



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

단일유체노즐의 미분무 분사 조건이
열복사 감쇠에 미치는 영향에 대한
실험적 연구



2023년 2월

부경대학교 산업대학원

소방공학과

박지호

공 학 석 사 학 위 논 문

단일유체노즐의 미분무 분사 조건이
열복사 감쇠에 미치는 영향에 대한
실험적 연구

지도교수 이 치 영

이 論 文 을 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 提 出 함

2023년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

소 방 공 학 과

박 지 호

이 논문을 박지호의 공학석사
학위논문으로 인준함

2023년 2월 17일



주 심 공학박사 전 준 호



위 원 공학박사 최 준 호



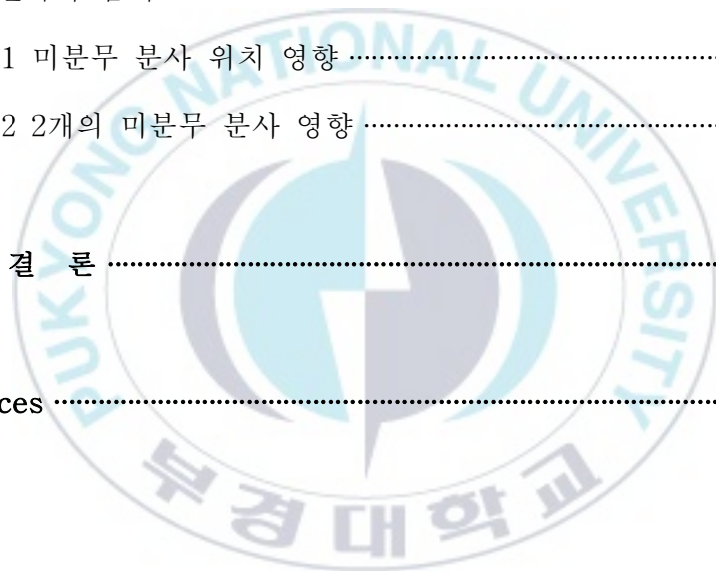
위 원 공학박사 이 치 영



목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 기존 연구 동향	5
1.3 연구 범위 및 목적	9
제 2 장 실험 세부 내용	10
2.1 실험 장치	10
2.1.1 단일유체노즐	10
2.1.2 미분무 특성 측정 실험 장치	12
2.1.3 열복사 감쇠 측정 실험 장치	15
2.2 실험 조건	18
2.3 실험 방법 및 결과 처리 방법	19
2.3.1 미분무 특성 측정 실험 방법	19
2.3.2 열복사 감쇠 측정 실험 방법	20
2.3.3 열복사 감쇠 측정 결과 처리 방법	22

제 3 장 실험 결과 및 분석	24
3.1 미분무 특성	24
3.1.1 물 공급 압력	24
3.1.2 액적 크기	26
3.1.3 액적 속도	32
3.1.4 가시화	37
3.2 열복사 감쇠	40
3.2.1 미분무 분사 위치 영향	40
3.2.2 2개의 미분무 분사 영향	45
제 4 장 결 론	50
References	54



List of Tables

Table 1.1. Existing research data on the heat radiation attenuation of mist water ·	8
Table 3.1 Average value and standard deviation of VMD and SMD distribution for Two_Spray and One_Spray of S_Nozzle and L_Nozzle	31
Table 3.2 Average value and standard deviation of velocity for One_Spray and Two_Spray of S_Nozzle and L_Nozzle	36
Table 3.3 Average value and standard deviation of heat flux and attenuated heat, attenuation rate for Location_SS and Location_HS of S_nozzle and L_nozzle ···	44
Table 3.4 Average value and standard deviation of heat flux and attenuated heat, attenuation rate for One_Spray_Sum and Two_Spray of S_nozzle and L_nozzle	49

List of Figures

Figure 1.1 Applications of thermal radiation attenuation by water spray and water curtain.	3
Figure 1.2 Schematic of thermal radiation attenuation by water mist.	4
Figure 2.1 Photos of nozzle for water mist.	11
Figure 2.2 Schematic of experimental setup for water mist characteristics measurement.	13
Figure 2.3 Photo of experimental setup for water mist characteristics measurement.	14
Figure 2.4 Schematic of experimental setup for thermal radiation attenuation measurement.	16
Figure 2.5 Photo of experimental setup for thermal radiation attenuation measurement.	17
Figure 2.6 Photo of thermal imaging camera	21
Figure 2.7 Exemplified temporal variation of measured heat flux (e.g, nozzle type = L_nozzle, water flow rate = 400 g/min).	23
Figure 3.1 Water supply pressure of S_Nozzle and L_Nozzle..	25
Figure 3.2 Droplet size of water mist for S_nozzle and L_nozzle for One_Spray ·	27
Figure 3.3 Droplet size of water mist for Two_Spray and One_Spray for	

S_nozzle.	29
Figure 3.4 Droplet size of water mist for Two_Spray and One_Spray for L_nozzle.	30
Figure 3.5 Droplet velocity of water mist for S_nozzle and L_nozzle for One_Spray.	33
Figure 3.6 Droplet velocity of water mist for Two_Spray and One_Spray.	35
Figure 3.7 Visualization of discharged water mist for S_nozzle(left: One_Spray&Location_CS, center: Two_Spray, right: One_Spray&Location_CH).	38
Figure 3.8 Visualization of discharged water mist for L_nozzle(left: One_Spray&Location_CS, center: Two_Spray, right: One_Spray&Location_CH).	39
Figure 3.9 Effect of water mist nozzle location on thermal radiation on heat flux for One_Spray.	42
Figure 3.10 Effect of water mist nozzle location on thermal radiation attenuation for One_Spray.	43
Figure 3.11 Heat flux of water mist discharged from two nozzles.	47
Figure 3.12 Thermal radiation attenuation of water mist discharged from two nozzles.	48

Experimental Investigation on Effect of Water Mist Spray Condition of
Single-fluid Nozzle on Thermal Radiation Attenuation

Ji Ho Park

Department of Fire Protection Engineering,
The Graduate School of Industry,
Pukyong National University

Abstract

In this study, the effect of water mist spray condition on thermal radiation attenuation was experimentally investigated. Two types of single-fluid nozzles were used to generate the water mist. To investigate the characteristics of water mist, the water supply pressure was reported, and the droplet size and droplet velocity of water mist sprayed from one and two nozzles were measured with the visualization of water mist. Then, the effects of nozzle installation location and water mist sprayed from two nozzles on the thermal radiation attenuation (i.e., measured heat flux, attenuated heat flux, and attenuation rate) were measured. Based on the measurement data of water mist characteristics, the general trends of thermal radiation attenuation were analyzed in detail.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

미분무는 일반적으로 액적은 입자 직경이 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 에어로졸(aerosol)과 액적 직경이 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 의 안개(fog)의 형성된 것을 의미⁽¹⁾하며, 국외의 NFPA(National fire protection association) 및 국내의 NFSC (National fire safety code)는 미분무를 노즐에서 분사하는 액적 중 99 %의 누적체적분포(cumulative volumetric distribution)를 각각 $1000\ \mu\text{m}$ 와 $400\ \mu\text{m}$ 이하로 정의하고 있다⁽²⁻³⁾.

최근 대중적인 화재 진압 방법은 화재의 확산을 방지하고 이로 인한 피해를 최소화하는 것을 목표로 하고 있다⁽⁴⁾. 미분무소화설비(water mist systems)는 소화 시 적은 양의 물이 소요되고, 수손 피해를 줄이는 장점⁽⁵⁾이 있다. 또한 유류 화재에 적응성이 있어 다량의 인화성 물질을 취급하는 시설의 화재 방호 설비로 활용되고 있다. Figure 1.1에 다량의 인화성 물질을 저장 및 취급하는 대형 위험물 시설의 물분무(water spray)와 수막을 이용한 방호설비를 나타내었다. 한편, 물분무 및 미분무소화설비는 액적 크기가 작아 부력을 이기고 화원 심부로 침투하는 비율이 낮고, 소화수의 이물질이 노즐의 분사구를 막아 비정상적으로 분사될 우려가 있다.

다량의 인화성 물질을 취급하는 대형 위험물 시설에서는 화재 발생 시 주변의 위험물 시설로 급격하게 화재가 확산 될 수 있으며, 이는 화재 확산의 주요 원인 중 하나인 열복사⁽⁶⁻⁹⁾ 때문이다. 이와 관련된 사고 사례로, 영국 번스필드(Buncefield)에서 원유저장 터미널(terminal)의 화재 폭발 발

생으로 인해 주변 22기의 탱크(tank)로 화재가 확산되었고, 인도 자이푸르(Jaipur)에서 대규모 저장 탱크로 휘발유를 이송 중 배관에서 대량의 휘발유 누출로 인한 화재 폭발로 주변 12기의 탱크로 화재가 확산된 사고가 있었다⁽¹⁰⁻¹¹⁾. 이와 같은 사고는 화원과 주변 보호 대상물 사이에 수막(water curtain)을 형성시켜 화재 확산을 막을 수 있다. 즉, 화원과 주변 보호 대상물 사이에 미분무에 의해 생성된 물 액적에 의하여 열복사가 흡수 및 산란되므로 열복사 감쇠 효과가 발생한다⁽¹²⁻¹⁶⁾. Figure 1.2에 미분무에 의한 열복사 감쇠 개략도를 나타내었다.

미분무의 미립화기는 다양한 방식이 존재하며, 일반적으로 외부의 에너지원에 따라 압력에너지, 기체에너지, 원심력에너지, 역학적 에너지, 전기에너지, 열에너지 분류된다. 그중 압력에너지에 의한 미립화가 가장 많이 사용되고 있다. 액체에 압력을 가하여 액체가 압력에너지에 의하여 노즐의 오리피스를 통과하면서 압력 저하가 운동에너지로 변하여 노즐의 오리피스에서 액류(liquid jet) 또는 액막(liquid sheet)상의 액체가 고속으로 분출되어 대기의 기체와 큰 상대속도에 의해 분열되면서 액적이 생성된다⁽¹⁷⁾. 이에 보다 다양한 미분무 분사 및 물 액적 특성에 의한 열복사 감쇠 효과에 관한 연구를 수행할 필요가 있다.



(a) Hazardous material storage tank



(b) Hazardous material manufactory

Figure 1.1 Applications of thermal radiation attenuation by water spray and water curtain.

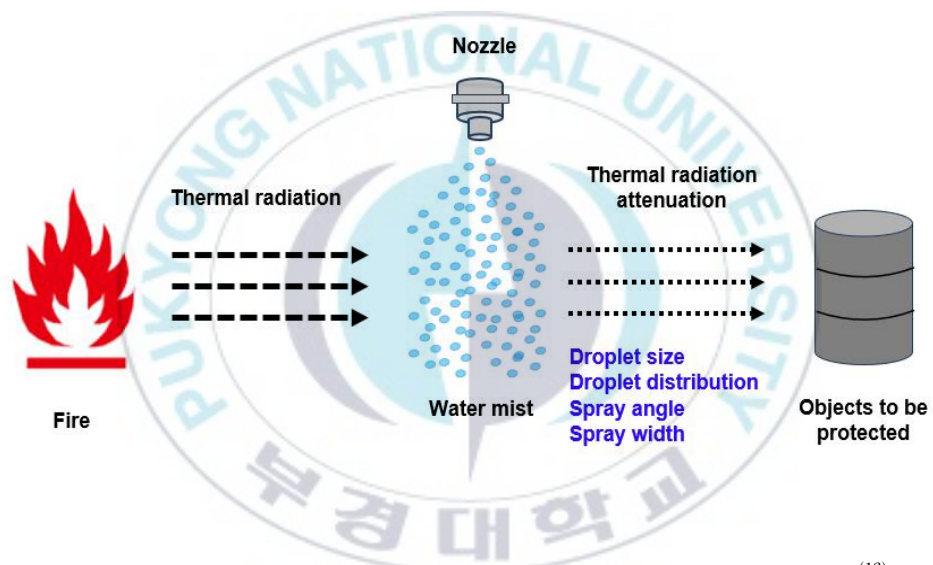


Figure 1.2 Schematic of thermal radiation attenuation by water mist⁽¹⁶⁾.

1.2 기존 연구 동향

기존에 미분무 분사에 의한 열복사 감쇠 연구는 크게 미분무 분사 조건(노즐의 종류, 오리피스 직경, 물 공급 유량)에 따른 열복사 감쇠 효과와 미분무 분사 특성(액적 크기, 액적 속도, 분무폭 등)이 열복사 감쇠에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, 이를 전산시뮬레이션(numerical simulation)을 통하여 검토한 연구로 구분할 수 있다.

