

## 횡단유동내 인젝터 홀의 위치에 따른 제트의 분무 특성

최명환\* · 신동수\* · Kanmaniraja. Radhakrishna\* · 손민\* · 구자예\*\*†

### Spray Characteristics of Jet According to Position of Injector Hole in Cross Flow

Myeung Hwan. Choi\* · DongSoo. Shin\* · Kanmaniraja. Radhakrishna\* · Min. Son · jaye. Koo\*\*†

#### ABSTRACT

Effects of injector position and momentum flux ratio on a vertical jet in a cross flow field were studied qualitatively and shown by using air and water. The experiment was carried out by fixing the momentum flux ratio and varying the position of the injector hole. Conversely, the injector hole position was fixed and the momentum flux ratio was varied. Image visualization was performed by a Shadowgraph technique using a high speed camera. The visualized images were compared for finding differences in spraying through Density Gradient Magnitude Image. It is observed that as the  $x/d$  of the apparatus increased the jet break up height decreases and the spray angle also decreases. When  $x/d$  is 0, the spray reaches the floor and ceiling at any momentum flux ratio.

#### 초 록

공기와 물을 사용하여 인젝터의 위치와 운동량 플럭스 비가 수직유동이 횡단유동장내의 수직분사 제트에 미치는 영향을 정성적으로 연구하고 도시하였다. 운동량 플럭스 비를 고정하고 인젝터 홀의 위치를 변화시키고 역으로 인젝터 홀의 위치를 고정하고 운동량 플럭스 비를 변화시켰다. 이미지 가시화는 고속카메라를 이용하여 Shadowgraph 기법을 사용하였다. 가시화된 이미지는 밀도구배강도 이미지를 통하여 분무의 차이를 비교하였다. 장치의  $x/d$ 가 증가할수록 제트의 분열 높이가 낮아지며 분무 각도 또한 감소하는 것을 관측하였다.  $x/d$ 가 0일 때는 어떠한 운동량 플럭스 비에서도 분무가 바닥과 천장에 닿게 되는 결과를 보였다.

Key Words: Gas turbine engine(가스터빈엔진), Radial swirler(반경방향 스월러),  
Jet-in-crossflow(수직분사제트), Momentum flux ratio(운동량 플럭스 비)

## 1. 서 론

전 세계를 통틀어 대기오염에 대한 위기의식이 고조되면서 엔진에 대한 배기가스 규제가 강해지고 있다. 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)의 환경규제위원회(Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP)에서 주요 대기오염물질에 대한 규제를 제정하고 있다. 그래서 최근 주목받고 있는 항공용 가스터빈엔진의 연소기 기술인 희박 예혼합 연소기(Lean-premixed-prevaporized, LPP)가 많이 연구되고 있다.[1],[2] LPP연소기는 희박 직접분사 연소기(Lean direct injection, LDI)와 마찬가지로 희박연소로 화염 온도를 낮추어 온도의 함수로 표현되는 NOx 생성량을 감소시키는 개념을 기본으로 한다. LPP연소기는 연소가 일어나기 이전에 연료와 공기의 균일한 혼합을 만들고 공기 중에 분사된 액체연료가 충분한 시간을 통해 기화된 후 공기와 예혼합기를 만들어 연소시키는 개념이다. LPP연소기는 국부화염온도가 낮으므로 벽라이너의 냉각에 필요한 공기량이 줄어들어 연소기에 쓰이는 공기량을 늘릴 수 있으며 이로 인해 공기와 연료 사이의 전단력을 이용한 분무에 매우 유리하다. 하지만 예혼합과 예증발에 쓰이는 시간이 매우 길어 화염이 꺼지거나 예혼합 영역에서 자연발화나 역화가 일어날 수 있다. 때문에 구조와 형상에 따라 적절한 스윌러(swirler)와 연소기를 선정해야한다.

