발사체 충돌에 의한 초음속 액체 제트의 분사 특성 및 유동 가시화

신정환* · 이인철* · 구자예† · 김희동**

Spray Characterization and Flow Visualization of the Supersonic Liquid Jet by a Projectile Impingement

Jeunghwan Shin, Inchul Lee, Jaye Koo and Heuydong Kim

Abstract. Supersonic liquid jet discharged from a nozzle has been investigated by using a ballistic range which is composed of high-pressure tube, pump tube, launch tube and liquid storage nozzle. High-speed Schlieren optical method was used to visualize the supersonic liquid jet flow field containing shock wave system, and spray droplet diameter was measured by the laser diffraction method. Experiment was performed with various types of nozzle to investigate the major characteristics of the supersonic liquid jet operating at the range of total pressure of 0.8 from 2.14 GPa. The results obtained shows that shock wave considerably affects the detailed atomization process of the liquid jet and as the nozzle diameter decreases, the shock wave angle and the averaged SMD of spray droplet tends to decrease.

Key Words: Projectile Aerodynamics(발사체 공기역학), Supersonic Liquid Jet(초음속 액체 제트), Shock Wave(충격파), SMD(Sauter 평균 지름), Atomization(미립화)

1. 서 론

초음속 액체 제트 분사 기술은 1950년대에 Bowden & Brunton이 고속항공기에 강하게 충돌하는 빗물에 의한 고체 표면의 삭마 및 변형을 초래하는 액체 침식 과정 분석 연구를 시작으로 발전되었으며, 현재 재료의 세척 및 절단 등에 물리적 현상들이 적용될 수 있다⁽¹⁾. 또한 고성능 직접 분사 방식 디젤 엔진(common rail direct injection diesel engine)의 연소 효율에 상당한 이점을 줄 수 있다. 액체 제트는 초음속의 상태로 분사되기 때문에 전방에 충격파를 수반하며, 이러한 충격파의 영향으로 온도, 전단력, 항력 등의 변화를 겪는다. 충격파를 수반한 초음속의 액체 제트는 액적 미립화가 촉진되어 완전 연소를 도모하고, 매연과 입자상 물질을 저감할 수 있다. 또한 국소 가열 효과로 인한 디젤 연료의 자발 점화 가능성을 기대할 수 있다⁽²⁾.

초음속 상태로 액체를 분사시키기 위해서는 높은 압력의 가압원이 필요하다. 일반적으로 산업용으로 사용되고 있는 사판식 유압펌프와 증압기는 액체 제트를 6000 bar의 압력으로 분사할 수 있지만 강한 충돌의 운동에너지를 제공하는 Ballistic Range의 일종인 2단식 경가스 총(two-stage light gas gun)을 사용하면 10,000 bar 이상의 압력으로 분사가 가능하다. 보통 2단식 경가스 총은 발사관으로부터 발사체(projectile)를 초고속으로 발사시킨 후 비행 상태에서의 공기 역학적 특성과 정지된 표적에 충돌시켜 고속 충돌 파괴현상을 연구할 수 있다⁽³⁾. 2단식 경가스 총으로부터 분사되는 액체 제트는 발사체를 직접 액체 저장부 배후에 충돌시켜 노즐을 통해 초음속의 속도로 전파하게 된다.

최근 초고압 고성능 디젤 엔진 개발에 관심을 가지는 미국, 일본 및 유럽 등 기술 선진국에서는 액체 제트의 분사 속도가 4.5 km/s 이상일 때 국소 가열 효과로 인한 자발 점화 가능성에 대해서 액체를 초고압 상태로 실현하는 많은 기술적 방법을 제시하였다. 초음속 액체 제트는 액체 제트 전방 영역에 충격파를 수반하며 제트 내부 액적과 미립화된 액적 사이에서 반사

†한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jykoo@kau.ac.kr

*한국항공대학교 대학원

**국립안동대학교 기계공학과

Fig. 1. Schematics of supersonic liquid jet⁽⁴⁾

충격파를 일으키기도 한다. 또한 유동장에서의 열/유체역학적 특성이 달라지며 실제로 초음속 액체 제트가 분사될 때, 미립화 특성 및 혼합 효율의 향상을 이끌어 낼 수 있다. 또한 충격파에 의해 유동장 내부 온도 상승을 일으킬 수 있다.

