

## Closed-type 스윙 인젝터의 스윙 챔버 형상에 따른 분무특성 연구

정연재<sup>a</sup> · 정석규<sup>a</sup> · 오석일<sup>a</sup> · 윤영빈<sup>a,\*</sup>

## Spray Characteristics of Closed-type Swirl Injectors with Varying Swirl Chamber Geometry

Yunjae Chung<sup>a</sup> · Seokkyu Jeong<sup>a</sup> · Sukil Oh<sup>a</sup> · Youngbin Yoon<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [ybyoon@snu.ac.kr](mailto:ybyoon@snu.ac.kr)

### ABSTRACT

This study has been done as a preliminary work in the process of confirming the modeling and calculation results on the dynamic characteristics of closed-type swirl injector which were performed by Ismailov et al. in Purdue university. Closed-type swirl injectors with replaceable swirl chamber parts were designed and manufactured. The steady state spray characteristics of closed-type swirl injector with varying swirl chamber length and diameter were verified. Mass flow rate was measured with a mass flow meter installed in front of the injector, and liquid film thickness was measured by Lefebvre's method with electrodes installed at the orifice of the injector. Variation of spray cone angle and break-up length were investigated from the spray images captured under different manifold pressure conditions.

### 초 록

Purdue 대학교의 Ismailov 등이 수행한 closed-type 스윙 인젝터의 동특성에 대한 모델링 및 계산 결과를 실험을 통해 확인하고자 하는 과정의 일환으로 수행된 연구이다. Closed-type 스윙 인젝터의 스윙 챔버의 길이와 지름의 영향이 인젝터의 동특성에 미치는 영향을 관찰하고자 스윙 챔버의 길이와 지름을 변화시킬 수 있는 인젝터를 제작하였다. 이러한 과정에서 closed-type 스윙 인젝터의 동특성에 대한 실험을 진행하기에 앞서서 정적인 분무 특성을 확인하였다. 인젝터 전단에 설치된 유량계를 통하여 유량을 확인하였으며, Lefebvre의 방식에 따라 closed-type 스윙 인젝터의 오리피스에 전극을 설치하여 매니폴드 압력에 따른 액막 두께의 변화를 측정하였다. 또한 압력별로 촬영된 순간적인 분무 사진을 통하여 매니폴드 압력에 따른 분사각과 분열길이의 변화를 관찰하였다.

Key Words: Closed-type Swirl Injector(스윙 인젝터), Swirl Chamber(스윙 챔버), Liquid Film Thickness(액막 두께), Spray Cone Angle(분사각)

Nomenclature

- $L_s$  : swirl chamber length
- $D_s$  : swirl chamber diameter
- $D_t$  : tangential entry diameter
- $D_o$  : orifice diameter
- $P_m$  : manifold pressure
- $\alpha$  : spray cone angle
- $L_{bu}$  : break-up length
- $A$  : injector geometry coefficient

1. 서 론

액체로켓엔진의 인젝터는 연소기에 추진제를 공급하는 핵심적인 요소로서 안정적인 유량, 미립화, 혼합 특성을 가져야 한다. 액체로켓엔진의 추진제는 인젝터를 통해 연소기에 분사된 후 미립화, 기화, 혼합 등의 과정을 거쳐 연소하게 된다. 이러한 과정들은 연소기에서의 연소과정에 직접적인 영향을 끼치게 되기 때문에 설계된 유량, 미립화, 혼합 특성을 가지는 인젝터를 통해 안정적인 연소과정을 이끌어 내기 위해서는 인젝터의 성능이 매우 중요하다. 이러한 인젝터의 종류 중 스월 인젝터는 같은 유량의 충돌형 인젝터에 비하여 제작이 용이하며 분무특성이 우수하여 많은 액체로켓엔진에서 채택되어 사용되고 있다[1]. 그 중에서도 closed-type 스월 인젝터는 가장 기본적인 형태의 스월 인젝터로 스월 챔버와 오리피스로 연결되는 부분에서 좁혀지면서 유체의 접선방향 속도를 가속시켜 작은 에너지로도 목표한 성능을 이끌어 낼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 스월 인젝터의 분무 특성에는 유량, 분사각, 액적크기, 혼합특성 등이 있는데 이러한 분무 특성들을 결정하는 데에는 인젝터의 형상 인자들이 결정적인 영향을 끼치게 된다. 위에서 언급된 정적 분무 특성들은 인젝터에 외란이 없는 상태에서 측정되지만, 인젝터가 실제로 운용되는 과정에서는 다양한 외란이 가해지게 된다. 이러한 다양한 외란에 인젝터가 어떠한 경향을 보이며 반응하느냐에 따라 정적으로는

