



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

2유체노즐의 미분무 분사 특성이
복사열 감쇠에 미치는 영향에 대한 연구



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부 (소 방 공 학 전 공)

조 재 근

공 학 석 사 학 위 논 문

2유체노즐의 미분무 분사 특성이
복사열 감쇠에 미치는 영향에 대한 연구

지도교수 이 치 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부 (소 방 공 학 전 공)

조 재 근

조재근의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위 원 장 공학박사 전 준 호 (인) 

위 원 공학박사 최 준 호 (인) 

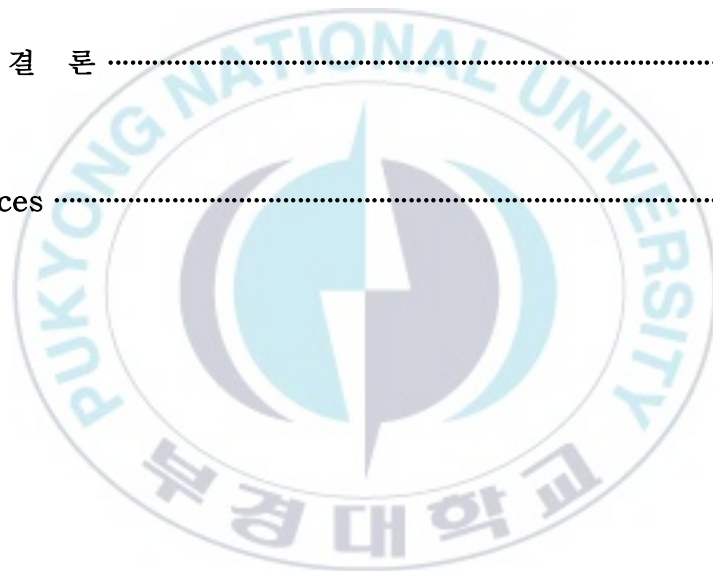
위 원 공학박사 이 치 영 (인) 

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 이론적 배경	5
1.3 기존 연구 동향	10
1.4 연구 목적 및 내용	17
제 2 장 선행 전산시뮬레이션	18
2.1 전산시뮬레이션 조건 및 방법	18
2.1.1 전산시뮬레이션 개략도	18
2.1.2 전산시뮬레이션 조건	20
2.1.3 전산시뮬레이션 결과 처리 방법	22
2.1.4 전산시뮬레이션 격자 크기 및 신뢰성 검토	25
2.2 전산시뮬레이션 결과 및 분석	29
2.2.1 물 공급 유량 영향	29
2.2.2 액적 크기 영향	31

2.2.3 분사각 영향	33
2.2.4 분사 특성에 대한 독립적인 영향	35
제 3 장 2유체노즐 분사 특성 측정 실험	38
3.1 2유체노즐	38
3.1.1 외부혼합형 2유체노즐	40
3.1.2 내부혼합형 2유체노즐	43
3.2 실험 장치 및 방법	49
3.2.1 공급 압력	51
3.2.2 액적 크기	53
3.2.3 분사각 및 분무폭	55
3.2.4 유량 분포	57
3.3 실험 결과 및 분석	60
3.3.1 공급 압력	60
3.3.2 액적 크기	64
3.3.3 분사각 및 분무폭	73
3.3.4 유량 분포	78
제 4 장 미분무 복사열 감쇠 실험	83
4.1 실험 장치 및 방법	83
4.1.1 실험 장치	83

4.1.2 실험 조건 및 방법	85
4.2 실험 결과 및 분석	88
4.2.1 물 및 공기 공급 유량 영향	88
4.2.2 분사 특성에 대한 독립적인 영향	97
4.2.2.1 물 공급 유량에 대한 독립적인 영향	97
4.2.2.2 액적 크기에 대한 독립적인 영향	103
 제 5 장 결 론	 109
References	113



List of Tables

Table 1.1 Previous study of thermal radiation attenuation	16
Table 2.1 Summary of numerical simulation conditions	21
Table 3.1 Summary of twin-fluid nozzles	39
Table 3.2 Summary of supply pressure measurement results for twin-fluid nozzle	61
Table 3.3 Summary of droplet size measurement results for twin-fluid nozzle	66
Table 3.4 Summary of spray angle and spray width measurement results for twin-fluid nozzle	74
Table 3.5 Summary of flow distribution measurement conditions for twin-fluid nozzle	79
Table 4.1 Summary of water flow rate and air flow rate conditions for twin-fluid nozzle	86
Table 4.2 Summary of thermal radiation attenuation for twin-fluid nozzle	90
Table 4.3 Summary of dependency of water flow rate effect (SMD)	98
Table 4.4 Summary of dependency of water flow rate effect (VMD)	101
Table 4.5 Summary of dependency of SMD effect	104
Table 4.6 Summary of dependency of VMD effect	107

List of Figures

Figure 1.1 Status of fire occurrence according to fire place (2010-2019).	3
Figure 1.2 Applications of thermal radiation attenuation by water mist.	4
Figure 1.3 Schematic of thermal radiation attenuation by water mist.	7
Figure 1.4 Schematic of thermal radiation attenuation principle by water droplet.	8
Figure 1.5 Schematic diagrams and photos of various nozzle for water spray.	9
Figure 1.6 Previous study of thermal radiation attenuation for single-fluid nozzle.	14
Figure 1.7 Previous study of thermal radiation attenuation for drencher head.	15
Figure 2.1 Schematic of numerical simulation.	19
Figure 2.2 Exemplified numerical simulation result for data reduction (Droplet size = 100 μm , water flow rate = 2 L/min, spray angle = 120°).	24
Figure 2.3 Dependency of thermal radiation attenuation on mesh cell size.	27
Figure 2.4 Comparison of thermal radiation attenuation between numerical simulation and previous experimental data.	28
Figure 2.5 Effect of water flow rate on thermal radiation attenuation.	30
Figure 2.6 Effect of droplet size on thermal radiation attenuation.	32

Figure 2.7 Effect of spray angle on thermal radiation attenuation.	34
Figure 2.8 Changes of peak and average thermal radiation attenuations with parametric ratio.	37
Figure 3.1 Photo of external mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).	41
Figure 3.2 Schematic diagram of external mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).	42
Figure 3.3 Photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).	45
Figure 3.4 Schematic and photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).	46
Figure 3.5 Photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 70°).	47
Figure 3.6 Schematic and photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 70°).	48
Figure 3.7 Schematic diagram of spray characteristics measurement.	50
Figure 3.8 Photo of pressure measurement.	52
Figure 3.9 Photo of PDPA.	54
Figure 3.10 Experimental set-up of water mist visualization.	56
Figure 3.11 Experimental set-up of flow distribution measurement.	58
Figure 3.12 Flow distribution measurement result for Large_ITN20 (Water flow	

rate = 700 g/min, air flow rate = 100 L/min).	59
Figure 3.13 Supply pressure measurement data under various water flow rate conditions.	62
Figure 3.14 Supply pressure measurement data under various air flow rate conditions.	63
Figure 3.15 SMD measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.	67
Figure 3.16 SMD measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.	68
Figure 3.17 SMD measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.	69
Figure 3.18 VMD measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.	70
Figure 3.19 VMD measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.	71
Figure 3.20 VMD measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.	72
Figure 3.21 Visualization of water mist for Small_ETN20 and Large_ETN20.	75
Figure 3.22 Visualization of water mist for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.	76

Figure 3.23 Visualization of water mist for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.	77
Figure 3.24 Flow distribution measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.	80
Figure 3.25 Flow distribution measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.	81
Figure 3.26 Flow distribution measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.	82
Figure 4.1 Photo and schematic diagram of thermal radiation attenuation experimental set-up.	84
Figure 4.2 Exemplified experimental result of Small_ITN70 for data reduction (Water flow rate = 300 g/min, air flow rate = 50 L/min).	87
Figure 4.3 Thermal radiation attenuation for Small_ETN20 and Large_ETN20. ..	91
Figure 4.4 Thermal radiation attenuation for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.	93
Figure 4.5 Thermal radiation attenuation for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.	95
Figure 4.6 Dependency of water flow rate effect (Spray angle = 20°, SMD constant).	99
Figure 4.7 Dependency of water flow rate effect (Spray angle = 20°, VMD	

constant).	102
Figure 4.8 Dependency of SMD effect (Spray angle = 20°, water flow rate constant).	105
Figure 4.9 Dependency of VMD effect (Spray angle = 20°, water flow rate constant).	108



Investigation on Effects of Spray Characteristics for Water Mist of
Twin-fluid Nozzle on Thermal Radiation Attenuation

Jae Geun Jo

Division of Architectural and Fire Protection Engineering
(Major of Fire Protection Engineering), The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In this study, the effects of spray characteristics for water mist of twin-fluid nozzles on thermal radiation attenuation was investigated numerically and experimentally. For numerical simulations, the effects of spray characteristics (i.e., water flow rate, droplet size, and spray angle) of water mist on peak and average thermal radiation attenuation were examined preliminarily using fire dynamics simulator (FDS). Then, experiments of spray characteristics of twin-fluid nozzles and their thermal radiation attenuation performance were conducted. As the twin-fluid nozzles, the external and internal mixing types were tested. For the spray characteristics, the supply pressure, droplet size, spray angle, spray width, and flow distribution were measured. The supply pressures of water and air were 1.3–59.6 and 29.8–316.1 kPa, respectively. The SMD (Sauter Mean Diameter) and VMD (Volume Median Diameter, $Dv_{0.5}$) were 19.9–99.4 and 21.1–107.6 μm , respectively. Through the visualization, the spray angle and spray width were measured. The spray width were approximately 200 and 300–320 mm for spray angles of 20° and 70°, respectively. From the flow distribution measurement, it was found that spray patterns of twin-fluid nozzles were full cone. Finally, the thermal radiation

attenuation on water mist of twin-fluid nozzles were measured under various water and air flow rate conditions. Under the present experimental conditions, the thermal radiation attenuation of twin-fluid nozzles were measured to be 6.9–52.4%. As the water flow rate and spray angle increased while the droplet size decreased, the thermal radiation attenuation increased. Based on the experimental data, the separate effects of water flow rate and droplet size on thermal radiation attenuation were investigated. In the present experimental range, the thermal radiation attenuation was proportional to water flow rate to the power of 0.32 and to the power of 0.33 under nearly constant SMD and VMD conditions, respectively. In addition, the thermal radiation attenuation was proportional to SMD to the power of -0.59 and VMD to the power of -0.53 for droplet size under nearly constant water flow rate conditions. Based on these results, the droplet size affected more significantly the change in thermal radiation attenuation than the water flow rate.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 산업시설에서의 화재 발생 빈도 및 피해액이 높은 수준이며, Figure 1.1에 나타낸 바와 같이 최근 10년(2010—2019년) 간의 화재 통계⁽¹⁾를 검토하였을 때 전체 화재 발생 426,521건 중 산업시설의 화재 발생이 55,011건(13%)으로 주거시설 111,254건(26%) 다음으로 많이 발생하였다. 한편, 산업시설 중 위험물 시설에서 화재가 발생할 경우 큰 인명 및 재산 피해가 예상된다. 화재가 진행됨에 따라 플래시오버(flashover)가 발생하는 최성기 화재에서는 강렬한 복사열로 인해 연소 확대의 위험성이 높고 인접 건물로 화염이 확산될 수 있다. 따라서 위험물 시설의 화재 안전성을 확보하기 위해 화원(fire source)으로부터 방출되는 복사열(thermal radiation)을 효과적으로 감소시키는 방법으로 미분무(water mist)를 이용할 수 있다.

미분무는 노즐(nozzle)을 통해 최소설계압력 조건에서 방사된 물입자 중 99%의 누적체적분포가 400 μm 크기 이하로 방사되는 것을 의미한다⁽²⁾. 일반적으로 미분무는 기존의 수계소화설비(예를 들면, 스프링클러소화설비)에 비해 물 소모량이 적으며 수손에 의한 피해가 적다⁽³⁾. 한편, 미분무는 다양한 종류의 화재 상황(즉, A, B, C급 화재)에 대해 직접적인 화재 진압뿐 아니라 노즐로부터 방사된 액적에 의한 복사열 감쇠 효과로 연료 탱크, 문화재 및 위험물 시설, 그 밖의 화재에 민감한 위험 시설의 안전성을 증대시킬 수 있다⁽⁴⁻⁷⁾. Figure 1.2에 위험물 및 문화재에 미분무를 적용한 사례 관련 사진을 나타내었다. 앞서 살펴본 바와 같이, 미분무에 의한 위험물 시설의 화재 방호 성능을 확보하고, 미분무 설비가 다양한 화재 안전 분야에

적용하기 위해서는 미분무의 복사열 감쇠 성능에 대한 연구가 반드시 수행
되어야 하고, 이를 극대화하기 위한 연구가 활발하게 수행될 필요가 있다.



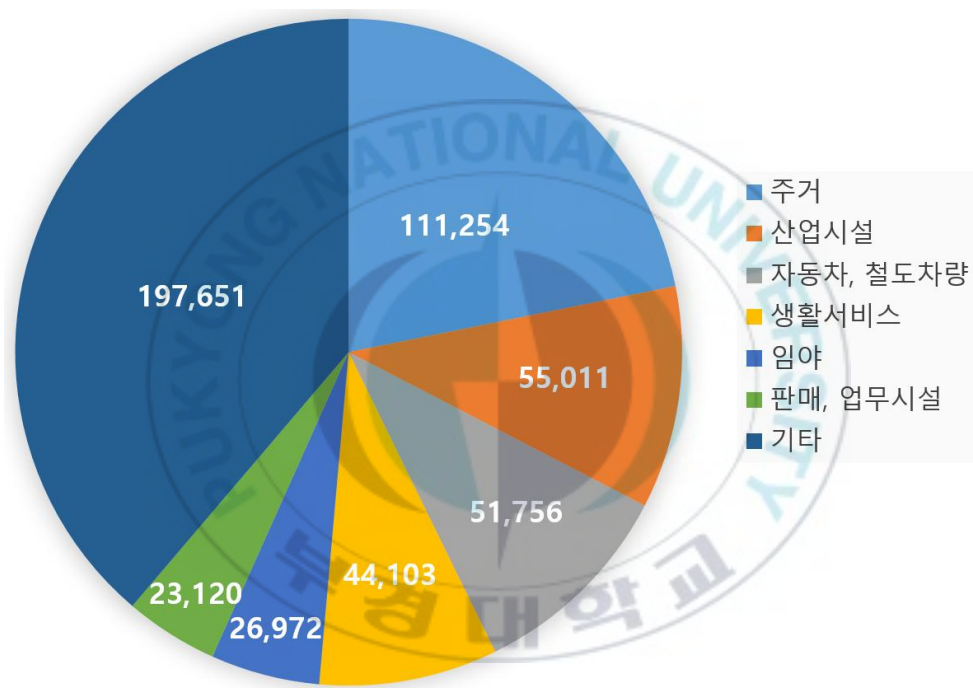


Figure 1.1 Status of fire occurrence according to fire place (2010-2019)⁽¹⁾.



(a) Oil storage tank⁽⁸⁾



(b) Heritage⁽⁹⁾

Figure 1.2 Applications of thermal radiation attenuation by water mist.

1.2. 이론적 배경

미분무의 복사열 감쇠 원리를 파악하기 위해서 Figure 1.3에 미분무의 복사열 감쇠 개략도⁽¹⁰⁾를 나타내었다. 노즐 또는 헤드(head)로부터 미분무가 생성되고, 이를 통해 방사된 미분무가 수막(water curtain)을 형성하게 된다. Figure 1.4에 나타낸 바와 같이 수막을 이루는 물 액적(droplet)에 의해 화재 및 화원으로부터 방사된 복사열이 흡수(absorption) 및 산란(scattering) 되는 현상이 발생하며, 이를 통해 복사열이 감쇠될 수 있다.

복사열 감쇠를 위해 미분무를 형성하는 노즐의 종류로는 단일유체노즐(single-fluid nozzle), 드렌처 헤드(drencher head), 2유체노즐(twin-fluid nozzle) 등이 있고, 노즐 관련 사진 및 개략도를 Figure 1.5에 나타내었다. 단일유체노즐은 한 종류의 액체를 이용하여 높은 속도 및 압력으로 오리피스(orifice)에 통과시켜 미분무를 형성하게 되고, 드렌처 헤드는 반사판에 물을 충돌시켜 물분무를 형성하게 된다. 두 종류의 유체(즉, 기체와 액체)를 이용하는 2유체노즐은 기체를 액체에 충돌하여 단일유체노즐에 비해 비교적 낮은 압력으로 미분무를 형성한다는 장점이 있다. 또한, 2유체노즐은 혼합 위치(즉, 액체와 기체가 최초로 만나는 지점) 또는 액체와 기체의 혼합이 분출 직전 및 직후 발생 여부에 따라 내부혼합형(internal mixing type) 및 외부혼합형(external mixing type)으로 구분할 수 있다⁽¹¹⁻¹³⁾. 내부혼합형의 경우, 노즐 내부(예를 들면, 혼합실)에서 액체와 기체가 혼합하여 미분무를 형성하게 되고, 외부혼합형의 경우, 노즐 외부에서 액체 및 기체가 충돌하여 미분무를 형성하게 된다⁽¹³⁾. 따라서 이러한 노즐을 통해 일정한 양의 액체를 다수의 액적으로 분할시키는 과정이 이루어지는데, 이를 미립화(atomization)라고 한다^(11,12). 액체의 미립화를 통해 액체의 전체 표면적이 증가하며, 주변 기체와 액적 간의 상호 작용을 기대할 수 있다.

한편, 미분무를 이용한 복사열 감쇠에 영향을 미치는 인자(factor)는 다음과 같다.

- (1) 화원 특성
- (2) 노즐 종류
- (3) 공급 유량 및 압력
- (4) 미분무 액적 크기
- (5) 분사각, 분무폭
- (6) 유량 분포

이러한 인자들은 복사열 감쇠에 지대한 영향을 미친다. 본 연구에서는 미분무 분사 특성(예를 들면, 공급 압력, 액적 크기, 분사각, 분무폭, 유량 분포)을 측정하고, 이를 통해 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각이 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하였다.

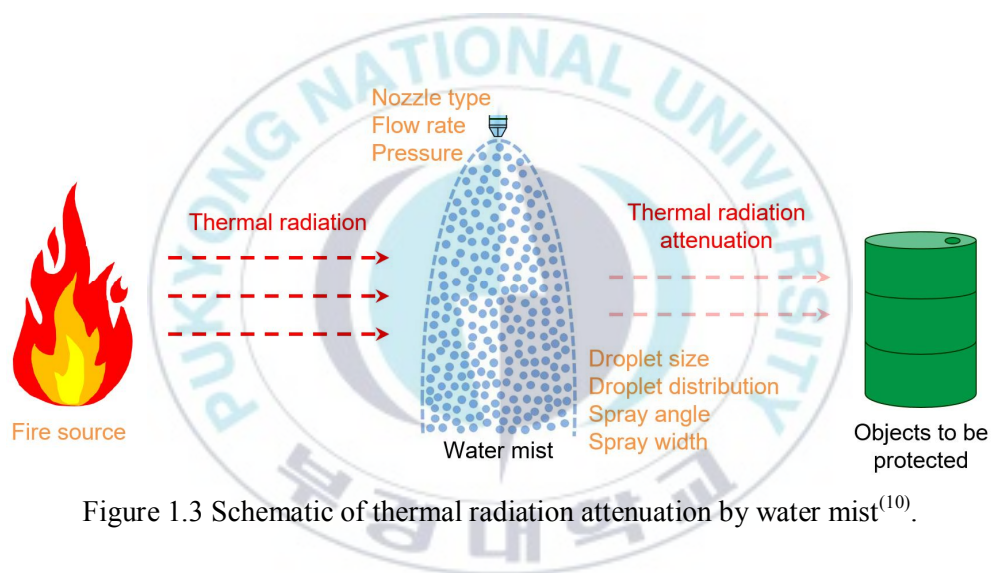


Figure 1.3 Schematic of thermal radiation attenuation by water mist⁽¹⁰⁾.

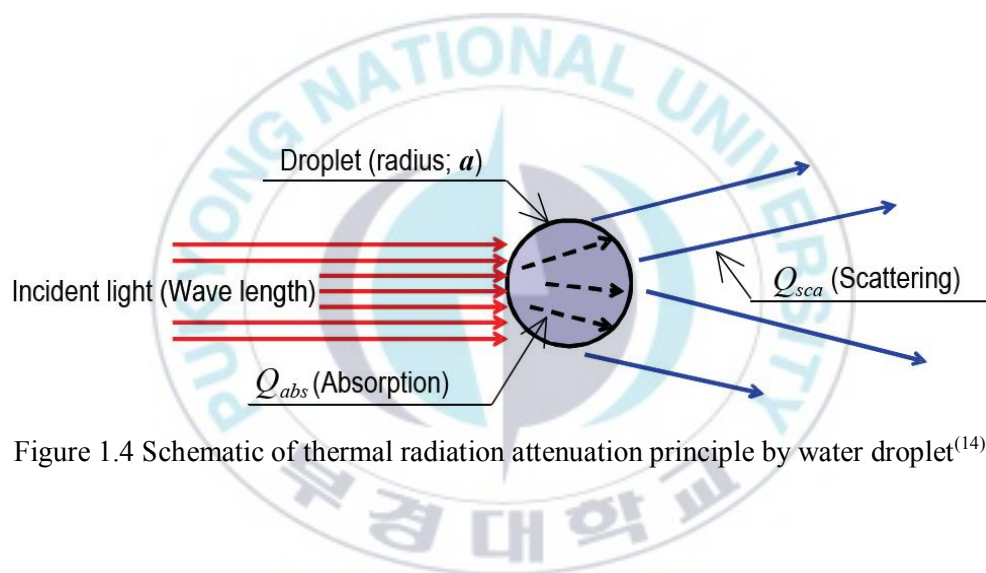
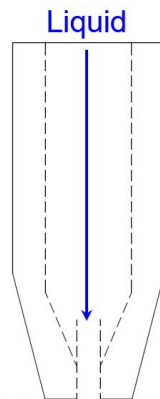
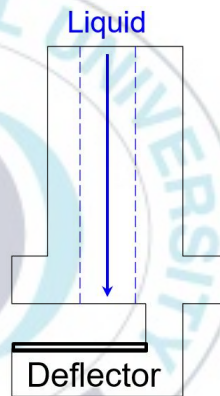
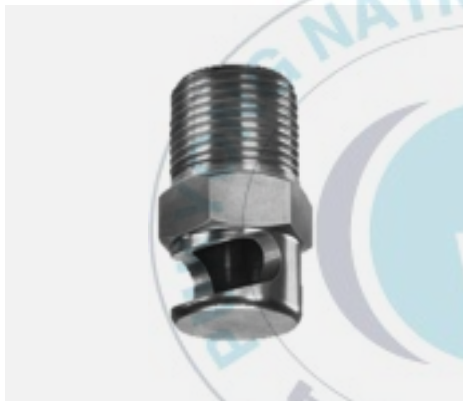


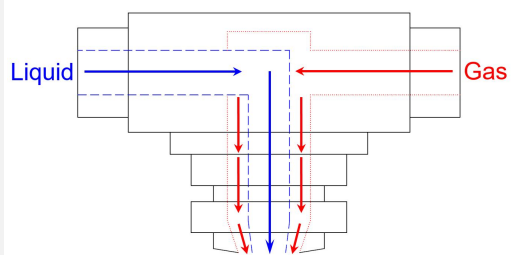
Figure 1.4 Schematic of thermal radiation attenuation principle by water droplet⁽¹⁴⁾.



(a) Single-fluid nozzle⁽¹⁵⁾



(b) Drencher head⁽¹⁵⁾



(c) Twin-fluid nozzle⁽¹⁶⁾

Figure 1.5 Schematic diagrams and photos of various nozzle for water spray.

