

## Y-jet 노즐의 설계인자와 SMD 측정방향에 따른 분무특성의 실험 연구

이상지\* · 홍정구†

### Experiment Study on the Spray Characteristics according to the Design Factors and SMD Measuring Direction of Y-jet Nozzle

Sang Ji Lee and Jung Goo Hong

**Key Words:** Twin-fluid Nozzle(이유체 노즐), Y-jet Nozzle(Y-jet 노즐), Mixing chamber length(혼합관 길이), SMD(액적 평균입경)

#### Abstract

Y-jet nozzle has various advantages over other twin-fluid nozzles and are used in industrial boilers. However, it costs large energy consumption because of assisted air and its design is complex. The Y-jet nozzle is consisted of a liquid and gas port and a mixing chamber. The diameter of the port and the length of the mixing chamber greatly affect spray and atomization characteristics, therefore, they are the most important factors in nozzle design. In this study, The experimental setup is consisted of a laboratory scale spray system. The characteristics of the Y-jet nozzle according to the design parameters were observed. As a result, it was found that the length of the mixing chamber did not have effect on the flow rate and the choking condition. The droplet size was measured using a Malvern type measuring device. In addition, measurements were conducted in the front and the right directions of the nozzles. Based on the results, the SMD View Ratio is defined. It is the asymmetrical design characteristics of the Y-jet nozzle.

#### 1. 서 론

이유체 분무노즐은 단일 유체만을 이용하는 압력 분무노즐과 다르게, 액체 미립화를 위한 보조 공기를 사용한다. 따라서 이유체 분무노즐은 단일 유체를 이용하는 압력 분무노즐보다 비교적 낮은 압력으로 미립화가 향상되는 특징을 보인다. 하지만 압력 분무노즐에 비해 보조 공기를 추가로 이용하므로 에너지 소모가 있고, 노즐 형상이 복잡하다. 또한 실험적 연구가 많이 진행되어 있는 압력 분무노즐과 다르게 이유체 분무노즐은 분무 특

성에 관한 연구와 데이터 등이 상대적으로 부족하여, 최적화된 분무조건을 찾기 어려운 상황이다<sup>(1-7)</sup>.

이유체 분무 장치 중 Y-jet 노즐은 다른 이유체 노즐에 비해 다양한 장점을 가지고 있다. 첫째, 상대적으로 단순한 구조를 가지고 있기에 제작이 용이한 장점이 있다. 둘째, 많은 양의 연료를 분사하는 데에 있어서 Y-jet 노즐은 다른 이유체 노즐 보다 적은 양의 보조 공기를 사용하여도 거의 동일한 수준의 분무효과를 가진다. 셋째, 넓은 턴 다운 비(turn-down ratio)를 가지며, 다양한 유량 조건에서 사용이 가능하다. 마지막으로 분무 시 분무각의 변화가 작아 다중 홀(multi hole)에서의 분류사이의 간섭이 작다. 이러한 Y-jet 노즐의 장점으로 인하여 산업용 보일러와 연소로를 비롯한 다양한 연소장치에 사용되고 있다<sup>(8)</sup>. 특히 Y-jet 노즐을 산업분야에 적용하기 위해서는 액체연료와 보조 공기 공급관의 크기 및 이유체가 혼합되는 혼합관의 길이가 노즐설계에 가장

(Received: 9 Nov 2018, Received in revised form: 12 Dec 2018, Accepted: 13 Dec 2018)

\*경북대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : jghong70@knu.ac.kr

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

중요한 변수이며, 따라서 이에 대한 실험적인 연구가 필요하다.