안정적이었으나 동적으로는 불안정한 인젝터가 될 가능성을 가지고 있다. Closed-type 스월 인젝터에 대한 연구는 전 세계적으로 널리 수행되었으나 동특성에 대한 연구는 러시아에서 가장 많이 수행되어왔다. 하지만 러시아의 많은 연구 결과들은 대외적으로 공개가 되고 있지 않기 때문에 세계적으로 몇몇 그룹들이 초기 단계부터의 연구를 다시 진행하고 있다. 본 연구는 미국의 Purdue 대학교의 Heister 교수 그룹에서 진행한 closed-type 스월 인젝터의 동특성에 대한 모델링 및 계산 결과를 실험적으로 확인하고자 하는 과정의 일환으로서, 연구에서 사용된 closed-type 스월 인젝터의 정적 특성을 먼저 확인하고자 하였다[2,3].

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 구성도

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치들의 구성을 나타내고 있다. 압축기를 통해 가압된 물탱크에서 인젝터에 실험유체인 물이 공급되며, 인젝터의 전단에는 Hoffer 사의 유량계가 설치되어 분사되는 유량을 실시간으로 측정하였다. 인젝터의 매니폴드와 오리피스에서 Valcom 사의 압력계를 통하여 압력을 측정하였다. 인젝터의 전단과 오리피스에는 Lefebvre의 방식과 같이

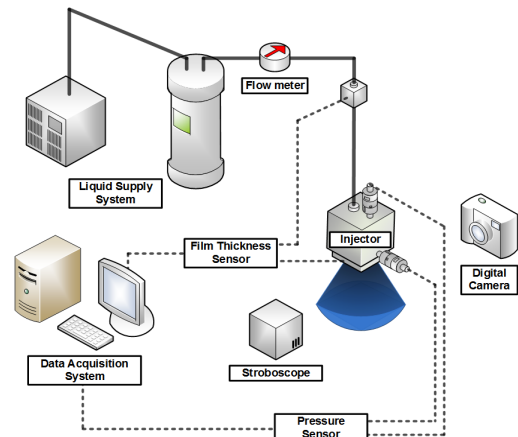


Fig. 1 Experimental apparatus.

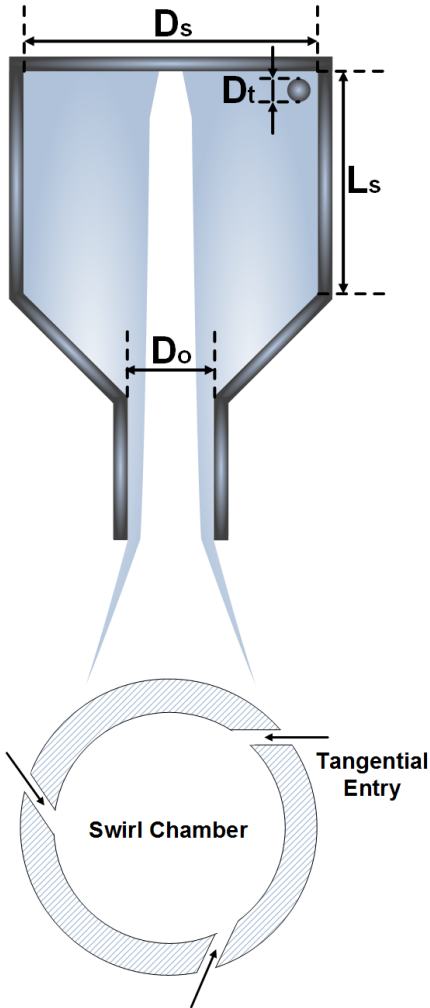


Fig. 2 Schematics of closed-type swirl injector.

전극을 설치하여, 인젝터 전단의 전극에서는 온도의 영향을 보정하고 인젝터 오리피스 전극으로는 액막 두께를 측정하였다[4]. 본 실험에 사용된 전극은 각기 다른 지름의 막대를 삽입하여 액막 두께가 고정된 상태에서 액막 두께에 따른 전압 값을 보정해 주었다. 이와 동시에 Sugawara 사의 Stroboscope를 광원으로 Canon 사의 7D digital camera를 사용하여 분무형상을 획득하였다.

