

횡단류 유동 내 원형 및 타원형 액체제트의 분열길이

송윤호* · 안규복†

Breakup Lengths of Circular and Elliptical Liquid Jets in a Crossflow

Yoonho Song and Kyubok Ahn

Key Words: Breakup length(분열길이), Circular nozzle(원형 노즐), Elliptical nozzle(타원형 노즐), Hydraulic flip(수력튀김), Spray characteristics(분무특성)

Abstract

Breakup lengths of circular and elliptical liquid jets in a subsonic crossflow were experimentally studied. Two circular-shaped and four elliptical-shaped plain-orifice injectors, which had different aspect ratios and orifice length to diameter ratios, were used to provide various liquid jet conditions such as steady, cavitation, and hydraulic flip. By varying the injection pressure drop from 1 bar to 6 bar, spray images were taken using a shadowgraph technique. Breakup lengths were measured and analyzed. As the aspect ratio in orifices increased, liquid column breakup lengths normalized by the equivalent diameter were reduced irrespectively of the switching of the major or minor axis to the crossflow. It was also found that when hydraulic flip developed inside the orifice, x -directional breakup lengths more decreased for both circular and elliptical liquid jets.

기호설명

a : 타원의 장축
 b : 타원의 단축
 d : 원형 오리피스 지름
 d_{eq} : 타원형 오리피스 등가지름(\sqrt{ab})
 L : 오리피스 길이
 q : 액체/공기 운동량속 비 ($\rho_l V_l / \rho_a u_a$)
 u_a : 횡단류 공기 속도
 V_l : 오리피스 내 액체 속도
 x : 횡단류 방향 길이
 x_b : x -방향에서의 분열길이

y : 횡단류 수직방향 길이
 y_b : y -방향에서의 분열길이
 ΔP : 분사압력
 ρ_a : 횡단류 공기 밀도
 ρ_l : 오리피스 내 액체 밀도

1. 서 론

횡단류 내 수직분사제트는 연료/공기 혼합기의 연료 시스템과 로켓엔진에서의 추력방향제어 등에 널리 활용되고 있다⁽¹⁾. 특히, 액체연료 수직분사는 램제트, 스크램제트와 같은 고속 공기흡입 추진기관에서 우수한 공기/연료 혼합 및 미립화 성능을 나타낸다고 보고되었다⁽²⁾. 수직분사제트에 대한 연구는 Schetz와 Padhye⁽³⁾, Wu 등⁽⁴⁾, Nejad와 Schetz⁽⁵⁾, Yoon과 No⁽⁶⁾를 포함한 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 선행연구자들은 다양한 실험조건에서 공기/연료 혼합에 중요한 영향을 주는 것으로 알려진 액체

(Received: 30 Oct 2017, Received in revised form: 2 Dec 2017, Accepted: 8 Dec 2017)

*충북대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : kbahn@cbnu.ac.kr

TEL : (043)261-3596 FAX : (043)263-2448

제트의 침투깊이, 분열깊이, 액주궤적 등을 측정하였다.

Schetz와 Padhye는 수직분사 액체제트에서 액주의 표면분열은 액주에서의 표면파(surface wave)에 의해 지배된다는 것을 실험적으로 확인하였다⁽³⁾. 이러한 표면파는 지속의 횡단류 유동에서는 2차원으로, 반면 고속 유동에서는 3차원으로 관찰되었다⁽⁷⁾. 이후 Nejad와 Schetz는 추가적인 연구를 통해 횡단류 유동의 공력학적 힘에 의한 액주파(acceleration wave)의 증폭이 액주의 분열을 일으킨다는 연구결과를 발표하였다⁽⁵⁾.