Mullinger와 Chigier<sup>(9)</sup>는 Y-jet 노즐의 혼합관의 길이가 길수록 분사되는 이류체 간의 더 많은 운동량의 전달이 이루어진다고 하였으며, 이로 인해 미립화 성능이 향상된다고 보고하였다. 이에 반해 Prasad<sup>(10)</sup>는 액체 미립화를 위한 충분한 운동량만 확보된다면 혼합관 길이의 더 큰 증가는 미립화에 도움이 되지 않는다고 하였다. 이러한 두 연구자들의 주장에 대해서 Andreussi 등<sup>(11)</sup>은 혼합관 내에서 이류체 간의 분열과 합착과 오리피스벽면의 재부착 인해 액적 크기가 변화하고, 이는 혼합관 길이와 혼합관 내의 공기의 속도와 밀도에 영향을 받는다고 주장하였다. 이와 같이 Y-jet 노즐의 혼합관 길이와 같은 설계인자에 대한 효과를 확인해본 연구도 진행되었지만, 액체와 기체의 공급관의 직경비의 변화는 액적크기에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 이에 따른 연구가 필요하다고 생각된다. 한편 Song 등<sup>(8,12)</sup>은 Y-jet 노즐은 반경방향으로 비대칭적인 입경분포를 가진다고 주장하였다. 하지만, 노즐의 3차원 측정방향에 따른 공간적인 입경분포를 구체적으로 제시하지는 못했다.

이에 본 연구에서는 실험실 규모의 분무실험 장치를 사용하여 Y-jet 노즐의 혼합관 길이와 액체 및 보조공기 공급관의 직경에 따른 분무특성을 확인하고자 한다. 또한 공간적으로 비대칭적인 분무 형태를 보이는 Y-jet 노즐 특성을 감안하여, 액적크기 측정 방향에 따른 공간적인 분무특성을 실험적으로 확인하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 노즐 및 실험 조건

실험에 사용한 노즐은 알루미늄으로 제작된 Y-jet 이류체 노즐이다. Y-jet 노즐은 크게 액체를 공급하는 액체 공급관(liquid inlet port)와 보조 공기를 공급하는 기체 공급관(air inlet port), 2개의 유체 공급관이 만나서 유체가 혼합되는 혼합관(mixing chamber)로 구성되어 있다. Fig. 1은 2개의 유체 공급관으로 공급된 유체가 혼합관에서 혼합되어 출구 오리피스(exit orifice)로 분사되는 노즐형태의 단면도이다.

Table 1은 실험에 사용된 4종류의 Y-jet 노즐 사양을 나타낸다. 4종류의 노즐 모두 출구 오리피스의 직경( $d_m$ )은 2.5 mm이며, 기체와 액체의 공급관 사이 각도( $\theta$ )는 65°로 고정하였다. 노즐 설계변수인 혼합관 길이( $l_m$ )와

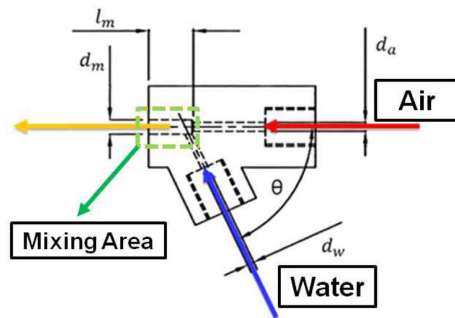


Fig. 1 Schematic diagram of the Y-jet nozzle

Table 1 Nozzle specification

Nozzle	C-3.5-1.4	C-5.5-1.4	C-7.5-1.4	C-5.5-0.7
$d_m$ (mm)	2.5			
$l_m$ (mm)	8.75	13.75	18.75	13.75
Angle( $\theta$ )	65			
$d_a$ (mm)	1.58		1.13	
$d_w$ (mm)	1.13		1.58	
$d_m/d_a$	1.58		2.21	
$d_a/d_w$	1.4		0.7	
$l_m/d_m$	3.5	5.5	7.5	5.5

Table 2 Experimental conditions

	Liquid	Gas
Working fluid	Water	Nitrogen
Injection pressure	0.5~5 bar	1~5 bar
Ambient condition	Atmosphere	
Temperature	20°C	

