

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.4.348

## 극저온 제트 유동에 대한 분사기 형상의 영향

조성호\*, 박구정\*, 길태옥\*, 윤영빈\*\*

## Effect of Injector Geometry on Cryogenic Jet Flow

Seongho Cho\* Gujeong Park\*, Taeock Khil\* and Youngbin Yoon\*\*

## ABSTRACT

Characteristics of cryogenic single jet flow were investigated. Liquid nitrogen was injected into a high-pressure chamber and formed single jet. Ambient condition around jet was changed from subcritical to supercritical condition of nitrogen. Injector geometries also were changed. A shape of the jet and core diameter were measured by flow visualization technique, and core spreading angle was calculated. Flow instability was found at atmospheric pressure condition. As ambient pressure increased, core spreading angle was increased and maintained after certain pressure.

## 초 록

액체 질소를 이용하여 극저온 단일 제트 유동의 특성을 관찰하였다. 고압 챔버 내부에 액체 질소를 분사하여 단일 제트를 생성, 주위기체압력을 변화시킴으로써 아임계 조건부터 초임계 조건의 주위 환경에 따른 제트의 특성 변화를 확인하였다. 또한 분사기의 길이 대 직경비 및 분사기 내부 형상의 변화에 따른 제트의 특성 변화를 파악하였다. 유동 가시화를 통하여 극저온 제트의 형상 및 액주의 지름을 측정하였으며, 이로부터 액주의 확산각을 계산하여 이전 연구 결과와 비교하였다. 아임계 조건 및 초임계 조건에서의 제트의 형상 변화를 관찰하였으며, 주위기체압력이 대기압과 동일할 경우 제트 유동에서 불안정이 발생함을 확인하였다. 또한 주위기체압력이 증가함에 따라 액주의 확산각이 점차 증가하다가 일정 압력 이상에서 거의 일정하게 유지됨을 확인하였다.

**Key Words** : Supercritical Condition(초임계 조건), Cryogenic Jet Injection(극저온 제트 분사), Rocket Engine Injector(로켓 엔진 분사기)

## 1. 서 론

액체 로켓 엔진에서 추진제는 고온 및 고압 조건의 연소실 내부로 분사기를 통하여 분사, 연소된다. 로켓 기술이 발전함에 따라, Table 1과 같이 현대의 로켓 엔진은 Table 2에서 확인할 수 있는 추진제의 초임계 온도 및 압력 이상의 환경

에서 연소 과정을 수행하며, 그 결과 연소실로 분사된 추진제는 아임계 액체상태에서 초임계 유체 상태로 변화하게 된다. 이때 추진제는 상변화 과정에서 높은 밀도의 기체와 유사한 거동을 보이며, 열역학적 물성치는 매우 불안정한 상태가 된다[1-6].

이러한 극저온 유동의 초임계 조건에서의 특성에 대한 연구는 미국의 AFRL[1-3] 및 독일의 DLR[4-6]에서 주로 수행되었으며, 특히 단일 및 동축 제트의 확산 및 분열 특성이 연구되었다. 이와 별개로 물을 이용하여 분사기 형상에 따른 제트 특성 변화와 관련된 연구가 수행되었으며,

† 2011년 1월 20일 접수 ~ 2011년 3월 28일 심사완료

\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소  
교신저자, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr  
서울특별시 관악구 관악로 599

**Table 1. Combustion Chamber Pressure of Liquid Rocket Engines**

Engine	SSME	RD-170	Vulcain	LE-7A
Pc(MPa)	18.9	25	11.4	12.1

**Table 2. Critical Properties of Fluids**

Fluid	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	RP1
P(MPa)	5.04	3.39	1.313	2.17
T(K)	154.6	126.2	33.2	662

그 과정에서 분사기 내부 형상에 따라 발생하는 공동 현상에 대한 다양한 연구가 진행되었다 [7-9]. 그러나 분사기 형상에 따른 극저온 유동의 변화와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않았다.