2.2 스윙 인젝터 형상

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 closed-type 스윙

Table 1. Closed-type swirl injector geometry.

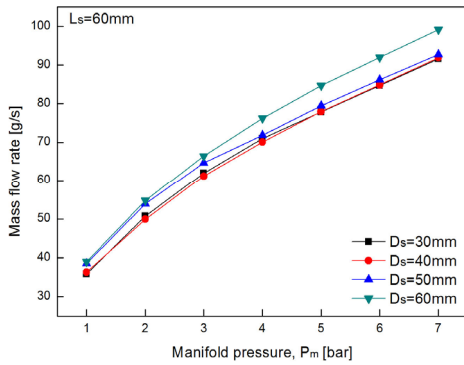
$L_s/D_s$	$L_s$ (mm)	$D_s$ (mm)	$D_t$ (mm)	$D_o$ (mm)
2	60	30	1.4	6
1.5		40		
1.2		50		
1		60		
2	60	30		
2.7	80			
3.3	100			
4	120			

인젝터의 개략도이다. 물탱크에서 가압된 물은 인젝터의 매니폴드에 공급되며, 1.4 mm 지름의 접선방향 유입구 3개를 통해 스윙 모멘텀을 가지고 스윙 챔버에 유입된다. 스윙 챔버의 지름과 길이를 Table 1과 같이 변화시켰으며 스윙 챔버와 오리피스 사이의 좁혀지는 부분은 45°를 유지하였다. 본 연구는 Purdue의 Ismailov 등의 연구 결과를 실험적으로 확인하고자 하는 목적으로 이루어지는 연구의 일환으로서 본 연구에서 사용된 인젝터는 Ismailov의 연구에서 사용된 인젝터의 스윙 챔버 형상을 약 1/2의 비율로 축소하여 제작되었다[2,3].

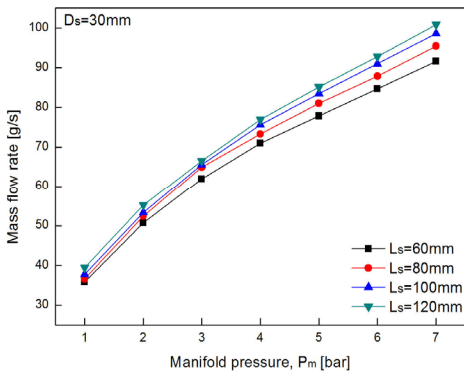
3. 실험결과 및 고찰

3.1 유량

Closed-type 스윙 인젝터의 매니폴드 압력을 1 bar부터 7 bar까지 1 bar 씩 증가시키며 유량을 측정하였다. 스윙 챔버의 형상과 무관하게 모든 조건에서 매니폴드 압력에 따라 유량이 증가하고 있으며, 매니폴드 압력이 증가할수록 그 증가는 감소하고 있는 경향을 보인다. Fig. 3(a)는 스윙 챔버 지름 변화에 따른 결과를 나타내고 있다. 스윙 챔버의 지름이 30 mm에서 60 mm로 증가할수록 유량이 증가하지만 그 변화폭은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Bayvel과 Orzechowski에 따르면 유량계수는 점성을 고려



(a)



(b)

Fig. 3 Mass flow rate with varying swirl chamber (a) diameter and (b) length.

하지 않았을 때는 스월 챔버의 지름이 증가함에 따라 감소하지만 점성을 고려하게 되면 스월 챔버의 지름이 증가함에 따라 특정한 최소점까지는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내게 된다. 본 연구의 경우 인젝터 형상계수 A가 약 29에서 60까지 변화하는 큰 스월 챔버 지름에 해당하는 경우로서 스월 챔버의 지름이 증가할수록 유량계수가 증가하여 유량을 증가시키는 결과를 나타내고 있다. 또한 인젝터 벽에서의 마찰이 증가하면 각운동량이 감소하게 되고 이로 인해 air-core의 지름과 분사각이 감소하게 된다. 결과적으로 유량계수는 증가하게 되어 본 연구에서는 스월 챔버의 길이가 길어질수록 증가한 마찰이 유량을 증가시키고 있는 것을 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있다[5].

