

# 분사압력 변이에 따른 70 N급 액체로켓엔진 인젝터의 분무성능특성

정 훈\* · 김종현\* · 김정수\*\*† · 박정\*\* · 이재원\*\*\*

## Effects of Injection Pressure on the Spray Performance Characteristics of the 70 N-class Liquid-rocket Engine Injector

Hun Jung\* · Jong Hyun Kim\* · Jeong Soo Kim\*\*† · Jeong Park\*\* · Jae-Won Lee\*\*\*

### ABSTRACT

A water-flow test for acceptance verification is carried out for a nonimpinging-type injector prior to the design-performance verification of 70 N-class liquid-rocket engine under development. It is observed that there exist varying characteristics of atomization among the injector-orifices caused by a fabrication crudeness of orifice holes which can be judged from a microscopic standpoint. The flow shedding phenomenon and ruffle on the surface of liquid column (or droplet) could be caught from the instantaneous spray images.

### 초 록

본 연구팀에서 개발 중인 70 N급 액체로켓엔진의 설계성능 검증에 앞서 요소부품인 비충돌형 인젝터에 대한 인수시험 및 수류시험을 수행하였다. 인젝터 오리피스 인수시험 결과 미시적 관점에서의 가공오차가 확인되었으며, 그로 인해 각각의 오리피스에서 발현되는 분무거동에 차이를 보였다. 순간 분무이미지를 통해 액주(혹은 액적) 표면에 나타나는 파동과 유동의 주기적 흘림현상을 관찰하였다.

Key Words: Monopropellant(단일추진제), Liquid-rocket Engine(액체로켓엔진), Nonimpinging-type Injector(비충돌형 인젝터), Water-flow Test(수류시험), Spray Performance(분무성능)

### 1. 서 론

액체로켓엔진은 연료공급시스템, 인젝터, 연소실, 노즐 등으로 구성되며, 그 중 엔진성능과 가장 밀접한 관계를 갖는 것은 인젝터라고 해도 과언이 아니다. 때문에, 인젝터 종류, 작동환경 등에 따른 분무 미립화 특성 규명을 위한 연구는 수없이 진행되어 왔다. Ryan 등[1]은 충돌형

\* 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* (주)한화 대전사업장 개발부

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

액체 제트의 미립화 특성을 제트의 속도 및 유동조건, 오리피스 직경, 충돌각 등에 따라 고찰하였다. Li 등[2]은 환상액체제트의 분무특성 매개변수가 분무축에 대칭으로 분포함을 확인하였으며, Miller 등[3]에 의해 스윙인젝터의 미립화특성이 연소불안정성에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구가 진행되기도 하였다. 인젝터 내부유동이 분무분열특성에 미치는 영향을 조사한 연구에서는 대부분의 연구자가 노즐(오리피스) 내부에서 발생하는 공동현상이 분무특성을 결정짓는 주원인이라고 주장하였다[4-9]. Heidmann 등[10,11]에 의한 분무 불안정성 규명 연구에서는 액체 제트의 불규칙성과 함께 액막-주변공기의 상호작용의 결과로, 액막 표면에 나타나는 파동(ruffle)과 액사/액적이 보이는 주기적 흘림현상(shedding phenomenon)이 관찰된 바 있다.

본 연구팀에 의해 수행된 공칭추력 4.5 N급 추력기 인젝터(MRE-STD-1)의 분무분열특성을 규명한 연구에서, 분사압력에 종속하는 초기분무속도가 후류로 이동하면서 고압-저압 간에 역전되는 사실을 확인하고 유동의 주기적 흘림현상을 관찰하였다. 또, 중·대형급 단일액체추진제 추력기의 체계소요에 대비하여, 4.5 N급 추력기 및 그 핵심부품의 성능평가기술에 대한 연구뿐만 아니라 10~1,000 N 대역의 추력기군에 대한 설계/개발 기술을 구축하여 왔다[12-14]. 본 논문에서는 선행연구를 통하여 일부 확보된 단일추진제 추력기 핵심부품에 대한 성능평가의 일환으로 수행된 70 N급 인젝터의 수류시험 결과를 기술하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