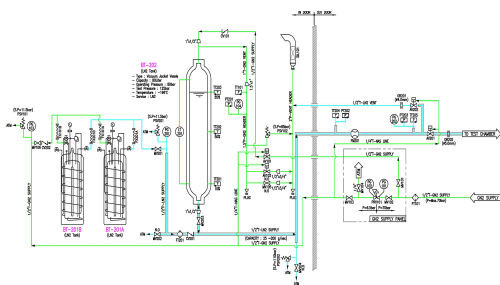
본 연구에서는 단일 제트 유동의 주위기체압력(Pc)을 액체 질소의 아임계 조건으로부터 초임계 조건 압력까지 변화시켰으며, 분사기 내부 오리피스 유입구 형상 및 오리피스 길이 대 직경비(L/d)의 변화에 따른 제트의 형상 변화를 유동 가시화 기법을 이용하여 측정하였다.

## II. 실험 방법 및 조건

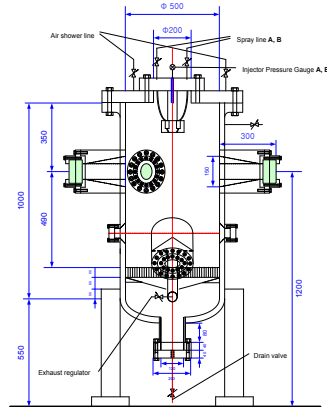
### 2.1 실험 장치

극저온 유체 제트 특성 실험을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 극저온 유체 공급/분사 장치를 구축하였으며, 작동 유체로 액체 질소를 선택하였다. 질소의 경우 Table 2에서 볼 수 있듯이 산소와 임계 압력 및 온도가 매우 유사하며, 산소에 비하여 취급이 매우 용이하기 때문에 실제 로켓 엔진에서 사용되는 액체 산화제를 모사하기에 적합하다.

본 장치에서는 우선 액체 질소를 80 Liter 용량의 런탱크 내부에 충전한 후 이를 기체 질소를 이용하여 가압하여 극저온 액체 질소를 고압 챔



**Fig. 1. P&ID of Cryogenic Fluid Feeding System**



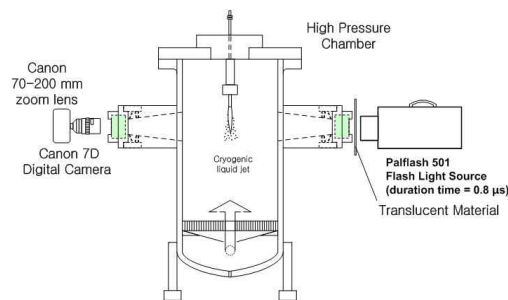
**Fig. 2. High Pressure Chamber**

버 내부로 공급 및 분사하였다. 이때 런탱크 및 배관은 이중 구조로 제작한 후 진공 단열하여, 액체 질소가 중간에 기화가 되는 것을 방지하였다. 고압 챔버의 대략적인 형상은 Fig. 2와 같으며, 고압 챔버 내부에 단일 제트 분사기를 장착하여 챔버 내부 압력에 따른 극저온 제트의 특성 변화를 파악할 수 있도록 하였다. 한편 분사기에 T-type 열전대를 장착하여 분사되는 유체의 온도를 확인하였다.

### 2.2 유동 가시화 기법

Fig. 3과 같이 Backlight imaging 기법을 이용하여 극저온 단일 제트 유동을 가시화하였다. Canon 7D 디지털 카메라, Canon EF 70-200mm zoom lens 및 기타 광학 장치를 이용하여 15 μm/pixel의 확대비로 유동을 촬영하였으며, 이때 Palfash 501 스파크 광원을 이용하여 유동의 촬영 시간을 1μs 이하로 축소, 대략 40m/s 이하의 속도를 갖는 유동의 이미지가 고정되도록 하였다.

각 유동 조건에 대하여 최소 15장 이상 유동 이미지를 촬영한 후, 이로부터 액주의 지름을 측



**Fig. 3. Schematic of Backlight Imaging**

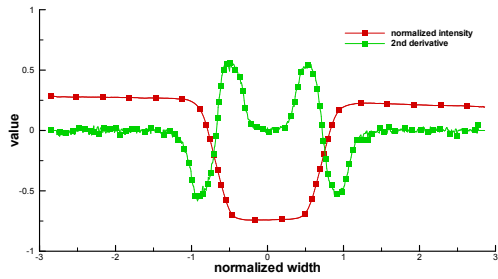


Fig. 4. Jet Core Diameter Measurement

정하였다. 분사기 끝단으로부터의 제트 진행 방향 거리  $x$ 를 분사기 오리피스 지름  $d$ 로 나누어 무차원화한 값  $x/d = 1, 2, 3, 4, 5$  가 되는 지점에서 이미지의 gray level intensity 분포를 확인한 후, 이를 2차 미분하여 그 값이 최소가 되는 위치를 제트와 배경의 경계로 설정하여 이로부터 제트의 지름을 측정하였다. 이 과정이 Fig. 4에 나타나 있다.