최근 연구되고 있는 동향에 의하면 Main injector와 Pilot injector는 각각 다른 분무 방식을 채택한다. Main injector는 연소기 내부로 흘러들어가는 공기량이 많으므로 낮은 분무 압력에서도 미립화가 유리한 Air-blast 방식이나 횡단유동에 대한 수직분사제트(jet in crossflow)방식을 주로 채택한다. 수직분사제트 분무방식은

수직으로 분사되는 제트에 수평방향의 공기유동을 통하여 미립화를 일으키는 방식이다.[ 이때 공기유동은 예혼합과 예증발의 시간을 길게하기 위해 스윌러를 통하여 스윌을 주게된다. 이때 채택되는 스윌러는 축방향 스윌러와 반경방향 스윌러가 있다. 두 스윌러는 연소기의 형상과 무게를 고려하여 채택한다. 수직분사제트유동에서 중요한 형상인자는 수직제트가 분사되는 injection hole의 위치이다. 본 연구에서는 반경방향 스윌러를 사용한 수직분사제트 방식의 Main injector의 설계를 위해 수직분사제트 유동에 대한 injection hole의 위치에 따른 분무특성을 연구하고 고속카메라와 이미지 가시화 기법을 통해 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

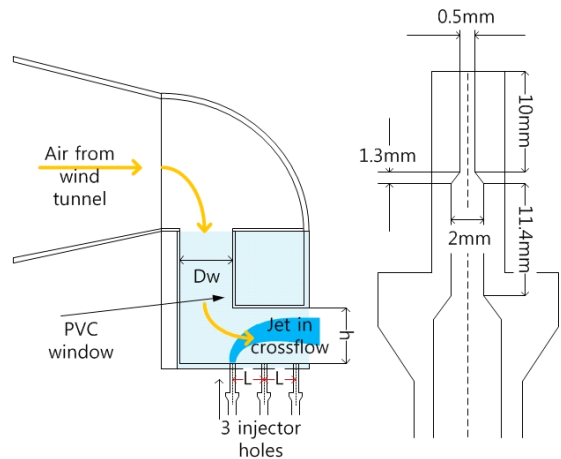


Fig. 1 Schematic of jet in crossflow experimental apparatus [3]

### 2.1 수직분사제트 유동 가시화 실험 장치 및 인젝터

횡단유동에 대하여 인젝터 홀의 위치에 따른 수직분사제트 유동 시험을 수행하기 위한 실험 장치의 개략도를 Fig. 1 오른쪽에 나타내었다. 송출형 풍동기에서 나온 유동은 장치 안으로 들어가고 장치 안에서 수직유동을 만들기 위해 꺾인다. 꺾인 유동은 반경방향 스윌러와 같은 유동을

