

# 주파수 변조 분사가 횡단 유동장의 분무 특성에 미치는 영향

이인철\* · 김종현\*\* · 구자예†

## Spray Characteristics of Modulated Liquid Jet Injected into a Subsonic Crossflow

I. C. Lee, J. H. Kim and J. Y. Koo

**Key Words:** Modulation(변조), Penetration(관통), Volume flux(체적유속)

### Abstract

These experiments are close examination of spray characteristics that are continuous liquid jet and modulated liquid jet. The experiments were conducted using water, over a range of crossflow velocities from 42~136 m/s, with modulation frequencies of 35.7~166.2 Hz. Between continuous crossflow jet and modulated cross-flow jet of penetration, breakup point, spray angle and macro spray shape are experimentally investigated with image analysis. In cross-flow field, main parameter of liquid jet for breakup was cross-flow stream rather than modulation effect. As oscillation of the periodic pressure that could make liquid jet moved up and down, the mixing efficiency was increased. Also, a bulk of liquid jet puff was detected at upper field of liquid surface. So, this phenomenon has a good advantage of mixing spray from concentration of center area to outer area. Because of modulation frequency, SMD inclination of the structured layer was evanescent. Cross-sectional characteristics of SMD at downstream area were non-structured distributions. Then cross-sectional characteristics of SMD size were about same tendency over a range that is effect of spray mixing. The tendency of volume flux value for various modulation frequency was same distribution. And volume flux was decreased when the modulation frequency increase.

### 기호설명

$Re_{cross}$  : Reynolds number of crossflow  
 $We_a$  : Weber number of crossflow  
 $q$  : momentum ratio of modulated injection

### 1. 서 론

횡단류 내에 여러 분사 형태로 분사되는 액체 제트는 로켓, 램제트, 스크램제트, 고성능 터보 제트에 많이 응용되어지므로 그 연구에 대한 가치 또한 중요하기 때문에 이러한 연구는 1980년대 에서부터 현재까지 꾸준히 지속되어오고 있는 연구이며, 초음속 및 아음속 횡단 유동장의 조건에서 수많은 연구가 진행되었다.

액체 제트의 분무 특성 연구는 인젝터 설계와 연소실 설계 이전의 필수적인 연구이며, 연소 효율을 결정하는 중요한 특성이 된다<sup>(1)</sup>. 수직으로 분사되는 액체 제트와 횡단류와의 상호 작용으로 인한 액체 제트의 동적 분무 특성(dynamic spray characteristics)에 대한 연구는 관통 거리(penetration depth) 및 액적의 분포(droplet distribution) 특성을 궁극적으로 결정하는 중요한 역할을 하

(2009년3월11일 접수 ~ 2009년 6월 27일 심사완료)

