

## 쿨링 포그 시스템의 저압 안개 노즐 분무특성에 대한 실험적 연구

김지엽\* · 정철\* · 강원중\* · 김정웅\* · 홍정구†

### Experimental Study on the Spray Characteristics of Low Pressure Fog Nozzles in Cooling Fog System

Ji Yeop Kim, Cheol Jeong, Won Jun Kang, Jeong Ung Kim, and Jung Goo Hong

**Key Words:** Cooling Fog(쿨링 포그), Mist Spray(안개 분무), Dry Fog(마른 안개), Low Pressure Fog Nozzle(저압 안개 노즐), SMD(액적 평균입경)

#### Abstract

Cooling fog is being used in various parts of society such as fine dust reduction, cleanliness, and temperature drop. Cooling fog has the advantage of low flow rate and ease of use compared to other spray systems. In the case of cooling fog, it was confirmed that the injection angle increased as the pressure increased and the nozzle diameter increased. In this study, the minimum injection angle was 33.61 degrees and the maximum injection angle was 107.38 degrees. It was confirmed that the larger the nozzle diameter and the smaller the pressure, the larger the droplet size. In addition, it was confirmed that the Sauter Mean Diameter (SMD) increased along the X and Y axis directions. It was confirmed that the size of the droplet decreases as it approaches the nozzle tip due to the characteristics of the nozzle design factor.

#### 1. 서 론

쿨링포그(Cooling Fog)는 압력 분무형 노즐을 이용하여 안개처럼 미세한 액적을 형성하여 분사하는 방법을 말한다<sup>(1,2)</sup>. 쿨링포그 노즐은 구조적으로 미립화 성능이 우수하며, 상대적으로 타 압력분무 노즐에 비해 적은 유량을 사용하고 에너지의 사용이 적다<sup>(3-5)</sup>. 또한, 넓은 분무 각을 갖기에 넓은 범위에 분사하는 특징이 있으며, 연속적으로 분무 가능하고 다중 구조를 갖기 용이하여 쿨링포그 시스템을 운용하기에 편의성이 높다는 장점을 가진다<sup>(6)</sup>. 쿨링포그 시스템은 이러한 장점을 통해 대기의 온·습도 제어 및 미세먼지 저감, 방역, 살포, 방충, 안

전, 관광 등 산업 전반에 이용되고 있다<sup>(7,12)</sup>.

일반적으로 분무되는 액적 크기가 너무 큰 경우, 미세먼지 등과 같은 입자들의 흡착능력은 우수하나 효율성이 떨어지며, 액적의 크기가 너무 작을 경우 효율은 높아지나 입자 흡착능력이 떨어진다<sup>(13)</sup>. 쿨링포그 노즐을 통해 생성되는 액적크기는 10~50  $\mu\text{m}$ 로 마른 안개(Dry Fog) 특성을 가져 미세 액적들이 기류에 쉽게 영향을 받으며 표면에 접촉 시 젖지 않는다<sup>(14,15)</sup>. 또한, 넓은 면적에 균일한 분포로 코팅을 형성하려는 특성을 가지고 있다<sup>(16)</sup>. 마른 안개의 경우, 부유하는 특성을 가지는 10  $\mu\text{m}$ 이하의 미세 액적들과 달리 공기 중에 가라앉으려는 경향이 있어 환기의 필요성이 적다<sup>(17)</sup>.

쿨링포그는 타 노즐과 다르게 열섬효과로 인해 생성된 뜨거운 공기의 에너지를 흡수하여 주위 온도를 최대 10°C까지 낮추는 효과를 가지고 있다<sup>(18,19)</sup>. 이러한 특성은 주로 축사 가축의 세척 및 온·습도 조절을 통한 스트레스 저감, 밀폐된 축사 환경에서 분뇨 및 메탄가스 제거 등에 주로 사용된다<sup>(20-23)</sup>.

(Received: 21 Sep 2022, Received in revised form: 2 Nov 2022, Accepted: 8 Nov 2022)

\*경북대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

E-mail : jghong70@knu.ac.kr

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

일반적으로 쿨링포그의 저, 고압 시스템은 20 bar를 기준으로 나누어지며, 압력과 분무 각에 관한 연구로 Najafi 등<sup>(24)</sup>은 7~12 bar의 좁은 범위의 저압 조건에서, Chacker 등<sup>(25)</sup>은 21~207 bar의 고압 조건에서, Wadekar 등<sup>(26)</sup>은 200~1400 bar의 초고압 조건에서 압력에 상관없이 분사압력이 액적 크기와 반비례함을 확인하였으며, 분무 각과는 비례함을 보고하였다.

