Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 21, No. 2, pp. 41-47, 2017

Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.2.041

초저온 질소 분사 핀틀 인젝터 분무의 가시화

이건웅[a] · 손 민[a] · 신동수[a] · 윤영빈[b] · 김정수[c] · 구자예[d,*]

Visualization of Cryogenic Nitrogen Spray from a Pintle Injector

Keonwoong Lee[a] · Min Son[a] · Dongsoo Shin[a] · Youngbin Yoon[b] · Jeong Soo Kim[c] · Jaye Koo[d,*]

[a]*Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea*
[b]*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea*
[c]*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea*
[d]*School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: jykoo@kau.ac.kr*

ABSTRACT

By using liquid and gaseous nitrogen as simulants, effects of pintle opening distance and simulant supplying condition on spray from pintle injector were investigated qualitatively. The experiment was performed by fixing the liquid supply pressure and varying the opening of the pintle and the supply pressure of gaseous nitrogen. Shadowgraph method with CCD camera was used for image visualization, and the differences of liquid-gas spray were compared by image post processing. In case of liquid nitrogen single injection, as the opening distance was increased, the injection speed was decreased. Therefore, the end of liquid sheet were converged to the center of spray. In the case of liquid nitrogen/Gaseous nitrogen spray, although shadowgraph images look similar to each other, It is shown that it can be analysed by image post processing.

초 록

모사추진제로 초저온 액체질소와 기체 질소를 사용하여 핀틀의 개도 및 모사추진제 공급 조건이 초저온 분무에 끼치는 영향을 정성적으로 연구하였다. 액체 공급압력을 고정하고, 핀틀의 개도와 기체 질소의 공급 압력을 변화시켜 실험을 진행하였다. 이미지 가시화는 CCD 카메라를 이용한 Shadowgraph 기법이 사용되었으며, 이미지 후처리를 통해 실험 조건에 따른 분무의 차이를 비교하였다. 액체 질소 단독 분사의 경우 개도가 늘어날 때, 분사속도가 줄어들고 챔버에서의 벤트 압력은 커져 액체질소 시트가 중앙으로 모이는 현상이 관측되었다. 액체질소/기체질소 분무의 경우 이미지 후처리를 통해 서로 실험 조건이 다르지만 Shadowgraph 이미지가 유사하게 나타나는 경우도 분석할 수 있음을 보였다.

Key Words: Pintle Injector(핀틀 인젝터), Liquid Nitrogen(액체 질소), Momentum Flux Ratio(운동량 플럭스 비), Image Post Processing(이미지 후처리)

Received 3 November 2016 / Revised 1 March 2017 / Accepted 6 March 2017
Copyright ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일반적으로 액체로켓 엔진에서 주로 사용되어 온 대표적인 인젝터의 두 유형은 전단동축 인젝터와 동축 스월 인젝터이다. 전단동축 인젝터는 설계가 다른 인젝터에 비해 단순하며, 쉬운 설계 난이도에 비해 꽤 좋은 혼합효율을 기대할 수 있다. 또한 인젝터 플레이트에 인젝터들을 밀집하여 배치하도록 가공하기 편하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 전단동축 분사기는 쉬운 설계 난이도에 비해 가공의 허용 오차범위가 상당히 좁아 정밀한 가공이 필요한 단점이 있다[1]. 동축 스월인젝터는 러시아에서 케로신을 사용하는 액체로켓 엔진에 많이 사용되었으며[2], 전단동축 분사기에 비해 높은 특성속도, 즉 연소효율을 기대할 수 있다는 해외의 연구 결과가 있다[3]. 그러나, 동축 스월인젝터는 설계상의 어려움이 단점으로 지적된다[1].

