

# 축소형 초고압 분사 시스템의 노즐 L/d에 따른 초음속 액체 제트의 미립화 특성

신정환\* · 이인철\* · 김희동\*\* · 구자예\*\*\*†

## Atomization Effect of Supersonic Liquid Jet by a Nozzle L/d of Subscale High-Pressure Injection System

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

### ABSTRACT

Subscale high-pressure injection system which use two-stage light gas gun composed with high-pressure tube, pump tube and launch tube can make supersonic liquid jet. The supersonic liquid jet enhances droplet atomization by shockwave in front of the jet. In this study, the experiments was executed to identify the atomization characteristics of the supersonic liquid jet using straight cone nozzle. SMD which presents the atomization characteristics was decreased from 151.2  $\mu\text{m}$  to 52.25  $\mu\text{m}$  by increasing of L/d.

### 초 록

고압관, 가압관, 발사관으로 구성된 2단식 경가스 총을 사용하는 축소형 초고압 분사 시스템은 액체 제트를 초음속으로 생성할 수 있다. 이러한 초음속 액체 제트는 전방에 발생하는 충격파로 인한 액적 미립화를 촉진 시킬 수 있다. 본 연구에서는 초음속 액체 제트의 미립화 특성을 파악하기 위해 직선 원추형 노즐을 사용하여 기하학적인 형상 변화에 따른 실험을 진행하였다. 미립화 특성을 나타내는 SMD는 L/d가 증가할수록 151.2  $\mu\text{m}$ 에서 52.25  $\mu\text{m}$ 로 감소하는 경향을 나타내었다.

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

### 1. 서 론

초음속 액체 제트 분사 기술은 고속 항공기나 터빈 블레이드에 강하게 충돌하는 빗물로 인한

고체 표면의 데미지 및 변형을 초래하는 액체 침식 과정 분석, 재료의 세척 및 절단 등에 과학적 상태들이 적용될 수 있다. 또한 고성능 직접 분사 방식 디젤 엔진의 연소 효율에 상당한 이점을 줄 수 있다. 충격파를 수반한 고속의 액체 제트는 액적 미립화가 촉진되어 완전 연소를 도모할 수 있고, 국소 가열 효과로 인한 디젤 연료의 자동 점화 가능성을 기대할 수 있다[1]. 이러

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

\*\* 국립안동대학교 기계공학과

\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

한 고속의 액체 제트를 생성하려면 초음속의 범위로 가속되기 위한 강한 충격의 운동 에너지를 제공하는 Ballistic Range의 일종인 2단식 경가스 총(Two-Stage Light Gas Gun)을 사용하는 것이 일반적이다. 보통 2단식 경가스 총은 발사관으로부터 발사체(Projectile)를 초고속으로 발사시킨 후 비행 상태에서의 공기 역학적 특성과 정지된 표적에 충돌시켜 고속 충돌 파괴현상을 연구하고 또한 파악할 수 있다[2]. 2단식 경가스 총으로부터 분사되는 액체 제트는 발사체를 직접 액체 노즐의 배후에 충돌시켜 초음속의 속도로 전파하게 된다. 이는 그림자 기법을 이용한 가시화 사진에서 얻어진 충격파로부터 확인할 수 있다.

최근 미국, 일본 및 유럽 등 기술 선진국에서는 초고압 디젤 엔진 개발에 관심을 가지고 액체를 초고압 상태로 실현하는 많은 기술적 방법을 제시하였다. Field & Lesser[3]는 Fig. 1과 같이 초음속 액체 제트에서 생성되는 충격파로 인한 미립화 특성을 연구하기 위해 발사체 충격 방법을 사용하여 노즐 출구로부터 고속의 액체 제트가 생성되는 마지막 단계를 증명하였다. 노즐을 통한 초기 분사시 액체는 높은 속도와 1.2 배 향상된 밀도를 형성하며, 액체 제트 전방과 충격파 사이에 상대적으로 높은 압력의 영역이 형성되어 작은 액적으로 분열된다.

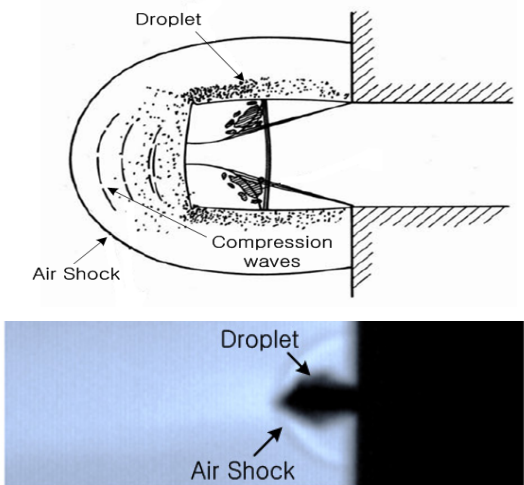


Fig. 1 Schematics and Images of High-Speed Liquid Jet after Leaving Nozzle at Early Stage[3]