\*한국항공대학교 대학원

\*\*동양공업전문대학 기계설계과

†책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

E-mail : jykoo@hau.ac.kr

TEL : (02)300-0116

며, 최종적으로 연소 효율을 결정하는 중요한 특성으로 작용한다. 횡단류 유동에 액체 제트가 어느 각도를 가지고 분사되면 분사된 액체 제트와 횡단류 사이의 운동량이 증가하여 액체 제트의 분열이 이루어진다. 이러한 현상은 수많은 인자들에 의해서 영향을 받지만 큰 영향으로서 횡단류에 분사된 액체 제트의 선단(windward)에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며, 액체 제트의 후단(leeward)에서는 압력이 낮아져서 액체 제트는 유체 흐름방향으로 늘어나서 휘어지고 변형된다. 또한 횡단류는 액체 제트 후단의 양단에서 서로 반대방향으로 회전하는 와류를 형성하며<sup>(2)</sup>, 동시에 횡단류는 액체 제트의 주위 가장자리에 전단력을 주어 액체가 찢겨져 나가고, 잘게 부서지는 미립화현상이 일어나게 된다. 분무 제적, 액적 표면 직경, 체적유속은 수치 해석 시에 연소실에서 증발에 대한 모델 정립과 등가비를 결정하는 중요한 지표가 될 수 있다. 최근 변조 분사 제트에 대한 특성 연구는 Hermanson<sup>(3)</sup>, Deepe<sup>(4)</sup> 등이 연구 하였으며, 분사 압력 변동에 따른 특성은 관통거리 증가, 분무각 증가, 혼합 효율의 향상이라는 장점을 지니며, 또한 연소불안정성을 해결할 수 있다는 장점을 지닌다고 연구되었다. 특히, Hermanson et al.<sup>(3)</sup>은 횡단 유동장에서 완전히 변조된 작동 사이클에서의 침투의 효과에 대해 연구하였는데 완전히 변조된 제트는 저 주파수에서 정상상태의 제트보다 더 깊이 침투하고 긴 분사 시간은 변조 분사된 제트의 난류 퍼프(puff)를 증가시키며, 주어진 분사 주파수에 분사 시간을 감소시키면 분무 형태가 변한다고 설명하였다. 저작동(low operation) 사이클에 대한 영향은 퍼프(puff) 사이에 큰 공간을 만들어내고 제트 퍼프는 솔레노이드 밸브에서의 진동과 유체 전달 시스템에 있다고 설명하였으며, 관통거리의 증가는 주어진 주파수에서 duty cycle을 감소시킴으로써 이루어지며, 관통거리의 감소는 분사 주파수를 증가시킴에 따라 이루어진다. Deepe et al.<sup>(4)</sup>은 횡단유속, 웨버수, 점성계수, 분사 주파수, 운동량 비의 함수로서 1 atm의 횡단류로 변조 분사되는 액체 제트의 일차적 연료 분포 특성이 연료 전달함수로서 특성화 하였고 횡단유속 50~110 m/s에서 물, 에탄올 그리고 혼합된 액체를 사용하여 실험을 진행하였다. 분사된 액체 제트의 주파수는 50, 75, 100 Hz 였으며, 연료 전달함수는 시간에 따라 변하는 체적 유량과 2인치 하부에서 Mie-scattering의 신호로 정량화 된다고 서술하였다. Rayleigh의 이론을 고려했을 때 불안정성은 연료 변조로 억제할 수 있으며, 이러한 불안정을 억제하기 위해서는 연료 유량의 조절 값과 변

조로 인한 화염의 열 방출에 대해서 정확히 파악해야 하며, 이러한 정보는 위상차와 이득으로서의 화염 전달함수로 나타난다고 설명하였다. 화염 전달함수는 연료 시스템 전달함수, 연료 전도 전달함수, 연료 연소 전달함수의 3가지 함수로 나타낼 수 있으며, 연료 시스템 전달함수는 인젝터 출구로 방출되는 연료의 유량과 작동기로 들어가는 신호 사이의 관계로 특징지어질 수 있다. 연료 전도 전달함수는 인젝터 출구로 나가는 연료 유량과 화염면에 도달하는 연료의 유량의 관계로 결정되며, 연료 연소 전달함수는 화염면에 도달하는 연료의 유량과 연료 연소의 결과로 인한 열 방출률 사이의 관계로 정의되어 증가된 분사 주파수에 따른 미립화 향상과 전도시간 감소를 통해 위상차를 줄여준다고 설명하였다.

국내에서는 횡단류에 변조되면서 분사되는 액체 제트의 분무에 대해서는 아직까지 규명되지 않은 점이 많으며, 또한 국외의 연구결과에서는 주로 거시적인 특성과 실제 연소시 불안정성에 관한 연구를 기술하고 있다. 본 연구에서는 특히 액체 제트의 분무 형태, 관통거리를 재고찰하였으며, SMD, 체적유속 및 분무 혼합에 관한 데이터를 수집한 후 각 분무 특성에 대한 연구 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법 및 장치구성