\* 한국항공대학교 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

만들어주기 위해 다시 한 번 수평방향으로 꺾이게 된다. 유동은 장치를 빠져나와 대기 중으로

실험 조건은 Table 1에 정리하였다. MFC (Mass flow controller)를 통하여 물의 유량을 설

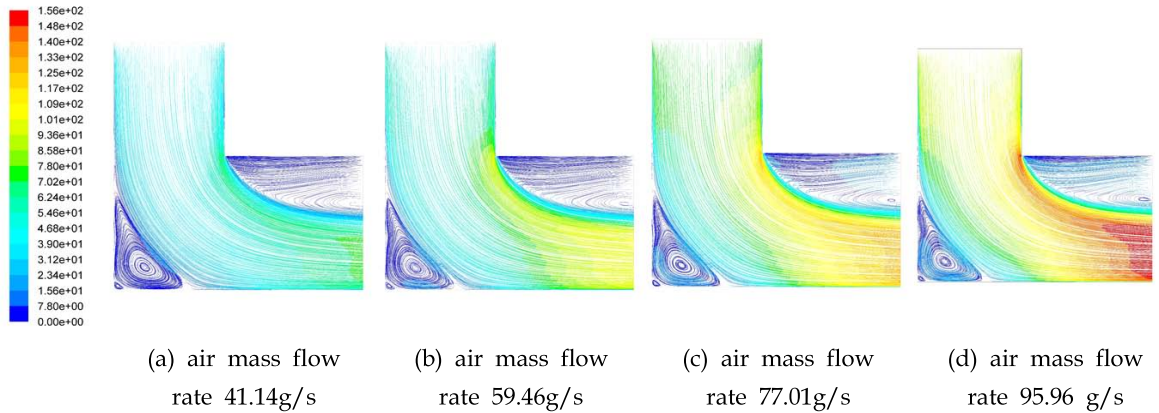


Fig.2 Pathlines and velocity profiles in 2D experimental apparatus

퍼지며 퍼진 유동은 흡출풍동기를 통해 일정한 방향으로 흐르게 된다. 인젝터 홀의 위치는 총 5개이나 수직유동에 직접적으로 영향을 받는 위치는 본 실험에서 제외하여 수직 유동이 직접적인 영향을 받지 않는 3개를 실험하였다. 인젝터에서 사용된 액체는 물이고 수직방향에서 꺾여 수평방향으로 움직이는 유동에 대하여 90°로 분사되며 횡단 유동에 대한 수직분사제트를 형성한다. 수직 유동이 지나가는 유로의 폭(Dw)은 8mm이고 수평유동이 지나가는 유로의 높이(h)는 10 mm이다. 인젝터의 구조는 Fig. 1의 왼쪽 그림과 같으며 1/4인치 튜브에서 들어온 유동은 중심선 기준 30°로 지름 2 mm, 길이 11.4 mm인 첫 번째 관을 통과한다. 그다음 30°로 동일하게 경사진 부분을 통과하여 지름(d) 0.5 mm 길이(y) 10 mm인 관을 통해 밖으로 분출된다. 이때 거리에 따른 인젝터의 위치를 홀이 직경으로 나누어 무차원화 하여 y/d로 표현한다. 즉, y/d는 20이다. 각 인젝터는 L(2 mm) 만큼 떨어져 위치 되어있으며 장치의 내부 가장 왼쪽 끝 벽에서부터 8 mm 떨어진 위치를 시작으로 차례대로 1번, 2번, 3번 인젝터로 지정하였다. 1번 인젝터의 위치를 기준으로 인젝터 직경으로 나누어 x/d=0 차례대로 x/d=4, x/d=8로 표현한다.[4]

정하고 1g/s, 1.5g/s, 2g/s로 분사하여 그 경향을 보았다. 물의 공급은 물탱크에 공기를 가압하

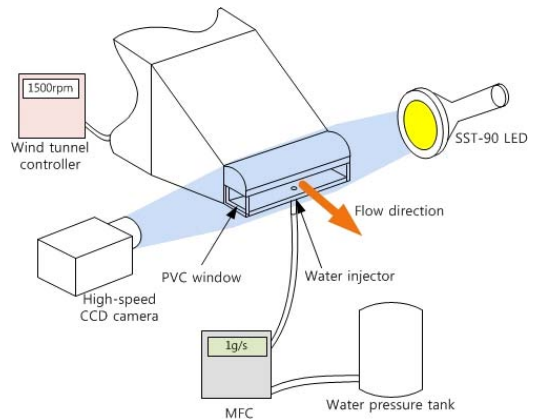


Fig. 3 Schematic of visualization method

여 사용하였다. 송출형 풍동기는 컨트롤러를 통하여 각각 41.14 g/s, 59.46 g/s, 77.01 g/s, 95.96g/s 으로 공급하였다. 이때 장치의 출구 높이는 h=10 mm, 너비는 w=80 mm 이므로 출구의 면적은 A=800mm<sup>2</sup>이다. 공기유량과 면적을 이용하여 출구의 공기 속도를 계산하게 되면 41.03 m/s, 58.44 m/s, 74.4m/s, 90.72 m/s가 된다. 물의 경우 물의 분사속도는 각각의 유량에 대하여 5.09 m/s, 7.64 m/s, 10.19 m/s이다.