Fig. 1과 같이 초음속 액체 제트에서 생성되는 충격파로 인한 미립화 특성을 연구하기 위해 Field & Lesser⁽⁴⁾는 발사체 충돌 방법을 사용하여 노즐 출구로부터 고속의 액체 제트가 생성되는 단계를 증명하였다. Fig. 1(a)처럼 초기에 분사되는 액체는 높은 속도와 1.2 배 향상된 밀도를 형성하며, 액체 제트 전방과 충격파 사이에 상대적으로 높은 압력의 영역이 형성되어 작은 액적으로 미립화된다. 또한 Fig. 1(b)는 초기 액체 제트의 액적 분열 다음 단계를 개략도로 나타낸 그림이다. 액체 제트 중심의 액주 자체는 항력의 영향과 관련된 공기역학적 발달로 이루어진 미립화된 액적의 막으로 둘러싸여 있다는 연구 결과를 도출하였다.

축소형 2단식 경가스 총을 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. 국내에서는 초음속 액체 제트의 구체적인 연구 결과가 미비하며, 국외에서 수행된 연구 결과에 따르면 액적의 미립화, 충격파의 효과 및 매연물질 저감 등에 관한 상당한 지견을 소지한 것으로 예상되며 국내에서도 이 분야에 대한 연구의 필요성이 요구된다. 본 연구에서는 축소형 2단식 경가스 총을 사용하여 초음속 액체 제트의 분사 특성을 파악하기 위해 직선 원추형 노즐(straight cone nozzle)의 기하학적인 형상 변화에 따라 액체 제트의 분열 과정과 미립화 특성, 분사 속도 및 침투 거리 등을 고찰하고, 초기 분사시 분무 영역에 대한 액적 평균 직경 분포 특성을 규

명하여 초고압 디젤 엔진을 포함한 여러 가지 응용 분야에 적용하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 초고압 분사 시스템 구성

초음속 액체 제트의 분사 특성 연구는 대기압 조건에서 수행하였으며, 분무장의 주위 온도 297 ± 5 K, 상대습도 50%의 조건에서 수행하였다. 초음속 액체 제트를 실현하기 위해 사용된 초고압 분사 시스템의 구조는 Fig. 2와 같이 구성되어 있다. 축소형 2단식 경가스 총은 크게 고압관, 가압관, 발사관으로 구성되며, 고압관과 가압관 사이에 제 1격막, 가압관과 발사관 사이에 제 2격막이 삽입된다. 격막은 0.1 mm의 두께를 가진 OHP필름을 사용한다. 또한 고압관으로부터 높은 압력으로 생성된 기체를 단열 압축시키기 위해 가압관에는 폴리 카보네이트로 제작된 피스톤이 삽입된다.

2.2 액체 저장부 및 분사 노즐 구성

초음속 액체 제트를 생성하기 위해 설계된 분사 노즐 어셈블리는 Type A와 B의 2가지 형상이 적용되었다. Fig. 3(a)는 체적 700 mm^3 으로 이루어진 Type A의 액체 저장부를 간략히 나타낸 그림이며, 발사관으로부터 발사된 발사체(질량 6 gram)의 운동에너지를 이용하여 저장된 액체에 직접 충돌시켜 노즐 오리피스를 통해 분사 시킨다. Type A에 사용된 액체는 물이며 다양한 분사 노즐 형상에 따라서 초음속 액체 제트의 분사 속도, 침투 거리 및 액적 미립화 특성을 규명하기 위해 사용되었다. Fig. 3(b)는 Type B의 형식을 나타낸 그림이며 체적 약 $19,000 \text{ mm}^3$ 의 액체 저장부로 이루어져 있다. Type B의 형식은 피스톤을 장착하여 액체를 보관하게 되고 피스톤 배후에 발사체(질량 60

Fig. 2. Schematics of ballistic range to produce supersonic liquid jets

Fig. 3. Nozzle assembly

Table 1. Properties of Liquid used

Parameter	Water	Diesel	Oil (5W/20)
Temperature(K)	293	293	310
Density(kg/m ³)	998	840	850
Kinematic Viscosity(mm ² /s)	1.004	1.8-4.0	46.5

gram)를 충돌 시켜 노즐 오리피스로부터 액체를 분사시키는 시스템으로 구성되어 있다. Type B는 다양한 물성치를 가진 액체에 따른 분사 특성을 규명하기 위

해 수행된 형식이다. 사용된 액체는 물, 디젤 연료, 엔진 오일(5 W/20)이며 액체에 따른 물성치는 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 분사 노즐은 Fig. 4와 같이 직선 원추형 노즐로써 오리피스 직경(d), 길이(L), 원추형 각도(α) 등과 같은 기하학적인 형상이 구분되어 있다. Table 2에는 초음속 액체 제트의 다양한 분사 특성 연구를 위해 분사 노즐의 기하학적 치수를 나타내었다.

