초고속 발사체의 액체 저장부 충돌에 의한 초음속 액체 제트의 분무 속도 및 분열 특성

이인철* · 신정환* · 김희동** · 구자예†

Spray Angle and Break-up Characteristics of Supersonic Liquid Jets by an Impinging Methods with High Speed Projectile

Inchul Lee, Jeunghwan Shin, Heuydong Kim and Jaye Koo

Abstract. Pulsed supersonic liquid jets injected into an ambient air are empirically studied by using a high pressure ballistic range system. Ballistic range systems which are configured with high-pressure tube, pump tube, launch tube and liquid storage nozzle. Experimental studies are conducted to use with various impact nozzle geometry. Supersonic liquid jets are generated by an impact of high speed of the projectile. High speed liquid jets are injected with $M = 3.2$ which pressure is 1.19 GPa. Multiple jets which accompany with shock wave and pressure wave in front of the jet were observed. The shock-wave affects significantly atomization process for each spray droplets. As decreasing orifice diameter, the averaged SMD of spray jets had the decreasing tendency.

Key Words: High Speed Impact(고속 충돌), Supersonic Liquid Jets(초음속 액체 제트), Shock Wave(충격파), SMD(Sauter 평균 지름)

1. 서 론

초음속 액체 제트는 초고압의 가압원을 통해 분사되며, 초고압 액체 제트의 분사 기술은 재료의 절단, 연료 분사와 같은 기술에서 폭넓게 응용되고 있으며, 일반적으로 산업에서 활용하고 있는 플런저 펌프(plunger pump)와 고압 복동식 펌프를 사용하여 1000기압 정도의 고압을 생성시킨다. 초음속 상태로 액체를 분무시키기 위해서는 가압원이 필요하며, 일반적인 펌프 방식의 가압원보다 더 큰 가압 압력을 발생시킬 수 있는 단발성 충돌형 가압 시스템을 활용해야 한다. 충돌형 가압 시스템은 축소형 2단식 경가스 총(Two-stage light gas gun)을 활용하며, 특히 발사체를 액체 저장부에 충돌시켜 초고압을 생성하도록 한다. 축소형 2단식 경가스 총

은 고압실, 펌프실, 발사관으로 구성되어 있으며, 고압실과 펌프실 사이에 격막을 설치하여 순간적인 압력 상승에 의해 피스톤과 발사체를 가속시키게 된다. 피스톤은 펌프실 내를 이동하면서 단열 압축 과정을 겪고 고압의 기체를 발사관으로 분사되어 발사체를 액체 저장부로 발사시킨다. 또한 펌프실에는 발사체의 가속 성능을 향상시키기 위해 헬륨이나 수소 등의 기체를 주입하여 발사체의 가속력을 향상시키기도 한다⁽¹⁾.

초음속 상태에서 발생하는 열/유체역학적 현상에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 초음속 상태에서 액체 제트 유동의 특성에 관한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 초고압 액체 제트는 Fig. 1과 같이 액체 제트 전방 영역과 액적 전방에서 충격파 거동을 수반하며, 또한 액체 제트 내부 액적과 액적 사이에서 반사 충격파를 일으킨다. 이렇게 초음속으로 분사되는 액체 제트는 음속 이상의 속도로 유동장에 분사되기 때문에 액체 제트와 유동장의 열/유체역학적 특성이 달라지며, 특히 초음속 액체 제트 분사시 미립화 특성과 혼합 효율의 향상을 이끌어낼 수 있고 충격파에 의해 유동장

†한국항공대학교 항공우주및기계공학부
E-mail : jykoo@kau.ac.kr

*한국항공대학교 대학원

**국립안동대학교 기계공학과

Fig. 1. Supersonic spray image with tip velocity of $M \approx 7.0^{(2)}$.

내부 온도 상승을 일으킬 수 있다⁽²⁾.

고속 액체 제트를 분사시키기 위한 연구에서는 상당히 오랜 기간 동안 고속 발사체 시험장치(Ballistic Range)의 작동특성을 조사하여 성능을 평가하였으며, 그 후 액체 제트의 초음속 상태를 얻기 위하여, Ballistic Range로부터 발사되는 발사체를 직접 액체 노즐의 저장부에 충돌시켜, 수만 기압의 압력을 용이하게 달성할 수 있었다. 다양한 실험 결과 액체 제트의 미립화 특성에는 발사체로부터의 충돌 압력이 주된 영향을 미치며, 액체 제트를 분사시키기 위한 발사체의 적정한 질량과 음속의 발사체 속도는 분사제트를 초음속의 속도로 전파시킬 수 있다는 결과를 타나내었다.

