

타원형 노즐을 이용한 횡단류 유동에서 액체제트 특성 연구

송윤호* · 황동현* · 안규복*†

A Study on the Characteristics of Liquid Jet in Crossflows Using Elliptical Nozzles

Yoonho Song* · Donghyun Hwang* · Kyubok Ahn*†

ABSTRACT

Effect of elliptical orifice on the spray characteristics of liquid jet ejecting into subsonic crossflows were experimentally studied. Circular/elliptical plain-orifice injectors, which had different ratios of the orifice length to diameter and major axis to minor axis, were used for transverse injection. Compared with the previous research, breakup lengths of elliptical nozzles are shorter than circular nozzles at all experimental condition. Cavitation/hydraulic flip are considered as a reduction in the breakup length at all circular/elliptical nozzle. In the case of liquid column trajectories, major axis which was placed to the crossflows, increases the frontal area of the liquid column exposed to the crossflows. Hence, the aerodynamic force exerted on the jet is increased and the penetration depth is reduced.

초 록

아음속 공기유동으로 수직분사하는 액체제트에 대하여 오리피스 형상이 달라질 경우, 분무특성에 어떠한 영향을 미치는지 실험적으로 연구하였다. 서로 다른 오리피스 길이 대 직경비와 타원형 노즐의 종횡비를 갖는 분사기들을 제작하여 수직분사 실험을 진행하였다. 원형노즐과 타원형 노즐에서의 분열길이를 비교하였으며, 타원형 노즐에서의 분열길이는 모든 실험조건에서 원형노즐에 비해 줄어들었다. 캐비테이션과 수력튀김 현상이 분사기 내부에 발달되는 분무차압 조건의 경우, 두 노즐 모두 분열길이가 감소하였다. 액주궤적의 경우, 장축으로부터 분무되는 액체제트가 횡방향 공기유동에 수직으로 부딪혀 나가는 경우가 액주의 궤적이 단축에 비해 더 휘어지며, 침투높이가 낮아진다.

Key Words: Breakup length(분열길이), Cavitation(캐비테이션), Circular nozzle(원형노즐), Column trajectory(액주궤적), Elliptical nozzle(타원형 노즐)

1. 서 론

횡방향의 아음속 유동에 대하여 수직으로 분사하는 액체제트의 분사 방법은 램제트, 스크램제트, 가스터빈 엔진 등의 연소기에 많이 사용되고 있다. 이와 같은 공기 흡입 엔진에서의 연소

* 충북대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

실의 안정성과 연소효율은 액체제트의 미립화 특성에 많은 영향을 받으므로, 이에 대한 물리적인 현상과 미립화 과정들의 메커니즘에 대하여 이해하는 것이 중요하다.

Chen 등[1]에 따르면, 일반적으로 액체제트의 분무구조는 크게 세 영역으로 구분하고 있다. 오리피스 출구로부터 분무되어 분사기의 노즐 형상을 유지하고 있는 액주영역, 액주파와 공력학적 힘에 의하여 분열이 일어나 큰 액적과 작은 액적으로 미립화 되어 이루어진 액사영역과 액적영역으로 구분하게 된다.

분열이전의 침투거리와 액주의 궤적은 분열 이후 액적의 형성위치를 결정해주며, 미립화가 얼마나 잘 일어났는가를 나타내는 중요한 파라미터가 된다. Schetz와 Padgye[2]는 최대 침투 높이에서의 모멘텀 해석을 수행하였으며, 침투 높이는 노즐 직경의 약 6.25배이며 액체/기체 모멘텀 플럭스 비에 따라 결정된다고 하였다. Wu 등[3, 4]은 액주의 궤적을 힘의 평형 이론을 통하여 접근하였으며, 공력학적 힘에 의하여 액주의 궤적이 결정된다는 가정을 바탕으로 항력계수와 액체/기체 모멘텀 플럭스비의 관계식으로 표현하였다. 또한 액적의 분열에 대하여 시간적도를 이용하여 수평방향과 수직방향의 분열길이를 예측하고, 여러 모델에 대하여 실험을 거쳐 타당성을 검증하였다. 하지만 이러한 분무특성에 대한 결과는 정상유동에 한정하여 실험이 진행된 것으로 오리피스 내부 교란에 대한 효과가 고려되지 않았다. 캐비테이션이나 수력튀김의 현상에 의한 교란이 분무에 영향을 미칠 가능성이 높다는 사실은 이미 예전부터 공유되고 있었다.