### 2.3 실험 조건

단일 제트 분사기의 형상 및 제트 유동 주위 압력 조건의 변화에 따른 극저온 제트 유동의 변화를 관찰하였다. 단일 제트 분사기의 형상은 Fig. 5와 같으며, 분사기 오리피스의 지름은 2mm로 고정하였다. 분사기 오리피스의 길이  $L$ 을 오리피스 직경  $d$ 로 나누어 무차원화한 값  $L/d$ 가 각각 5 및 20의 값을 갖도록 하였으며, 오리피스 유입구를 각각 sharp 및 round 형상으로 변경하여 분사기 형상에 따른 제트 유동의 변화를 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 PTFE(Teflon)을 이용하여 분사기를 단열, 주위 기체로부터의 열전달에 의한 극저온 액체 질소의 기화를 방지하였다 [10]. Table 3에 분사기 형상 조건을 정리하였다.

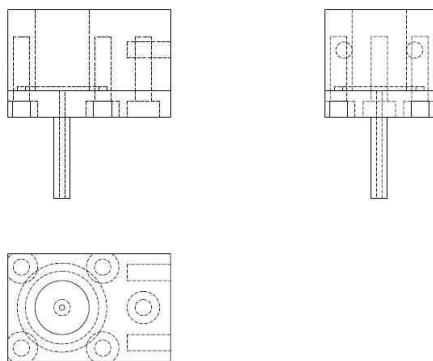


Fig. 5. Injector Design

Table 3. Injector Geometry Parameters

Injector Diameter(mm)	Inlet Shape	L/d
2	round	20
2	sharp	20
2	sharp	5

Table 4. Flow Condition

Flow Condition	Range	
$P_c$ (bar)	1	10, 20, 30, 40
$\Delta P$ (bar)	4, 6, 8	2, 4, 6
$T_{injectant}$ (K)	90~125	

실험 수행을 위하여 유동의 분사 차압  $\Delta P$  및 챔버 압력  $P_c$ 를 변화시켰다. 분사 차압 변화를 통하여 유동 속도가 바뀌도록 하였으며, 챔버 압력을 조절함으로써 유동 주위 환경이 유체에 대하여 아임계 및 초임계 환경으로 변화하도록 하였다. 챔버 내부 온도는 약 280K로 유지하였다. 세부적인 유동 조건을 Table 4에 나타내었다.

## III. 실험 결과

### 3.1 상압 조건의 극저온 제트 특성

챔버 내부 압력이 대기압과 동일할 경우, 모든 유동 조건에서 유동의 불안정 현상이 관찰되었다. 이때 제트의 형상 및 유량이 급격히 변화하였으며, 그 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이  $\Delta P$ 가 증가함에 따라 유동의 변동이 감소하였으며, Fig. 7과 같이 분사기 유입구 형상이 sharp inlet에서 round inlet으로 변화함에 따라 변동의 크기가 일부 감소함을 확인하였다.

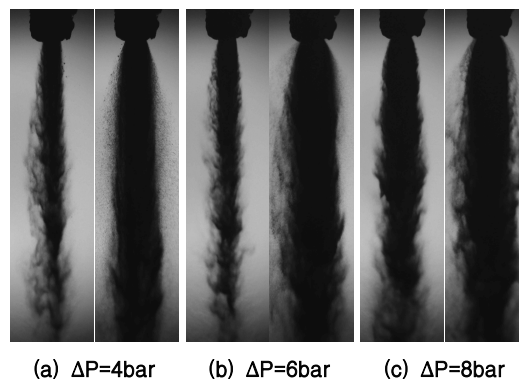
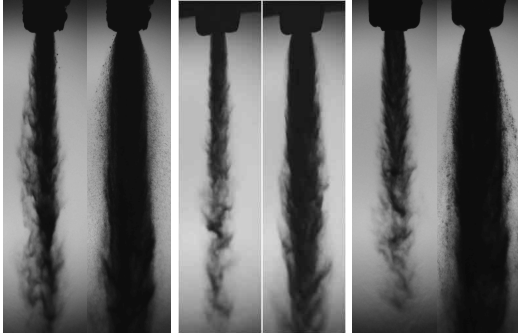