출구 오리피스 직경( $d_m$ )의 비( $l_m/d_m$ ), 보조공기 공급관 직경( $d_a$ )과 액체 공급관 직경( $d_w$ )의 비( $d_a/d_w$ )에 따른 분무특성을 살펴보기 위해  $l_m/d_m$ 은 3.5, 5.5, 7.5의 실험조건을 가지며,  $d_a/d_w$ 는 1.4와 0.7의 실험조건을 가진다. Table 2는 실험에 사용한 작동유체의 종류와 실험조건을 나타낸다. 작동유체는 상온의 물과 공기를 대신하여 질소를 사용하였으며, 물의 경우 분사압력이 0.5~5 bar, 질소의 경우 1~5 bar이다. 또한 본 연구에서는 각 실험조건에서의 액체와 기체의 질량유량을 기체액체 질량비(Air to Liquid mass flow ratio, ALR)로 무차원화 하였다. ALR의 관계는 식 (1)과 같다.

$$ALR = \frac{\text{Air mass flow rate}}{\text{Liquid mass flow rate}} \quad (1)$$

### 2.2 실험 장치

Figure 2는 Y-jet 노즐의 분무특성을 확인하기 위한 실험실 규모의 분무 실험 장치이다. 실험 장치는 Y-jet 노즐을 중심으로 크게 액체 공급부, 기체 공급부, 계측부로 구분된다. 액체 공급부에서는 약 10 bar의 압력으로 가압된 질소를 이용하여 서지탱크(surge tank, BT100-2J)에 압력을 일정하게 유지하여 사용하였다. 서지탱크에 공급되는 압력은 서지탱크와 질소 펌프 사이에 압력조정기(pressure regulator)를 두어 조정하였다. 분사되는 액체의 유량은 니들밸브(needle valve)를 통해 조절하였다. 기체 공급부는 약 10 bar의 압력으로 가압되는 질소 펌프를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 압력 조정기로 관내에 공급되는 압력을 조정한 다음 니들밸브를 이용하여 기체의 유량을 조절하였다. 각각의 유량 계측은 디지털 플로워 미터(SMC, PF2A711)와 데이터 획득 보드(NI DAQ-9172, National Instruments)를 통해 실시간으로 획득하였다. 노즐의 전단압력은 압력 센서(pressure transducer)를 이용해 값을 측정하였으며, 유량과 마찬가지로 데이터 획득보드를 통해 실시간으로 그 값을 측정하였다. 유량과 노즐 내부압력은 유량, 압력 센서의 값을 100 Hz로 샘플링 하여 5초간 측정된 값의 평균이다. 노즐로부터 분사되는 액적의 크기(Sauter Mean Diameter, SMD)는 레이저 회절(laser diffraction) 원리를 이용한 말번(Malvern) 타입의 측정 장치(MLXA-A12-635-5, 측정범위(약 8~450 μm), 작동거리(400 mm 이내), Laser spot radius: 3.9[pixel]), CCD(EPIX CMOS camera)를 사용하였다. 액적 크기는 노즐 팁(Tip)으로부터 200 mm

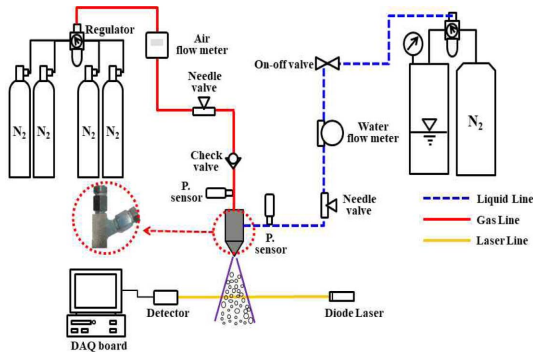


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup for measurement of spray characteristics

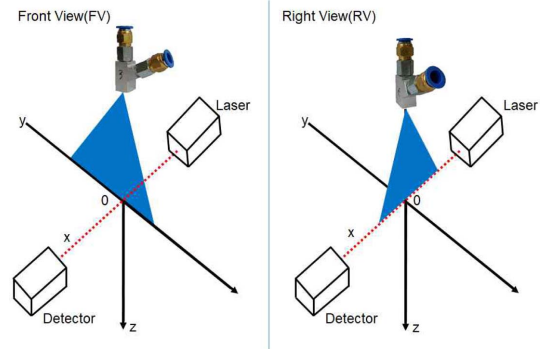


Fig. 3 Schematic diagram of the SMD measuring direction

분무하류에서 측정된 데이터이다<sup>(13,14)</sup>.