1.3 기존 연구 동향

기존에 미분무와 물분무를 이용한 복사열 감쇠 성능에 대한 연구가 일부 수행된 바 있다^(5,17-22). 일반적으로 미분무 분사 특성(예를 들면, 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각, 오리피스 크기)에 따른 복사열 감쇠 성능을 확인하였고, 전체적인 경향을 보고하였다. 복사열 감쇠 연구는 크게 단일유체노즐과 드렌치 헤드를 이용한 연구로 구분할 수 있고 다중 분사 노즐(multi-injector nozzle)을 이용한 연구가 일부 수행된 바 있다.

Figure 1.6에 단일유체노즐을 이용한 복사열 감쇠 결과 예시를 나타내었다. Dembele 등⁽⁵⁾은 2종류의 단일유체노즐을 사용하여 복사열 감쇠 실험을 수행하였고 노즐 종류, 액적 크기, 공급 압력, 물 공급 유량이 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과, 노즐의 압력과 물 공급 유량이 증가함에 따라 액적 크기가 작아지고 복사열 감쇠가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 물 공급 유량 조건에서 단일 스프레이 노즐을 통해 더 미세한 액적이 분사되는 경우 복사열 감쇠 성능이 더 높게 나타난다고 보고하였다.

Murrell 등⁽¹⁷⁾은 3종류의 중실원추형(full cone)과 1종류의 중공원추형(hollow cone) 노즐, 총 4종류의 노즐을 이용해 복사열 감쇠 성능에 대한 실험을 수행하였고 각 노즐의 복사열 감쇠 성능을 비교하였다. 노즐의 공급 압력이 증가함에 따라 물 공급 유량이 증가, 액적 크기가 감소하였는데 이로 인해 복사열 감쇠 성능이 증가한다고 보고하였다. 복사열 감쇠율은 2.8-35.5%로 나타났다.

Balner와 Barcova⁽¹⁸⁾는 히터(heater)와 열유속계 사이에 다양한 분사 특성의 미분무 수막을 분사하여 복사열 감쇠 성능을 측정하였다. 그 결과, 오리피스 직경이 증가함에 따라 액적 크기가 증가하였고 복사열 감쇠율이 증

가하였다. 실험 결과를 토대로 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대해 높은 물 공급 유량과 수막을 이루는 넓은 유량 분포(즉, 분무폭)가 액적 크기에 비해 복사열 감쇠가 더 크게 변화할 수 있다고 보고하였다. 해당 연구에서 복사열 감쇠율은 15.2–51.2%로 나타났다.

Ko⁽¹⁹⁾는 미분무가 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대해 FDS (Fire dynamics simulator)를 이용하여 확인하였다. Murrell 등⁽¹⁷⁾의 연구를 바탕으로 전산시뮬레이션을 구축 및 수행하였고 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각 등의 분사 특성에 대한 복사열 감쇠 영향을 확인하였다. 그 결과, 물 공급 유량 및 분사각이 증가하고, 액적 크기가 감소할수록 복사열 감쇠가 증가하는 경향을 확인하였다.

Figure 1.7에 드렌처 헤드를 이용한 복사열 감쇠 성능 결과 예시를 나타내었다. Cheung⁽²⁰⁾은 프로판올 풀화재(propanol pool fire) 조건에서 드렌처 헤드를 통해 형성된 수막이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과, 공급 압력이 4 bar에서 6 bar로 증가하는 경우, 복사열 감쇠 성능은 약 36%에서 57%로 증가하였고, 물 공급 유량이 1.02 L/s에서 1.30 L/s로 증가하는 경우, 복사열 감쇠 성능은 31.8%에서 59.2%로 약 2배 증가한다고 보고하였다. 이를 통해 화원 크기, 물 공급 유량, 공급 압력 및 분사 속도가 증가할수록 복사열 감쇠 성능이 증가하고, 노즐의 직경이 작을수록 분사되는 액적 크기가 감소할수록 복사열 감쇠 성능이 효과적으로 나타난다고 보고하였다.

Chow 등⁽²¹⁾은 3종류의 드렌처 헤드를 이용하여 복사열 감쇠 성능과 연기 및 독성 가스 차단 효과 실험을 수행하였다. 노즐 종류, 오리피스 직경, 공급 유량 및 압력에 따른 복사열 감쇠 성능을 확인하였다. 그 결과, 복사열 감쇠 성능은 68–75.6%로 나타났다.

Lee 등⁽²²⁾은 드렌처 헤드의 특성(예를 들면, 오리피스의 직경, 반사판의

거리, 반사판의 직경)의 변화에 따른 실험을 수행하였고, 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하였다. 복사열 감쇠 성능은 12–26%로 관찰되었다고 보고하였다.

다중 분사 노즐을 이용한 연구의 경우, Zhu 등⁽²³⁾은 다중 분사 노즐을 사용하여 복사열 감쇠 성능 실험을 수행하였고, 실험 결과를 이용하여 전산 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 공급 압력이 증가할수록 액적 크기가 감소하며, 공급 유량과 수막의 두께가 증가함에 따라 복사열 감쇠 성능이 증가한다고 보고하였다. 앞서 살펴본 기존 복사열 감쇠 연구들을 정리하여 Table 1.1에 나타내었다.

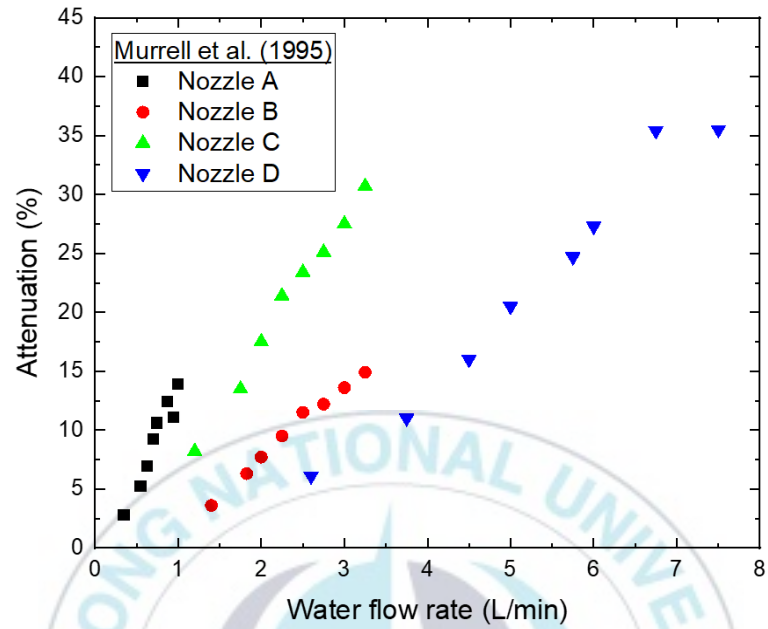
기존 연구 동향을 검토한 결과, 복사열 감쇠 성능은 물 공급 유량 및 분사각이 증가하고, 액적 크기가 감소할수록 복사열 감쇠가 증가하는 경향을 확인하였다. 즉, 복사열 감쇠 성능은 미분무 분사 특성(예를 들면, 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각 등)에 지대한 영향을 받는 것으로 나타났다. 하지만 기존 연구 결과 중 Balner and Barcova⁽¹⁸⁾는 오리피스 직경이 증가함에 따라 액적 크기가 증가하고, 복사열 감쇠가 증가하였다. 이는 기존 복사열 감쇠 연구^(5,17,20,23)를 통해 나타나는 경향과 차이가 있는 것으로 확인하였다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 노즐을 통해 미분무를 분사할 경우 미분무의 분사 조건 및 특성들이 상호 밀접하게 연관되어 있기 때문으로 판단된다. 예를 들면, 노즐의 오리피스를 통해 물의 분사 압력(또는 속도)이 증가하면 물 공급 유량은 증가하고, 액적 크기는 작아지는 경향이 나타난다. 따라서 이러한 조건에서 미분무의 각 분사 특성이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향을 독립적으로 확인하는 것은 한계가 있다고 판단된다. 또한, 실험적으로 이를 확인하는 것은 현실적으로 매우 어렵고, 많은 노력이 필요하다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 2유체노즐을 고려해 볼 수 있다.

2유체노즐은 단일유체노즐에 비해 비교적 낮은 압력에서 고속의 기체를

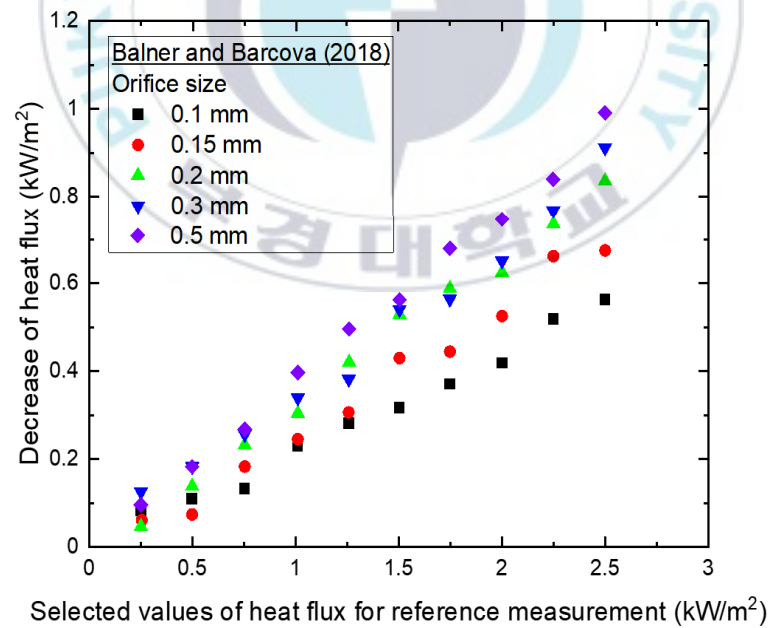
저속의 액체에 충돌하여 미세한 액적을 형성한다^(11,12). 구조적으로 액체와 기체를 각각 분리하여 공급하기 때문에 유체(예를 들면, 액체, 기체) 공급 조건에 따라 다양한 분사 특성을 구현할 수 있고, 분사 조건을 독립적으로 제어할 수 있는 장점이 있다^(11,12). 예를 들면, 물 공급 유량이 일정한 조건에서 공기 공급 유량 변화에 따라 다양한 크기의 액적을 형성할 수 있다. 따라서 이러한 조건에서 액적 크기만이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향을 독립적으로 확인하는 것이 가능하다. 하지만 기존 연구 동향 검토 결과, 2유체노즐을 이용한 복사열 감쇠 연구는 매우 미흡한 것으로 파악되었다.

본 연구자는 기존에 2가지 외부혼합형 2유체노즐을 이용하여 미분무의 분사 특성에 따른 복사열 감쇠 성능을 검토한 바 있다⁽²⁴⁾. 실험을 통해 물 공급 유량, 공기 공급 유량, 액적 크기 등이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향을 비교하고 분석하였다. 또한, 기존 실험 연구⁽¹⁷⁾와 비교를 통해 2유체노즐이 단일유체노즐에 비해 동일한 물 공급 유량 조건에서 복사열 감쇠 성능이 더 높게 나타날 가능성이 있음을 확인하였다.

앞서 살펴본 바와 같이, 미분무의 복사열 감쇠 연구는 대부분 단일유체노즐, 드렌처 헤드를 중심으로 수행되었고, 2유체노즐을 이용한 연구는 제한적으로 수행되었으며 미흡한 실정이다. 따라서 많은 장점을 가지고 있는 2유체노즐을 이용한 복사열 감쇠 연구가 수행되어야 하고, 미분무에 의한 복사열 감쇠 효과를 극대화하기 위해서는 복사열 감쇠에 영향을 미치는 각 미분무 분사 특성들에 대한 독립적인 영향 평가가 필수적이다. 따라서 이에 대한 연구가 체계적으로 수행될 필요가 있다.

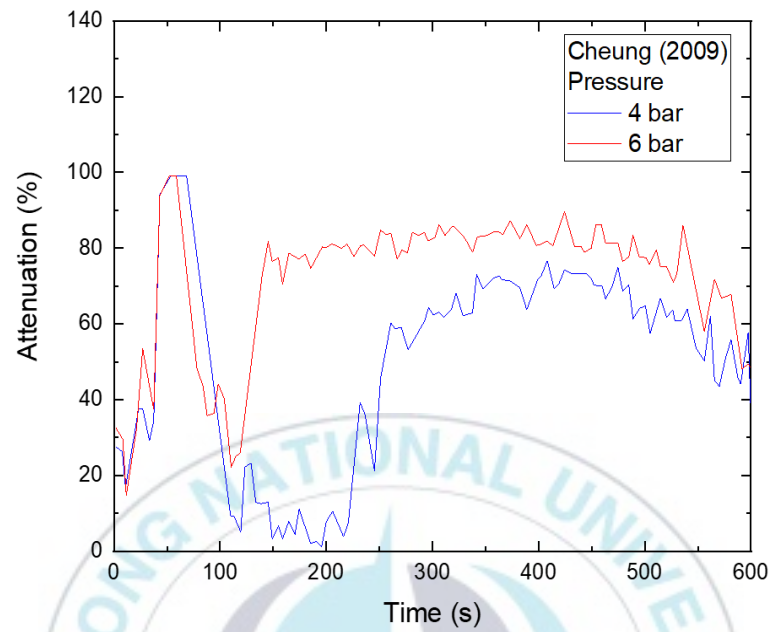


(a) Murrell et al. (1995)⁽¹⁷⁾

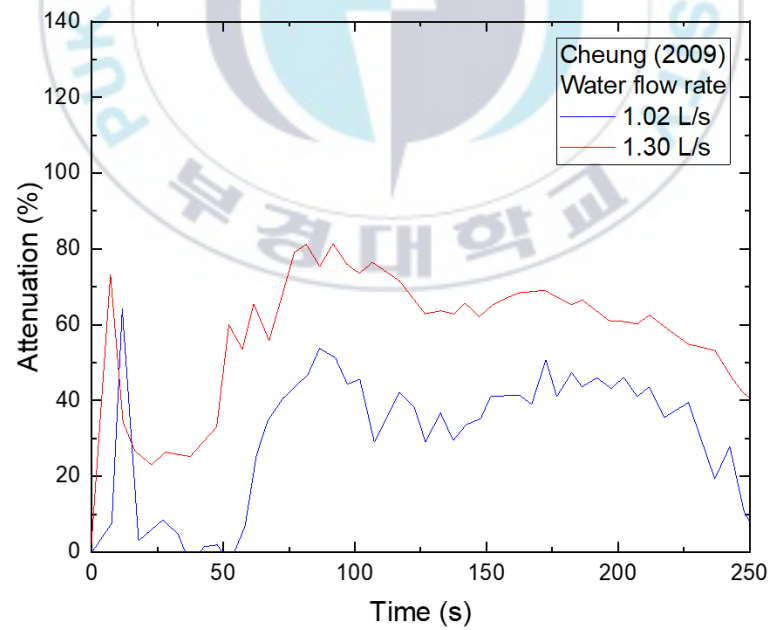


(b) Balner and Barcova (2018)⁽¹⁸⁾

Figure 1.6 Previous study of thermal radiation attenuation for single-fluid nozzle.



(a) Effect of pressure



(b) Effect of water flow rate

Figure 1.7 Previous study of thermal radiation attenuation for drencher head⁽²⁰⁾.

Table 1.1 Previous study of thermal radiation attenuation

Parameter Author	Nozzle type	Orifice size (mm)	Droplet size (μm)	Water flow rate (L/min)	Spray angle ($^\circ$)	Spray width (m)	Pressure (bar)	Fire source type	Fire source size
Murrell et al. (1995)	Single-fluid nozzle	—	93–794 (VMD)	0.35–7.5	—	—	1–8	Radiant heat panel	1 m $\times$ 1 m
Balner and Barcova (2018)	Single-fluid nozzle	0.1–0.5	30–65	0.0629– 0.1638	—	—	70	Radiant heat panel	0.25 m $\times$ 0.2 m
Cheung (2009)	Drencher head	9.5, 11	—	61.2, 69.6, 78	—	—	4–6	Propanol pool fire	41, 160 kW
Chow et al. (2011)	Drencher head	5.2, 8, 13	—	49.8, 89.4, 102	180	—	0.8, 5, 9.7	Propanol pool fire	165 kW
Lee et al. (2016)	Drencher head	12.7	286–350 (VMD)	68.3– 152.72	214	—	1–5	—	—
Zhu et al. (2015)	Multi-injector nozzle	1.0	58–114 (VMD)	10.0–15.5	225	0.35–0.5	10–30	Diesel pool fire	1 m $\times$ 1 m

1.4 연구 목적 및 내용

앞서 기존 연구를 검토한 내용을 토대로 분석한 결과, 미분무 분사 특성이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향에 대해 독립적으로 평가한 연구는 수행된 바 없었고, 2유체노즐을 이용한 연구도 매우 미흡한 실정이다. 따라서 2유체노즐을 이용한 복사열 감쇠 성능 극대화 및 실제 설비에 적용하기 위한 연구가 수행되어야 하고, 각 미분무 분사 특성이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향에 대한 검토가 필수적으로 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 2유체노즐의 미분무 분사 특성이 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문의 연구 순서는 아래와 같다.

2장에서는 전산시뮬레이션을 통해 미분무 분사 특성인 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각이 복사열 감쇠(예를 들면, 위치에 따른 복사열 감쇠율, 최대 및 평균 복사열 감쇠율)에 미치는 영향을 선행적으로 확인하였다.

3장에서는 8종류의 외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 미분무 분사 특성(예를 들면, 공급 압력, 액적 크기, 분사각, 분무폭, 유량 분포)을 측정하였다.

4장에서는 외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 다양한 물과 공기 공급 유량 조건에서 복사열 감쇠 실험을 수행하였고, 실험데이터를 토대로 물 공급 유량, 액적 크기가 복사열 감쇠에 미치는 독립적인 영향에 대해 분석 및 검토하였다.

제 2 장 선행 전산시뮬레이션

2.1 전산시뮬레이션 조건 및 방법

2.1.1 전산시뮬레이션 개략도

본 연구에서는 미분무 분사 특성(예를 들면, 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각)이 복사열 감쇠에 미치는 독립적인 영향을 확인하기 위해 전산시뮬레이션을 구축하였고, 해당 개략도를 Figure 2.1에 나타내었다. 본 연구에서는 전산시뮬레이션의 신뢰성을 검토하기 위해 기존 연구^(17,19)를 대상으로 전산시뮬레이션의 형상 및 조건을 선정하였다. 구획실 전체 크기는 $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}$ (24 m^3)이고, 바닥면을 제외한 모든 면을 개방하였다. 히터(heater) 크기는 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (1 m^2)이며, 표면 온도는 기존 연구⁽¹⁷⁾와 동일하게 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 노즐은 구획실 중앙에 바닥으로부터 높이 2.2 m 위치에 설치하였고, 복사열유속(heat flux)은 바닥으로부터 높이 1.46 m 인 히터 중심 위치에서 0.1 m 간격으로 측정하였다.

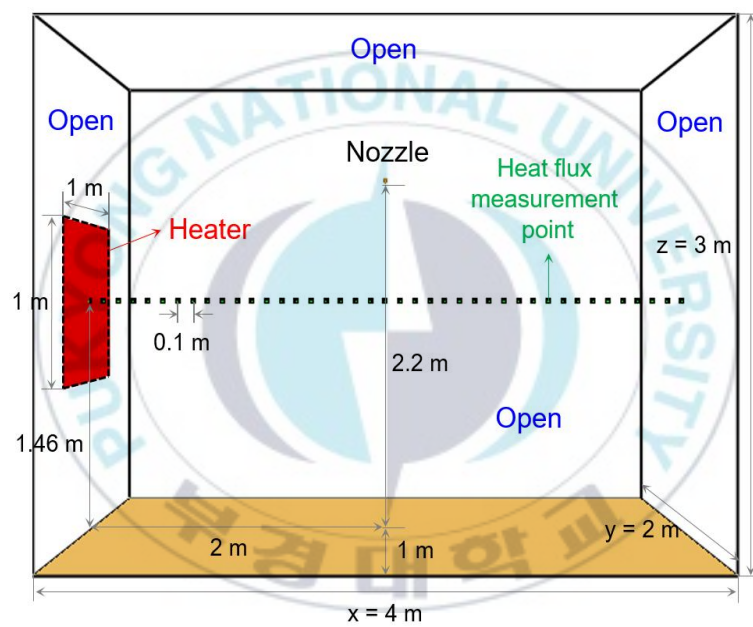


Figure 2.1 Schematic of numerical simulation.

2.1.2 전산시뮬레이션 조건

본 연구에서 설정한 전산시뮬레이션의 조건을 Table 2.1에 나타내었다. 미분무의 분사 특성 중 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각이 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하기 위해 물 공급 유량은 1–3 L/min, 액적 크기는 100–300 μm , 분사각은 60–180° 조건으로 선정하였다. 한편, 분사각의 경우, 노즐 중심축을 기준으로 설정한 분사각이 축 방향 대칭으로 분사되도록 설정하였다. 물 공급 유량이 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하기 위해 액적 크기 200 μm 와 분사각 120°인 조건에서 1, 2, 3 L/min인 경우를 설정하였고, 액적 크기 영향을 확인하기 위해 물 공급 유량 2 L/min과 분사각 120°인 조건에서 100, 200, 300 μm 인 경우를 설정하였으며, 분사각의 영향을 확인하기 위해 액적 크기 200 μm 와 물 공급 유량 2 L/min인 조건에서 60, 120, 180°인 경우에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였다. 노즐로부터 분사되는 미분무의 분사 속도(injection velocity)는 2 m/s로 설정하였다. 히터의 연료는 기존 연구⁽¹⁷⁾와 동일하게 천연가스(natural gas)로 설정하였다. 본 연구에서는 전산시뮬레이션을 수행하기 위해 FDS (Ver. 6.5.3)를 이용하였다.

Table 2.1 Summary of numerical simulation conditions

Parameter	Effect of water flow rate	Effect of droplet size	Effect of spray angle
Water flow rate (L/min)	1, 2, 3	2	2
Droplet size (μm)	200	100, 200, 300	200
Spray angle ($^{\circ}$)	120	120	60, 120, 180
Injection velocity (m/s)	2		

2.1.3 전산시뮬레이션 결과 처리 방법

전산시뮬레이션 결과 처리 방법을 설명하기 위해 Figure 2.2에 액적 크기 100 μm , 물 공급 유량 2 L/min, 분사각 120°인 조건에 대한 전산시뮬레이션 결과를 나타내었다. 모든 전산시뮬레이션 수행 결과는 측정된 복사열 유속이 정상상태(steady state)에 도달한 후의 결과를 평균하였다.

Figure 2.2(a)는 위치에 따른 복사열유속 측정 결과를 나타내고 있다. 미분무를 분사하지 않은 경우(without water mist), 히터로부터 거리가 증가함에 따라 복사열유속이 지속적으로 감소하는 경향이 나타난다. 미분무를 분사한 경우(with water mist), 거리가 증가함에 따라 복사열유속이 지속적으로 감소하는 경향은 동일하나 노즐 중심(즉, 위치 $x = 2 \text{ m}$) 부근에서 복사열유속이 급격하게 감소하는 경향이 나타났다. 즉, 미분무에 의한 복사열 감쇠 효과로 인해 이러한 경향이 관찰되는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 모든 전산시뮬레이션 조건 및 결과에서 유사하게 나타났다.