Tamaki 등[5]은 오리피스 내부의 유동에 대하여 캐비테이션이 일어나는 다양한 인자들에 대하여 규명하였고, 이러한 내부 유동 특성은 분무에 대하여 지대한 영향을 미친다고 하였다. Ahn 등[6]은 앞선 선행연구의 결과를 토대로 오리피스 내부에 교란이 발생하게 되었을 때, 액주궤적과 액주의 분열길이에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

최근 들어, 향상된 미립화 성능을 얻기 위하여 노즐의 형상을 원형이 아닌 삼각형이나 타원형

등으로 제작한 노즐에 대한 연구들이 보고되고 있다. Ku 등[7]은 타원형 노즐의 경우 원형 노즐에 비해 동일 분사조건에서 작은 액적이 형성되며, 분사된 연료와 주위공기와의 혼합효과가 증대된다는 연구를 발표하였다.

선행연구들을 종합해보면, 원형 노즐을 이용하여 액주의 궤적과 액주분열과 같은 분무특성에 대한 연구가 상당히 진행되어 왔지만, 타원형 노즐을 이용하여 수직분사된 실험이 거의 연구되지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 아음속 횡단류 공기유동에 수직으로 액체제트를 분사시켜 내부 유동 특성(캐비테이션 및 수력튀김)과 오리피스 형상(원형 및 타원형 노즐)에 따른 액체제트의 분무특성을 실험적으로 연구하는데 목적이 있다.

2. 실험방법

Figure 1은 분무장치와 분무가시화 장치를 나타낸 도식도이다. 고압 압축기를 이용하여, 각각의 작동유체들을 가압시켜서 공기와 물을 각각 테스트 영역에 공급하게 된다. 테스트 영역과 분사기 챔버 내 물의 압력과 온도 측정을 위해 K-type 열전대를 사용하였다. 유동가시화를 위해 2개의 광원장치(Polarion, PS-X1)와 고속카메라(Vision Research, Phantom v9.1)를 이용하여, 분사기 출구로부터 분무되는 액체제트의 이미지를 각 조건에서 400장씩 촬영하였다.

각 분사기의 오리피스 형상과 실험조건은 Table 1에 정리하였다. 분사기 모델에서 “C”, “E”는 각각 원형 및 타원형 오리피스를 나타내며, 다음 숫자는 오리피스 단면의 종횡비(a/b)를, 마지막 숫자는 오리피스 길이 대 오리피스 지름(타원일 경우 단축지름)비를 의미한다. 기존의 결과[8]에 의하면, 각진 모서리를 갖는 오리피스에서 $L/d > 8$ 에서는 캐비테이션과 $L/d \leq 8$ 인 경우에는 수력튀김 현상을 발견하였다. 따라서 본 연구에서도 이를 바탕으로 캐비테이션과 수력튀김, 정상유동 상태를 얻도록 설계하였다.

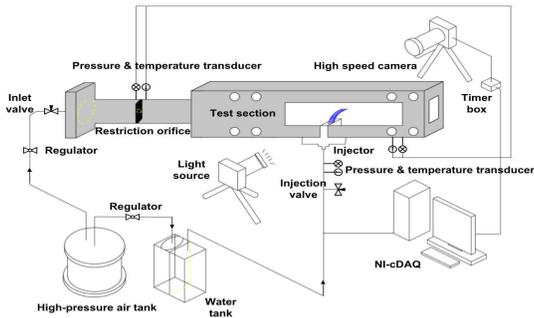


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus : test section

Table 1. Experimental conditions

Injector No.	C-1-10	E-2-20	E-3-30
Orifice diameter(d), minor axis(b)	0.5 mm		
Major axis(a)	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
Aspect ratio	1	2	3
Injection pressure differentials [bar]	1, 2, 3, 4, 5, 6		