분열깊이뿐 아니라 액주의 침투깊이와 액주궤적과 같은 분무특성들은 분무의 분포에 큰 영향을 주기 때문에, 이에 대한 많은 이론적/실험적/해석적 연구들이 수행되었다. 액체제트의 침투깊이에 대한 연구는 그림자법(shadowgraph)와 같은 가시화 방법 또는 PDPA와 LDV 등과 같은 레이저 계측을 통해 이루어졌다. 액체제트의 궤적식은 보통 먹굽수 형태, 로그함수 형태 등으로 정의되었으며, 액체/기체 운동량속 비(q)와 오리피스 지름(d)의 함수로 표현되었다⁽⁸⁾. 그러나 연구자들마다 조금씩 다른 상관식을 나타내었는데, 이는 측정기법의 차이, 액주궤적 정의의 차이, 균일하지 않는 횡단류 유동속도로 인한 영향, 경계층 효과 등에 의한 것으로 생각되었다⁽⁶⁾.

이러한 이유로 Chelko는 경계층의 효과에 대해 연구하였으며, 벽면에서 분사하는 방법과 연소실 내로 분사기를 돌출하여 분사했을 때 액주궤적과 침투깊이가 다름을 실험적으로 확인하였다⁽⁹⁾. Wu 등은 공력학적 항력에 의해 액주가 받게 되는 힘이 액주궤적을 결정한다는 가정을 통하여, 액주궤적을 액체/공기 운동량속 비와 항력계수의 관계식으로 표현하였다. 또한 구형 액적의 2차 분열에 대한 시간 척도(time scale)를 이용하여 x -, y -방향에서의 분열깊이를 예측하였으며, 실험을 수행하여 가정의 타당성을 검증하였다^(4,10). 그러나 이러한 액체제트 분무특성들은 오리피스 내 공동 현상(cavitation)이나 수력튀김 현상(hydraulic flip)이 발생하지 않는 정상유동에 한정되어 연구되었다.

Tamaki 등은 오리피스 내부에 일어나는 공동 현상 현상에 초점을 맞추어, 이러한 내부 유동이 대기조건(atmospheric condition)에서의 분무특성에 중요한 영향을 줄 수 있음을 밝혔다⁽¹¹⁾. Ahn 등은 공동 현상이나 수력튀김 현상이 오리피스 내부에 발생하였을 때 수직분사제트 액주의 궤적과 분열깊이에 미치는 영향에 대해 검토하였으며, 유효지름(effective diameter)과 유효속도(effective velocity)의 개념을 도입하여 분열깊이와 액주궤적을 재정의하였다⁽¹²⁾.

최근에는 단공노즐의 미립화 성능을 향상시키기 위해 원형 형태의 노즐이 아닌 다양한 형태의 노즐을 사용한 연구들이 보고되고 있다. New 등은 레이저유도 형광기법을 이용하여 중황비가 2, 3을 갖는 타원형 노즐의 제트구조를 관찰하였다⁽¹³⁾. Marzbali는 수직분사 액체제트의 전산해석을 통해 원형 노즐과 타원형 노즐에서의 분무특성을 연구하여, 중황비가 낮은 타원형 노즐일수록 액주궤적이 상대적으로 더 휘어지는 것을 발견하였다⁽¹⁴⁾.

이처럼 정상상태 수직분사에서의 분무특성과 오리피스 내부의 공동 현상/수력튀김 현상과 같은 내부교란에 의한 영향들에 대해서는 그동안 활발히 연구되었다. 그러나 이는 원형 노즐에 한정적인 것으로, 타원형 노즐에 대해서는 실험적으로 연구한 결과를 찾기가 힘든 상황이다. 따라서 본 논문에서는 대기조건에서 타원형 노즐의 미립화 성능이 원형 노즐에 비해 우수하다는 선행연구의 결과⁽¹⁵⁾를 바탕으로, 원형 및 타원형 노즐에서의 분열깊이의 변화를 비교, 분석하였다. 또한 원형 및 타원형 오리피스 내부에서 수력튀김 현상이 발생했을 때 분열깊이의 변화를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Figure 1은 본 실험에 사용된 분무장치와 분무가시화 장치를 나타낸 도식도이다. 초킹(choking) 오리피스와 레귤레이터를 이용하여 고압탱크에 압축된 공기를 실험 조건인 약 80 m/s로 시험부(test section)에 공급하였으며, 추가적으로 분기된 레귤레이터를 사용하여 분사기에 공급되는 액체제트의 압력을 조절하였다. 시험부 내부의