쿨링포그 노즐 오리피스 직경에 관한 연구로 Gao 등<sup>(27)</sup>은 1~2 mm 직경에서, Barakat 등<sup>(28)</sup>은 0.1~0.4 mm 직경에서, Wadekar 등<sup>(26)</sup>은 0.148 mm와 0.38 mm 직경에서 액적 크기를 측정하였으며, 노즐의 직경이 액적 크기와 비례 관계를 갖는 것을 확인하였다.

쿨링포그 노즐의 분무 하류 도달거리(Penetration)에 대한 연구로, Chen 등<sup>(29)</sup>은 노즐 팁(Tip)으로부터 하류 100~500 mm 범위에서, Li 등<sup>(30)</sup>은 Flat Fan 노즐 팁 하류 300~600 mm 범위에서, Gao 등<sup>(31)</sup>은 Swirl 노즐의 팁의 수평 방향 0~3000 mm 범위에서의 액적 크기에 대한 연구를 진행하였다.

Chacker 등<sup>(25)</sup>은 선회(Swirl) 분무 노즐과 디플렉터(Deflector) 노즐의 액적 크기를 비교고찰 하였다. Mandato 등<sup>(32)</sup>은 단공 노즐과 이류체 노즐에 따른 액적 크기 분포 차이와 유체 특성에 따른 액적 크기를 비교하였다.

선행연구의 경우, 저압 분무 조건에서의 미립화 특성을 다룬 연구 자료가 고압 분무 조건에 비해 상대적으로 적고, 대부분의 선행 연구가 다중 구조 및 자동화 시스템에 집중되어 있으므로, 이를 실제 대기 조건에서 적용하기에는 무리가 있다. 그 중에서도 분무 하류 방향에 대한 연구결과가 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 쿨링포그 노즐의 분무 하류 방향과 축 방향에 따른 분무 특성 연구를 수행하고자 한다. 특히, 일반적인 압력 분무형 노즐과의 비교를 위해 특별히 제작된 안개 분무 노즐을 이용하여 노즐 오리피스 및 분무조건에 따른 미립화 특성을 확인하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Figure 1은 실험 변수에 따른 쿨링 포그 시스템의 분무 특성을 확인하기 위한 실험실 규모의 장치도이다. 실험 장치는 크게 액체 공급부와 계측부 크게 2개의 부분으로 나뉜다. 먼저 액체 공급부에서 서지 탱크(Surge

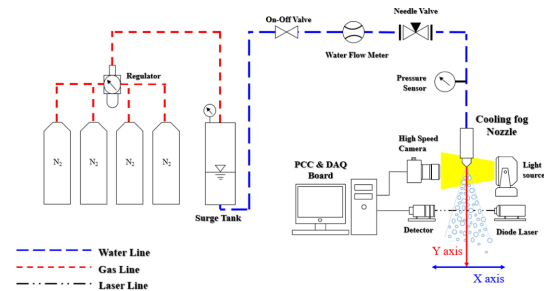


Fig. 1 Schematic of the Experimental setup

Tank)는 질소로 가압 되었으며, 압력조절기(Regulator)을 통해 서지 탱크로 공급되는 압력을 조절하였다. 서지 탱크로부터 나온 액체의 압력과 유량은 압력계(Pressure Sensor)와 유량계(Water flow meter)로 확인하였고, 니들 밸브(Needle valve)를 통해 압력과 유량을 조절하여 공급하였다. 유량 계측은 디지털 유량계(SMC, PF2A711)와 데이터 획득 보드(NI DAQ-9172, National Instruments)를 통해 실시간으로 데이터를 획득하였다. 노즐의 경우 안개 분무 노즐로 가장 많이 이용되고 있는 F사의 저압 세라믹 노즐 (Low Pressure Ceramic Nozzle)을 이용하였다. 계측부의 경우 분무 가시화를 위해 High-speed camera (Phantom VEO E310L, Maximum Resolution : 512×512, Sample Rate : 11,500 f/s)와 스트로브스코프(Stroboscope)를 이용한 가시화 기법을 이용하였고, 실시간으로 PCC(Phantom Camera Control) 프로그램을 통해 분무 이미지를 획득하였다. 유량과 노즐 내부압력은 유량, 압력 센서의 값을 100 Hz로 샘플링 하여 5초간 측정값의 평균으로 나타내었다. 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  $\mu\text{m}$ ), 작동 거리(400 mm 이내), Laser Spot Radius: 3.9[pixel])를 이용하였고, 실험조건 당 최소 30번씩 측정하여 평균을 나타내었다.<sup>(33-35)</sup>