Figure 2.2(a)에서 확보한 데이터를 바탕으로 Figure 2.2(b)에 위치에 따른 복사열 감쇠율을 나타내었다. 복사열 감쇠율(attenuation, γ)은 식 (1)^(10,17)을 이용하여 계산하였다.

$$\gamma = \frac{U_0 - U}{U_0} \times 100 [\%] \quad (1)$$

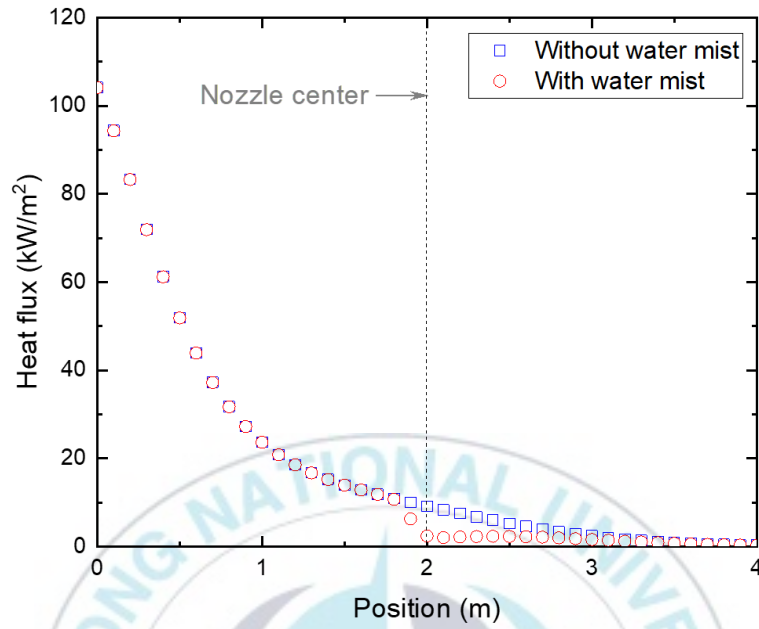
여기서, U_0 와 U 는 각각 미분무를 분사하지 않은 경우와 미분무를 분사한 경우에서의 복사열유속을 의미한다. Figure 2.2(b)를 통해 최대 복사열 감쇠율(peak attenuation)과 평균 복사열 감쇠율(average attenuation)을 도출하여 비교 및 검토하였다. 최대 복사열 감쇠율은 Figure 2.2(b)의 위치에

따른 복사열 감쇠율에서 가장 높은 값(peak)을 의미한다. 한편, 평균 복사열 감쇠율은 위치에 따라 측정된 복사열 감쇠율에 대해 전체 평균한 결과를 의미하며 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

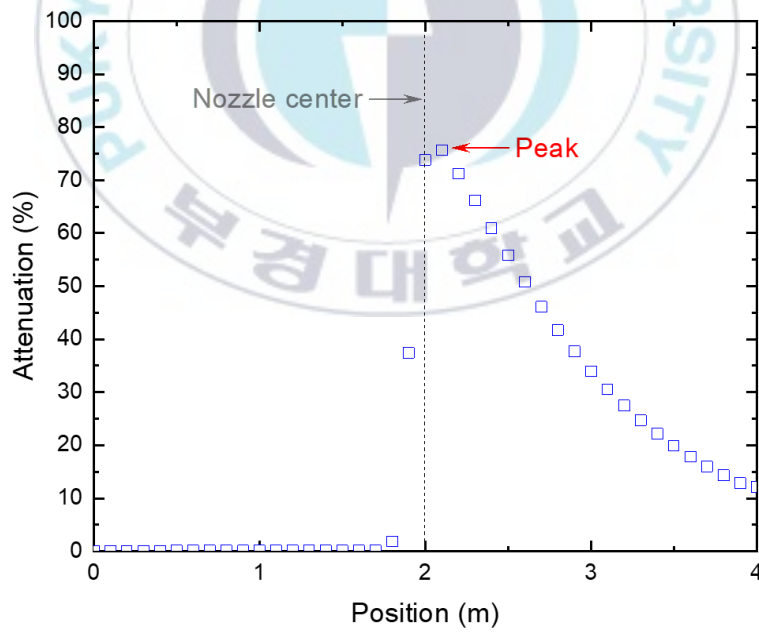
$$\gamma_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_0 - U}{U_0} \times 100 \right)_i [\%] \quad (2)$$

여기서, N 은 데이터 개수(즉, Figure 2.1의 측정 위치 수)를 의미한다.





(a) Thermal radiation heat flux



(b) Thermal radiation attenuation

Figure 2.2 Exemplified numerical simulation result for data reduction
(Droplet size = 100 μm , water flow rate = 2 L/min, spray angle = 120°).

2.1.4 전산시뮬레이션 격자 크기 및 신뢰성 검토

본 연구의 전산시뮬레이션에 적합한 격자 크기 선정을 위해 기존 연구⁽¹⁷⁾에서 사용한 중실원추형 노즐인 Nozzle D를 대상으로 압력 분사 조건이 4 bar인 경우 총 3가지 종류의 격자 크기(즉, 한 변의 길이 0.1, 0.05, 0.033 m)를 사용하여 전산시뮬레이션을 수행하였고, 격자 크기에 따른 복사열 감쇠율 결과를 Figure 2.3에 나타내었다.

Figure 2.3을 통해 격자 크기에 따른 복사열 감쇠율을 비교한 결과 격자 크기가 0.1 m와 0.05 m인 경우 최대 복사열 감쇠율이 유사하게 나타나는 것으로 확인하였고, 격자 크기가 0.033 m인 경우 최대 복사열 감쇠율이 낮게 나타나는 것으로 관찰되었다. 한편, 격자 크기가 0.05 m와 0.033 m인 경우, 노즐 중심을 지난 후 위치에 따른 복사열 감쇠율 경향은 절댓값의 차이는 있으나 전체적으로 유사하게 관찰되었고, 격자 크기 0.1 m인 조건인 경우, 다른 두 격자 크기에 비해 위치에 따른 복사열 감쇠율이 완만하게 감소하는 것으로 관찰되었다.

본 연구에서 격자 크기에 따른 전산시뮬레이션의 신뢰성을 검토하기 위해 기존 실험 결과⁽¹⁷⁾와 본 전산시뮬레이션 결과를 비교하였다. 물 공급 유량과 공급 압력에 따른 복사열 감쇠율 비교 결과를 각각 Figure 2.4(a)와 2.4(b)에 나타내었다. 기존 실험 결과⁽¹⁷⁾와 본 전산시뮬레이션 비교 결과, 본 전산시뮬레이션 및 기존 실험⁽¹⁷⁾ 모두 물 공급 유량과 공급 압력이 증가할수록 복사열 감쇠율은 증가하는 경향이 관찰되었다.

한편, 본 전산시뮬레이션 및 기존 실험 결과⁽¹⁷⁾에 대한 정량적인 차이(δ)를 식 (3)을 통해 도출하였다.

$$\delta = \left| \frac{\gamma_{num} - \gamma_{exp}}{\gamma_{exp}} \right| \times 100 [\%] \quad (3)$$

여기서, γ_{num} 과 γ_{exp} 는 각각 본 전산시뮬레이션 및 기존 실험 연구⁽¹⁷⁾의 복사열 감쇠율 결과를 의미한다. 본 전산시뮬레이션과 기존 실험 결과⁽¹⁷⁾ 간 비교를 통한 정량적 차이를 검토하였을 때 격자 크기 0.1 m인 조건에서 약 29.0–60.0%이며 평균 약 52.9%로 나타났고, 격자 크기 0.05 m인 조건에서 약 1.4–22.0%이며 평균 약 6.4%, 격자 크기 0.033 m인 조건에서 약 32.9–47.0%로 평균 약 39.3%로 계산되었다.

Figure 2.3과 Figure 2.4의 결과를 토대로 전산시뮬레이션의 격자 크기 한 변의 길이 0.05 m인 조건을 설정하였고, 이 때 전산시뮬레이션의 총 격자수는 192,000 개다. Figure 2.4를 통해 본 전산시뮬레이션과 기존 실험 결과⁽¹⁷⁾간 전체적인 데이터의 경향과 수치적 차이를 고려했을 때 본 연구에서 구축한 전산시뮬레이션 방법이 타당하다고 판단된다.

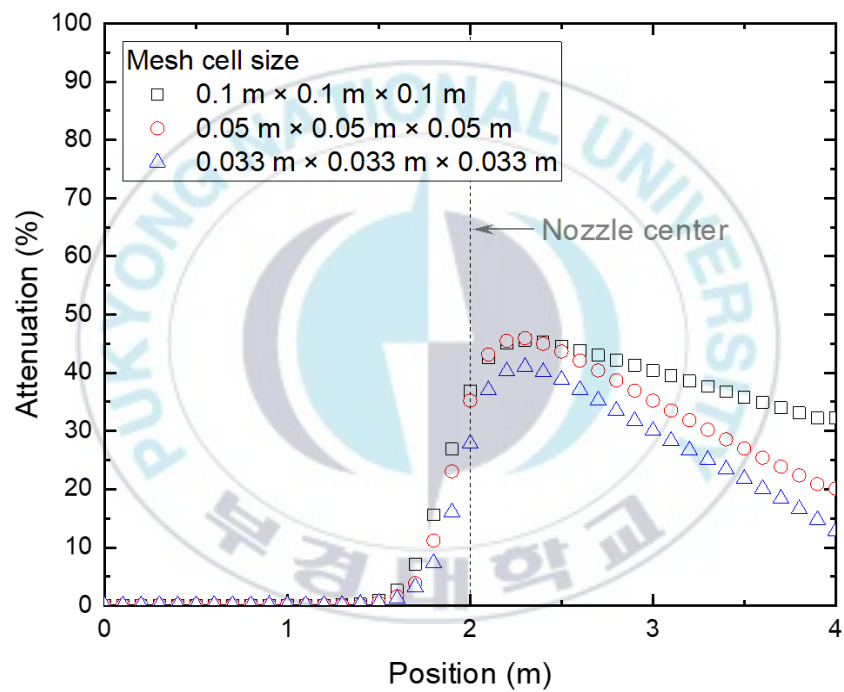
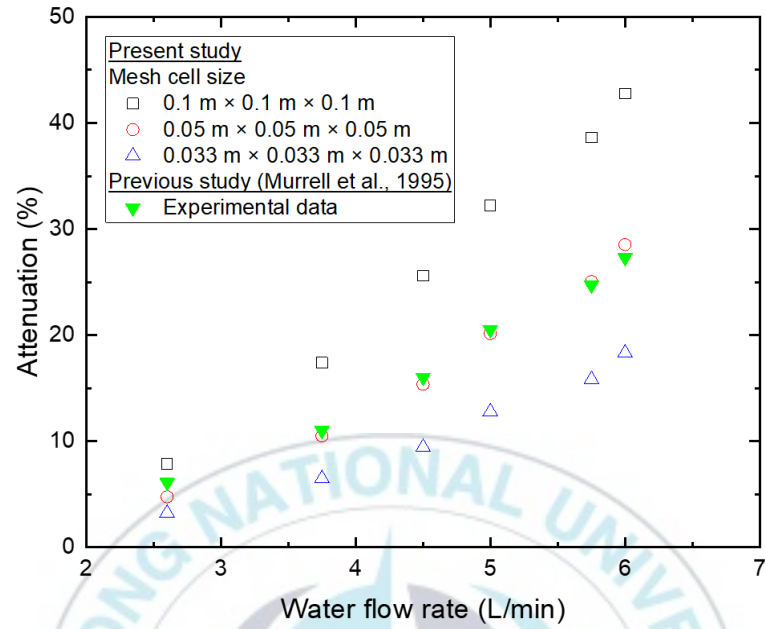
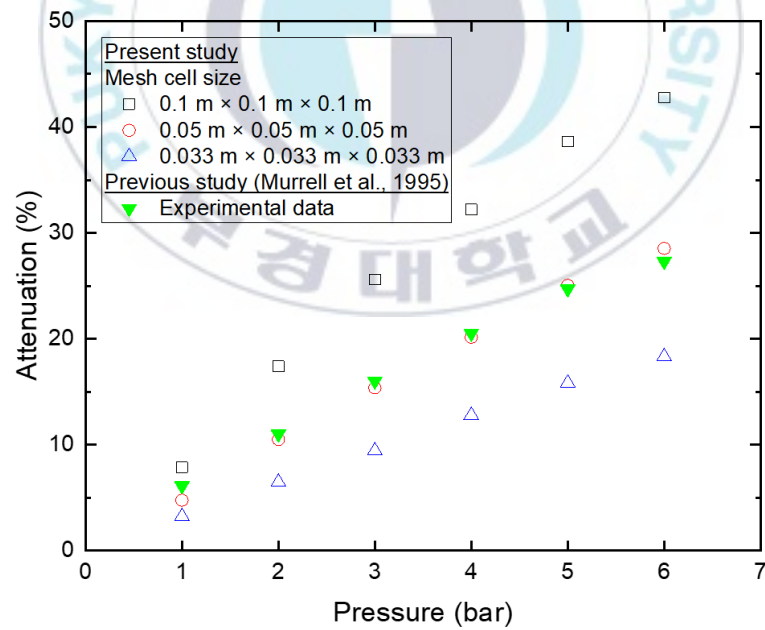


Figure 2.3 Dependency of thermal radiation attenuation on mesh cell size.



(a) Water flow rate effect



(b) Pressure effect

Figure 2.4 Comparison of thermal radiation attenuation between numerical simulation and previous experimental data.

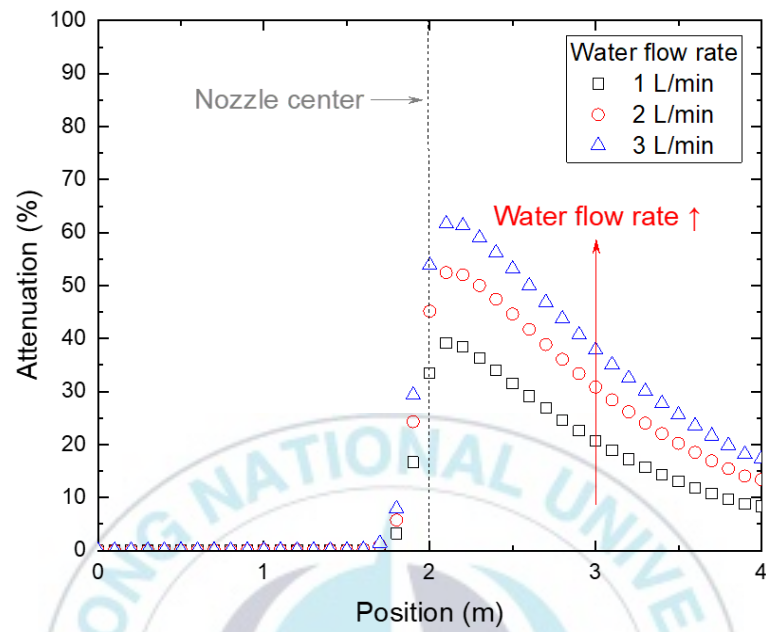
2.2 전산시뮬레이션 결과 및 분석

2.2.1 물 공급 유량 영향

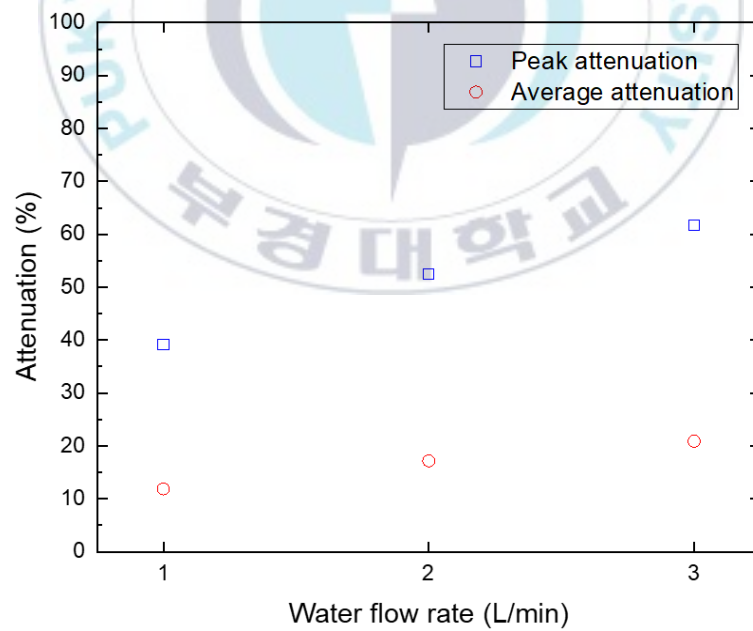
복사열 감쇠율에 대한 물 공급 유량의 영향을 Figure 2.5에 나타내었다. 액적 크기 200 μm , 분사각 120°인 조건에서 물 공급 유량이 1, 2, 3 L/min 인 조건에 대한 복사열 감쇠율을 확인하였다.

Figure 2.5(a)에 위치에 따라 물 공급 유량이 복사열 감쇠율에 미치는 영향을 나타내었다. 노즐 중심 직전 부근에서부터 복사열 감쇠율이 급격히 증가하였고, 노즐 중심을 약간 지난 위치에서 최댓값에 도달한 후, 거리가 증가할수록 복사열 감쇠율이 완만하게 감소하는 경향이 관찰되었다. 물 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타나는데, 이는 물 공급 유량이 증가함에 따라 형성된 수막 내 미분무의 전체적인 표면적이 증가하고, 복사열을 감소할 수 있는 액적 밀도 및 개수가 증가하기 때문으로 판단된다.

Figure 2.5(b)에 물 공급 유량에 대한 최대 및 평균 복사열 감쇠율을 나타내었다. 물 공급 유량이 증가할수록 최대 및 평균 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타나며, 최대 복사열 감쇠율은 약 39.2–61.7%이고, 평균 복사열 감쇠율은 약 11.9–20.9%로 관찰되었다.



(a) Variation of attenuation with position



(b) Peak and average attenuations

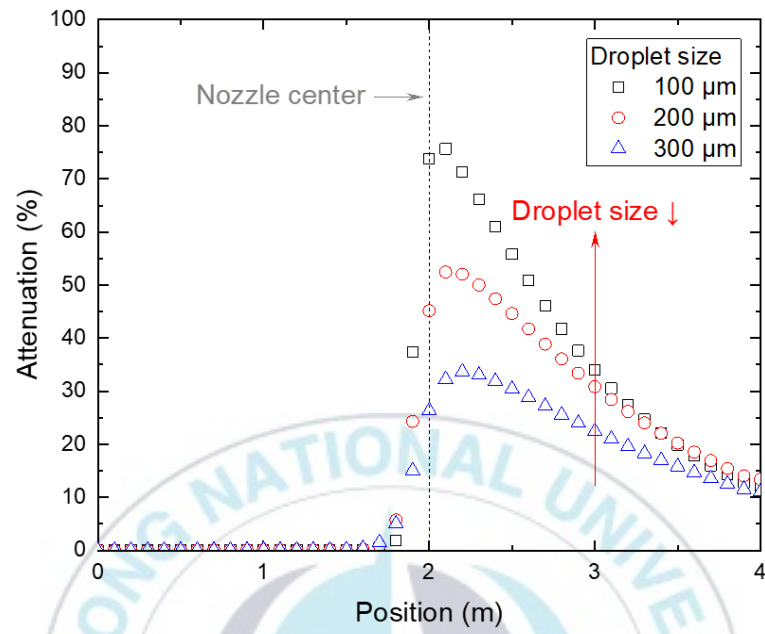
Figure 2.5 Effect of water flow rate on thermal radiation attenuation.

2.2.2 액적 크기 영향

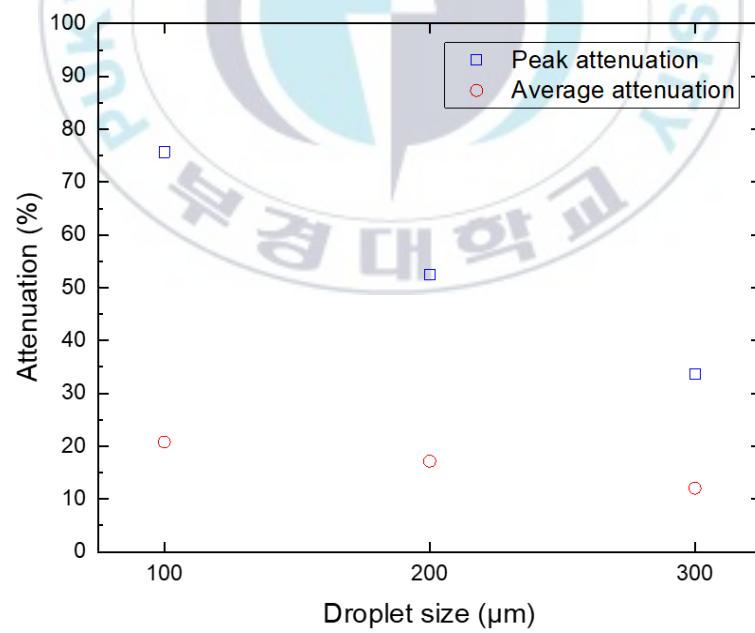
Figure 2.6(a)에 위치에 따라 미분부의 액적 크기가 복사열 감쇠율에 미치는 영향을 나타내었다. 물 공급 유량 영향과 동일하게 노즐 중심 직전부터 복사열 감쇠율이 급격히 증가하며, 노즐 중심을 지난 위치에서 최댓값에 도달한 이후 거리가 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향이 관찰되었다. 액적 크기가 감소할수록 복사열 감쇠율이 증가하였는데, 그 이유는 액적 크기가 감소하게 되면 복사열을 흡수하는 액적의 개수와 표면적이 증가하고, 이와 함께 액적 체류 시간이 증가되기 때문으로 판단된다^(14,19,25). 한편, 노즐 중심 직후 부근에서 액적 크기 영향이 높게 나타났고(즉, 조건에 따라 액적 크기에 의한 복사열 감쇠율의 차이가 크게 관찰되었고), 노즐 중심으로부터 거리가 증가함에 따라 액적 크기 영향은 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 2.6(b)에 액적 크기에 대한 최대 및 평균 복사열 감쇠율을 나타내었다. 액적 크기가 감소할수록 최대 및 평균 복사열 감쇠율은 증가하는 경향이 나타났으며, 액적 크기 변화에 따른 최대 복사열 감쇠율의 변화율이 평균 복사열 감쇠율의 변화율에 비해 크게 나타났다.

본 전산시뮬레이션 조건에서 액적 크기 영향은 최대 복사열 감쇠율의 경우 약 33.7–75.6%이고, 평균 복사열 감쇠율의 경우 약 12.1–20.8%로 측정되었다.



(a) Variation of attenuation with position



(b) Peak and average attenuations

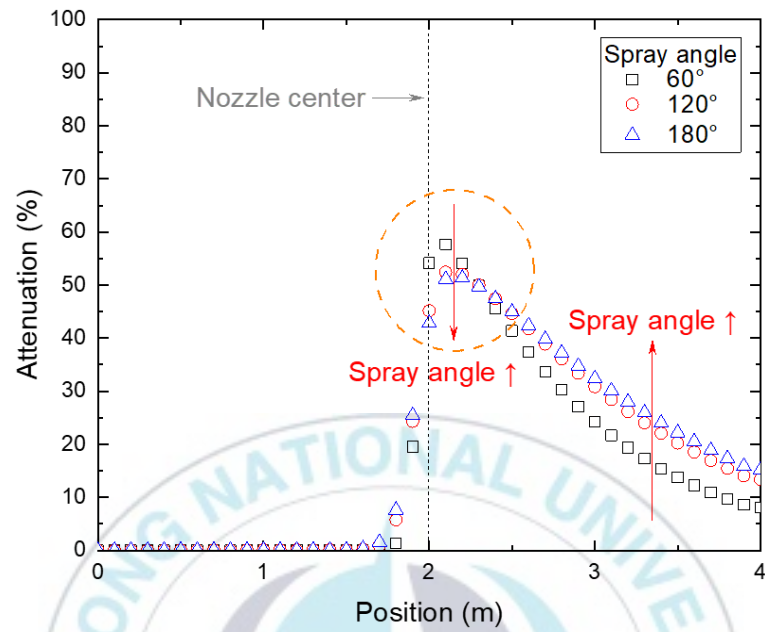
Figure 2.6 Effect of droplet size on thermal radiation attenuation.

