

Y-jet 노즐의 출구오리피스 형상이 비대칭 분무에 미치는 영향

백광열* · 홍정구†

The Effect of the Y-jet Nozzle Exit Orifice Shape on Asymmetric Spray

Gwang Yeol Baik and Jung Goo Hong

Key Words: Twin-fluid nozzle(이유체 노즐), Y-jet nozzle(Y-jet 노즐), Elliptical orifice(타원형 오리피스), Asymmetrical spray(비대칭적인 분무), SMD(평균액적크기)

Abstract

Y-jet nozzle has a wide fuel flow rate range and turn-down ratio, thus, it is used in industrial boilers, furnace and agricultural atomizer. However, it has asymmetrical spray characteristics due to the nozzle design factors. Therefore, in this study, asymmetric spraying characteristics of the elliptical Y-jet nozzle was studied by using the lab-scale spray apparatus. As a result, the elliptical Y-jet nozzle had lower gas mass flow rate than circular Y-jet nozzle at same gas pressure, because of bigger shear stress due to the wider inner surface at the elliptical Y-jet nozzle. Larger SMD was measured on the elliptical Y-jet nozzle than the circular Y-jet nozzle. When SMD was measured in the X_Axis direction at the same gas mass flow rate, the elliptical Y-jet nozzle with an aspect ratio of 2:1 showed greater asymmetry than the others.

1. 서 론

이유체 노즐은 보조 기체를 노즐의 외부 또는 내부에 분사된 액체와 충돌 후 혼합하여 분사하는 노즐이다. 이유체 노즐은 단일 유체만 사용하는 압력형 분무 장치에 비해 더욱 미세한 액적을 얻을 수 있고, 넓은 분사 압력 범위를 가진다. 특히 연소 시 이유체 노즐은 액체 연료와 보조 기체가 쉽게 혼합되어 미립화가 잘 이루어지므로 압력형 분무 장치에 비해 연소의 효율을 높일 수 있다⁽¹⁾.

Y-jet 노즐은 다른 이유체 미립화기기에 비해 상대적으로 간단한 설계구조를 가지고 있다. 또한 같은 양의 보조 기체를 이용한 다른 이유체 노즐에 비해 더 작은 액적을 얻을 수 있다. Y-jet 노즐은 분사압력에 따라 분

사 각이 상당한 변화를 보이는 다른 이유체 노즐과 달리, 높은 분사압력 조건에서도 분사각의 변화가 작은 특징이 있다. 다른 장점으로, 넓은 사용 연료 유량의 범위와 운전범위(Turn-down ratio)를 가져 산업용 보일러나 용광로, 농업용 스프레이 등 많은 분야에서 사용되고 있다⁽²⁾.

Y-jet 노즐의 분무 조건에 대한 연구로 Wigg 등⁽³⁾은 Y-jet 노즐에서 기체를 적게 쓰며 미립화의 성능에 영향을 미치지 않기 위해서는 액체와 기체의 분사 압력 비를 동일하게 유지해야 한다고 하였다. Bryce 등⁽⁴⁾은 Y-jet 노즐에서 기체 분사 압력이 고정된 조건에서 액체 분사 압력을 증가시키며, 기체 분사유량이 감소하는 것을 확인하였다.

Song 등^(5,6)과 Nazer등⁽⁷⁾의 선행연구에 따르면 Y-jet 노즐은 노즐 설계 특성상 비대칭적인 분무 특성을 가진다고 하였고, Lee 등⁽⁸⁾ 또한 Y-jet 노즐의 분무패턴은 측면계측과 정면계측을 통해 측정방향에 따라 공간적인 분무 형태가 비대칭적인 것을 보고하였다. 이와 같이 Y-jet 노즐은 비대칭적인 분무 특성을 가지기에 이를 보완하기 위해 노즐 설계인자의 최적화 방안에 대한 연구가

(Received: 3 Feb 2021, Received in revised form: 17 Feb 2021, Accepted: 18 Feb 2021)

*경북대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : jghong70@knu.ac.kr

TEL : (053)950-6570 FAX : (053)950-6550

보고되고 있다. Song 등⁽⁵⁾은 혼합관의 길이가 짧은 노즐에서는 노즐 내부에서 물이 액막을 형성하지 못하고 공기가 직접 충돌해 분사되어 입경분포가 보다 균일하게 나타난다고 보고하였다. Lee 등⁽⁸⁾은 Y-jet 노즐의 혼합관 길이가 길수록 액적 크기는 작아지며, 액체 공급관과 기체공급관의 비에 따라 액적크기가 변화한다고 하였다. Andreussi 등⁽⁹⁾와 Nazzari⁽¹⁰⁾들은 Y-jet 노즐의 혼합관 길이와 혼합관 내의 보조기체의 속도와 밀도는 혼합관 내에서 이유헤 간의 분열과 합착이 일어나게 하고, 오리피스 벽면의 재부착을 야기시켜 액적의 크기를 변화시킨다고 주장하였다. 그러나 Prasad⁽¹¹⁾는 혼합관의 길이의 증가는 액체가 미립화 되기 위한 충분한 운동량만 있다면 큰 영향이 없다고 하였다.