### 2.1 실험장치 및 조건

횡단 유동장에 변조 분사 인젝터를 사용하여 액체 제트의 분무 실험을 수행하였으며, 실험실내의 온도를 평균 293.1K(20°C), 습도를 50%, 액체 제트에 작용하는 중력의 영향은 무시하였다. Table 1 각종 실험 변수, 물성치 및 실험 범위를 타나낸 표이며, Fig. 1에는 변조분사와 공기 보조 분사 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 나타내었으며, 실험에 사용된 단공(hole) 오리피스 직경은 1.0 mm이고 L/d는 2.5 이다. 변조 분사의 경우 분사 주파수를 최대 166 Hz까지 변경하였으며, 액체 제트의 압력 변조 조절 장치는 레저버(reservoir)에서 나온 액체 제트에 주기적인 압력 변동을 주어 횡단류로 분사시키는 장치이다. 분사 장치의 입구 인젝터 하부 10 mm에 압력 변환기(pressure transducer)를 설치하여 실시간으로 변동하는 압력을 나타내었다. 이 장치는 원판의 홀 간격을 조절하여 duty cycle을 변경할 수 있다. 고속의 주기적인 압력 조절의 환경 하에서 솔레노이드 밸브처럼 열에 의한 작동성능 하락에 대한 염려를 배제

Table 1 Test environment conditions

| Parameter   | Liquid         | Ambient air |
|---|----------------|-------------|
| Temperature (°C)  | 20             | 20          |
| Supply pressure (kPa)                                   | 50~300         | 50~300      |
| Density (kg/m <sup>3</sup> )                            | 998            | 1.21        |
| Surface Tension (N/m)                                   | 0.0727         | -           |
| $Re_{cross} = \frac{\rho_a U_a d_h}{\mu_a} \times 10^5$ | 3.03 ~ 10.05   |             |
| $We_a = \frac{\rho_a U_{cross}^2 d}{\sigma_1}$          | 28.2 ~ 316.9   |             |
| Liquid jet momentum ratio [q] (modulated jet)           | 18.77 ~ 118.06 |             |
| Liquid jet velocity (m/s)                               | 5.34~29.7      | -           |
| Modulation frequency (Hz)                               | 35.7 ~ 166     |             |

할 수 있으며, 반경 방향으로 더 많은 홀의 가공과 서로 다른 홀의 형상 가공으로 슬레노이드 밸브와는 또 다른 압력 변조를 발생시킬 수 있다는 장점을 지닌다. 이 장치는 최대 3200 RPM 까지 회전이 가능한 DC 모터를 사용하여 8개의 홀이 있는 회전원판을 회전시키며, 회전 원판이 돌면서 입구에서 유입된 액체 제트는 원판의 홀을 지나 출구로 나아가게 된다. 이때 회전 원판이 돌면서 수초 이내에 압력강하가 발생하게 된다. 이러한 원리로 주기적인 압력 변조를 발생시켜 횡단류로 분사시키게 된다. 100 kPa의 인제션 압력인 0 Hz에서 12.58 g/

s의 유량이 흐르지만 주기적인 압력 변조 주파수에 따른 질량 유량은 주파수가 증가함에 따라서 유량이 감소하는데 그 이유는 회전 원판 홀(hole)이 출구의 홀과 중첩되어 분사되는 시간 간격이 짧아지기 때문이다. 액체 제트의 분사압력은 100 kPa이며, 운동량비는 변조 분사의 경우 무차원 운동량 비 q로 나타내었다. q는 전반적인 액체 제트 특성에 영향을 주며, 운동량 비는 실험 변수들 사이의 상호관계를 파악하기 위해서 사용되어진다.

$$q = \frac{\rho_l U_l^2}{\rho_g U_g^2} \quad (1)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 변조 분사의 거시적 특성

Figure 2는 횡단 유동장으로 연속 분사, 변조 분사, 공기보조 분사된 액체 제트의 분무 형상을 나타낸 그림이다. 일반적으로 단일 분사 제트에서는 횡단류의 수평방향 공기력이 수직 방향으로 분사되는 액체 제트에 교란을 주어 액주에 불안정한 파장을 만들며, 교란된 액주는 액막(ligament), 액적(droplet)으로 분열하는 과정을 보인다. 변조 분사된 액체 제트는 연속 분사된 액체 제트에 비해 표면에 불규칙하게 단절된 큰 액적 덩어리 집합체가 훨씬 많이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 공기 보조 분사의 경우는 무화된 액적들이 분무 중심과 하류에 분포하는 것을 볼 수 있으며, 액체 제트를 분열시키는 보조 공기로 인하여 관통 거리가 깊은 것을 관찰 할 수 있