2.2.3 분사각 영향

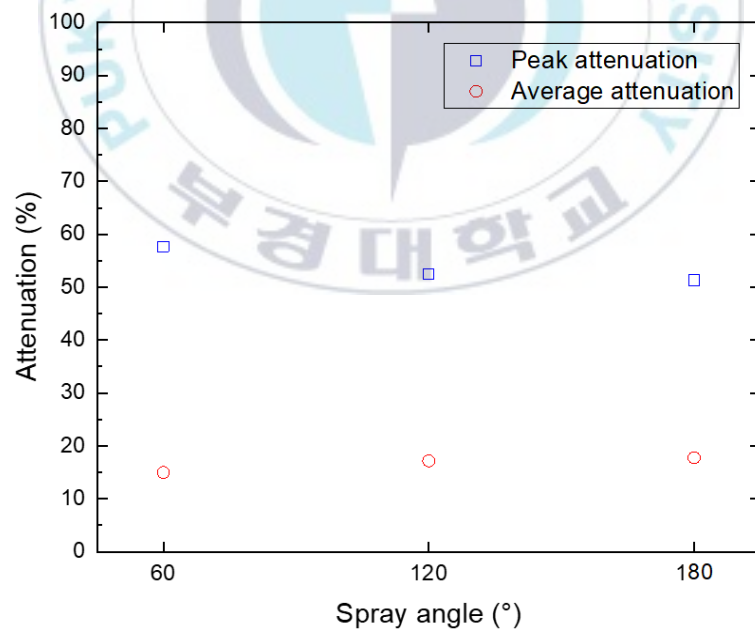
복사열 감쇠율에 대한 분사각의 영향을 Figure 2.7에 나타내었다. 액적 크기 200 μm , 공급 유량 2 L/min인 경우에 대해 분사각 60, 120, 180°인 조건인 경우 복사열 감쇠율을 확인하였다.

Figure 2.7(a)에 위치에 따라 분사각이 복사열 감쇠율에 미치는 영향을 나타내었다. 노즐 중심 직전부터 미분무의 복사열 감쇠율이 증가하였고, 노즐 중심으로부터 약간 지난 위치에서 최댓값에 도달한 후 완만하게 감소하는 전체적인 경향은 Figure 2.5(a) 및 2.6(a)와 동일하게 나타났다. 하지만 위치에 따라 복사열 감쇠율에 미치는 영향이 다른 것으로 관찰되었다. 노즐 중심을 지난 위치에서는 분사각이 감소함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였다. 이는 분사각이 감소할수록 노즐 중심측 위치에서 복사열을 감소할 수 있는 미분무 액적의 밀도가 증가하기 때문으로 판단된다. 반면, 노즐 중심으로부터 일정 거리 이상(즉, 거리가 증가하는 경우) 떨어진 위치에서는 분사각이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 분사각이 증가할수록 분무폭이 증가하기 때문으로 판단된다.

Figure 2.7(b)에 분사각에 따른 최대 및 평균 복사열 감쇠율을 나타내었다. 분사각의 영향은 물 공급 유량 및 액적 크기 영향과 비교하여 다른 경향을 나타내었다. 분사각이 증가할수록 최대 복사열 감쇠율은 감소하였다. 반면, 평균 복사열 감쇠율은 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 이유는 앞서 검토한 바와 같이 분사각이 증가할수록 노즐 중심에서 액적 밀도가 감소하며, 복사열이 감소되는 미분무 경로(즉, 분무폭)가 증가하기 때문으로 판단된다. 본 전산시뮬레이션 조건에서 수행한 결과, 분사각 영향은 최대 복사열 감쇠율의 경우 약 51.3–57.7%이며, 평균 복사열 감쇠율의 경우 약 15.0–17.8%로 관찰되었다.



(a) Variation of attenuation with position



(b) Peak and average attenuations

Figure 2.7 Effect of spray angle on thermal radiation attenuation.

2.2.4 분사 특성에 대한 독립적인 영향

미분무의 분사 특성(물 공급 유량, 액적 크기, 분사각)의 최솟값에 대해 2배, 3배 변화시켜 각 분사 특성에 대한 복사열 감쇠율의 독립적인 영향을 확인하였다. Figure 2.8에 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각 비(ratio) 변화에 따른 복사열 감쇠율의 변화를 나타내었다. x축에는 식 (4)를 사용하여 계산한 각 인자의 변화량 비(parametric ratio, α)로 나타내었고, y축에는 식 (5)를 이용하여 각 인자의 변화에 대한 복사열 감쇠율의 변화(attenuation change, ξ)를 나타내었다.

$$\alpha = \frac{\phi}{\phi_{\min}} \quad (4)$$

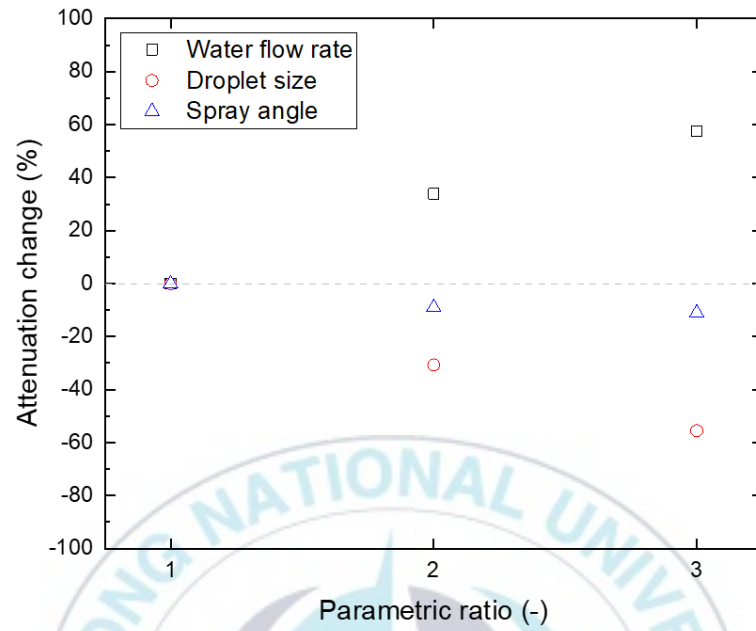
$$\xi = \frac{\gamma - \gamma_{\phi = \min}}{\gamma_{\phi = \min}} \times 100 [\%] \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 미분무의 분사 특성(즉, 액적 크기, 공급 유량, 분사각)을 의미하며 $\phi_{\min}$ 은 각 미분무 분사 특성의 최솟값(즉, 물 공급 유량 1 L/min, 액적 크기 100 μm , 분사각 60°)을 의미한다. $\gamma_{\phi = \min}$ 은 각 미분무의 분사 특성 최솟값인 조건의 경우 복사열 감쇠율을 의미한다.

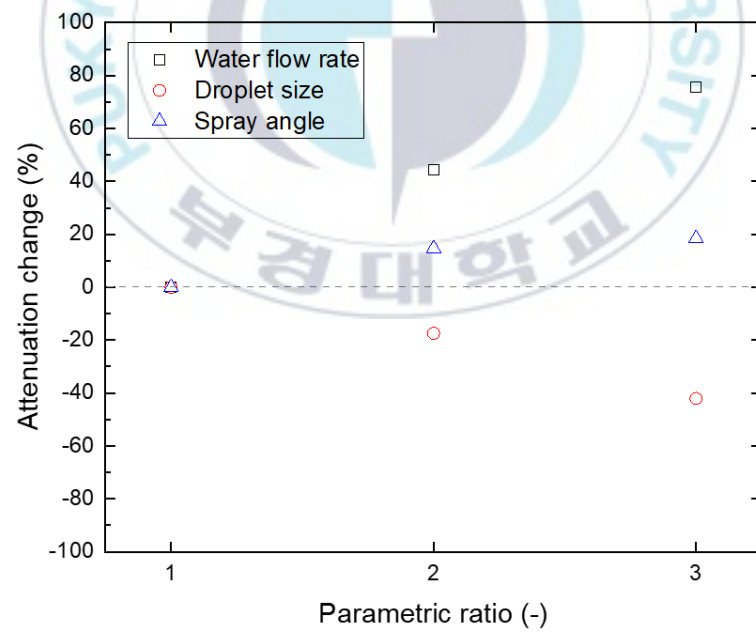
Figure 2.8(a)에 미분무의 분사 특성에 따른 최대 복사열 감쇠율의 변화를 나타내었다. 물 공급 유량의 경우 물 공급 유량이 증가할수록 최대 복사열 감쇠율이 증가하였고, 최소 물 공급 유량 조건 1 L/min에 비해 2배 ($\alpha = 2$) 및 3배 ($\alpha = 3$) 증가한 경우, 최대 복사열 감쇠율은 각각 약 33.9%와 약 57.4% 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 액적 크기와 분사각이 증가할수록 최대 복사열 감쇠율은 감소하는 것으로 관찰되었다. 최소 액적 크

기(100 μm)와 최소 분사각(60°)에 대해 액적 크기와 분사각이 2배 증가한 경우, 각각 약 30.7%와 약 9.1%, 3배 증가한 경우, 각각 약 55.5%와 약 11%로 최대 복사열 감쇠율은 감소하는 것으로 관찰되었다. 본 결과를 토대로 볼 때, 최대 복사열 감쇠율의 경우, 액적 크기 비와 물 공급 유량 비에 의한 변화가 크게 나타났고, 분사각 변화에 대한 영향이 비교적 낮게 나타났다.

Figure 2.8(b)에 미분무의 분사 특성에 따른 평균 복사열 감쇠율의 변화를 나타내었다. 물 공급 유량 증가에 대한 평균 복사열 감쇠율은 증가하였지만, 액적 크기가 증가할수록 평균 복사열 감쇠율은 감소하였다. 이러한 경향은 Figure 2.8(a)에 나타난 물 공급 유량과 액적 크기 변화에 대한 최대 복사열 감쇠율의 경향과 동일하게 관찰되었다. 그러나 분사각의 경우 분사각이 증가할수록 최대 복사열 감쇠율은 감소하지만, 평균 복사열 감쇠율은 증가하는 경향이 나타났다. 물 공급 유량이 2배와 3배로 증가할수록 평균 복사열 감쇠율은 최소 물 공급 유량 조건에 대한 평균 복사열 감쇠율에 비해 각각 약 44.5%와 약 75.5% 증가하였다. 또한, 분사각이 2배, 3배 증가한 경우 약 14.7%와 약 18.5%로 평균 복사열 감쇠율의 증가가 관찰되었다. 반면, 최소 액적 크기를 기준으로 액적 크기가 2배, 3배로 증가할수록 평균 복사열 감쇠율은 약 17.4%와 약 42.1%로 감소하였다. 따라서 평균 복사열 감쇠율을 가장 크게 변화시키는 것은 물 공급 유량의 영향으로 관찰되었고, 분사각의 영향이 가장 작은 것으로 나타났다.



(a) Peak attenuation



(b) Average attenuation

Figure 2.8 Changes of peak and average thermal radiation attenuations with parametric ratio.

제 3 장 2유체노즐 분사 특성 측정 실험

3.1 2유체노즐

본 연구에서는 미분무의 분사 특성(예를 들면, 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각)이 복사열 감쇠에 미치는 영향을 확인하기 위해 2유체노즐을 이용하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 2유체노즐은 기체에너지를 이용하여 액체를 미립화하는 장치이며, 단일유체노즐에 비해 비교적 낮은 압력으로 미세한 미분무를 효과적으로 형성할 수 있다. 또한, 분사 조건을 독립적으로 제어할 수 있고, 유체 공급 조건에 따라 다양한 분사 특성을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 8종류의 외부혼합형 2유체노즐(Spraying Systems Co.)⁽²⁶⁾ 및 내부혼합형 2유체노즐(H. IKEUCHI CO., LTD.)⁽²⁷⁾을 사용하였고, Table 3.1에 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 사양^(26,27)을 정리하여 나타내었다.

Table 3.1 Summary of twin-fluid nozzles

Twin-fluid nozzle	Nozzle type	Orifice size (mm)	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)	Spray angle (°)
Small_ETN20	External mixing	Center hole for water = 0.508 Annular gap for air = 0.178	12.7–61.7	13.3–41	20
Large_ETN20		Center hole for water = 1.524 Annular gap for air = 0.254	46.7–433.3	58–147	
Small_ITN20	Internal mixing	2.25	66.7–641.7	29–91	70
Middle_ITN20		2.98	133.3–1241.7	60–190	
Large_ITN20		3.46	191.7–1783.3	77–245	
Small_ITN70		2.27 × 0.68	66.7–641.7	29–91	
Middle_ITN70		3.52 × 0.81	133.3–1241.7	60–190	
Large_ITN70		3.94 × 1.09	191.7–1783.3	77–245	

3.1.1 외부혼합형 2유체노즐

외부혼합형 2유체노즐은 노즐 외부에서 액체와 기체가 충돌하여 미분무를 형성한다⁽¹³⁾. 본 연구에서는 2종류의 외부혼합형 2유체노즐을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 외부혼합형 2유체노즐의 경우, 구조적으로 중심축에서 물을 공급하며, 외측의 환형 부분을 통해 공기를 공급한다. 따라서 넓은 분사각을 구현하기 어렵고, 미분무 분사 시 분사각은 20°이다.

Figure 3.1과 Figure 3.2에 외부혼합형 2유체노즐 Small_ETN20 및 Large_ETN20의 사진과 개략도를 각각 나타내었다. 오리피스 크기, 물 및 공기 분사 면적 차이를 통해 미분무를 형성할 수 있는 조건을 고려하여 비교적 작은 2유체노즐을 Small_ETN20 (Small External mixing Twin-fluid Nozzle), 큰 2유체노즐을 Large_ETN20 (Large External mixing Twin-fluid Nozzle)으로 명명하였다. Small_ETN20의 경우, 물이 분사되는 오리피스 내경은 0.508 mm, 공기가 분사되는 환형 부분의 간격은 0.178 mm이고, Large_ETN20의 경우, 물이 분사되는 오리피스 내경은 1.524 mm, 공기가 분사되는 환형 부분의 간격은 0.254 mm이다.



(a) Small_ETN20



(b) Large_ETN20

Figure 3.1 Photo of external mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).

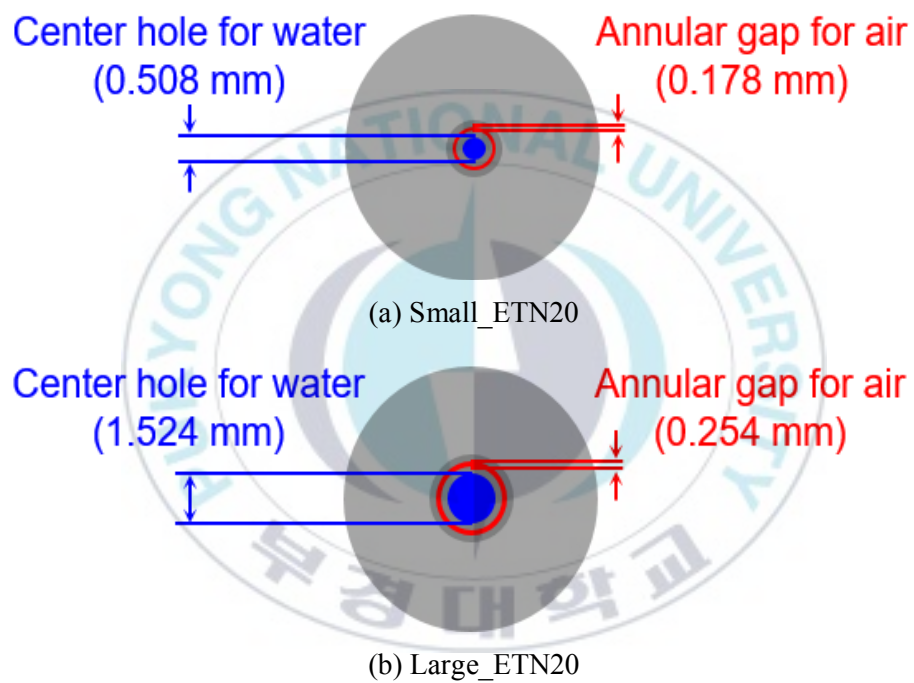


Figure 3.2 Schematic diagram of external mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).

3.1.2 내부혼합형 2유체노즐

내부혼합형 2유체노즐은 노즐 내부(예를 들면, 혼합실)에서 액체와 기체가 혼합하여 미분무를 형성한다⁽¹³⁾. 본 연구에서 사용한 내부혼합형 2유체노즐의 경우 사양서를 토대로 크게 분사각이 20°, 70°인 노즐로 구분할 수 있다.

Figure 3.3과 Figure 3.4에 분사각인 20°인 3종류의 내부혼합형 2유체노즐의 사진과 개략도를 각각 나타내었다. 오리피스 크기, 액체(예를 들면, 물) 및 기체(예를 들면, 공기)의 분사 면적 차이를 고려하여 미분무 형성이 원활한 조건에 대해 가장 작은 2유체노즐을 Small_ITN20 (Small Internal mixing Twin-fluid Nozzle), 그 다음으로 작은 2유체노즐을 Middle_ITN20 (Middle Internal mixing Twin-fluid Nozzle), 가장 큰 2유체노즐을 Large_ITN20 (Large Internal mixing Twin-fluid Nozzle)로 명명하였다. 미분무가 분사되는 오리피스의 직경은 Small_ITN20의 경우 2.25 mm, Middle_ITN20의 경우 2.98 mm, Large_ITN20의 경우 3.46 mm이다.

Figure 3.5와 Figure 3.6에 분사각이 70°인 3종류의 내부혼합형 2유체노즐의 사진과 개략도를 각각 나타내었다. 오리피스 크기, 물 및 공기의 분사 면적 차이를 고려하여 가장 작은 2유체노즐을 Small_ITN70 (Small Internal mixing Twin-fluid Nozzle), 그 다음으로 작은 2유체노즐을 Middle_ITN70 (Middle Internal mixing Twin-fluid Nozzle), 가장 큰 2유체노즐을 Large_ITN70 (Large Internal mixing Twin-fluid Nozzle)로 명명하였다. 물이 분사되는 타원형의 오리피스의 높이 및 직경은 각각 Small_ITN70의 경우 2.27 mm × 0.68 mm, Middle_ITN70의 경우 3.52 mm × 0.81 mm, Large_ITN70의 경우 3.94 mm × 1.09 mm 이다.

Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20의 경우, 노즐 탭 부분이 단

공(single hole) 구조로 되어있다. 반면, Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ITN70의 경우, 노즐 탭 부분이 8개의 다공(multi hole) 구조로 되어 있어 이를 통해 비교적 넓은 분사각을 구현할 수 있다.





(a) Small_ITN20

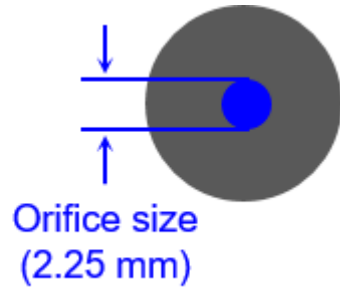


(b) Middle_ITN20

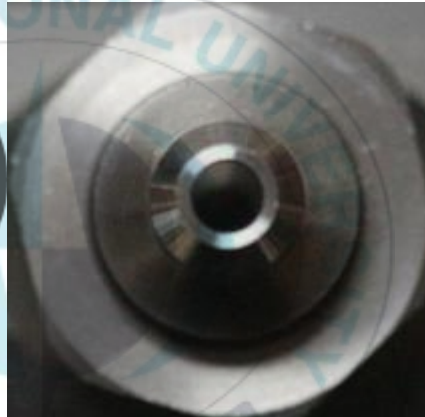
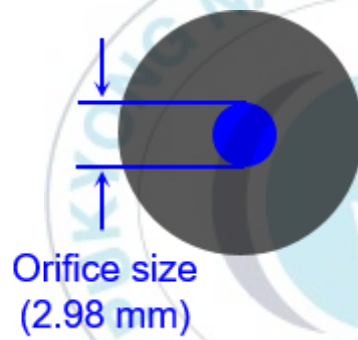


(c) Large_ITN20

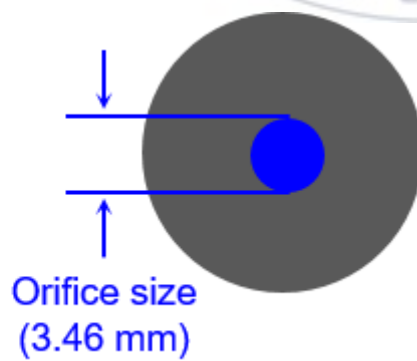
Figure 3.3 Photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).



(a) Small_ITN20



(b) Middle_ITN20



(c) Large_ITN20

Figure 3.4 Schematic and photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 20°).



(a) Small_ITN70

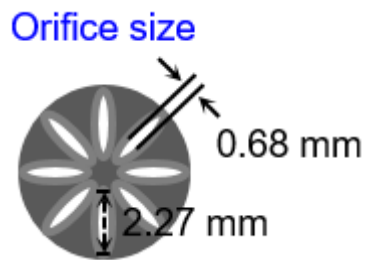


(b) Middle_ITN70

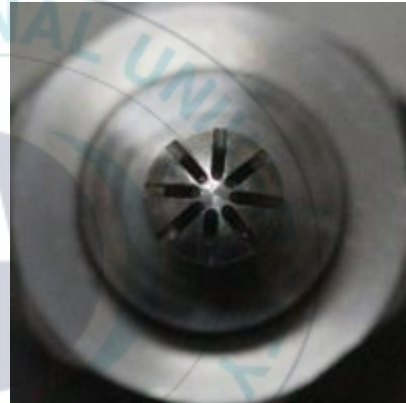
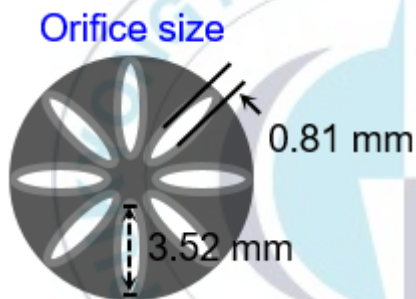


(c) Large_ITN70

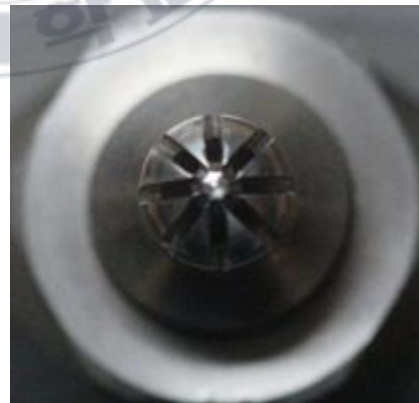
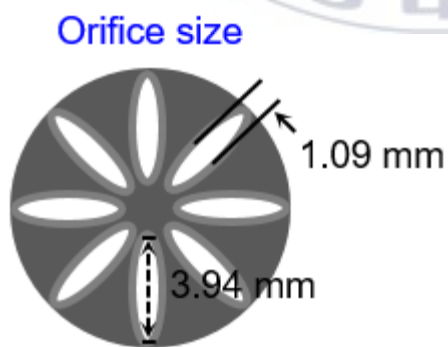
Figure 3.5 Photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 70°).



(a) Small_ITN70



(b) Middle_ITN70



(c) Large_ITN70

Figure 3.6 Schematic and photo of internal mixing twin-fluid nozzle (Spray angle = 70°).

3.2. 실험 장치 및 방법

2유체노즐의 미분무에 의한 복사열 감쇠는 미분무의 분사 특성(예를 들면, 공급 압력, 액적 크기, 분사각, 분무폭, 유량 분포)에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 미분무 분사 특성을 필수적으로 측정할 필요가 있다. 본 연구에서는 외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 물 및 공기 공급 유량 조건에 따른 공급 압력, 액적 크기, 분사각, 분무폭, 유량 분포를 측정하였다.