한편, 이유헤 노즐의 액체 미립화 효과를 증진시키기 위해 노즐 출구 오리피스의 형상을 변형시킨 실험들이 보고되고 있다. Lee 등⁽¹²⁾은 이유헤 노즐에서 노즐 내부 압력은 에어로레이터(Aerator) 면적의 차이보다 원형 또는 타원형 노즐 등의 출구 오리피스의 형상이 분무특성에 더 큰 영향을 줄 것이라고 보고하였다. Ku 등⁽¹³⁾은 타원형 노즐에서 출구오리피스 입구 형상에서 장, 단축의 반경방향 속도 분포가 다르게 나타남을 확인하였다. Kim 등⁽¹⁴⁾은 타원형 노즐의 경우에는 같은 면적의 원형 노즐에 비해 둘레의 길이가 길기 때문에 작동 유체와 오리피스 벽면 사이에 작용하는 전단응력 작용 면적이 넓다고 하였고, 이로 인해서 유출계수가 타원형이 원형보다 낮게 나타날 것이라고 보고하였다. 또한 Re 수가 같은 조건에 타원형 노즐의 유출계수는 원형 노즐보다 낮은 것을 확인하였다. Song 등⁽¹⁵⁾은 타원형 노즐에서 유동이 정상상태인 경우 장축 평면에서는 분무각이 줄

어지고, 단축 평면에서는 분무각이 커지는 현상을 확인하였다.

이처럼 많은 선행 연구자들은 Y-jet 노즐의 공급 유체의 압력조건, 액체연료 및 보조 기체의 공급관의 비, 이유헤가 혼합되는 혼합관의 길이 등에 대하여 연구를 진행하였다. 하지만 Y-jet 노즐에서 노즐의 출구 오리피스 형상에 관한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 실험실 규모의 Y-jet 노즐 실험분부 장치를 사용하여 Y-jet 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 분무특성을 확인하고자 한다. 특히 비대칭적인 입경분포를 가지는 Y-jet 노즐 특성을 감안하여 X축 반경 방향에 따른 액적크기 공간적인 분무특성을 실험적으로 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 Y-jet 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 분무특성을 확인하기 위한 실험실 규모의 장치도이다. 실험 장치는 크게 액체 및 보조 기체의 공급부와 계측부의 3개의 부분으로 나뉜다. 먼저 액체 공급부에서 액체는 질소로 가압하였으며, 액체의 유량은 유량계(Mass flow meter)로 확인하였고 니들 밸브(needle valve)를 통해 공급 유량을 조절하여 공급하였다. 보조 기체 공급부에서 기체는 고압의 질소를 사용하였고, 유입되는 질소의 압력은 압력조절기를 이용하여 공급하였고, 니들 밸브로 분사압력을 조절하였다. 기체의 유량은 기체유량계를 통해 측정 하였다. 각각의 유량 계측은 디지털 플로우 미터(SMC, PF2A711)와 데이터 획득 보드(NI