1950년대에 빗물에 의한 항공기 표면 삭마 현상의 연구를 시작으로 고속 액체 제트의 연구가 시작되었으며, 고압의 압축 공기와 화약을 사용하여 Fig. 2와 같이 고속 탄환을 액체 저장부에 충돌시켜 고속 액체 제트의 분무 특성과 액적 충돌 특성을 연구하였다. 거시적 분무 특성 연구로서 Bowden, O'Keefe's et al.의 연구에서는 발사된 탄환이 네오프렌(Neoprene) 디스크에 충돌한 후 액체 저장부를 가압하여 액체 제트를 최대 3.5 km/s로 분사시켰으며, 액체 제트의 압력을 최대 1.8GPa까지 상승시키는 연구를 수행하였다^(3,4,5). 그 후, 1992년 이래로 발사체 충돌에 의한 액체 제트 분사 방법, 액체 제트 충격파거동 등 다양한 연구가 수행되었으며, Shi et al.^(6,7)는 hyperbolic 형상의 수축 노즐을 티타늄 재질로 제작하고 액체 표면 직접 충돌 방법을 이용하여 액체 제트의 속도를 최대 4.5 km/s로 분사시켰다. 미시적 분무 특성 연구는 주로 레이저 회절 입자분석 장치를 사용하여 연구를 진행하는데 Nakahira et al.^(8,9)는 주로 디젤 분무의 충격파 거동에 따른 분무각, 분무형상, 분무 관통 길이 그리고 SMD 변화를 연구하였고 정대용⁽¹⁰⁾은 플런저 펌프를 이용하여 분사압력 4000 bar에 해당하

Fig. 2. Supersonic spray image with tip velocity of $M \approx 1.34^{(11)}$.

는 디젤 분무의 충격파 거동 및 분사 특성에 대한 연구를 수행하였다.

현재까지의 다양한 연구 결과에도 불구하고 종래의 연구들은 액체제트의 미시적 미립화 특성을 상세하게 연구하지 않았으며, 특히, 초음속 액체 제트 전방에서 발생하는 충격파가 미립화에 미치는 영향을 규명하지 못하였다. 또 초음속 액체제트가 실험실의 무한 공간으로 전파하는 이상적인 경우에 대한 실험을 수행하여, 실제의 유한체적의 연소실에서 발생하는 충격파의 반사 등의 효과에 관해서는 관심을 가지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 다양한 노즐 형상 변화에 따른 액체 제트의 충격파 거동과 분무각, 분사속도 특성을 고찰하고 초기 분사시 분무 영역에 대한 액적 평균 직경 분포 특성을 연구하도록 한다.

2. 실험장치 및 방법

초음속 액체 제트의 분무 특성 연구는 대기압 조건에서 수행하였으며, 분무장의 주위 온도는 $297 \pm 5K$, 상대습도 50% 조건에서 수행하였다. 시험에 사용된 액체는 온도 20°C, 밀도 998 kg/m³, 표면장력 0.0727 N/m 조건의 물을 사용하였다. 초음속 액체 제트를 분사하기 위한 초고압 분무 시험 장치는 Fig. 3과 같으며, 본 장치는 고압관, 펌프관, 발사관, 액체 저장부로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 고압 기체는 총포용 고압 압축기를 사용하여 약 115 bar의 기체를 질소통에 저장하여 순간적으로 사용하며, 고압관, 펌프관, 발사관 사이에는 격막을 두어 압력 상승시 파열되어 순간적으로 압축된 기체를 사용할 수 있게 하였다. 고압관으로부터 이송된 고압 기체는 순간적으로 펌프관으로 이송되어 피스톤을 가속시키고 순간적으로 공기를 단열 압축시

Fig. 3. Schematics of high pressure injection systems with supersonic liquid jets.

Fig. 4. Piston and Projectile.

Fig. 5. Projectile impact area and liquid storage part.

Fig. 6. Configuration and dimensions of Straight Cone Nozzle.