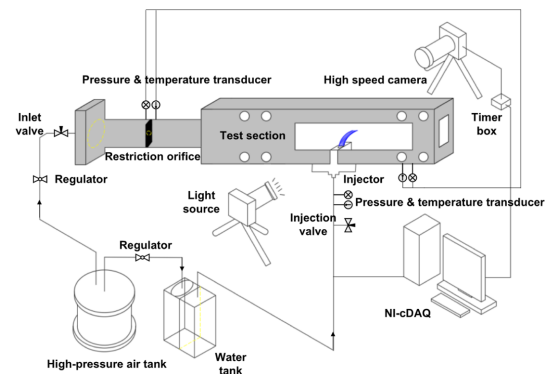


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus⁽¹⁶⁾

Table 1 Orifice design parameters and experimental conditions

Injector No.	C-1-10/05	E-2-20/05	E-3-30/05
Orifice shape	Circle	Ellipse	
d or b [mm]	0.5		
d or a [mm]	0.5	1.0	1.5
a/b	1	2	3
L/d or L/b	10/5	20/5	30/5
ΔP [bar]	1, 2, 3, 4, 5, 6		

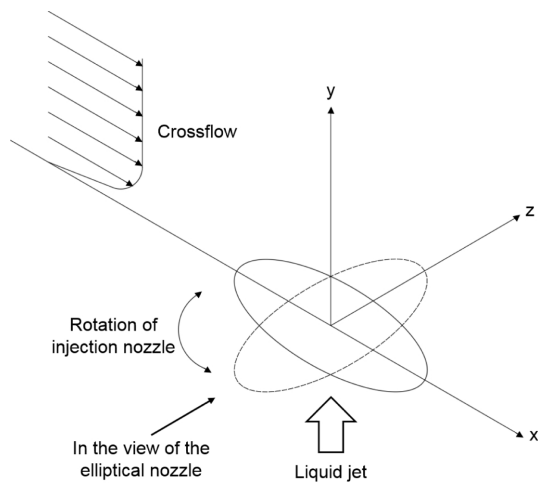


Fig. 2 Schematic for direction and placement of air crossflow and elliptical liquid jet

높이와 너비는 각각 50 mm이며, 분무가시화를 위해 길이 300 mm의 아크릴 창을 앞/뒷면에 설치하였다. 수직

분사 이미지 측정을 위해 고속카메라(Vision Research Phantom v9.1)와 2대의 광원장치(Polarion, PS-X1)를 이용하였다. 순간 이미지 확보를 위해 카메라의 노출시간은 설정 최솟값인 2 μ s로 설정하였으며, 각 실험 조건마다 1,000 fps로 400장의 이미지를 촬영하였다. 실험 시 측정된 각 부분에서의 공기와 물의 압력 및 온도 데이터는 100 Hz로 NI-cDAQ에 저장하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무 이미지

각 분사기에 대한 분사압력 4 bar에서의 분무 이미지를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 타원형 오리피스의 경우 동일한 분무압력 조건에서도 분무 이미지가 달라짐을 확인할 수 있었다. 오리피스 내부에서 공동 현상이나 수력튀김 현상이 발생하지 않은 정상유동을 갖는 Fig. 3에 대해서 먼저 살펴보면 타원의 장축이 공기유동 방향과 평행한 경우(in the view of major axis)의 액체제트가 타원의 단축이 유동방향과 평행한 경우(in the view of minor axis)에 비해 공기유동 방향으로 덜 휘는 것을 볼 수 있다. 이는 타원의 장축이 공기유동 방향과 평행할 경우 액체제트와 공기유동이 부딪히는 단면적이 반대의 경우에 비해 줄어들기 때문이다⁽⁶⁾. 따라서 액체제트에 가해지는 공력학적 힘이 상대적으로 약하여 동일 분사압력 조건에서 더 높이 침투하는 것이다.