3. 결과 및 고찰

3.1 액체제트의 액주궤적

수직분사 제트의 궤적에 대한 연구는 광범위하게 연구되었고, 궤적은 주로 위쪽 경계면을 기준으로 분무의 전체적인 분포 특성을 결정한다고 알려져 있다. Figure 2는 동일 직경(원형노즐의 직경과 타원형의 단축 = 0.5 mm)을 갖는 두 분사기에서 액체제트가 분무될 때, 액체제트와 횡방향 공기유동이 서로 수직으로 부딪히는 기준으로 액주궤적의 변하게 되는데 그 결과를 그래프로 나타내었다. 원형노즐의 경우, 오리피스 직경을 이용하여 데이터를 정규화 시켜주었으며, 타원형 노즐의 경우, 장축과 단축의 직경이 서로 다르기 때문에 유효직경(\sqrt{ab})의 개념을 도입하여, 데이터를 각각 정규화 시켜주었다. 타원형

노즐이 원형 노즐보다 액주궤적이 더 많이 휘어졌으며, 이는 타원형 노즐에서 액체제트가 분무될 때 원형노즐과 다르게 순간적으로 kidney 형태의 넓은 액주형태로 빠르게 변형되므로, 공력학적 힘을 상대적으로 더 받기 때문에 액주궤적이 많이 휘어지게 된다.

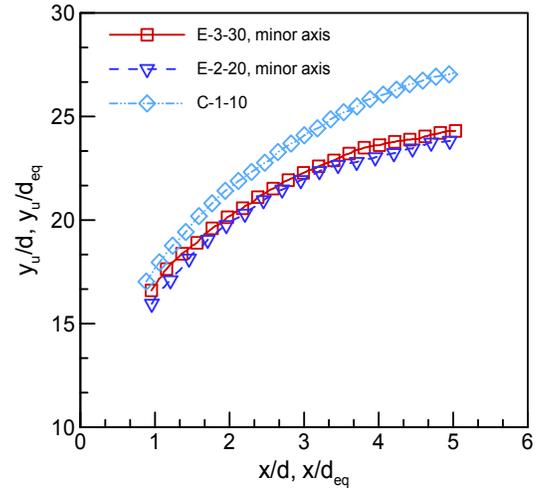


Fig. 2 Liquid column trajectories normalized by the each orifice diameter for the injectors with circular/elliptical nozzles

Figure 3은 타원형 노즐(E-2-20, E-3-30)에 대해서 동일 분사기 기준 장축과 단축을 바꿔가며 실험을 진행하였으며, 이에 따른 액주궤적 결과를 나타내었다. 같은 타원형 분사기를 기준으로 종횡비가 바뀌는 경우, 침투높이와 액주의 궤적이 서로 다르게 되는데 이는 공기 역학적 관점으로 설명할 수 있다. 결과를 보면, 종횡비가 서로 다른 두 타원형 노즐의 모든 경우에서, 횡방향 공기유동이 장축으로부터 분무되는 액체제트와 수직으로 부딪혀 나가는 경우가 액주궤적이 더 휘어지게 된다. 동일 운동량 비에 대해서 장축 출구로부터 분무되는 액체제트와 공기역학적 힘이 수직으로 부딪히는 경우, 단축 출구로부터 분무되는 액체제트보다 공기유동 대비 노출되는 액주영역이 늘어나기 때문에 액체제트에 가해지는 항력이 증가되고, 침투높이가 감소하게 된다.

