

아음속 횡단 유동장으로 펄스 분사된 액체 제트의 분무특성

이인철* · 변용우** · 구자예***

Spray Characteristics of a Pulsed Liquid Jet into a Cross-flow of Air

In Chul Lee*, Young Wu Byun** and Ja Ye Koo***

Key Words : cross-flow(횡단류), pressure pulse frequency(압력펄스 주파수), volume flux(체적유속)

Abstract

The present study of these experiments are close examination of spray characteristics that are continuous liquid jet and modulated pressure pulse liquid jet. The experiments were conducted using water, over a range of cross-flow velocities from 42~136 m/s, with injection frequencies of 35.7~166.2 Hz. Between continuous cross-flow jet and pressure pulsed cross-flow jet for characteristics of penetration, breakup point, spray angle and macro spray shape are investigated experimentally. In cross-flow field, main parameter of liquid jet for breakup was cross-flow stream rather than pressure pulse frequency. 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 pressure pulsation frequency, an inclination of SMD for 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 frequency of pressure pulse was same distribution. And volume flux was decreased when the frequency of pressure pulse increase.

1. 서론

램제트, 스크램제트 엔진은 압축기와 터빈을 사용하지 않고 흡입 공기의 압축 성질을 이용하며, 고온·고압이 된 기체는 분사노즐로 이동되어 연소된 후 입구속도보다 높은 출구 속도를 얻게 된다. 이러한 초고속 비행에 사용되는 엔진은 무게대비 추력 발생율이 가스 터빈 엔진에 비해 약 1.5배 이상 높으며, 흡입구와 연소실 노즐로 간단히 구성되어 있어서 개발 시 적은 비용과 노력으로 개발이 가능하다는 장점이 있다. 램제트 및 스크램제트 엔진은 연소실 입구에서 흡입 공기의 속도가 아음속 이상에 이르므로 고속으로 흘러가는 공기 속에 연료를 분사시켜 연소실에 들어가기 전 수초 이내에 연료와

공기가 잘 혼합되어 연소실로 들어가도록 해야 한다 [1,2]. 공기 흡입식 제트 엔진은 흡입구와 연소실 사이에 중간 완충의 역할을 하는 매개체가 없어서 연소실에서의 화염이 불안정하며, 흡입공기가 불안정하고 흡입구와 연소실에 직접적인 영향을 받게 되므로 안정화된 추력 발생 기술이 매우 어려워진다. 고속의 공기 흐름에서 연료가 혼합되어 모두 기화되면 흡입구에서의 흐름 박리에 의한 압력 진동과 연소실에서 화염 진동간의 상호작용으로 연소 불안정이 생기는데 이러한 불안정성은 여러 구조물에 스트레스를 주고 배기가스의 허용 배출 범위를 넘기 때문에 연료의 분사제어 및 미립화 제어를 통해 연소기 내로 공급되는 연료와 혼합 특성을 잘 조절해야 한다 [3,4].

본 연구의 목적은 단공(single hole nozzle)노즐과 DC 모터를 이용한 기계적 방식의 압력 변조 장치를

* 한국항공대학교 항공우주및기계공학과, leeincc@kau.ac.kr

** 한국항공대학교 항공우주및기계공학과, ywbyeon@kau.ac.kr

*** 한국항공대학교 항공우주및기계공학부, jykoo@kau.ac.kr

사용하여 횡단 유동장에 분사되는 액체 제트에 주기적인 압력변동을 주어 횡단류 내에서의 거시적·미시적 분무특성을 고찰 할 뿐만 아니라, 관통거리, 분포면적, SMD, 체적유속 및 분무 혼합 특성을 궁극적으로 연구하는 것이다. 현재까지 국내에서 횡단류에 변조되면서 분사되는 액체 제트의 분무에 대해서는 아직까지 규명되지 않은 점이 많다. 때문에 실제로 횡단류에 압력이 주기적으로 변동 되면서 분사되는 액체 연료 제트의 관통거리 및 체적유속과 같은 분무 특성을 실험적인 방법으로 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

횡단 유동장에 연속분사 및 압력 변조 장치를 이용하여 펄스(pulse)분사되는 액체 제트의 분무특성에 대하여 실험하였다. 실험실 내의 온도는 평균 293.16K(20℃), 습도 50%였으며, 액체 제트에 작용하는 중력의 영향은 무시하였다. 또한 횡단류 유동 방향에 각도 변환 장치를 이용하여 액체 제트를 90°로 분사하였다. 액체 제트는 압축공기를 이용하여 액체를 가압하게 되며, 가압된 액체는 압력 조절기(regulator)를 통해서 제어할 수 있게 하였다. 일부의 공기압은 인젝션 노즐의 개폐를 담당하며, 가압탱크의 경우 압축 공기를 이용하여 0 ~ 600 kPa 까지 압력 조절기를 통하여 액체를 가압하게 된다. 액체 제트는 50 kPa에서 300 kPa 까지의 압력으로 분사되었으며, 대기압 및 상대습도의 변화에 따른 유속의 변화를 보상하기 위하여 유속을 표준대기(20℃, 101.3 kPa, 상대습도 50%)로 환산하여 진행하였다.

