

## 초음속 후향 계단 유동에서 액체 분사로 인한 초음속 제트의 구조 변화

안상훈<sup>1</sup>, 한두희<sup>1</sup>, 최한영<sup>1</sup>, 서성현<sup>2</sup>, 성홍계<sup>3,†</sup><sup>1</sup>한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과<sup>2</sup>국립한밭대학교, 기계공학과<sup>3</sup>한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부Structural Change of Supersonic Jet Due to Liquid Injection  
in Supersonic Backward Facing Step FlowSang-Hoon Ahn<sup>1</sup>, Doo-Hee Han<sup>1</sup>, Han-Young Choi<sup>1</sup>, Seong-Hyeon Seo<sup>2</sup> and Hong-Gye Sung<sup>3,†</sup><sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering, Korea Aerospace University<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University<sup>3</sup>School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

## Abstract

The experiment on the liquid jet in crossflow in supersonic BFS (backward-facing step) flow was conducted to investigate the mixing characteristics. The working fluids are nitrogen and water. The shadow graph technique was used to visualize the flow field. Images captured by the high-speed camera were applied to analyze the flow phenomena. The liquid jet was injected at the re-circulation zone created by the supersonic jet flow. Experimental conditions are defined based on the pressure of the nitrogen gas chamber and pressurized liquid tank. In respective cases, the penetration depth of liquid jet and location of the Mach disc were observed to be proportional to the momentum ratio of gas and liquid jets.

## 초 록

초음속 유동이 흐르는 후향 계단에서 액체 제트가 수직으로 분사되는 유동의 혼합 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 작동 유체는 질소와 물을 사용하였다. 섀도우그래프 기법을 사용하여 유동을 가시화하였으며, 초고속 카메라로 촬영된 영상은 시간 평균화 처리를 통해 분석에 사용하였다. 액체 제트의 주입구는 초음속 질소가스 유동에 의해 생성되는 재순환 영역 내부에 위치하며 유동방향에 수직하게 분사된다. 실험 조건은 질소가스 챔버와 액체 가압탱크의 압력에 따라 나누었다. 각 실험 조건에서 분사된 액체 제트의 침투 깊이와 마하 디스크의 생성 위치의 변화를 관찰하였으며, 운동량비에 따른 유동의 구조 변화에 대해 고찰하였다.

**Key Words:** Jet in cross flow (횡단류 유동), Liquid jet (액체 제트), Supersonic flow (초음속 유동), Backward Facing Step (BFS; 후향 계단)

## 1. 서 론

횡단류 가스 유동에 분사되는 액체 제트는 고속으로 이동하는 물체의 조향이나 공기 흡입식 연소기의 연료 분사, 가스터빈 냉각 스프레이 및 가스-스팀 사

출장치 등 넓은 영역에 적용된다. 다양한 분야의 설계 및 개발 과정에서 액체 제트의 침투 깊이, 액적 분열, 혼합 특성 등의 유동구조는 성능에 큰 영향을 미치는 주요 설계 변수이다. 횡단류 가스에 액체 제트가 분사되는 과정은 물리적으로 복잡하기 때문에 심도 깊은 연구가 요구된다.

Nejad 등[1]은 마하수 3의 초음속 횡단류 가스에 액체 제트의 액적의 크기, 표면장력 그리고 점성의 상관 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Perurena 등[2]은 마하수 6의 초음속 횡단류 가스에

Received: Sep. 29, 2019 Revised: Nov. 7, 2019 Accepted: Nov. 24, 2019

† Corresponding Author

Tel: +82-10-5275-9196, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

액체 제트 인젝터의 종횡비와 침투 깊이, 측면 확장 상 관 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Fan 등 [3]은 오일러리안-라그랑지안 (Eulerian-Lagrangian) 기법을 이용하여 초음속 횡단류에 분사되는 액체 제트의 액적 분열 모델과 액적의 크기를 모사하는 수치적 연구를 수행하였다. R. Hu 등[4]은 단순히 초음속 횡단류에 액체 제트가 분사되는 것이 아니라 액체 제트 상류에 가스 제트가 공존하는 형상에서 실험적, 수치적 연구를 수행 하였다. J. Hu 등[5]은 스크램 제트 연료 분사를 스트럿만을 사용한 경우와 벽과 스트럿에서 분사하는 경우에 대해서 케로신 연소 실험을 수행하였다. Kim 등[6]은 다량의 냉각제가 분사되는 가스-스팀 발사체계에서 냉각제 분사조건에 따른 냉각 효율 및 발사체 사출 성능의 변화를 수치적 연구를 수행하였다.

앞서 언급된 바와 같이, 단순히 초음속 횡단류에 액체 제트가 분사될 뿐 만 아니라 복합적 현상이나 응용 분야에 적용하는 방향의 연구들이 진행되고 있다. 본 연구는 초음속 횡단류에 다량의 물을 분사하였으며, 혼합 성능의 향상을 위해서 후향 계단형상을 적용하였다. 실험을 통해 운동량비에 따른 유동구조 분석을 수행하였다.