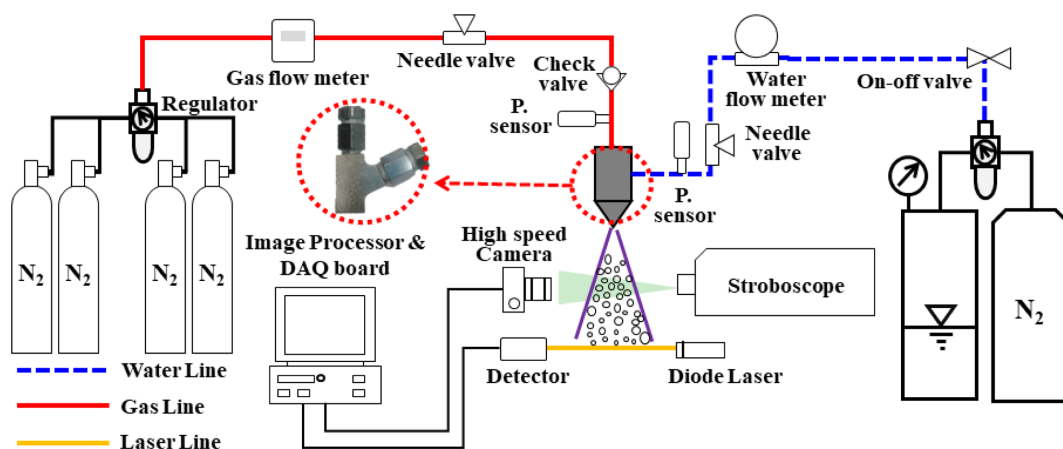


Fig. 1 Schematic of the Experimental setup

Table 1 Nozzle specification

Nozzle	Major Axis (mm)	Minor Axis (mm)	l_m (mm)	Exit Orifice Aarea (mm ²)	Angle (°)
H2	1.767	3.534	8.75	4.908	65
V2	3.534	1.767			
C	d_m (mm)			4.906	
	2.5				

DAQ-9172, National Instruments)를 통해 실시간으로 데이터를 획득하였다. 분무 가시화를 위해 초고속 카메라 (Phantom VEO E310L, Maximum resolution : 512 × 512, Sample rate : 11,500 f/s)와 스트로보스코프를 이용한 가시화 기법을 이용하였다. 유량과 노즐 내부압력은 유량, 압력 센서의 값을 100 Hz로 샘플링 하여 5초간 측정값의 평균이다. 노즐로부터 분사되는 평균액적크기 (Sauter Mean Diameter, SMD)는 레이저 회절(Laser diffraction) 원리를 이용한 맬번(Malvern) 타입의 측정 장치(MLXA-A12-635-5), 측정범위(약 8~450 μm), 작동거리(400 mm 이내), Laser spot radius: 3.9[pixel], 약 3 mm), 액적 크기는 노즐 팁(Tip)으로부터 200 mm 분무하류에서 측정된 데이터이다^(16,17).

2.2 실험 노즐 및 실험 조건

Table 1은 본 연구에서 사용된 노즐의 제원이다. 연구에 사용된 노즐은 총 3가지로 C, H2, V2이다. l_m 은 혼합관의 길이, d_m 은 출구 오리피스의 직경, d_g 는 가스 공급관의 직경, d_w 는 액체 공급관의 직경이다. 모든 노즐

은 l_m 8.75 mm, 가스와 액체의 공급관 사이의 각도(θ)는 65°, d_g 1.58 mm, d_w 1.13 mm로 동일하고 타원형 노즐의 출구 오리피스의 넓이는 직경 2.5 mm인 원형노즐을 기준으로 근사한 넓이를 가지도록 제작하였다.

Figure 2는 2개의 유체 공급 관으로 공급된 유체가 혼합 관에서 혼합되어 출구 오리피스로 분사되는 노즐형태의 단면도와 각 노즐의 출구 오리피스의 형상을 나타내는 단면도이다. Y-jet 노즐에서 가스는 중앙으로 공급되고, 액체는 공기 주입구와 65°로 공급된다. C 노즐은 출구 오리피스의 형상이 원형, H2 노즐은 출구 오리피스의 형상비가 1:2, V2 노즐은 출구 오리피스의 형상비가 2:1로 제작하였다. 이는 타원형 노즐에서 형상 비에 따른 분무특성 비교를 위함이다. 실험에 사용된 H2, V2 노즐은 방전가공으로 제작하였다.

Table 2는 실험유체와 실험조건을 나타낸다. 실험액체는 20°C 물을 사용하였고 보조기체로 질소를 사용하였다. 물의 분사압력은 0.5~5bar까지 0.5bar씩 증가시키며 실험을 진행하였고, 질소의 분사압력은 C 노즐의 경우 1~5bar까지, H2 노즐의 경우 1~20bar까지, V2 노즐의 경우 1~15bar까지 1bar씩 증가시키며 실험을 진행하였다. 이는 노즐의 출구 오리피스 형상에 따라 동일한 가스의 질량유량을 가지기 위해서이다. 평균액적크기는 노즐 팁으로부터 분무 하류 200 mm에서 측정하였다.