Figure 3은 액적크기를 측정하는 방향에 대한 개략도이다. 선행연구에서 Y-jet 노즐을 비대칭적인 분무특성을 보여준다고 하였으며<sup>(8,12)</sup>, 이에 따라 본 연구에서는 노즐의 방향에 따라 정면계측(Front View, FV)과 90° 회전한 측면계측(Right View, RV)으로 구분하여 계측하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 액체분사압력과 보조공기질량유량의 관계

Figure 4는 모든 노즐에서 액체 분사압력에 따른 보조공기 질량유량의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 혼합관 길이( $l_m$ )가 서로 다르고, 보조공기 공급관 직경( $d_b$ )과 액체 공급관 직경( $d_w$ )의 비( $d_b/d_w$ )는 1.4로 동일한 C-3.5-1.4, C-5.5-1.4, C-7.5-1.4 노즐에서의 결과이고, Fig. 4의 (d)는 보조공기 공급관 직경과 액체 공급관 직경의 비가 0.7인 노즐(C-5.5-0.7)이다. 액체 분사압력을 5 bar부터 0.5 bar까지 0.5 bar 간격으로 감소시키며 실험을 진행하였다. 모든 노즐에서 액체 분사압력이 감소할수록 보조공기 질량유량이 증가하는 경향성을 보였으나, 액체 분사압력이 감소함에 따라 더 이상 보조공기 질량유량이 증가하지 않고 일정한 유량을 가지는 초킹 현상(choking condition)을 관찰하였다. 이는 액체 분사압력이 감소함에 따라 보조공기 질량유량이 증가되지만, 특정한 액체 분사압력 이하의 조건에서는 더 이상 보조공기가 증가하지 않고 일정하게 된다. 또한 Fig. 4(a), (b), (c)의 각 노즐에 따른 초킹 발생 구간은 거의 동일한 것을 확인하였다. 초킹 발생 구간은 보조공기 분사압력이 상대적으로 높은 4~5 bar에서 가장 넓게 나