액체로켓엔진 개발과정의 일환으로서, 인젝터(시작품) 성능특성 고찰을 위해 인젝터 분사각 판별 및 분무거동 평가시험 등을 수행하였다. Fig. 1에 도시한 기계식 인젝터 패터너는 시작품 제작이 완료된 70 N급 인젝터의 요구 분사각 성능판별을 위한 것으로, 그 제원은 개발모델 인젝터의 예상 분무궤적 및 분무각에 근거하여

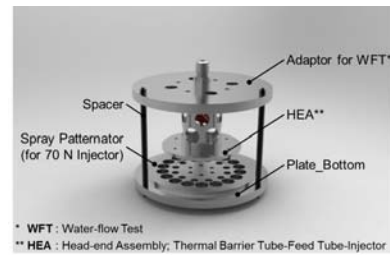


Fig. 1 Configuration of the mechanical injector-patternator

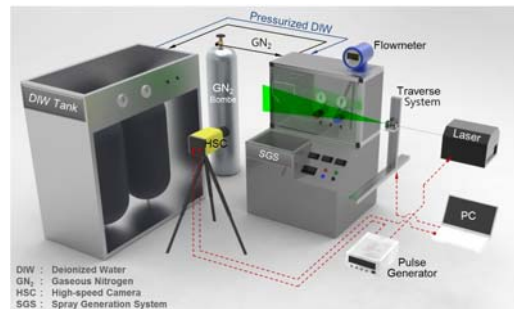


Fig. 2 Schematic diagram of the injector-spray visualization system

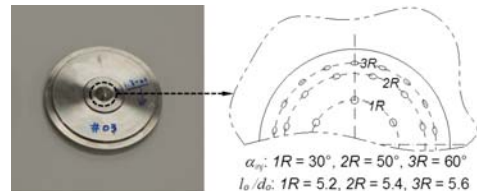


Fig. 3 Prototype injector used in the experiment

설계, 제작되었다. 또, 인젝터로부터 발현되는 분무성능특성을 관찰하고, 비간섭적(non-intrusive) 방법에 의한 분사각 요구성능 만족여부를 판명하기 위하여 가시화기법을 적용하였다. 인젝터 분무 가시화장치는 분무발생장치, 유량계, DPSS 레이저( $\lambda=532$  nm), 구면 및 원주 렌즈, 고속카메라 등으로 구성되며, 그 개략도를 Fig. 2에 보인다.

실험에 사용된 비충돌형(직접분사방식) 인젝터는 본 연구진에서 설계, 개발중인 우주비행체 정밀 자세제어용 액체로켓엔진의 단위 구성품으로, 인젝터의 오리피스는 슈퍼드릴 방전가공(super-drill EDM)으로 제작되었으며 그 시작품

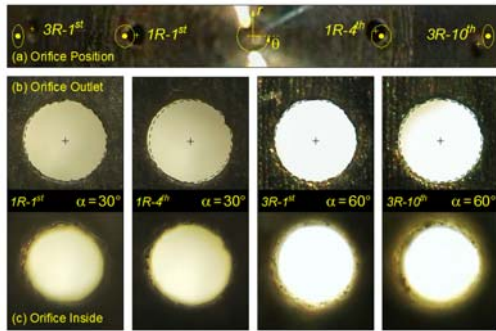


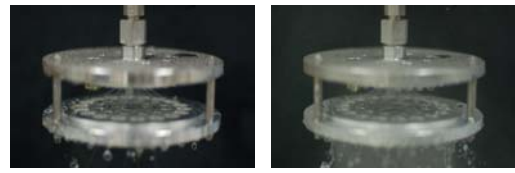
Fig. 4 Configuration of the fabricated injector orifice

Table 1. Inspection results: manufacturing error of the each injector-orifice

Orifice No.	Deviation (drawing-measured)	
	r [mm]	$\theta$ [degree]
1R-1 <sup>st</sup>	0.13	0.50
1R-4 <sup>th</sup>	0.06	-2.40
3R-1 <sup>st</sup>	0.16	1.92
3R-10 <sup>th</sup>	0.11	2.00

형상과 평면도를 Fig. 3에 나타낸다. 0.25 mm 직경을 갖는 인젝터 오리피스의 총 개수는 36개로, 3열에 걸쳐 배열되며 각 열(row)마다 고유의 분사각(1열-30°; 2열-50°; 3열-60°)을 이루도록 설계되었다. 수류시험(Water-flow Test, WFT)에 앞서, 전자현미경을 이용하여 가공이 완료된 인젝터 오리피스의 단면형상 및 내부 표면거칠기 등에 대한 정밀검사를 수행하였다. 이 때, 1열 및 2열은 600 배율로 촬영하였으며, 3열은 인젝터 형상이 갖는 제약으로 말미암아 300 배율의 렌즈로 이미지를 획득하였다.