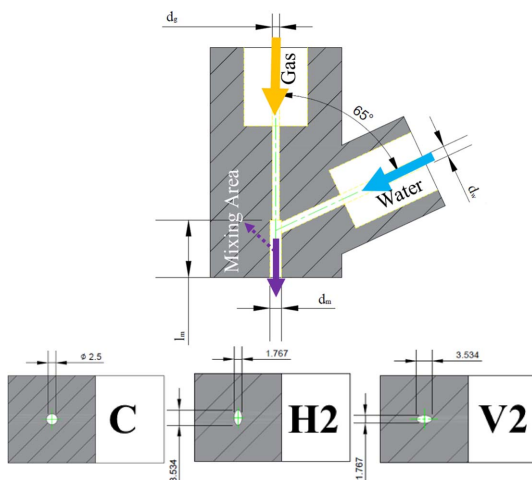


Fig. 2 Schematic of the Y-jet nozzle

Table 2 Experimental conditions

Nozzle	C	H2	V2
Gas Pressure (bar)	1~5	1~20	1~15
Temperature	20°C		
Liquid	Water		
Gas	N ₂		
Liquid Pressure (bar)	0.5~5		
Measuring Position (mm)	200		

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 가스 압력 및 유량

Figure 3과 Fig. 5는 C, H2, V2 노즐의 가스 분사압력을 5bar로 고정시킨 조건이다. 액체의 분사압력은 0.5~5bar까지 0.5bar씩 증가시키면서 실험을 진행하였다.

Figure 4와 6은 H2, V2 노즐의 가스 분사압력은 C 노즐에 비해 H2 노즐은 4배인 20bar, V2 노즐은 3배인 15bar로 고정시킨 조건이다. 이는 노즐 별로 가스의 질량유량을 동일하게 맞추기 위해 설정된 조건이다. 액체의 분사압력은 0.5~5bar까지 0.5bar씩 증가시키면서 실험을 진행하였다.

실험을 진행하였다.

Figure 3과 Fig. 4는 각각 동일 가스 분사 압력조건과 동일 가스 질량유량 조건에서 액체의 분사압력에 따른 액체의 질량유량을 나타낸 그래프이다. 실험에 사용된 모든 노즐에서 액체의 분사압력이 증가할수록 액체의 질량유량은 증가하였다. 노즐 출구 오리피스 형상에 따른 액체 질량유량의 차이는 1% 미만인 것을 확인하였다. 이는 액체는 비압축성 유체로 노즐 출구 오리피스의 면적이 동일하므로 액체 질량유량이 동일한 것으로 판단된다.

