

수막설비용 노즐의 수력직경 변화에 따른 방사유량, 방사압 그리고 액적의 평균 크기 상관관계 분석

박정욱, 신연재, 유우준*
동양대학교 건축소방안전학과

Analysis of Correclations between Flow Rate, Pressure and Average Size of Droplet with Hydraulic Diameter of Water Curtain Nozzle

Jung Wook Park, Yeon Je Shin, Woo Jun You*
Division of Architecture & Fire Safety, Dong Yang University

요약 본 연구에서는 수막설비에 사용되는 워터커튼 노즐의 형상 인자 변화에 따른 분사압력과 방사유량 그리고 액적의 평균크기의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해서 노즐의 내부 직경과 폭을 변화한 총 5개(D5W3, D5W6, D5W8, D4W6 그리고 D7W6) 각각의 노즐을 제작하였으며, 액적 측정 실험 장치를 구성하여 노즐의 수력직경 변화에 따른 유량 계수와 액적의 분포 상수를 반복실험을 통하여 산출하였다. 그 결과 유량계수는 노즐의 직경과 폭이 증가함에 따라 수력직경의 0.79 지수승과 62.8의 상수값에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 평균 액적의 크기는 분사 압력의 -0.235 지수승의 크기로 감소하였다. 특히, 본 연구에서 정의한 액적의 분포상수는 수력 직경의 0.258 지수승과 244.21의 크기에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 동일 워터커튼 노즐에 대해서 분사압력의 크기가 증가할수록 평균 액적의 크기가 감소하는 것을 검증하였다. 본 연구 결과는 수막설비용 노즐의 형상 설계에 따른 유동 특성을 예측하기 위한 노즐의 분사압력, 방사유량 그리고 평균 액적크기의 설계 자료로 활용이 유용할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, the correlations between flow rate, exhaust pressure, and droplet mean diameter with the shape factor of a water curtain nozzle were investigated. To analyze the flow coefficient and the distribution constant on the effects of the hydraulic diameter, five nozzles (D5W3, D5W6, D5W8, D4W6, and D7W6) were mocked up with a consideration of the internal diameter and width. The results showed that the flow coefficient increased in proportion to the constant 0.79 and 62.8 of the hydraulic diameters according to the diameter. As the nozzle width increased, the average droplet size decreased to the -0.235 exponential of the pressure. The average volume was reduced, in which the size distribution of the volume indeterminate decreased with increasing pressure for the same nozzle of the water-curtain. The distribution constants of droplet increased in proportion to the 0.258 exponential of the hydraulic diameter and 244.21. These results are expected to be useful to the design of pressure, flow meter, and average droplet size from a water curtain nozzle to predict the flow characteristics.

Keywords : Nozzle, Water-Curtain, Flow-Rate, Droplet-Size, Hydraulic-Diameter, Shape-Factor

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2018R1C1B5045686)입니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Woo Jun You(Dong Yang University)

email: wjyou@dyu.ac.kr

Received February 3, 2020

Accepted April 3, 2020

Revised March 25, 2020

Published April 30, 2020

1. 서론

수막 설비는 방호 구역에서 화재가 발생하면 감지기 등에 의해서 화재 신호를 감지하여 열 및 연기를 차단하기 위한 설비이다[1-3]. 이러한 수막 설비는 가압송수장치, 배관, 화재감지장치 그리고 노즐 등으로 구성되어 있으며, 수막 설비의 성능은 화재가 발생한 경우 주변의 가연물로 열원이 확산되는 현상을 최소화하고 유독가스 및 연기를 효과적으로 차단하여 피난 흐름률을 높이는데 주요 목적이 있다[4-7]. 따라서 노즐에서 분사되는 액적의 유동 특성은 화재로 인해서 발생하는 열기를 냉각시킬 뿐만 아니라 화원에서 방사되는 복사강도의 효과를 감소시키고 연기를 차단하기 때문에 수막 설비의 성능을 연구하는 분야에서 가장 관심이 있는 주제 중 하나이다 [7-9].