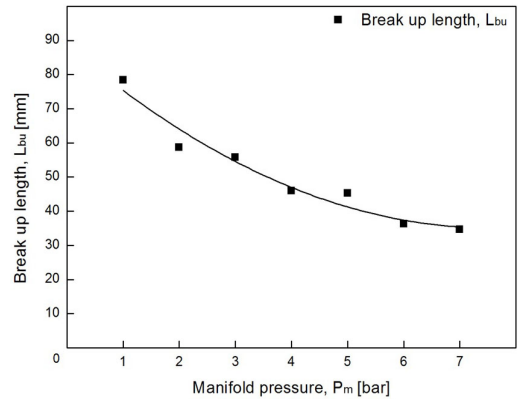


Fig. 4 Break-up length of closed-type swirl injector.

### 3.2 분무형상 및 분열 길이

Fig. 5는 Sugawara 사의 Sroboscope를 광원으로 사용하여 Canon 사의 7D 디지털 카메라를 통해 촬영한 closed-type 스월 인젝터의 분무 형상을 매니폴드 압력에 따라 나타낸 그림이다. 매니폴드 압력이 증가함에 따라 분사각이 증가하며 액막이 액적으로 분해되는 분열 길이가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. Inamura의 연구에 따르면 스월 인젝터의 분열 길이는 액막 두께와  $\cos \alpha$ 에 비례하고 분사되는 유체 속도의 제곱에 반비례 하는데, 매니폴드 압력이 증가할수록 액막 두께와  $\cos \alpha$ 는 감소하고 유체 속도는 증가하기 때문에 매니폴드 압력이 증가할수록 분열 길이가 짧아지게 된다. 이러한 결과를 Fig. 4에서도 확인할 수 있다[6].

### 3.3 액막 두께

인젝터의 가장 중요한 성능 중 하나는 미립화 특성으로서 스월 방식의 인젝터에서는 오리피스에서의 액막 두께가 미립화 특성을 결정하는 가장 중요한 변수이다[7]. Fig. 6은 Lefevbre의 기법을 사용하여 측정된 인젝터 오리피스에서의 액막 두께 변화를 형상변화에 따라 나타낸 결과이다. 조건 당 3회의 반복 측정을 통하여 평균값을 도출하였으며 센서의 샘플링 비는 400 k이다. 매니폴드 압력, 즉 분사압이 증가할수록 액막 두께가 줄어드는 경향을 보이며, 스월 챔버의 지름이 클수록 액막 두께가 두꺼워지며 스월 챔버의 길이

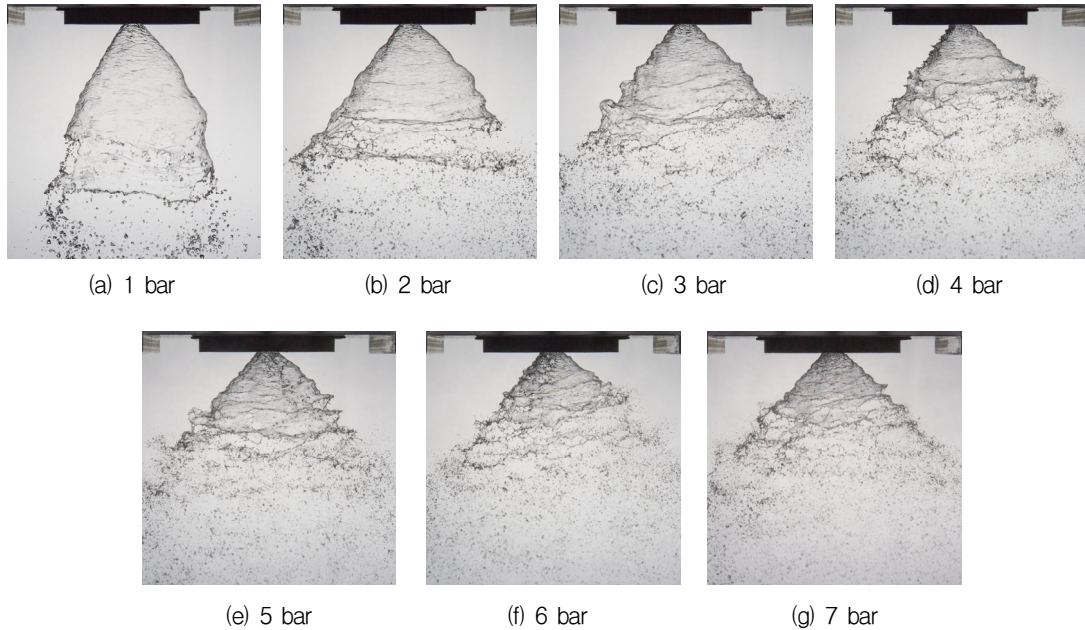


Fig. 5 Spray patterns of closed-type swirl injector with different injection pressure :  $D_s= 30$  mm ;  $L_s= 60$  mm.