Figure 5는 액체의 분사압력에 따른 가스의 질량유량을 나타낸 그래프이다. 실험 노즐과 조건은 Fig. 3와 동

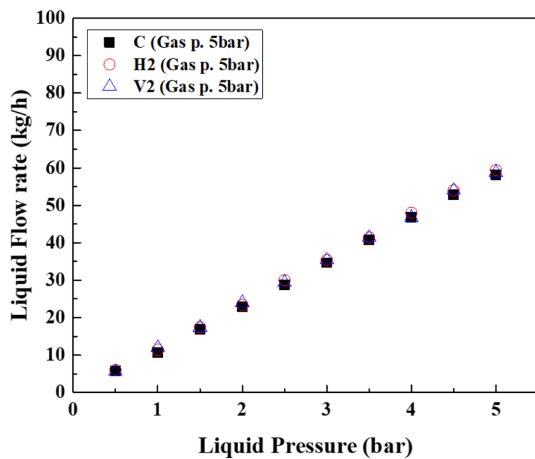


Fig. 3 Liquid flow rate according to liquid pressure at fixed gas pressure

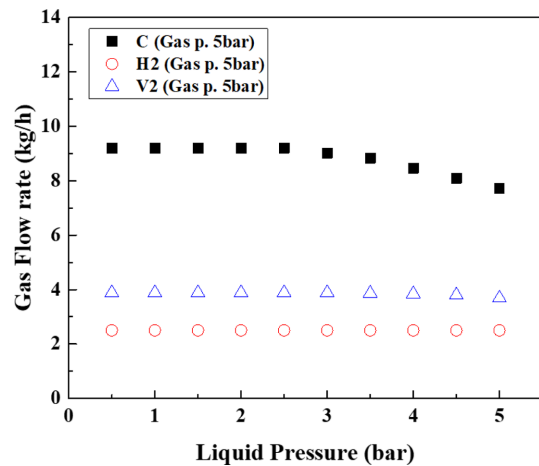


Fig. 5 Gas flow rate according to liquid pressure at fixed gas pressure

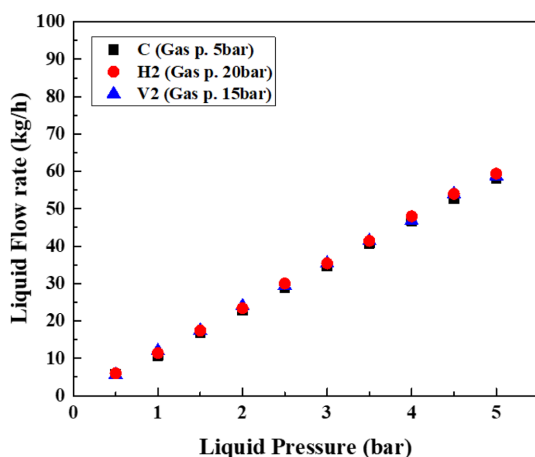


Fig. 4 Liquid flow rate according to liquid pressure at fixed gas flow rate

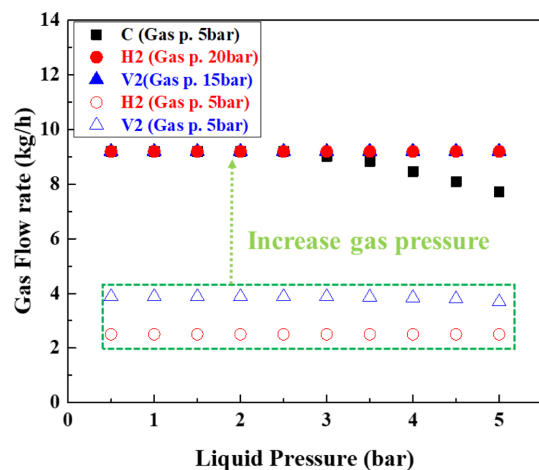


Fig. 6 Gas flow rate according to liquid pressure at fixed gas flow rate

일한 조건에서 실험을 진행하였다. 가스압력 5bar인 조건에서 가스의 질량유량은 C 노즐에 비해 H2 노즐은 평균값의 약 72%, V2 노즐은 약 56% 작은 것을 확인하였다. 이는 타원형 노즐의 경우 원형 노즐에 비해 원주 둘레의 길이가 길어 공급되는 가스와 노즐 내부 벽면의 전단응력 작용 면적이 넓어 가스와 벽면사이의 마찰력이 원형 노즐보다 크기 때문이라 사료된다^(14,18).

Figure 6은 액체 분사압력에 따른 가스 질량유량을 나타낸 그래프이다. 가스의 분사압력을 C 노즐은 5bar, H2 노즐은 20bar, V2 노즐은 15bar 일 때 동일한 가스 질량유량을 가지는 것을 확인하였다. 이를 통해 같은 출구 오리피스 넓이를 가진 노즐이라도 출구 오리피스 형상에 따라 동일한 가스의 질량유량을 가지기 위해 C 노즐에 비해 H2 노즐은 4배, V2 노즐은 3배의 가스 분사압력이 필요한 것을 확인하였다. 또한 장축으로 유입되는 V2 노즐과 비교해 H2 노즐 조건에서 가스 질량유량 조건이 동일하게 위해서는 더 큰 압력이 필요하다.

3.2 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 평균액적크기

Figure 7은 액체의 분사압력에 따른 평균액적크기를 나타낸 그래프이다. 실험에 사용된 노즐은 C, H2, V2 노즐이다. 가스의 압력은 5bar로 고정하였으며, 액체의 분사압력은 0.5-5bar까지 0.5bar씩 증가시키며, 실험을 진행하였다. 액체의 분사압력이 증가함에 따라 평균액적크기가 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 액체의 분사압력이 증가하면 액체의 질량유량도 증가하기 때문이다. Fig. 5의 결과에 따라 가스의 분사압력이 동일함에