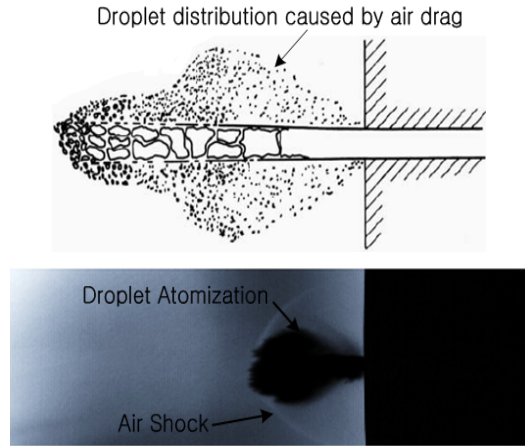


Fig. 2 Schematics and Images of High-Speed Liquid Jet after Leaving Nozzle at Later Stage[3]

Fig. 2는 초기 액체 제트의 액적 분열 다음 단계를 개략도와 가시화 이미지로 나타낸 그림이다. 주요 액주 자체는 공기 항력의 영향과 관련된 동역학적으로 발달이 이루어진 미립화된 액적의 막으로 둘러싸여 있다는 연구 결과를 도출하였다. Reitz & Bracco[4]는 액체 제트의 미립화 과정을 실험적으로 연구하였다. 액체 제트의 미립화 영향, 분사 속도, 분사 거리, 분사 각도는 노즐 형상에 관련이 있으며, 이는 노즐 출구 중심으로 관찰되었다.

축소형 초고압 분사 시스템을 이용한 초음속 액체 제트는 제트 전방에서 발생하는 충격파와 액적 미립화의 관계, 충격파에 의한 액체 제트의 국소 가열 효과 등 현재까지 잘 알려지지 않는 복잡한 열/유체역학적 특성을 포함하고 있다. 현재 국내에서는 초음속 액체제트의 구체적인 연구 결과가 많지 않고 국외에서 수행된 연구 결과에 따르면 액적의 미립화, 매연물질 배출 및 충격파의 효과 등에 관한 상당한 지견을 소지한 것으로 예상되며 국내에서도 이 분야의 기술 개발의 중요성이 요구된다. 본 연구에서는 2단식 경가스 총을 사용하여 초음속 액체 제트의 분사 특성을 파악하기 위해 직선 원추형 노즐의 기하학적인 형상 변화에 따라 액체 제트의 분열 과정과 미립화 특성을 규명하여 초고압 디젤 직접 분사 엔진 등에 적용하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 축소형 초고압 분사 시스템 구성

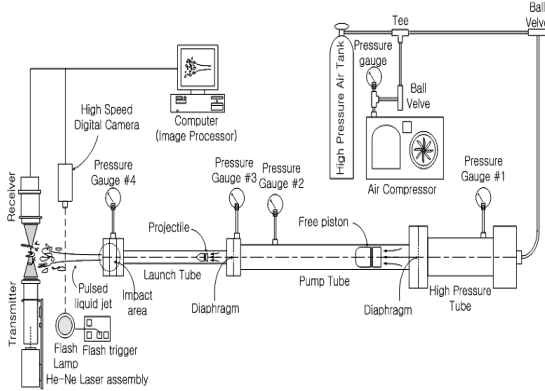


Fig. 3 Schematics of Two-Stage Light Gas Gun

초음속 액체 제트의 액적 미립화 특성을 파악하기 위한 축소형 초고압 분사 시스템의 구조는 Fig. 3과 같이 구성되어 있다. 2단식 경가스 총은 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 삽입된다. 초음속 액체 제트의 미립화 특성은 Memview사의 1280x128 이미지 크기에서 2  $\mu\text{sec}$  노출로 4261 fps의 성능을 가진 SVSI 고속 카메라로 가시화하여 확인할 수 있다. 특히 액체 제트의 액적 직경 측정을 위해 레이저 회절 원리를 이용한 분무 입경 장치를 사용하였다. He-Ne 레이저를 사용한 분무 입경 장치는 Mie scattering 원리를 이용하여 액적 크기를 측정하며, 구형 액적에 대한 굴절률과 흡수 계수를 매개 변수로 사용하고 액적의 산란중 회절에 따른 광량을 다윈 소 광검출기로 사용하여 측정하도록 한다.

### 2.2 액체 저장부 및 분사 노즐 구성

체적 700 mm<sup>3</sup>으로 이루어진 액체 저장부 후방에 충돌된 발사체의 운동에너지를 이용하여 저장된 액체를 초고속으로 분사시킨다. 초음속 액체 제트는 분사 노즐 형상에 따라 액체 제트의

속도와 분사 거리가 달라진다[5]. 실험에 사용된 분사 노즐은 Fig. 4와 같이 직선 원추형 노즐 (Straight Cone Nozzle)로써 오리피스 직경(d), 길이(L), 원추형 각도( $\alpha$ ) 등과 같은 기하학적인 형상이 구분되어 있다. Table 1에 노즐 형상 변화에 대한 기하학적 치수를 나타내었다.

