flame Stabilization in Subsonic and Supersonic Flow", Major Research Topics in Combustion, Springer-Verlag.
- 3) Heidmann, M. F., Priem, R. J. and Humphrey, J. C., 1957, "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets", NACA TN 3835.
- 4) Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S. and Santoro, R. J., 1995, "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets", Journal of Propulsion and Power, Vol. 11(1), pp. 135-145.
- 5) Marchione, T., Allouis, C., Amoresano, A. and Beretta, F., 2007, "Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray", Journal of Propulsion and Power, Vol. 23(5), pp. 1096-1101.
- 6) Kim, J. S. and Kim, J. S., 2008, "A Characterization of the Spray Evolution by Dual-mode Phase Doppler Anemometry in an Injector of Liquid-propellant Thruster", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23(6), pp. 1637-1649.
- 7) Jung, H. and Kim J. S., 2008, "Spatial Distribution Characteristics of Small LRE-injector's Spray-droplet According to the Variation of Fuel-injection Pressure", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 12(5), pp. 1-8.
- 8) Edwards, C. F. and Marx, K. D., 1992, "Analysis of the Ideal Phase-Doppler System: Limitations Imposed by the Single-particle Constraint", Atomization and Sprays, Vol. 2(3), pp. 319-366.
- 9) Lefebvre, A. H., 1989, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corp., New York, pp. 367-409.
- 10) Schmidt, E. W., 2001, "Hydrazine and Its Derivatives: Preparation, Properties, Applications", 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.