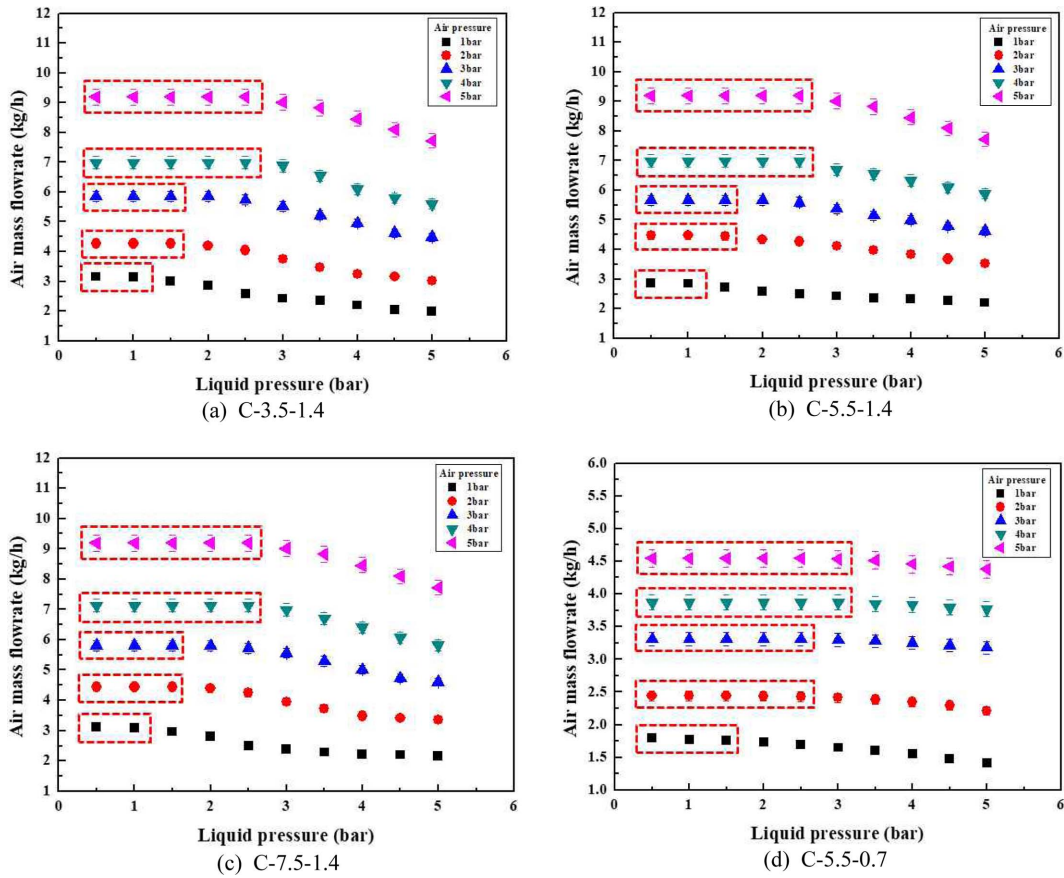


Fig. 4 Air mass flowrate according to liquid pressure

타났다. Fig. 4의 (d)에서 사용된 노즐(C-5.5-0.7)은 (b)에서 사용된 노즐(C-5.5-1.4)과 혼합관 길이는 같고, 보조 공기 공급관 직경과 액체 공급관 직경의 비가 0.7이다. Fig. 4의 (d)는 액체 분사압력이 감소할수록 보조공기 질량유량이 증가하는 경향과 초킹이 발생하는 현상이 유사하게 관찰되지만, Fig. 4(a), (b), (c)인 노즐보다 초킹 발생구간이 더 넓은 것을 확인하였다. 이는 Fig. 4(a), (b), (c)인 노즐보다 (d)의 노즐(C-5.5-0.7)에서 보조공기 공급관의 직경이 더 작기 때문이다. 또한 직경비( $d_b/d_w$ )가 1.4인 노즐보다 0.7인 노즐에서 보조공기 질량유량이 약 50% 정도 감소한 것을 확인하였다. 위 결과로부터 직경비( $d_b/d_w$ )가 작을수록 보조공기 질량유량이 감소하고 초킹 발생 구간이 넓어진 것을 확인하였다.

### 3.2 기체액체 질량비에 따른 액적크기

Figure 5는 실험에서 사용된 전체 노즐을 대상으로 기체액체 질량비(ALR)에 따른 액적크기 분포를 나타낸

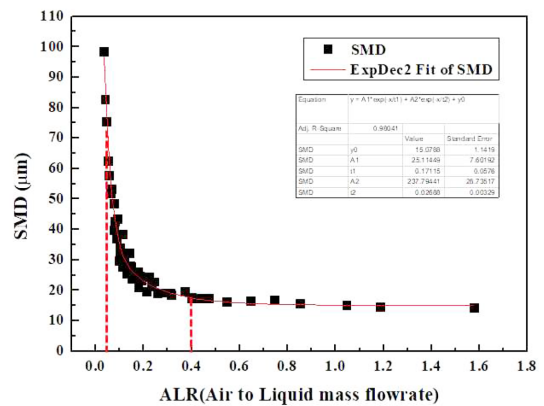


Fig. 5 SMD according to ALR

그래프이다. 기체액체 질량비의 증가에 따라 액적크기는 작아지는 경향을 확인하였으며, 기체액체 질량비가 0.4 이상의 조건에서는 액적크기가 일정한 값으로 수렴되는 것을 확인하였다. 이는 기체액체 질량비가 커질수