분무의 분석을 위해 무차원수 운동량 플럭스

비(Momentum flux ratio)를 도입하였다. 운동량 플럭스 비를 사용하여 두 유체의 거동을 분석하고 설명하였다.

$$J = \frac{\rho_{jet} V_{jet}^2}{\rho_{gas} V_{gas}^2} \quad (1)$$

## 2.2 이미지 가시화 및 후처리 방법

횡단유동조건내의 수직분사제트유동을 가시화를 하기 위해 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 SST-90 LED 조명과 APX-RS 고속카메라를 이용하여 고속이미지 촬영을 하였으며 촬영속도는 10000 frame per second(펄),노출 시간은 1/25100 sec 이고 촬영된 이미지는 후처리를 통하여 밀도 구배 강도 이미지(Density Gradient Magnitude Image, D.G.M.I)를 통해 유동을 분석하였다. [5],[6]

## 2.3 수직분사제트유동 가시화 실험 조건

반경방향 유동에 대한 Jet-in-cross분무 실험은 3개의 인젝터 홀에 대하여 Table.1에 제시된 조건과 12가지의 운동량 플럭스 비를 조건으로 총 36번 실험하였다. 각 결과에 대하여 인젝터 홀의 위치에 따라 물의 유량이 일정한 조건, 공기유량이 일정한 조건, 운동량 플럭스 비가 일정한 조건을 비교하여 유동을 분석하였다.

또한 실험을 진행하기 이전에 장치의 유동특성이 어떠한 경향이 있는지 미리 파악하기 위하여  $k-\epsilon$ 모델을 이용해 경계조건을 통하여 공기 유동만 간단하게 2D로 해석하였다.[7]

## 3. 실험 결과

우선 횡단유동에 대한 수직분사제트의 거동을 알아보기 위하여  $k-\epsilon$ 모델을 통해 해석한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 장치의 출구 면적은 일정하기 때문에 공기 질량 유량이 증가할수록 출구에서의 속도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 유동의 특성은 곱힘 관에서 일어나는 것과 비슷한 경향을 보인다. 반경방향에서 유입되는 유동이 수평방향으로 전환될 때 수평방향 유로의 상부에 재순환 영역이 생기게 된다. 이러한 특성은 제트에 의하여 분열된 액적의 경로에 커다란 영향을 미치게 된다.

인젝터의 위치가  $x/d=0$ 일 때를 기준으로 서서히 증가시켜 가며 운동량 플럭스 비가 12.29인 조건으로 촬영한 순간이미지와 밀도구배강도 이미지를 Fig. 4에 나타내었다.[8]  $x/d=0$ 에서 증가하면서 유동내부로 분사되는 제트의 분열 높이가 점점 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 유동의

Table 1. Experimental condition

Exit area ( $mm^2$ )	water density ( $kg/m^3$ )	water mass flow rate(g/s)	water velocity (m/s)	air density ( $kg/m^3$ )	air mass flow rate(g/s)	air velocity (m/s)	Momentum Flux ratio
800	1000	1	5.09	1.25	41.14	41.03	12.29
				1.27	59.46	58.44	5.97
				1.29	77.01	74.4	3.62
				1.32	95.96	90.72	2.38
		1.5	7.64	1.25	41.14	41.03	27.66
				1.27	59.46	58.44	13.44
				1.29	77.01	74.4	8.15
				1.32	95.96	90.72	5.36
		2.0	10.19	1.25	41.14	41.03	49.17
				1.27	59.46	58.44	23.89
				1.29	77.01	74.4	14.49
				1.32	95.96	90.72	9.53



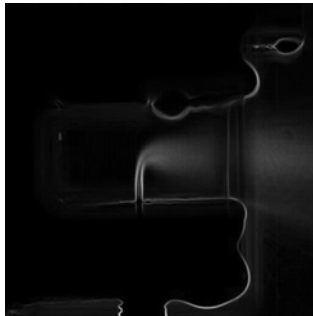
(a)  $J=12.29$ ,  $x/d=0$



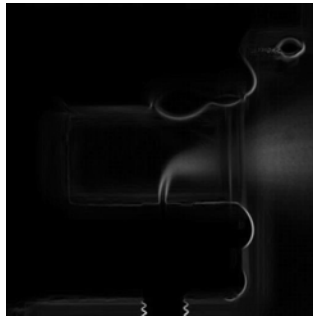
(b)  $J=12.29$ ,  $x/d=4$



(c)  $J=12.29$ ,  $x/d=8$



(d) D.G.M.I. of (a)