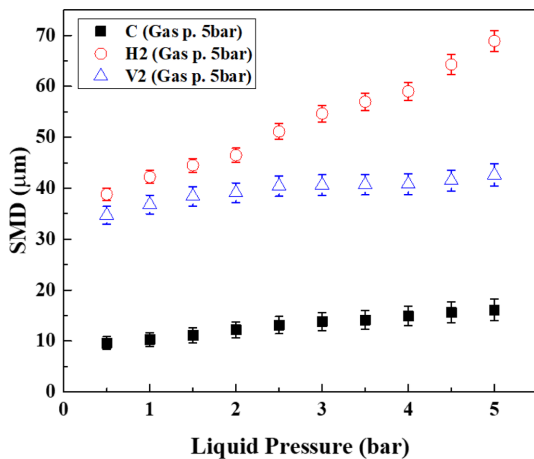


Fig. 7 SMD according to liquid pressure at fixed gas pressure

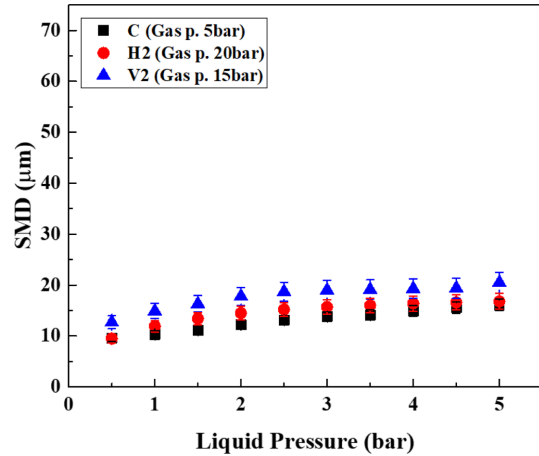


Fig. 8 SMD according to liquid pressure at fixed gas flow rate

도 불구하고, 가스의 질량유량은 C 노즐이 가장 높았고, H2 노즐이 가장 낮다. 이에 따라 Fig. 7의 평균액적의 크기도 가스의 질량유량에 영향을 받아 C 노즐이 가장 작게 측정되었고, H2 노즐이 가장 크게 측정되었다.

Figure 8은 가스 질량유량이 동일한 조건에서의 액체의 분사압력에 따른 평균액적크기를 나타낸 그래프이다. 실험 사용된 노즐은 Fig. 7과 동일하고, 가스의 분사압력은 동일한 가스의 질량유량을 가지기 위한 조건으로 Fig. 6의 실험조건과 동일하다. 동일한 가스의 질량유량 조건에서 실험에 사용된 모든 노즐의 평균액적크기는 Fig. 7의 동일 가스 분사압력일 때의 평균액적크기 비해 차이가 미미한 것을 확인하였다. 결과적으로 평균액적크기는 가스의 분사압력이 아닌 가스의 질량유량에 더 많은 영향을 받는 것을 확인하였다.

3.3 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 공간적 분무 특성

Figure 9는 실험에 사용된 C, H2, V2 노즐의 분무 이미지도. 가스 질량유량을 동일하게 하기 위해 가스의 분사압력을 C 노즐은 5bar, H2 노즐은 20bar, V2 노즐은 15bar로 고정하였다. 액체의 분사압력은 1bar, 3bar, 5bar에서 각각 이미지를 촬영하였다. 액체 분사압력이 증가할수록 실험에 사용된 모든 노즐 조건에서 분무중심으로부터 좌측보다 우측에서 액주의 분열이 상대적으로 이루어지지 못한 것을 관찰하였다. V2 노즐의 경우 C 노즐과 H2 노즐에 비해 우측에서의 액주 분열이 이루어지지 못해 비대칭 분무가 심화된 것을 확인하였다.