미분무 분사 조건에 따른 열복사 감쇠에 관한 연구는 다음과 같다. Cheung⁽¹⁸⁾은 드렌처헤드(drencher head)에서 분사된 수막(water curtain)의 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하였다. 물 공급 압력과 유량이 증가할수록 열복사 감쇠율이 증가하였고, 오리피스(orifice) 직경이 작은 노즐이 큰 노즐보다 더 미세한 액적을 생성하기 때문에 열복사 감쇠율이 증가한다고 보고하였다. Murrell 등⁽¹⁹⁾은 4가지의 노즐(nozzle)을 이용하여 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하여 물 공급 압력이 증가할수록 물 공급 유량은 증가하고, 액적 크기는 감소하기 때문에 열복사 감쇠율이 증가한다고 보고하였다. Balner와 Barcova⁽²⁰⁾는 5가지의 노즐을 이용하여 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 직경이 더 큰 오리피스의 노즐이 더 큰 액적을 분사하더라도 증가된 물 공급 유량과 액적의 분무폭에 의하여 열복사 감쇠율은 증가한다고 보고하였다. Chow 등⁽²¹⁾은 3가지의 드렌처헤드에서 분사된 수막을 통하여 열과 연기, 유독가스의 차단 효과(blocking effect)에 대한 실험을 수행하였다. 드렌처헤드에서 분사되는 수막에 기공들(air voids)이 존재하여 연속된 층이 아니며, 이에 열복사 감쇠 효과는 있으나, 연기와 유독가스는 차단할 수 없다고 보고하였다. Lee 등⁽¹⁵⁾은 드렌처헤드에서 분사된 수막의 유동 특성 및 열복사 감쇠 효과는 오리피스 출구와 반사판 간 거리와 반사판의 직경이 열복사 감쇠에 미치는

영향이 크며, 액적 크기의 변화가 열복사 감쇠에 미치는 영향은 크지 않다고 보고하였다. Jo와 Lee⁽²²⁾는 2가지의 2유체미립화기를 이용하여 미분무의 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 물 공급 유량이 증가할수록 수막 내 미분무의 액적 개수 및 표면적, 액적 밀도가 증가하여 열복사 감쇠율이 증가하였다. 또한, 공기 공급 유량이 증가할수록 수막 내 미분무의 액적 개수 및 표면적이 증가하고, 액적의 체류시간도 증가하기 때문에 열복사 감쇠율이 증가한다고 보고하였다. Kang과 Lee⁽²³⁾는 단일유체노즐에서 분사한 미분무의 축방향 위치에 따른 액적 크기 및 분무폭에 대한 열복사 감쇠 효과 실험을 수행하였다. 실험 결과, 하나의 노즐로부터 분사된 미분무의 축방향 위치 조건이 변화함에 따라 액적 크기와 분무폭이 변화하였고, 이때 액적 크기의 변화보다 분무폭의 변화가 열복사 감쇠 효과에 미치는 영향이 크다고 보고하였다. Table 1.1에 열복사 감쇠 효과 실험에 대한 기존 연구 데이터(data)를 나타내었다.

미분무 분사 특성에 관한 연구는 다음과 같다. Voytkov 등⁽⁴⁾은 PIV(particle image velocimetry) 및 SP(shadow photography)를 이용하여 액적 크기 및 액적 속도에 대한 열복사 감쇠 효과 실험을 수행하였다. 실험 결과, 수막의 물 공급 유량이 $0.5 \sim 1 \text{ L/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 경우 액적 크기가 $0.15 \sim 0.6 \text{ mm}$ 보다 작으면, 산란된 열복사로 인하여 열복사 감쇠율이 원래 값의 $1/2$ 또는 $1/3$ 로 감소한다고 보고하였다. Chong과 Hochgreb⁽²⁴⁾는 PDA(phase Doppler anemometer)를 이용하여 공기의 내부 혼합 소용돌이에 대한 분사의 구조적 특성에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과, 액적은 소용돌이에 의하여 원심분리 되며, 액적 속도는 액적 크기와 반비례하는 상관관계가 있다고 보고하였다. Shrigondekar 등⁽²⁵⁾은 노즐을 통하여 미분무 분사 특성에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과, 분무폭은 레이놀즈 수(Reynolds number)가 증가할수록 감소하고, 액적 속도는 레이놀즈 수가

증가할수록 증가하였다. 또한, 노즐로부터 축방향 거리가 증가할수록 액적 속도는 감소한다고 보고하였다.

또한, 미분무 분사에 관한 전산시뮬레이션 연구는 다음과 같다. Ko⁽²⁶⁾는 Murrell 등⁽¹⁹⁾의 실험을 바탕으로 FDS(fire dynamics simulator)를 이용하여 미분무의 액적 크기, 물 공급 유량, 분무폭 등의 조건에 따른 열복사 감쇠 특성을 검토하였다. 전산시뮬레이션 결과, 물 공급 유량이 증가할수록 미분무의 액적 속도는 빠르고 액적 크기가 작아진다고 보고하였다. 또한, 미분무의 액적 크기가 작을수록, 분무폭이 클수록 열복사 감쇠 효과가 증가한다고 분석하였다.



Table 1.1 Existing research data on the heat radiation attenuation of mist water

Author	Nozzle	Flow rate	Pressure	Fire or Heat	Average attenuation (%)
Cheung (2009)	Drencher head 3/8"	-	4~6 bar	160 kW	47.40~69.67
		-		41 kW	36.00~52.76
		1.02~1.30 l/s	-	41 kW	31.82~59.15
Murrell et al. (1995)	A_full-cone	350~1,000 ml/min	1~8 bar	900 °C	2.8~13.9
	B_full-cone	1,400~3,250 ml/min			3.6~14.9
	C_hollow-cone	1,200~3,250 ml/min			8.2~30.7
	D_full-cone	2,600~7500 ml/min			6.1~35.5
Balner and Barcova (2018)	Orifice_100 μm	-	-	4.8 kW	0.687~0.721 (kW/m ²)
	Orifice_150 μm				0.502~0.567(kW/m ²)
	Orifice_200 μm				0.821~0.893(kW/m ²)
	Orifice_300 μm				0.909~0.916(kW/m ²)
	Orifice_500 μm				0.917~1.038(kW/m ²)
Chow et al. (2011)	A_orifice_8mm	1.49 L/s	5.0 bar	846 s (fire duration)	72.7
	B_orifice_13mm	1.70 L/s	0.8 bar	947 s (fire duration)	68.1
	C_orifice_5.2mm	0.83 L/s	9.7 bar	722 s (fire duration)	75.6
Kang and Lee (2022)	Single-fluid nozzle	200~350 g/min	251~810 kPa	1.01 kW/m ²	12.4~30.1
Jo and Lee (2021)	Twin-fluid nozzle (Small atomizer)	36~105 g/min (water) 10~30 L/min (air)	-	5.0 kW/m ²	6.1~11.9
	Twin-fluid nozzle (Large atomizer)	37~300 g/min (water) 20~60 L/min (air)	-		5.2~14.6

1.3 연구 범위 및 목적

대부분의 기존 연구에서는 노즐의 위치를 단일 지점으로 설정하여 미분무 분사가 열복사 감쇠에 미치는 영향을 검토하였고, 2개의 노즐에서 분사되는 미분무가 열복사 감쇠에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 것으로 파악되었다. 또한, 2개의 노즐에서 분사되는 미분무의 상호 작용에 따라 미분무 특성이 변화할 수 있고, 이러한 미분무의 특성 변화가 열복사 감쇠 성능에 영향을 미칠 수 있다. 그리고 실제 위험물 시설에는 화재 확산을 방지하기 위하여 다수의 노즐이 설치될 수 있다. 이러한 상황을 전반적으로 고려할 때, 2개의 노즐에서 분사되는 미분무 특성이 열복사 감쇠 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

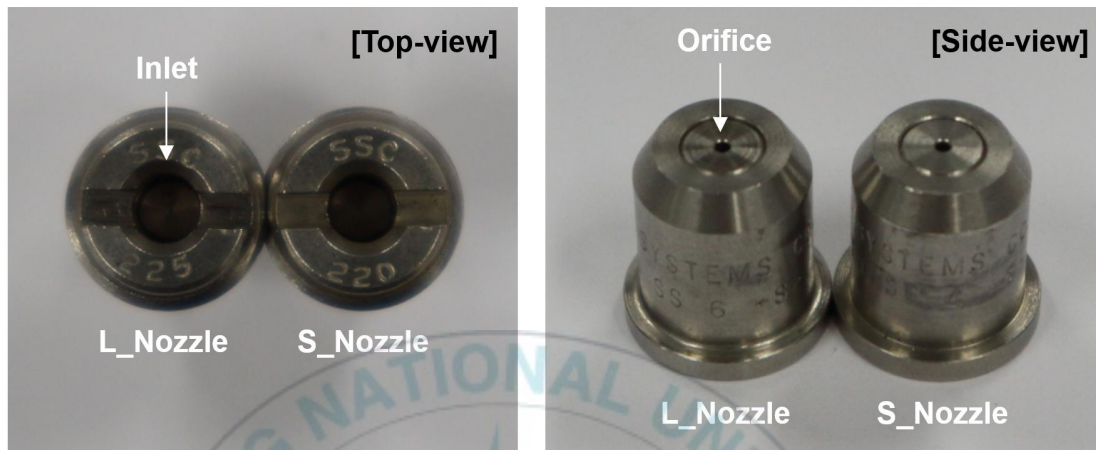
본 연구에서는 2가지의 단일유체노즐을 이용하여 노즐의 위치 조건 및 2개의 노즐 분사 조건에 따른 미분무 특성 및 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하였다. 2장에서는 단일유체노즐과 미분무 특성 측정 및 열복사 감쇠 효과 측정에 대한 실험 장치, 실험 조건, 실험 방법 및 결과 처리 방법을 기술하였다. 3장에서는 2가지의 노즐에서 분사되는 미분무의 분사 특성(물 공급 압력, 액적 크기, 액적 속도, 가시화)을 측정하였다. 4장에서는 2개의 노즐에서 동시에 분사하는 경우와 1개의 노즐에서 각각 분사하는 경우의 미분무 분사 특성 및 열복사의 감쇠 효과에 대하여 검토하였다. 본 연구는 다량의 인화성 물질을 취급하는 위험물 시설 등에 미분무 또는 물 분무소화설비 설치 시 노즐의 위치 조건에 관한 기초 설계 자료로 활용되어 화재 확산 방지에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 장 실험 세부 내용

2.1 실험 장치

2.1.1 단일유체노즐

본 연구에서는 2가지 종류의 상용 단일유체노즐(single-fluid nozzle)을 사용하였고, Figure 2.1에 해당 노즐들의 사진을 나타내었다. 미분무가 분사되는 두 노즐의 오리피스 직경은 1.1 mm로 같고, 노즐 내부에 있는 홈(groove)의 크기는 각각 0.58 mm와 0.76 mm로 측정되었다. 홈의 크기가 작은 노즐을 S_Nozzle(small nozzle)이라 명명하였고, 홈의 크기가 큰 노즐을 L_Nozzle(large nozzle)이라 명명하였다.



(a) With nozzle cap



(b) Without nozzle cap

Figure 2.1 Photos of nozzle for water mist.

2.1.2 미분무 특성 측정 실험 장치

본 연구에서는 물 공급 유량 조건과 노즐의 종류 및 위치 조건에 따른 물 공급 압력, 액적 크기(VMD, SMD), 액적 속도를 측정하고 미분무에 대한 가시화를 수행하였다. Figure 2.2과 Figure 2.3에 미분무 특성 측정 실험 장치의 개략도와 사진을 각각 나타내었다. 물탱크(water tank)와 마이크로 기어펌프(micro gear pump)를 설치하여 미분무 노즐에 물을 공급하였고, 전자저울(electronic scale)을 이용하여 일정 시간 동안 물탱크의 무게 감소량을 측정하여 물 공급 유량을 도출하였다. 노즐 전단에 압력 트랜스미터(pressure transmitter)를 설치하여 물 공급 압력을 측정하였으며, 측정된 데이터는 데이터 수집장치(data acquisition system)를 통하여 컴퓨터에 1초 간격으로 저장하였다. 2개의 노즐은 200 mm 이격하여 설치하였으며, 노즐로부터 수직 방향으로 380 mm 하부에 수평 방향으로 9지점에서 위상 도플러 입자 분석기(PDPA, phase Doppler particle analyzer)를 이용하여 미분무의 액적 크기 및 액적 속도를 측정하였다. 이때, 2개의 노즐 오리피스 중심축의 위치는 측정점 3과 7이며, 각 측정점의 간격은 50 mm이다. 또한, 측정점 5는 2개의 노즐 사이의 중간 지점이며, 측정점 3과 7로부터 각각 100 mm 떨어진 지점으로 겹치는 지점이다. 또한, 미분무 가시화를 위하여 조명과 암막, 카메라(camera)를 이용하였다. 2개의 노즐에서 동시에 미분무를 분사하는 경우를 Two_Spray로 명명하였고, 2개의 노즐 중 1개의 노즐에서만 미분무를 분사하는 경우를 One_Spray라 명명하였다.