최근, 한국형 발사체를 통한 달 탐사가 주요한 항공우주분야의 이슈로 떠오르면서, 달 착륙 등의 목적으로 추력 조절이 가능한 추진 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 핀틀 인젝터는 Lunar Module Descent Engine(LMDE)에 사용된 바 있으며[4], 일반적으로 형상이 고정된 전단 동축 인젝터 또는 동축 스월 인젝터와 달리 핀틀을 이용해 추진제의 공급 면적을 변화시켜 유량을 스로틀링 하여 추력을 제어하게 된다. 핀틀 인젝터는 또한 추력 제어의 용이함 외에, 인젝터 플레이트에 수많은 분사기 모듈들을 설치하여 무게 증가가 필수 불가결[5]한 전단동축 분사기와 다르게, 단 하나의 핀틀 인젝터로 액체 로켓의 유량 요구조건을 만족시킬 수 있기 때문에 엔진 무게의 경감을 꾀할 수 있다.

일반적인 핀틀 인젝터는 중앙의 핀틀부에서 산화제가 액막 형태로 분사되며, 환형 오리피스에서 분사되는 연료와 충돌하여 분열하게 된다. 형상이 고정된 다른 인젝터에 비해, 핀틀 인젝터에는 구동부가 존재하여 설계상에 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 액체 산소 등 초저온 모사추진제를 이용한 핀틀 인젝터 연소실험의 선행 단계로서 액체질소를 이용한 초저온 분무 실험을 통해 핀틀 인젝터의 초저온 분무 특성을 연구하고, 이미지 가시화 기법을 분석하여 핀틀 연소 실험에 적용하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 초저온 분무 가시화 실험 장치 및 핀틀 인젝터

액체질소를 이용한 핀틀 인젝터 초저온 분무 시험을 수행하기 위한 초저온 분무 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 액체 및 기체 추진제를 모사하기 위하여 반응성이 적은 액체 질소와 기체 질소를 모사추진제로 선택하였다.

액체 질소의 예분사를 통해 배관과 인젝터를 충분히 냉각시켜 분사 전 액체 질소의 기화를 방지한 후, 분무 실험을 실시하였다. 기존 초저온 분무 실험[6]에서는 액체 질소의 가압을 위해 기체질소를 사용하였으나, 기체질소가 액체질소의 낮은 온도에 액화되어 가압에 부정적인 영향을 끼쳐 액화점이 낮은 헬륨으로 대체하였다.

실험에 사용된 핀틀 인젝터의 개략도는 Fig. 2에 나타내었으며, 형상인자는 Table 1에 나타내었다. 액체질소는 중앙의 핀틀 포스트를 통과하여 가시화 챔버로 분사되며 기체질소는 환형 오리피스 갭에서 분사된다. 핀틀의 개도는 설계상으로 0 mm에서 1.0 mm 이상 변할 수 있게 제작되었으나 본 실험에서는 0.8 mm 개도까지 실험을 진행하였다. 개도를 조절하는 마이크로미터는 0.001 mm 단위까지 개도 조절이 가능하다.

액체질소 공급라인의 밸브는 최대한 분사기와 근접하게 배치하여 배관 내에서의 액체질소의

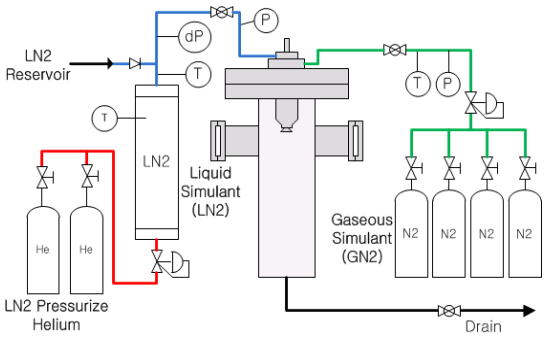


Fig. 1 Schematic of cryogenic spray experiment apparatus.

기화를 최대한 줄였다. 핀틀 인젝터 형상에서 추진제 공급에 가장 중요한 요소는 최소 면적인데, 기체 질소의 경우 Eq. 1과 같이 환형갭의 면적이 최소 공급 면적으로 정의된다.

$$A_{\min,gas} = \pi\left[(R_{post}+t_{ann})^2 - R_{post}^2\right] \quad (1)$$

액체질소의 경우 핀틀 개도가 작을 때에는 핀틀 팁과 포스트 사이에 최소 면적이 형성되며, 핀틀 개도가 일정 이상 커지면 센터 갭과 핀틀 로드 사이의 면적이 최소면적으로 고정된다. 따라서 액체 추진제 최소 공급 면적은 Eq. 2와 Eq. 3으로 구한 값 중 더 작은 값을 사용하여야 한다.