수막설비에 관한 연구 사례로 R. Viskanta[5]는 복사 열전달 방정식에 의해서 액적의 크기 분포(Distribution), 액적의 크기(Droplet Size) 및 액적의 밀도 수(Number of Density)와 복사강도의 감소 효과를 정량적으로 분석하였으며, 액적의 밀도 수가 증가할수록 복사강도가 감소되는 크기를 산출하기 위한 관계식을 제시한 바 있다. FMRC(Factory Mutual Research Center)의 Heskestad[7]는 액적 크기, 노즐의 직경 그리고 분사압력의 상관관계를 분석하여, 표면장력에 대한 관성의 비를 나타내는 웨버 수(Weber)의 형태로 액적 크기에 관한 관계식을 제시하였다. W. Yang et al.[10]은 연소 생성물인 H₂O와 CO₂에 대해서 exponential wide band 모델을 two-flux 기법에 적용하여 액적의 크기 변화에 따른 복사 강도 감소 효과를 분석하여 액적의 크기와 액적 밀도 수에 따라서 복사열이 강하게 지배하고 있음을 나타내었다. 기존 연구 사례에서 보듯이 액적의 분포, 액적의 크기 및 밀도 수는 복사강도를 감소시키는 중요한 인자인 것을 확인할 수 있다. 특히, 노즐의 기하학적 형상에 따라서 액적의 유동 현상이 달라지기 때문에 노즐의 형상 조건은 수막설비의 성능을 결정해 주는 중요한 인자로 판단된다.

본 연구에서는 워터 커튼 형태로 분사되는 수막설비용 노즐의 형상 인자를 분석하여 유동 특성에 관한 기초 실험을 수행하였으며, 측정된 결과로부터 특성길이 및 분사 압력을 고려한 액적의 크기와 분사 유량에 관한 관계식을 제시하여 노즐 설계를 위한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험방법 및 결과

2.1 연구내용

Figure 1은 본 연구에서 제작한 노즐의 형상을 나타낸 것으로 Table 1에서 보듯이 내부 직경(D)의 크기가 5 mm인 경우 외부 폭(W)의 크기가 3 mm, 6 mm, 8 mm인 노즐과 외부 폭(W)의 크기가 6 mm인 경우 내부 직경(D)의 크기가 4 mm, 7 mm인 노즐 총 5개를 제작하였다.

노즐의 유량 곡선을 분석하기 위해서 베르누이 방정식(Bernoulli Equation)에 의한 유량과 압력차의 관계는 식(1)과 같다.

$$Q = C_{flow} \times \Delta P^n \quad (1)$$

여기서 Q , C_{flow} , ΔP 그리고 n 은 각각 체적유량, 유량 계수, 노즐의 입출구에서의 차압 그리고 지수상수를 의미한다. 노즐의 기하학적 형상이 유사한 경우 상온에서 액적 특성길이와 오리피스 형상 및 압력의 관계는 Heskestad[7]의 연구 결과에 따라서 식 (2)과 같다.

$$d \sim \Delta P^{-1/3} D_h^{2/3} \quad (2)$$

여기서 d , ΔP 그리고 D_h 는 각각 액적의 특성길이, 압력차 그리고 노즐의 직경을 각각 의미한다. 또한, 베르누이 방정식에 의해서 $\Delta P \sim U^2$ 의 관계를 이용하여 액적의 특성 길이와 노즐의 직경 비를 무차원 형태로 표현하면 식(3)과 같이 정리된다[7].

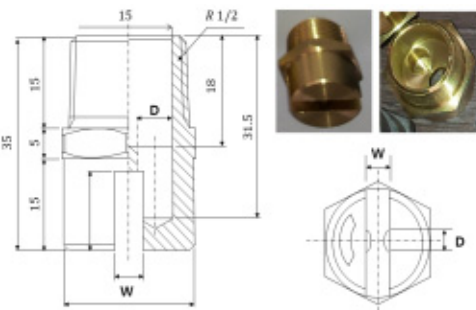


Fig. 1. The Figure and Schematic Diagram of the Water Curtain Nozzle.

Table 1. The Type and Size of the Water curtain nozzles

Type	D5W3	D5W6	D5W8	D4W6	D7W6
Dinner	5mm	5mm	5mm	4mm	7mm
Width	3mm	6mm	8mm	6mm	6mm

$$\frac{d}{D_h} = C \times We^{-1/3} \sim (\Delta P \times D_h)^{-1/3} \quad (3)$$

여기서 We 는 웨버 수를 의미하며 본 연구에서는 노즐의 형상 인자에 따른 액적의 평균 크기를 분석하기 위해서 구의 체적에 대한 표면적 비를 의미하는 SMD(Sauter Mean Diameter)을 사용하였으며, 오리피스 수력 직경 (Hydraulic Diameter)을 구한 후 액적의 평균직경의 관계를 분석하고자 한다.