Fig. 6. Fluctuation of the Jet at  $P_c=1\text{bar}$ ;  $d=2\text{mm}$ , round inlet,  $L/d=20$



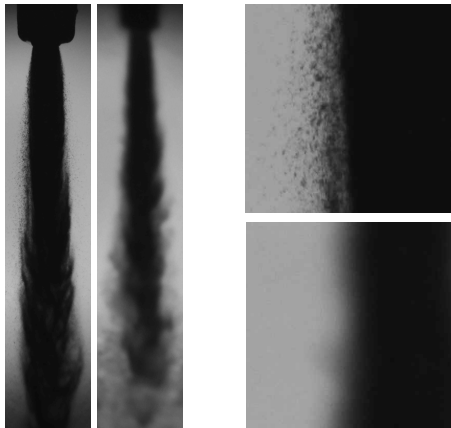
(a) d=2mm, round inlet, L/d=20  
 (b) d=2mm, sharp inlet, L/d=5  
 (c) d=2mm, sharp inlet, L/d=20

Fig. 7. Fluctuation of the Jet at Pc=1bar, ΔP=4 bar

이러한 유동 불안정 현상은 이전 연구[11,12]에서 나타난 공동화 현상에 의한 것으로 생각된다. 극저온 유동에서 공동화 현상은 외부로부터의 열전달에 의하여 주로 발생하며[11], 공동화 현상은 그 유입구 형상에 의하여 영향을 받을 수 있다[12]. 공동화 현상이 분사기 오리피스 유입구에서 주기적으로 발생하여 유동이 통과할 수 있는 단면적이 변화할 경우[8,12] 유동이 불안정하게 생성될 수 있다.

3.2 고압 조건의 극저온 제트 특성

고압 챔버 내부 압력이 증가하였을 때, 상압 조건일 경우와 비교하여 제트가 안정적으로 형성되었다. 또한 분사 차압에 따른 제트 형상의 변화는 크지 않았다. Fig. 8에서 아임계 조건

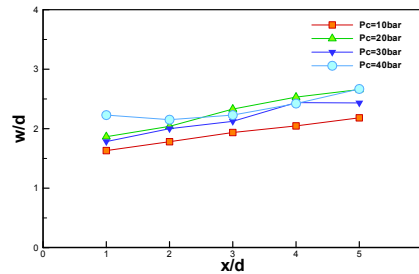


(a) whole image (b) magnified image

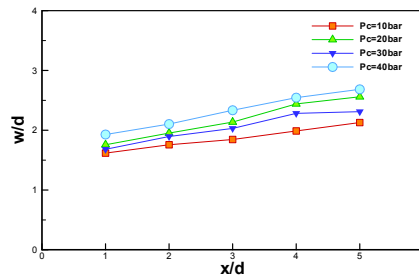
Fig. 8. Image of Cryogenic Jet, ΔP=4bar  
 (a) left: Pc=1bar, right: Pc=40bar  
 (b) upper: Pc=1bar, lower: Pc=40bar

(Pc=1bar)과 초임계 조건(Pc=40bar)에서의 제트 형상을 비교하였다. 아임계 조건에서 제트 유동은 액체 분무와 유사한 거동을 보이며, 액주 표면에서 액적의 분열 현상이 일어남을 확인하였다. 초임계 조건에서 제트 유동은 그 경계가 모호하였으며, 표면에서 액적의 분열 현상을 관찰할 수 없었다. 이와 같은 아임계 및 초임계 조건에서 미립화 및 기화 과정의 차이는 극저온 액체 질소가 분사된 후 주위 조건에 따라 상변화 과정이 달라지는 것에 기인한다. 아임계 조건에서는 액체 질소가 기체 상태로 기화하면서 액적 분열 과정이 발생하는 데 반하여, 초임계 조건에서는 액체 질소가 초임계 유체로 변화면서 액적 분열 과정을 관찰할 수 없게 된다[1-6].