그러나 오리피스 내 수력튀김 현상이 발생되었던⁽¹⁶⁾ Fig. 4에서의 분무 이미지는 다른 결과를 나타내었다. 타원의 장축이 공기유동 방향과 평행한 경우의 액체제

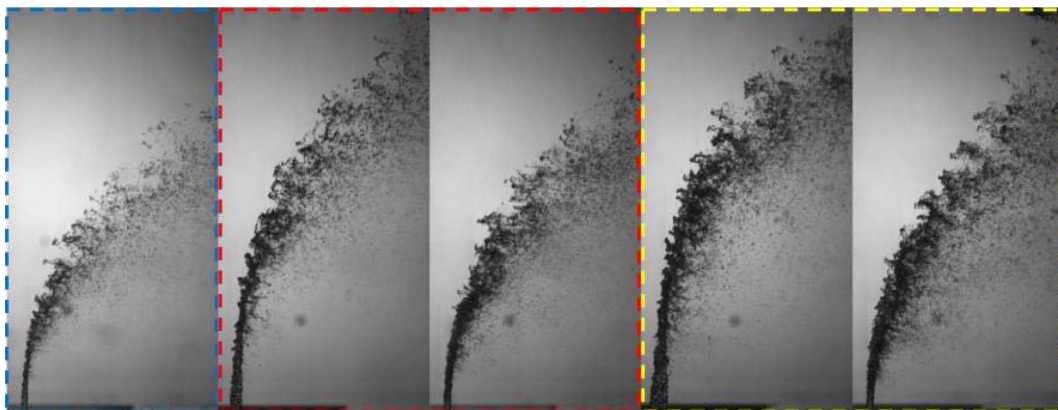


Fig. 3 Spray images of liquid jets in a crossflow at $\Delta P = 4$ bar (from left to right: C-1-10, E-2-20 (in the view of major axis), E-2-20 (in the view of minor axis), E-3-30 (in the view of major axis), and E-3-30 (in the view of minor axis))

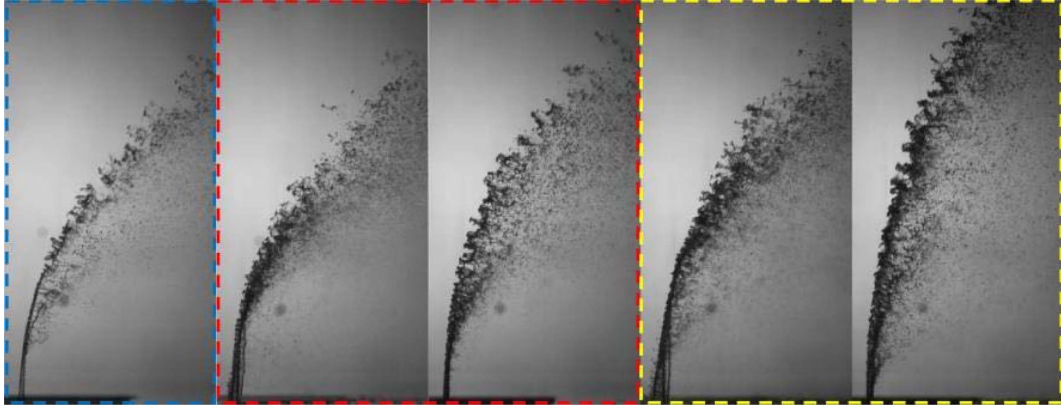


Fig. 4 Spray images of liquid jets in a crossflow at $\Delta P = 4$ bar (from left to right: C-1-5, E-2-5 (in the view of major axis), E-2-5 (in the view of minor axis), E-3-5 (in the view of major axis), and E-3-5 (in the view of minor axis))