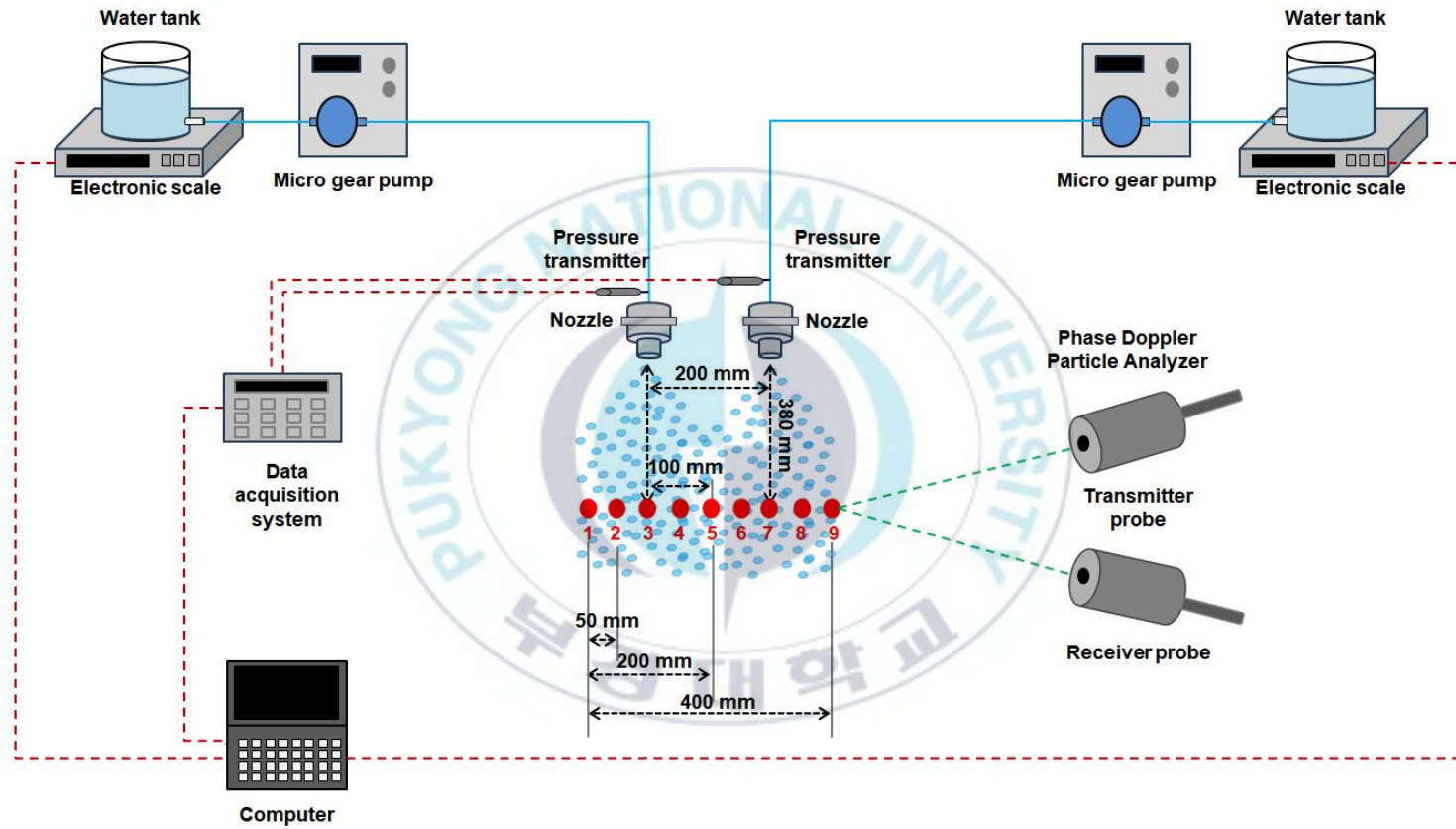


Figure 2.2 Schematic of experimental setup for water mist characteristics measurement.

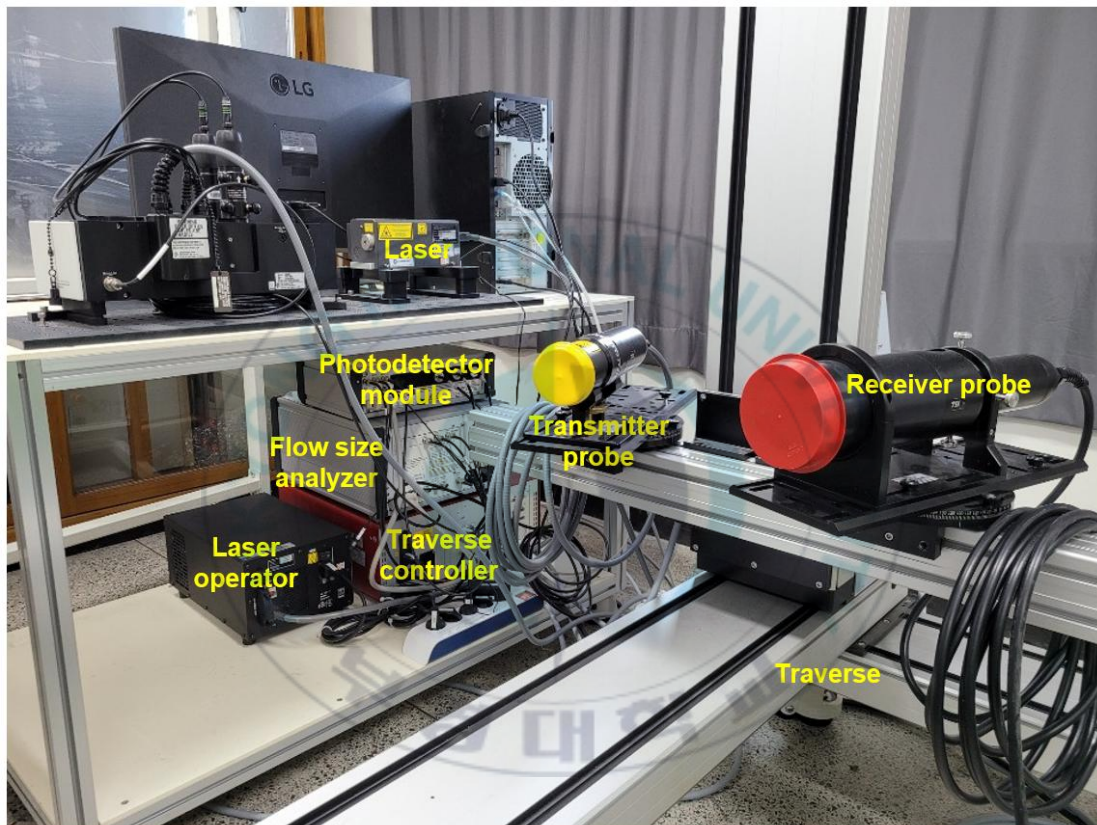


Figure 2.3 Photo of experimental setup for water mist characteristics measurement.

2.1.3 열복사 감쇠 효과 측정 실험 장치

본 연구에서는 물 공급 유량 조건과 노즐의 종류 및 위치 조건에 따른 열복사 감쇠 효과를 측정하였다. Figure 2.4과 Figure 2.5에 열복사 감쇠 효과 측정 실험 장치의 개략도와 사진을 각각 나타내었다. 폭 200mm, 높이 250mm 크기의 히터(heater, OMEGA, QH-081060-T)를 설치하여 열복사를 방사하였고, 열유속을 측정하기 위하여 히터로부터 1,000mm 떨어진 위치에 열유속계를 설치하였다. 또한, 열유속계의 온도를 일정하게 유지 시키기 위하여 항온 순환 수조를 연결하였고, 열유속계에 측정된 데이터는 데이터 수집장치를 통하여 컴퓨터에 1초 간격으로 저장하였다. 물탱크와 마이크로 기어펌프를 설치하여 미분무 노즐에 물을 공급하였으며, 전자저울을 이용하여 일정 시간 동안 물탱크의 무게 감소량을 측정하여 물 공급 유량을 도출하였다. 2개의 미분무 노즐은 히터와 열유속계 사이에 히터로부터 350mm 떨어진 지점과 열유속계로부터 450mm 떨어진 지점의 상부 380mm 위치에 각각 설치하였다. 히터에 가까운 노즐을 Location_HS(heater side)로 명명하였고, 열유속계에 가까운 노즐을 Location_SS(sensor side)로 명명하였다.

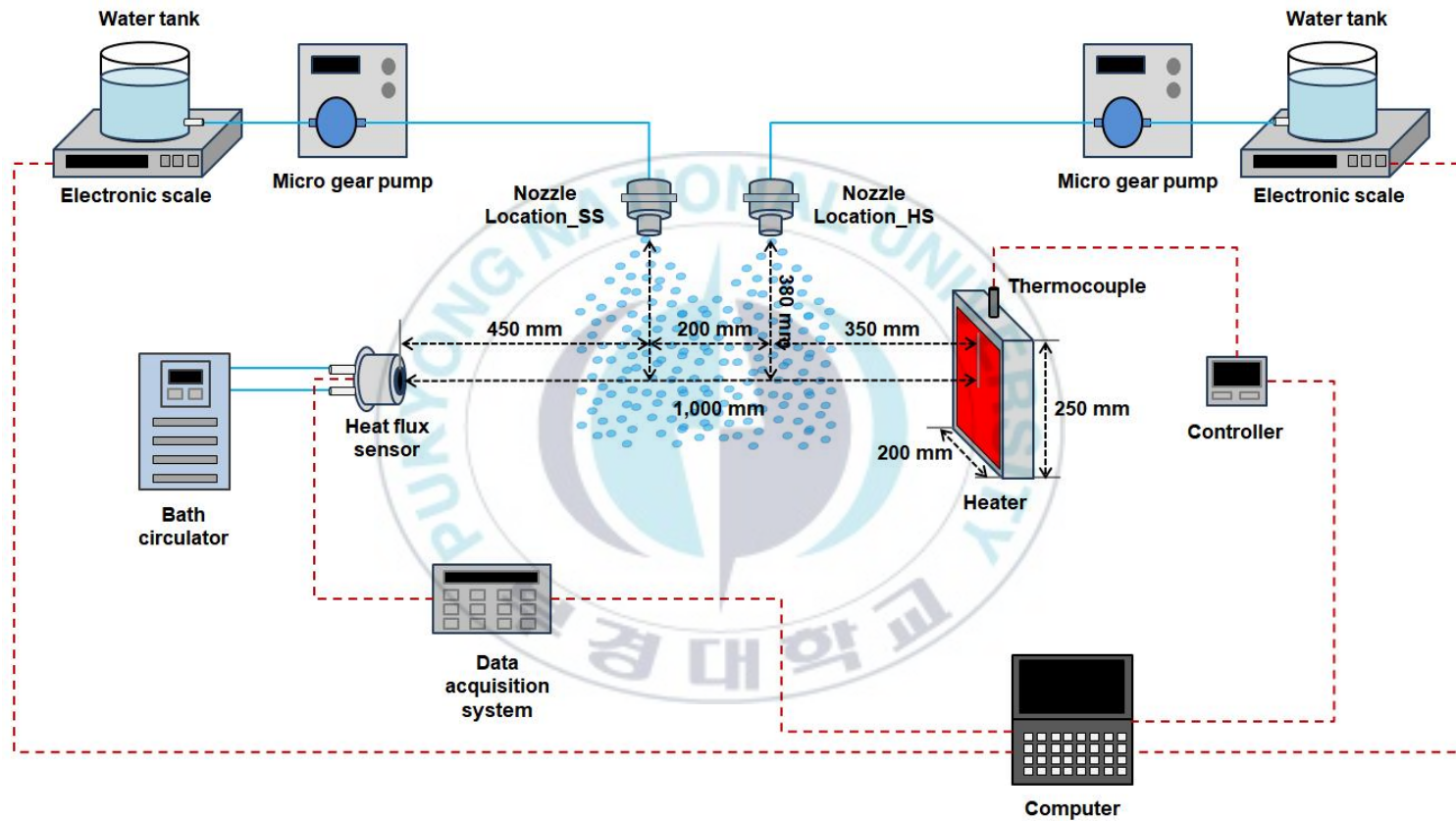


Figure 2.4 Schematic of experimental setup for thermal radiation attenuation measurement.

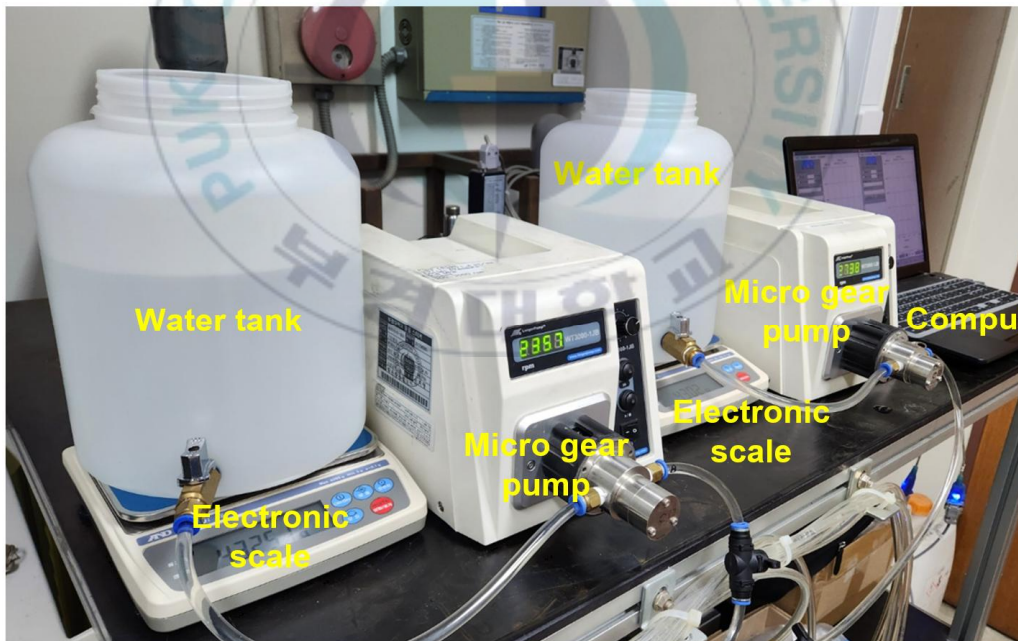


Figure 2.5 Photo of experimental setup for thermal radiation attenuation measurement.