Figure 3.7에 미분무의 분사 특성을 측정하기 위해 구축한 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 2유체노즐에 물을 공급하기 위해 순수 제조 장치(water purification system, MDM, Mini Pure I)를 통해 여과되어 얻은 순수(pure water)를 물탱크에 저장하여 사용하였다. 물탱크에 저장된 물을 마이크로 기어 펌프(micro gear pump, Longer pump, WT3000-1JB/MS213XD0PT) 및 피스톤 로터리 펌프(piston rotary pump, Fluid Metering Inc., RHB)를 이용하여 공급하였고, 물 공급 유량은 1 min 간 감소된 물탱크의 무게를 전자 저울(electronic balance, AND, CB-2000, resolution: 0.1 g)로 측정하여 계산하였다. 한편, 2유체노즐의 공기 공급을 위해 공기압축기(air compressor, GSCOMP, GSOC-400C)에 압축된 공기를 MFC(Mass Flow Controller, Line Tech, M3100V)를 이용하여 일정한 공기 공급 유량을 공급하였다.

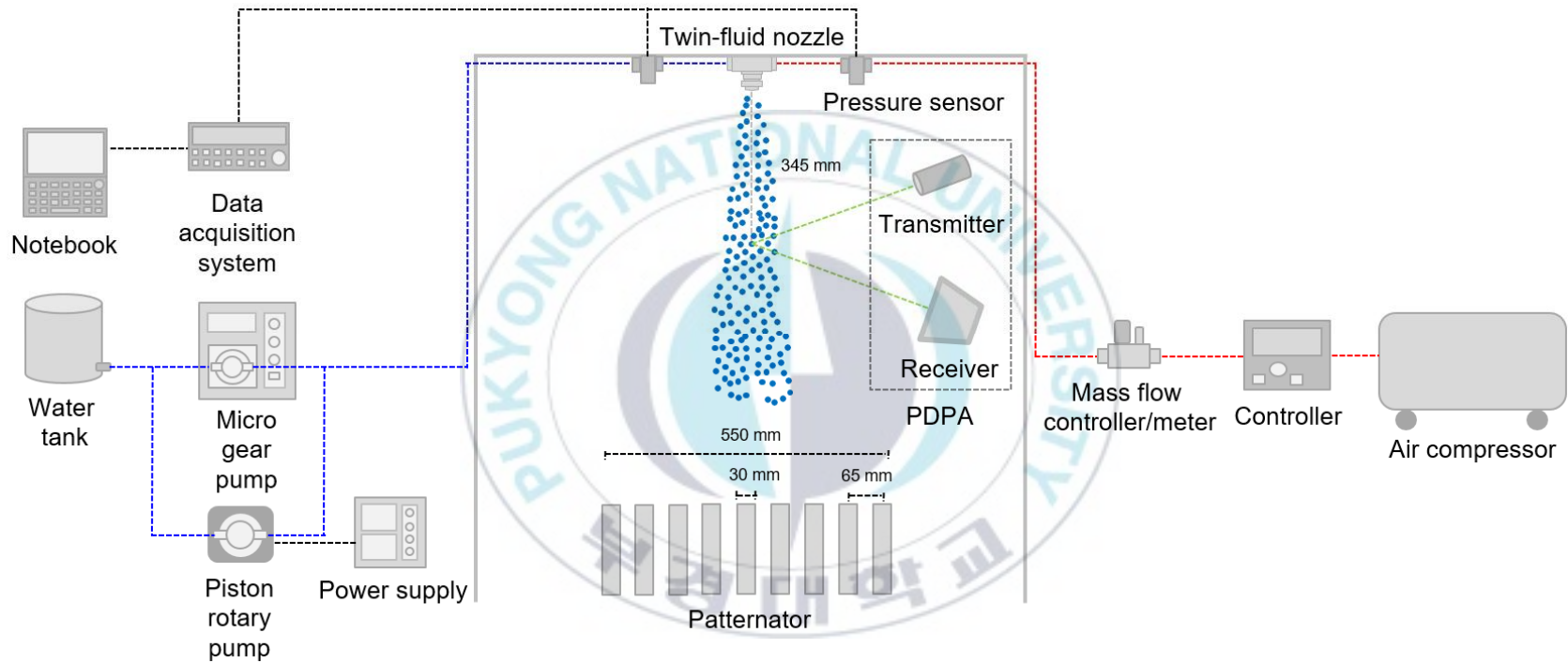


Figure 3.7 Schematic diagram of spray characteristics measurement.

3.2.1 공급 압력

외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 다양한 물과 공기 공급 유량 조건에 대한 공급 압력을 측정하였다. 2유체노즐의 물 및 공기 공급 압력을 측정하기 위해 노즐 중심으로부터 115 mm 떨어진 거리에 압력트랜스미터(pressure transmitter, KELLER, PA-21Y)를 설치하였고, 압력트랜스미터의 압력 측정 범위는 0–6 bar이다. 이와 관련된 사진을 Figure 3.8에 나타내었다. 다양한 물 및 공기 유량 조건에 대해 물과 공기를 각각 공급(즉, 물 및 공기만 공급)하여 1 min 간 총 3회 반복 측정하였고, 측정된 데이터를 1–5 V의 전기적 신호로 변환하여 1 s 간격으로 데이터 수집 장치(data acquisition system, KEYSIGHT, 34972A)를 통해 노트북(notebook)에 저장하였다.

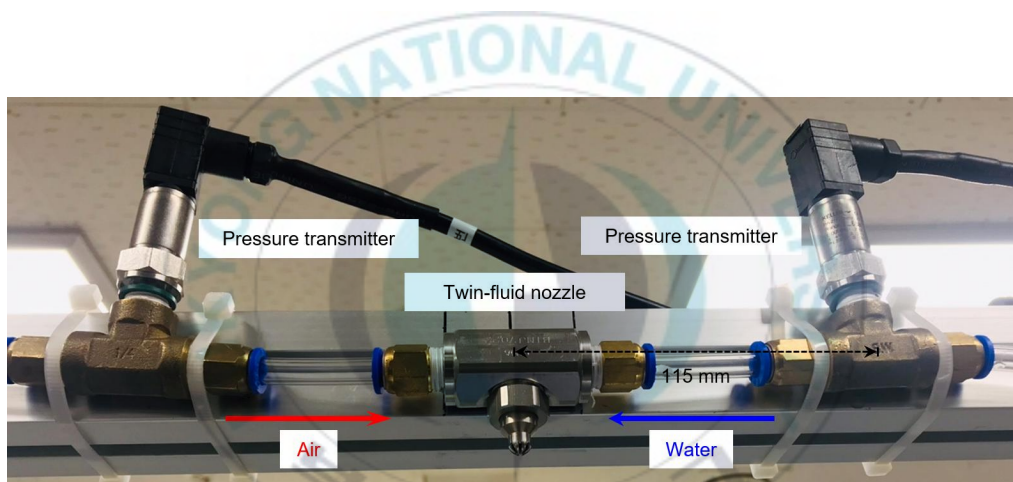


Figure 3.8 Photo of pressure measurement.

3.2.2 액적 크기

다양한 공기 및 물 공급 유량 조건에서 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 미분무 액적 크기를 측정하기 위해 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용하였고, 이와 관련된 사진을 Figure 3.9에 나타내었다.

액적 크기 측정 시 4장의 ‘미분무 복사열 감쇠 실험’의 실험 장치와 동일한 위치(즉, 노즐의 중심축으로부터 아래쪽 방향 345 mm 떨어진 거리)에서 총 3회 반복 측정하였고, 액적 크기 측정 개수는 총 20,000 개다. 본 연구에서는 SMD(Sauter Mean Diameter, D_{32}) 및 VMD(Volume Median Diameter, $D_{v0.5}$)를 이용하여 액적 크기 측정 결과를 표현하였다. SMD는 미분무의 평균 직경으로 일반적으로 인용되며⁽²⁸⁾ 식 (6)과 같이 정의된다.

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i D_i^2} \quad (6)$$

여기서, N_i 는 액적의 수, D_i 는 액적의 직경을 의미한다. 한편, 본 연구에서는 VMD($D_{v0.5}$)와 VMD를 동일한 의미로 표현하였다. 체적 중간 입경인 VMD는 액적 분포 특성을 나타내는 대표 입경으로 액적 크기를 표현하는 방법 중 하나이다⁽²⁸⁾. VMD는 미분무 전체 부피에 대한 액적 크기의 중앙값을 의미하며, 액적 크기의 중앙값을 기준으로 전체 부피의 50%는 직경이 작은 액적으로 구성되고 나머지 50%는 중앙값보다 직경이 더 큰 액적으로 구성됨을 의미한다⁽¹²⁾.

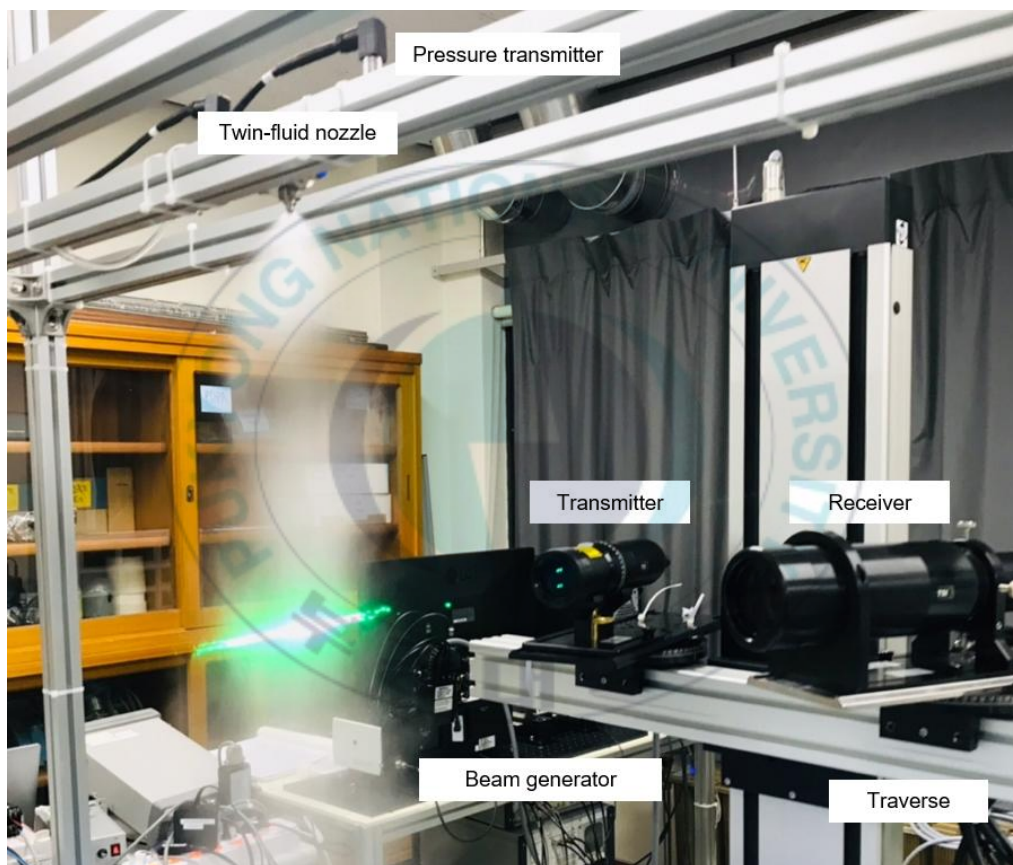


Figure 3.9 Photo of PDPA.

3.2.3 분무각 및 분무폭

외부 및 내부혼합형 2유체노즐로부터 분사된 미분무의 분무폭 및 분사각을 측정하기 위해서 미분무의 가시화를 수행하였다. Figure 3.10에 미분무 가시화 실험 장치의 모습을 나타내었다. 가시화를 위해 레이저 발생 장치로부터 발생된 레이저를 2유체노즐로부터 분사된 미분무에 투사하였고, 이를 디지털 카메라(digital camera, Canon, EOS M10)를 이용해서 촬영하였다. 촬영한 사진을 이용하여 화이트보드(white board)에 100 mm 간격으로 그은 선을 토대로 분무폭을 측정하였다.



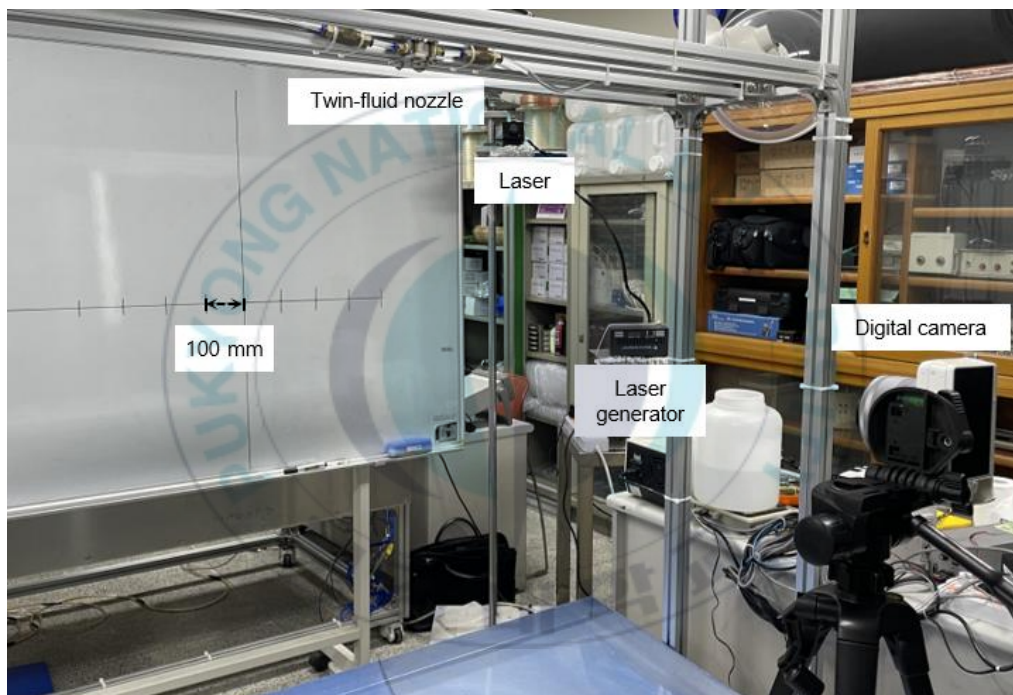


Figure 3.10 Experimental set-up of water mist visualization.

3.2.4 유량 분포

외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 유량 분포를 측정하기 위해 구축한 실험 장치의 사진을 Figure 3.11에 나타내었다. 유량 분포 측정 시 채수통(patternator)으로 메스실린더(measuring cylinder, 100 ml, resolution: 0.1 ml)를 이용하였으며, 총 9개의 메스실린더를 65 mm 간격으로 배치하였다. 각 메스실린더에 물을 10 ml 채운 후 2유체노즐의 수직 아래를 메스실린더의 중심에 위치시켰으며, 각 물 공급 유량에 대해 1 min 간 분사하였을 때 채워진 물 높이를 총 3회 반복 측정하였다. Figure 3.12에 측정한 실험 결과를 대표적으로 나타내었다.



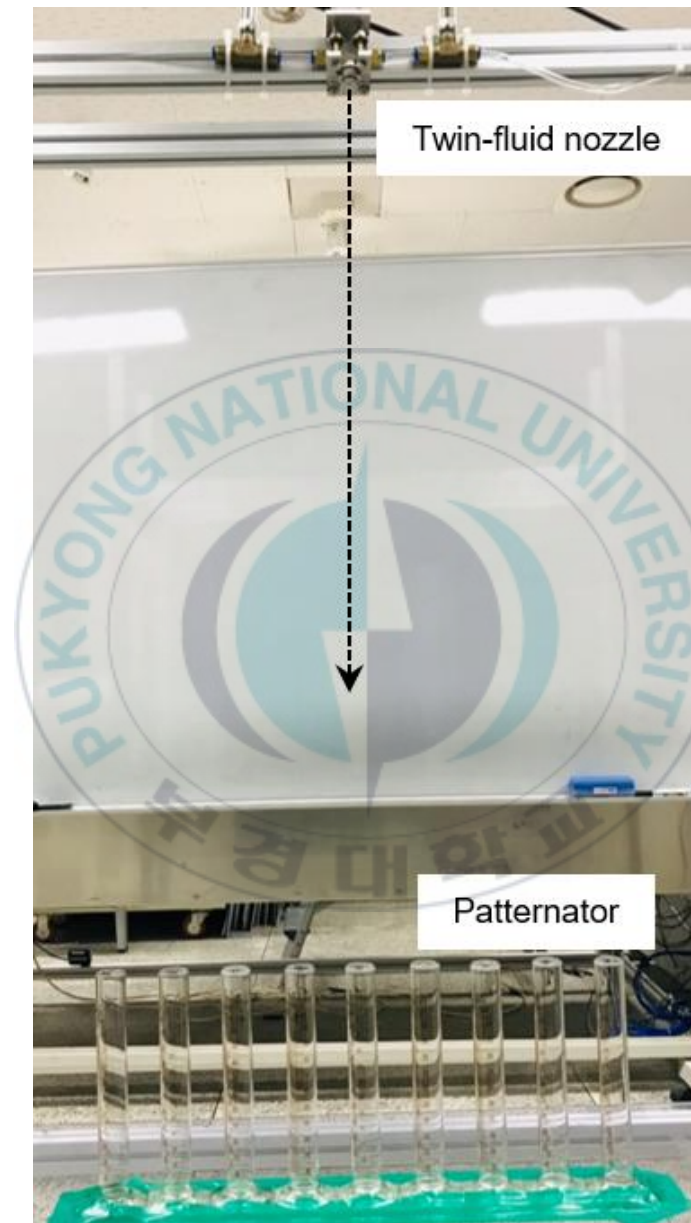


Figure 3.11 Experimental set-up of flow distribution measurement.

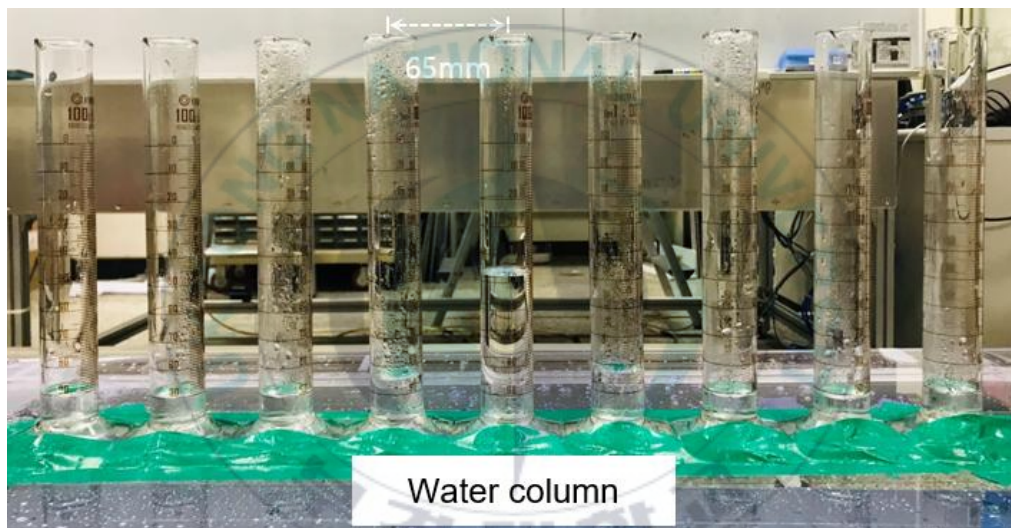


Figure 3.12 Flow distribution measurement result for Large_ITN20
(Water flow rate = 700 g/min, air flow rate = 100 L/min).

3.3 실험 결과 및 분석

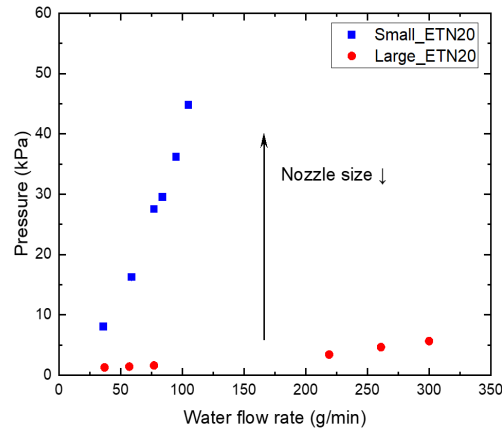
3.3.1 공급 압력

Table 3.2에 외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 다양한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 물과 공기 공급 압력 측정 결과를 나타내었다. 본 실험 조건에서 2유체노즐의 압력 측정 결과, 물 공급 압력은 1.3–59.6 kPa, 공기 공급 압력은 29.8–316.1 kPa로 측정되었다.

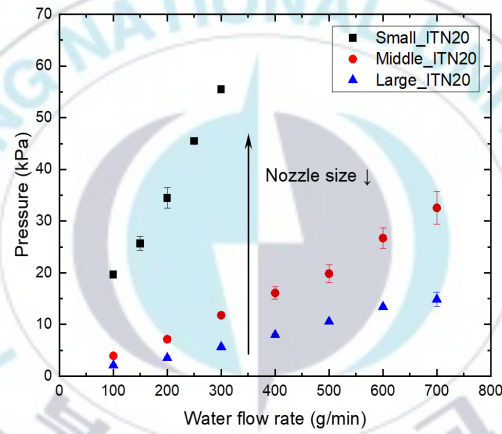
Figure 3.13과 Figure 3.14에 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 물과 공기 공급 압력 측정 결과를 각각 나타내었다. 압력 측정 결과를 통해 물과 공기 공급 유량이 증가함에 따라 압력이 증가하는 경향이 관찰되었다. 물 공급 압력 측정 데이터를 비교한 결과, 전체적으로 유사한 물 공급 유량 조건에서 Small, Middle, Large 2유체노즐 순으로 압력이 높게 나타남을 확인하였다. 한편, 공기 공급 압력 측정 데이터를 비교한 결과, 물 공급 압력 측정 비교 결과와 동일하게 Small, Middle, Large 2유체노즐 순으로 공기 공급 압력이 높게 나타났다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 유사한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 노즐의 오리피스 및 환형 갭(외부혼합형의 경우)의 면적이 작기 때문으로 판단된다.