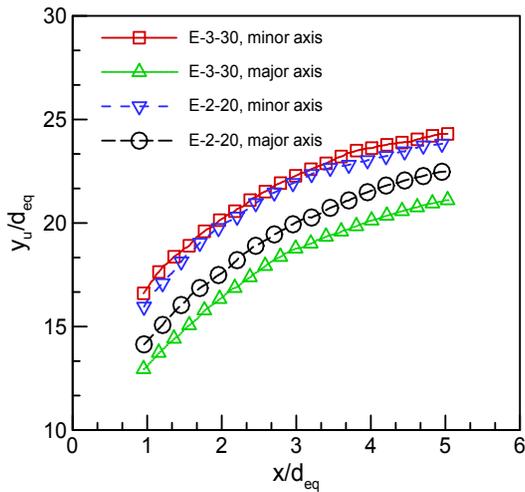


Fig. 3 Liquid column trajectories normalized by the equivalent diameter for the injectors with elliptical nozzles

3.2 액체제트의 분열길이

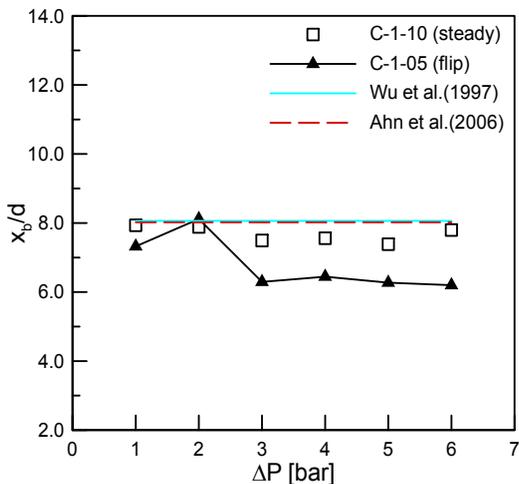


Fig. 4 Liquid column breakup length for the circular nozzle

분열길이의 경우, 각 분무차압 조건에서 고속 카메라로 촬영된 400장의 이미지를 바탕으로 in-house code를 이용하여 x 방향과 y 방향에서의 분열길이를 분석하였다. 원형노즐에서의 x 방향과 y 방향에서의 분열길이를 Fig. 4에 나타내

었다. C-1-10 분사기의 경우, 분열길이는 이전 선행연구와 비슷한 분열길이의 결과($x/d = 7.67$)를 보였다. 하지만 C-1-05의 분사기의 경우, 캐비테이션과 수력튀김의 내부 유동 특성이 관찰된다. 캐비테이션이 일어나면서부터(2 bar \rightarrow 3 bar) 분열길이가 감소한 모습을 확인할 수 있다. 캐비테이션이 분사기 내부에 발달하게 되면, 액체제트의 교란을 초래하며 이러한 불안정한 흔들림에 의하여 분열과정을 빠르게 촉진시켜 액주의 분열이 빠르게 진행된다고 판단하였다. 수력튀김으로 내부유동 특성이 변하게 되면(3 bar 이후), 액체제트의 단면적 감소에 의한 결과가 분열길이 감소효과를 나타낸 주된 요인으로 생각되었다.

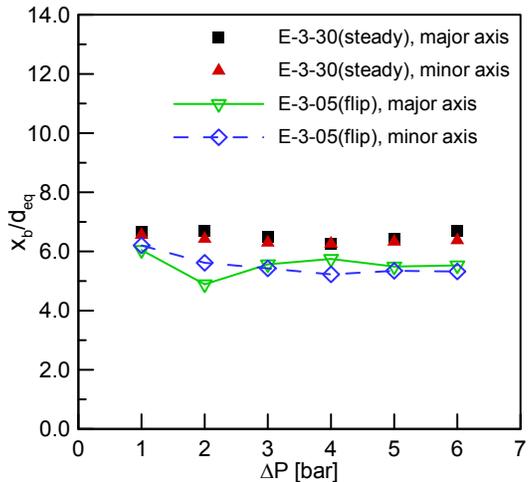


Fig. 5 Liquid column breakup length for the elliptical nozzle with aspect ratio value of 3

