

축소형 초고압 분사 시스템의 노즐 형상에 따른 초음속 액체 제트 분무 특성에 관한 연구

신정환* · 이인철* · 김희동** · 구자예***†

Spray Characteristics of Supersonic Liquid Jet by a Nozzle Geometry of Miniature High-Pressure Injection System

Jeunghwan Shin* · Inchul Lee* · Heuydong Kim** · Jaye Koo***†

ABSTRACT

Two-stage light gas gun, sorted with Ballistic Range System, is used to research spray characteristics of supersonic liquid jets. When high pressure tube was pressurized to the 135 bar, diaphragm films which composed with OHP film are ruptured. Expansion gases accelerate a projectile approximately 250 m/s at the exit of pump tube. And accelerated projectile collides with liquid storage part and liquid jets were injected into supersonic conditions. Supersonic liquid jets show the multiple jets and generate shockwave at the forward region of jets. Supersonic liquid jets of speed and shockwave angle have different value at each case. Supersonic liquid jets with minimum velocities are injected with $M=1.53$ at the geometry condition of $L/d=23.8$

초 록

고압관, 가압관, 발사관으로 구성된 Ballistic Range의 일종인 2단식 경가스 총을 사용하여 초음속 액체 제트의 분무 특성을 연구하였다. 135 bar의 압축공기는 고압관과 가압관 사이에 OHP필름으로 구성된 격막을 파열시킨 후 가압관의 발사체를 약 250 m/s의 속도로 가속하였다. 가속된 발사체는 액체 저장부에 충돌하여 액체를 초고압으로 가압한 후 초음속으로 분사시키며, 특히 초음속 액체 제트는 미립화된 다중 제트의 형태를 나타내고 액체 제트 전방 영역에서 충격파를 수반한다. 다양한 분사 노즐의 기하학적 형상에 대한 분무시험결과 초음속 액체 제트의 속도와 충격파 각도가 각각 다르게 생성되었으며, L/d 가 9.9, 11.9, 23.8의 조건에 대하여 L/d 가 23.8의 경우에 액체 제트의 분사속도가 마하수 1.53으로 가장 낮게 측정되었다.

Key Words : Two-Stage Light Gas Gun(2단식 경가스 총), Projectile(발사체), Shock Wave(충격파), Droplet Atomization(액적 미립화), Straight Cone Nozzle(직선 원추형 노즐)

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 국립안동대학교 기계공학과

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

1. 서 론

최근 초고압 액체 제트의 분사 기술을 응용한 재료의 절단, 초고압 디젤 연료 분사와 같은 초고압 분사 기술이 폭넓게 연구되고 있지만[1], 초고압 조건에서 분사되는 액체 제트의 분무 특성에 관한 연구 결과는 미비하다. 초고압상태의 액체 제트를 생성하는 방법과 분무 특성을 파악하는 방법에 어려움이 많기 때문에 그 대안으로 Fig. 1과 같이 Ballistic Range(이하 B.R)방법을 사용하는 것이 검토되었다. B.R의 일종인 2단식 경가스 총(Two-Stage Gas Gun)을 이용하여 발사체(Projectile)를 초고속으로 발사시켜 비행 상태에서의 공기역학적 특성과 고속 충돌 파괴현상을 연구할 수 있다. Figure 2에는 액체 저장부 및 직선 원추형 노즐로 구성된 초고압 분사 시스템의 노즐부를 간략히 나타내었다. 체적 700 mm^3 으로 이루어진 액체 저장부 후방에 충돌된 발사체의 운동 에너지를 이용하여 저장된 액체를 초고압 및 초고속으로 분사시켜 초음속 액체 제트의 분무 특성을 연구하였다. 주로 초음속 액체 제트는 분사 노즐 형상에 따라 액체 제트의 속도와 분무 도달 거리가 달라지며, 실험에 사용된 3가지 분사 노즐은 오리피스 직경(d), 길이(L), 원추형 각도(α) 등과 같은 여러 가지 기하학적인 형상으로 구분 된다[3].

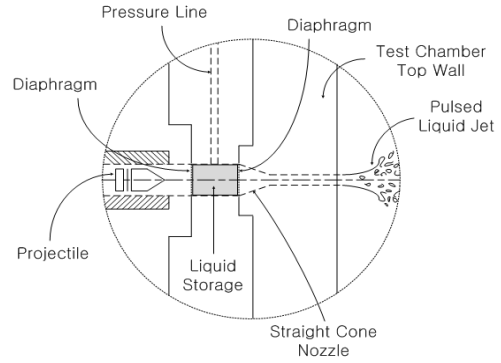


Fig. 2 Liquid Storage and Straight Cone Nozzle

2. 실험 장치 구성 및 분사 노즐 설계

2.1 실험 장치(초고압 분사 시스템) 구성

초음속 액체 제트의 분무 특성을 연구하기 위한 초고압 분사 시스템은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 초고압 분사 시스템은 크게 고압관, 가압관, 발사관으로 구성되며, 고압관과 가압관 사이에 제 1격막, 가압관과 발사관 사이에 제 2격막이 위치한다. 고압관으로부터 높은 압력으로 생성된 기체를 단일 압축시키기 위해 가압관에는 폴리 카보네이트로 제작된 피스톤이 삽입되고 발사체는 제2격막에 위치한 발사관 내부에 설치하도록 한다. 또한 실험에 사용된 피스톤과 발사체는 Fig. 3과 같다.