## 2. 본 론

스탱크에서 토출된 질소가스가 레귤레이터(regulator)를 통해 설정 압력으로 감압 되며, 뉴메틱 밸브(pneumatic valve)를 작동하여 실험 부로 주입되는 가스를 조절한다. 액체 제트는 개별 질소 가스를 이용해 물탱크를 가압하고, 뉴메틱 밸브를 이용하여 조절한다. 초음속 질소 가스 유동에 의해 생성된 재순환 영역 내부에 액체 제트를 주입하여 질소 가스와의 혼합 특성을 관찰할 수 있다.

Figure 2는 실험부의 형상을 나타낸다. 챔버에 주입된 질소 가스는 축소 노즐을 통해 질식(choking)되며 초음속 유동이 생성된다. 노즐 출구를 빠져 나온 유동은 후향 계단을 지나면서 팽창하며, 계단 하류 부근에서 재순환 영역을 생성하며 하류로 흘러간다. 재순환 영역으로 주입된 물과 질소 가스가 혼합되며 후방의 배기 덕트를 통해 빠져나가게 된다.

실험부 내 유동은 웨도우그래프(shadowgraph) 기법을 이용하여 가시화하였다. 웨도우그래프 기법은 Fig. 3과 같이 적용하였다. 점 광원에서 부채꼴 형으로 확산되는 빛을 콘덴서 렌즈를 통해 평행하게 만들고, 평행한 빛은 피사체를 통과한다. 이 때 유동 밀도 차이에 따라 빛의 투과율이 변화하며, 이 현상을 초고속 카메라[7]로 촬영하여 유동을 가시화할 수 있다. 초고속 카메라의 영상은 해상도 1350 x 988 픽셀을 초당 1000 프레임으로 촬영하였으며, 셔터 개폐 속도는 1/250000 초이며, 조리개 값은 F5.6으로 설정하였다. 촬영된 영상에서 1 mm 당 픽셀의 수는 약 21.6개이다.

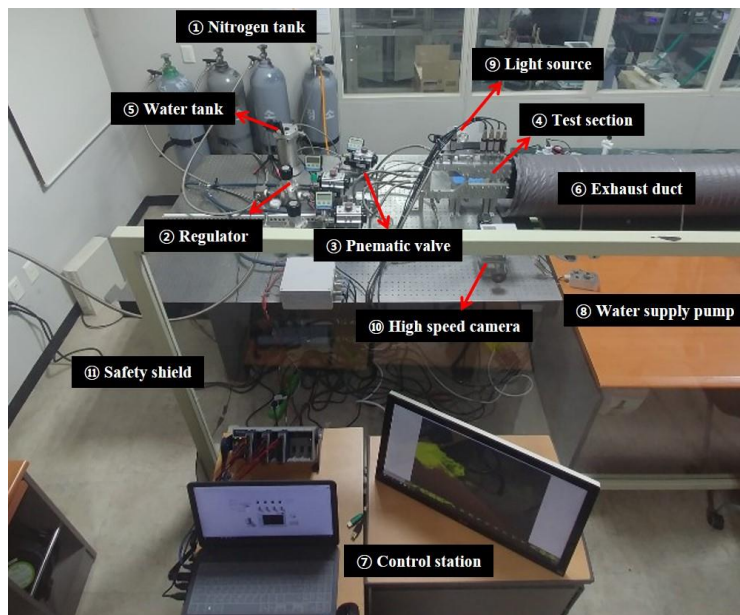


Fig. 1 Experimental Device Configuration

### 2.1 실험 장치 구성

Figure 1은 실험 장치의 전체 구성을 나타낸다. 가

Figure 4는 실험 시퀀스를 도식화한 것이다. 질소 가스가 주입된 후 0.5초의 지연시간을 주어 가스 유동

을 안정화시킨다. 이후 가압 물탱크의 뉴메틱 밸브를 가동하여 재순환 영역에 액체 제트를 분사하고 약 1초간 초고속 카메라로 내부 현상을 촬영한다. 일련의 과정은 실험 제어용 PC와 NI-cDAQ[8, 9] 보드 통해 제어된다.