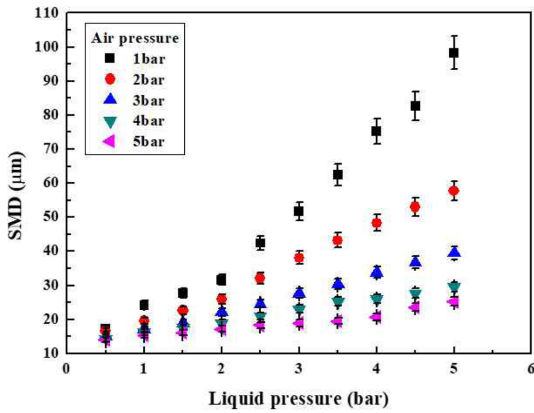


Fig. 6 SMD according to liquid pressure

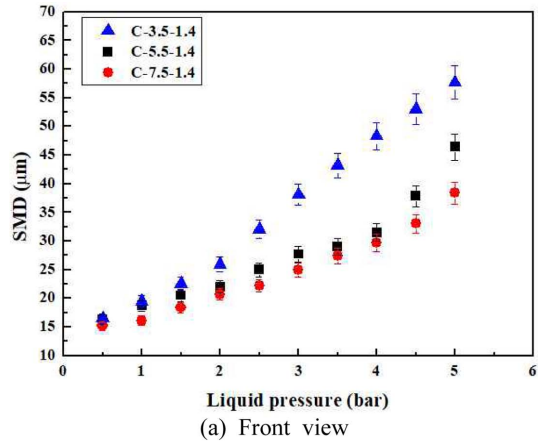
록 보조공기 공급량이 액체의 공급량보다 많아지기 때문에 액적크기가 작아진 것으로 판단된다.

### 3.3 액체 분사압력에 따른 액적크기

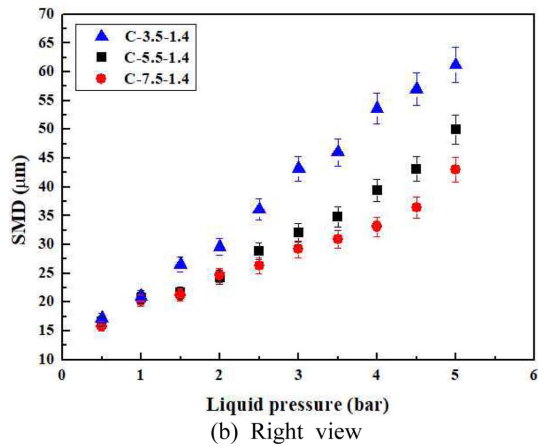
Figure 6은 노즐(C-3.5-1.4)에서 보조공기 분사압력을 1~5 bar로 고정시킨 조건에서, 액체 분사압력을 0.5~5 bar까지 0.5 bar씩 증가시켰을 때, 각 조건에서의 액적크기를 나타낸 그래프이다. 보조공기 분사압력에 관계없이, 액체 분사압력이 증가할수록 액적크기가 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 액체 분사압력이 증가할수록 액체 질량유량이 증가하기 때문이다. 동일한 액체분사압력에서 보조공기 분사압력이 클수록 액적크기의 크기가 작은 것을 확인하였다. 이는 보조공기 분사압력이 증가할수록 미립화를 촉진시키는 보조공기 질량유량이 증가하기 때문이다. 또한 액체 분사압력이 1bar 이하에서는 보조공기 분사압력에 따른 액적크기의 차이는 크지 않은 것을 확인하였다.