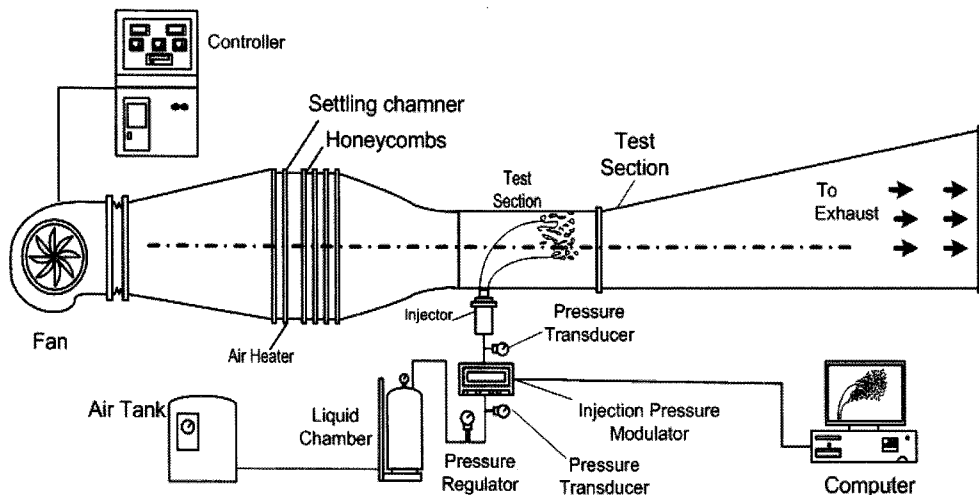


Fig. 1 Schematic of experiment system & suction type wind tunnel

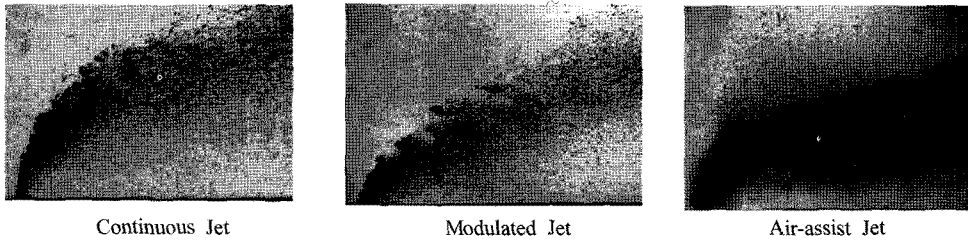


Fig. 2 Photograph images of continuous, modulated and air-assist jet

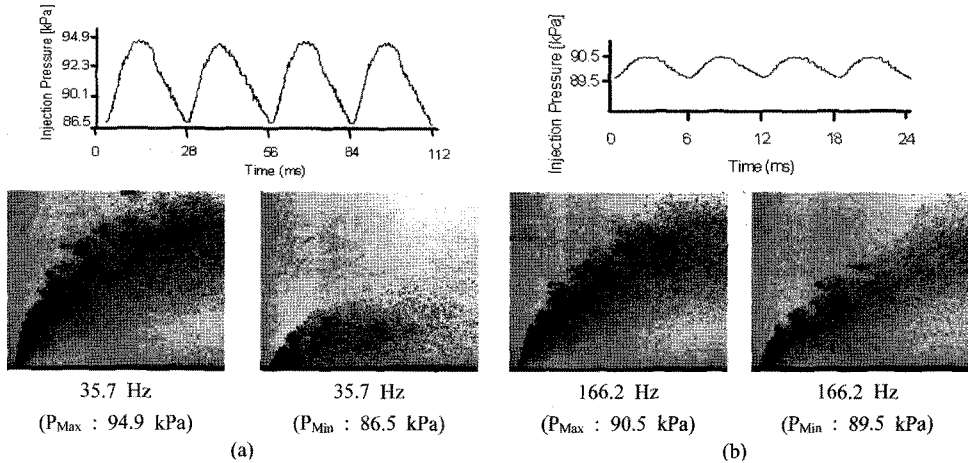


Fig. 3 Spray image of liquid jet in cross-flow for modulated

다. Fig. 3은 변조 분사된 액체 제트의 인젝터 후단에서 측정된 압력변화 주파수 선도와 최대, 최소 압력에 해당하는 이미지를 나타낸 것이다. 35.5 Hz의 분사 주기를 갖는 경우 최대 94.9 kPa, 최소 86.5 kPa의 주기적인 압력 변동과 변조 분사의 주기를 약 28 ms로 나타내며, 압력 변동으로 인한 분무 관통거리는 분무 상하 운동으로 94.9 kPa의 경우와 86.5 kPa의 범위를 보상하게 된다. 166 Hz는 6 ms의 분사 주기를 갖으며, 최대 최소의 압력차는 1 kPa 이다. 실제로 상하 주기 운동에 대한 정도는 거의 보이지 않기 때문에 공기와 혼합 효율은 감소할 것으로 예측된다. Fig. 3은 변조 분사된 액체 제트의 분무 궤적을 나타낸 그림이다. 변조 분사된 액체 제트는 실험조건을  $d=1.0\text{ mm}$ ,  $L/d=2.5$ ,  $We_a=92.74$ ,  $Re_{cross}=5.44 \times 10^5$ , 분사압  $P_i=100\text{ kPa}$ 로 유지하고 실험을 실시하였다. 주기적인 압력 변화로 분사된 액체 제트는 35.7~166.2 Hz의 분사 압력의 변조 주파수를 갖고 횡단 유동장으로 수직 분사되며, 횡단 유동장에서 주기적인 압력 변동에 따라서 상하의 주기적인 궤적의 변화를 일으키게 된다. 35.7 Hz의 경우는 큰 압력 변동으로 인하여 분무의 상하 운동이 가장 크게 나타난다. 즉, 각각의