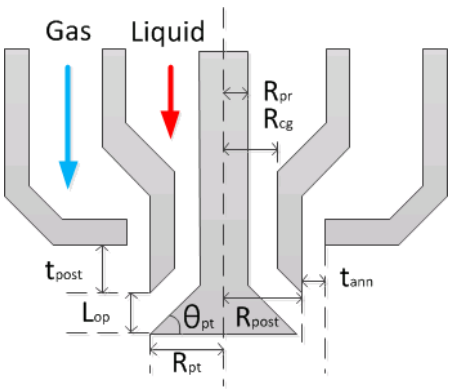


Fig. 2 Schematic of the pintle injector.

Table 1. Dimensions of the pintle injector.

Post radius, R_{post}	4.0	mm
Center gap radius, R_{cg}	2.25	mm
Pintle rod radius, R_{pr}	1.5	mm
Pintle tip radius, R_{pt}	4.0	mm
Annular gap thickness, t_{ann}	0.5	mm
Pintle tip angle, θ_{pt}	40	deg
Post recess length, t_{post}	3.0	mm
opening distance, L_{op}	0.3~0.8	mm

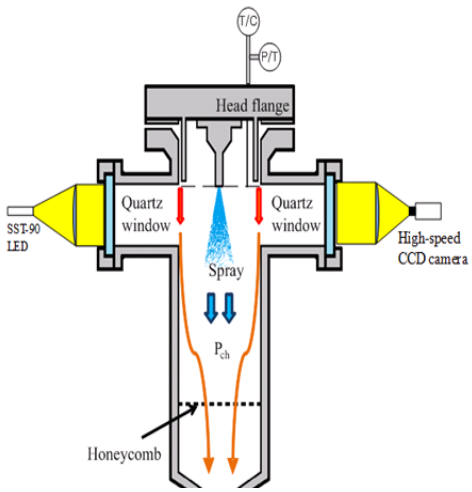
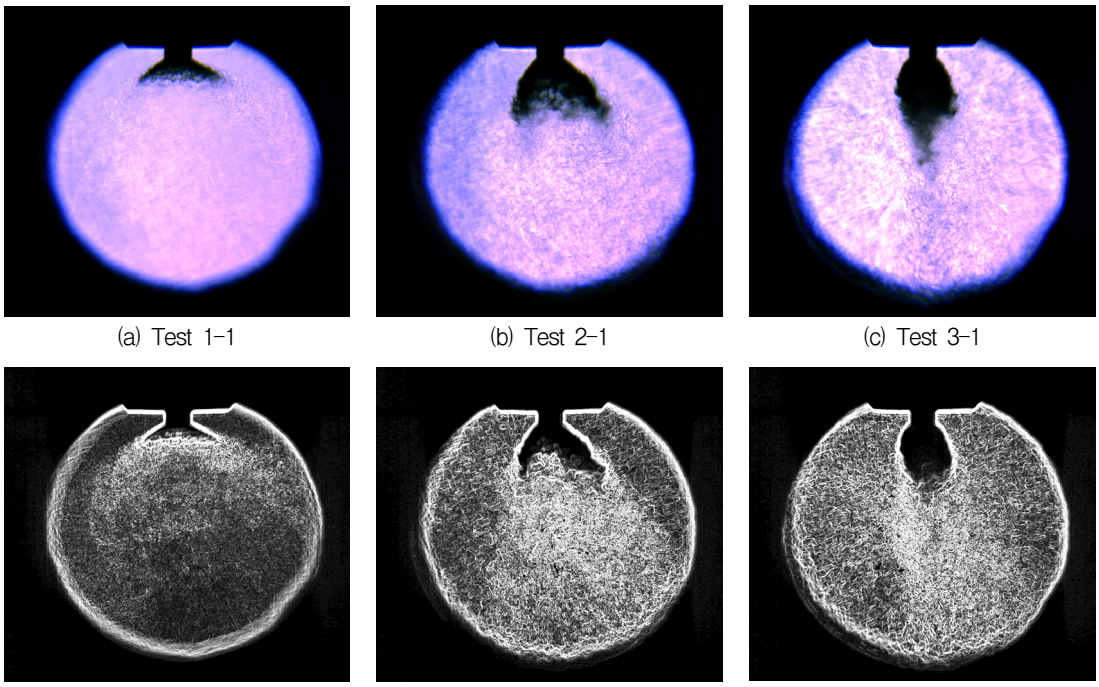