실제 액체로켓엔진의 추진제로 널리 사용되는 하이드라진( $N_2H_4$ )은 실험실 단위 연구에서 취급하는 것이 용이하지 않기 때문에 그 물성치가 하이드라진과 매우 유사하고, 고압분사 시험시 정전기에 의한 미립액적의 이상거동을 방지할 수 있는 이온제거수(Deionized Water, DIW)를 작동유체로 사용하였다. DIW는 기체질소로 가압되며 밸브, 필터, 유량계, 압력센서 등으로 구성되는 분무발생장치를 지나 최종적으로 인젝터에서 상온의 대기(atmosphere) 증으로 분사된다.



(a)  $P_{inj} = 0.24$  MPa (b)  $P_{inj} = 2.31$  MPa

Fig. 5 Verification of angular injection requirement through mechanical injector-patternator

분사압력은 실제 액체로켓엔진의 작동영역을 기준으로 0.24 - 2.66 MPa로 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

제작이 완료된 인젝터의 가공완성도 판별을 위해 전자현미경으로 모든 오리피스를 촬영하였으며, 본 연구를 통하여 분무패턴분석이 수행된 오리피스에 한하여 그 결과를 Fig. 4에 제시한다: (a) 인젝터 중심축과 수직방향으로 촬영한 이미지와 설계도면을 중첩하여 확인한 각 오리피스의 오차위치를 Table 1에 제시한다. (b, c) 각 오리피스의 출구 및 내부 형상은 완전한 원형이 아닐뿐더러 불규칙한 단면형상을 보이고 있으며, 그 표면거칠기 또한 매끄럽지 못하다. 단지, 각 오리피스의 가공균일도가 거시적 관점에서 비슷한 수준을 유지하고 있어, 인젝터 분무간 특성차는 크지 않을 것으로 기대된다.

인젝터 패턴네이터를 활용해 인젝터 시작품에 대한 요구 분사각 성능을 평가하였으며, 본 실험의 최저분사압력인 0.24 MPa과 최대압력 2.31 MPa에서의 시험장면을 Fig. 5에 도시한다. 모든 인젝터 분무가 전 압력 구간에서 패턴네이터 홀을 통과하는 것이 확인되었다. 다만, 각각의 분무에서 발현되는 거동특성 차이가 관찰되었으며, 이는 미시적 관점에서의 오리피스별 가공오차에 기인한 것으로 사료된다.

개발모델 인젝터에 대한 분무성능 판별을 위하여 각 분사압력별 질량유량을 측정하고, 실험치를 근거로 오리피스 출구속도를 예측하였다. 출구속도는 아래의 식으로 산출하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

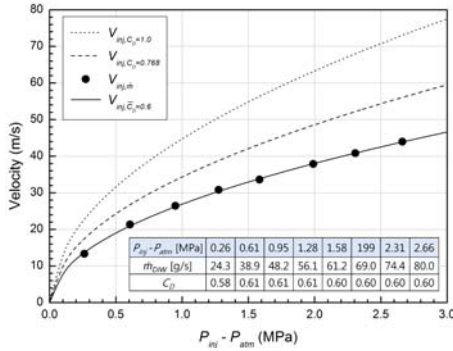


Fig. 6 Distribution of velocity at the orifice exit according to injection pressure variation

$$C_{D_{max}} = 0.827 - 0.0085 \frac{l_o}{d_o} \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_{D_{max}}} + \frac{20}{Re_j} \left( 1 + 2.25 \frac{l_o}{d_o} \right) \quad (2)$$