가 길어질수록 액막 두께가 두꺼워지는 경향을 나타내고 있다. 인젝터 오리피스에서의 액막 두께는 그 동안 다양한 연구를 통해 여러 가지의 이론식과 실험식이 제시되었다. 그 중, Lefebvre 등은 이론 및 실험을 통해 아래의 식들을 제시하였다[7-9].

$$t = 3.66 \left( \frac{d_0 \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P} \right)^{0.25} \quad (1)$$

$$t = 2.7 \left( \frac{d_0 \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P} \right)^{0.25} \quad (2)$$

또한 Kim 등은 실험을 통해 Lefebvre의 식에서 인젝터 오리피스의 길이의 영향까지 고려된 액막 두께 실험식을 제시하였다[10].

$$\left( \frac{t}{d_0} \right) = 1.44 \left( \frac{\dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P d_0^3} \right)^{0.25} \left( \frac{l_0}{d_0} \right)^{0.6} \quad (3)$$

이와 같은 이전 연구들의 식들을 보면 액막

두께는 유체의 특성, 분사압력, 분사유량, 오리피스의 지름 및 길이에 따라 달라진다. 본 연구는 실험유체, 분사압력, 인젝터 오리피스의 지름 및 길이가 동일한 조건에서 진행되었으므로 액막 두께는 오직 분사유량에 따라 변화한다고 볼 수 있다. 따라서 Fig. 6과 같은 결과는 분사유량이 증가함에 따라 액막 두께가 증가한 것으로 분석할 수 있다.

### 3.4 분사각

스웰 인젝터의 분사각의 측정은 실험적으로는 오직 수류실험을 통해서만 얻어낼 수 있는 값으로, 연소실에서의 연소현상에 영향을 끼치는 미립화 특성을 결정하는 중요한 인자 중 하나이다. Fig. 7은 본 연구에서 사용된 인젝터의 오리피스로부터 하방으로 2D. 지점에서 측정된 분사각 결과를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 매니폴드 압력이 증가할수록 분사각이 증가하는 일반적인 경향을 보이며, 스웰 챔버의 지름과 길이가 증가할수록 분사각이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이는 3.1절에서 언급한 바와 같이 스웰 챔버의 길이가 증가할수록 마찰에 의해 각운동량이 손실

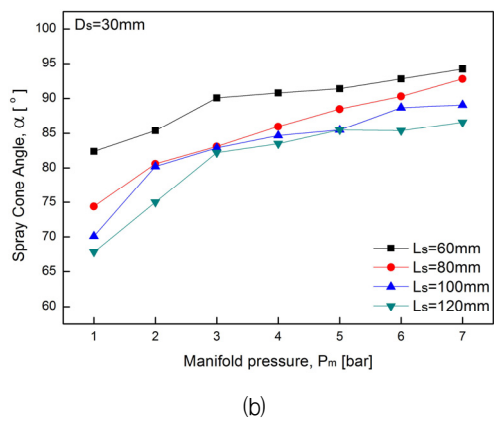
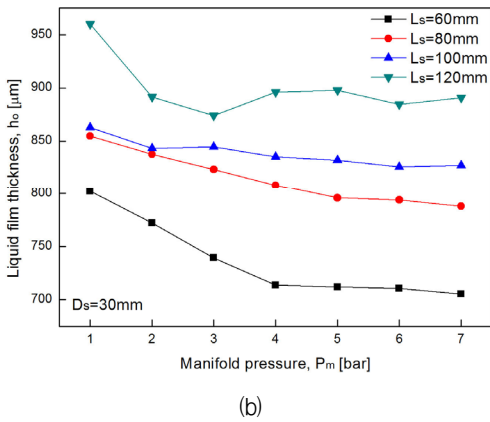
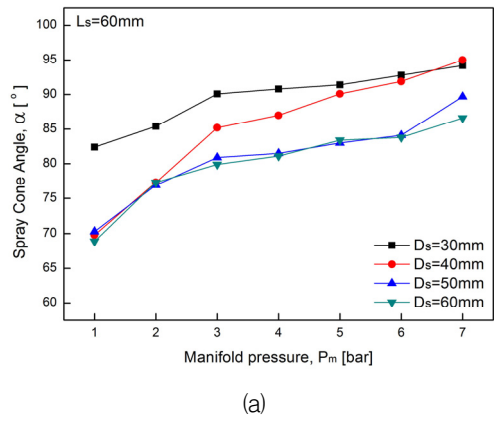
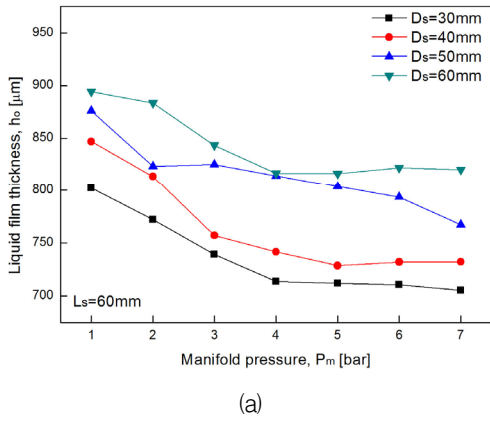