### 2.2 실험 조건

Table 1은 쿨링 포그 분무 특성을 확인하기 위한 실험 조건을 나타낸 표이다. 노즐 직경의 경우 F사 에서 시중에 상용화되고 있는 0.1, 0.2, 0.5 mm 직경의 노즐을 이용하여 실험하였고, 바깥의 상온조건과 유사한 25°C에서 실험을 진행하였다. 압력조건은 경우 노즐 사용 조건인 24 bar까지 실험을 진행하였고, 노즐의 축 방향의 분무 특성을 확인하기 위해 Y axis는 1, 3, 5, 7, 100, 150,

Table 1 Experimental conditions

Nozzle Diameter (mm)	0.1, 0.2, 0.5
Temperature (°C)	25
Liquid Pressure (bar)	1~24
Y axis Measuring Position (mm)	10, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500
X axis Measuring Position (mm)	0~100

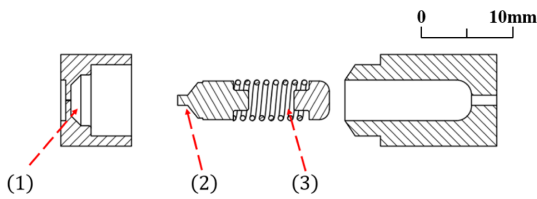


Fig. 2 Schematic of the Cooling fog nozzle

200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 mm에서 실험을 진행하였다. 또한, 노즐의 반경 방향의 분무 특성을 확인하기 위해 X axis는 0~100 mm까지 10 mm씩 이동하면서 측정하였다.

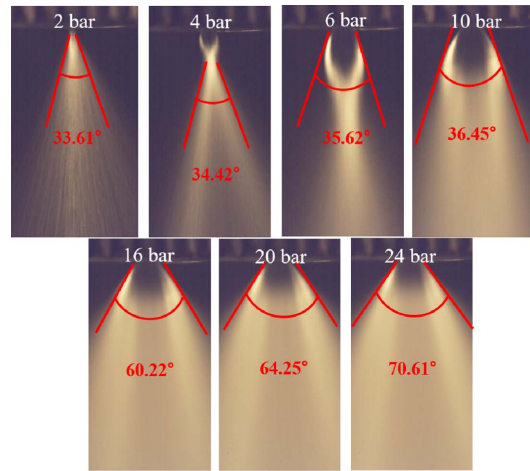
### 2.3 실험 노즐

Figure 2는 쿨링 포그에 이용되는 F사의 저압 세라믹 노즐의 단면도이다. 실험 노즐은 크게 (1), (2), (3) 3가지 부분으로 구성되어있다. (1)의 경우 낮은 분사압력에서도 미립화가 가능하도록 선화 분무의 형상을 나타내며, 노즐 내 중심부에 공기 코어(Air Core)가 형성되는 구조를 가진다. (2)의 경우 분무시 중심부에 중공이 되는 Hollow cone 역할을 하는 핀 구조를 가지며, (3)의 경우 스프링에 의해 일정 이상 압력이 가해짐으로써 유체가 분무 되는 구조이다.

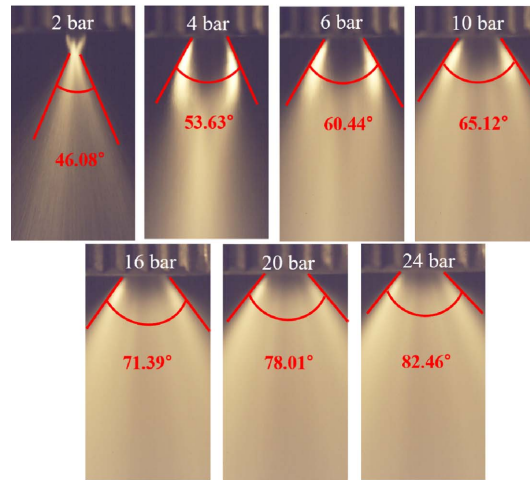
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 분무 이미지