Fig. 3 Schematic of shadowgraph visualization method[6].

Table 2. Experimental Conditions.

		LN_2 single injection			LN_2/GN_2 spray			
		Test 1-1	Test 2-1	Test 3-1	Test 1-2	Test 2-2	Test 3-2	Test 2-3
Opening Distance (mm)		0.3	0.5	0.8	0.3	0.5	0.8	0.5
Supplying Pressure (bar)	LN_2	15	15	15	15	15	15	20
	GN_2	-	-	-	15	15	15	25
$\dot{m}$ of LN_2 (g/s)		169.7	187.8	213.6	115.2	140.7	223.4	195.8
$\dot{m}$ of GN_2 (g/s)		-	-	-	43.3	35.5	30.6	62.3
Velocity of LN_2 (m/s)		48.3	33.0	24.1	32.8	24.3	24.7	35.0
Velocity of GN_2 (m/s)		-	-	-	285.0	223.0	173.1	251.9
Velocity ratio		-	-	-	8.70	9.17	7.00	7.20
Momentum Flux Ratio		-	-	-	1.39	1.62	1.05	1.60



(a) Test 1-1 (b) Test 2-1 (c) Test 3-1

(d) D.G.M.I. of Test 1-1 (e) D.G.M.I. of Test 2-1 (f) D.G.M.I. of Test 3-1

Fig. 4 Shadowgraph image and D.G.M.I of liquid nitrogen single injection according to increasing pintle tip opening distance.

$$A_{\min,liq} = \frac{\pi}{\sin\theta_{pt}}[R_{post}^2 - (R_{post} - L_{op}\sin\theta_{pt}\cos\theta_{pt})^2] \quad \cdots (2)$$

$$A_{\min,liq} = \pi(R_{cg}^2 - R_{pr}^2) \quad (3)$$

그러나, 핀틀 개도가 커져 Eq. 3 으로 최소 면적을 사용하더라도, 액체 추진제의 분사 속도를 구할 때에는 Eq. 2를 기준 면적으로 사용하여야 한다.

분무의 분석을 위하여 운동량 플럭스 비(Momentum flux ratio)를 도입하였는데, 일반적인 전단동축 인젝터에서는 추진제의 분사방향이 같기 때문에 두 추진제의 운동량의 비를 그대로 사용한다. 그러나 핀틀 인젝터에서는 핀틀 팁 각도에 따라 액체 추진제의 분사각이 달라지기 때문에, 핀틀 팁 각도를 고려해주어야 한다. 단, 본 연구에서는 핀틀 팁 각도가 40도로 고정되어 있기 때문에, Eq. 4와 같이 두 추진제의 절대적인 운동량의 비를 사용하여 분무의 거동을 비교, 분석하였다.