### 3.4 설계인자에 따른 액적크기

Figure 7과 8은 액체 분사압력에 따른 액적크기를 나타낸 그래프이다. Fig. 7은 혼합관 길이가 서로 다른 C-3.5-1.4, C-5.5-1.4, C-7.5-1.4 노즐에서 실험이 수행되었다. 보조공기 분사압력은 2bar로 고정시키고, 액체 분사압력을 0.5bar에서 5bar까지 증가시킨 조건에서 액적크기를 측정하였다. 모든 노즐에서 액체 분사압력이 증가할수록 액적크기가 커지는 경향을 확인하였으며, 동일한 액체 분사압력 조건에서는 혼합관 길이가 짧을수록 액적크기가 큰 것을 확인하였다. 이는 기체와 액체가 서로 혼합되는 혼합관 길이가 길수록, 혼합관 내에서 액체



(a) Front view



(b) Right view

Fig. 7 SMD according to liquid pressure in mixing chamber length and measuring direction (Air pressure 2 bar fixed)

의 분열시간이 늘어나고, 이에 따라 액적크기가 더 작아지는 것으로 판단된다.

Figure 8은 직경비( $d_a/d_w$ )가 다른 노즐(C-5.5-1.4, C-5.5-0.7)을 대상으로 액적크기를 나타낸 그래프이다. Fig. 7과 동일한 압력조건에서 실험을 진행하였으며, 직경비가 0.7인 노즐(C-5.5-0.7)이 직경비가 1.4인 노즐(C-5.5-1.4)보다 동일한 액체 분사압력에서 액적크기가 큰 것을 확인하였다. 이는 직경비가 0.7인 노즐이 1.4인 노즐보다 액체 공급관의 크기는 크고, 보조공기 공급관의 크기는 작기 때문이다.

### 3.5 측정방향에 따른 액적크기

Y-jet 노즐의 구조특성상 비대칭적인 분무특성을 가지기 때문에 측정방향에 따른 액적크기를 관찰할 필요가



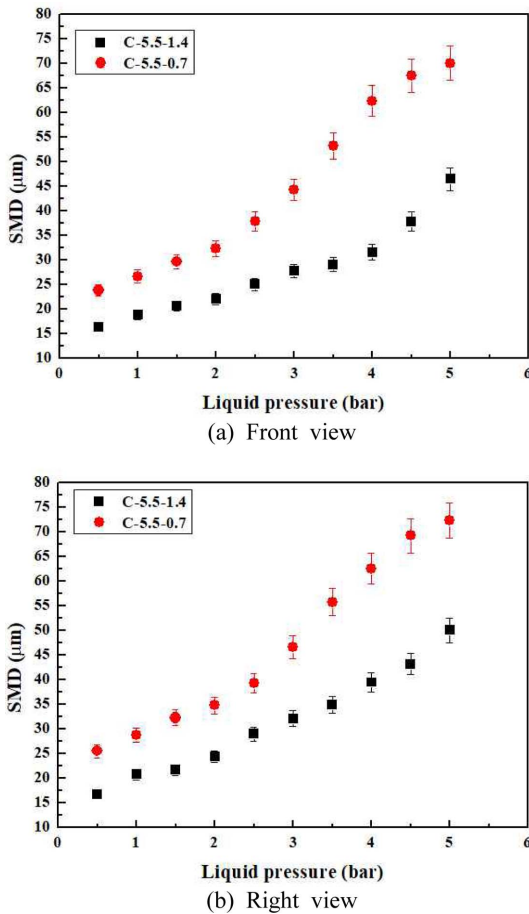


Fig. 8 SMD according to liquid pressure in da/dw ratio and measuring direction (Air pressure 2 bar fixed)

Table 3 SMD view ratio

Nozzle	C-3.5-1.4	C-5.5-1.4	C-7.5-1.4	C-5.5-0.7
SMD View Ratio	1.1	1.126	1.147	1.054

있다. Table 3은 Fig. 7과 8에서 노즐의 측정방향에 따른 액적크기 차이를 알아보기 위한 표이다. 각각의 노즐에서 동일한 액체 분사압력 조건에서 정면계측과 측면계측에서 액적크기를 측정하였다. 측면계측과 정면계측에서 획득한 액적크기를 평균하여 그 값을 비로 나타내었고, 이를 방향에 따른 평균 액적크기 비(SMD View Ratio)로 정의하였다.