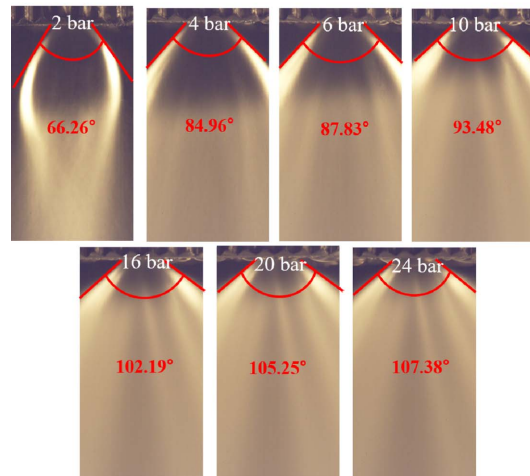
Figure 3, Table 2는 노즐 직경과 압력에 따른 분무 패턴을 확인하기 위한 이미지이다. 실험 조건은 압력조건 1에서 24 bar까지 실험을 진행하였고, 노즐로부터 200 mm 하류에서 분무 이미지를 촬영하였다. Fig. 3에서 분무 이미지를 확인한 결과 노즐 직경에 따라 최소



(a) Nozzle diameter 0.1 mm



(b) Nozzle diameter 0.2 mm



(c) Nozzle diameter 0.5 mm

Fig. 3 Spray images according to nozzle diameter

Table 2 Spray angles (°) according to pressure

Nozzle Diameter (mm)	Pressure (bar)						
	2	4	6	10	16	20	24
0.1	33.6	34.4	35.6	36.5	60.2	64.3	70.6
0.2	46.0	53.6	60.4	65.1	71.4	78.0	82.5
0.5	66.2	85.0	87.8	93.5	102.2	105.6	107.4

33.61°에서 최대 107.38°를 확인하였다. 또한, 노즐 직경이 커질수록 압력이 강할수록 분무 각은 큰 것을 확인하였다. 이를, Table 2에 나타내었다. 10 bar 이상의 압력 조건에서 노즐 직경 0.1, 0.2, 0.5 mm 모두 충분히 분무가 발달하였으며, 8 bar 이하의 압력조건에서는 노즐 직경 0.1, 0.2, 0.5 mm 모두 Fig 3의 2 bar 조건과 유사하게 불안정한 분무 패턴을 확인하였다. 이는, 유체가 일정한 분무로 발달하기에 충분한 운동량을 가지지 못함으로써 분무가 상대적으로 불안정하게 나타난다고 판단된다. 또한, 노즐 직경 0.1, 0.2, 0.5 mm의 경우 노즐 팁으로부터 분무가 충분히 발달하지 못하거나, 발달하더라도 낮은 수 농도가 나타남을 확인할 수 있는데 이는 노즐 내부의 선회 형상과 노즐 내부의 중심 핀으로 인해 디플렉터 노즐과 유사하게 분무 시 노즐 중심부로 유체가 충분히 공급되지 못해서 생성된 것으로 판단된다.

3.2 노즐 직경의 유체 압력조건에 따른 유량 및 SMD (Sauter Mean Diameter)

Figure 4는 실험에 이용된 노즐 직경의 압력에 따른 액체 유량에 대한 그래프이다. 실험 조건은 노즐 팁으로

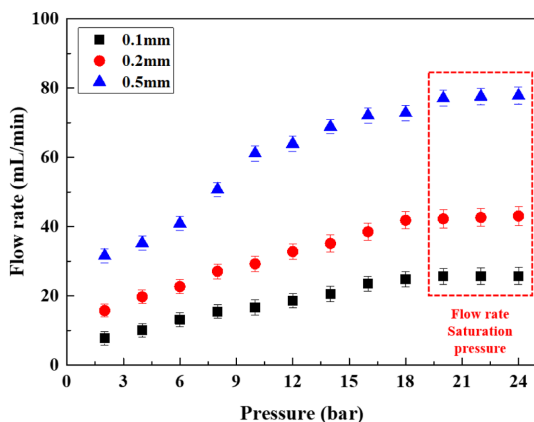


Fig. 4 Liquid flow rate according to pressure

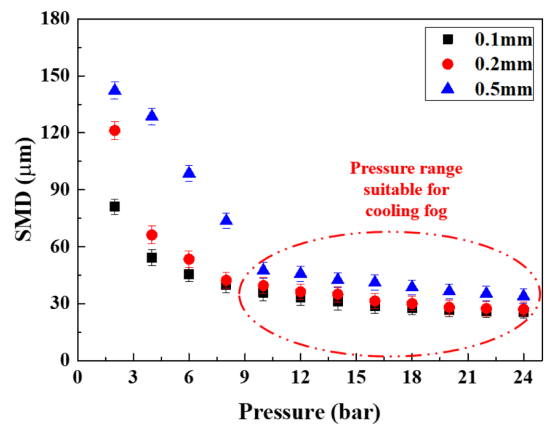


Fig. 5 SMD according to pressure different nozzle diameter

부터 하류 200 mm에서 측정하였다.