$$J = \frac{\rho_{gas} V_{gas}^2}{\rho_{liq} V_{liq}^2} \quad (4)$$

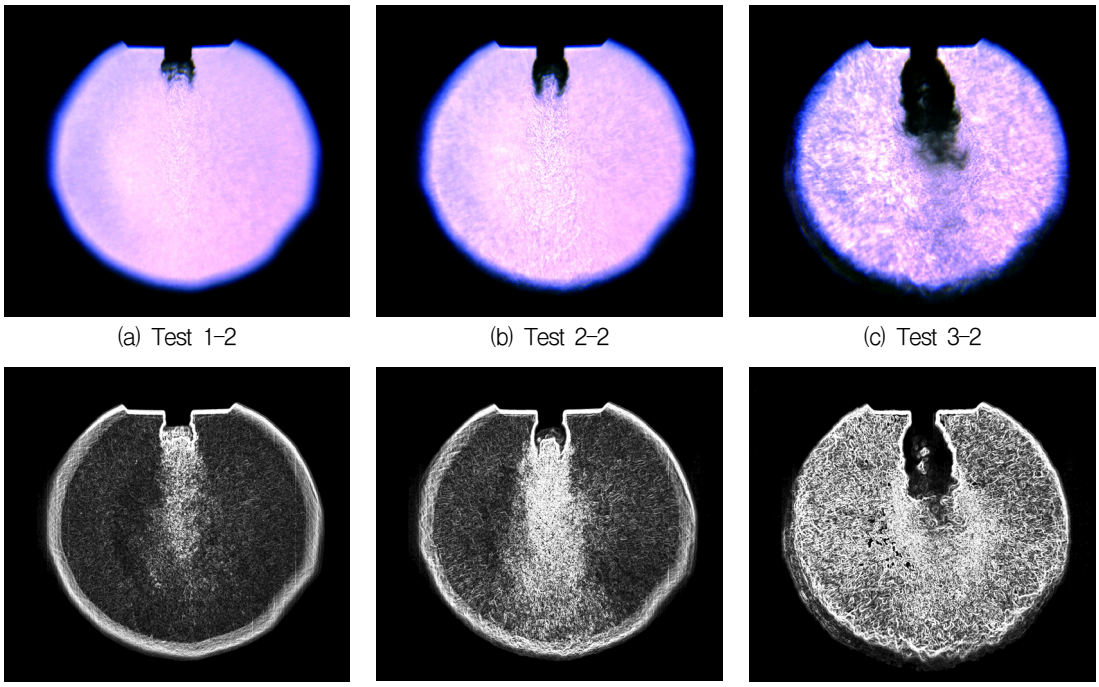
2.2 이미지 가시화 및 후처리 기법

핀틀 인젝터 초저온 분무 이미지의 가시화를 위하여 Fig. 3과 같이 Photron 사의 APX-RS 고속카메라와 SST-90 LED를 이용한 Shadowgraph 기법을 사용하였으며[7], 이미지의 촬영속도는 3000 frame per second(fps), 노출시간은 1 μs로 설정하였다.

이미지 후처리는 이전 연구에서 사용된[7] 밀도 구배 강도 이미지(Density Gradient Magnitude Image, D.G.M.I.)로 변환으로 수행되었다.

2.3 초저온 분무 실험 조건

초저온 분무 가시화 실험은 총 7번에 걸쳐 수



(a) Test 1-2 (b) Test 2-2 (c) Test 3-2

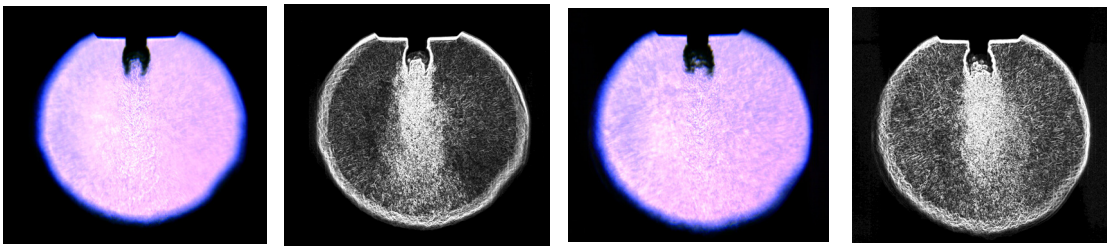
(d) D.G.M.I. of Test 1-2 (e) D.G.M.I. of Test 2-2 (f) D.G.M.I. of Test 3-2

Fig. 5 Shadowgraph images and D.G.M.I of liquid/gaseous nitrogen spray according to increasing pintle tip opening distance.