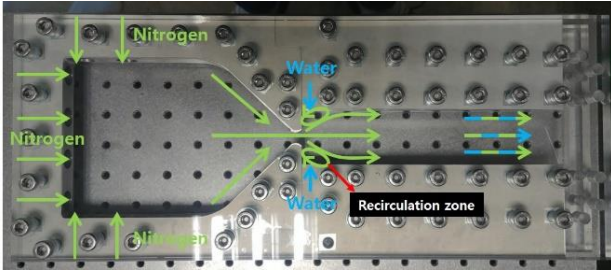


Fig. 2 Test Section

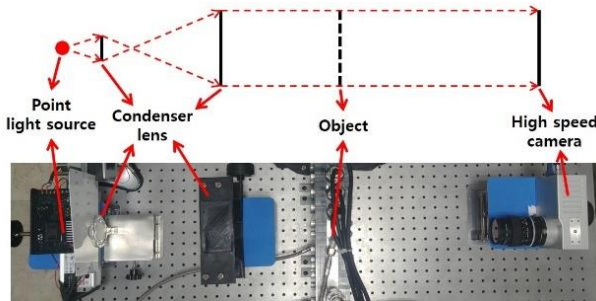


Fig. 3 Shadowgraph Schematic & Device Setting

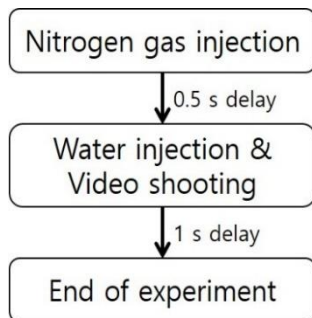


Fig. 4 Experiment Process

### 2.2 실험부 설계

실험부는 20 mm 두께의 알루미늄으로 제작하였으며, 유동의 가시화를 위해서 양측면은 20 mm 두께의 투명한 아크릴로 제작하였다. 알루미늄과 아크릴판 사이에는 가스의 기밀을 위해 0.5 t의 실리콘 시트를 설치하였다. 챔버로 유입된 질소 가스가 질식되도록 질소 가스 공급관과 노즐목의 면적비를 0.28로 선정하였다. 노즐 출구 하류의 혼합 영역의 높이는 41.2 mm 이고, 길이는 199 mm 이다. 물의 주입을

위한 오리피스는 직경이 1.5 mm이고 노즐 출구로부터 7 mm 하류에 위치한다. 이는 질소가스에 의해 생성되는 재순환 영역 내부에 위치한다. 각 설계 수치는 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of Test Section Geometry

Parameter	Dimension
Test Section Width	20 mm
Test Section Height	41.2 mm
Mixing Zone Length	199 mm
Water Orifice Diameter	1.5 mm
Water Orifice Location	7 mm (from nozzle exit)
Nozzle Throat	8 mm
Area Ratio ( $A_{N_2} / A_{throat}$ )	0.28

### 2.3 실험 조건

실험 조건은 실험부의 압력 ( $P_{cham}$ )과 물 공급 압력 ( $P_{water}$ )을 기준으로 설정하였다.  $P_{cham}$ 은 4, 6, 8 bar로 선정하였으며,  $P_{water}$ 는 1 bar,  $P_{cham} - 2$  bar,  $P_{cham}$ ,  $P_{cham} + 2$  bar로 선정하여 총 12개 케이스를 실험하였다. 각각의 케이스에서 질소 가스의 질량 유량, 물의 질량 유량은 Table 2와 같고, 질소 가스와 물의 단위 부피당 운동량비는 Table 3과 같다. 질소 가스의 질량유량의 계산에서, 실험부의 단면은 원형이 아닌 사각형이므로 수력 직경( $D_h$ )을 이용하여 계산하였다.

$$Mom. ratio = \rho_{N_2} v_{N_2} / \rho_{H_2O} v_{H_2O} \quad (1)$$

$$D_h = 2ab / a + b \quad (2)$$

Equation 1에서  $\rho$ 는 밀도를 의미하고,  $v$ 는 속도를 의미한다. Equation 2에서  $a$ 와  $b$ 는 노즐 목 단면의 가로, 세로 길이를 의미한다.

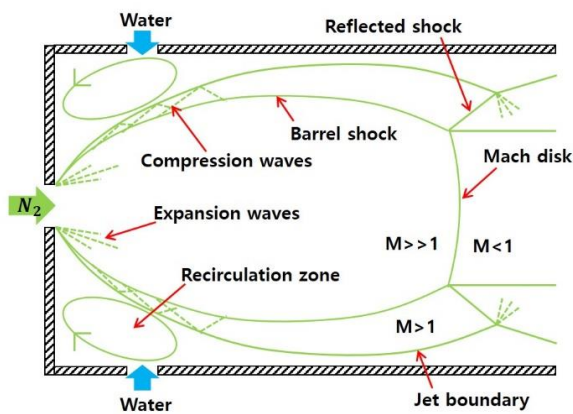
노즐 출구를 통과한 질소 가스의 유동구조는 Fig. 5와 같다. 노즐 출구를 통과한 질소 가스는 팽창파를 생성하며 속도가 빨라지고, barrel shock을 생성한다. 제트 경계(jet boundary)와 barrel shock 사이에 압축파가 생성되며, 하류에서 마하 디스크가 생성되며 하류유동의 마하수가 1보다 작아지게 되며, 후향 계단과 제트 경계 사이의 공간에 재순환 영역이 생성된다. 재순환영역에 액체 제트를 주입하여 실험을 진행하였다.