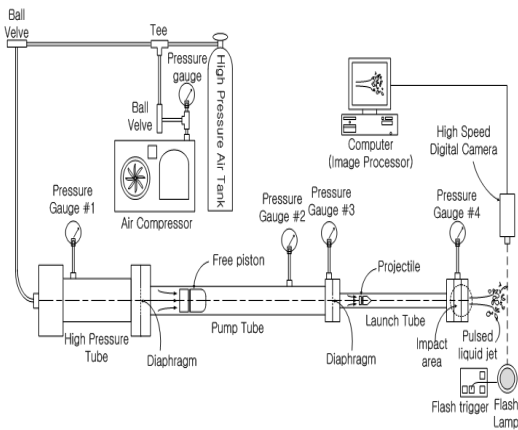


Fig. 1 Schematics of Ballistic Range System



Fig. 3 Piston and Projectile

2.2 분사 노즐 설계

초고압 분사 시스템에서 분사 노즐 형상에 따른 액체 제트의 분사 속도를 규명하기 위한 연구가 진행되고 있다[3]. 그 중 한 가지는 Fig. 4와 같은 직선 원추형 노즐이다.

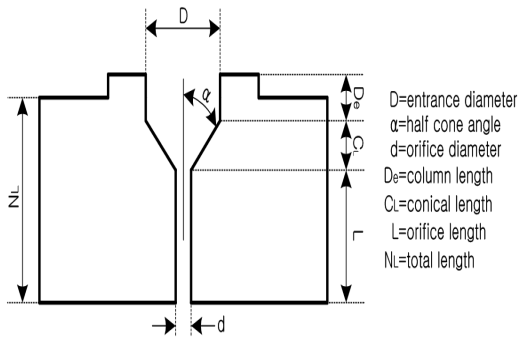


Fig. 4 Configuration and Dimensions of Straight Cone Nozzle

입구 직경(D)은 발사체의 직경과 일치시키는데 그 이유는 발사체보다 크거나 작은 경우 액체 제트의 가압 압력을 감소시켜 최종적으로 액체 제트의 분사 속도를 낮춘다. 원추형 각도(α)는 45°이며 액체가 오리피스 출구를 향하면서 가속화 하는 역할을 한다. 오리피스 직경(d)은 액체 제트의 속도 변화에 관련된 변수이다.

본 실험에 사용된 직선 원추형 노즐의 변수는 Table.1과 같다.

Table 1. Supersonic Nozzle Geometries

Nozzle case	D (mm)	α (°)	L (mm)	d (mm)	L/d
1	5.2	45	9.9	1.0	9.9
2	5.2	45	11.9	1.0	11.9
3	5.2	45	11.9	0.5	23.8

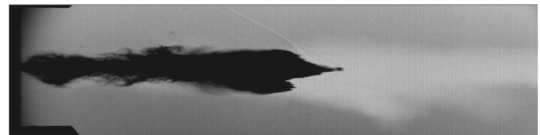
3. 실험 방법

초고압 분사 시스템의 1단에 해당하는 고압관에 약 120 bar의 기체를 압축시킨 후 압축된 공기는 고압관에서 110~140 bar가 되었을 경우 고압관 후방의 격막을 파열시킨다. 가압관에서 피스톤이 기체를 단일 압축 시키고 두 번째 격막을 파열시킨다. 이때 발사관 내부에 삽입된 발사체를 분사 액체 저장부에 충돌시켜 액체를 분사 노즐을 통해 초음속으로 분사 시킨다. 액체 제트의 분무 형태는 다중 제트를 나타내고 제트

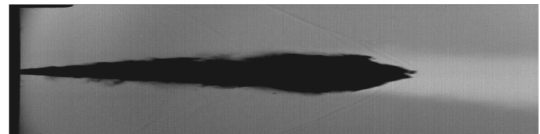
전방 영역에는 충격파를 수반한다. 설계된 3가지 분사 노즐의 기하학적 형태를 변경시키면서 액체 제트의 분무 특성을 파악하였다. 분사된 초음속의 액체 제트 이미지는 2130 fps의 고속 카메라로 촬영하였으며 그림자 가시화 기법을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