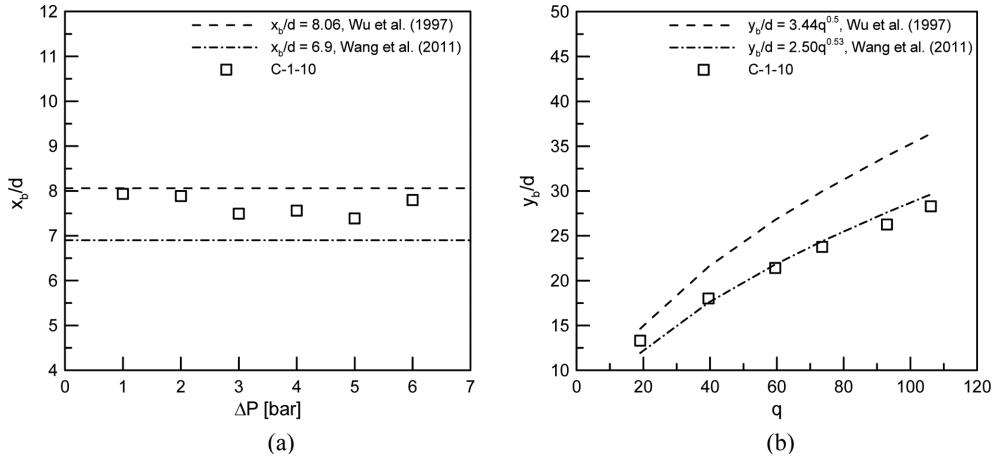


Fig. 5 X-directional and y-directional breakup lengths normalized by the orifice diameter for C-1-10

트가 타원의 단축이 유동방향과 평행한 경우에 비해 더 많이 휘는 현상이 발견되었다. 수력튀김 현상으로 인해 유체의 유로는 실제 타원의 장축보다 좁아지는데 이는 단축에서보다 장축에서 분무되는 액체제트의 유로가 상대적으로 더 줄어들게 된다. 따라서 타원의 단축이 공기 유동 방향과 평행한 경우 액체제트가 받는 공력학적 힘은 감소하게 되어 더 높이 침투하는 것으로 생각된다. 하지만 이러한 영향만으로는 장축과 단축에서 침투길이의 역전 현상을 설명하기는 부족하며 타원형 노즐에서의 축교차 현상을 포함하여, 향후 이러한 현상을 설명하기 위한 보다 깊이 있는 연구가 필요하다.

3.2 액체제트의 분열길이

분열길이 측정은 참고문헌⁽¹²⁾에 설명된 Matlab 프로

그램 기반의 코드를 사용하였다. 각 분무 이미지에서 노즐 출구 중심으로부터 분열위치까지의 분열길이(x_b, y_b)를 측정하였으며, 분열길이의 편차가 크기 때문에 400장의 이미지에서 얻은 결과값을 평균하였다.

원형 노즐에 대한 분열길이는 선행 연구자들에 의해 많이 보고되었다. 따라서 타원형 노즐의 분열길이를 분석하기 전 원형 노즐에 대하여 먼저 분열길이를 구하였으며, 분석된 결과들을 이전 선행연구들과 비교하여 타당성을 검증하였다. 공동 현상이나 수력튀김 현상이 없는 C-1-10 분사기의 분열길이를 Fig. 5에 나타내었다. 분사압력에 따라 분열길이가 약간씩 달라지긴 하지만 선행 연구자들^(3,19)과 유사한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있었다. C-1-10 분사기에 대한 x-방향 평균 분열길이, y-방향 분열길이를 오리피스 지름과 액체-공기 운동량속