**Table 2.** Mass Flowrates of N2 and Water

	Gauge pressure (bar)	Mass Flowrate (g/s)
N2 Chamber	4	119.3
	6	117.0
	8	214.7
Water Tank	1	21.3
	2	27.2
	4	35.1
	6	41.5
	8	47.1
	10	52.0

**Table 3.** Momentum Ratios per Unit Volume

$P_{water}$ (bar)	$P_{cham}$		
	4 bar	6 bar	8 bar
1	10.4	7.4	5.8
2	13.2	-	-
4	17.1	12.2	-
6	20.2	14.4	11.2
8	-	16.4	12.7
10	-	-	14.1



**Fig. 5** Flow Structure of Nitrogen Gas

**2.4 실험 결과**

Figure 6은 MATLAB을 이용하여 정상상태가 된 유동을 시간평균화 한 결과이다. Fig. 6의 (a)-(d)는  $P_{cham}$  이 4 bar,  $P_{water}$  가 1 bar, 2 bar, 4 bar, 6 bar인 경우 이다. Figure 6의 (e)-(h)는  $P_{cham}$  이 6 bar인 경우에  $P_{water}$  가 1, 4, 6, 8 bar인 경우이며, (i)-(l)은

$P_{cham}$  이 8 bar인 경우에  $P_{water}$  가 1, 6, 8, 10 bar인 경우이다.  $P_{cham}$  이 8 bar이고  $P_{water}$  가 1 bar, 6 bar인 케이스(Fig. 6; (i), (j))에서 급격한 질소가스 팽창에 의한 결로현상으로 데이터의 왜곡이 발생하였다.  $P_{water}$  가 8 bar, 10 bar인 경우에는 물의 공급량이 많아 지고 침투 깊이가 깊어 지며 질소 가스가 팽창할 공간이 줄어들어 결로 현상이 발생하지 않았다. Figure 6의 (e)와 (i)의 경우 주입된 물의 운동에너지가 부족하기 때문에 액체제트가 가스와 액체의 경계면인 barrel shock을 관통하지 못하는 것을 볼 수 있다.  $P_{water}$  가 증가함에 따라 액체제트가 경계면을 관통하는 현상이 관측된다.

이미지의 정량적인 비교를 위해서 평균화 된 이미지를 밝기의 정도인 강도 (intensity)로 데이터화 하였다. 비교 위치는 노즐 출구로부터 10, 16, 28, 35 mm 하류에 위치하며, Fig. 7와 같이 표시하였다. 각 위치 데이터를 이용한 비교 그래프는 Fig. 8과 같다. Figure 8의 그래프에서 강도의 값이 크면 질소의 분포가 지배적이고, 강도의 값이 작으면 물의 분포가 지배적임을 의미한다.

$P_{water}$  가 1 bar인 경우(Fig. 8; (a)-(d))에서, 10 mm, 16 mm 위치(Fig. 8; (a), (b))의 질소 가스의 분포 영역은  $P_{cham}$  이 8, 6, 4 bar 순으로 넓었다. 이는 노즐 출구를 통과한 가스의 팽창이 8 bar의 경우가 가장 강하게 일어나기 때문이다. 8 bar의 경우, 얼음의 생성으로 인해 질소 가스가 분포하는 영역에서 강도의 값이 비교적 적었다. 28 mm 위치(Fig. 8; (c))에서는 4 bar의 경우, 마하 디스크의 위치가 비교적 상류에 위치하고, 6, 8 bar의 경우에는 하류에 위치하기 때문에 이와 같은 강도 분포의 차이를 보였다. 35 mm 위치(Fig. 8; (d))에서 4 bar의 경우에, 물이 존재하는 영역의 분포가 고른 형태를 보였으며, 6 bar, 8 bar의 경우에는 마크 디스크 하류의 아음속 영역에 물이 빨려 들어가 작은 크기의 강도 값 분포 영역이 있다. 그리고 상, 하단의 벽을 따라 흘러가는 물과 마하 디스크 하류의 물 영역의 사이에 강도가 큰 구간이 존재한다.  $P_{water} = P_{cham} - 2$  bar인 경우(Fig. 8; (e)-(h)), 8 bar 경우에서 얼음으로 인한 데이터의 왜곡이 두드러졌다. 10 mm, 16 mm 위치에서의 데이터(Fig. 8; (e), (f))는 물의 침투 깊이가 깊어 졌기 때문에 Fig. 8의 (a), (b) 보다 강도가 높은 영역이 좁게 나타났다. 28 mm 과 35 mm 위치(Fig. 8; (g), (h))의 경우, 마크 디스크의 위치가 상류로 이동하였기 때문에 Fig. 8의 (d)에서 관찰되었던 유동의 형태가 상류에서부터 관찰되었다. 그리고 마크 디스크 하류에 생성된 물이 존재하는 영역의 크기가 줄어들었다. 이는 주입된