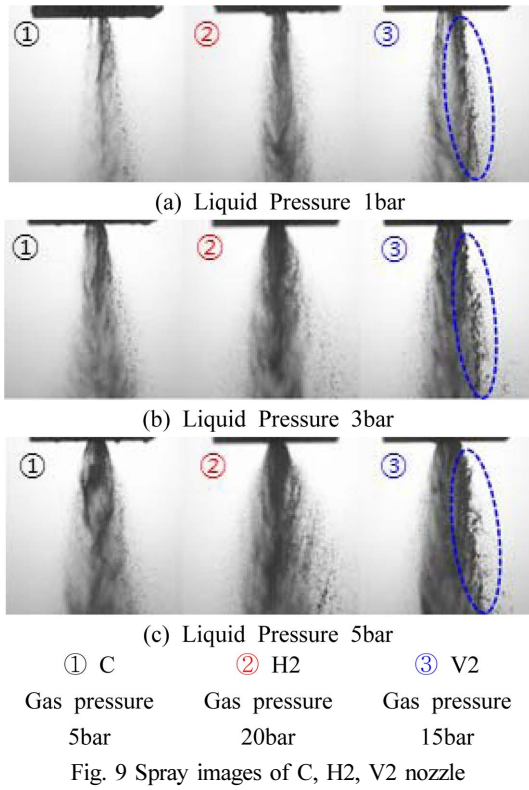


Figure 10은 X축 반경방향에 따른 평균액적크기로 나타낸 그래프이다. 실험은 Fig. 9의 실험 노즐과 조건을 동일하게 하여 실험을 진행하였다. Fig. 9에서 관찰한 것과 같이 실험에 사용된 모든 노즐은 분무중심 우측에서 평균액적크기가 큰 것을 확인하였다. V2 노즐의 경우 C 노즐과 H2 노즐에 비해 상대적으로 평균액적크기가 크다. 또한 Fig. 9 분무이미지에서는 구별하지 못했던 X축 전체 범위에서 평균액적크기도 V2 노즐이 가장 크게 측정된 것을 확인하였다. 이 결과로 C 노즐과 H2 노즐은 노즐 내부에서 액체가 액막을 형성하지 못하고, 가스가 직접 충돌해 분사되어 액적의 입경분포가 상대적으로 균일하게 나타나는 것으로 판단된다⁽⁶⁾. 타원형 노즐의 경우 장축에서가 단축에서 보다 상대적으로 유체가 유입되었을 때 수축되는 힘이 크기 때문이다⁽¹⁸⁾. 이에 따라 V2 노즐의 경우는 공급되는 가스 및 액체와 노즐 내부 벽면에서의 전단응력, 공급되는 가스와 액체 사이의 전단응력이 복합적으로 작용하여 상대적으로 C 노즐과 H2 노즐에 비해 가스의 간섭이 작기 때문에 더 비대칭적인 분무특성을 가진다고 판단된다. 그러나 이는 압력 분무 노즐에서 나타는 경향으로 이유체 노즐에

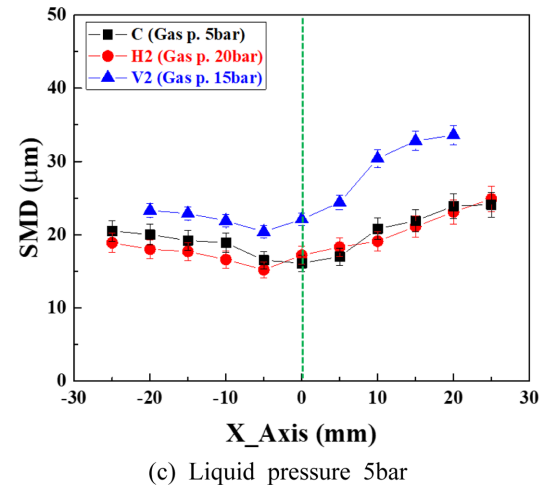
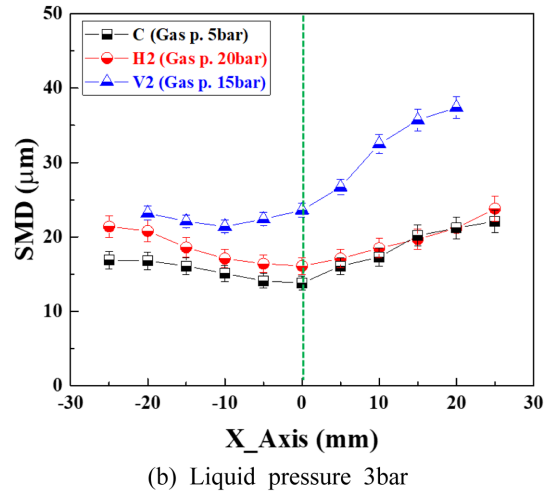
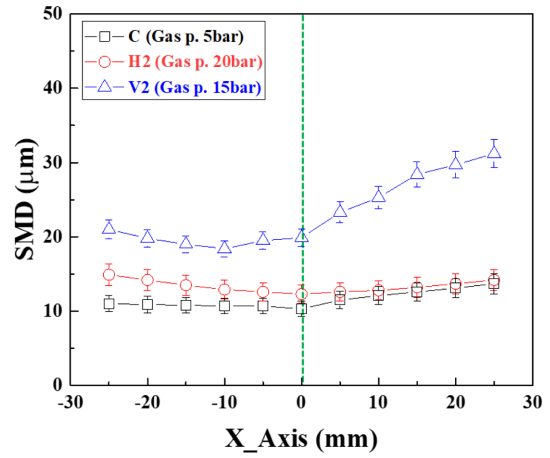


Fig. 10 SMD according to X_Axis

서도 같은 경향을 보인다고 확정 지을 수는 없다. 이에 타원형 Y-jet 노즐 내부유동에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 Y-jet 노즐의 출구 오리피스 형상에 따른 분무 특성을 관찰하고, 타원형 Y-jet 노즐의 가스 질량유량 및 입경분포를 실험적으로 확인하였다.

(1) 원형 노즐에 비해 타원형 노즐이 동일 가스압력 조건임에도 불구하고 가스 질량유량이 낮게 나오는 것을 확인하였다. 이는 타원형 노즐의 경우 원형 노즐에 비해 원주 둘레의 길이가 길어 공급되는 가스와 노즐 내부 벽면의 전단응력 작용 면적이 넓기 때문이다.