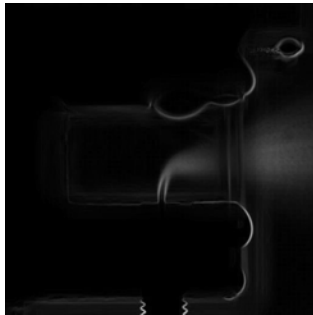


(e) D.G.M.I. of (b)



(f) D.G.M.I. of (c)

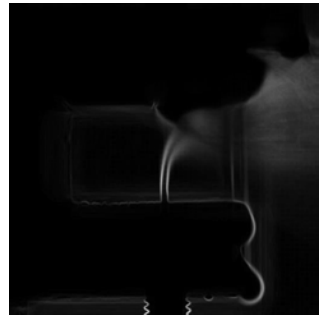
Fig. 4 Shadowgraph image and D.G.M.I. of jet in crossflow according to changing the injection hole position with fixed momentum flux ratio



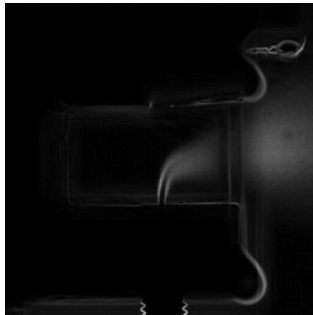
(a)  $J=12.29$ , water 1 g/s



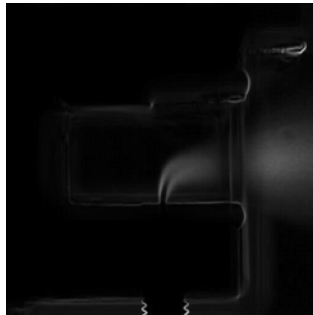
(b)  $J=27.66$ , water 1.5 g/s



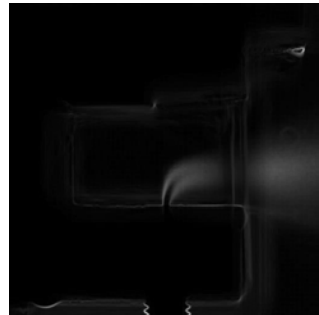
(c)  $J=49.17$ , water 2.0 g/s



(d)  $J=13.44$  air 59.46 g/s



(e)  $J=8.15$  air 77.01 g/s

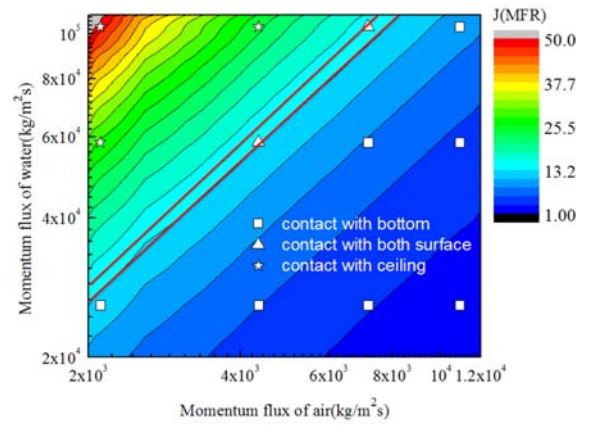


(f)  $J=5.36$ , air 95.96 g/s

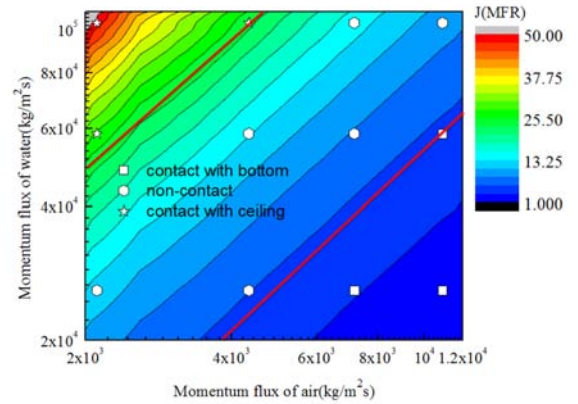
Fig. 5 D.G.M.I. of jet in crossflow according to changing momentum flux ratio by changing water mass flow rate and air mass flow rate