물이 제트 경계를 뚫고 들어가고, 상, 하단 벽 주변에 물이 존재하는 영역의 크기가 증가하여 발생한 현상이다.  $P_{water} = P_{cham}$  인 경우(Fig. 8; (i)-(l))와  $P_{water} = P_{cham} + 2$  경우 (Fig. 8; (m)-(p))도 물의 침투 깊이가 깊어짐에 따라 질소가 분포하는 영역이 줄어들었고, 마하 디스크의 위치가 점차 상류로 이동하는 동일한 경향을 보였다. Figure 8 (j)의 질소 가스 제트가 분포하는 중심 영역에서, 6 bar의 경우보다 8 bar의 경우의 강도가 낮은 것은 얼음의 생성이 여전히 남아 있는 것으로 보인다. Figure 8의 (n)에서는 중심부의 강도가 6 bar와 8 bar가 비슷한 것으로 보아, 얼음의 생성이 사라졌다고 판단된다.

Figure 9, 10은 질소 챔버 압력( $P_{cham}$ )과 물 압력( $P_{water}$ )에 따른 침투 깊이와 마하 디스크 위치의 변화를 나타낸다. 질소 챔버 압력이 낮을수록 침투 깊이가 커지는데, 이는 질소가스의 초음속 제트의 운동량이 작아지므로 물의 침투가 더 용이하기 때문이다. 반면에 질소 챔버 압력이 클수록 마하 디스크의 위치는 커지는데, 이는 질소 챔버 압력이 클수록 더 강한 초음속 제트가 형성되기 때문이다. 또한 물 압력이 클수록 침투 깊이가 커져서 마하디스크의 위치는 감소한다.

특이점은 질소 챔버 압력이 4 bar 일 때에 마하 디스크의 위치는 큰 변화가 없는데, 이는 초음속 제트의 크기가 상대적으로 작기 때문에 물 분사의 영향을 적게 받는다. 위의 분석 내용은 Fig. 6 에서 시각적으로 확인할 수 있다. 물 분사압이 1 bar인 경우에서 질소 챔버 압력이 6 bar, 8 bar인 결과(운동량비(물의 운동량/질소의 운동량)가 가장 작은 두 케이스)에서 물의 침투 깊이가 9.54 mm 및 9.28 mm이며, 마크 디스크의 위치가 각각 29.86 mm 및 29.79 mm이다. 이는 운동량비가 7.4 이하에서 주입된 물이 제트 경계를 제대로 통과하지 못했기 때문에 유사한 결과를 보이는 것이다.

Figure 11, 12는 Fig. 9, 10에서 나타낸 압력 변수를 운동량비에 따라 나타내 것이다. 침투 깊이와 마하 디스크의 위치 모두가 운동량비에 따라 선형적 관계를 나타낼을 알 수 있다. 단지 질소 챔버 압력이 4 bar 일 때에 마하 디스크의 위치가 선형적 관계가 벗어 나는데 이는 위에서 설명하였듯이 초음속 제트의 크기가 상대적으로 작기 때문에 물 분사의 영향을 적게 받기 때문이다.