2.2 액체 제트 압력 펄스 장치

액체 제트의 압력 펄스 조절 장치는 레저버(reservoir)에서 나온 액체 제트에 주기적인 압력 변동을 주어 횡단류로 분사시키는 장치이다. Fig. 1은 횡단류 장치와 압력 변조 장치의 개략도이다. 장치의 입구, 출구 쪽에는 압력 변환기(pressure transducer)를 설치하여 실시간으로 변동하는 압력을 관찰할 수 있게 하였다. 또한 인젝터 하부 10 mm에도 압력 변환기(pressure transducer)를 설치하였다. 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 할 수 있으며, 반경 방향으로 더 많은 홀의 가공과 서로 다른 홀의

형상 가공으로 솔레노이드 밸브와는 또 다른 압력 펄스를 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 펄스를 발생시켜 횡단류로 분사시키게 된다. 100 kPa의 인젝션 압력에서 연속 분사 시에는 12.58 g/s의 유량이 흐르지만 주기적인 압력 펄스 주파수에 따른 질량 유량은 주파수가 증가함에 따라서 유량이 증가함을 알 수 있다.

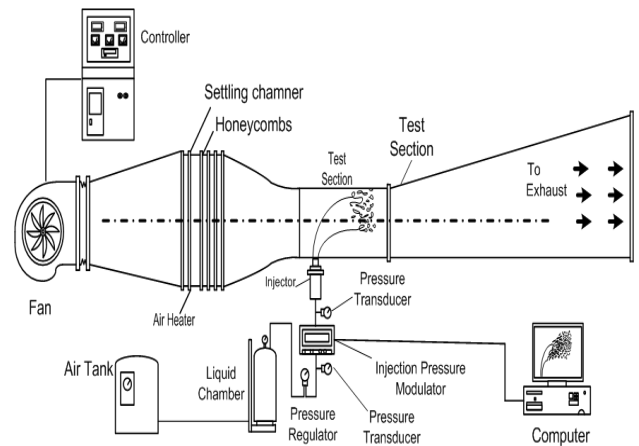


Fig. 1 Schematic of cross-flow jet modulation system

3. 결과 및 고찰

3.1 액체 제트의 분무 이미지

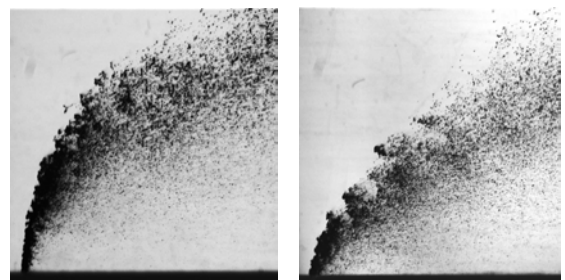
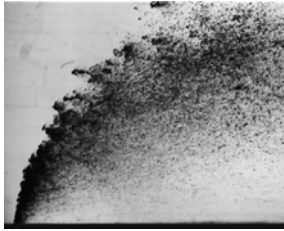
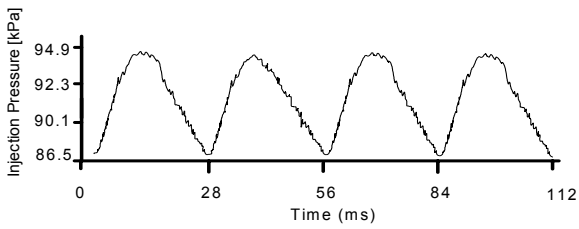


Fig. 2 Pulsed spray image in comparison with continuous spray

Fig. 2는 연속 분사된 액체 제트의 분무와 펄스 분사된 액체 제트 분무를 비교한 이미지이다. 펄스 분사된 액체 제트는 연속 분사된 액체 제트에 비하여 액체 제트 표면에서 단절된 큰 액적 덩어리 집합체가 훨씬 많이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

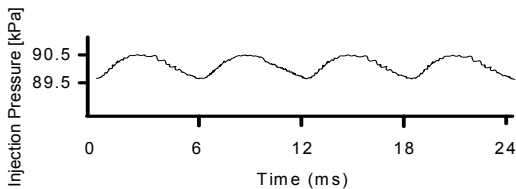


35.7 Hz (Max
pressure : 94.9 kPa)



35.7 Hz (Min
pressure : 86.5 kPa)

(a)