$$SMD \text{ View Ratio} = \frac{\text{Right view SMD}}{\text{Front view SMD}}$$

모든 노즐에서 방향에 따른 평균 액적크기 비가 1보다 큰 값을 얻었고, 측면계측에서 측정된 액적크기가 정면계측에서 측정된 액적크기보다 약 10% 정도 크게 나타났다. 이를 통해 Y-jet 노즐의 공간적인 분무 형태가 비대칭임을 방향에 따른 평균 액적크기 비를 통해 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 Y-jet 노즐의 혼합관의 길이, 액체 및 보조공기 공급관의 직경비에 따른 유량 및 액적크기를 실험적으로 얻었고, 분무특성을 방향에 따른 평균 액적크기 비로 확인하였다.

(1) 액체 분사압력에 따른 보조공기 질량유량의 결과를 통해 초킹 현상을 관찰하였고, 혼합관의 길이에 따른 초킹 조건의 차이는 크지 않았고, 0.7의 직경비에서 보다 넓은 초킹 구간을 확인하였다.

(2) 혼합관 길이가 길수록 액적 크기가 작은 것을 확인하였으며, 이는 혼합관 길이에 따른 분열시간이 길어지기 때문으로 판단된다. 또한 직경비가 클수록 액체 공급관은 작아지고 기체 공급관이 커지므로 액적크기가 작은 것을 확인하였다.

(3) 방향에 따른 평균 액적크기 비가 1보다 크므로 Y-jet 노즐의 분무패턴은 측정방향에 따라 공간적인 차이를 보인다.

#### 참고문헌

- (1) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.
- (2) C. W. Lee, Y. J. Lee, J. W. Park, and K. Terasima, "Effect of nozzle hole configuration on spray characteristics for diesel engine", 10th Annual Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul, Korea, 2005, pp. 267-272.
- (3) A. R. Jones, "Design optimization of a large pressure jet atomizer for power plant", International Conference on Liquid Atomization and Spray System, 1982, pp. 181-185.
- (4) P. S. Kutty, M. V. Narasimhan, and K. Narayansway, "Design and prediction of discharge rate, cone angle and air core diameter of swirl chamber atomizers", International Conference on Liquid Atomization and

- Spray System, 1978, p. 93.
- (5) S. D. Sovani, P. E. Sojka and A. H. Lefebvre, "Effervescent atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, 2001, pp. 483~521.
- (6) A. H. Lefebvre, "Atomization and Spray", Hemisphere publishing corporation, 1989, pp. 201~307.
- (7) 구건우, 홍정구, "타원형 노즐의 내부유동 구조가 액주분열에 미치는 영향", *한국액체미립화학회지* 제18권 1호, 2013, pp. 44~54.
- (8) 송시홍, 이상용, "Y-jet 노즐에서의 혼합관 길이변화에 따른 분무특성 연구", *대한기계학회논문집* 제18권 제11호, 1994, pp. 3021~3031.
- (9) P. J. Mullinger, and N. A. Chigier, "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers", *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 47, 1974, pp. 251~261.
- (10) K. S. L. Prasad, "Spray Characterization of Air Blast Atomisers", *Proc. ICLASS-82*, 1982, pp. 123~130.
- (11) 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.
- (12) 송시홍, 이상용, "Y-jet 노즐을 통한 저점도 액체의 유량 및 입경예측에 관한 연구", *대한기계학회논문집* 제18권 제12호, 1994, pp. 3377~3385.
- (13) 구건우, 홍정구, 박철우, 이충원, "원형 및 타원형 노즐 내부유동과 외부유동의 상관관계", *대한기계학회 논문집 B권* 제36권 3호, 2012, pp. 325~333.
- (14) 윤현진, 홍정구, 구건우, 석지권, 정경열, "이유체 노즐 미립화 특성이 요소 열분해에 미치는 영향", *한국액체미립화학회지* 제20권 3호, 2015, pp. 162~167.