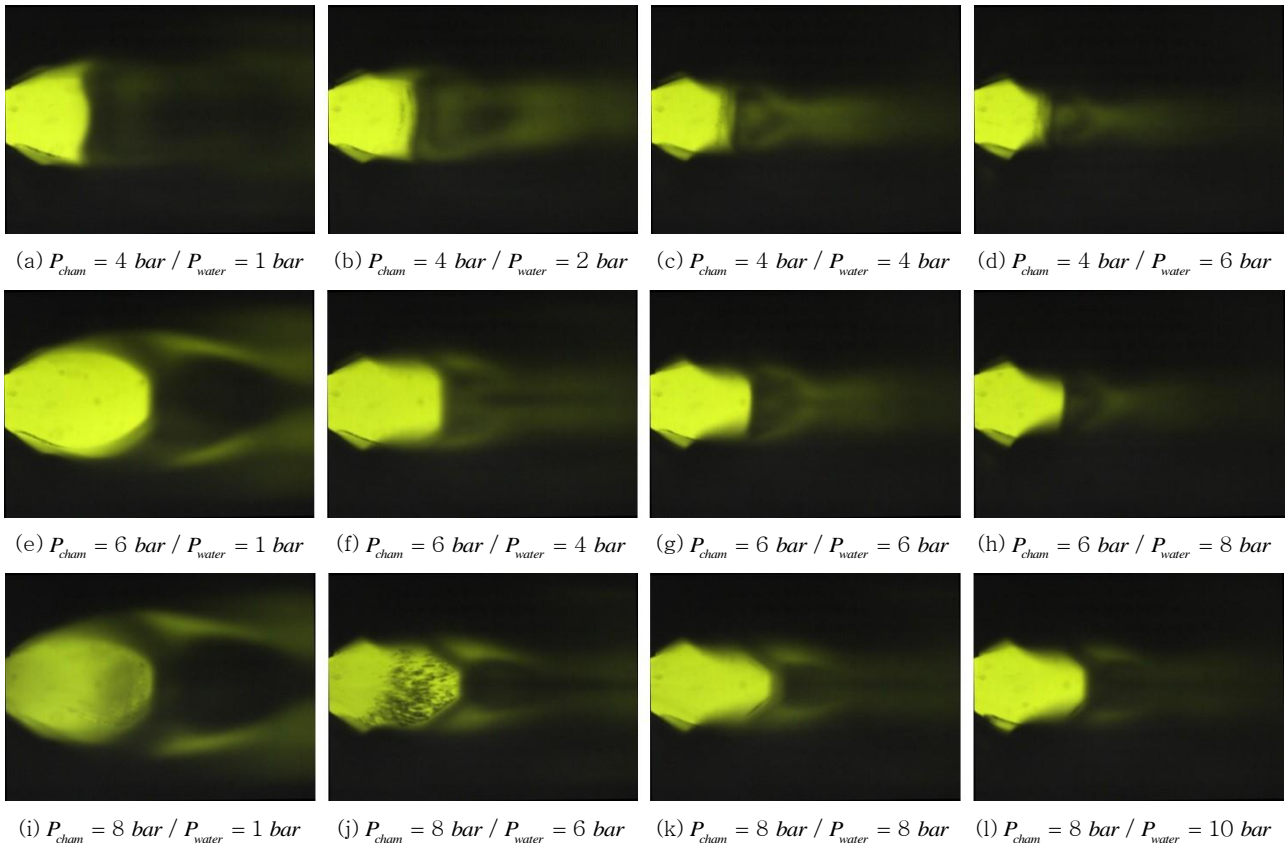


Fig. 6 Averaged Images of Experimental Results

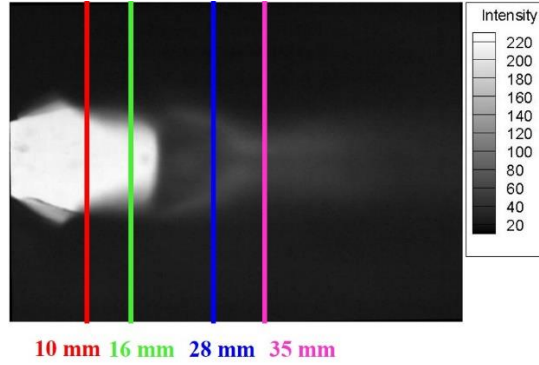
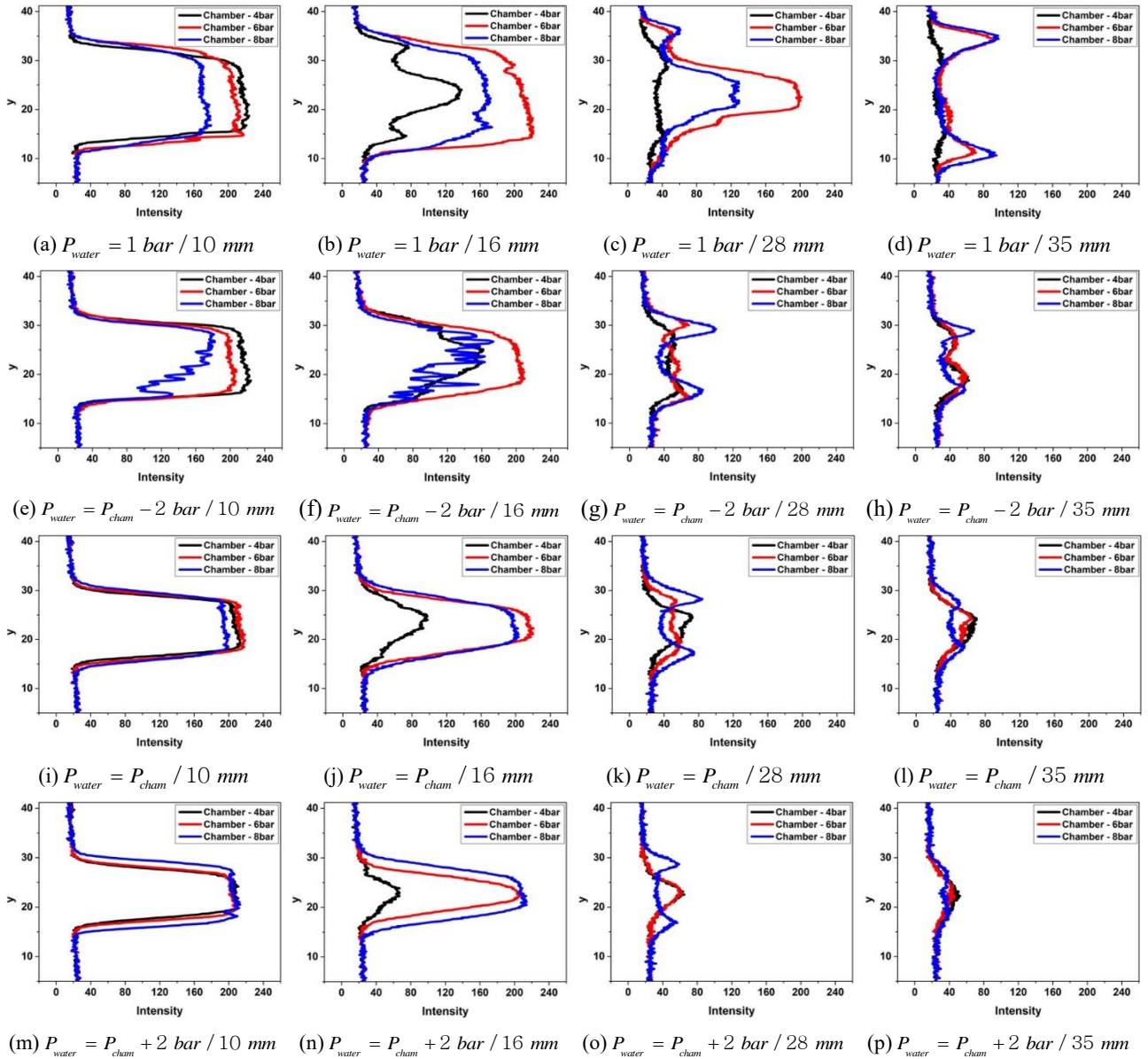