Table 2. Nozzle geometries

Nozzle case	D (mm)	(°)	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
4	5.2	45	2.0	0.5	4.0
5	5.2	45	9.0	0.3	30.0
6	5.2	45	15.0	1.2	1.67
7	5.2	45	11.0	1.2	4.17
8	5.2	45	8.0	1.2	6.67
9	5.2	45	5.0	1.2	9.17
10	5.2	45	2.0	1.2	12.5
11	5.2	45	2.0	0.8	2.5
12	5.2	45	8.0	0.8	10.0
13	5.2	45	11.0	0.8	13.75
14	5.2	45	15.0	0.8	18.75

2.3. 쉘리렌 가시화 및 분사 입경 측정 장치 구성

Fig. 5는 쉘리렌 가시화 장치로⁽⁵⁾ 광원은 HID Lamp를 사용하였으며, 초음속 액체 제트의 유동장을 가시화 하기위해 512×512 이미지 크기에서 2 μ s의 노출로 20,000 fps의 성능을 가진 Photron사의 FASTCAM SA1.1 모델의 초고속 CCD 카메라를 사용하였다. 또한 초음속 액체 제트의 액적 직경 측정을 위해 레이저 회절 원리를 이용한 분사 입경 장치는 Mie scattering 원리를 이용하여 액적 크기를 측정하며, 구형 액적에 대한 굴절률과 흡수 계수를 매개 변수로 사용하고 액적의 산란 중 회절에 따른 광량을 다윈소 광검출기를 사용하여 측정하도록 한다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 발사체 및 초음속 액체 제트의 충격파 구조 분석

고압관에서 115 bar의 압력이 생성되었을 때 제 1격 막이 파열되어 가압관으로 전달되고 그로 인해 단열 압축된 기체는 발사체를 가속시켜 액체 저장부에 충돌하게 된다. Fig. 6은 노즐 출구에서 방출되는 발사체를 초고속 카메라로 촬영한 이미지이다. Type B 발사체의 경우 0~0.235 ms 사이에서 발사 초기 발사관 출구에서 충격파와 압축파를 관찰할 수 있다. Type A의 발사체는 약 250 m/s, Type B의 발사체는 약 182 m/s의 속도로 방출된다. 이처럼 초고속으로 방출된 발사체는 발사관 출구에서 액체 저장부에 충돌하여 액체 제트를 초음속으로 분사시킨다. Fig. 7의 쉘리렌 가시화 이미지로부터

Fig. 5. Schlieren optical system **Fig. 6.** Schlieren images **Fig. 7.** Spray injection image at nozzle exit

액체 저장부가 충돌된 직후 액체 제트의 밀도는 최대 1.2배 향상되며 오리피스 출구에서 액체 제트는 압축파와 충격파를 관통하며 미립화 과정을 거친다.

Fig. 8은 초음속 액체 제트의 분무 및 충격파 구조를 나타낸 그림이다. 초음속으로 분사되는 액체 제트 전방에는 궁형 충격파(bow-shock)가 발생하며 궁형 충격파 후방에는 압축파가 존재한다. 분무 외곽에서는

Fig. 8. Flow field of supersonic liquid jets

공기역학적 항력에 의해 초음속 액체 제트의 미립화 특성이 나타나며, 분무 중심에서는 큰 운동량을 지닌 액주가 충격파를 수반하고 압축파의 영향과 공기역학적 항력을 받으면서 분사된다. 액주 형태로 분사된 액체 제트는 완전한 미립화 과정을 거치지 않고 분무 선단에서 액적 덩어리(droplet clump)를 이루어 분사된다. 이러한 액적 덩어리 전방에 다시 궁형 충격파가 나타나며, 액적과 액적 사이에는 반사 충격파(reflected shockwave)가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

3.2 초음속 액체 제트의 미립화 특성

Fig. 9는 오리피스 길이(L) 대 직경(d) 변화에 따른

Fig. 9. SMD of droplet and Mach number with L/d

(a) Water jet ($M \approx 2.15$)

(b) Diesel jet ($M \approx 2.33$)

(c) Oil(5W/20) jet ($M \approx 3.45$)

Fig. 10. Spray images with different liquids

초음속 액체 제트의 마하수와 SMD를 나타낸 그래프이다. 초고속 CCD 카메라를 사용하여 분사 시간에 따른 분사 거리를 측정하였고, 이를 통해 마하수를 계산하였으며, SMD는 분사 입경 측정 장치를 통하여 측정하였다.