2.2 실험 조건

본 연구에서 미분무 특성 측정 실험의 물 공급 유량 조건은 S_Nozzle의 경우 300 g/min, 350 g/min, 400 g/min으로 설정하였고, L_Nozzle의 경우 300 g/min, 350 g/min, 400 g/min, 500 g/min, 600 g/min으로 설정하였다. 미분무 분사 조건은 Two_Spray와 One_Spray로 설정하였다.

또한, 열복사 감쇠 효과 측정 실험의 물 공급 유량 조건은 S_Nozzle의 경우 300 g/min, 350 g/min, 400 g/min, 450 g/min으로 설정하였고, L_Nozzle의 경우 300 g/min, 350 g/min, 400 g/min, 450 g/min, 500 g/min으로 설정하였다. 노즐의 위치 조건은 Location_HS와 Location_SS이며, 미분무 분사 조건은 Two_Spray와 One_Spray로 설정하였다. 각 실험 조건마다 3회 반복 실험하여 데이터를 도출하였다.

2.3 실험 방법 및 결과 처리 방법

2.3.1 미분무 특성 측정 실험 방법

물 공급 압력은 각각 1 s 간격으로 1 min 간 측정하여 평균값을 나타내었고, 미분무 가시화는 조명과 암막, 카메라를 이용하여 나타내었다. 또한, 액적 크기와 액적 속도는 PDPA를 이용하여 앞에서 언급한 측정점 1~9에서 측정하였다. One_Spray 조건에서는 측정점 1~5, Two_Spray 조건에서는 측정점 1~9에서 각각 미분무 특성을 측정하여 비교하였다. 이와 같은 방법으로 모든 실험 조건을 수행하였다. One_Spray 조건에서 측정점 3(오리피스 중심축의 측정점)을 측정점(measurement position) 0 mm으로 표현하였고, Two_Spray 조건에서는 측정점 5(2개 노즐의 중간 지점)를 측정점 0 mm으로 표현하였다.

PDPA를 이용하여 측정한 데이터는 총 20,000개이며, 액적 속도는 평균값으로 도출하였고, 액적 크기는 VMD(volume median diameter)와 SMD(Sauter mean diameter)를 이용하여 도출하였다. VMD는 미분무의 체적에 대한 액적 크기의 중앙값을 의미하며, 액적 크기의 중앙값을 기준으로 체적의 50%는 직경이 작은 액적으로, 나머지 50%는 중앙값보다 직경이 큰 액적으로 구성된다⁽¹⁷⁾. SMD는 미분무의 평균 직경을 의미하며, 일반적으로 인용^(27,28)되는 식 (1)은 다음과 같다.

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^2} \quad (1)$$

여기서, N_i 는 액적의 수, D_i 는 액적의 직경을 의미한다⁽²⁸⁾.

2.3.2 열복사 감쇠 효과 측정 실험 방법

열복사 감쇠 효과 측정 실험은 총 3회 반복 수행하였고, 실험 방법은 아래와 같다.

(1) 열유속계에 연결된 항온 순환 수조를 작동하여 열유속계의 표면온도를 25℃로 유지하였고, 히터를 작동하여 설정 온도가 900℃에 도달 시 열화상 카메라로 히터의 표면온도를 측정하여 $710 \pm 10^\circ\text{C}$ 를 확인하였다. Figure 2.6에 히터의 표면온도를 촬영한 사진을 나타내었다.

(2) 미분무가 분사되지 않은 상태에서 데이터 수집장치를 통하여 측정된 열유속 데이터가 $1.10 \pm 0.02 \text{ kW/m}^2$ 임을 확인 후 실험을 시작하였다.

(3) 열유속 데이터는 0~210 s간 측정하여 저장하였다. 그중 약 70~145 s에 구간에서 미분무를 분사하였고, 약 0~70 s, 145~210 s 구간은 미분무를 분사하지 않았다. 이와 같은 방법으로 모든 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

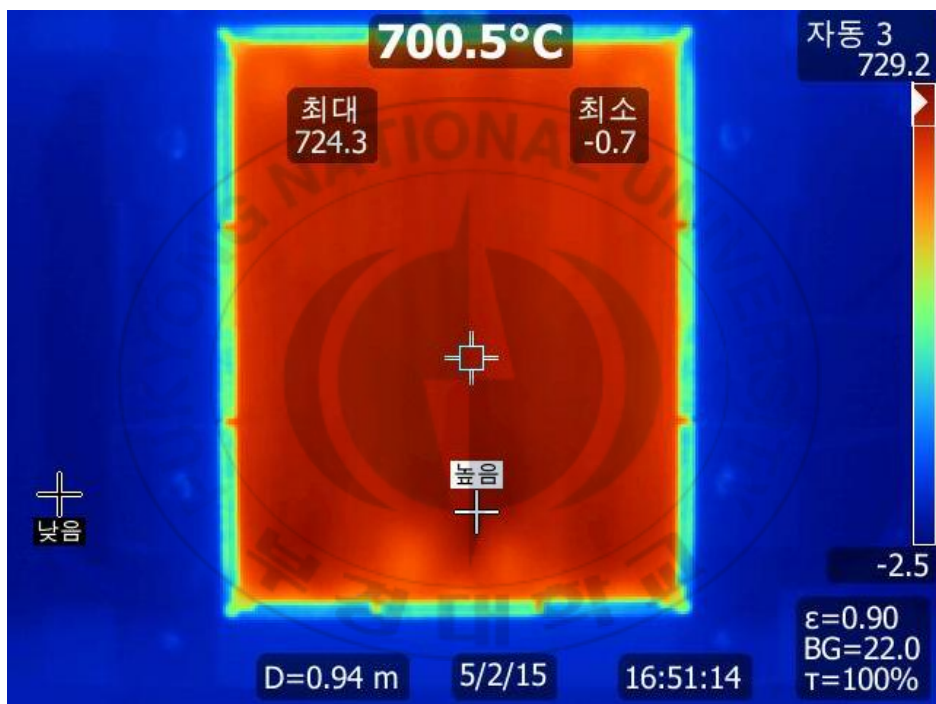


Figure 2.6 Photo of thermal imaging camera.

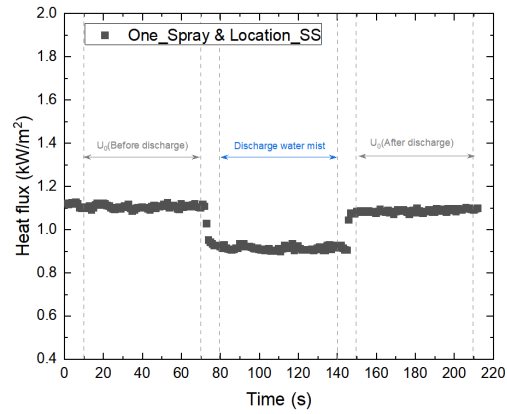
2.3.3 열복사 감쇠 효과 측정 결과 처리 방법

Figure 2.7과 같이 시간에 따른 열유속 측정 데이터를 그래프로 나타내었다. 미분무를 분사하지 않은 10~70 s 구간의 열유속 평균값을 U_0 , 미분무를 분사하는 80~140 s 구간의 열유속 평균값을 U 라고 정의하였다. 이에 따라 미분무에 의한 열복사 감쇠량(ΔU)과 감쇠율(ξ)은 각각 아래의 식(2)과 식(3)을 이용⁽²⁸⁾하여 각각 계산하였다.

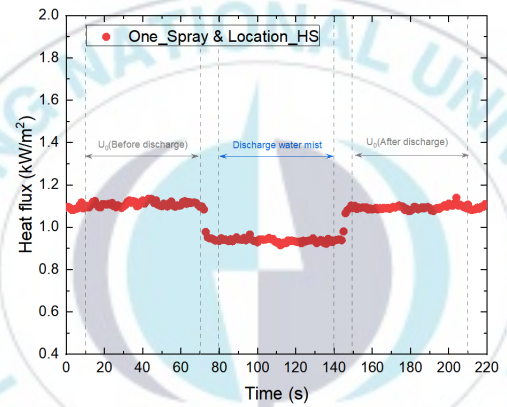
$$\Delta U = U_0 - U \quad (2)$$

$$\xi = \Delta U / U_0 \times 100 [\%] \quad (3)$$

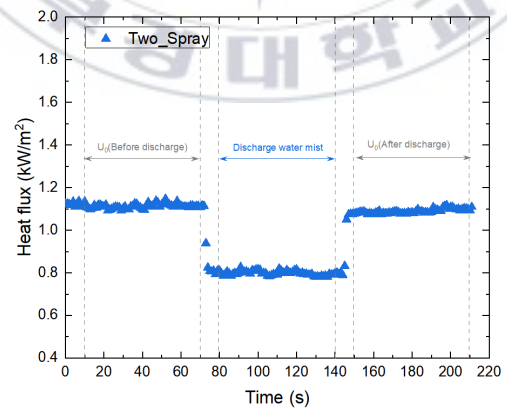




(a) One_Spray & Location_SS



(b) One_Spray & Location_HS



(c) Two_Spray

Figure 2.7 Exemplified temporal variation of measured heat flux (e.g, nozzle type = L_Nozzle, water flow rate = 400 g/min).

제 3 장 실험 결과 및 분석

3.1 미분무 특성

3.1.1 물 공급 압력

Figure 3.1에 물 공급 유량에 따른 S_Nozzle과 L_Nozzle의 압력 측정값을 나타내었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~400 g/min 조건에서 물 공급 압력은 391~720 kPa로 측정되었고, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~600 g/min 조건에서 물 공급 압력은 194~781 kPa로 측정되었다. 물 공급 유량이 증가할수록 압력이 증가하였고, 같은 물 공급 유량 조건에서 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 압력이 높게 측정되었다. S_Nozzle과 L_Nozzle은 오리피스 직경은 같으나, 노즐 내부 홈의 크기는 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 작다. 이는 같은 물 공급 유량 조건에서 노즐 내부 홈의 크기가 작은 것은 오리피스 직경이 작은 것과 같은 효과⁽¹⁸⁾를 보이는 것으로 판단된다.

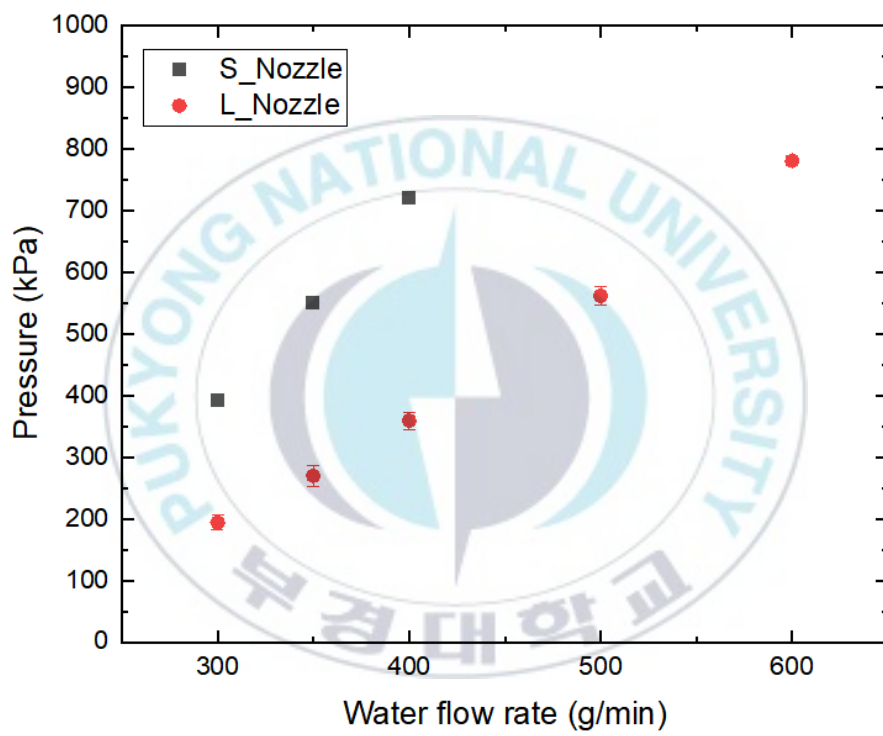
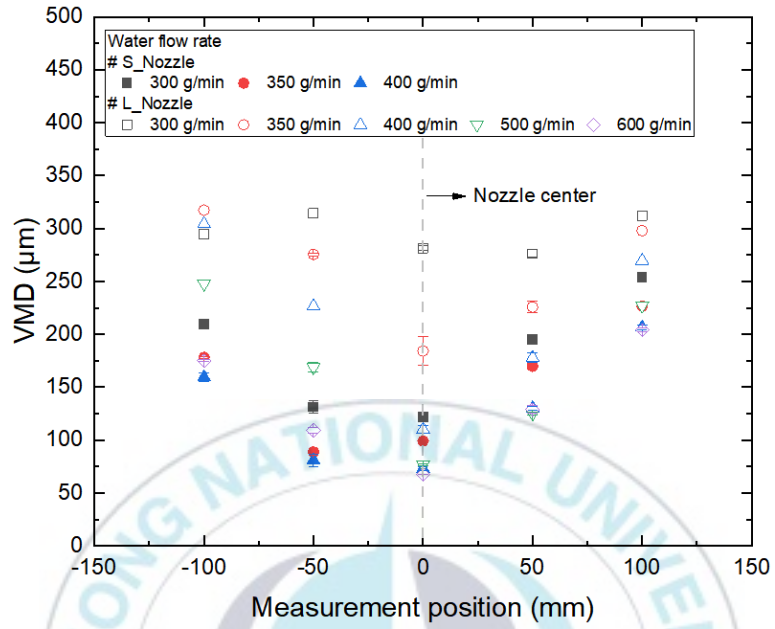