Fig. 6 Liquid film thickness with varying swirl chamber (a) diameter and (b) length.

Fig. 7 Spray cone angle with varying swirl chamber (a) diameter and (b) length.

되면서 분사각이 감소하는 결과와 함께 일정 크기 이상의 스윙 챔버 지름에서 스윙 챔버의 지름이 증가할수록 분사각이 감소하는 경향을 가지게 되는 ‘viscosity barrier’ 현상으로 파악된다[5].

#### 4. 결 론

Closed-type 스윙 인젝터의 스윙 챔버 형상에 따른 동특성을 파악하고자 하는 연구의 선행연구로서 closed-type 스윙 인젝터의 스윙 챔버의 지름과 길이에 따른 분무 특성을 확인하였다. 스윙 챔버의 지름이 커질수록 분사되는 유량이 증가하였으며, 스윙 챔버의 길이도 길어질수록 분사되는 유량이 증가하였으나 그 증가량은 크지

않았다. 스윙 챔버 지름과 길이 증가에 따라 증가된 유량으로 인하여 오리피스에서의 액막 두께가 증가하였다. 인젝터 오리피스로부터 하방 2D<sub>0</sub> 지점에서 측정된 분사각은 스윙 챔버의 지름과 길이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 closed-type 스윙 인젝터의 기본 분무 특성인 유량, 오리피스에서의 액막 두께, 분사각은 서로 연관성을 나타내며 그 경향은 유량이 증가할수록 오리피스에서의 액막 두께는 증가하며 분사각은 감소한다는 것을 확인하였다. 추후 후속 연구로서 매니폴드 전단에 설치된 펄세이터를 통해 매니폴드 압력을 가진 하였을 때 나타나는 동특성을 관찰할 것이며, 본 연구에서 측정된 분무 특성과 가진 시의 동특성의 관계가 비교 분석될 것이다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

## References

1. Bazarov, V. and Yang, V., "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, pp. 797-806, 1998.
2. Ismailov, M. and Heister, S., "Dynamic Response of Rocket Swirl Injectors, Part I Wave," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No. 2, pp. 402-411, 2011.
3. Ismailov, M. and Heister, S., "Dynamic Response of Rocket Swirl Injectors, Part II Nonlinear Dynamic Response," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No. 2, pp. 412-421, 2011.
4. Suyari, M. and Lefebvre, A.H., "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 2, No. 6, pp. 528-533, 1986.
5. Bayvel, L. and Orzechowski, Z., *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, Washington, D.C., U.S.A., 1993.
6. Inamura, T., Tamura, H. and Sakamoto, H., "Characteristics of Liquid Film and Spray Injected from Swirl Coaxial Injector," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, pp. 632-639, 2003.
7. Lefebvre, A.H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere, New York, N.Y., U.S.A., 1989.
8. Suyari, M. and Lefebvre, A.H., "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 2, No. 6, pp. 528-533, 1986.
9. Rizk, N.K. and Lefebvre, A.H., "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 3, pp. 193-199, 1985.
10. Kim, S., Khil, T., Kim, D. and Yoon, Y., "Effect of Geometric Parameters on the Liquid Film Thickness and Air Core Formation in a Swirl Injector," *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 015403, 2009.