Table 3.2 Summary of supply pressure measurement results for twin-fluid nozzle

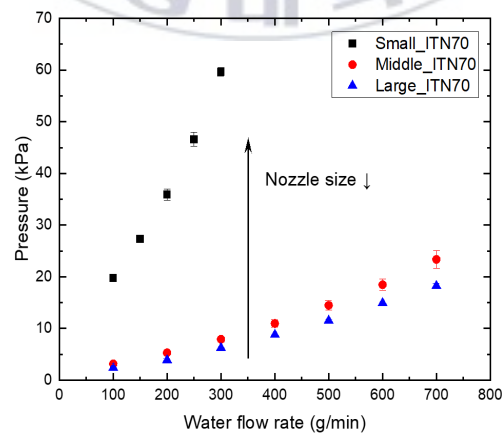
Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)	Water flow pressure (kPa)	Air flow pressure (kPa)
Small_ETN20	36–105	10–30	8.1 (± 0.12)–44.8 (± 0.35)	79.6 (± 3.38)–316.1 (± 2.27)
Large_ETN20	37–300	20–60	1.3 (± 0.08)–5.7 (± 0.21)	29.8 (± 1.50)–174.0 (± 1.79)
Small_ITN20	100–300	30–50	19.6 (± 0.23)–55.5 (± 0.06)	94.0 (± 1.98)–198.4 (± 2.22)
Middle_ITN20	100–700	40–80	4.0 (± 0.04)–32.6 (± 3.11)	36.9 (± 0.73)–128.0 (± 1.76)
Large_ITN20	100–700	60–100	2.1 (± 0.21)–14.9 (± 1.41)	43.0 (± 0.50)–115.3 (± 0.72)
Small_ITN70	100–300	30–50	19.8 (± 0.41)–59.6 (± 0.83)	88.5 (± 3.82)–191.0 (± 4.97)
Middle_ITN70	100–700	40–80	3.2 (± 0.15)–23.4 (± 1.75)	36.9 (± 1.15)–120.9 (± 2.42)
Large_ITN70	100–700	60–100	2.4 (± 0.13)–18.2 (± 0.53)	47.1 (± 0.98)–115.1 (± 2.37)



(a) Small_ETN20 and Large_ETN20

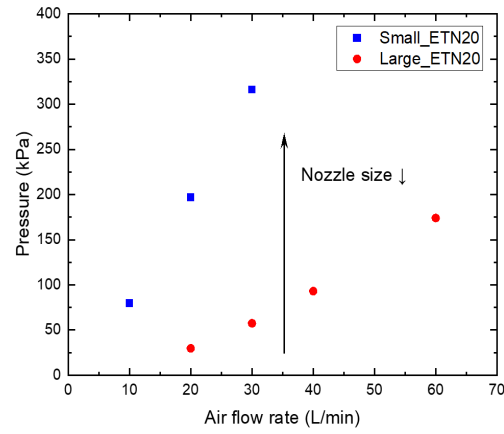


(b) Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20

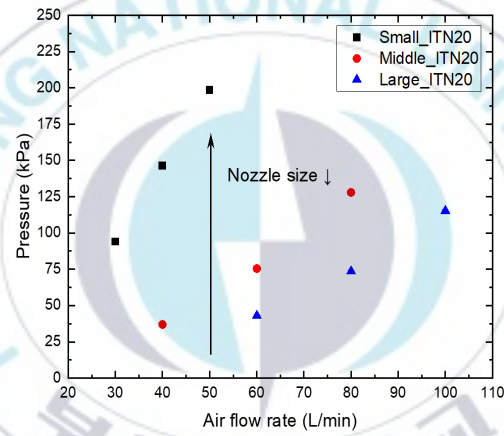


(c) Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70

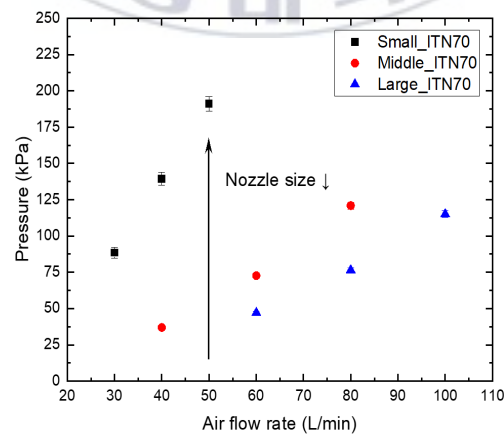
Figure 3.13 Supply pressure measurement data under various water flow rate conditions.



(a) Small_ETN20 and Large_ETN20



(b) Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20



(c) Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70

Figure 3.14 Supply pressure measurement data under various air flow rate conditions.

3.3.2 액적 크기

본 연구자는 외부혼합형 2유체노즐 Small_ETN20과 Large_ETN20을 이용하여 복사열 감쇠 성능 실험을 수행한 바 있다⁽²⁴⁾. 해당 연구를 통해 미분무 분사 특성이 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대해 선행적으로 확인하였다. 액적 크기는 복사열 감쇠 성능에 영향을 미치는 미분무의 분사 특성 중 하나이며, 액적 크기가 감소함에 따라 복사열 감쇠 성능이 증대되는 것으로 보고된 바 있다^(14,19,25). 따라서 액적 크기를 측정하고, 복사열 감쇠에 미치는 영향을 세부적으로 검토할 필요가 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 SMD 및 VMD($D_{v0.5}$)를 이용하여 액적 크기 측정 결과를 표현하였다.

Table 3.3에 다양한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 외부 및 내부혼합형 2유체노즐에 대한 SMD, VMD 측정 결과를 정리하여 나타내었다. 액적 크기 측정 결과, SMD의 경우 19.9–99.4 μm , VMD의 경우 21.1–107.6 μm 로 측정되었다. 본 실험 조건에서 2유체노즐의 미분무 액적 크기는 약 110 μm 이하로 형성됨을 확인하였다.

Figures 3.15–3.17에 2유체노즐의 SMD 측정 결과를 나타내었다. Figure 3.15는 외부혼합형 Small_ETN20, Large_ETN20의 SMD 측정 결과, Figure 3.16은 내부혼합형 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ETN20의 SMD 측정 결과, Figure 3.17은 내부혼합형 Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ETN70의 SMD 측정 결과를 정리하여 나타내었다.

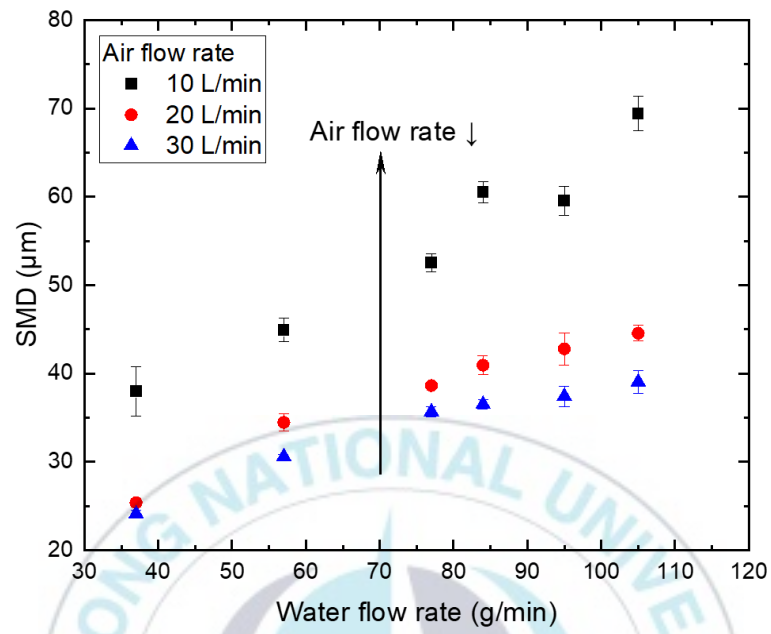
Figures 3.18–3.20에 2유체노즐의 VMD 측정 결과를 나타내었다. Figure 3.18은 외부혼합형 Small_ETN20, Large_ETN20의 VMD 측정 결과, Figure 3.19는 내부혼합형 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ETN20의 VMD 측정 결과, Figure 3.20은 내부혼합형 Small_ITN70,

Middle_ITN70, Large_ETN70의 VMD 측정 결과를 정리하여 나타내었다. 전체적으로 일정한 공기 조건에서 물 공급 유량이 증가함에 따라 SMD, VMD가 증가하며, 일정한 물 공급 조건에 대해 공기 공급 유량이 감소함에 따라 SMD, VMD가 증가하는 경향이 관찰되었다.

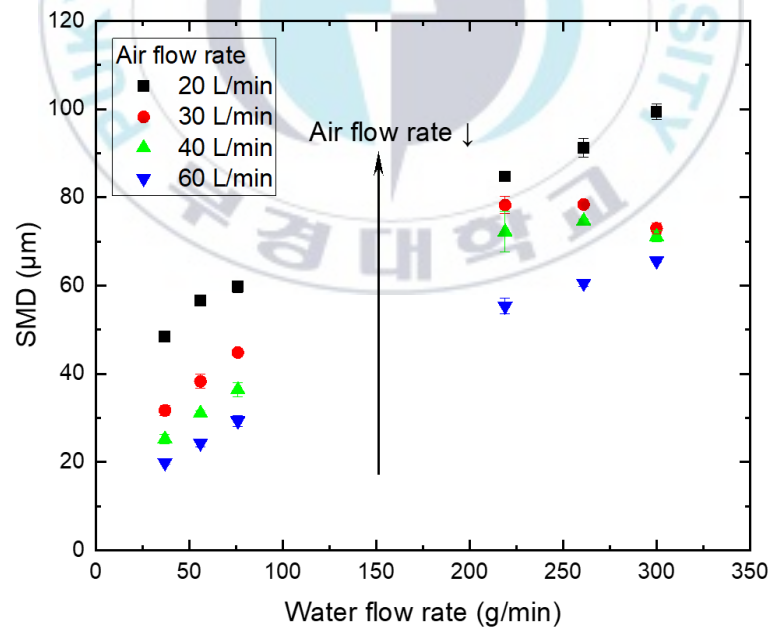


Table 3.3 Summary of droplet size measurement results for twin-fluid nozzle

Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)	SMD (μm)	VMD (μm)
Small_ETN20	36 – 105	10 – 30	24.1 (± 0.43) – 69.4 (± 1.93)	26.4 (± 0.41) – 84.8 (± 2.87)
Large_ETN20	37 – 300	20 – 60	19.9 (± 0.39) – 99.4 (± 1.73)	21.1 (± 0.41) – 107.6 (± 3.54)
Small_ITN20	100 – 300	30 – 50	31.6 (± 0.94) – 61.5 (± 1.62)	33.3 (± 1.34) – 71.8 (± 5.3)
Middle_ITN20	100 – 700	40 – 80	30.6 (± 0.59) – 87.3 (± 0.54)	32.7 (± 0.99) – 88.3 (± 2.11)
Large_ITN20	100 – 700	60 – 100	36.3 (± 1.41) – 72.7 (± 0.84)	39.9 (± 2.18) – 85.0 (± 0.99)
Small_ITN70	100 – 300	30 – 50	31.8 (± 0.57) – 54.0 (± 2.01)	37.5 (± 1.15) – 69.3 (± 1.89)
Middle_ITN70	100 – 700	40 – 80	39.7 (± 0.51) – 65.0 (± 1.30)	47.7 (± 0.58) – 76.3 (± 2.56)
Large_ITN70	100 – 700	60 – 100	37.8 (± 0.15) – 61.9 (± 0.79)	45.0 (± 0.52) – 74.1 (± 1.40)

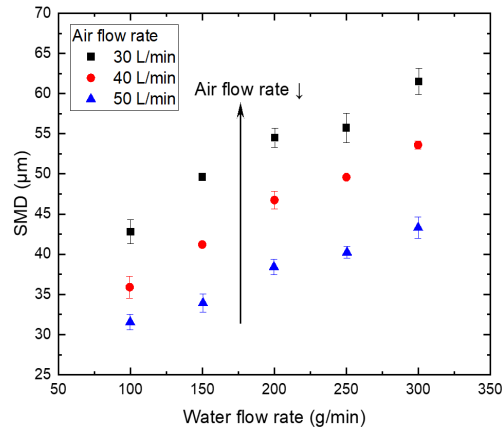


(a) Small_ETN20

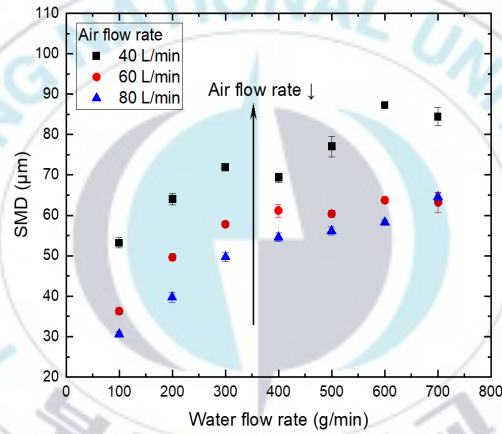


(b) Large_ETN20

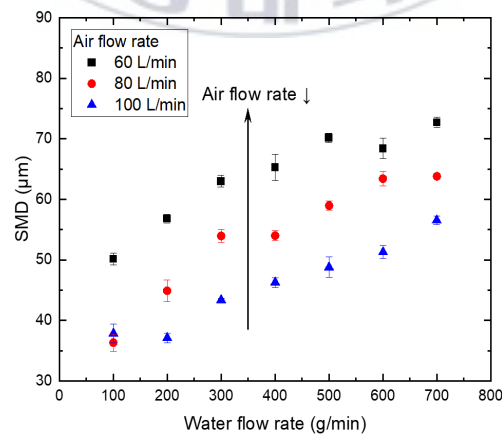
Figure 3.15 SMD measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.



(a) Small_ITN20

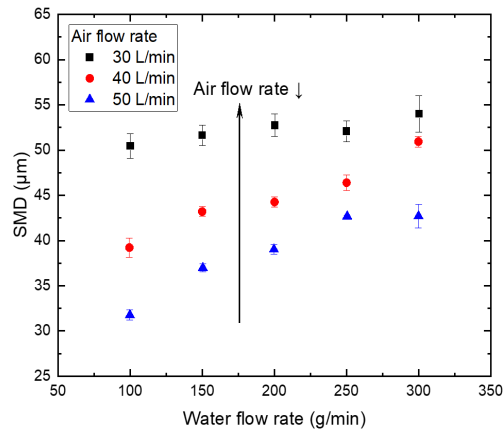


(b) Middle_ITN20

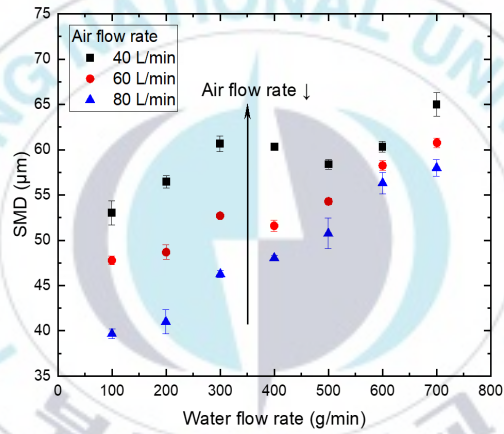


(c) Large_ITN20

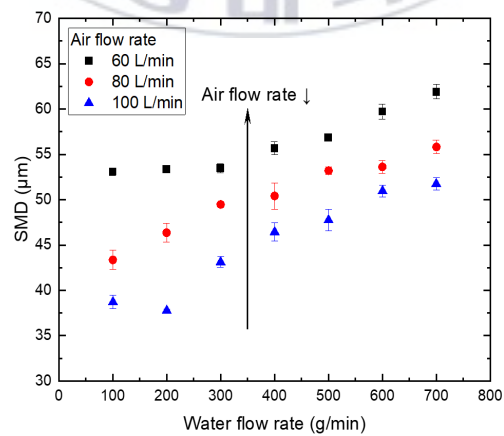
Figure 3.16 SMD measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.



(a) Small_ITN70

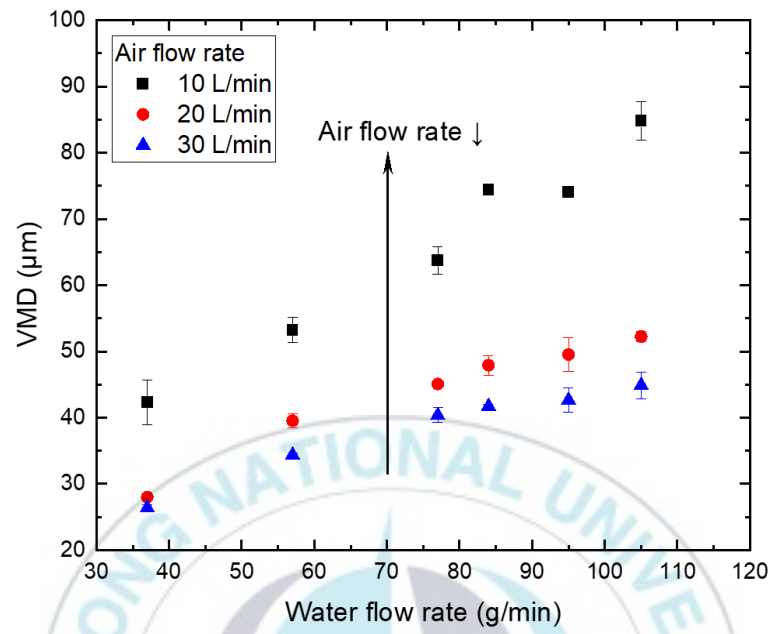


(b) Middle_ITN70

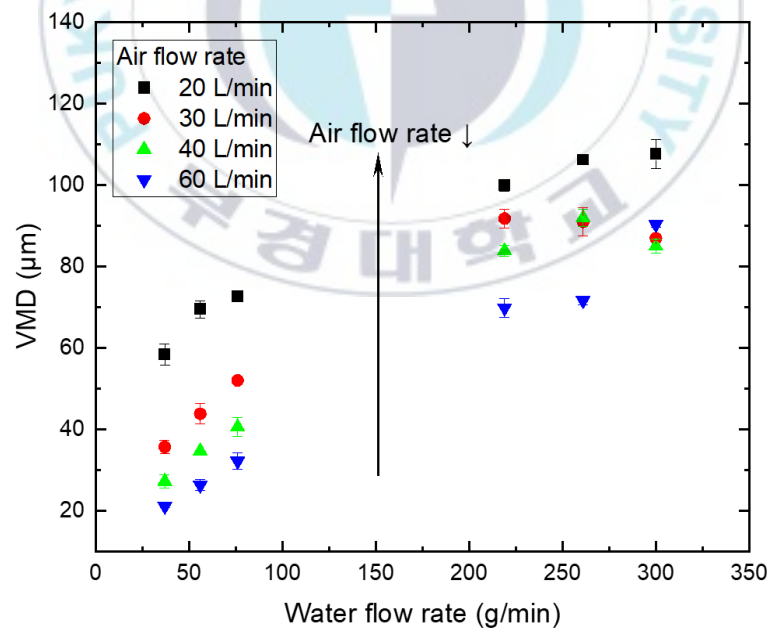


(c) Large_ITN70

Figure 3.17 SMD measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.

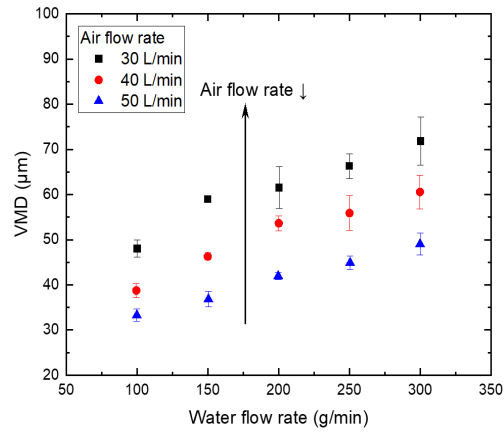


(a) Small_ETN20

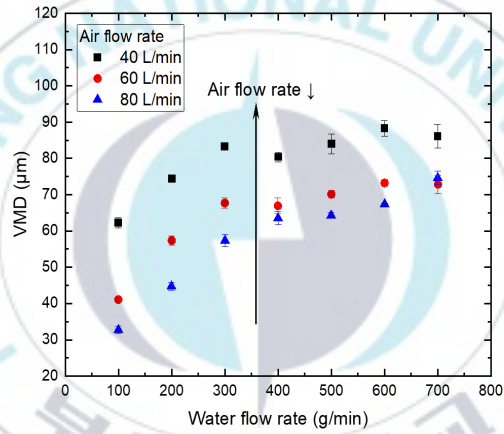


(b) Large_ETN20

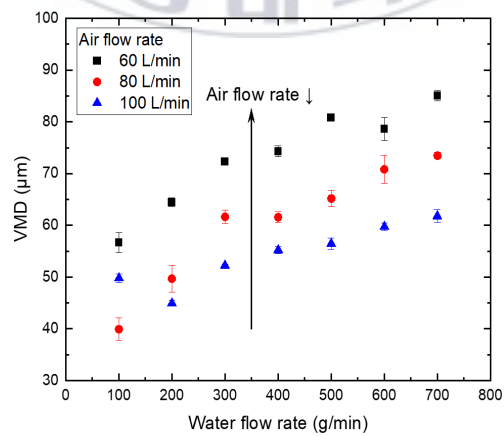
Figure 3.18 VMD measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.



(a) Small_ITN20

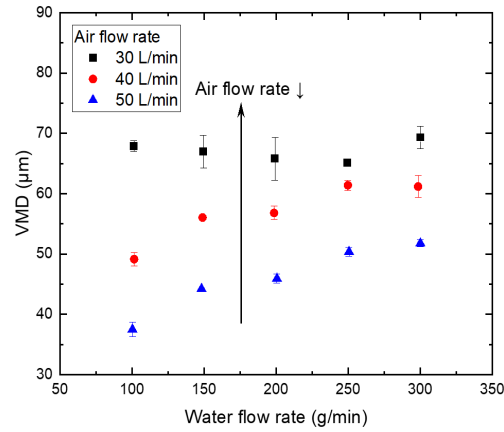


(b) Middle_ITN20

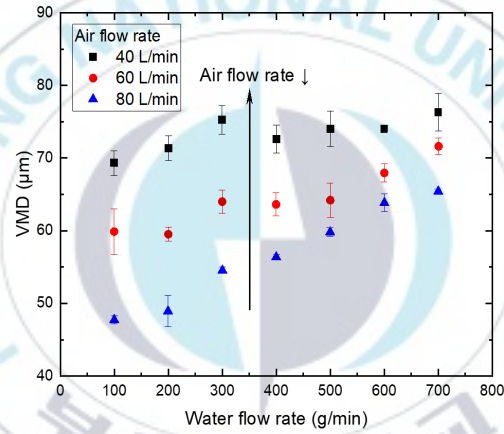


(c) Large_ITN20

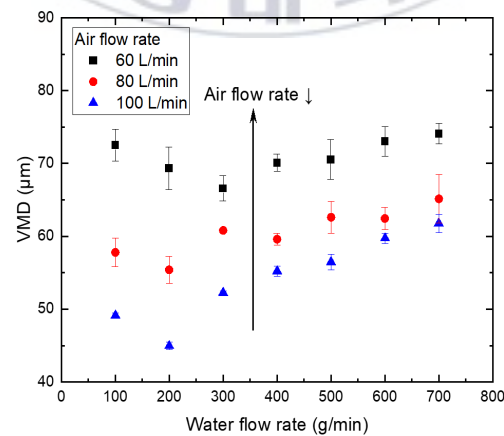
Figure 3.19 VMD measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.



(a) Small_ITN70



(b) Middle_ITN70



(c) Large_ITN70

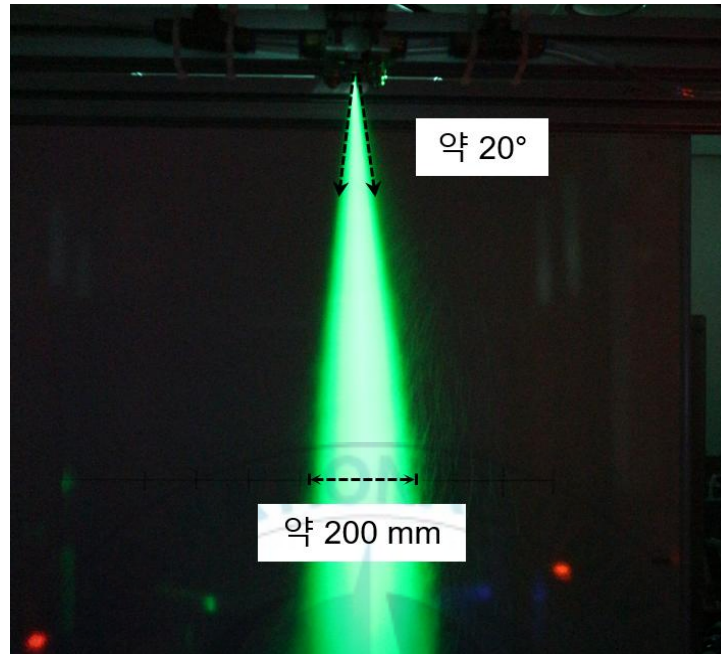
Figure 3.20 VMD measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.