압력증가에 따라 3가지 직경의 노즐 모두 유량이 선형적으로 증가함을 확인하였고, 19 bar 이상의 압력조건에서는 압력증가에도 3가지 노즐 모두 유량이 수렴(Saturation)됨을 확인하였다. 또한, 노즐 직경이 작을수록 유량이 수렴하는 압력 범위가 넓어짐을 확인하였다.

Figure 5는 노즐 직경의 압력에 따른 SMD 그래프이다. 압력의 증가에 따라 3가지 직경의 노즐 SMD가 감소하는 것을 확인하였다. 분무 압력증가에 따라 액적은 외부에서 공기와의 전단력 증가에 의해 분열이 가속화된다. 그러나 9 bar 이상의 압력 이상에서는 노즐 오리피스 직경에 무관하게 SMD 수준이 수렴되는 현상을 보인다. 즉 9 bar 이하 압력에서는 노즐 오리피스 직경이 SMD 수준을 결정하는 변수로 작용하지만 9 bar 이상의 압력에서는 유의미한 변수로서 작용하지 못한다.

이에따라 선행연구 Murata 등<sup>(15)</sup>의 따라 콜링포그에 적합한 액적 크기 범위인 10~50 µm를 가지기 위해서는 본 실험에서 사용된 노즐 직경에 관계없이 안정적인 분무시스템을 운영하기 위해서는 분사 압력 범위를 10 bar

이상으로 분무해야할 필요가 있다.

3.3 축 방향 위치에 따른 압력 및 노즐 직경 SMD

Figure 6은 노즐의 축 방향(Y axis)에 따른 노즐 직경의 SMD 데이터이다. 노즐 직경이 클수록 SMD가 상대적으로 큰 것을 확인하였다. 또한, 노즐 직경 0.1 mm 기준으로 노즐 직경 0.2 mm는 평균 8.23% 노즐 직경 0.5 mm는 평균 34.93%가 큰 것을 확인하였다. 축 방향으로 증가할수록 SMD는 큰 것을 확인하였는데, 이는 노즐구조에서 확인할 수 있듯이 선화 분무 구조와 핀에 의해 노즐 팁에 저압 조건과 미세 액적이 형성되고 분무 하단으로 갈수록 상대적으로 큰 액적들이 저압 부분으로 이동함에 따라 축 방향 증가에 따라 액적이 크게 형성된다. 또한, 노즐 직경이 큰 경우 Y축 방향으로 상대적으로 먼 곳에서 수렴됨을 확인하였다.

Figure 7은 노즐의 축 방향에 따른 압력조건에 따른

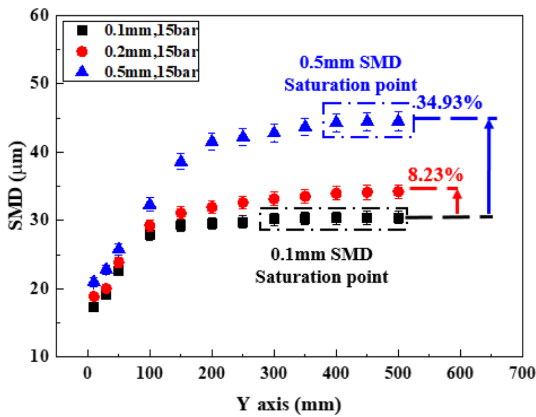


Fig. 6 SMD according to y axis different nozzle diameter

SMD 데이터이다. 압력이 증가할수록 평균 액적 크기는 작은 것을 확인하였다. SMD의 경우 가장 작은 20 bar 조건을 기준으로, 15 bar의 경우 평균 14.51%, 10 bar의 경우 41.87% 차이를 확인하였다. 또한, 큰 압력조건 20 bar에서 노즐의 축 방향으로부터 가까운 곳에서 SMD가 일정하게 유지됨을 확인하였다. 높은 압력의 경우 낮은 압력조건에 비해 상대적으로 속도(운동량)가 빠르게 저압인 Y축 방향으로 이동하게 된다. 이에, 압력이 큰 조건인 20 bar에서 노즐 팁으로부터 액적 크기가 수렴되는 거리가 짧아짐을 확인할 수 있다.