Figure 5에는 타원형 노즐을 기준으로 x방향에서의 분열길이 결과를 보여준다. Fig. 4의 원형노즐에서의 분열길이 결과와 비교하였을 때 전체적으로 분열길이가 감소한 것을 확인할 수 있다. 원형노즐과 달리 타원형 노즐의 경우, 장축과 단축에서의 길이가 서로 다르게 나타난다. 이로 인하여 압력분포와 반경 방향의 운동량이 각 축에서 서로 다르게 나타난다. 단축에 비해 상대적으로 큰 직경을 가진 장축에서 반경방향의 속

도는 단축에 비해 크게 나타나며, 모멘텀 또한 장축에서 크게 작용할 것이다. 따라서 캐비테이션이 단축에 비해 장축에서 상대적으로 강하며, 이로 인하여 액체제트가 더욱 강하게 교란되어 타원형 노즐에서의 분열길이가 원형노즐보다 전체적으로 모든 분사기에서 감소된 것으로 판단하였다. 캐비테이션과 수력튀김 현상이 일어나는 E-3-05의 타원형 노즐을 보면, 원형노즐의 E-1-05의 분열길이 결과와 비슷한 경향을 보이게 되는데, 두 유동 특성이 분사기 내부에 발달하게 되면 분열길이가 감소하는 영역이 발견된다.

4. 결론

본 연구에서는 원형노즐과 타원형 노즐을 이용하여 수직분사 실험을 진행하였으며, 두 오리피스 형상 차이에 따라 액체제트의 분무특성 차이를 확인하고자 하였다.

원형노즐과 타원형 노즐에서의 침투높이와 액주궤적을 비교하였을 때, 원형노즐에서의 액주궤적 및 침투높이가 타원형 노즐에 비하여 더 휘며, 낮아진 것을 알 수 있었다. 중형비가 다른 타원형 노즐에서의 액주궤적 형태는 장축 출구로부터 분무되는 액체제트와 공기역학 힘이 수직으로 부딪히는 경우가 단축과 비교하였을 때 공기 유동과 노출되는 액주영역이 늘어나기 때문에 액체제트에 가해지는 항력이 증가되고, 침투높이가 감소하게 된다.

액주 분열길이의 경우, 캐비테이션과 수력튀김 현상이 일어나는 분무차압 조건에서 분열길이가 감소하였으며, 이는 타원형 노즐에서도 비슷한 경향을 보이게 된다. 또한 원형노즐과 타원형 노즐에서의 분열길이를 비교하였을 때 전체적으로 타원형 노즐에서 분열길이가 원형노즐보다 작게 나타났다. 이러한 이유는 타원형 노즐의 장축이 원형노즐의 직경보다 더 크기 때문에 캐비테이션이 더욱 강하게 일어나서 액주의 분열을 더욱 빠르게 촉진시켰다고 판단하였다.

참 고 문 헌

1. Chen, T. H., Smith, C.R., Schommer, D. G. and Nejad, A. S., "Multi-Zone Behavior of Transverse Liquid Jet in High-Speed Flow," *AIAA Paper 93-0453*, 1993.
2. Schetz, J. A. and Padhye A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstream," *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 10, pp. 1385-1390, 1977.
3. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R.P. and Nejad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 1, pp. 64-73, 1997.
4. Wu, P. K., Miranda, R. F. and Faeth, G. M., "Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Nonturbulent and Turbulent Round Liquid Jets," *Atomization and Sprays*, Vol. 5, No. 2, pp. 175-196, 1995.
5. Tamaki, N., Shimizu, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., "Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet," *Atomization and Sprays*, Vol. 8, No. 2, pp. 179-197, 1998.
6. Ahn, K., Kim, J. and Yoon, Y., "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip," *Atomization and Sprays*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-34, 2006.
7. Ku, K., Hong, J. and Lee, C., "Effect of Internal Flow Structure in Circular and Elliptical Nozzles on Spray Characteristics," *Atomization and Sprays*, Vol. 21, No. 8, pp. 655-672, 2011.
8. Vennard, J.K., *Elementary Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1961.