$$V_e = C_D \cdot \sqrt{\frac{2(P_{inj} - P_{atm})}{\rho_l}} \quad (3)$$

여기서,  $C_D$ 는 유량계수,  $l_o$  및  $d_o$ 는 오리피스의 길이와 직경,  $Re$ 는 제트 레이놀즈수, 그리고  $V_e$ 는 오리피스 출구에서의 속도를 의미한다. Eq. 2는 공동현상이 나타나지 않는 단순분사노즐 (plain orifice)에 국한하여  $l_o/d_o=2\sim 10$ ,  $Re=10\sim 20,000$ 의 범위에서 적용 가능한 선형식으로 서[15], 실험에 사용된 인젝터 오리피스의 제원 ( $l_o/d_o=5.2; 5.6$ ,  $Re=3,000\sim 12,000$ )에 기초하여 채택되었다. 실험치가 상기의 수식에 의한 값과 보이는 차이로부터 오리피스 내부에서 비교적 심한 비가역적 현상이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 이에 따라, 오리피스의 길이-직경비, 유출 입부 단면형상 등과 같은 설계수정과 함께 가공 방식을 변경하여 인젝터 성능개선을 도모하였으며, 해당 인젝터에 대한 시험평가 결과를 본 논문에서 기술하지는 않는다.

Figure 7은 유량측정시험 결과로부터 도출한 주요 무차원 매개변수의 상관관계를 통해 인젝터의 1차분열(primary breakup) 성능을 판단한 것이며, 개발모델의 객관적 성능검증을 위해 본 연구팀에 의해 수행된[13,14] 실제 액체추진제 추력기 인젝터의 시험결과를 함께 나타낸다. 최

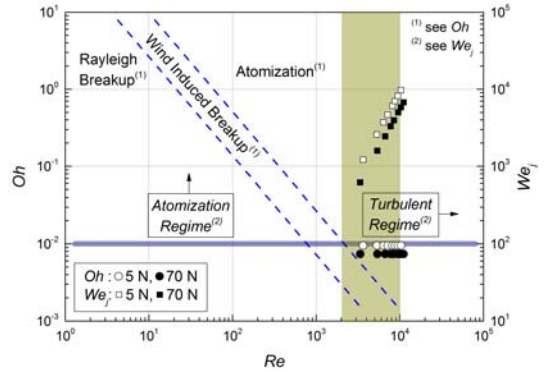


Fig. 7 Categorization of spray-flow regime by the interrelation of  $Re-Oh$  and  $Re_j-We_j$

저분사압력인 0.24 MPa에서도  $Re$ 가 2,300 이상으로 도출되는데, 이 같은 경우 불규칙한 난류유동의 발달로 인해 인젝터 분무의 분열길이 (breakup length)가 짧아지는 것이 일반적이다. 액적의 미립화도(degree of atomization)에 관계하는  $We_j$ 의 범위는 최저압을 제외하고는 미립화 영역의 기준( $We_{j, \geq 100}$ )[16] 보다 한 차원(order) 이상 큰 것으로 나타난다. 또,  $Re-Oh$  상관관계를 이용한 분류에서도 노즐 출구부근에서 분열 길이가 형성되는 미립화 영역에 속하는 것이 재차 확인된다. 다만, 비행모델 인젝터에 비해 그 성능이 다소 저조한 것으로 판단되어 전술한 바와 같이 추가적인 인젝터를 설계, 제작하였으며 그 성능검증시험이 일부 완료된 상태에 있다.

기계적 방식에 의한 인젝터 분사각 성능평가 (Fig. 5 참조)에 더하여 광학계측기법을 이용해 비간접적 방법으로 분사각 평가를 시도하였다. Fig. 8은 이미지 획득률 5,000 fps, 촬상소자 노출시간 2  $\mu s$  조건으로 1초간 촬영한 이미지를 중첩시킨 것으로, 분무의 전체궤적에 대한 명확한 식별이 가능하여 성능기준 만족 여부를 정확히 판단할 수 있다. 요구분사각 성능기준(파선)을 도식화하여 분무이미지에 중첩시켜 확인한 결과 기계적 패터네이터 시험과 달리  $P_{inj}=0.93$  MPa의 경우 분무의 궤적이 합격기준 범위에서 벗어나 있음이 확인된다. 유동의 유입각( $\alpha_{inj}$ )이 큰 3열(3R)이 1열(1R)에 비해 분무의 궤적범위가 비교적 넓게 분포하는 것 또한 관찰되는데, 이는