3.3 반경 방향 위치에 따른 압력 및 노즐 직경 SMD

Figure 8은 노즐의 반경 방향(X axis)에 따른 노즐 직경의 SMD 데이터이다. 측정 위치는 분무 하류 200 mm에서 측정하였다. 압력이 증가할수록 평균 액적 크기는 작음을 확인하였고, 반경 방향의 SMD는 노즐 직경 0.1 mm

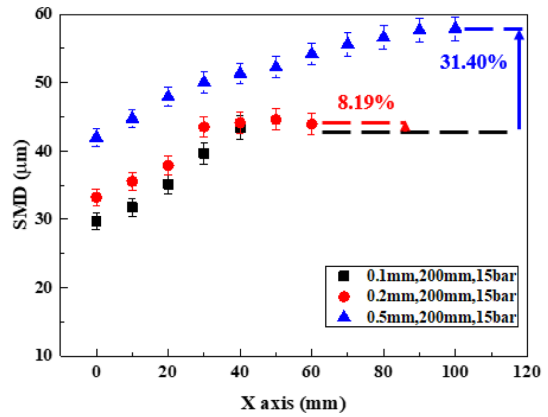


Fig. 8 SMD according to x axis different nozzle diameter

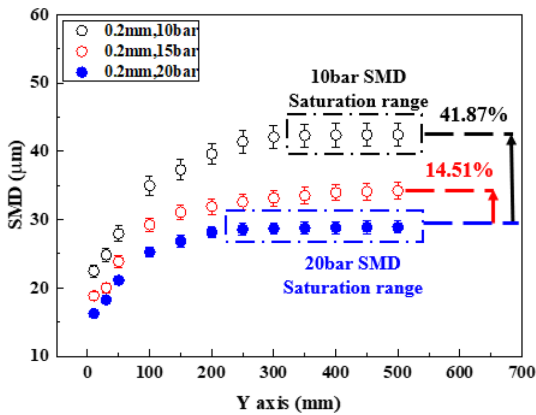


Fig. 7 SMD according to y axis different pressure

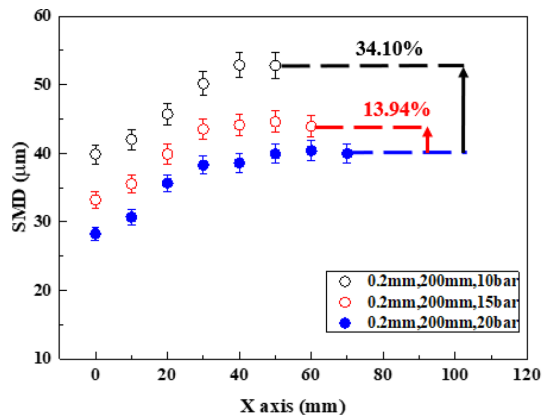


Fig. 9 SMD according to x axis different pressure

의 기준으로 0.2 mm는 +8.19%, 0.5 mm는 +31.40% 차이가 나타났다.

분무 반경의 경우 노즐 직경이 넓을수록 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3에서 노즐 직경에 따른 분무 각 차이에서 확인할 수 있다. 본 실험 조건의 노즐 직경 0.5 mm의 경우, 반경 40 mm 이상은 SMD가 50  $\mu$ m 이상으로 쿨링포그 노즐에 적합하지 않음을 확인하였다.

Figure 9는 노즐의 반경 방향에 따른 압력조건의 SMD 데이터이다. 측정 위치는 분무 하류 200 mm에서 측정하였다. 압력이 증가할수록 액적 크기가 작아지는 것을 확인하였고, SMD는 20 bar를 기준으로 15 bar는 13.94%, 20 bar는 34.10%를 확인하였다. 압력이 큰 경우 더 넓은 범위의 반경 방향의 SMD가 측정되었다.

Figure 8과 Fig. 9의 경우 반경 방향으로 갈수록 액적이 커지는 것을 확인하였는데, 이는 노즐구조 특성상 중심부의 선회 분무와 핀 형상의 영향에 의해 분무 중심부가 노즐 반경방향보다 상대적으로 낮은 압력을 가지며, 이로 인해 반경방향의 미세액적들이 분무 중심부로 이동하기 때문에 반경방향에 따른 SMD 차이를 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 F사의 쿨링포그 노즐의 분무 특성을 축방향과 반경방향에 대해 관찰하고, 평균액적크기를 통해 쿨링포그 노즐 적합성에 대해 실험적으로 확인하였다.

(1) 노즐 직경, 압력이 증가할수록 유량이 커짐을 확인하였고, 노즐 직경이 감소할수록 SMD의 경우 감소하는 것을 확인하였다. 운전 범위의 경우 10 bar 이상에서 실험에 사용된 노즐 모두 10~50  $\mu$ m의 SMD 범위를 갖는 것을 확인하였다.