Table 1. Injection Nozzle Geometries used in Experiment

Nozzle case	D (mm)	α (°)	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

킨다. 펌프실 출구에서 기체 압력은 피스톤의 중량과 고압실 기체의 압력에 의존한다. 단열 압축된 공기는 펌프관과 발사관의 격막을 파열시키고 발사관으로 이송되어 Fig. 4와 같은 탄환 형상의 발사체(Projectile)를 가속시킨다. 발사관으로부터 발사된 발사체는 Fig. 5와 같이 액체 저장부에 충돌하여 초음속 액체 제트를

분무시키게 되며, 액체 저장부의 기하학적 노즐 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서는 분사 노즐 내부 오리피스의 기하학적 형상에 따른 분무 특성을 연구하였으며, Table 1에는 초음속 액체 제트의 다양한 분무 특성 연구를 위해 분사 노즐의 기하학적 치수를 나타내었다. 액체 제트의 분무 가시화 이미지는 그림자 기법

(shadow-graph)을 이용하였으며, 약 15,000 fps 사양의 고속 CCD 모듈을 사용하여 이미지를 촬영하였다. 액체 제트의 액적 직경 측정을 위해 레이저 회절 원리를 이용한 분무 입경 측정 장치를 사용하였다. 헬륨-네온 레이저를 사용한 분무 입경 측정 장치는 Mie -scattering 원리를 이용하여 액적 직경을 측정하며, 구형 액적에 대한 굴절률과 흡수계수를 매개 변수로 사용하고 산란 중 회절에 따른 광량을 다윈소 광검출기 사용하여 측정하도록 한다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

초음속 액체 제트를 발생시키기 위한 발사체 충돌 분무 시스템은 Fig. 7의 그래프에서 보는바와 같이 고압관에서 115 bar의 압력이 충전된 직후 고압관과 펌프관의 격막을 파열시킨다. 격막 파열 후 수 ms 이내에 펌프관의 피스톤을 가속시켜 펌프관의 압력을 상승시킨다. 이 때에 고압의 기체는 피스톤을 가속시켜 기체를 단일 압축 시키고 단일 압축된 기체는 다시 펌프관과 발사관의 격막을 파열시켜 발사체를 가속시킨다. Fig. 8은 발사체 출구에서 약 250 m/s로 방출되는 발사체를 고속 카메라로 촬영한 이미지이다. 0 ms ~ 0.208 ms의 가시화 이미지에서 보듯이 발사초기 발사관 출구에서는 충격파와 압축파를 관찰할 수 있으며, 약 2.079 ms가 되는 시점에서 발사체가 방출되는 것을 볼 수 있다. 이렇게 방출된 발사체는 발사관 출구에서 액체 저장부에 충돌하여 초음속 액체 제트를 분사시킨다. 발사관과 마찬가지로 오리피스 관 내부에서도 액체 제트가 분사되기 직전에 압축파가 발생하며, 수직 기체 방출파(air relief wave)를 형성하여 수 μs 이내에 오리피스 출구에

Fig. 7. Pressure development profile with pressure tube and pump tube.

Fig. 8. Projectile Injection images at orifice exit.

Fig. 9. Spray Injection images at orifice exit.

Fig. 10. Supersonic spray images ($M \approx 3.2$).

서 압축파와 충격파를 형성한 후 초음속으로 액체 제트를 분사시킨다. Fig. 9는 질량 2.0 g, 속도 250 m/s의 발사체 충돌을 통해 분사된 초음속 액체 제트의 분무 이미지를 가시화한 그림이다. 충돌후 액체 제트의 밀도는 최대 1.2배 이상 증가하며, 오리피스 출구에서 액체 제트는 압축파와 충격파를 관통하며 미립화 과정을 거친다. 분사 초기 0.060 ms에 액체 제트가 분사되며, 이 때에 액체 제트 전방에 궁형 충격파(bow-shock)가 생성되는 것을 관찰할 수 있다.

궁형 충격파와 분무 덩어리 사이에서는 아주 적은 양의 무화된 액적이 분무 덩어리 주위에 발생한다. 본 연구에서는 그림자 기법을 사용하여 고속의 CCD 모듈을 사용하여 초음속 액체 제트를 촬영하였으며, 이미지 분석을 통해 초음속 액체 제트의 충격파 각도를 측정 한 후 Fig. 11과 같이 궁형 충격파에 대한 $\theta - \theta_s - M$ 관계⁽¹²⁾를 이용하여 마하수를 도출하였다. Fig. 10은 마하

Fig. 11. $\theta_c - \theta_s - M$ diagram for cones in supersonic flow⁽¹²⁾.