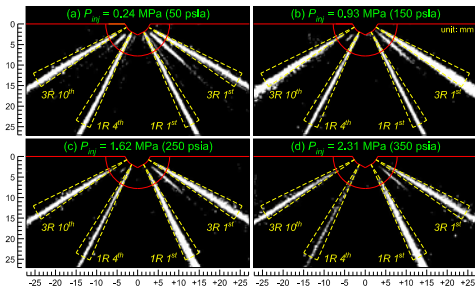


Fig. 8 Overlapped images for evaluation of spray trajectory (variation of injection angle)

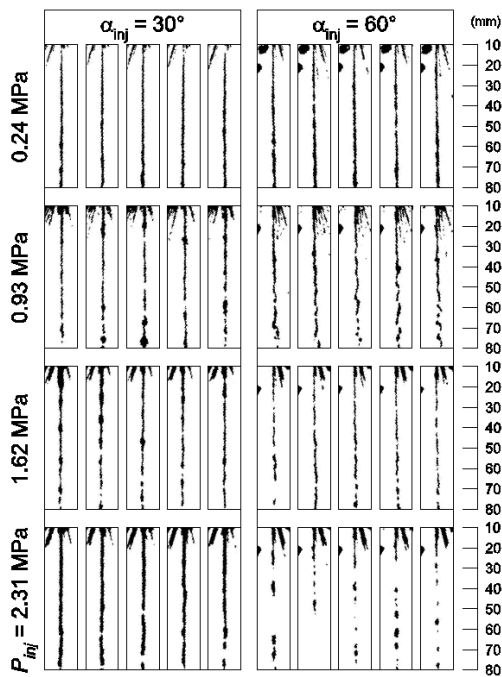


Fig. 9 Spray behavior as a variation of the injection pressure and orifice inlet angle

급작스런 유로 변화에 따른 공동현상 증대에 의한 결과로 사료된다. 또, 분무거동의 비균일성에 미치는 유입각의 영향은 분사압력이 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 분무의 순간유동 식별을 위해 고속 카메라의 촬상소자 노출시간을 50  $\mu$ s로 설정하여 오리피스 출구로부터 10-70 mm 후류지점에서 분사압력과 유동유입각 변이에 따라 획득한 이미지이다. 주변 공기와의 상호작용으로 인해 액주(혹은 액적) 표면에 파동(ruffle)이 존재하는

것이 분무이미지 전체에서 확인된다.  $\alpha_{inj}=30^\circ$ 인 경우는 분사압력 변이에 따른 뚜렷한 변화가 관찰되지는 않으나, 0.93, 1.62 MPa에서 액체 덩어리가 간헐적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 반면,  $\alpha_{inj}=60^\circ$ 로 분사된 분무는 전술한 내부유동 특성에 기인하여 분사압력에 따른 영향이 다소 큰 것으로 파악된다. 주목할 만한 점으로, Fig. 7에서 분무각 합격범위를 만족시키지 못하는 것으로 판명됐던  $P_{inj}=0.93$  MPa,  $\alpha_{inj}=60^\circ$  조건으로 분사된 분무는 여타의 분무에 비해 심한 흘림현상이 존재하고 있으며, 하류로 이동하면서 그 주기는 점차 커진다. 이러한 분무액적의 주기적 현상은 연소불안정성을 야기시킬 수 있는 잠재적 위험요소 이므로, 그 주기 및 진폭 등에 대한 체계적이고 면밀한 연구가 추가적으로 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구팀에 의해 개발중인 70 N급 액체로켓 엔진 인젝터 시작품에 대한 인수시험 및 성능평가를 목적으로 분사압력과 유동유입각 변이에 따른 분무성능특성을 고찰하였다. 실험장치는 전자현미경, 기계식 인젝터 패터네이터, 인젝터 분무 가시화장치를 사용하였으며, 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 제작된 인젝터의 인수시험 결과 오리피스의 가공위치가 설계규격 대비 미소한 오차를 보였다. 각 오리피스의 가공완성도는 비슷한 수준을 보이기는 하나, 미시적인 관점에서 불규칙적인 단면형상, 내부 표면거칠기 등이 관찰되었다.