166.2 Hz (Max
pressure : 90.5 kPa)



166.2 Hz (Min
pressure : 89.5 kPa)

(b)

Fig. 3 Spray image of liquid jet in cross-flow for pulsed (a)35.7 Hz, (b)166.2 Hz

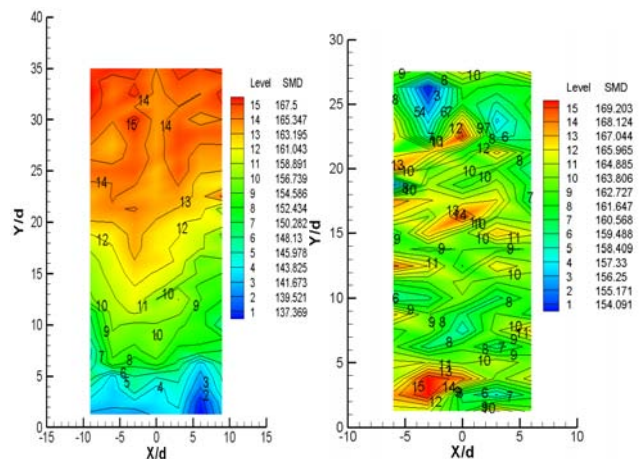
주기적인 압력 펄스로 분사된 액체 제트는 35.7 ~ 166.2 Hz의 분사 압력 펄스 주파수를 갖고 횡단류로 수직 분사되며, 횡단 유동장에서 주기적인 압력 변동에 따라서 상하의 주기적인 궤적의 변화를 일으키게 된다. 즉, 각각의 압력 변동에 따라서 관통거리와 분무각의 특성이 수초 이내에 변화된다. 이러한 펄스 분사는 횡단류 유동장에서 일정한 압력 범위 내에서 혼합효율을 향상시키고 더 나아가 연소시에 액체 제트가 지닌 주파수 즉, 압력 진동의 영향으로 연소시 연소실 내의 열 발생과 압력과의 180도 위상차를 갖게 하여 연소불안정성을 해소할 수 있는 장점을 지닌다[5]. 펄스 분사된 액체 제트는 실험

협조건을 $d=1.0$ mm, $L/d=2.5$, $We_a=92.74$, $Re_{cross}=5.44 \times 10^5$ 변조되지 않을 때 분사압 $P_i=100$ kPa로 유지하고 실험을 실시하였다.

연료 분사에 대한 압력 변동의 주파수가 증가함에 따라서 최대 압력은 94.9 kPa에서 86.5 kPa까지 낮아지며, 주파수가 감소함에 따라서 최대 압력과 최소 압력의 범위는 커지게 된다. 분사 주파수가 낮은 영역에서는 관통거리가 깊어지기 때문에 넓은 압력의 범위에 대한 관통거리의 보상이 가능하게 되며, 또한 궤적의 진동에 따라서 유동에 교란을 주기 때문에 혼합효율도 향상되게 된다.

Fig. 3은 펄스 분사된 액체 제트의 인젝터 후단에서 측정된 압력변화에 대한 주파수 선도와 최대, 최소 압력에 해당하는 이미지를 나타낸 것이다. 35.5 Hz의 분사 주기를 갖는 경우는 최대 94.9 kPa, 최소 86.5 kPa의 주기적인 압력 변동이 발생하고 펄스 분무의 주기는 약 28 ms이며, 압력 변동으로 인한 분무 관통거리는 94.9 kPa의 경우와 86.5 kPa의 범위를 보상하게 된다. 166.2 Hz는 5 ms의 분사 주기를 갖으며, 최대 최소의 압력차는 1 kPa 이다. 실제로 상하 주기 운동에 대한 정도는 거의 보이지 않기 때문에 공기와 혼합 효율은 감소 할 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 억제 할 수 있을 것으로 예측된다.