Fig. 12. Enlarged image of spray tip.

수 약 3.2의(1088 m/s) 초음속으로 분사된 액체 제트의 충격파 거동을 나타낸 이미지이다. 또한 초음속 액체 제트 분사 압력은 베르누이 방정식에 의해 도출되며, 오리피스스의 방출계수를 0.7로 하였을 때 약 1.19GPa의 압력으로 나타낼 수 있었다. Fig. 10에 나타난 분무는 0.4 ms 이내에 완전히 발달하여 분사되며, 초음속 분무 주위에는 대기 중의 항력으로 인하여 미립화 된 액체 제트가 발생하고 Fig. 9와 같이 초기 발생한 궁형 충격파를 관통한 초음속 액체 제트는 불균일한 분무 형상을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 초음속 분무는 충격파를 재관통하여 대기 중으로 분무되며 미립화 과정을 거친다. Fig. 12는 초음속으로 분사된 액체 제트 선단의 분무 이미지를 확대한 그림이다. 액주 형태로 분사된 액체 제트는 완전한 미립화 과정을 거치지 않고 분무 선단에서 액적 덩어리(droplet clump)를 이루어 분무된다. 이러한 액적 덩어리 전방에 다시 궁형 충격파(blow-shock)가 나타나며, 액적과 액적 사이에는 반사 충격파(reflected shock-wave)가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 분사 압력이 극초고압으로 상승함에 따라 액적 직경을 작아져 무화된 액체 제

Fig. 13. Spray tip Mach number and SMD with various orifice length over diameter.

트의 특성을 나타낼 것으로 예측하였으나 액체 제트 분사 오리피스 직경의 영향으로 액체 제트가 모두 미립화되지 않고 상대적으로 큰 액적들이 발생하였다. 또한 큰 액적들이 분무 전방으로 진행함에 따라 액적 덩어리 후방에서 분열되어 미립화가 진행되는 현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 13은 오리피스 길이 대 직경 변화에 따른 초음속 액체 제트의 마하수를 나타낸 그래프이다. $L/d = 3$ 에서 $L/d = 11.9$ 에 이르기까지 마하수가 증가하는 이유는 오리피스 길이의 영향으로서 L/d 가 증가할수록 액주의 분열이 지연되어 분사되었기 때문이다. 따라서 L/d 가 작을 경우 액주의 분열은 가속화 되고 액주의 빠른 분열은 액체 제트의 속도를 감소시키는 현상을 나타낸다. 액체 제트의 마하수는 $L/d = 11.9$ 에서 가장 크게 나타나며, $L/d = 11.9$ 에서는 액체 제트가 가장 안정적인 액주 형태를 유지한 후 초음속으로 분사되기 때문에 Fig. 10과 같이 안정된 분무 형상을 나타내며 초음속으로 분사된다. 오리피스 길이를 $L = 11.9$ 로 고정하였을 때에 $L/d = 11.9$ 에서 $L/d = 39$ 에 이르기까지 오리피스의 직경을 1.0 mm에서 0.3 mm로 감소 시킴에 따라 마하수가 감소하는 이유는 발사체 충돌 직후 순간적으로 상승한 압력을 모두 방출되지 못하고 노즐 내부에서 압력 상쇄 효과가 나타나 마하수가 감소하는 것이다.

초음속 인젝터로부터 분사된 액체 제트는 미시적 분무 특성을 파악하기 위해 미립화 정도를 SMD(Sauter mean diameter)로 평가하며, 증발이나 연소 연구 분야에서는 SMD를 사용한다. 증발이나 표면 연소에서는 액적의 면적이 중요한 의미를 지니므로 실제 분무와 같은 체적과 표면적의 비를 가지는 SMD를 사용하도록

한다. 또한 SMD는 액적 관통이나 액적의 열전달 측면에서도 중요한 과정을 특성화 할 수 있기 때문에 분무되는 액체 제트는 SMD를 통해 성능을 평가 하도록 한다. Fig. 13과 같이 SMD는 오리피스 직경이 작아짐에 따라 최대 $151.2\ \mu\text{m}$ 에서 $52.25\ \mu\text{m}$ 로 감소하는 특성을 나타내었으며, 오리피스 직경이 $1.0\ \text{mm}$ 범위에서 SMD는 $142.0\ \mu\text{m} \sim 151.2\ \mu\text{m}$ 의 분포 특성을 나타내었다.