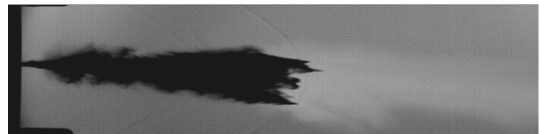
고압관에서 135 bar의 압력이 생성되었을 때 제 1격막이 파열되는데 이러한 압력의 생성은 격막의 두께에 따라 조절이 가능하다. 본 실험에서 격막은 두께 0.1 mm OHP 필름 7장을 사용하여 수행되었다. 고압관에서 전달된 높은 압력은 가압관으로 전달되고 그로인해 단일 압축된 기체는 발사체를 약 250 m/s의 속도로 가속시켜 액체 저장부에 충돌하게 한다. 실험에 사용된 3가지 분사 노즐의 기하학적 형태에 따라서 분사된 초음속 액체 제트의 분무 특성을 파악하였다.



(a) Injection Nozzle Case 1



(b) Injection Nozzle Case 2

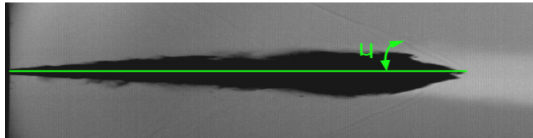


(c) Injection Nozzle Case 3

Fig. 5 Supersonic Liquid Jet Image by Variable Injection Nozzle

분사 노즐의 기하학적인 변수에 따라 촬영된 고속 액체 제트 이미지는 Fig. 5와 같다. 촬영된 가시화 이미지로부터 확인된 실험 결과 분무 초기 미립화된 액체 제트가 초고속으로 분

사되면서 분사 초기 충격파를 수반하였다. 그 후에 고속의 액체 제트는 충격파를 관통하면서 다중 충격파를 수반하였다. 분사 말기에는 액체 제트의 미립화된 각각의 액적 전방에 충격파를 수반하면서 반사 충격파를 생성하였다. 실험 결과 측정된 가시화 이미지의 초음속 액체 제트의 충격파를 통해서 분사 노즐 형상에 따른 액체 제트의 분무 특성을 Fig. 6과 같이 파악하였다. 분사 노즐 형상에 따라서 각각 다른 분사 각도와 충격파 각도를 확인 할 수 있으며, 또한 이를 통해 액체 제트의 속도를 유추해 낼 수 있었다.



(a) Liquid Jet Shock Wave from an Experiment

Nozzle Case	L/d	μ (°)	V (m/s)	Mach Number
1	9.9	34.37	608.79	1.77
2	11.9	30.13	684.66	1.99
3	23.8	40.74	526.64	1.53

(b) The Liquid Jet Profile by Nozzle Geometry

Fig. 6 (a) Shock Wave Angle from Shadowgraph Image and (b)Liquid Jet velocity and Mach Number by Nozzle Geometry

5. 결 론

B.R의 일종인 2단식 경 가스총을 이용하여 초음속 액체 제트의 분무 특성을 연구하였다. 고압관으로 이송된 압축 공기로 인해 격막을 파열 시키며, 그로인해 가압관의 피스톤은 기체를 단열 압축 시켜 두 번째 격막을 파열시킨다. 고압의 압축 공기는 발사관으로 이송되어

발사체를 약 250 m/s로 가속 시켰으며, 발사체의 충동을 통해 체적 700 mm³인 액체 저장부의 작동유체를 초음속으로 분사시켰다. 분사 초기 미립화된 액적들은 충격파를 수반하고 고속의 액체 제트는 다중 충격파 및 반사 충격파를 형성하였다. 분사 노즐의 기하학적인 형태를 변화시킨 결과 액체 제트의 속도, 분사 각도 및 충격파 각도가 각각 다르게 측정되었다. 동일한 오리피스 길이(L) 조건에 대해서 오리피스 직경(d)이 작아짐에 따라 액체 제트의 분사속도가 낮게 측정되었다. 특히, L/d 값이 9.9에서 11.9로 증가한 조건에서 액체 제트의 마하수는 마하수 1.77에서 1.93으로 약 11% 증가하였지만, L/d 값이 11.9에서 2배 증가한 23.8인 경우에 마하수 1.53으로 가장 낮게 측정되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 사업인 일반연구자 지원 사업 협동 연구(과제번호 : 2009-0087898)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. H. Shi, M. Itoh, "Design and experiment of a small high-speed liquid jet apparatus," *Jpn J Appl Phys Pt 1* 35, 4157-4165(1996)
2. K. Pianthong, K. Takayama, B.E. Milton, M. Behnia, "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," *Shock Waves* 2005, (DOI) 10.1007 / s00193-004-0237-2.
3. K. Pianthong, A.Matthujak, K. Takayama, B.E. Milton, M. Behnia, "Dynamic characteristics of pulsed supersonic fuel sprays," *Shock Waves* 2008, (DOI) 10.1007 / s00193-008-0123-4.