(2) 노즐 직경, 압력이 증가할수록 분무 각이 큰 것을 확인하였고, 선회 분무와 핀에 의해 노즐 팁으로부터 Hollow cone 형상이 생성됨을 확인하였다.

(3) 노즐 팁의 축 방향에 따라 SMD는 증가함을 확인하였고, SMD의 수렴 범위는 노즐 직경이 작을수록 압력이 증가할수록 크다.

(4) 노즐 팁의 반경방향에 따라 SMD는 증가하는 것을 확인하였고, SMD는 노즐 직경이 작을수록 압력이 증가할수록 작다. 이는 Hollow cone이 형성되면서 분무 중심부의 압력이 반경방향보다 낮기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20204010600060), 또한, (주) 필터테크의 재원을 지원받아 수행한 연구과제입니다.

#### 참고문헌

- (1) F. Sultan, N. Ashgriz, D. R. Guildenbecher and P. E. Sojka, "Handbook of Atomization and Sprays", Springer, 2011.
- (2) H. Lefebvre and V. G. McDonell, "Atomization and Sprays, 2nd ed", CRC Press: Boca Raton, 2017.
- (3) S. Y. Lee, Atomization and Spray, Minumsa, 1996.
- (4) S. H. Shah, K. R. Pai, S. R. Shinde and B. N. Thorat, "Analysis of a Vapor Compression Refrigeration System using a Fog-Cooled Condenser", Applied Thermal Engineering, Vol. 196, 2021, 117229.
- (5) R. Ghosh, T. K. Ray and R. Ganguly, "Cooling Tower Fog harvesting in power plant—A pilot study", Energy, Vol. 89, 2015, pp. 1018~1028.
- (6) C. Guo, W. Nie, C. Xu, H. Peng, C. Zhang, S. Li, N. Yue, Z. Liu, S. Yang, Q. Ma and M. Li, "A Study of the Spray Atomization and Suppression of Tunnel Dust Pollution based on a CFD-based Simulation", Journal of Cleaner Production, Vol. 276, 2020, 123632.
- (7) J. Sánchez-Hermosilla, F. Páez, V. J. Rincón and Á. J. Callejón, "Evaluation of a Fog Cooling System for applying Plant-Protection Products in a Greenhouse Tomato Crops", Crop Protection, Vol. 48, 2013, pp. 76~81.
- (8) K. Rajmund, "Advantages of Water Fog Use as a Fire Extinguisher", Academic and Applied Research in Military and Public Management Science, Vol. 14, No. 2, 2015, pp. 259~264.
- (9) P. E. Santangelo, "Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, No. 8, 2010, pp. 1353~1366.
- (10) Z. Wang, W. Wang and Q. Wang, "Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 44, 2016, pp. 626~632.
- (11) C. N. Huang and Y. H. Ye, "Development of a water-mist cooling system: A 12,500 Kcal/h air-cooled chiller",