Fig. 7 Intensity Data Location

Fig. 8 Comparison of Intensity; (a)-(d)  $P_{water} = 1 \text{ bar}$  , (e)-(h)  $P_{water} = P_{cham} - 2 \text{ bar}$  , (i)-(l)  $P_{water} = P_{cham}$  and (m)-(p)

$$P_{water} = P_{cham} + 2 \text{ bar}$$

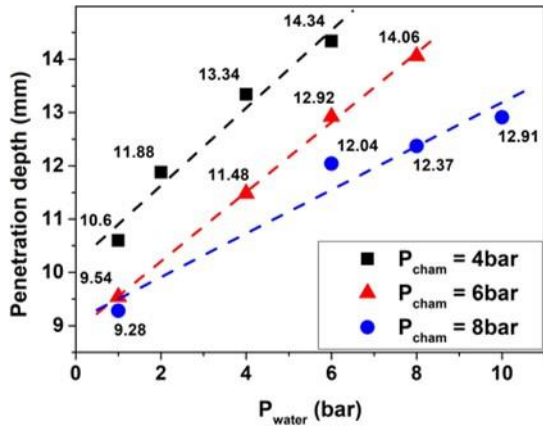


Fig. 9 Penetration Depth of Water Injection to The Pressures of N2 ( $P_{cham}$ ) and Water ( $P_{water}$ )

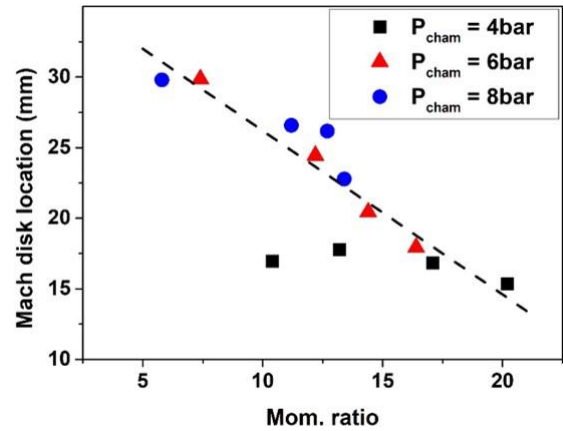


Fig. 12 Mach Disk Location of N2 Supersonic Jet vs. the Momentum Ratios of Water Injection to N2 Jet

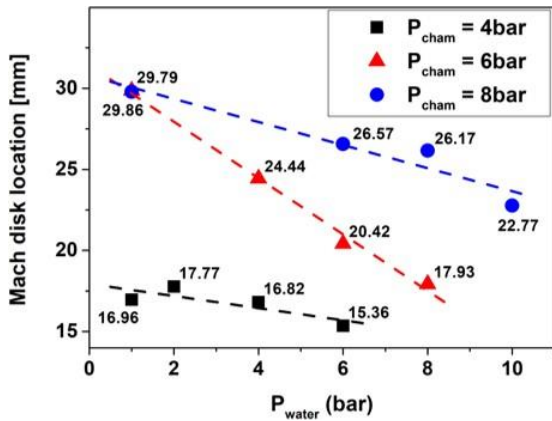


Fig. 10 Mach Disk Location of N2 Supersonic Jet to The Pressures of N2 ( $P_{cham}$ ) and Water ( $P_{water}$ )