방향이 수직에서 수평으로 변하면서 유동이 유로의 위쪽보다는 아래쪽으로 물리는 현상이 원 인임을 확인할 수가 있다. 또한  $x/d=0$  위치에서 제트가 분열된 후 형성된 액적들이 이루는 각도가  $x/d=8$ 까지 차례대로 점점 감소하는 것을 볼 수가 있다.  $x/d=0$ 인 인젝터에서 형성된 액적들은 유로의 바닥과 충돌하여 출구에서 pre-filming을 통해 다시 분열하는 것을 관측할 수 있다.  $x/d=4$  위치에서는 유로의 바닥과 천장 사이에 적당한 각도를 이루며 분열이 되고  $x/d=8$ 의 경우도 제트의 분열 위치가 낮음에도 불구하고 분무 액적 각도가 가장 작아 천장과 바닥에 닿지 않음을 볼 수 있다.

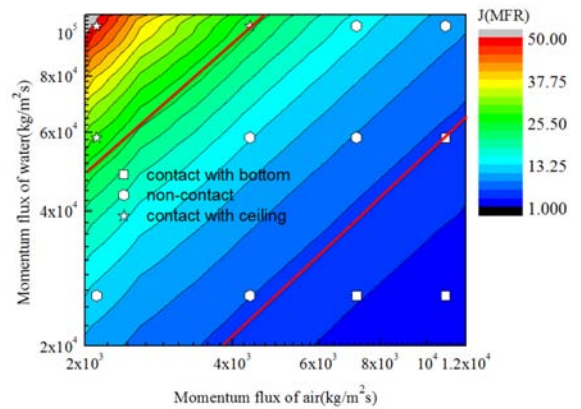
동일한 인젝터 홀의 위치에 따라 운동량 플럭스 비를 변화시켜가며 비교한 밀도구배강도 이미지의 일부는 Fig. 5에 도시하였다. 모든 밀도 구배강도 이미지의 인젝터 홀은  $x/d=4$ 로 고정하였으며 Fig. 5(a), (b), (c)는 공기유량을 41.14 g/s 일정하게 한 뒤 물의 유량을 1 g/s, 1.5 g/s, 2 g/s 까지 순서대로 증가시켰고 Fig. 5(d), (e), (f)는 물의 유량을 1.5 g/s로 고정한 뒤 공기 유량을 59.46 g/s, 77.01 g/s, 95.96 g/s로 증가시켰다. 공기유량이 일정할 때 물의 유량에 따라 운동량 플럭스 비가 증가하면서 제트의 분열 위치가 점점 높아지는 것을 관측할 수 있다. 또한 분열 위치가 증가하면서 분열액적의 윗면이 수평선과 이루는 각도가 점점 증가하여 천장과 액적들이 충돌하여 pre-filming이 일어나고 액막이 다시 분열한다. 운동량 플럭스 비가 49.17일 때, 분열액적의 이루는 밀도 구배의 경계가 전산유체를 통해 해석한 재순환 영역과 수평방향유동의 경계를 이루게 된다. 액체의 질량 유량이 일정하고 공기질량유량이 증가하는 조건에서는 운동량 플럭스 비가 감소하면서 제트의 분열 높이가 감소하나 그 폭이 크지 않다. 분열된 액적이 이루는 윗면이 점점 낮아지며 액적분열각도가 점점 좁아지는 것을 관측할 수 있다. 하지만 액적 분열 위치가 너무 낮아지면 분열액적이 이루는 윗면이 유로의 바닥에 닿아 pre-filming을 유발한다. 이런 모든 경우를 분석하여 분열된 액적이 바닥과 천장에 닿는 운동량 플럭스 비를 3개