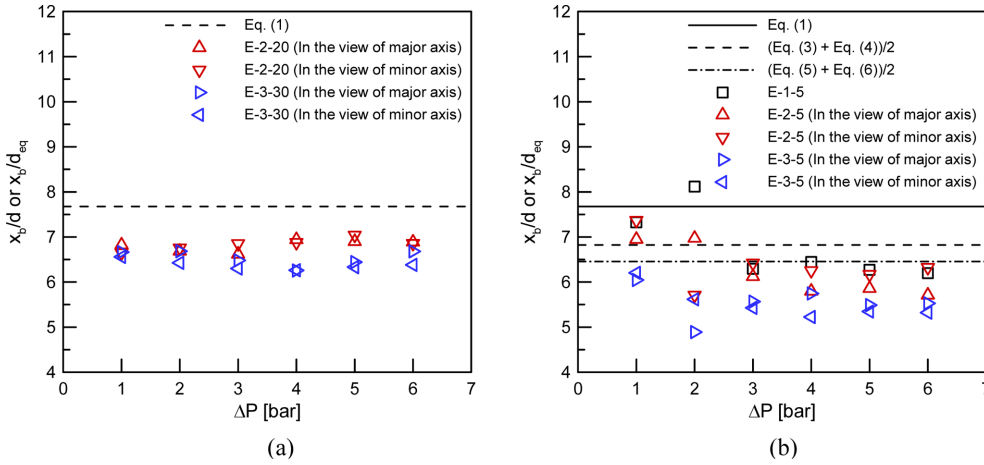


Fig. 6 X-directional breakup lengths normalized by the equivalent orifice diameter for (a) E-2-20, E-3-30 and (b) C-1-5, E-2-5, E-3-5

비로 나타내면 다음과 같은 경험식을 얻을 수 있었다.

$$x_b/d = 7.676 \text{ for C-1-10} \quad (1)$$

$$y_b/d = 3.547q^{0.4417} \text{ for C-1-10} \quad (2)$$

Figure 6(a)는 타원형 노즐을 갖는 E-2-20, E-3-30 분사기에서의 분열길이 결과를 나타낸 결과이다. 원형 노즐과 달리 타원형 노즐은 장축과 단축이 서로 다르기 때문에 등가지름의 개념(d_{eq})을 도입하였다⁽¹⁸⁾. 등가지름은 원형 노즐에서의 넓이와 타원형 노즐의 넓이를 서로 같다고 두어 도출한 값이며, 모든 타원형 노즐에서의 분열길이 결과를 등가지름으로 정규화 하였다.

원형 노즐에서의 분열길이 결과와 비교하였을 때 등가지름으로 정규화한 타원형 노즐에서의 분열길이 전 반적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 종횡비가 증가할수록 정규화된 분열길이 감소하였다. 이는 동일한 단면적을 가진 원형 노즐에 비해 타원형 노즐이, 특히 종횡비가 큰 타원형 노즐일수록 짧은 분열길이를 갖는다는 것을 의미한다. 이러한 정규화된 분열길이의 감소는 타원형 노즐에서의 축교차 현상에 의한 것으로 생각된다. 원형 노즐의 경우 공기역학적 힘에 의한 액주파의 증폭으로 액주분열이 이루어진다. 하지만 타원형 노즐의 경우 액주파의 증폭과 함께 타원형 단면의 액주가 원형으로 바뀌려는 표면장력과 관성력의 복합적인 힘들이 액주에 주기적으로 작용하는 축교차 현상으로 인해 액체제트가 더욱 빠르게 불안정해지는 것으로 판단된다. 분열길이의 감소는 액주의 형태로 존재하던 액체제트가 빠르게 액사로 분열이 일어남을 의미하므로,

램제트나 스크램제트 엔진에서의 연료 미립화 및 연소 측면에서 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

E-2-20과 E-3-30 분사기에 대한 x-방향 평균 분열길이는 다음과 같다.