3.2 액체 제트의 미시적 분무 특성



(a) 0 Hz

(b) 35.7 Hz

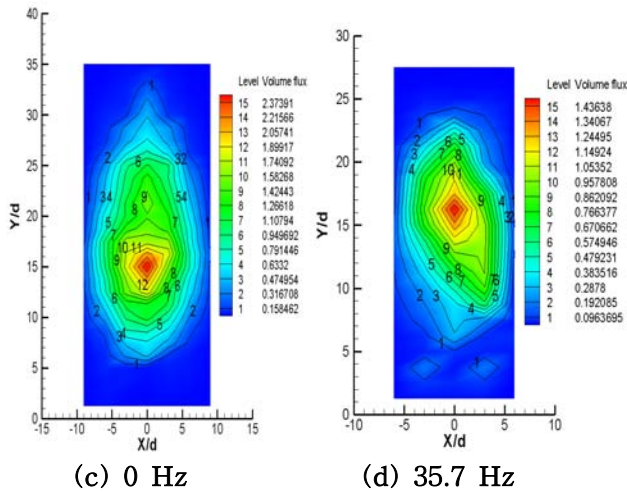


Fig. 4 Cross-sectional contour of liquid jets SMD and volume flux at $Z/d=20$ ($P_i=100$ kPa, $d=1.0$ mm, $L/d=2.5$)

Fig. 4는 횡단 유동장에 분사된 액체 제트에 대한 SMD와 체적유속을 $Z/d=20$ 에서 나타낸 2차원 단면 분포이다. 0 Hz 분무에 대한 SMD는 성층화된 구조를 지니며, 분무 외곽으로 갈수록 좀 더 큰 액적들이 관찰되었다. 분무 상부로 갈수록 큰 액적들이 관찰되었는데 그 이유는 분무 초기에 분사된 액체 제트는 공기와 액주와의 운동량 교환으로 분열이 되었지만 질량이 크고 수직 방향의 속도 성분이 남은 큰 액적이 존재하기 때문이다. 횡단 유동장에 35.7 Hz로 펄스 분사된 액체 제트는 변조 분사 장치의 가동 시에는 최대 압력 94.9 kPa로 분사되며, 최소압력 86.5 kPa로 분사된다. 그리고 일반적으로 SMD의 범위는 137~171 μm 로 나타난다. SMD의 크기에 대한 경향성은 0 Hz의 경우와 비슷하지만 각각의 단면에서 SMD의 분포는 성층화된 분포를 보이지 않고 불균일한 분포를 나타낸다. (c)에서 처럼 압력 펄스 0 Hz의 조건에서의 분무 단면의 체적유속은 횡단류 방향으로 진행 할수록 중심의 최대값이 작아지고 분포되는 면적은 점점 크게 나타난다. 압력 펄스에 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 된다.

4. 결론

횡단 유동장에 연속으로 분사되는 액체 제트 및 펄스 분사되는 액체 제트의 이미지로 거시적 분무 특성을, PDPA를 이용하여 미립화 특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 횡단 유동장으로 펄스 분사된 액체 제트를 관찰했을 때 압력 펄스의 영향으로 액체 제트는 Y/d 방향으로 주기적인 상하 운동을 진행하며, 액체 제트 표면에서 단절된 큰 액적 덩어리 집합체가 연속 분사보다 훨씬 많이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

2. 횡단류로 분사된 액체 제트의 단면 분포 특성 고찰 결과 분사 압력 펄스에 대한 주파수가 증가함에 따라 연속 분사시의 특징인 성층화된 SMD의 경향성은 사라지며, 불균일한 액적의 단면분포 특성을 나타낸다.

3. 분사 압력 펄스의 주파수 변화에 대한 체적유속의 경향성은 주파수별로 비슷한 분포를 보이며, 압력 펄스에 대한 주파수가 증가하면 압력이 낮아져 유량이 감소하기 때문에 체적유속은 줄어들게 된다. 압력 펄스 주파수의 영향으로 액주는 주기적으로 상하 운동을 하기 때문에 혼합효율을 향상시킬 수 있으며, 중심에만 집중되는 체적유속을 분산시킬 수 있는 장점을 지닌다.

후기

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

참고문헌

- [1]. Yatsuyanagi, N., Chinzei, N., Mitani, T., Wakamatsu, Y., Masuya, G., Iwagami, S., Endo, M., Hanus, G., "Ramjet Engine Test Facility In NAL-KRC, Japan," AIAA-98-1511, 1998.
- [2]. Inamura, T., Takahashi, M., Kumakawa, A., "Combustion Characteristics of a Liquid-Fueled Ramjet Combustor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 4, (2001), pp. 860-868.
- [3]. Law, C.K., "Mechanics of Flame Stabilization in Subsonic and Supersonic Flows," Major Research Topics in Combustion, Springer-Verlag, 1911.
- [4]. Landau, A.H., Yeneriz, M.A., "Parametric Supersonic Combustion Ramjet Engine Optimization," AIAA-65-446, 1965.
- [5]. Bloxidge, G.J., Dowling, A.P., Hooper, N., and Langhorne, P.J., "Active Control of an Acoustically Driven Combustion Instability," AIAA J. 26, pp. 783, 1998.