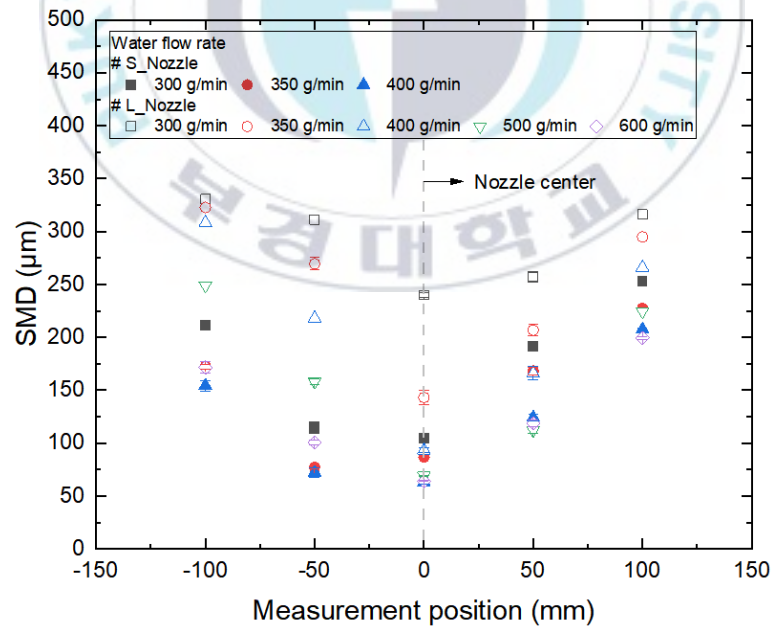
Figure 3.1 Water supply pressures of S_Nozzle and L_Nozzle.

3.1.2 액적 크기

Figure 3.2에 One_Spray 조건(1개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 미분무 액적 크기(VMD, SMD)의 측정 결과를 나타내었다. S_Nozzle과 L_Nozzle 조건 모두 물 공급 유량이 증가할수록 VMD와 SMD가 작아지는 경향이 관찰되었다. 그리고 노즐의 중심축에서 VMD와 SMD가 가장 작았으며, 노즐의 중심축에서 멀어질수록 VMD와 SMD가 점점 커지는 경향이 관찰되었다. 본 연구에서 측정된 액적 크기 분포 경향은 기존 연구⁽²⁶⁾와 동일함을 확인하였다. 전반적으로 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 같은 물 공급 유량 조건에서 VMD와 SMD가 작은 것으로 측정되었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~400 g/min 조건에서 VMD는 130~182 μm 로 측정되었고, SMD는 124~175 μm 로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~600 g/min 조건에서 VMD는 137~296 μm 로 측정되었고, SMD는 131~291 μm 로 측정되었다.



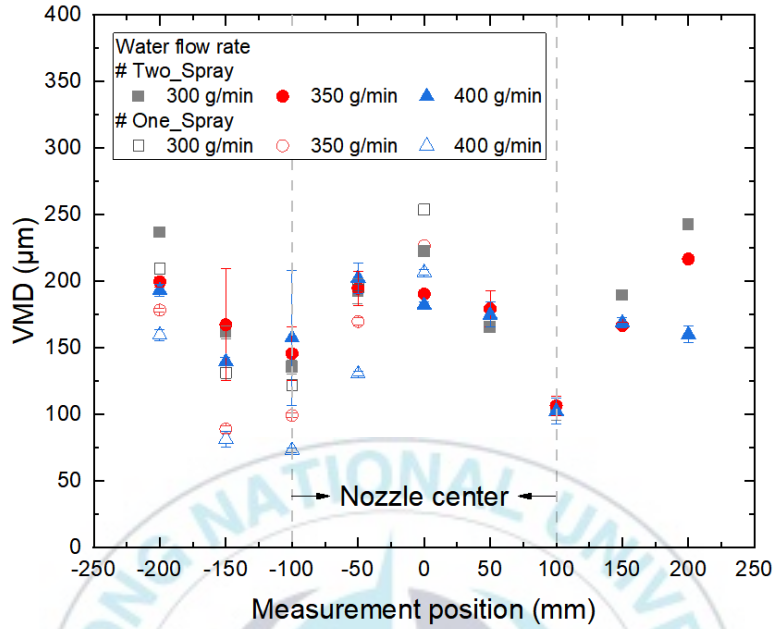
(a) VMD



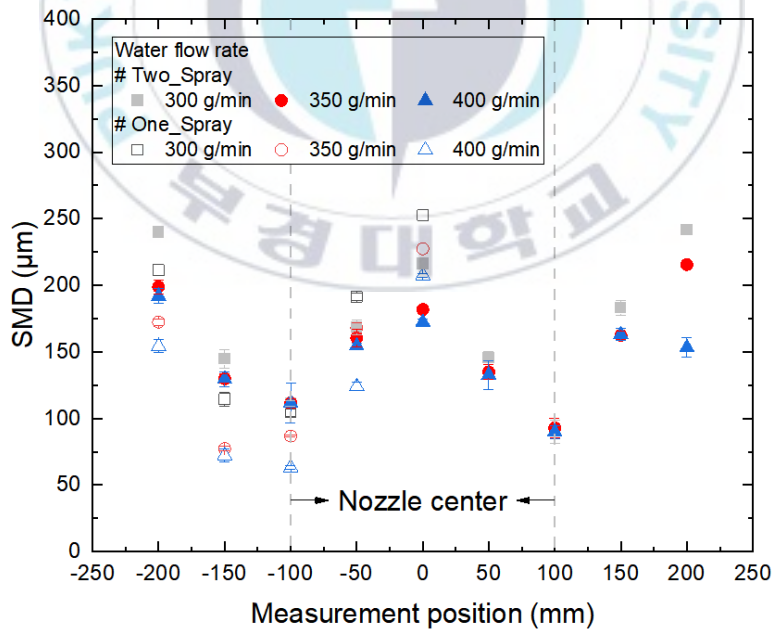
(b) SMD

Figure 3.2 Droplet size of water mist for S_Nozzle and L_Nozzle for One_Spray.

Figure 3.3와 Figure 3.4에 Two_Spray 조건(2개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 분사한 미분무 액적 크기(VMD, SMD)의 측정 결과를 나타내었다. 그리고 One_Spray(1개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우) 조건의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 분사한 미분무 액적 크기를 함께 나타내어 비교하였다. 전반적으로 One_Spray와 마찬가지로 Two_Spray에서도 노즐의 중심축에서 VMD와 SMD가 작게 측정되었고, 같은 물 공급 유량 조건에서도 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 VMD와 SMD가 작은 것으로 측정되었다. 그러나, 같은 물 공급 유량 및 위치 조건에서 One_Spray와 Two_Spray 조건의 VMD, SMD 측정값은 일관된 경향이 관찰되지 않았다. Table 3.1에 One_Spray와 Two_Spray 조건, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건에서 물 공급 유량 조건에 따른 액적 크기에 대한 평균값과 표준편차를 나타내었다. Two_Spray 조건의 S_Nozzle에서 미분무를 분사하였을 때 VMD, SMD 측정값은 164~183 μm , 144~171 μm 로 측정되었고, L_Nozzle에서 미분무를 분사하였을 때 VMD, SMD 측정값은 198~291 μm , 159~274 μm 로 측정되었다. 액적 크기의 측정 데이터는 표준편차를 고려하면, One_Spray와 Two_Spray 조건의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 미분무를 분사하였을 때 평균 액적 크기의 차이는 크지 않은 것으로 판단되었다.

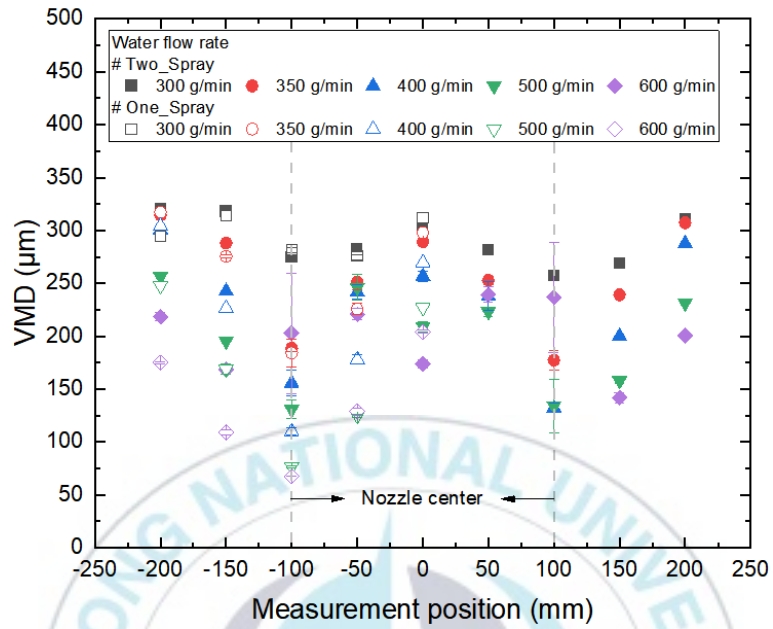


(a) VMD

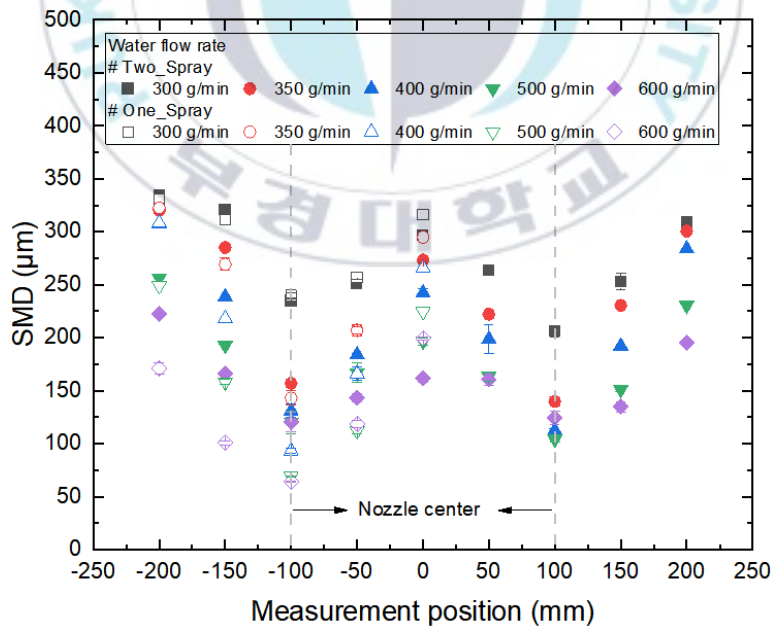


(b) SMD

Figure 3.3 Droplet size of water mist for Two_Spray and One_Spray for S_Nozzle.



(a) VMD



(b) SMD

Figure 3.4 Droplet size of water mist for Two_Spray and One_Spray for L_Nozzle.

Table 3.1 Average value and standard deviation of VMD and SMD distribution for One_Spray and Two_Spray of S_Nozzle and L_Nozzle

Nozzle Type	Water Flow Rate (g/min)	One_Spray		Two_Spray	
		VMD (μm)	SMD (μm)	VMD (μm)	SMD (μm)
S_nozzle	300	182 \pm 49	175 \pm 57	183 \pm 44	171 \pm 51
	350	152 \pm 52	146 \pm 57	174 \pm 31	154 \pm 38
	400	130 \pm 50	124 \pm 53	164 \pm 28	144 \pm 30
L_nozzle	300	296 \pm 15	291 \pm 36	291 \pm 22	274 \pm 41
	350	260 \pm 49	247 \pm 65	256 \pm 46	237 \pm 59
	400	218 \pm 68	210 \pm 75	228 \pm 53	210 \pm 61
	500	169 \pm 63	163 \pm 67	198 \pm 44	176 \pm 46
	600	137 \pm 48	131 \pm 49	201 \pm 31	159 \pm 31

3.1.3 액적 속도

Figure 3.5에 One_Spray 조건(1개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 분사한 미분무 액적 속도의 측정 결과를 나타내었다. S_Nozzle과 L_Nozzle 조건 모두 노즐의 중심축에서 액적 속도가 가장 빠르고, 노즐의 중심축에서 멀어질수록 액적 속도가 점점 느려지는 경향이 관찰되었다. 이러한 액적 속도 분포는 액적 크기 분포와 연관이 있을 수 있다. 액체가 분사되는 속도와 주위 기체 간 속도 차이에 의해 액체가 분열되어 액적이 생성되고, 상대속도가 빠를수록 액적 크기가 작아진다⁽¹⁷⁾. Figure 3.5에 나타낸 바와 같이 노즐 중심축에서 액적 속도가 가장 빠르고 중심축에서 멀어질수록 액적 속도가 감소하기 때문에 Figure 3.2에서 언급한 바와 같이 노즐 중심축에서는 액적 크기가 작고 중심축에서 멀어질수록 액적 크기가 커지는 것으로 판단된다. 또한, 물 공급 유량이 증가할수록 액적 속도는 커지는 경향이 관찰되었다. 전반적으로 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 액적 속도가 작은 것으로 측정되었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~400 g/min 조건에서 액적 속도는 0.46~0.62 m/s로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~600 g/min 조건에서 액적 속도는 0.5~0.8 m/s로 측정되었다.