3.3.3 분사각 및 분무폭

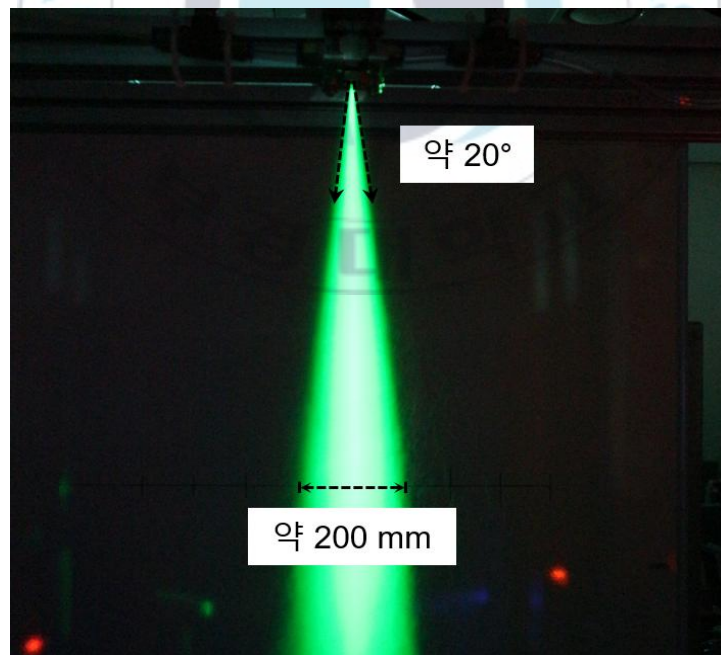
분사각 및 분무폭을 측정하기 위해 2유체노즐로부터 분사된 미분무의 가시화를 수행하였다. Table 3.4에 가시화 수행 시 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 유량 조건과 분사각 및 분무폭 측정 결과를 요약하여 나타내었다. Figure 3.21에 외부혼합형 2유체노즐 Small_ETN20, Large_ETN20, Figure 3.22에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20, Figure 3.23에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ITN70의 가시화 결과를 나타내었다. Figures 3.21 – 3.23의 가시화 결과를 토대로 검토하였을 때 분사각 20°인 경우, 분무폭은 약 200 mm로 측정되며, 분사각이 70°인 경우, 물과 공기 공급 유량 조건에 따라 분무폭은 약 300–320 mm로 측정되었다. 즉, 가시화를 통해 측정된 분사각은 노즐로부터 분사된 액적이 나타나는 전체 각도를 의미하며, 2유체노즐의 사양서^(26,27)와 동일하게 나타남을 확인하였다.

Table 3.4 Summary of spray angle and spray width measurement results for twin-fluid nozzle

Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)	Spray angle (°)	Spray width (mm)
Small_ETN20	105	30	20	200
Large_ETN20	300	60		
Small_ITN20	300	50		
Middle_ITN20	700	80		
Large_ITN20	700	100	70	300
Small_ITN70	300	50		320
Middle_ITN70	700	80		320
Large_ITN70	700	100		

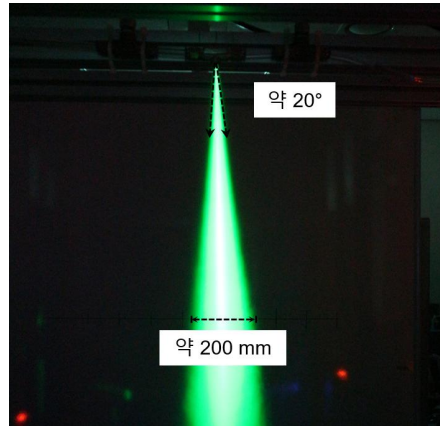


(a) Small_ETN20

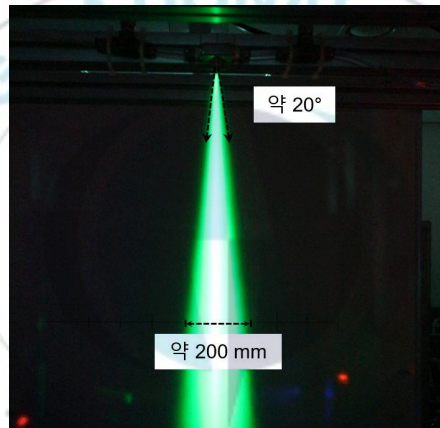


(b) Large_ETN20

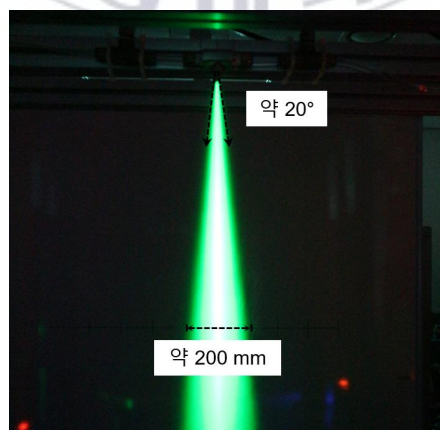
Figure 3.21 Visualization of water mist for Small_ETN20 and Large_ETN20.



(a) Small_ITN20

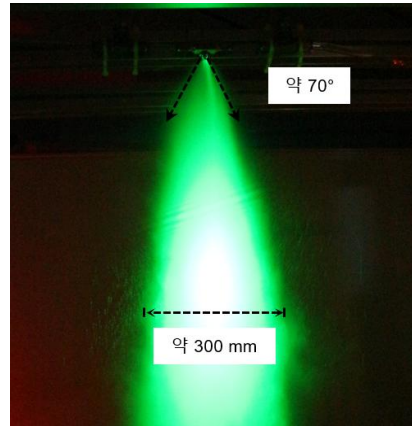


(b) Middle_ITN20

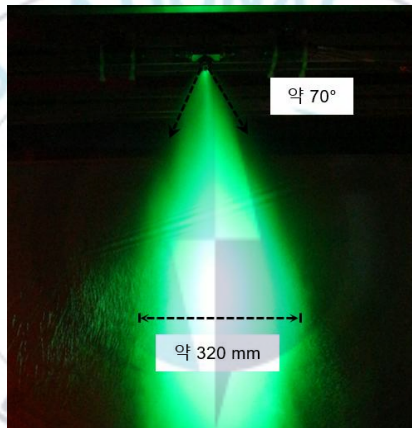


(c) Large_ITN20

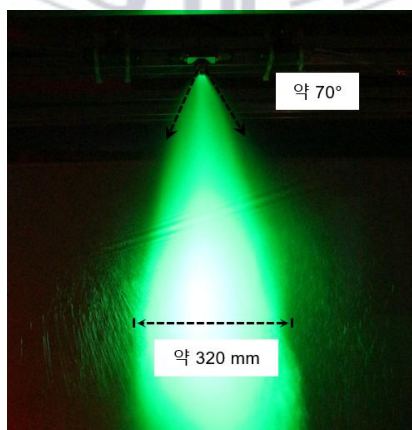
Figure 3.22 Visualization of water mist for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.



(a) Small_ITN70



(b) Middle_ITN70



(c) Large_ITN70

Figure 3.23 Visualization of water mist for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.

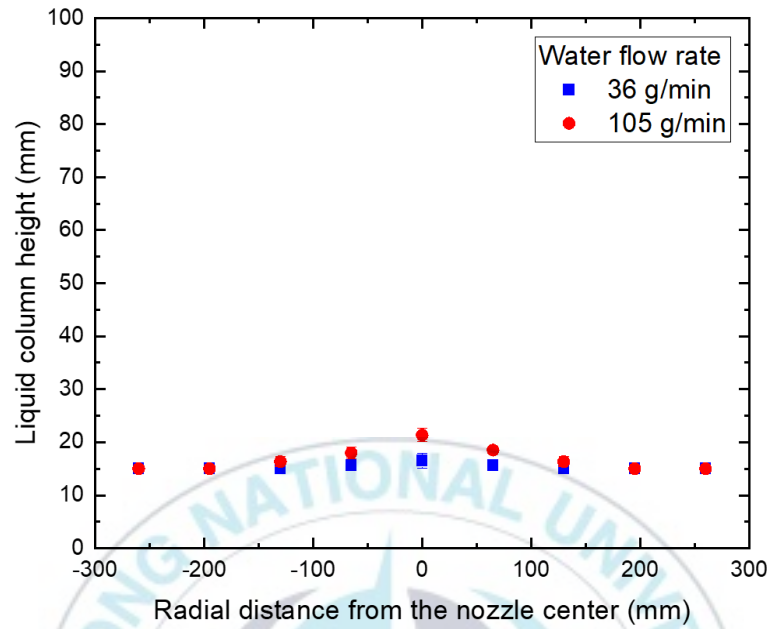
3.3.4 유량 분포

외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 유량 분포를 측정하였고, 유량 분포 측정 시 2유체노즐의 각 유량 조건을 Table 3.5에 정리하여 나타내었다.

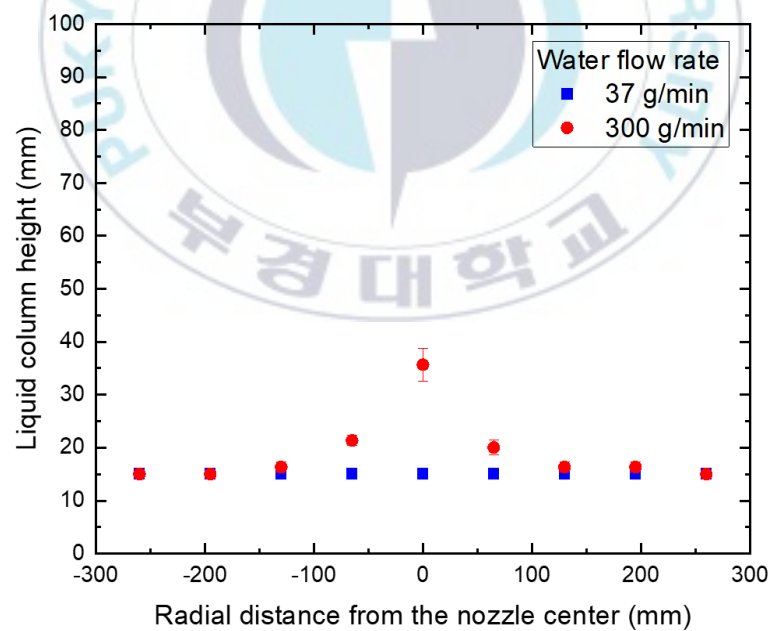
Figures 3.24–3.26에 2유체노즐의 유량 분포 측정 결과를 나타내었다. Figure 3.24에 외부혼합형 Small_ETN20, Large_ETN20, Figure 3.25에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20, Figure 3.26에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ITN70를 정리하였다. x축은 노즐 중심으로부터의 반경 방향 거리이며, y축은 각 메스실린더에서 측정된 물 기둥(water column)의 높이를 의미한다. 유량 분포 측정 결과, 전체적으로 모든 유량 조건에 대해 노즐 중심(즉, $x = 0$ mm)에서 가장 높게 나타났다. Figure 3.24 및 Figure 3.25를 통해 분사각이 20° 인 경우, 노즐 중심으로부터 거리가 멀어질수록 물 기둥의 높이가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Figure 3.26을 통해 분사각이 70° 인 경우, 물 공급 유량이 높은 조건에서 노즐 중심축에서 거리가 멀어짐에 따라 Figure 3.24 및 Figure 3.25에 비해 비교적 완만하게 물 기둥의 높이가 낮아지는 것으로 관찰되었다. 본 연구에서 측정한 유량 분포 결과를 토대로 분사 형태는 중실원추형으로 나타났다.

Table 3.5 Summary of flow distribution measurement conditions for twin-fluid nozzle

Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)
Small_ETN20	36, 105	30
Large_ETN20	37, 300	60
Small_ITN20	100, 300	50
Middle_ITN20	100, 700	80
Large_ITN20	100, 700	100
Small_ITN70	100, 300	50
Middle_ITN70	100, 700	80
Large_ITN70	100, 700	100

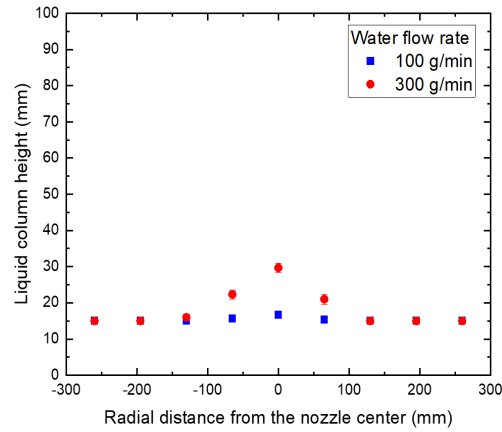


(a) Small_ETN20 (Air flow rate = 30 L/min)

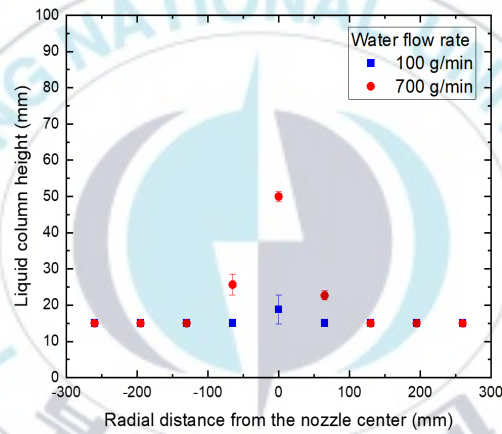


(b) Large_ETN20 (Air flow rate = 60 L/min)

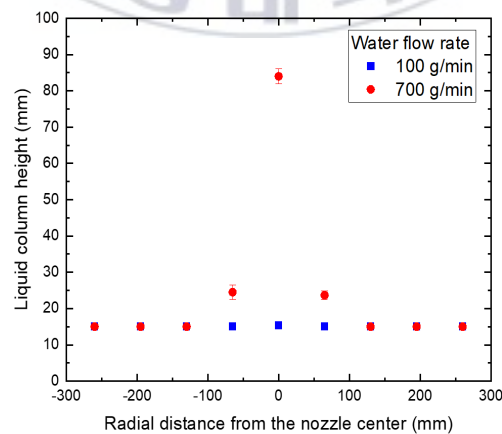
Figure 3.24 Flow distribution measurement data for Small_ETN20 and Large_ETN20.



(a) Small_ITN20 (Air flow rate = 50 L/min)

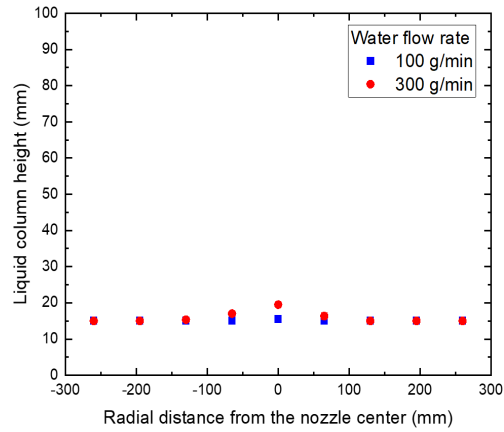


(b) Middle_ITN20 (Air flow rate = 80 L/min)

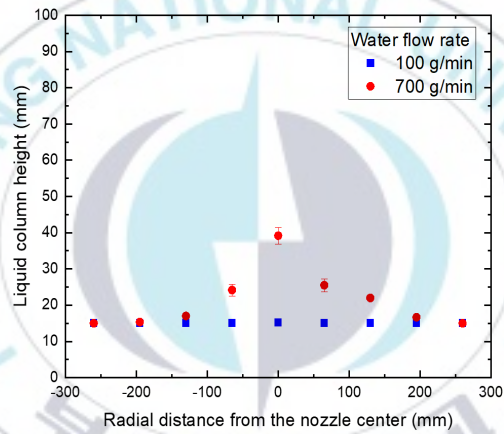


(c) Large_ITN20 (Air flow rate = 100 L/min)

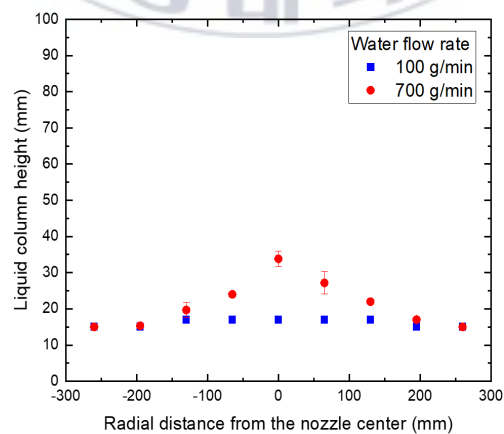
Figure 3.25 Flow distribution measurement data for Small_ITN20, Middle_ITN20, and Large_ITN20.



(a) Small_ITN70 (Air flow rate = 50 L/min)



(b) Middle_ITN70 (Air flow rate = 80 L/min)



(c) Large_ITN70 (Air flow rate = 100 L/min)

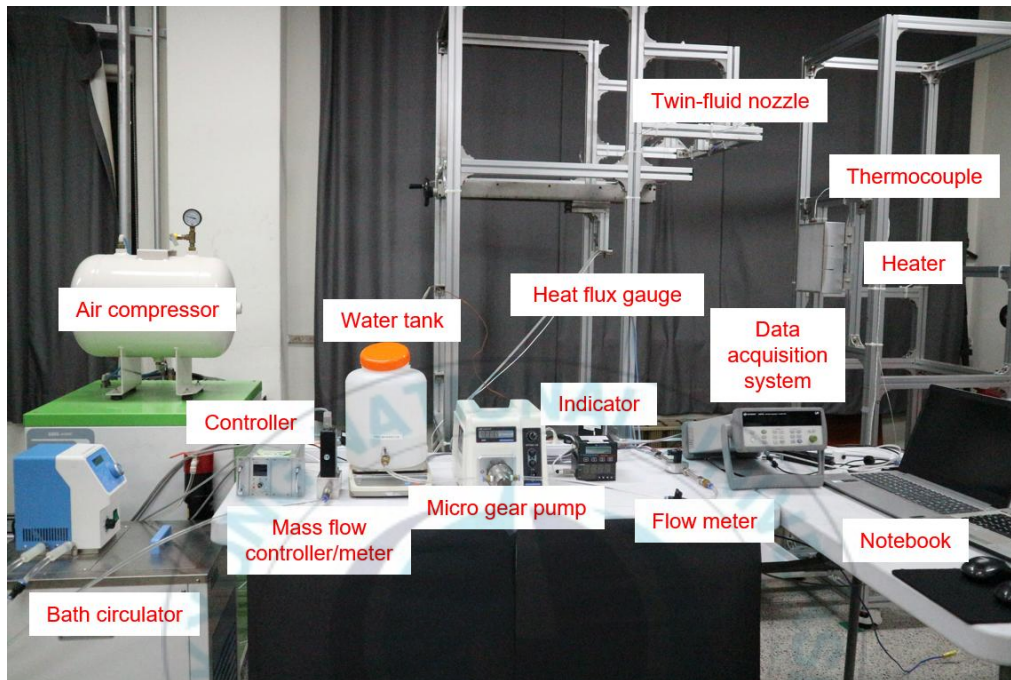
Figure 3.26 Flow distribution measurement data for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.

제 4 장 미분무 복사열 감쇠 실험

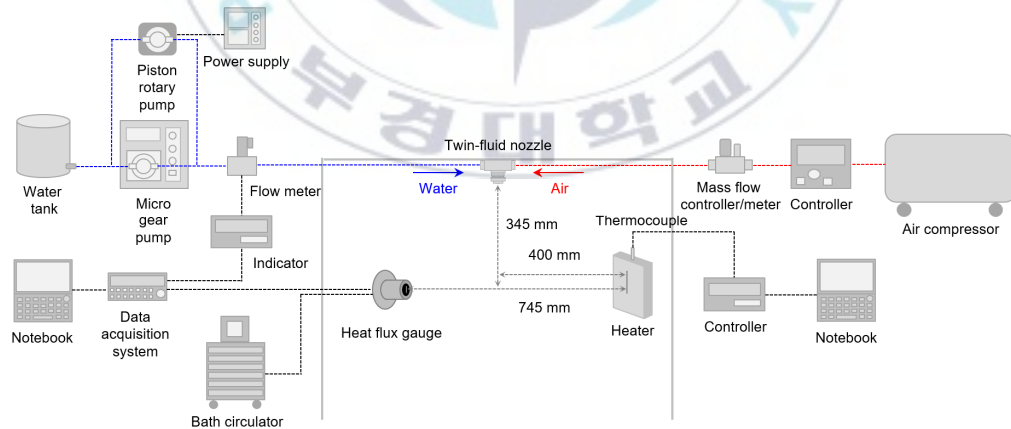
4.1 실험 장치 및 방법

4.1.1 실험 장치

Figure 4.1에 2유체노즐의 미분무에 의한 복사열 감쇠 성능 측정을 위해 구축한 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 2유체노즐의 미분무를 형성하기 위한 물과 공기 공급 방법은 제3장의 ‘2유체노즐 분사 특성 실험 장치’에서 설명한 방법과 동일하다. 한편, 물 공급 유량은 2유체노즐로 공급되는 물에 대해 1 min 간 감소된 물탱크의 무게를 전자 저울로 3회 반복 측정하였다. 배관 내 흐르는 물의 유량을 측정하기 위해 유량계(flow meter, Nuritech, FG-31)를 설치하였고, 펄스(pulse) 신호를 유량 지시계(flow indicator, Nuritech, FM)로 받아 노트북에 저장하였다. 즉, 실험을 통해 마이크로 기어 펌프의 RPM (revolutions per minute)과 직류 전압(DC voltage) 및 유량계 측정값과 물 공급 유량 간 관계식을 도출하여 사용하였다. 열원은 히터(quartz heater, OMEGA, QH-081060-T)를 사용하였고, 히터 표면 중심 온도를 측정하기 위해 열화상 카메라 (thermal imagers, FLUKE, Ti400)를 이용하였다. 또한, 히터로부터 방사되는 복사열유속을 측정하기 위해 열유속계(heat flux gauge, Hukseflux Thermal Sensors B.V., SBG01-010)를 사용하였고, 순환수조(bath circulator, DAIHAN Scientific, MaxircuTM CL-12)를 이용하여 열유속계에 물을 순환시켰다. 열유속계는 히터의 정중앙에 위치하도록 설치하였고, 히터와 열유속계 간의 거리는 약 745 mm, 히터와 노즐 중심까지의 거리는 약 400 mm이고, 노즐은 높이 약 345 mm 인 위치에 고정하였다. 측정된 복사열유속은 데이터 수집 장치를 이용하여 1 s 간격으로 수집하여 노트북에 저장하였다.



(a) Photo



(b) Schematic diagram

Figure 4.1 Photo and schematic diagram of thermal radiation attenuation experimental set-up.

4.1.2 실험 조건 및 방법

Table 4.1에 2유체노즐의 복사열 감쇠 실험 조건을 정리하여 나타내었다. 물 공급 유량은 36–700 g/min이고, 공기 공급 유량은 10–100 L/min이다. Figure 4.2에 Small_ITN70를 이용하여 물 공급 유량 300 g/min, 공기 공급 유량 50 L/min 조건에서 수행한 복사열 감쇠 실험 결과 예시를 나타내었다. Figure 4.2를 통해 관찰되는 경향은 모든 실험에서 유사하게 나타났다. 복사열 감쇠 실험은 총 2회 반복 수행하였고, 실험 방법은 아래와 같다.

(1) 열전대를 이용하여 실내 온도가 초기 온도(약 20 °C)인지 확인한다. 히터를 약 20 min 가열한 뒤, 히터의 중심 온도가 약 900 °C에 도달하는 경우, 열화상 카메라를 이용하여 히터 중심 표면 온도를 측정한다. 이때 표면 온도는 약 710 °C로 나타났다.

(2) 총 실험 시간은 120 s이며, 초시계를 이용하여 실험 시간을 측정한다. 실험 시작과 동시에 데이터 수집 장치를 작동시켜 열유속계를 이용하여 열유속을 측정한다. 미분무를 분사하지 않은 경우, 열유속은 약 1.57 kW/m²으로 나타났다.

(3) 실험 시작 후 약 61 s에서 펌프를 이용하여 미분무를 분사한다. 미분무를 분사한 시점에서부터 열유속이 급격히 감소하는 경향이 관찰되고, 이후 미분무를 계속 분사하고 있는 동안 열유속이 일정하게 유지되는 것(약 0.89 kW/m²)으로 나타났다.

(4) 미분무를 분사하지 않은 경우 20–60 s, 미분무를 분사한 경우 80–120 s에서 측정된 열유속의 평균값을 이용하여 식 (1)^(10,17)을 사용하여 복사열 감쇠율(γ)을 계산한다.