2.2 실험장치 구성

Figure 2는 본 연구를 위해서 구성된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 물 입자 측정 장치는 HELOS VARIO 모델로 렌즈의 크기에 따라서 측정 거리 (working distance) 영역이 구분되어 있으며, 31개의

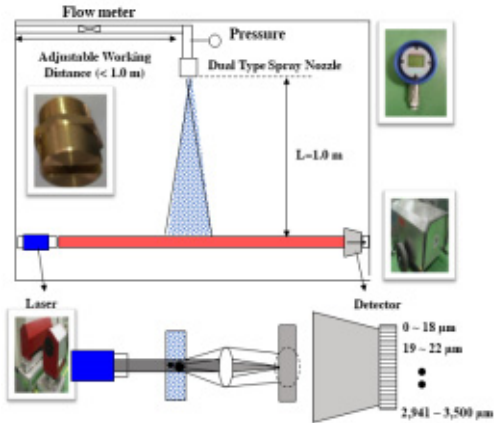


Fig. 2. Schematic diagram of the measurement apparatus for droplet size

Table 2. Specification of the experiment apparatus

Components	Specification
Test Chamber	• Size(3 × 3) m
Droplet Measure Equipment	HELOS VARIO • R7 Lens 0.1 μm ~ 3750 μm • (0.01~50) % Optical concentration Focal length 2.0 m • He-Ne laser 632 mm, 5mW • Working distance 1.132 mm • Measuring volume 600.7 cm ³
pressure	S301 Allsensor • (0 ~ 10.0) MPa • Accuracy ±(0.25 % of f.s.)
Flow Meter	UF801-P Ultra Flux • 1 mm/s ~ 45 m/s, Response Time 0.2 s • 8 mm ~ 1.0 m inner diameter • Accuracy ±(0.2 % + 3%f.s.)
Pump	W5201 DIBO • Range (0~20.0) MPa, (0~18.0) L/min

밴드(band) 구간에서 감쇄되는 빛의 회절 강도를 이용하는 원리로 실험장치 규격과 유량계, 압력 및 펌프의 사양을 Table 2에 나타내었다[11].

2.3 실험결과 및 분석

Figure 3는 본 연구에서 사용한 워터커튼 노즐의 형상을 이미지 측정에 의해서 나타낸 것으로 식 (4)의 수력 직경을 구하기 위한 주요 치수를 Table 3에 나타내었다.

$$D_h = \frac{4 \times Area}{Perimeter} \quad (4)$$

식(4)에서 Area와 Perimeter는 각각 유체가 유동의 수직방향으로 흐르는 단면적과 유체가 노즐에 인접하는 길이를 의미하며, Figure 3과 같은 조건에 의해서 식 (5) 과 식 (6)의 관계를 갖게 된다.

$$Area = \frac{1}{2} (r_{inner}^2 \theta - bh) \quad (5)$$

$$Perimeter = b + r\theta \quad (6)$$

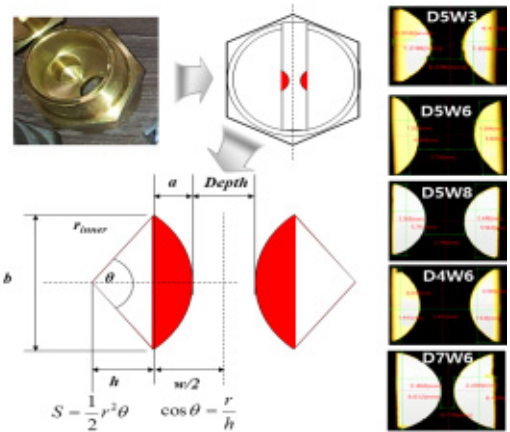


Fig. 3. Image Analysis of the Water Curtain Nozzle for Hydraulic Diameter.