(2) 동일한 가스 분사압력조건에서 원형 노즐에 비해 타원형 노즐에서 평균액적크기가 큰 것을 확인하였고, 동일한 가스 질량유량 조건에서는 실험에 사용된 모든 노즐의 평균액적크기 차이는 미미한 것을 확인하였다.

(3) 동일한 가스 질량유량 조건에서 액적의 입경 분포는 C 노즐과 H2 노즐은 차이가 미미하며, V2 노즐의 경우 위의 두 노즐과 비교해 상대적으로 공간적인 비대칭인 것을 확인하였다. 이는 단축 액체가 유입되는 H2 노즐에 비해, V2 노즐은 장축으로 액체가 유입되기 때문이다.

참고문헌

- (1) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.
- (2) Y. Zhou, M. Zhang, J. Yu, X. Zhu, and J. Peng, "Experimental investigation and model improvement on the atomization performance of single-hole Y-jet nozzle with high liquid flow rate", Powder Technology, 199, 2010, pp. 248~255.
- (3) L. D. Wigg, "Drop Size Prediction for Twin-Fluid Atomization", J. Inst. Fuel, Vol. 37, 1964, pp. 500~505.
- (4) W. B. Bryce, N. W. Cox, and W. I. Joyce, "Oil Droplet Production and Measurement from a Twin Fluid Atomizer Using Real Fluids", Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray System (ILASS), 1978, pp. 259~263.

- (5) 송시홍, 이상용, "Y-jet 노즐에서의 혼합관 길이변화에 따른 분무특성 연구", 대한기계학회논문집, 제18권 제11호, 1994, pp. 3021~3031.
- (6) 송시홍, 이상용, "Y-jet 노즐을 통한 저점도 액체의 유량 및 입경예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제18권 제12호, 1994, pp. 3377~3385.
- (7) Y. H. Nazzar, M. Ehmann, M. Sami, and M. Gavaises, "Atomization Mechanism of Internally Mixing Twin-Fluid Y-Jet Atomizer", Journal of Energy Engineering, Vol. 147, Issue 1, 2021.
- (8) 이상지, 홍정구, "Y-jet 이유체 노즐의 설계인자에 따른 분무특성", 경북대학교 대학원, 2018.
- (9) P. Andreussi, L. Tognotti, G. De michele, and M. Graziadio, "Design and Characterization of Twin-Fluid Y-jet Atomizers", Atomization and Sprays, Vol. 2, 1992, pp. 45~59.
- (10) Y. H. Nazzar, M. Ehmann, P. Koukouvinis, M. Gavaises, "The Influence of Geometrical and Operational Parameters on Internal Flow Characteristics of Internally Mixing Twin-Fluid Y-Jet Atomizers", Atomization and Sprays, Vol. 29, No. 5, 2019, pp. 403~428.
- (11) K. S. L. Prasad, "Spray Characterization of Air Blast Atomisers", Proc. ICLASS-82, 1982, pp. 123~130.
- (12) 이상지, 홍정구, "노즐 형상에 따른 Effervescent 이유체 노즐의 분무특성", 한국액체미립화학회지, 제22권 제3호, 2017, pp. 146~152.
- (13) 구건우, 홍정구, 이충원, "원형 노즐과 타원형 노즐에서 발생하는 캐비테이션 유동", 대한기계학회 논문집 B권, 제35권 10호, 2011, pp. 1005~1012.
- (14) 김성열, 구건우, 이충원, 홍정구, "타원 노즐과 원형 노즐의 내부 유동과 외부유동", 대한기계학회 춘추학술대회, 2010, pp. 2874~2879.
- (15) 송윤호, 황동현, 안규복, "오리피스 형상에 따른 단공 노즐 액체제트의 유동특성", 한국추진공학회지, 제21권 5호, 2017, pp. 19~28.
- (16) 구건우, 홍정구, 박철우, 이충원, "원형 및 타원형 노즐 내부유동과 외부유동의 상관관계", 대한기계학회 논문집 B권, 제36권, 3호, 2012, pp. 325~333.
- (17) 윤현진, 홍정구, 구건우, 석지권, 정경열, "이유체 노즐 미립화 특성이 요소 열분해에 미치는 영향", 한국액체미립화학회지, 제20권 3호, 2015, pp. 162~167.
- (18) 구건우, 홍정구, "타원형 노즐의 내부유동 구조가 액주분열에 미치는 영향", 한국액체미립화학회지 제18권 1호, 2013, pp. 44~54.