(a)  $x/d = 0$



(b)  $x/d = 4$



(c)  $x/d = 8$

Fig. 6 Contact range according to Momentum flux ratio



의 등치선(contour)곡선을 사용하여 인젝터 홀의 위치에 따라 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 6의(a)를 보면 인젝터가  $x/d=0$ 에 위치해 있을 때 운동량 플럭스 비가 13.44보다 낮은 경우 바닥과 액적들이 접촉하고 14.49보다 높은 경우 천장과 접촉한다. 그 사이 범위는 바닥과 천장에 동시에 접촉되는 경우이다. Fig. 6의 (b)는  $x/d=4$  위치에 있을 때를 도시하였다. 운동량 플럭스 비가 5.36보다 낮은 경우 바닥에 접촉하며 23.89 보다 높은 경우 천장과 접촉한다. 이때 빨선 내의 범위인 9.53과 23.89사이의 범위는 는 액적이 바닥과 천장에 닿지 않는 경우를 의미한다. Fig. 6의 (c) $x/d=8$ 도 (b)와 동일한 경우이지만 바닥과 접촉하게 되는 운동량 플럭스비의 범위가 5.97로 증가하고 천장과 접촉하게 되는 플럭스 비의 영역이 27.66부터 시작된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수직방향 유동조건에 대한 수직분사제트유동 실험 장치와 고속카메라를 이용하여 가시화 하고 분석하였다.

운동량 플럭스 비가 일정할 때 인젝터 홀의 위치가 수직방향 유동에서 멀어질수록 제트의 분열 위치는 점점 낮아지는 결과를 보였다. 이는 수직방향의 유동이 수평방향으로 꺾이면서 나타는 유동의 영향이다. 이때 생성되는 재순환 영역에 제트가 유입되면 제트는 재순환 영역과 수평을 향하는 유동사이의 경계를 따라 막을 형성한다. 또한 분열제트액적이 이루는 각도는 감소하는 경향을 보였다. 또한 인젝터 홀의 위치가 고정될 때 운동량 플럭스 비가 증가하고 감소함에 따라 제트의 분열 높이가 증가하고 감소하였다.  $x/d$ 가 0일 때는 분무가 바닥과 천장에 닿게 되며 공기와 물의 전단에 의한 분열이 아닌 충돌에 의한 분무가 일어나며  $x/d=4, 8$ 일 때, 운동량 플럭스 비에 따라 바닥과 천장에 닿지 않는 경우를 관측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 지원을 받아 수행한 항공우주부품기술개발사업(No. 100 67074)의 연구 결과입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Lefebvre, A.H., *Gas Turbine Combustion*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
2. Lefebvre, A. H., *Lean premixed/prevaporized combustion*, NASA CP-2016, 1977.
3. Liscinsky, D., True, B., & Holdeman, J., "Experimental investigation of crossflow jet mixing in a rectangular duct," *29th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, pp. 2037, June. 1993.
4. Lee, I. C., Kang, Y. S., Moon, H. J., Jang, S. P., Kim, J. K., & Koo, J., "Spray jet penetration and distribution of modulated liquid jets in subsonic cross-flows," *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 24, No. 7, pp. 1425-1431, 2010.
5. Kim, D. H., Lee, K. W., Son, M and Koo, J. Y., "Visualization of Gas-centered Swirl Sprays in Sub to Super Critical Conditions," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, 2014, pp. 26-33.
6. Lee, K. W., Kim, D. H., Son, M., Han, J. Y. and Koo, J.Y., "Analysis of Supercritical Shear Coaxial Jet Using Density Gradient Magnitude," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, 2013, pp. 59-66.
7. Homicz, G. F., "Computational fluid dynamic simulations of pipe elbow flow" U.S.A., Department of energy, SAND Repoet, SAND2004-3467, Aug. 2004.
8. Stenzler, J. N., Lee, J. G., Santavicca, D. A., & Lee, W., "Penetration of liquid jets in a cross-flow". *Atomization and Sprays*, Vol. 16, No. 8, 2006.