행되었으며, 각각 실험 조건은 Table 2 에 나타내었다. Test 1-1부터 Test 3-1 은 액체질소 단독분사 실험으로서, 액체 공급압력을 고정한 상태에서 핀틀 개도를 변화시켜 진행하였으며, Test 1-2 부터 2-3 까지는 기체질소를 함께 분사하는 초저온 분무 실험으로, Test 1-1부터 Test 3-1 까지의 실험과 같은 액체질소 공급압력과, 고정된 기체질소 공급압력으로 핀틀의 개도를 변화시켜가며 실험을 진행하였다. Test 2-3 은 Test 2-2에서 추진제 공급압력을 증가시켜서 유량을 늘려 실험을 수행하였다. 액체질소 단독분사의 경우는 핀틀 개도를 증가시킬수록 유량은 늘어나나, 분사속도는 줄어듦을 확인 할 수 있다. 이는 핀틀 개도와 분사 면적이 Eq. 2에 따라 일정 정도 이상으로 증가하면 Eq. 3의 면적 값으로 최소면적이 고정되어, 액체질소 유량의 증가가 분사면적의 증가에 미치지 못하기 때문이다. 그리고 Test 2-2와 Test 2-3은 모사추진제 유량이 변화하는데, 운동량비는 거의 유사한 것으로 계산되었다.

3. 실험 결과

액체질소 단독분사의 Shadowgraph 이미지와 그 밀도구배강도 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 핀틀의 개도가 가장 작은 경우(Test 1-1), 액체질소의 속도가 빠르며 이로 인해 액체질소 시트의 각이 질소의 소산 시까지 잘 유지됨이 관측된다. 하지만 개도가 점점 늘어날수록 액체질소의 분사 속도는 느려지며, 챔버의 드레인으로 인한 힘이 작용하여 액체질소 시트가 분무 가운데로 모이는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 상압 분무 시험[8]과는 다른 결과로, 상압 분무 시험에서는 챔버가 존재하지 않았기 때문에 드레인에 의한 끌림현상이 없었으며, 또한 상압 분무 시험에서 외부의 압력은 항상 1 bar로 일정하기 때문에 공급압력의 변화도 거의 없기 때문이다. 하지만 초저온 분무 실험의 경우 챔버 내에서 진행되었기 때문에, 액체 질소의 기화에 따라 챔버의 압력이 올라가며, 이는 액체 질소 분무에 대



(a) Test 2-2 (b) D.G.M.I. of Test 2-2 (c) Test 2-3 (d) D.G.M.I. of Test 2-3

Fig. 6 Shadowgraph images and D.G.M.I of liquid/gaseous nitrogen spray according to increasing mass flow rate.

한 항력 증가를 유발하였으며, 또한 챔버에서의 드레인으로 하류 방향으로 압력구배가 생겨 상압분무 시험과 다르게 개도가 증가할수록 분무가 가운데로 몰리는 현상을 관측할 수 있었다.

액체질소/기체질소 분무의 Shadowgraph 이미지와 그 밀도구배강도 이미지는 Fig. 5 에 나타내었다. 핀틀의 개도가 늘어날수록 액체질소의 유량은 늘어나며, 이로 인해 가시화 영역에서 액체질소가 차지하는 영역도 늘어난다. Fig. 5(a) 이미지와 Fig. 5(b) 이미지를 비교해보면 액체질소의 상변화가 굉장히 빠르며, 그 가시화 이미지가 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 하지만 밀도구배강도 이미지에서는 확연히 백색의 상변화 영역이 큰 차이가 난다. 그리고 개도가 0.8 mm의 경우인 Fig. 5(c)는 앞서 두 이미지와는 확연히 다른 분무 양상을 보이는데, 액체질소 유량이 증가함에 따라 Shadowgraph 이미지에서 액체질소가 관측되는 영역도 크게 늘어났으며, 밀도구배강도 이미지에서는 백색의 상변화 영역이 줄어들었다. 이는 액체질소 공급량의 급격한 증가가 챔버 압력 상승을 야기시켜, 기체 질소 공급량이 줄어들면서 운동량 플럭스비가 약 1.0 근처로 낮아지고, 이로 인해 액체질소 시트의 분열이 저하된 결과인것으로 보인다.