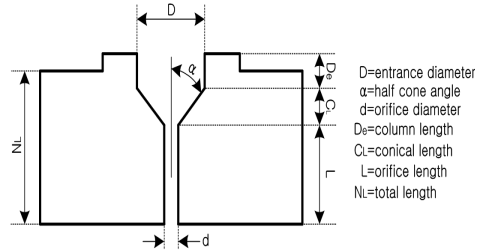


Fig. 4 Configuration and Dimensions of Straight Cone Nozzle

Table 1 Injection Nozzle Geometries used in Experiment

Nozzle case	D (mm)	$\alpha$ (°)	L (mm)	d (mm)	L/d
1	5.2	45	3.0	1.0	3.0
2	5.2	45	9.9	1.0	9.9
3	5.2	45	11.9	1.0	11.9
4	5.2	45	11.9	0.5	23.8
5	5.2	45	11.9	0.3	39.6

## 3. 실험 결과 분석 및 고찰

고압관에서 생성된 115 bar의 압력이 생성되었을 때 제 1격막이 파열되어 가압관으로 전달되고 그로 인해 단일 압축된 기체는 발사체를 250 m/s의 속도로 가속시켜 액체 저장부에 충돌하게 한다. 노즐 출구 내부에서 액체 제트가 분사되기 직전에 수직 기체 방출파(Air Relief Wave)를 형성하며 수  $\mu\text{sec}$  이내에 압축파와 충격파를 가진 초음속 액체 제트가 미립화 과정을 거치며 분사된다. 이때 액체 제트 전방에 궁형 충격파(Bow-Shock)가 생성되는 것을 관찰할 수 있다. 궁형 충격파와 액체 제트 사이에서는 아주 적은 양의 무화된 액적이 액체 제트 주위에 발생한다. Fig. 5는 1088

m/s ( $M \approx 3.2$ )의 속도를 가진 초음속으로 분사된 액체 제트의 충격파 거동을 나타낸 이미지이다. 0.4 msec 이내에 완전히 발달하여 분사되며 초음속 분무 주위에는 대기 중의 항력으로 인하여 미립화 된 액체 제트가 발생한다.

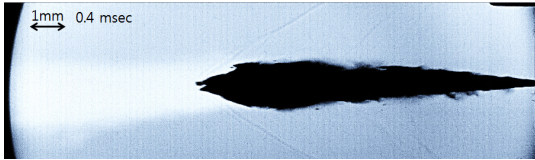


Fig. 5 Supersonic Spray images ( $L/d=11.9$ ,  $M \approx 3.2$ )

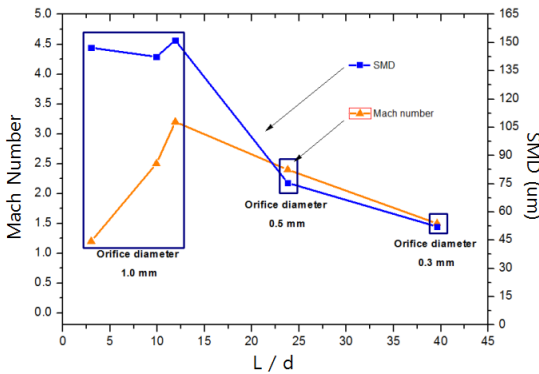


Fig. 6 Spray Mach Number and SMD with Various Nozzle  $L/d$

Fig. 6에서  $L/d$ 가 3.0에서 11.9까지 오리피스 길이( $L$ )가 증가함으로써 액체제트의 액주 분열이 늦어지기 때문에 마하수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 5와 같이  $L/d=11.9$ 일 때 가장 빠른 분사 속도를 나타내었으며 안정적인 액주 형태를 가지고 초음속으로 분사되었다. SMD는 노즐 직경이 감소함에 따라서  $151.2 \mu\text{m}$ 에서  $52.25 \mu\text{m}$ 로 감소하는 경향이 나타났으며, 특히 노즐 직경( $d$ ) 1.0 mm에서  $142.0 \mu\text{m}$ 에서  $151.2 \mu\text{m}$ 로 큰 변화 없는 SMD 분포 특성의 결과를 도출하였다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고속 카메라와 레이저 회절 분무

입경 측정 장치를 사용하여 초음속 액체 제트의 노즐  $L/d$ 에 따른 미립화 특성을 연구하였다. 초음속으로 분사된 액체제트는 전방 영역에서 공형 충격파가 생성되며 각각의 액적 사이에서도 반사 충격파가 발생하였다.  $L/d=11.9$ 에서 가장 빠른 분사속도를 이루었으며,  $L/d$ 가 증가할수록 SMD는 감소하는 경향을 나타내었다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. 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.
2. Charters, A. C., "Development of the High Velocity Gas Dynamics Guns," Intl. Jour. Impact Engineering, Vol. 17, pp. 181-203, 1995
3. J. E. Field and M. B. Lesser, "On the mechanics of high speed liquid jets," Proceedings Royal Society London, A Series, vol. 357, pp. 143-162, 1977.
4. R. D. Reitz and F. V. Bracco, "Mechanism of atomization of a liquid jet," Physic of Fluids, vol. 25, pp. 1730-1742, 1982
5. 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.