(2) 인젝터의 분사각 요구성능 평가시험을 수행한 결과, 기계식 패터네이터를 이용한 실험에서는 모든 오리피스가 전 압력구간에 걸쳐 합격기준을 만족하는 것으로 판단되었다. 반면, 가시화 기법을 적용한 정밀판독에 의하면 유동 유입각이 큰 오리피스의 경우 특정 압력 구간에서 합격범위를 이탈하고 있음이 확인됐다.

(3) 모든 실험 조건에서 액주(혹은 액적) 표면에 파동(ruffle)이 존재하였으며, 유동 유입각이 큰

오리피스별 분무특성은 유입각이 작은 것보다 분사압력 변이에 대한 종속성이 컸다. 주목할 만한 점으로, 특정압력 구간에서 분무의 주기적 홀림현상이 증폭되는 사실이 관찰되었으며 향후 추가적인 연구가 반드시 필요하다. 또한, 각 오리피스별 질량유량 측정을 통한 인젝터 성능 불균일도 검증이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(No. 20110020890).

## 참 고 문 헌

- Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S., and Santoro, R. J., "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 1, 1995, pp.135-145
- Li, X. and Shen, J., "Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 1, 1999, pp.103-110
- Miller, K., Sisco, J., Nugent, N., and Anderson, W., "Combustion Instability with a Single-element Swirl Injector," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 5, 2007, pp.1102-1112
- Tamaki, N., Shimizu, M., Nishida, K., and Hiroyasu, H., "Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet," *Atomization and Sprays*, Vol. 8, No. 2, 1998, pp.179-197
- Hiroyasu, H., "Spray Break-up Mechanism from the Hole-type Nozzle and Its Applications," *Atomization and Sprays*, Vol. 10, No. 3-5, 2000, pp.511-527
- Kato, M., Kano, H., Date, K., Oya, T., and Niizuma, K., "Flow Analysis in Nozzle Hole in Consideration of Cavitation," 1997, SAE Paper 970052
- Kent, J. C. and Brown, G. M., "Nozzle Exit Flow Characteristics for Square-edged and Rounded Inlet Geometries," *Combustion Science and Technology*, Vol. 30, No. 1-6, 1983, pp.121-132
- Ganippa, L. C., Bark, G., Andersson, S., and Chomiak, J., "Cavitation: A Contributory Factor in the Transition from Symmetric to Asymmetric Jets in Cross-flow Nozzles," *Experiments in Fluids*, Vol. 36, No. 4, 2004, pp.627-634
- Baumgarten, C., Stegemann, J., and Merker, G. P., "A New Model for Cavitation Induced Primary Break-up of Diesel Sprays," *Proceeding of 18th ILASS Europe Conference, 2002*, pp.15-20, Zaragoza, Spain
- Heidmann, M. F. and Humphrey, J. C., "Fluctuations in a Spray Formed by Two Impinging Jets," *NACA TN 2349*, 1951
- Heidmann, M. F., Priem, R. J., and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets," *NACA TN 3835*, 1957
- Kim, J. S., Park, J., Kim, S., Choi, J., and Jang, K. W., "Test and Performance Evaluation of Small Liquid-monopropellant Rocket Engines," *AIAA-2006-4388*, 2006
- 정훈, 김정수, "소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 연료분사압력 변이에 따른 액적의 공간 분포 특성," *한국추진공학회지*, 제12권, 제5호, 2008, pp.1-8
- Kim, J. S. and Kim, J. S., "A Characterization of the Spray Evolution by Dual-mode Phase Doppler Anemometry in an Injector of Liquid-propellant Thruster," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 6, 2009, pp.1637-1649

15. Lichtarowicz, A., Duggins, R. K., and Markland, E., "Discharge Coefficients for Incompressible Non-cavitating Flow through Long Orifices," J. of Mechanical Engineering Science, Vol. 7, No. 2, 1965, pp.210-219
16. Kenny, R. J., Moser, M. D., Hulka, J., and Jones, G., "Cold Flow Testing for Liquid Propellant Rocket Injector Scaling and Throttling," AIAA-2006-4705, 2006