Table 3. The Results of major dimensions of the Water curtain nozzles

Parameter	D5W3	D5W6	D5W8	D4W6	D7W6
D_{inner}	5.20	5.20	5.90	4.20	6.90
w	3.00	6.00	8.00	6.00	6.00
θ	113.10	121.19	158.63	145.97	143.65
a	1.17	1.32	2.40	1.49	2.37
h	1.43	1.28	0.55	0.61	1.08
b	4.37	4.57	5.88	4.39	6.54

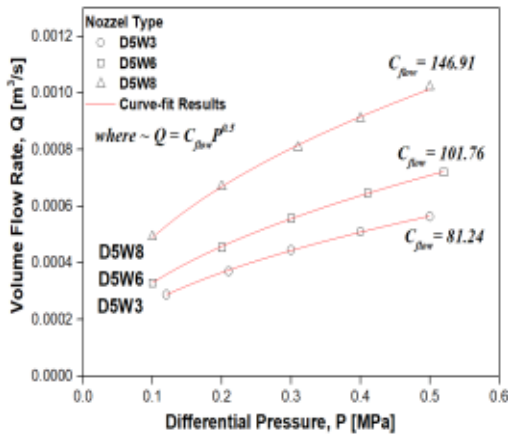


Fig. 4. The effects of the flow coefficients on the width of nozzle (W=3mm, 6mm and 8mm)

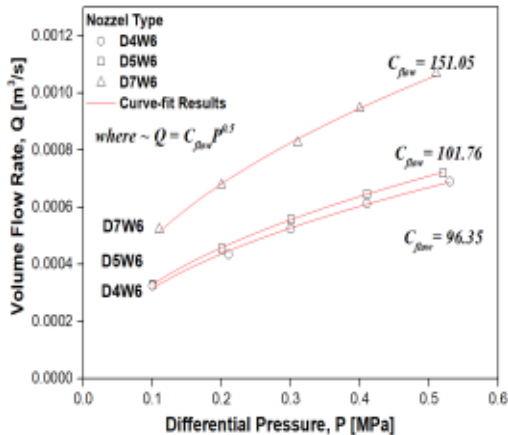


Fig. 5. The effects of the flow coefficients on the inner diameter of nozzle (D_{inner} =4mm, 5mm and 7mm)

여기서 h 는 삼각형의 높이로 $r_{inner} - a$ 이며, a 는 노즐의 제조 공정에서 따라서 결정되는 설계 값으로 식 (7)와 같은 관계를 갖고 있다.

$$a = \frac{w - Depth}{2} \quad (7)$$

Figure 4는 Table 3에서 노즐의 내부 직경(D_{inner})이 5 mm이고 노즐의 폭(w)을 3mm, 6mm, 그리고 8 mm로 가공한 노즐(D5W3, D5W6 그리고 D5W8)의 압력과 유량의 관계를 측정된 결과이다. 그림에서 보듯이 노즐의 폭이 증가할수록 유량계수의 값이 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 식 (1)의 형태로 곡선 접합한 결과 유량 계수($m^{3.5}/kg^{0.5}$)는 81.24, 101.76 그리고 146.91

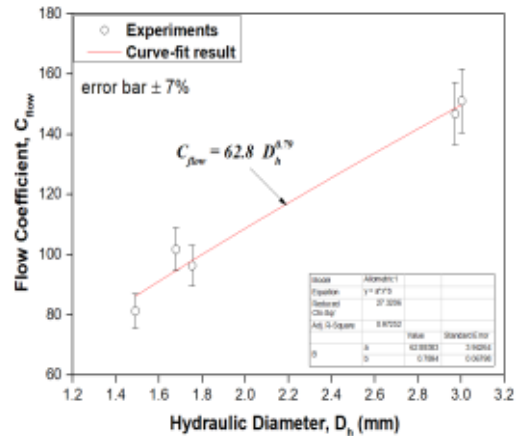


Fig. 6. The Curve-fit Results of the Flow Coefficient VS. Hydraulic Diameter.

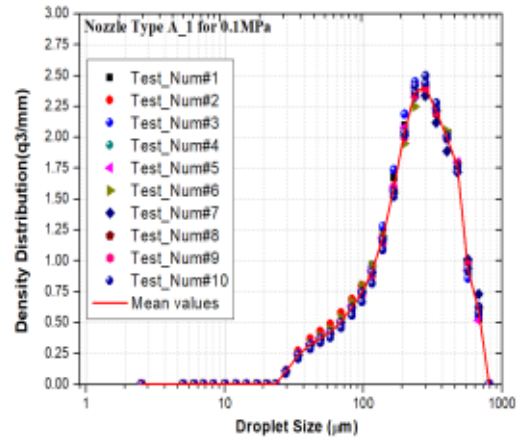


Fig. 7. The Repeated Measurement of the Droplet Distributions of Water Curtain.