압력 변동에 따라서 관통거리의 특성이 수초 이내에 변화되며, 이러한 변조 분사는 횡단 유동장에서 일정한 압력 범위 내에서 혼합효율을 향상시키는 장점을 지닌다. 변조 주파수가 166.2 Hz 일 경우 액체 제트의 분무 상하 운동은 그 정도가 35.7 Hz보다 적으며, 연속분사와 경향이 동일해진다. 변조 분사 주파수가 166 Hz 일 경우 실제로 상하 주기 운동에 대한 정도는 거의 보이지 않아서 공기와 혼합 효율은 감소할 것으로 예측된다. 하지만 35.5 Hz에서 94.9 kPa로 분사된 최대 압력에 대해서 5.6% 정도 차이가 나게 되고 유량은 5.14% 정도 차이가 나게 된다. 실제로 연속적인 유량에 근접하여 내부의 압력 변화만 보이고 상당히 안정된 형상을 보이기 때문에 연소시스템에 응용하여 연소시 180도의 위상차를 지니게 하여 연소 불안정성을 억제할 수 있을 것으로 예측된다. Fig. 4는 변조 분사된 액체 제트의 분무 궤적을 나타낸 그림이다.

주기적인 압력 변조로 분사된 액체 제트는 100 kPa로 분사되지만 실제 압력 변조 장치의 영향으로 압력강하가 발생하여 주기적인 압력 변동을 나타내며 분사된다. 35.7 Hz의 경우는 큰 압력 변동으로 인하여 분무의 상

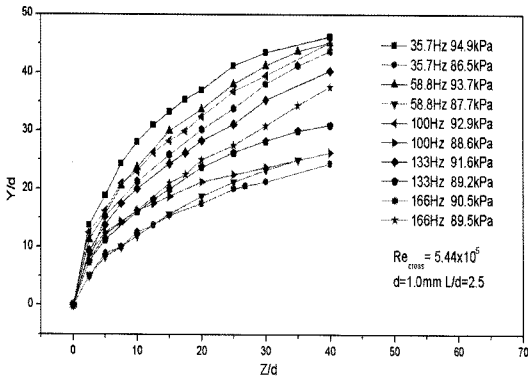


Fig. 4 Spray trajectory of liquid jet in crossflow for modulated injection

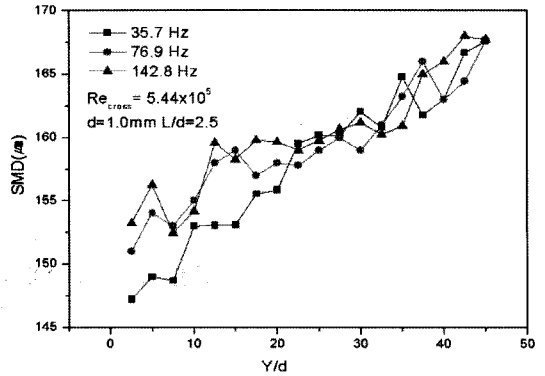


Fig. 5 Centerline profile of spray plume for liquid jet SMD at various modulated frequency (X/d=0, Z/d=40)