그리고 Fig. 6에서는 Test 2-2와 Test 2-3의 Shadowgraph 이미지와 밀도구배강도 이미지를 나타내었다. Shadowgraph 이미지에서는 액체질소 분무 형태가 유사한 것으로 보인다. 이는 공급압력 증가로 인해 질량유량만 늘어났을 뿐, 운동량 플럭스비는 거의 변하지 않았기 때문이다. 하지만 밀도구배강도 이미지에서는 더 많은 액체질소의 기화로 인한 온도구배로 가시화영역 배경의 불안정이 더 심한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초저온 분무 실험장치와 고속 카메라를 이용해 핀틀 분사기의 초저온 분무를 가시화하여 분석하였다.

액체질소 단독분사의 경우, 기존의 상압 분무 시험[8]과는 다른 결과로서 드레인이 존재하는 챔버 내에서 실험이 진행되어 개도가 증가할수록 느려지는 액체 분사 속도 및 챔버 드레인으로 인해 아래로 작용하는 압력구배 때문인 것으로 보인다. 이는 실제 액체로켓엔진에서 로켓 노즐을 빠져나가는 유동에 의해 상압 수류시험과는 다른 분무 거동이 나타날 수 있음을 보여준다.

액체/기체 질소 분무 실험의 경우, 운동량 플럭스 비가 늘어날 경우 액체질소의 상변화와 분열이 활발하게 일어나며, 분무의 운동량 플럭스 비가 큰 경우 밀도구배강도 이미지의 하류 백색 상변화 영역이 크고 선명하게 관측된다. 운동량 플럭스비를 유지시키며 액체질소와 기체질소 공급 유량을 동시에 늘린 결과 Shadowgraph 이미지로 나타난 분열양상은 큰 변화가 없었으나, 밀도구배 이미지 액체질소 유량 증가로 인해 배경의 불안정이 더 선명하게 관측되었다.

따라서 핀틀 인젝터 연소 실험에서 급격한 밀도 변화가 수반되는 연료의 미립화 및 연소반응에 대해서 밀도구배강도 이미지를 사용하여 분

석을 수행할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

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

References

1. Long, M.R., Bazarov., V.G. and Anderson, W.E., "Main Chamber Injectors for Advanced Hydrocarbon Booster Engines," *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, A.l., U.S.A., AIAA 2003-4599, Jul. 2003.
2. Sutton, G.P., "History of Liquid-propellant Rocket Engines in Russia, Formerly the Soviet Union," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1008-1037, 2003.
3. Salgues, D., Mouis, G., Lee, S.Y., Kalitan, D., Pal, S. and Santoro, R., "Shear and Swirl Coaxial Injector Studies of LOX/GCH4 Rocket Combustion Using Non-intrusive Laser Diagnostics," *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2006-757, Jan. 2006.
4. Casiano, M.J., Hulka, J.R. and Yang, V., "Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 5, pp. 897-923, 2010.
5. Huzel, D.K. and Huang, D.H., "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines," AIAA, Reston, V.A., U.S.A., Vol. 147, 1992.
6. Kim, D.H., Lee, K.W., Son, M and Koo, J.Y., "Visualization of Gas-centered Swirl Sprays in Sub to Super Critical Conditions," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 26-33, 2014.
7. Lee, K.W., Kim, D.H., Son, M., Han, J.Y. and Koo, J.Y., "Analysis of Supercritical Shear Coaxial Jet Using Density Gradient Magnitude," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 59-66, 2013.
8. Yu, K.J., Son, M., Kim, D.H., Lee, K.W., Shin, B.C., Song., W.S. and Koo, J.Y., "Spray Pattern by a Opening Distance from Pintle Injector," *Proceedings of the 2015 KSPE Spring Conference*, Busan, Korea, May 2015.