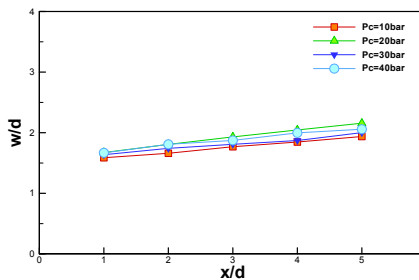
앞서 설명한 유동 가시화 기법을 이용하여 단일 제트 유동의 액주 지름을 측정하였다. Fig. 9,



(a) d=2mm, round inlet, L/d=20



(b) d=2mm, sharp inlet, L/d=5

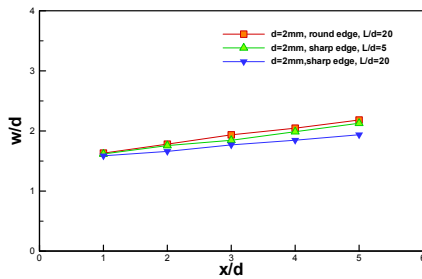


(c) d=2mm, sharp inlet, L/d=20

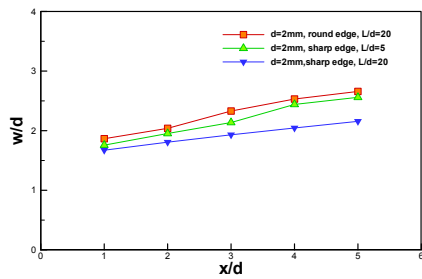
Fig. 9. Jet Core Width for each Injector, ΔP=4bar

10에서 제트의 진행 방향 및 이에 따른 액주 지름의 변화를 각각 무차원화( $x/d$ ,  $w/d$ )하여 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 주위기체압력이 10bar에서 20bar로 증가하면서 액주 지름이 크게 증가하였으며 이후 압력 증가에 따라 지름은 약간 감소하거나 일정한 값을 유지하였다. 이러한 주위기체압력이 액주 지름에 미치는 영향은 분사기 유입구 형상이 sharp inlet이며  $L/d=20$ 인 경우 크게 감소하였다.

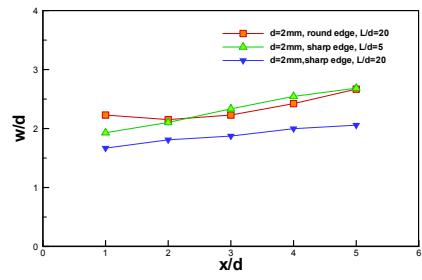
Fig. 10에서 동일한 유동 조건( $\Delta P=4bar$ )에서 분사기 형상에 따른 액주의 지름을 비교하였다. 주위기체압력이 증가함에 따라 유입구 형상이 sharp inlet인 경우, round inlet인 경우에 비하여 액주 지름이 뚜렷하게 감소함을 확인하였다. 한편 round inlet,  $L/d=20$ 인 분사기와 sharp inlet,  $L/d=5$ 인 분사기의 경우 실험 결과가 유사함을 확인하였다.



(a)  $P_c=10bar$



(b)  $P_c=20bar$



(c)  $P_c=40bar$

Fig. 10. Jet Core Width for each Chamber Pressure,  $\Delta P=4bar$

### 3.3 극저온 제트 액주의 확산각

제트의 지름 측정 결과로부터 제트 액주 확산각을 계산하여 주위기체 대 분사유체의 밀도비 변화에 따른 확산각의 변화를 Fig. 11에 도시하였다. 모든 분사기 형상에 대하여 확산각 변화의 경향은 유사하며, 밀도비의 값이 0.04가 될 때까지 증가한 후 값이 거의 일정하게 유지됨을 확인하였다. 이는 특정 주위기체 압력에서 제트 표면의 기화 특성이 변화함을 의미하며, 이러한 결과는 이전 연구 결과[1]와 유사하다.

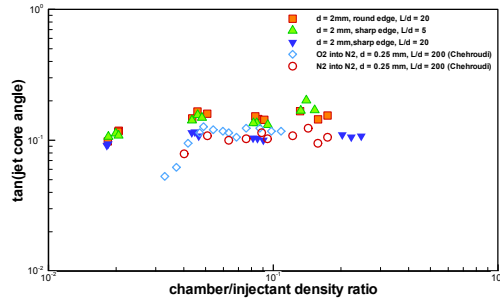


Fig. 11. Jet Core Spreading Angle (compared with the results of Chehroudi et al.[1])

## IV. 결 론

액체 질소를 이용하여 극저온 유체 단일 제트의 특성을 조사하였다. 형상 가시화 기법을 통하여 제트의 진행 방향에 따른 액주의 지름을 측정 한 후, 이로부터 액주의 확산각을 계산하였다. 분사기 오리피스의 유입구 형상 및 길이 대 직경비를 형상 변수로 이용하였으며, 분사 차압 및 주위기체압력을 유동 조건으로 하여 유동 주위 환경을 질소의 아이계 및 초임계 조건으로 설정한 후 실험을 수행하였다.