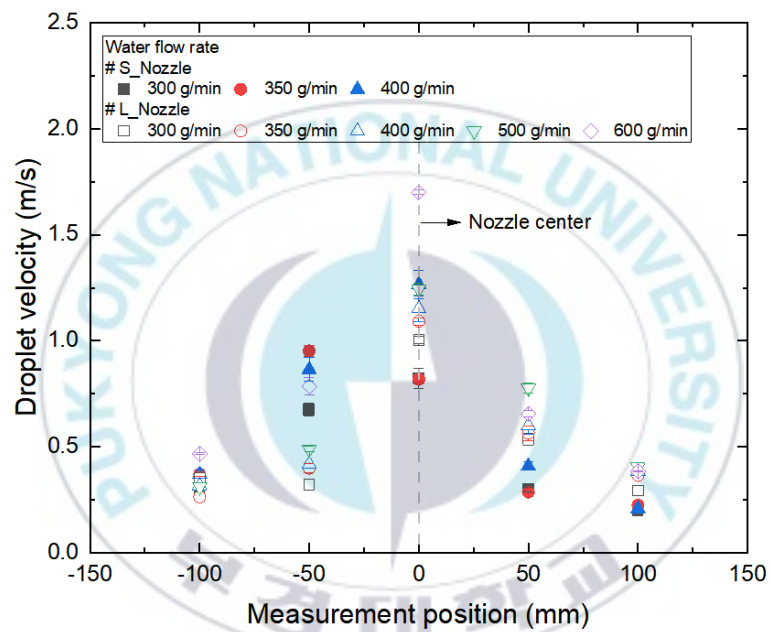
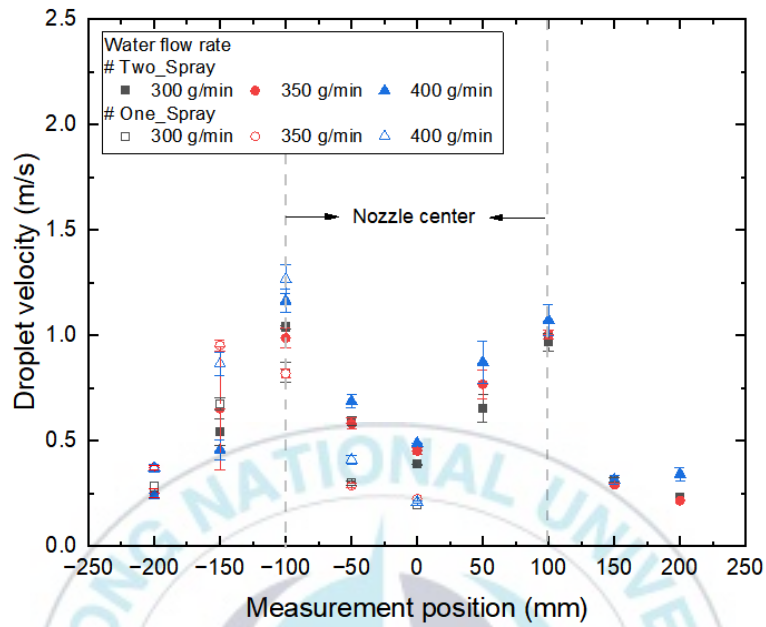
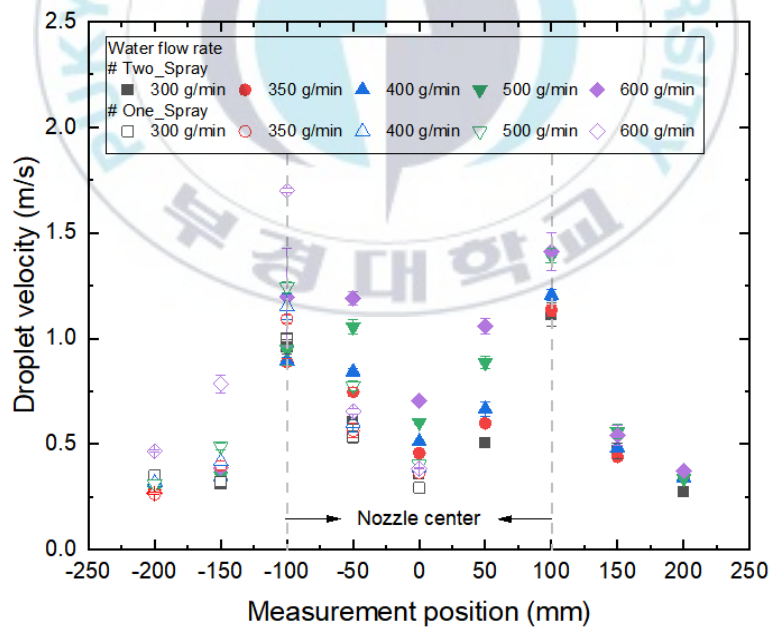


Figure 3.5 Droplet velocity of water mist for S_Nozzle and L_Nozzle for One_Spray.

Figure 3.6에 Two_Spray 조건의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 미분무 액적 속도의 측정 결과를 나타내었다. 그리고 One_Spray 조건의 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 미분무 액적 속도를 함께 나타내어 비교하였다. Table 3.2에 One_Spray와 Two_Spray 조건, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건에서 물 공급 유량 조건에 따른 액적 속도에 대한 평균값과 표준편차를 나타내었다. 전반적으로 One_Spray와 마찬가지로 Two_Spray에서도 노즐의 중심축에서 액적 속도가 빠른 것으로 측정되었고, 같은 물 공급 유량 조건에서도 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 액적 속도가 느린 것으로 측정되었다. 그러나, 같은 물 공급 유량 조건에서 One_Spray와 Two_Spray 조건의 액적 속도 측정값은 일관된 경향이 관찰되지 않았다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~400 g/min 조건에서 액적 속도는 0.55~0.63 m/s로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~600 g/min 조건에서 액적 속도는 0.55~0.79 m/s로 측정되었다.



(a) S_Nozzle



(b) L_Nozzle

Figure 3.6 Droplet velocity of water mist for One_Spray and Two_Spray.

Table 3.2 Average value and standard deviation of velocity for One_Spray and Two_Spray of S_Nozzle and L_Nozzle

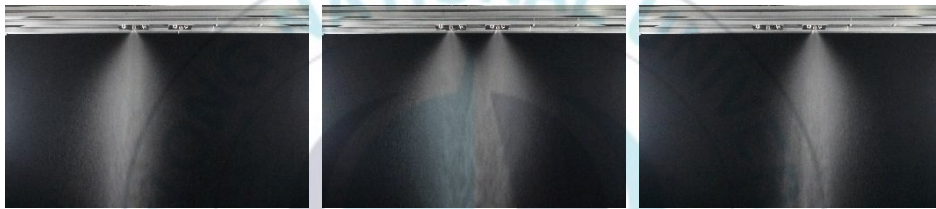
Nozzle Type	Water Flow Rate (g/min)	One_Spray	Two_Spray
		Velocity (m/s)	Velocity (m/s)
S_Nozzle	300	0.46 ± 0.25	0.55 ± 0.28
	350	0.53 ± 0.30	0.58 ± 0.28
	400	0.62 ± 0.39	0.63 ± 0.32
L_Nozzle	300	0.50 ± 0.26	0.55 ± 0.28
	350	0.54 ± 0.29	0.58 ± 0.27
	400	0.57 ± 0.30	0.62 ± 0.29
	500	0.64 ± 0.34	0.71 ± 0.36
	600	0.80 ± 0.47	0.79 ± 0.40

3.1.4 가시화

Figure 3.7과 Figure 3.8에 One_Spray 조건(1개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)과 Two_Spray 조건(2개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)의 미분무 가시화 결과를 물 공급 유량 조건별로 좌측에 One_Spray&Location_SS, 중앙에 Two_Spray, 우측에 One_Spray&Location_HS를 나타내었다. S_Nozzle과 L_Nozzle 모두 물 공급 유량 많은 경우가 적은 경우보다 분무폭이 넓은 것으로 관찰되었고, 같은 물 공급 유량 조건의 경우 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 분무폭이 넓은 것으로 관찰되었다. 또한, Two_Spray의 조건의 경우 S_Nozzle과 L_Nozzle 모두 물 공급 유량 많은 경우가 적은 경우보다 분무폭이 넓어 분무폭이 겹치는 부분이 많은 것으로 관찰되었다. 마찬가지로 같은 물 공급 유량 조건의 경우 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 분무폭이 겹치는 부분이 많은 것으로 관찰되었다. Two_Spray 조건의 분무폭이 One_Spray_Sum(One_Spray&Location_HS와 One_Spray&Location_SS의 분무폭 합)보다 작은 것으로 관찰되며, 이는 Two_Spray 조건에서 2개의 노즐이 미분무를 분사하였을 때 분무폭이 겹치는 부분이 발생하기 때문으로 판단된다.



(a) Water flow rate = 300 g/min



(b) Water flow rate = 350 g/min



(c) Water flow rate = 400 g/min

Figure 3.7 Visualization of discharged water mist for S_Nozzle(left: One_Spray&Location_SS, center: Two_Spray, right: One_Spray&Location_HS).



(a) Water flow rate = 300 g/min



(b) Water flow rate = 350 g/min



(c) Water flow rate = 400 g/min



(d) Water flow rate = 500 g/min



(e) Water flow rate = 600 g/min

Figure 3.8 Visualization of discharged water mist for L_Nozzle(left: One_Spray&Location_SS, center: Two_Spray, right: One_Spray&Location_HS).

3.2 열복사 감쇠

3.2.1 미분무 분사 위치 영향

Figure 3.9에 One_Spray 조건(1개의 노즐에서 미분무가 분사되는 경우)에서 S_Nozzle과 L_Nozzle의 미분무 분사 위치 조건(Location_SS, Location_HS)에 따른 미분무 복사열유속 측정 결과를 나타내었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~450 g/min 조건에서 Location_SS의 복사열유속은 0.789~0.885 kW/m²로 측정되었고, Location_HS의 복사열유속 0.793~0.898 kW/m²로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~500 g/min 조건에서 Location_SS의 복사열유속은 0.878~0.965 kW/m²로 측정되었고, Location_HS의 복사열유속은 0.898~0.991 kW/m²로 측정되었다.

또한, Figure 3.10에 One_Spray 조건에서 S_Nozzle과 L_Nozzle의 미분무 분사 위치 조건(Location_SS, Location_HS)에 따른 미분무 열복사 감쇠량 및 감쇠율 측정 결과를 나타내었고, Table 3.3에 Location_SS와 Location_HS 조건, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건에서 물 공급 유량 조건에 따른 열복사 감쇠에 대한 평균값과 표준편차를 나타내었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~450 g/min 조건에서 Location_SS의 열복사 감쇠량 및 감쇠율은 각각 0.214~0.293 kW/m², 19.5~27.1%로 측정되었고, Location_HS의 열복사 감쇠량 및 감쇠율은 각각 0.209~0.291 kW/m², 18.9~26.9%로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~500 g/min 조건에서 Location_SS의 열복사 감쇠량 및 감쇠율은 각각 0.13~0.23 kW/m², 11.9~20.6%로 측정되었고, Location_HS의 열복사 감쇠량 및 감쇠율은 각각 0.11~0.20 kW/m², 9.9~17.9%로 측정되었다. 실험 결과, S_Nozzle이 L_Nozzle보다 열복사 감쇠 효과가 높은 경향이 관찰되었고, S_Nozzle과

L_Nozzle 조건에서 전반적으로 Location_SS가 Location_HS보다 열복사 감쇠 효과가 높은 경향이 관찰되었다. 이는 S_Nozzle이 L_Nozzle보다 미분 무 액적 크기가 작기 때문이라고 판단된다.