$$x_b/d_{eq} = 6.810 \text{ (in the major axis) for E-2-20} \quad (3)$$

$$x_b/d_{eq} = 6.838 \text{ (in the minor axis) for E-2-20} \quad (4)$$

$$x_b/d_{eq} = 6.535 \text{ (in the major axis) for E-3-30} \quad (5)$$

$$x_b/d_{eq} = 6.376 \text{ (in the minor axis) for E-3-30} \quad (6)$$

공기 유동방향에 대한 장축과 단축의 배치 상관없이 평균 분열길이는 거의 일정하게 나타났다. 횡단류 유동에 대한 노즐의 장축/단축의 위치가 항력계수에 영향을 주어 수직분사 액체제트의 액주궤적은 변화시키지만, 액주분열에 필요한 액주파의 증폭에는 노즐의 배치에 상관없이 동일한 시간이 소요되기 때문으로 생각된다.

다음으로 C-1-5, E-2-5, E-3-5 분사기에서의 분열길이 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 기존 연구⁽¹⁸⁾에서 설명되었듯이 이 분사기들에서는 $\Delta P = 1$ bar에서는 정상유동이, $\Delta P \geq 3$ bar에서는 수력튀김 현상이 발생하였다. 그리고 $\Delta P = 2$ bar에서 C-1-5 분사기에서는 정상유동이, E-2-5와 E-3-5 분사기에서는 공동 현상이 발생되었다. 공동 현상이 일어나는 경우에는 오리피스 내부에 기포가 성장하며 액체제트에 경우 심한 굴곡이 발생하게 되며 상당히 흔들리게 된다. 이러한 불안정한 액체제트의 교란이 분열과정을 촉진시키며 결국 액주의 분열길이 정상유동 상태보다 더 감소하게 된다.

수력튀김 현상이 발생한 분사압력 조건에서 분열길이는 동일 단면에서 정상유동을 갖는 C-1-10, E-2-20, E-3-30 분사기들에 비해 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이는 외부 공기가 오리피스 내부로 유입되며 액체제트의 단면적이 줄어들고, 액체제트가 오리피스 벽면으로부터 분리됨에 따라 액주파가 오리피스 끝단이 아니라 오리피스 유입구부터 시작되기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

오리피스 형상에 따른 수직분사 액체제트에서의 분무 특성을 알아보고자 원형 노즐과 종횡비가 다른 타원형 노즐을 제작하여 실험적으로 연구하였다. 또한 정상유동 상태가 아닌 공동 현상과 수력튀김 현상이 타원형 노즐의 수직분사 액체제트에 어떠한 영향을 주는지 살펴보고자 하였다.

(1) 등가지름으로 정규화한 타원형 노즐에서의 분열 길이가 원형 노즐 대비 15% 정도 감소한 것을 알 수 있었다. 미립화 관점에서 보았을 때 분열길이의 감소는 액주의 형태로 존재하던 액체제트가 빠르게 액사로 분열이 일어남을 의미하므로 연소실에서의 평균 입径이 작아질 것으로 예상된다. 따라서 타원형 노즐로 설계하는 것이 미립화 측면에서 효율적임을 알 수 있었다. 또한 종횡비가 증가할수록 분열길이는 더욱 감소되었는데, 이는 타원형 노즐에서만 발견되는 축교차 현상으로 설명할 수 있다.