유동의 주위기체압력이 상압일 경우, 모든 실험 조건에 대하여 불안정 유동이 관찰되었다. 이러한 불안정성은 분사기 오리피스의 유입구 형상이 round inlet일 경우와 분사 차압이 클 경우 감소하였다. 유동 불안정성의 원인은 외부 열전달에 의한 공동화 현상으로 생각되며, 유입구 형상에 따라 공동화 현상의 정도가 변화하는 것으로 보인다.

보다 높은 주위기체압력 조건에서, 극저온 제트는 안정적으로 형성되었다. 이때 분사 차압에 의한 제트 특성 변화는 거의 발생하지 않았다. 주위기체압력이 증가함에 따라 제트의 형상이 변화하며, 이때 아이계 조건에서 액체 분무의 특성

을 보이나 초임계 조건에 근접함에 따라 밀한 기체 제트의 특성을 보임을 확인하였다. 액주 지름 측정 결과로부터 액주의 확산각을 계산하였으며, 이를 주위기체 대 분사 유체 밀도 비의 변화에 따라 도시하여 이전 연구 결과[1]와 비교하였다. 액주의 확산각은 round inlet,  $L/d=20$  인 분사기와 sharp inlet,  $L/d=5$  인 분사기의 경우 유사한 값을 보였으며, sharp inlet,  $L/d=20$  인 분사기의 경우 상대적으로 작은 값을 보였다. 또한 전반적인 경향은 주위기체압력이 증가함에 따라 확산각이 증가하며 특정 압력 이후 확산각이 유지됨을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL)과 중견연구자지원사업(핵심연구)으로부터 지원받아 수행되었습니다(No. 0498-20100025, 0498-20100003).

### 참고문헌

1) Chehroudi, B., Talley, D. G. and Coy, E., "Visual Characteristics and Initial Growth Rates of Round Cryogenic Jets at Subcritical and Supercritical Pressures", *Physics of Fluids*, Vol. 14, 2002, pp. 850-861.

2) Woodward, R. D. and Talley, D. G., "Raman Imaging of Transcritical Cryogenic Propellants", *AIAA 96-0468*, 1996.

3) Davis, D. and Chehroudi, B., "Measurements in an Acoustically Driven Coaxial Jet under Sub-, Near-, and Supercritical Conditions", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, 2007, pp. 364-374.

4) Oschwald, M. and Schik, A., "Supercritical Nitrogen Free Jet Investigated by Spontaneous Raman Scattering", *Experiments in Fluids*, Vol. 27, 1999, pp. 497-506.

5) Mayer, W., Schik, A., Schaffler, M. and Tamura, H., "Injection and Mixing Processes in High-Pressure Liquid Oxygen/Gaseous Hydrogen Rocket Combustors", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, 2000, pp. 823-828.

6) Branam, R. and Mayer, W., "Characterization of Cryogenic Injection at Supercritical Pressure", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, 2003, pp. 342-355.

7) Lefebvre, A. H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1989.

8) Nurick, W. H., "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98, 1976, pp. 681-687.

9) Hiroyasu, H., "Spray Breakup Mechanism from the Hole-Type Nozzle and Its Applications", *Atomization and Sprays*, Vol. 10, 2000, pp. 511-527.

10) Davis, D., *On the Behavior of a Shear-Coaxial Jet, Spanning Sub- to Supercritical Pressures, with and without an Externally Imposed Transverse Acoustic Field*, Ph.D. Thesis, 2006.

11) Utturkar, Y., Wu, J., Wang, G. and Shyy, W., "Recent Progress in Modeling of Cryogenic Cavitation for Liquid Rocket Propulsion", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, 2005, pp. 558-608.

12) Lee, C., Roh, T.-S., "Flow Instability due to Cryogenic Cavitation in the Downstream of Orifice", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No.3, 2009, pp. 643-649.