하 운동이 가장 크게 나타난다. 즉, 각각의 압력 변동에 따라서 관통거리의 특성이 수초 이내에 변화되며, 이러한 변조 분사는 횡단류 유동장에서 일정한 압력 범위 내에서 혼합효율을 향상시키는 장점을 지닌다.

### 3.2 변조 분사의 미시적 특성

Figure 5는 변조 주파수에 따른 분무 중심의 SMD를 나타낸 그래프이다. 분무된 액적의 SMD 분포는 35.7

Hz~142.85 Hz에서 147 μm~168 μm의 분포를 나타낸다. 그리고 35.7 Hz의 SMD는 76.9 Hz와 142.8 Hz의 SMD보다 Y/d=20 이하에서 적은 분포를 보이며, 147 μm~155 μm까지의 SMD 분포를 나타낸다. Fig. 6은 변조 분사시 SMD와 체적 유속을 나타낸 단면 분포도이다. 변조 분사된 액체 제트의 경우 단면 분포 면적이 넓지 않기 때문에, 측정범위를 Y/d=0~55, Z/d=0~60로 제한하였다. 압력 변동에 따라 액체 제트는 상하 운동을 하기 때

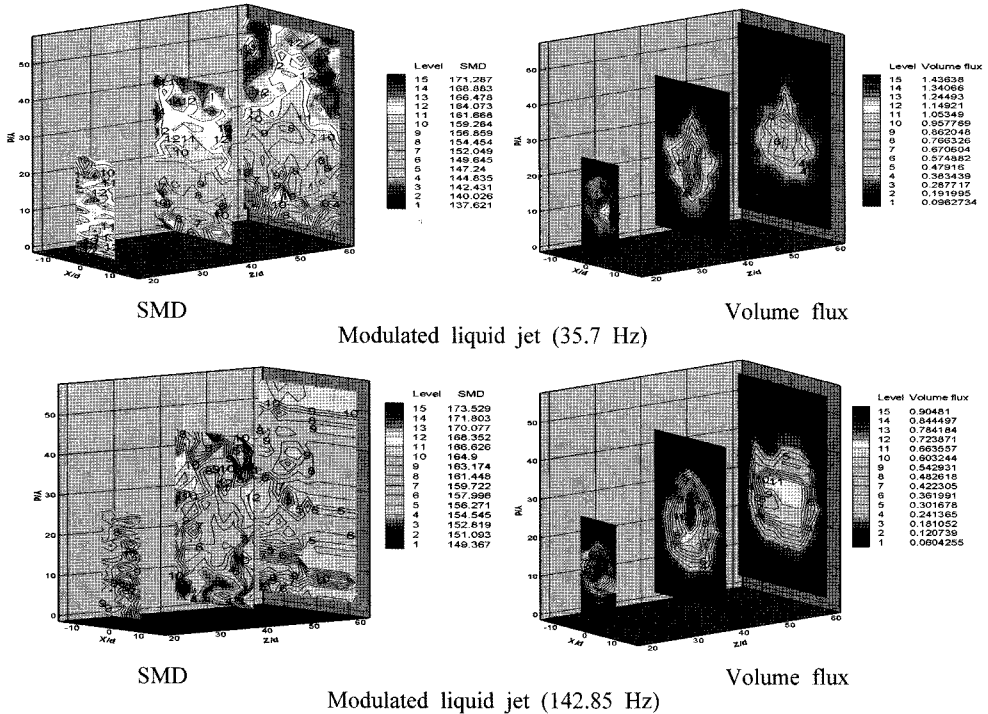


Fig. 6 Cross sectional contour of SMD and volume flux (d=1.0 mm, L/d=2.5)