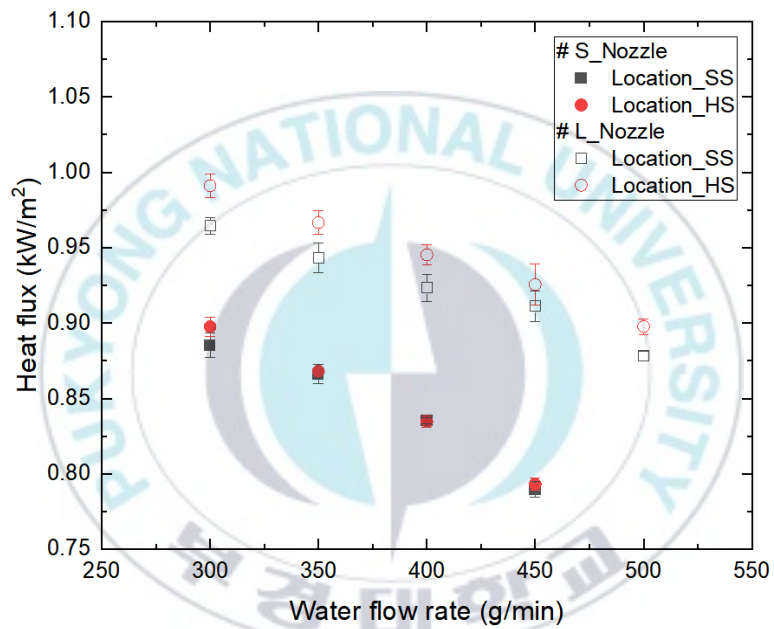
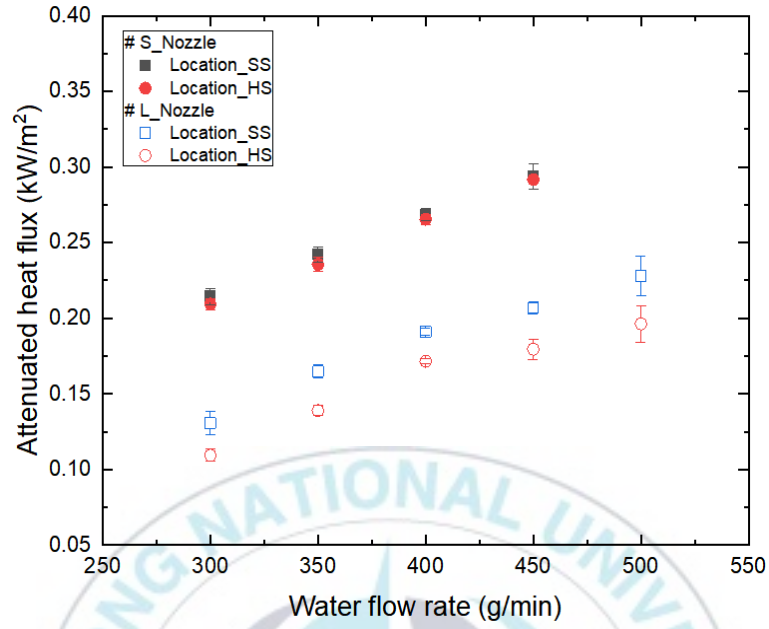
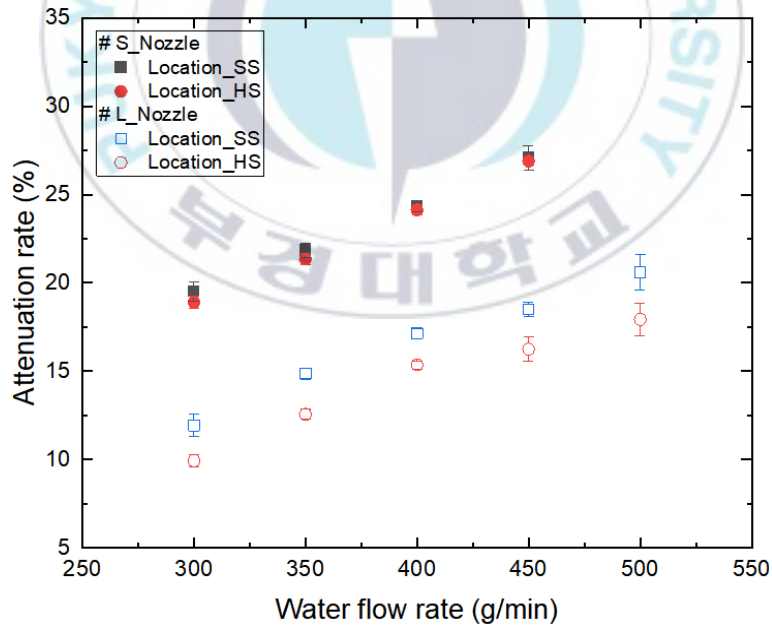


Figure 3.9 Effect of water mist nozzle location on heat flux for One_Spray.



(a) Attenuated heat flux



(b) Attenuation rate

Figure 3.10 Effect of water mist nozzle location on thermal radiation attenuation for One_Spray.

Table 3.3 Average value and standard deviation of attenuated heat flux and attenuation rate for Location_SS and Location_HS of S_Nozzle and L_Nozzle

Nozzle Type	Water Flow Rate (g/min)	Location_SS		Location_HS	
		Attenuated Heat Flux (kW/m ²)	Attenuation Rate (%)	Attenuated Heat Flux (kW/m ²)	Attenuation Rate (%)
S_Nozzle	300	0.214 ± 0.005	19.5 ± 0.53	0.209 ± 0.004	18.9 ± 0.34
	350	0.242 ± 0.004	21.8 ± 0.39	0.236 ± 0.005	21.3 ± 0.32
	400	0.268 ± 0.008	24.3 ± 0.32	0.265 ± 0.003	24.1 ± 0.31
	450	0.293 ± 0.002	27.1 ± 0.69	0.291 ± 0.008	26.9 ± 0.18
L_Nozzle	300	0.13 ± 0.008	11.9 ± 0.64	0.11 ± 0.004	9.9 ± 0.36
	350	0.16 ± 0.004	14.9 ± 0.32	0.14 ± 0.003	12.6 ± 0.28
	400	0.19 ± 0.002	17.1 ± 0.30	0.17 ± 0.002	15.4 ± 0.23
	450	0.21 ± 0.004	18.5 ± 0.42	0.18 ± 0.007	16.3 ± 0.68
	500	0.23 ± 0.013	20.6 ± 1.00	0.20 ± 0.012	17.9 ± 0.91

3.2.2. 2개의 미분무 분사 영향

Figure 3.11에 2개의 미분무 분사 조건(Two_Spray, One_Spray_Sum)에 따른 복사열유속 측정 결과를 나타내었다. 즉, 2개의 노즐에서 미분무 분사되는 복사열유속 값(Two_Spray)과 Location_SS, Location_HS 노즐에서 각각 미분무가 분사되는 복사열유속의 합(One_Spray_Sum)을 의미한다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~450 g/min 조건에서 Two_Spray 조건의 복사열유속은 0.63~0.75 kW/m²로 측정되었고, One_Spray_Sum 조건의 복사열유속은 1.58~1.78 kW/m²로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~500 g/min 조건에서 Two_Spray 조건의 복사열유속은 0.74~0.88 kW/m²로 측정되었고, One_Spray_Sum 조건의 복사열유속은 1.78~1.96 kW/m²로 측정되었다. 실험 결과, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건 모두 Two_Spray가 One_Spray_Sum보다 복사열유속이 작게 관찰되었다.

Figure 3.12에 2개의 미분무 분사 조건에 따른 열복사 감쇠량 및 감쇠율 측정 결과를 나타내었다. 즉, 2개의 노즐에서 미분무 분사되는 열복사 감쇠 효과(Two_Spray)와 Location_SS, Location_HS 노즐에서 각각 미분무가 분사되는 열복사 감쇠 효과의 합(One_Spray_Sum)을 의미한다. Table 3.4에 One_Spray_Sum과 Two_Spray 조건, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건에서 물 공급 유량 조건에 따른 열복사 감쇠에 대한 평균값과 표준편차를 나타내었다. S_Nozzle은 물 공급 유량이 300~450 g/min 조건에서 Two_Spray 조건의 열복사 감쇠량 및 감쇠율은 각각 0.36~0.46 kW/m², 32.3~42.4%로 측정되었고, One_Spray_Sum 조건의 열복사 감쇠량과 감쇠율은 각각 0.42~0.59 kW/m², 38.4~54.0%로 측정되었다. 또한, L_Nozzle은 물 공급 유량이 300~500 g/min 조건에서 Two_Spray 조건의 열복사 감쇠량과 감쇠율은 각각 0.23~0.36 kW/m², 20.3~32.9%로 측정되었고, One_Spray_Sum 조건의 열복사 감쇠량과 감쇠율은 각각 0.24~0.42 kW/m², 21.9~38.5%로 측

정되었다. 실험 결과, S_Nozzle과 L_Nozzle 조건 모두 Two_Spray가 One_Spray_Sum보다 열복사 감쇠 효과가 작게 관찰되었다. 이는 앞서 Figure 3.7과 Figure 3.8에서 가시화 결과를 살펴본 바와 같이 미분무 분무 폭이 겹치는 부분이 발생하여 Two_Spray의 분무폭이 One_Spray_Sum의 분무폭보다 작기 때문이라고 판단된다.



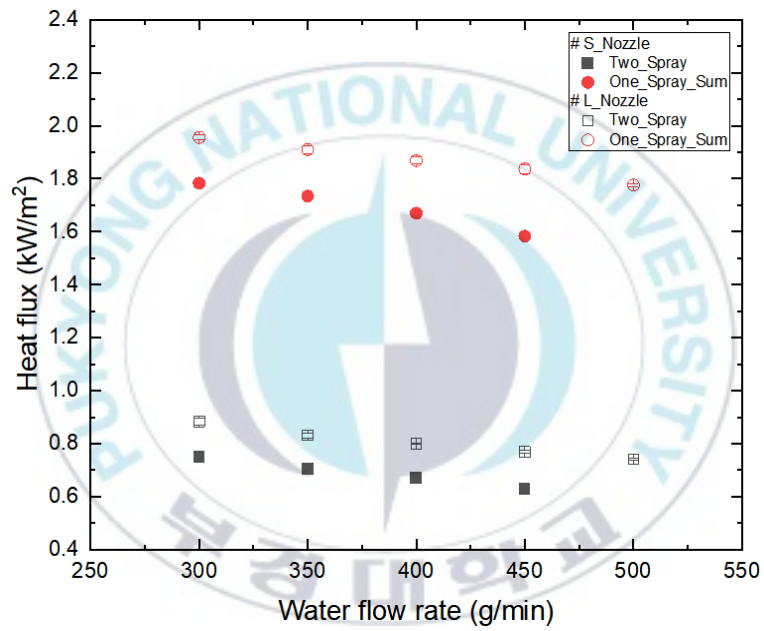
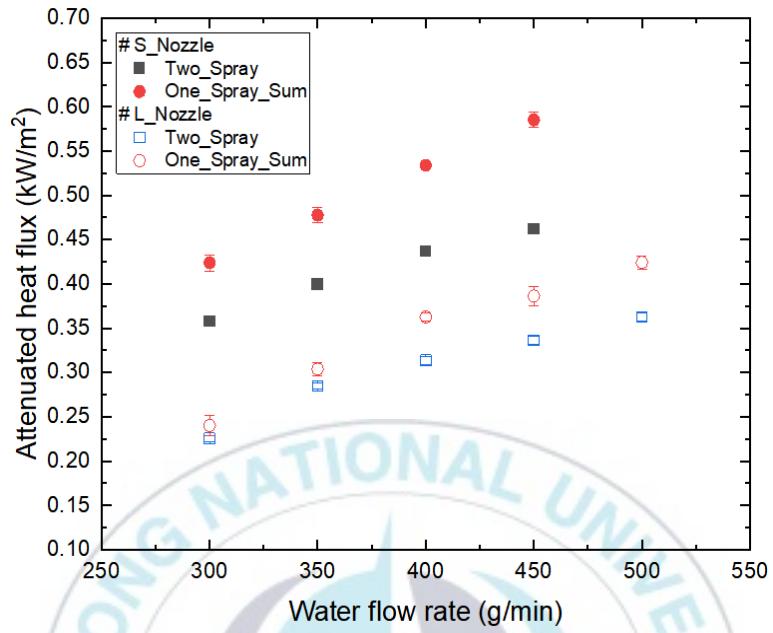
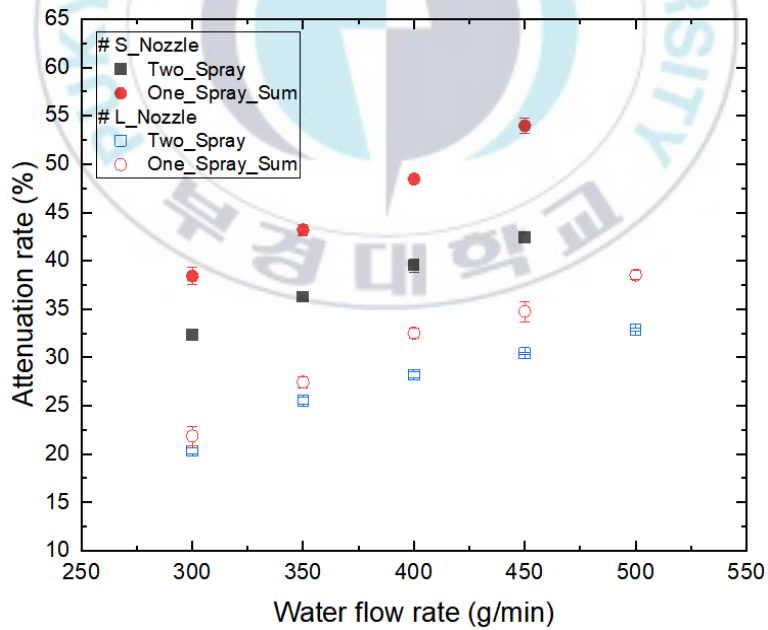


Figure 3.11 Heat flux of water mist discharged from two nozzles.



(a) Attenuated heat flux



(b) Attenuation rate

Figure 3.12 Thermal radiation attenuation of water mist discharged from two nozzles.