- Energy Reports, Vol. 1, 2015, pp. 123~128.
- (12) Y. Hikosaka, M. Kanechi, M. Sato and Y. Uno, "Dry-fog Aeroponics Affects the Root Growth of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Greenspan) by Changing the Flow Rate of Spray Fertigation", *Environmental Control in Biology*, Vol. 53, No. 4, 2015, pp. 181~187.
  - (13) Z. Ning and K. Zhu, "Research on Prevention and Control Technologies of Harbor Pollution", 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, 2009, pp. 713~716.
  - (14) T. Cutts, S. Kasloff, D. Safronetz and J. Krishnan, "Decontamination of common healthcare facility surfaces contaminated with SARS-CoV-2 using peracetic acid dry fogging", *Journal of Hospital Infection*, Vol. 109, 2021, pp. 82~87.
  - (15) Y. Murata, Y. Kudo and M. Yonezawa, "Characteristics of a Dry Fog Ionizer", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 142, 2008, 012066.
  - (16) J. Krishnan, G. Fey, C. Stansfield, L. Landry, H. Nguy, S. Klassen and C. Robertson, "Evaluation of a Dry Fogging System for Laboratory Decontamination", *Applied Biosafety*, Vol. 17, No. 3, 2012, pp. 132~141.
  - (17) S. K. Chaulya, A. Chowdhury, S. Kumar, R. S. Singh, S. K. Singh, R. K. Singh, G. M. Prasad, S. K. Mandal and G. Banerjee, "Fugitive Dust Emission Control Study for a developed smart dry fog system", *Journal of Environmental Management*, Vol. 285, 2021, 112116.
  - (18) A. Arbel, O. Yekutieli and M. Barak, "Performance of a Fog System for Cooling Greenhouse", *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 72, No. 2, 1999, pp. 129~136.
  - (19) Kendaro, D. R. Handarto, M. Saukat, T. Herwanto and K. Pandiangan, "Enhancement of Droplets Quality for fog cooling system in a naturally-ventilated greenhouse using centrifugal and axial fans", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 542, 2020, 012032.
  - (20) A. Haeussermann, E. Hartung, T. Jungbluth, E. Vranken, J. M. Aerts and D. Berckmans, "Cooling effects and evaporation characteristics of fogging systems in an experimental piggery", *Biosystems Engineering*, Vol. 97, No. 3, 2007, pp. 395~405.
  - (21) V. Priedniece, V. Kirsanovs, M. Dzikēvičs, Ģ. Vīgants, I. Veidenbergs and D. Blumberga, "Experimental and analytical study of the flue gas condenser-fog unit", *Energy Procedia*, Vol. 158, 2019, pp. 822~827.
  - (22) H. Toida, T. Kozai, K. Ohyama and Handarto, "Enhancing Fog Evaporation Rate using an Upward Air Stream to improve Greenhouse Cooling Performance", *Biosystems Engineering*, Vol. 93, No. 2, 2006, pp. 205~211.
  - (23) S. Buhl, A. Stich and C. Bulitta, "Dry fog disinfection as an alternative method for room decontamination", *Current Directions in Biomedical Engineering*, Vol. 7, No. 2, 2021, pp. 427~429.
  - (24) S. M. A. Najafi, P. Mikaniki and H. Ghassemi, "Microscopic and macroscopic atomization characteristics of a pressure-swirl atomizer, injecting a viscous fuel oil", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 1, 2020, pp. 9~22.
  - (25) M. Chaker, C. B. Meher-Homji and T. Mee III, "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines: Part B - Fog Droplet Sizing Analysis, Nozzle Types, Measurement and Testing", *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 4, 2002, pp. 429~441.
  - (26) S. Wadekar, A. Yamaguchi and M. Oevermann, "Large-Eddy Simulation Study of Ultra-High Fuel Injection Pressure on Gasoline Sprays", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 107, 2021, pp. 149~174.
  - (27) Y. Gao, X. Li, P. Chang and L. Liu, "Experimental Study on Deliquification with Atomizing Nozzle in Gas Well", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 555, 2020, 012127.
  - (28) E. Barakat, T. Jin, H. Wang, K. Hu and G. Wang, "Experimental and numerical study of fogging cooling performance through a cylindrical duct for a micro gas turbine", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 207, 2022, 118115.
  - (29) B. Chen, D. Gao, Y. Li, C. Chen, X. Yuan, Z. Wang and P. Sun, "Investigation of the droplet characteristics and size distribution during the collaborative atomization process of a twin-fluid nozzle", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, 2020, pp. 1625~1639.
  - (30) S. Li, C. Chen, Y. Wang, F. Kang and W. Li, "Study on the Atomization Characteristics of Flat Fan Nozzles for Pesticide Application at Low Pressures", *Agriculture*, Vol. 11, No. 4, 2021, 309.
  - (31) G. Gao, C. Wang and Z. Kou, "Experimental Studies on the Spraying Pattern of a Swirl Nozzle for Coal Dust Control", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 10, 2018, 1770.
  - (32) S. Mandato, E. Rondet, G. Delaplace, A. Barkouti, L.

- Galet, P. Accart, T. Ruiz and B. Cuq, "Liquids' atomization with two different nozzles: Modeling of the effects of some processing and formulation conditions by dimensional analysis", *Powder Technology*, Vol. 224, 2012, pp. 323~330.
- (33) J. Y. Kim, S. J. Lee and J. G. Hong, "Spray Mode and Monodisperse Droplet Properties of an Electrospray", *ACS Omega*, Vol. 7, No. 32, 2022, pp. 28667~28674.
- (34) J. Y. Kim, S. J. Lee, G. Y. Baik and J. G. Hong, "Effects of working fluids on spray modes and atomization characteristics in electrospray", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 38, 2021, pp. 61~68.
- (35) K. W. Ku, J. G. Hong and C. W. Park, "Effect of assist-air of twin fluid atomizer on urea thermal decomposition", *Atomization Sprays*, Vol. 25, 2015, pp. 895~915.