로 나타났다.

Figure 5는 Table 3에서 노즐의 폭(w)이 약 6 mm이고 내부 직경(D_{inner})이 약 4 mm, 5 mm, 그리고 7 mm로 가공한 노즐(D4W6, D5W6 그리고 D7W6)의 압력과 유량의 관계를 측정된 결과이다. 그림에서 보듯이 노즐의 폭이 증가할수록 유량계수의 값이 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 식 (1)의 형태로 곡선 접합한 결과 유량 계수($m^{3.5}/kg^{0.5}$)는 96.35, 101.76 그리고 151.05로 나타났다.

Figure 6은 노즐 종류에 따른 Table 3의 수력직경 변화에 따라서 유량-압력 곡선 실험결과로부터 산출한 유량계수를 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 수력직경의 크기가 증가할수록 유량계수가 증가하게 되고 본 연구에

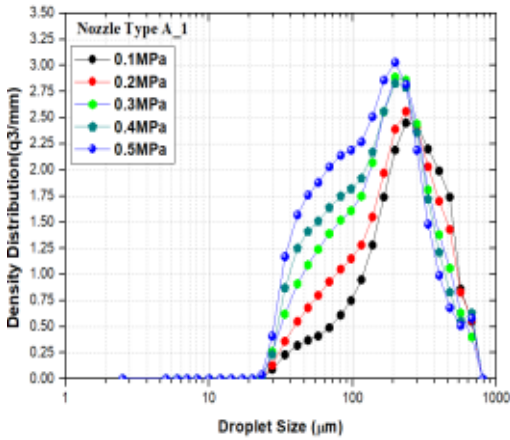


Fig. 8. The Effects of Droplet Distributions on the Spray Pressure of the Water Curtain Nozzle.

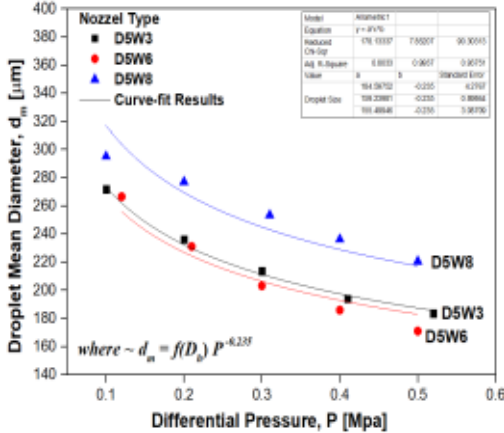


Fig. 9. Droplet Mean Diameter VS. Differential Pressure for (D5W3, D5W6 and D5W8).

서 사용한 워터커튼 노즐의 경우 ± 7 % 오차 범위에서 아래와 같은 경험식으로 산출되는 것을 확인할 수 있다.

$$C_{flow}(D_h) = 62.8 \times D_h^{0.79} \quad (8)$$

Figure 7은 분사 노즐(D5W6)에서의 압력이 0.1 MPa인 경우 워터커튼 노즐의 분사지점으로부터 1 m 아래에서 측정된 액적의 분포함수와 누적체적분포를 나타낸 결과이다. 본 연구에서 사용한 액적측정 장치는 레이저 회절에 의한 방식으로 10회/3s로 하여 동일 체적공간에서 분사된 크기를 산출하였으며, 그림에서 보듯이 분포함수의 형상은 왼쪽으로 치우친 형태로 나타났다. 액적의 분포 밀도는 최대 2.0 정도이며 액적의 크기가 300 μm ~ 600 μm 사이가 가장 많이 존재하는 것으로 나타났다.

Figure 8은 분사 노즐(D5W6)에 대해서 압력의 크기

Table 4. Summarized of the Analysis Results of the Water Curtain Nozzle

Parameter	D5W3	D5W6	D5W8	D4W6	D7W6
Area [mm ²]	3.54	4.23	10.44	4.27	11.40
Peri. [mm]	9.50	10.07	14.04	9.74	15.19
D _h [mm]	1.49	1.68	2.97	1.75	3.00
C _{flow} [m ^{3.5} /kg ^{0.5}]	81.24	101.76	146.91	96.35	151.05
f(D _h) [-]	263.84	273.55	317.12	297.06	328.49