L/d 가 3.0에서 11.9까지 오리피스 길이가 증가함에 따라 액체 제트의 액주 분열이 늦어지기 때문에 마하수가 증가함을 알 수 있다. 반대로 L/d 가 감소함에 따라 액주의 분열은 가속화되기 때문에 액주의 빠른 분열은 액체 제트의 속도를 감소시키는 결과를 초래하였다. 초음속으로 분사된 액체 제트는 미세적 분사 특성

Fig. 11. Spray penetration distance with different liquids

Fig. 12. Change of supersonic liquid jets with L/d

을 파악하기 위해 미립화 정도를 SMD(sauter mean diameter)로 나타내었다. SMD는 오리피스 직경이 작아짐에 따라 최대 151.2 μm 에서 52.25 μm 로 감소하는 특성을 나타내었다. 오리피스 직경 1.0 mm, 0.5 mm, 0.3 mm의 경우 오리피스 길이가 증가해도 SMD는 큰

변화가 없는 균일한 분포를 나타내었다.

3.3 물성치에 따른 초음속 액체 제트의 분사 특성

Fig. 10은 충돌 Type B에서 $L/d=11.9$ 의 노즐을 사용하여 다양한 액체의 물성치에 따른 초음속 액체 제트

Fig. 13. Spray velocity and penetration distance with L/d

를 쉐리렌 가시화 이미지로 나타내었으며, 분사 시간에 따른 침투 거리(penetration distance)를 Fig. 11의 그래프로 분석하였다. 침투 거리는 노즐 출구에서 액체 제트의 끝단까지의 길이로 정의하였다. 엔진 오일(5 W/20)의 경우 점성이 가장 크기 때문에 중심에서 분열되지 않은 액주로 인해 동일한 분사 시간(0.05 ms)에 대하여 분무 속도가 $M \approx 3.45$ 로 가장 높게 나타났으며, 가장 짧은 시간 내에 72.7 mm의 침투거리를 도달할 수 있었다. 이러한 결과로 초음속 액체 제트의 분사 환경에서 점성이 분사 속도에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.4 노즐 L/d에 따른 초음속 액체 제트의 분사 속도 비교

Fig. 12는 고정된 오리피스 길이($L=11.0$ mm)에서 오리피스 직경 변화에 따른 초음속 액체 제트의 분사 이미지를 나타낸 그림이다. 모든 조건에서 초음속 액체 제트는 전방에 충격파를 수반하며 액주 중심의 분사 에너지가 더 크게 작용하여 충격파를 관통하고 공기역학적 항력을 받으며 분열되는 특성을 파악할 수 있다. 동일한 오리피스 길이 조건에서 오리피스 직경이 증가함에 따라 분사 속도가 감소하는 경향이 발생하여 중심 액주의 분열이 빠르게 진행되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 13의 그래프와 같이 오리피스 직경 변화에 따른 순간 속도는 변동이 심한 특성이 나타난다. 이는 분사가 진행 될수록 액주의 분열이 빠르게 생성됨과 동시에 분사 시간 0.04 ms의 시점으로 충격파를 관통한 펄스 분사된 액주로 인해 순간 속도가 증가되는 경향이 나타났다. 또한 침투거리는 오리피스 직경이 가장 작은 0.5 mm에서 가장 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 축소형 2단식 경가스총을 이용하여 발사체 충돌에 의해 분사되는 초음속 액체 제트의 유동 가시화 및 미립화 특성을 쉐리렌 가시화 장치와 레이저

회절 분무 입경 측정 장치를 사용하여 분석하였다.

1) 초음속 액체제트 전방에 충격파 및 압축파 시스템이 발생하였으며, 분무외곽에서는 액적이 분열되는 과정을 가시화하였다. 또 제트 내부에서는 분열되지 않은 액주가 분사되어, 선행하는 충격파를 관통한 후 다시 2차 충격파가 발생하였다.

2) 액체의 점성이 높은 오일(5W/20)의 경우, 제트내부에서 큰 운동량을 가지는 액주로 인해 높은 마하수와 침투거리를 보였다.

3) 노즐의 길이가 길어질수록 분사 속도가 감소하였으며, 노즐의 직경이 작을수록 분사속도는 증가하였다.

4) 액적의 SMD는 노즐의 직경이 감소함에 따라 감소하였으나, L/d의 변화에는 크게 의존하지 않았다.

후 기

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

참고문헌

- 1) F. P. Bowden and J. H. Brunton, 1958, "Damage to solids by liquid impact at supersonic speeds," Nature, vol. 181, no. 4613, pp. 873~875.
- 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) Charters, A. C., 1995, "Development of the high velocity gas dynamics guns, Intl. Jour. Impact engineering," Vol. 17, pp. 181~203.
- 4) J. E. Field and M. B. Lesser, 1977, "On the mechanics of high speed liquid jets," Proceedings Royal Society London, A series, Vol. 357, pp. 143~162.
- 5) 강현구, 2007, "Ballistic Range Simulator에 관한 실험적 연구," 국립안동대학교 석사학위논문.