Table 3.4 Average value and standard deviation of attenuated heat flux and attenuation rate for One_Spray_Sum and Two_Spray of S_Nozzle and L_Nozzle

Nozzle Type	Water Flow Rate (g/min)	One_Spray_Sum		Two_Spray	
		Attenuated Heat Flux (kW/m ²)	Attenuation Rate (%)	Attenuated Heat Flux (kW/m ²)	Attenuation Rate (%)
S_Nozzle	300	0.42 ± 0.01	38.4 ± 0.88	0.36 ± 0.003	32.3 ± 0.05
	350	0.48 ± 0.01	43.2 ± 0.60	0.40 ± 0.004	36.2 ± 0.18
	400	0.53 ± 0.00	48.5 ± 0.03	0.44 ± 0.006	39.5 ± 0.69
	450	0.59 ± 0.01	54.0 ± 0.82	0.46 ± 0.003	42.4 ± 0.08
L_Nozzle	300	0.24 ± 0.01	21.9 ± 0.97	0.23 ± 0.003	20.3 ± 0.36
	350	0.30 ± 0.01	27.4 ± 0.59	0.28 ± 0.003	25.5 ± 0.41
	400	0.36 ± 0.00	32.5 ± 0.52	0.31 ± 0.005	28.2 ± 0.31
	450	0.39 ± 0.01	34.7 ± 1.04	0.34 ± 0.005	30.4 ± 0.12
	500	0.42 ± 0.01	38.5 ± 0.45	0.36 ± 0.005	32.9 ± 0.18

제 4 장 결 론

본 연구에서는 단일유체노즐을 이용하여 미분무의 열복사 감쇠 효과에 대한 실험을 수행하였다. 2종류(S_Nozzle, L_Nozzle)의 미분무 노즐을 이용하여 다양한 물 공급 유량 조건에서 미분무 분사 특성(물 공급 압력, 액적 크기, 액적 속도, 가시화)을 측정하여 검토하였다. 이후, 노즐의 설치 위치 조건 및 2개의 노즐 분사 조건에 따른 미분무의 열복사 감쇠 효과 실험을 수행하였다. 실험을 통해 열유속계 근처에 노즐을 설치한 조건(Location_SS), 히터 근처에 노즐을 설치한 조건(Location_HS), 2개의 노즐을 동시에 분사하는 경우(Two_Spray), 1개의 노즐을 분사하는 경우(One_Spray), 각각 1개의 노즐을 분사하는 경우의 합(One_Spray_Sum)에 대한 결과를 검토하였다. 본 연구에서 도출한 주요 결과를 아래에 정리하였다.

- (1) 물 공급 압력은 S_Nozzle에서 391~720 kPa로 측정되었고, L_Nozzle에서 194~781 kPa로 측정되었다. 물 공급 유량이 증가할수록 물 공급 압력도 증가함이 관찰되었고, 가시화 결과, 물 공급 유량이 증가할수록 미분무의 분무폭이 증가하는 것을 확인하였다.
- (2) One_Spray 조건에서 액적 크기는 S_Nozzle의 경우 VMD와 SMD가 각각 130~182와 124~175 μm 로 측정되었고, L_Nozzle의 경우 VMD와 SMD가 각각 137~296과 131~291 μm 로 측정되었다. Two_Spray 조건에서 액적 크기는 S_Nozzle의 경우 VMD와 SMD가 각각 164~183과 144~171 μm 로 측정되었고, L_Nozzle의 경우 VMD와 SMD가 각각 198~291과 159~274 μm 로 측정되었다. 두 조건에서 모두 물 공급 유

량이 증가할수록 액적 크기(VMD, SMD)는 감소하였고, 노즐 중심축에서 먼 지점에 비해 노즐 중심축에서의 액적 크기가 작은 것으로 나타났다.

- (3) One_Spray 조건에서 액적 속도는 S_Nozzle의 경우 0.46~0.62 m/s로 측정되었고, L_Nozzle에서 0.5~0.8 m/s로 측정되었다. Two_Spray 조건에서 액적 속도는 S_Nozzle의 경우 0.55~0.63 m/s로 측정되었고, L_Nozzle에서 0.55~0.79 m/s로 측정되었다. 두 조건에서 모두 물 공급 유량이 증가할수록 액적 속도는 증가하였고, 노즐 중심축에서 먼 지점에 비해 노즐 중심축에서의 액적 속도가 빠른 것으로 측정되었다.
- (4) One_Spray 조건에서 미분무에 의한 열복사 감쇠 효과 측정 결과, 물 공급 유량이 증가함에 따라 열복사 감쇠율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물 공급 유량 증가에 따라 미분무의 액적 크기가 감소하고 이로 인해 액적 개수와 전체 표면적이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, 유사한 물 공급 유량 조건에서 S_Nozzle이 L_Nozzle에 비해 열복사 감쇠 성능이 우수한 것으로 나타났는데 이는 S_Nozzle의 미분무 액적 크기가 L_Nozzle에 비해 작기 때문으로 판단된다.
- (5) 노즐의 설치 위치 조건에 따른 열복사 감쇠 효과 측정 결과, Location_SS가 Location_HS보다 열복사 감쇠 효과가 높은 경향이 관찰되었다. Location_SS 조건에서 S_Nozzle과 L_Nozzle의 열복사 감쇠율은 각각 19.5~27.1과 11.9~20.6%로 측정되었다. Location_HS 조건에서 S_Nozzle과 L_Nozzle의 열복사 감쇠율은 각각 18.9~26.9와 9.9~17.9%로 측정되었다.
- (6) 2개의 노즐 분사 조건에 따른 열복사 감쇠 효과 측정 결과, Two_Spray 조건의 열복사 감쇠율이 One_Spray_Sum 조건에 비해 낮은 것으로 나타났다. Two_Spray 조건의 열복사 감쇠율은 S_Nozzle과

L_Nozzle에서 각각 32.3~42.4와 20.3~32.9%로 측정되었고, One_Spray_Sum 조건의 열복사 감쇠율은 S_Nozzle과 L_Nozzle에서 각각 38.4~54.0과 21.9~38.5%로 측정되었다. 또한, 물 공급 유량이 증가함에 따라 Two_Spray 조건과 One_Spray_Sum 조건 간 열복사 감쇠율 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 Two_Spray 조건에서는 미분무가 겹치게 되고 물 공급 유량이 증가할수록 미분무가 겹치는 부분이 넓어져서 Two_Spray 조건의 분무 폭이 One_Spray_Sum 조건에 비해 좁아지기 때문으로 판단된다.

추후 Two_Spray 조건에서 미분무가 중첩되는 부분에서의 미분무 특성에 대한 세부 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 분무폭의 정량화는 미분무 분사 특성과 복사열 감쇠 성능 간 상관관계를 예측하기 위한 중요한 인자이므로 정확한 분무폭 측정을 위한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 학위 논문은 저자가 학위 과정 중 한국화재소방학회 논문지에 게재한 아래와 같은 논문의 내용을 바탕으로 작성하였음.

- 박지호, 강준석, 이치영*, 2022, 열복사 감쇠 성능에 대한 미분무 노즐 설치 조건의 영향 검토, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 36, No. 5, pp. 1-10 (ISSN: 2765-088X (Online), 2765-060X (Print), 10월).



References

1. Society of Fire Protection Engineers, “SFPE handbook of fire protection engineering”, 3rd Edition, NFPA, Quincy, USA (2002).
2. National Fire Protection Association, “NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection System”, 2000 Edition, NFPA, Quincy, USA (2000).
3. NFSC 104A, “National Fire Safety Code for Water Mist Fire Extinguishing System” (2021).
4. I. S. Voytkov, R. S. Volkov, N. P. Koplov, E. Yu.Syshkina, A. V. Tomilin, P. A. Strizhak, “Impact of scattered radiation on thermal radiation shielding by water”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 154, pp. 278–290 (2021).
<http://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.034>
5. W. C. Park, “The Latest Fire Suppression System”, DongHwa Technology Publishing Co., Republic of Korea (2014).
6. M. B. Dickinson, C. E. Wold, B. W. Butler, R. L. Kremens, D. Jimenez, P. Sopko, J. J. O'brien, “The Wildland Fire Heat Budget – using Bi-directional Probes to Measure Sensible Heat Flux and Energy in Surface Fires“. *Sensors* 21 (6), 2035 (2021).
<http://dx.doi.org/10.3390/s21062135>
7. L. A. Dombrovsky, S. Dembele, J. X. Wen, I. Sikic, “Two-step method for radiative transfer calculations in a developing pool fire at the initial stage of its suppression by a water spray”, *International*

- Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 127, Part B, pp. 717-726 (2018). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.095>
8. X. Fang, H. Wang, J. Tao, C. Sheng, 2 “Analysis on Radiation Heat Transfer and the Associated Ignition during Forest Fire Spread”, *Scientia Silvae Sinicae* Vol. 55, Issue (3), pp. 97-105 (2019). <http://dx.doi.org/10.11707/j.1001-7488.20190311>
 9. J. J. Tao, “Study on the transition mechanism for broadleaf foliage from smoldering to flaming combustion under external radiant heat flux”, *Biomass Conversion Biorefinery* Vol. 10, pp. 765 - 773 (2020). <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-019-00500-7>
 10. J. D. Lee, J. Y. Ryu, S. W. Park, M. O. Yoon, C. W. Lee, “Study on the Evaluation of Radiant Heat Effects of Oil Storage Tank Fires Due to Environmental Conditions”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 72-78 (2020). <http://doi.org/10.7731/KIFSE.2020.34.1.072>
 11. G. Atkinson, S. Coldrick, S and Gant, L. Cusco, “Flammable Vapor Cloud Generation from Over Filling Tanks: Learning the lessons from Buncefield Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, Vol. 35, pp. 329-338 (2015). <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.011>
 12. S. Dembele, J. X. Wen and J. F. Sacadura, “Experimental Study of Water Sprays for the Attenuation of Fire Thermal Radiation”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 534-543 (2001). <https://doi.org/10.1115/1.1371921>
 13. Z. Liu and A. K. Kim, “A Review of Water Mist Fire Suppression

- System-Fundamental Studies”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No 3, pp. 32-50 (1999).
<https://doi.org/10.1177/104239159901000303>
14. J. R. Mawhinney and J. K. Richardson. “A Review of Water Mist Fire Suppression Research and Development”, Fire Technology, Vol. 33, No 1, pp. 54-90 (1997).
15. S. C. Lee, B. J. Kim, J. O. Lee, C. H. Park and C. H. Hwang, “An Experimental Study on the Effects of the Shape of a Drencher Head on the Characteristics of a Water Curtain”, Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 86-93 (2016).
<https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.3.086>
16. J. G. Jo and C. Y. Lee, “Examination on Effects of Sprays of Spray Characteristics of Water Mist on Thermal Radiation Attenuation Using Fire Dynamics Simulator”, Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 1-10 (2021). <http://doi.org/10.7731/KIFSE.67a3ae31>
17. H. S. Jeon, “Liquid Atomization”, Munundang Co., Republic of Korea (2009).
18. W. Y. Cheung, “Radiation Blockage of Water Curtains”, International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 9, No. 1, pp., 7-13 (2009).
19. J. V. Murrell, D. Crowhurst and P. Rock, “Experimental Study of the Thermal Radiation Attenuation of Sprays from Selected Hydraulic Nozzles”, In Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, Vol. 95, pp. 369-378 (1995).
20. D. Balner and K. Barcova, “Attenuation of Thermal Radiation

- through Water Mist”, *Process Safety Progress*, Vol. 37, No. 1, pp. 18–24 (2018). <https://doi.org/10.1002/prs.11904>
21. W. K. Chow, E. Y. L. Ma and M. K. K. Ip, “Recent Experimental Studies on Blocking Heat and Smoke by a Water Curtain”, *International Journal on Engineering Performance–Based Fire Codes*, Vol. 10, No. 4, pp. 89–95 (2011).
22. J. G. Jo and C. Y. Lee, “Experimental Study on Thermal Radiation Attenuation Using Water Mist of Twin–Fluid Atomizer”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 24–32 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.67a3ae31>
23. J. S. Kang and C. Y. Lee, “Investigation on Effects of Water Mist Characteristics According to Axial Position on Thermal Radiation Attenuation Performance”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 11–18 (2022). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.32592e18>
24. C. T. Chong and S. Hochgreb, “Effect of Atomizing Air Flow on Spray Atomization of an Internal Mix Twin–fluid Atomizer”, *Atomization and Spray* (2015). <https://doi.org/10.1615/atomizSpr.2015011361>
25. H. Shrigondekar, A. Chowdhury, S. V. Prabhu, “Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 93, pp.441–455 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015>
26. G. H. Ko, “Numerical Study on the Attenuation Effect of Water Mist on Thermal Radiation”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 4, pp. 7–12 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.67dab4d2>

27. A. Jones and P. F. Nolan, "Discussions on the Use of Fire Water Sprays or Mist for Fire Suppression", *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 8, No. 1, pp. 17-22 (1995).
[https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)90057-V](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)90057-V)
28. J. G. Jo, "Investigation on Effects of Spray Characteristics for Water Mist of Twin-fluid Nozzle on Thermal Radiation Attenuation", Division of Architectural and Fire Protection Engineering (Major of Fire Protection Engineering), The Graduate School, Pukyong National University (2022).
<https://doi.org/10.1002/prs.12421>