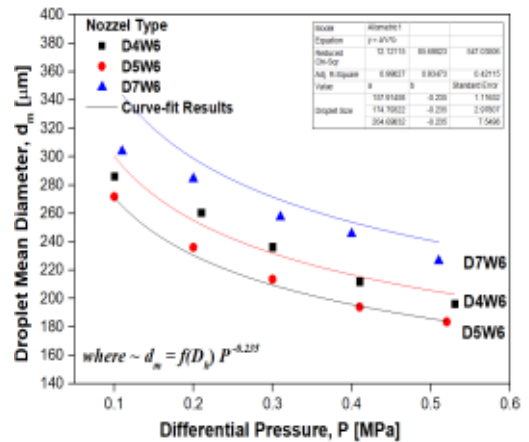


Fig. 10. Droplet Mean Diameter VS. Differential Pressure for (D4W6, D5W6 and D7W6).

가 약 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 그리고 0.5 MPa인 각각의 경우 10회씩 측정된 분포함수의 크기를 나타낸 결과이다. 분사 압력의 크기가 증가하면 더욱 미립화된 액적이 만들어 지므로 작은 크기의 액적 크기 그래프가 왼쪽으로 치우치게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Heskestad[7]의 연구 결과와 일치하고 있다. 따라서, 최종 노즐의 수력 직경(D_h), 분사압력(ΔP), 유량계수(C_{flow}) 및 평균액적의 크기(d_m)를 분석하기 위해서 Schematic Diagram of the Water Curtain Nozzle 식 (4)로부터 수력직경에 따른 분포상수(f(D_h))를 식 (9)와 같이 정의하여 상관관계 검토하였다.

$$d_m = f(D_h) \times \Delta P^m \quad (9)$$

Figure 9과 Figure 10은 분사압력 변화에 따른 평균액적의 크기를 분석한 결과로 동일 노즐에 대해서 분사

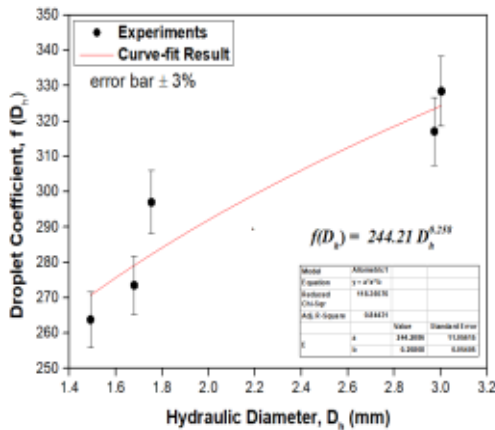


Fig. 11. Droplet Coefficient VS. Hydraulic Diameter.

압력의 크기가 증가할수록 -0.235 지수승으로 평균 액적의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, D4W6의 경우를 제외하고 수력 직경이 증가할수록 노즐 입구에서 액적의 충돌로 인해서 미립화되는 평균 액적의 크기가 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. D4W6의 경우 반복 시험에 의한 데이터의 편차가 가장 크게 나타났기 때문에 사료된다. 본 연구에서 사용한 워터커튼 노즐의 형상에 대해서 내부 직경 및 폭의 변화에 따라서 수력직경(D_h), 분사압력(ΔP), 유량계수(C_{flow}) 및 평균액적의 크기(d_m)를 측정 및 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Figure 11은 식 (9)에서 액적의 분포상수($f(D_h)$)를 산출한 결과를 나타낸 것으로 D4W6의 결과를 제외하고 오차범위 $\pm 3\%$ 이내에서 식(10)의 값이 잘 일치하는 것을 나타내고 있다. 즉, 워터커튼 노즐의 수력직경이 결정된 경우 식 (4)에 의해서 유량계수가 결정되기 때문에 분사압력과 방사유량을 예측할 수 있으며, 식(10)에 의해서 평균 액적의 크기가 예측 가장한 것으로 판단된다.

$$f(D_h) = 244.21 \times D_h^{0.258} \quad (10)$$

3. 결론

본 연구에서는 수막설비에 사용하는 워터커튼 노즐의 형상인자 변화를 고려한 수력직경(D_h), 분사압력(ΔP), 유량계수(C_{flow}) 및 평균액적의 크기(d_m)의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해서 노즐의 내부 직경(D_{inner})과 폭(w)을 변화한 총 5개의 노즐(D5W3, D5W6, D5W8,

D4W6 그리고 D7W6)을 제작하였으며, 분사압력 변화에 따라서 유량과 분포함수 및 액적의 크기를 산출하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 워터커튼 노즐의 형상을 분석하여 유량계수를 산출한 결과 노즐의 직경과 폭이 증가함에 따라서 비례하여 증가하였으며, 본 연구에서 정의한 수력직경의 0.79 지수승과 62.8 상수값을 갖고 증가하는 것으로 나타났다.