4. 결 론

초고속 발사체의 액체 저장부 충돌에 의한 초음속 액체 제트 분무 속도 및 분열 특성 연구를 위해 고속 CCD 모듈과 레이저 회절 분무 입경 측정 장치를 사용하였다. 발사초기에 발사관 출구에서는 압축파와 충격파를 관찰할 수 있었다. 오리피스 관 출구에서도 발사관과 비슷하게 액체 제트가 분사되기 직전에 수직 기체 방출파를 형성하여 수 μs 이내에 오리피스 출구에서 압축파와 충격파를 나타내었다. 초음속으로 분사된 액체 제트 전방 영역에서 궁형 충격파가 발생하였으며, 액체 제트는 이러한 충격파를 관통한 후 다시 압력발달 과정을 거쳐 2차 충격파를 생성하였다. 초음속 액체 제트 분무 선단의 액적에서도 충격파가 발생하였으며, 각각의 액적 사이에서 반사 충격파도 발생하였다. 오리피스 직경이 $1.0\ \text{mm}$ 조건에서 L/d 를 증가시킴에 따라 마하수가 크게 나타났으며, $L/d = 11.9$ 일 때 초음속 액체 제트의 분사 속도가 가장 빠르게 나타났다. 오리피스 길이를 $L = 11.9$ 로 고정하고 L/d 를 증가시킨 결과 액체 제트의 분사 속도는 노즐 내부에서 압력 상쇄 효과로 감소하였다. 또한 오리피스 직경 $1.0\ \text{mm}$ 조건에서 L/d 가 증가함에 따라 SMD는 동일한 분포를 나타내었으며, 오리피스 길이를 $L = 11.9$ 로 일정하게 하고 L/d 를 증가시킴에 따라 SMD가 감소하는 경향을 나타내었다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Bogdanoff, D. W. and Miller, R. J., 1995, "Improving the Performance of Two Stage Light Gas Guns by Adding a Diaphragm in the Pump Tube," Intl. J. Impact Engineering, Vol. 17, pp. 81-92.
- 2) K. Pianthong, K. Takayama, B. E. Milton, M. Behnia, 2005, "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," Shock Waves, Digital Object Identifier (DOI) 10.1007/s00193-004-0237-2.
- 3) F. P. Bowden and J. H. Brunton, 1958, "Damage to solids by liquid impact at supersonic speeds," Nature, Vol. 181, No. 4613, pp. 873-75.
- 4) F. P. Bowden and J. H. Brunton, 1961, "The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds," Proceeding Royal Society London, A series, Vol. 263, pp. 433-50.
- 5) J. D. O'Keefe, W. W. Wrinkle, and C. N. Scully, 1967, "Supersonic liquid jets," Nature, vol. 213, pp. 23-5.
- 6) H. H. Shi and K. Takayama, 1995, "Generation of high-speed liquid jets by high-speed impact of a projectile," JSME International Journal, Series B, vol. 38, no. 2, pp. 181-90.
- 7) H. H. Shi, K. Higashiura, and M. Itoh, 1999, "Generation of hypervelocity liquid jets using a powder gun and impact experiment," Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, vol. 42, no. 135, pp. 9-8.
- 8) T. Nakahira, M. Komori, M. Nishida, and K. Tsujimura, 1992, "The shock wave generation around the diesel fuel spray with high pressure injection," SAE Technical Paper, no. 920460.
- 9) K. Nishida, H. Ochiai, M. Arai, and H. Hiroyasu, 1997, "Characterization of diesel fuel spray by ultrahigh-pressure injection," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, vol. 63, no. 605, pp. 344-49.
- 10) 정대용, 2004, "극초고압 디젤분무의 액적분사압력 및 한계압력 규명에 관한 연구," 성균관대학교 박사학위 논문.
- 11) 이종근, 김희동, 구자예, 2010, "초음속 발사체의 쉘리 렌 가시화," 한국가시화정보학회 추계학술대회 발표논문집, pp. 73-74.