(2) 원형 노즐과 타원형 노즐에서 분사기 내부에 공동 현상과 수력튀김 현상이 발달하게 되면 정상유동 상태에 비해 분열길이의 감소가 발생함을 알 수 있었다. 공동 현상에 의한 분열길이 감소 효과는 공동 현상 기포에 의하여 액체제트의 강한 섭동 때문에 나타난 것으로 보이며, 수력튀김 현상에 의한 분열길이 감소효과는 실제 오리피스 직경 대비 액체제트의 단면적이 줄어들어 정규화된 분열길이가 감소하였다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A5A1073861, NRF-2015M1A3A3A02011346, NRF-2017R1A1A1A05001237)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) A. R. Karagozian, "Transverse jets and their control", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 5, 2010, pp. 531~553.
- (2) J. D. Abbitt, C. Segal, J. C. McDaniel and R. B. Whitehurst, "Experimental supersonic hydrogen combustion employing staged injection behind a rearward-facing step", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 3, 1993, pp. 472~478.
- (3) J. A. Schetz and A. Padhye, "Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams", *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 10, 1977, pp. 1385~1390.
- (4) P. K. Wu, K. A. Kirkendall, R. P. Fuller and A. S. Nejad, "Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 64~73.
- (5) A. S. Nejad and J. A. Schetz, "Effects of viscosity and surface tension on a jet plume in supersonic crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 22, No. 4, 1984, pp. 458~459.
- (6) H. J. Yoon and S. Y. No, "Evaluation of empirical correlations for penetrations height of liquid jet in uniform crossflow", *Annual Conference of ILASS-ASIA, Kenting, Taiwan*, pp. 20~21, Oct, 2011.
- (7) J. A. Schetz, E. A. Kush Jr and P. B. Joshi, "Wave phenomena in liquid jet breakup in a supersonic crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 7, 1980, pp. 774~778.
- (8) S. Y. No, "A review on empirical correlations for jet/spray trajectory of liquid jet in uniform cross flow", *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, Vol. 7, No. 4, 2015, pp. 283~314.
- (9) L. J. Chelko, "Penetration of liquid jets into a high-velocity air stream", *NACA, RM E50F21*, 1950.
- (10) P. K. Wu and G. M. Faeth, "Aerodynamic effects on primary breakup of turbulent liquids", *Atomization and Sprays*, Vol. 3, No. 3, 1993, pp. 265~289.
- (11) N. Tamaki, M. Shimizu, K. Nishida and H. Hiroyasu, "Effects of cavitation and internal flow on atomization of a Liquid Jet", *Atomization and Sprays*, Vol. 8, No. 2, 1998, pp. 179~197.
- (12) K. Ahn, J. Kim and Y. Yoon, "Effects of orifice internal flow on transverse injection into subsonic crossflows: cavitation and hydraulic flip", *Atomization and Sprays*, Vol. 16, No. 1, 2006, pp. 15~34.
- (13) T. H. New, T. T. Lim and S. C. Luo, "A visual study on elliptical jets in crossflow", *Journal of Visualization*

- tion, Vol. 5, No. 2, 2002, pp. 129~136.
- (14) S. N. Marzbali, "Penetration of circular and elliptical liquid jets into gaseous crossflow: a combined theoretical and numerical study", Master. Dissertation, Mechanical and Industrial Dept, Concordia Univ, Montreal, Quebec, 2002.
- (15) K. Ku, J. Hong and Lee, W, "Effect of internal flow structure in circular and elliptical nozzles on spray characteristics", *Atomization and Sprays*, Vol. 21, No. 8, 2011, pp. 655-672.
- (16) Y. Song, D. Hwang and K. Ahn, "Effect of orifice geometry on spray characteristics of liquid jet in cross-flow", *AIAA Paper 2017-1961*, 2017.
- (17) J. K. Vennard, "Elementary fluid mechanics", John Wiley & Sons Inc, New York, 1961.
- (18) Y. Song, D. Hwang and K. Ahn, "Effect of orifice geometry on flow characteristics of liquid jet from single hole nozzle", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 5, 2017, pp. 19-28.
- (19) Q. Wang, U. M. Mondragon and C. T. Brown, "Characterization of trajectory, break point, and break point dynamics of a plain liquid jet in a crossflow", *Atomization and Sprays*, Vol. 21, No. 3, 2011, pp. 203-219.