둘째, 동일 워터커튼 노즐에 대해서 분사압력 변화에 따른 액적의 크기 분포를 분석한 결과 분사 압력의 크기가 증가할수록 액적의 크기 분포가 미립화된 왼쪽 방향으로 치우치게 기존 문헌[7] 결과와 같이 평균 액적의 크기가 감소하는 것을 검증하였다.

셋째, 수력직경 변화에 따른 액적의 크기분포를 분석한 결과 평균 액적의 크기는 분사압력의 -0.235의 지수승의 크기로 감소하는 것으로 나타났으며, 분포상수는 수력직경의 0.258 지수승과 244.21의 크기에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구의 결과로부터 노즐의 형상 설계에 따른 분사압력, 방사 유량 그리고 평균 액적크기의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

References

- [1] J. G. Quintiere, "Fundamentals of fire phenomena", p.439, John Wiley & Sons, 2006, pp.439
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0470091150>
- [2] N. Semenov, "Chemical Kinetics and Chain Reactions", p.480, Oxford, 1935, pp.480
DOI: <https://doi.org/10.1038/151185a0>
- [3] D. A. Frank-Kamenetskii, "Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics", p. 370, Princeton, pp. 370
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/9781400877195>
- [4] S. Arrhenius, "On the reaction velocity of the inversion of cane sugar by acids", Zeitschrift fur physikalische Chemie, Vol.4, pp. 226ff, 1889.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-012344-8.50005-2>
- [5] R. Viskanta, C. C. Tseng, "Spectral radiation characteristics of water sprays", *Combustion Theory and Modelling*, Vol.11, No.1, pp.113-125, Feb. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1080/13647830600823175>
- [6] H. Kung, "A Mathematical Model of Wood Pyrolysis", *Combustion and Flame*, Vol.18, No.2, pp. 185-195, Apr. 1972.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180\(72\)80134-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(72)80134-2)
- [7] G. Heskestad, "Scaling the interaction of water sprays and flames", *Fire Safety Journal*, Vol.37, No.6, pp.535-548, Sep. 2002.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00012-7)

- [8] F. Tamanini, "A Numerical Model for One-Dimensional Heat Conduction with Pyrolysis in a Slab of Finite Thickness", in Appendix A of Factory Mutual Research Corporation Report No. 21011.7, Factory Mutual Research, USA.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(79\)80103-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(79)80103-4)
- [9] W. Yang, T. Parker, H. D. Ladouceur, R. J. Kee, "The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression", *Fire safety journal*, Vol.39 No.1 pp.41-66, Feb. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2003.07.001>
- [10] W. J. You, H. S. Ryou, "Development and application of a simplified radiative transport equation in water curtain systems", *Fire Safety Science*, Vol. 96, pp.124-133, Mar. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.002>
- [11] W. J. Parker, "Prediction of the Heat Release Rate of Douglas Fir", *Proceedings of the Second International Symposium*, Fire Safety Science, New York, pp.337-346, 1989.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.2-337>
- [12] K. B. McGrattan, R. J. McDermott, C. G. Weinschenk, G. P. Forney, "FDS Technical Reference guide", p.309, NIST, 2013, Sixth Edition, pp.309
DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1018>

박 정 욱(Jung Wook Park)

[준회원]



- 2013년 3월 ~ 2019년 2월 : 동양대학교 건축소방안전학과 (건축소방안전학학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 동양대학원 건축소방안전공학과 (건축소방안전공학석사)

<관심분야>

열역학, 화재공학

신 연 제(Yeon Je Shin)

[준회원]



- 2020년 2월 : 동양대학교 건축소방안전학과 (건축소방안전학학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 동양대학원 건축소방안전공학과 (건축소방안전공학석사)

<관심분야>

열전달, 화재공학

유 우 준(Woo Jun You)

[정회원]



- 2007년 12월 ~ 2016년 6월 : 한국 연구소 시험인증 및 연구
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 건축소방안전학과 교수

<관심분야>

다공성 매질의 열전달 현상 및 가연물의 연소 특성 분석