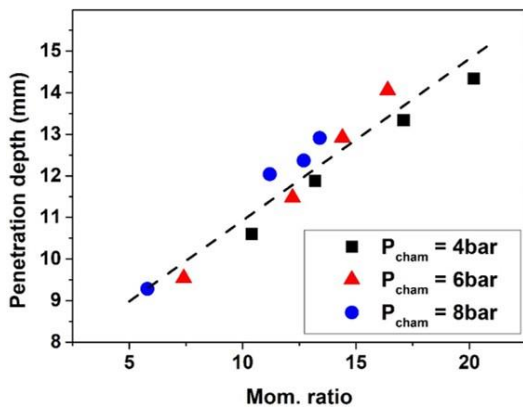


Fig. 11 Penetration Depth of Water Injection vs. The Momentum Ratios of Water Injection to N2 Jet

### 3. 결 론

초음속 후향 계단 유동에서 유동의 수직인 방향으로 액체를 분사하는 실험을 수행하였다. 작동유체는 질소와 물을 사용하였다. 실험 조건으로 질소 챔버의 압력  $P_{cham}$  을 4 bar, 6 bar, 8 bar, 물 주입 압력  $P_{water}$  는 1 bar,  $P_{cham} - 2$  bar,  $P_{cham}$ ,  $P_{cham} + 2$  bar로 선정하여 총 12개의 케이스에 대해서 실험을 진행했다.

노즐 출구로부터 10 mm, 16 mm, 28 mm, 35 mm 하류의 위치에서 빛의 강도 값을 이용한 비교를 수행하였다. 각 위치의 빛의 강도 값의 분포는 주입된 물의 침투 깊이와 마하 디스크의 위치에 따라 변화하였다. 침투 깊이와 마하 디스크의 위치는 초음속 가스 제트와 주입된 물의 운동량비에 비례하는 것을 관측할 수 있었다. 운동량비가 증가함에 따라 침투 깊이가 증가하였으며 마하 디스크의 위치는 상류로 이동하였다. 이는 운동량비의 증가에 따라서 초음속 가스 제트 경계를 뚫고 제트 내부로 침투하여 물이 존재하는 공간이 증가하며, 이에 따라 초음속 기체의 제트가 팽창할 공간이 줄어들기 때문에 마하 디스크의 생성 위치가 상류로 이동하는 것으로 판단된다. 이와 같은 경향성은 정량적 비교에서도 확인이 되었다. 침투 깊이와 마하 디스크의 위치 모두가 운동량비에 따라 선형적 관계를 나타냄을 알 수 있었다.

본 논문에서 관측한 액체의 침투 깊이는 가스-액체의 혼합 특성에 큰 영향을 미치고 마하 디스크의 위치는 실 기구 설계 시 고려해야 할 중요한 인자이다. 침투 깊이가 증가할수록 gas와 액체가 후방에서 빠르게 혼합되는 현상을 미루어 볼 때 가능한 12 이상의 운동량비를 유지하는 것이 바람직하다고 판단된다. 운동량비가 증가함에 따라 주입되는 물의 유량이 증가하므로, 과도한 물의 증가는 혼합 성능을 저하시키는 원인이

될 수 있으며, 주입된 액체가 냉각제로 사용되었을 시에 증발률을 감소시켜 성능이 저하되는 원인이 될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청 국방과학연구소 연구사업 ‘고온가스 냉각제를 이용한 혼합가스 유량제어 모델 연구’의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] A.S. Nejad and J.A. Schetz, "Effects of Properties and Location in the Plume on Droplet Diameter for Injection in a Supersonic Stream", *AIAA Journal*, vol. 21, no. 7, pp. 956-961, 1983.
- [2] J. Beloki Perurena, C.O. Asma, R. Theunissen and O. Chazot, "Experimental investigation of liquid jet injection into Mach 6 hypersonic crossflow", *Experiments in Fluids*, vol. 46, no. 3, pp. 403-417, 2009.
- [3] X. Fan, J. Wang, F. Zhao, J. Li and T. Yanf, "Eulerian-Lagrangian method for liquid jet atomization in supersonic crossflow using statistical injection model", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 1-13, 2018.
- [4] R. Hu, Q. Li, C. Li and C. Li, "Effects of an accompanied gas jet on transverse liquid injection in a supersonic crossflow", *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 440-451, 2019.
- [5] J. Hu, J. Chang, W. Bao, Q. Yang and J. Wen, "Experimental study of a flush wall scramjet combustor equipped with strut/wall fuel injection", *Acta Astronautica*, vol. 104, pp. 84-90, 2014.
- [6] H.M. Kim and J.S. Kim, "Effect of Heat Transfer and Phase Change of Coolant on the Performance of Mixed-gas Ejection System", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 22, no. 6, pp. 84-93, 2018.
- [7] High speed camera specification, [https://optronis.com/wp-content/uploads/2018/09/CR3000X2\\_de\\_F.pdf](https://optronis.com/wp-content/uploads/2018/09/CR3000X2_de_F.pdf)
- [8] National Instrument CompactDAQ specification, <http://www.ni.com/pdf/manuals/374046a.pdf>
- [9] National Instrument LabVIEW manual, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>