문에 약 1만개 이상의 액적을 수집하여 평균화 하였다. PDPA로 시간에 따라 변화하는 액체 제트의 액적 평균 입경을 측정 한 결과 35.7 Hz의 경우 SMD는 137  $\mu\text{m}$  ~171  $\mu\text{m}$  정도로 분포하며, 액체 제트가 비주기적으로 상하 운동을 하기 때문에 각각의 단면에서 SMD는 불균일하게 분포하였다. 142.85 Hz의 경우 변조 분사 장치의 가동 시에는 최대 압력은 91.1 kPa로 분사되며, 최소압력은 89.25 kPa로 분사된다. 일반적으로 SMD의 범위는 149~173로 나타나며, 주파수 변조에 따른 SMD 영향은 횡단류에 의한 영향이 보다 지배적이고, 변조 분사의 경우 액적 분열에 대한 운동량이 작기 때문에 SMD 크기 분포는 0~142.8 Hz의 경우 동일한 경향성을 보인다. 또한 각각의 단면에서 초기에 SMD의 분포는 성층화된 분포를 보이지 않고 불균일한 분포를 나타낸다.  $Z/d=40, 60$ 에서는 약 159  $\mu\text{m}$ ~166  $\mu\text{m}$  액적들이 넓은 범위로 분포하게 되며,  $Z/d=60$ 에서는 연속 분사와 같은 층상 형태의 SMD 분포를 보인다. 결국 변조 주파수를 증가시키에 따라 액주의 상하 진동이 줄어들어 불균일한 SMD의 영역은 연속 분사의 경우와 동일해지게 되며, 액적들은 횡단류의 영향으로 주된 분열을 거치고 횡단류 방향으로 진행 할수록 그 분무 영역만 넓어지는 것으로 관찰되었다. 압력 변조에 대한 주파수가 35.7 Hz가 되면 액체 제트는 Y/d 방향의 상하 진동 때문에 분무 중심에서 0 Hz 경우와는 달리 Y/d 방향으로 넓어지게 되는 특성을 나타내며, 분사 유량이 주파수가 증가함에 따라 줄어들기 때문에 집중되는 체적유속은 변하게 되어 체적유속은 횡단류 방향으로 진행 할수록 중심의 최대값이 작아지고 분포되는 면적은 점점 크게 나타난다. 142.85 Hz의 경우 최대 체적유속은  $Z/d=20, Y/d=15$ 에서 0.90481  $\text{cc/s/cm}^2$  이고  $Z/d=40, Y/d=28$ 에서 체적유속의 값이 0.7981  $\text{cc/s/cm}^2$ ,  $Z/d=60, Y/d=30$  부근에서 체적유속의 값이 0.6764  $\text{cc/s/cm}^2$ 이 나타난다.

## 4. 결 론

횡단 유동장에 변조 분사되는 액체 제트의 분무 특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 횡단 유동장으로 변조 분사된 액체 제트는 압력 변조의 영향으로 Y/d 방향으로 주기적인 상하 운동을 나타내기 때문에 혼합효율을 향상 시킬 수 있다.

- 분무 단면에 대한 SMD 분포는 연속 분사의 성층화 분포 경향성과 비교하여 불균일한 분포 특징을 나타내며, 분사 압력 변조 주파수 변화에 대한 체적유속의 경향성은 주파수에 따라 비슷한 분포 경향을 보인다.

## 후 기

본 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구과제임(KRF-2007-D00084).

## 참고문헌

- (1) C. K. Law, "Mechanics of Flame Stabilization in Subsonic and Supersonic Flows", Major Research Topics in Combustion, Springer-Verlag, 1911.
- (2) A. R. Karagozian, "An Analytical Model for the Vorticity Associated with a Transverse Jet", AIAA Journal, Vol. 24, pp. 429~436, 1986.
- (3) J. C. Hermanson, A. Wahba and H. Johari, "Duty-Cycle Effects on Penetration of fully Modulated, Turbulent Jets in cross-flow", AIAA Journal, Vol. 36, No. 10, pp. 1935~1937, October, 1998.
- (4) J. M. Deepe, J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Effect of Weber Number on the Fuel Transfer Function for Modulated Liquid Jets", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2006.