Table 4.1 Summary of water flow rate and air flow rate conditions for twin-fluid nozzle

Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)
Small_ETN20	36—105	10—30
Large_ETN20	37—300	20—60
Small_ITN20	100—300	30—50
Middle_ITN20	100—700	40—80
Large_ITN20	100—700	60—100
Small_ITN70	100—300	30—50
Middle_ITN70	100—700	40—80
Large_ITN70	100—700	60—100

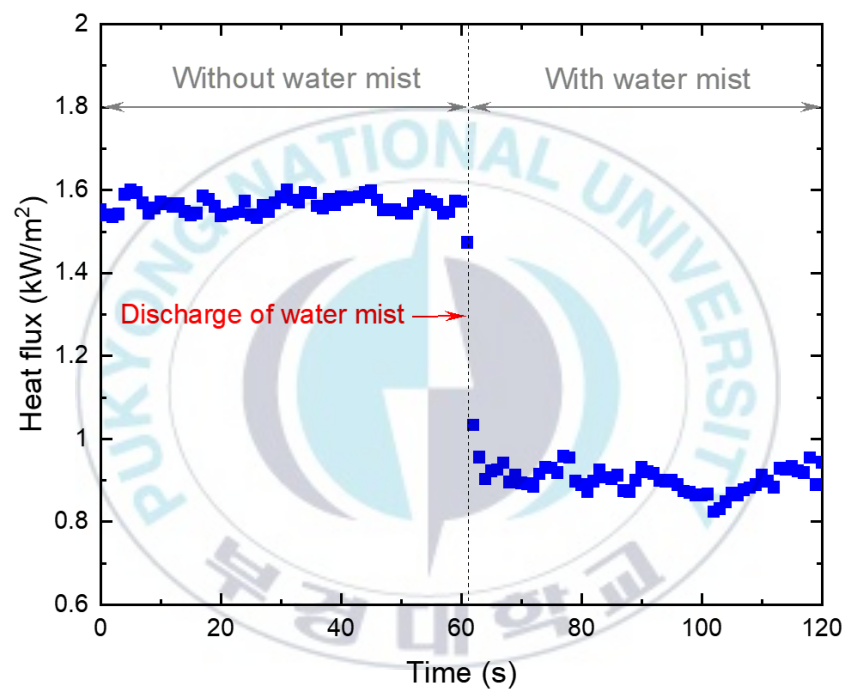


Figure 4.2 Exemplified experimental result of Small_ITN70 for data reduction
(Water flow rate = 300 g/min, air flow rate = 50 L/min).

4.2 실험 결과 및 분석

4.2.1 물 및 공기 공급 유량 영향

미분무의 복사열 감쇠 성능은 미분무의 분사 조건(즉, 물 및 공기의 공급 유량 조건)에 따라 다양하게 나타날 수 있고, 이에 따라 복사열 감쇠 성능이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 물과 공기의 공급 유량 조건에 따른 복사열 감쇠 성능을 확인하였다. Table 4.2에 2유체노즐의 실험 조건 및 복사열 감쇠율을 정리하여 나타내었다. 본 실험 조건에서 복사열 감쇠율은 전체적으로 6.9–52.4%로 나타났다.

Figure 4.3에 외부혼합형 2유체노즐 Small_ETN20, Large_ETN20을 이용하여 물과 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율을 나타내었다. Figure 4.3(a)에 Small_ETN20의 복사열 감쇠율 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 비교적 물 공급 유량이 적은 조건에서는 전체적으로 물 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. 하지만 특정 물 공급 유량 조건 이후에서는 복사열 감쇠율의 변화가 감소하거나 미미한 것으로 관찰되었다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 공기 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향이 나타났다. 공기 공급 유량이 10 L/min에서 20 L/min으로 증가함에 따라 복사열 감쇠율은 급격히 증가하고, 이후 20 L/min에서 30 L/min으로 증가하는 경우, 복사열 감쇠율은 비교적 완만하게 증가하거나 변화가 미미한 것으로 관찰되었다. Small_ETN20의 복사열 감쇠율은 10.9–18.2%로 측정되었다.

Figure 4.3(b)에 Large_ETN20의 복사열 감쇠율 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율은 비교적 물 공급 유량이 적은 조

건에서 전체적으로 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 급격히 증가하는 경향이 관찰되었고, 이후 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 비교적 물 공급 유량이 적은 조건에 비해 완만하게 증가하는 경향이 나타났다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율은 공기 공급 유량 20 L/min에서 40 L/min으로 증가하는 경우, 전체적으로 증가하는 경향이 나타나지만, 공기 공급 유량 40 L/min에서 60 L/min으로 증가하는 경우, 공기 공급 유량 변화에 따른 복사열 감쇠율의 변화가 비교적 작은 것처럼 관찰되었다. 본 실험 조건에서 Large_ETN20의 복사열 감쇠율은 6.9–18.8%로 측정되었다.



Table 4.2 Summary of thermal radiation attenuation for twin-fluid nozzle

Twin-fluid nozzle	Water flow rate (g/min)	Air flow rate (L/min)	Thermal radiation attenuation (%)
Small_ETN20	36–105	10–30	10.9–18.2
Large_ETN20	37–300	20–60	6.9–18.8
Small_ITN20	100–300	30–50	15.0–22.6
Middle_ITN20	100–700	40–80	11.3–23
Large_ITN20	100–700	60–100	13.8–28.4
Small_ITN70	100–300	30–50	27.6–43.3
Middle_ITN70	100–700	40–80	14.8–52.4
Large_ITN70	100–700	60–100	10.6–37.2

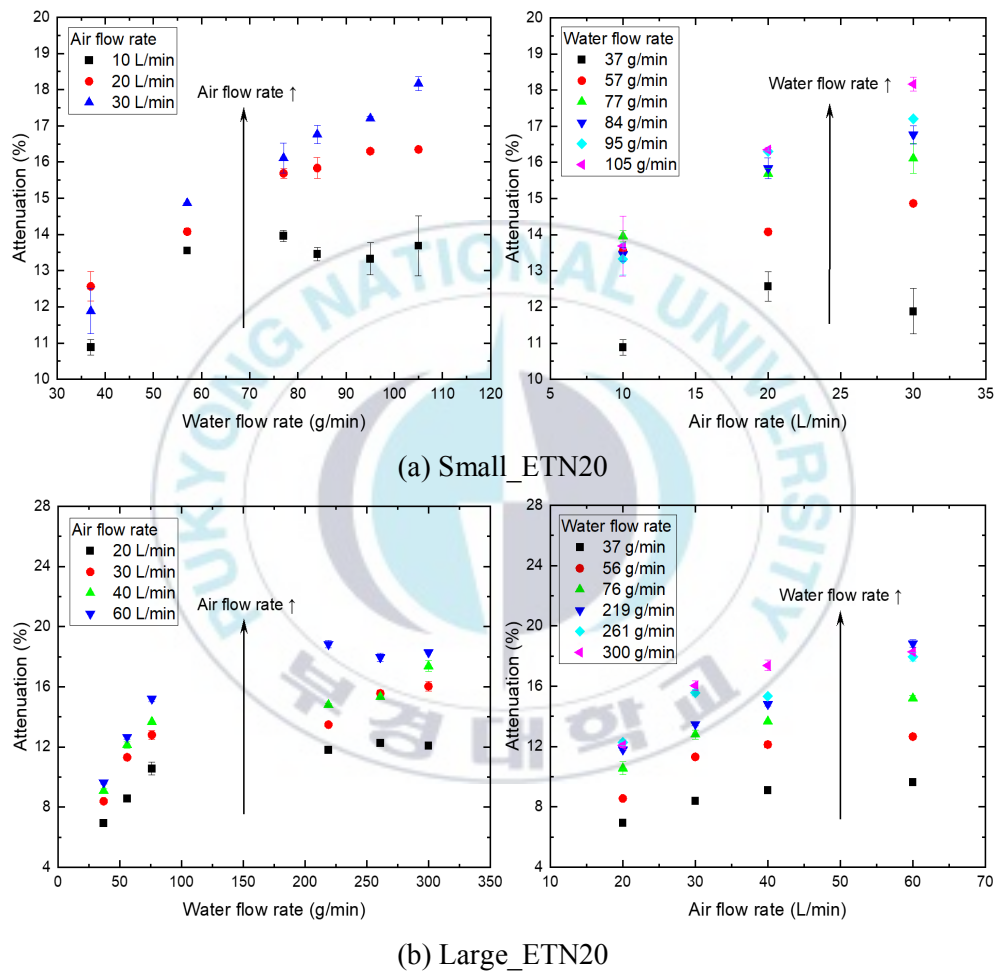
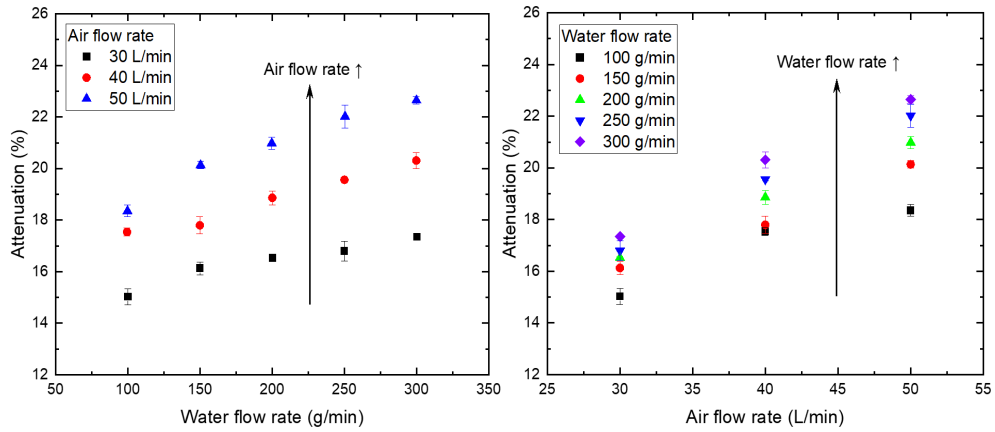


Figure 4.3 Thermal radiation attenuation for Small_ETN20 and Large_ETN20.

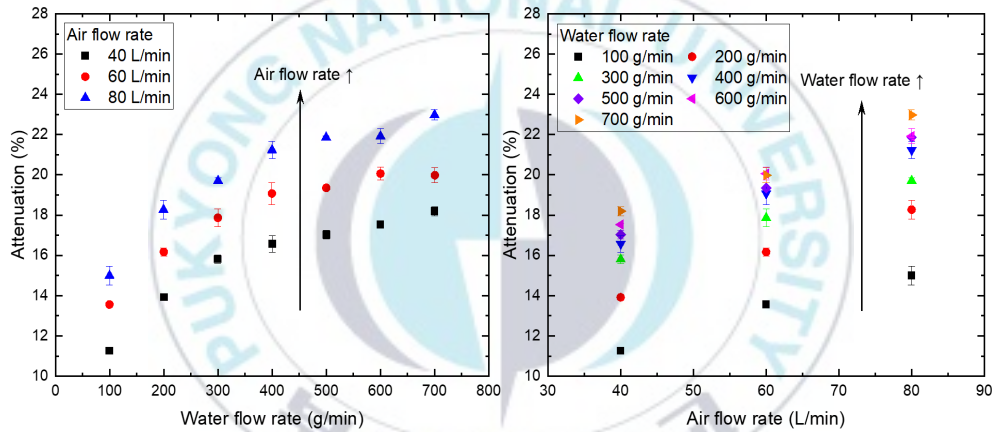
Figure 4.4에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20을 이용하여 물 및 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율을 나타내었다. Figure 4.4(a)에 Small_ITN20의 복사열 감쇠율 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 물 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향이 나타나지만, 공기 공급 유량이 30 L/min 조건인 경우, 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율의 증가율이 감소하는 경향이 관찰되었다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 공기 공급 유량이 증가할수록 전체적으로 증가하는 경향이 관찰되었다. Small_ITN20의 복사열 감쇠율은 15.0–22.6%로 측정되었다.

Figure 4.4(b)에 Middle_ITN20에 대한 복사열 감쇠율 측정 결과를 나타내었다. 물 공급 유량의 경우, 공기 공급 유량이 일정한 조건에 대해 물 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. 공기 공급 유량의 경우, 공기 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 동일한 경향이 관찰되었고, Middle_ITN20의 복사열 감쇠율은 11.3–23%로 나타났다.

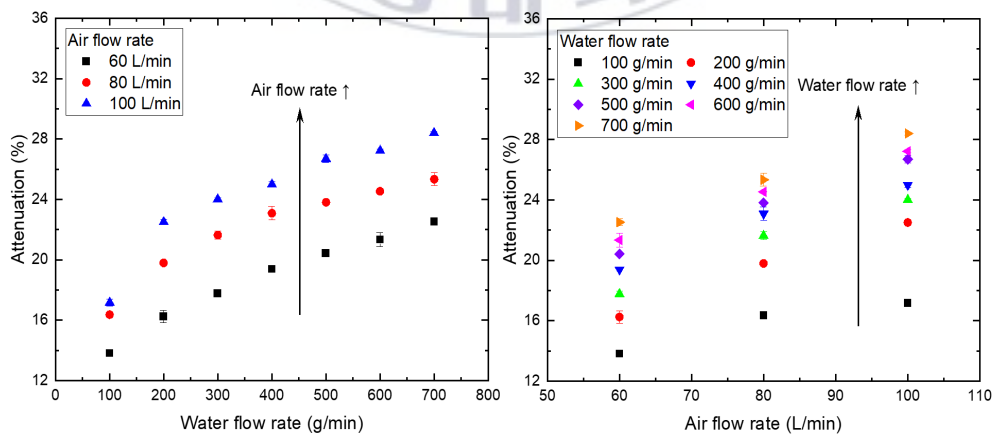
Figure 4.4(c)에 Large_ITN20의 복사열 감쇠율을 나타내었다. 물과 공기 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 복사열 감쇠율이 증가하는 경향은 Figure 4.4(a),(b)와 동일하게 나타났다. 측정 결과 Large_ITN20의 복사열 감쇠율은 13.8–28.4%로 나타났다.



(a) Small ITN20



(b) Middle ITN20



(c) Large ITN20

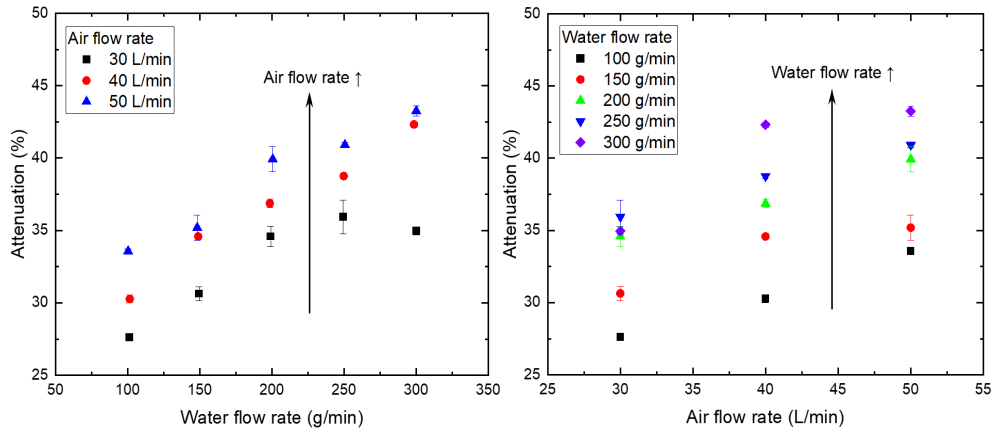
Figure 4.4 Thermal radiation attenuation for Small ITN20, Middle ITN20, and Large ITN20.

Figure 4.5에 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ITN70의 물과 공기 공급 유량에 대한 복사열 감쇠율을 나타내었다.

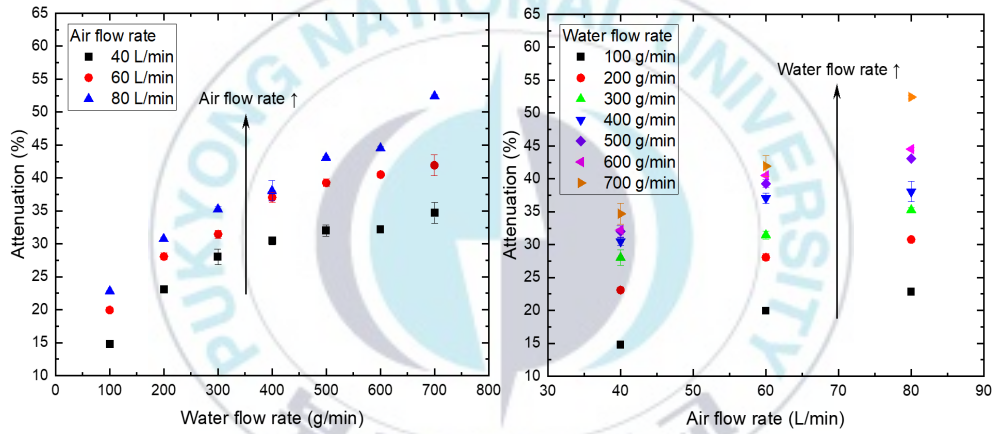
Figure 4.5(a)에 Small_ITN70의 복사열 감쇠율 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 물 공급 유량이 증가할수록 전체적으로 복사열 감쇠율이 증가하는 것으로 관찰되었다. 하지만 공기 공급 유량 30 L/min 조건인 경우, 특정 물 공급 유량 조건 이후에서는 복사열 감쇠율의 증가를 확인하기 어려운 것으로 나타났다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 공기 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. Small_ITN70의 복사열 감쇠율은 27.6–43.3%로 측정되었다.

Figure 4.5(b)에 Middle_ITN70의 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 물 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 복사열 감쇠율이 증가하는 것으로 관찰되었다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, 공기 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. 본 실험 조건에서 Middle_ITN70의 복사열 감쇠율은 14.8–52.4%로 측정되었다.

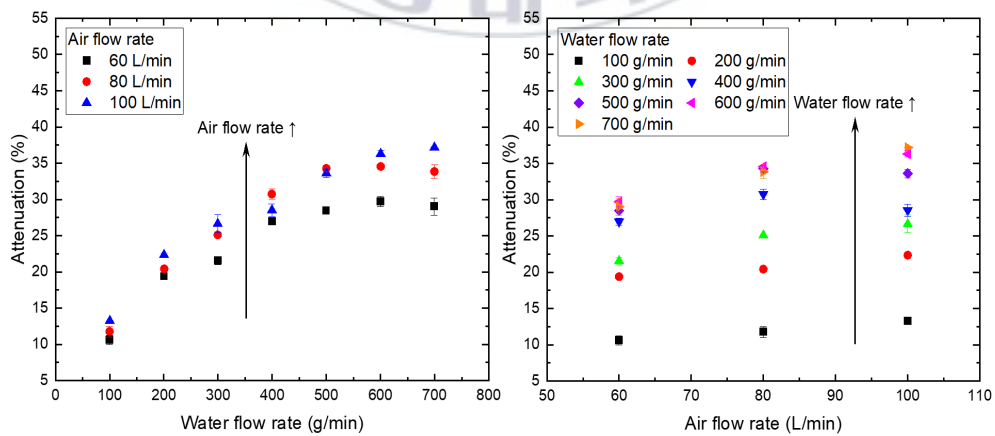
Figure 4.5(c)에 Large_ITN70의 실험 결과를 나타내었다. 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, Figure 4.5(a),(b)와 마찬가지로 물 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 복사열 감쇠율이 증가하는 것으로 관찰되었다. 하지만 공기 공급 유량 60, 80 L/min 조건의 경우, 특정 물 공급 유량 조건 이후에서는 물 공급 유량 증가에 따른 복사열 감쇠율의 변화가 감소하거나 미미한 것으로 관찰되었다. 공기 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 경우, Figure 4.5(a),(b)와 동일하게 공기 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향을 확인하였다. Large_ITN70의 복사열 감쇠율은 10.6–37.2%로 측정되었다.



(a) Small_ITN70



(b) Middle_ITN70



(c) Large_ITN70

Figure 4.5 Thermal radiation attenuation for Small_ITN70, Middle_ITN70, and Large_ITN70.

본 연구에서는 외부 및 내부혼합형 2유체노즐을 이용하여 물 및 공기 공급 유량 조건에 대한 복사열 감쇠 성능을 측정하였다. 물 공급 유량 영향의 경우, 전체적으로 물 공급 유량이 증가할수록 복사열 감쇠율이 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 그 원인은 물 공급 유량 증가에 따라 복사열을 감쇠할 수 있는 미분무의 전체적인 액적 개수 및 표면적, 액적 밀도가 증가하였기 때문으로 판단된다^(10,24). 한편, 공기 공급 유량 영향의 경우, 공기 공급 유량 증가에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 액체를 미립화할 수 있는 기체 에너지가 증가하게 되고, 미분무의 액적 크기 감소에 의해 액적 개수 및 전체 표면적이 증가하며, 이를 통해 특정 공간에서 복사열을 감쇠할 수 있는 액적 체류 시간이 증가되기 때문으로 판단된다^(14,19,25).

복사열 감쇠율 결과를 토대로 분사각 20°, 70°의 내부혼합형 2유체노즐을 서로 비교하였을 때 넓은 미분무의 분사각을 구현하는 Small_ITN70, Middle_ITN70, Large_ITN70의 복사열 감쇠율이 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20에 비해 전체적으로 더 높게 나타나는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 제3장의 ‘2유체노즐 분사 특성 측정 실험’ 중 분무폭 측정 결과를 토대로 분사각 20°인 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 분무폭(약 200 mm)에 비해 분사각 70°인 내부혼합형 2유체노즐의 분무폭(약 300–320 mm)이 확연히 넓게 나타나며, 이를 통해 복사열 감쇠에 영향을 주는 미분무 경로가 증가하기 때문으로 판단된다.

4.2.2 분사 특성에 대한 독립적인 영향

4.2.2.1 물 공급 유량에 대한 독립적인 영향

분사각이 20°인 외부혼합형 2유체노즐 Small_ETN20, Large_ETN20과 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20을 이용하여 측정된 액적 크기 및 복사열 감쇠율 결과를 토대로 선형 회귀(linear regression) 분석을 통해 미분무 분사 특성 조건 액적 크기, 분사각이 고정되어 있는 경우(즉, 액적 크기, 분사각이 일정한 조건), 복사열 감쇠율에 대한 물 공급 유량의 독립적인 영향을 평가하였다. 본 연구에서는 액적 크기 측정 결과인 SMD 및 VMD를 이용하여 두 가지 방법으로 독립적인 영향을 평가하였다.

Table 4.3에 SMD의 액적 크기 측정 결과를 바탕으로 물 공급 유량의 복사열 감쇠에 대한 독립적인 영향 결과를 나타내었다. 미분무 분사 특성 중 분사각 20°, SMD가 40–60 μm 인 경우, 물 공급 유량이 40.6 g/min에서 627.4 g/min로 증가함에 따라 복사열 감쇠율은 7.2%에서 26.7%로 증가하였다.

Figure 4.6에 Table 4.3을 토대로 데이터 피팅(fitting)한 결과를 나타내었다. R-square 값은 0.77로 나타났고, 본 실험 조건에서 물 공급 유량의 지수는 0.32로 나타났다. 따라서 식 (7)과 같은 상관관계를 도출하였다.

$$\gamma \sim \dot{m}_w^{0.32} \quad (7)$$

Table 4.3 Summary of dependency of water flow rate effect (SMD)

Spray angle (°)	SMD (μm)	Water flow rate (g/min)	Thermal radiation attenuation (%)	Twin-fluid nozzle
20	40	42.9–246.6	11.7–23.2	Small_ETN20
	50	40.6–548.6	7.2–26.7	Large_ETN20
				Small_ITN20
	60	77.5–627.4	10.6–24.0	Middle_ITN20 Large_ITN20

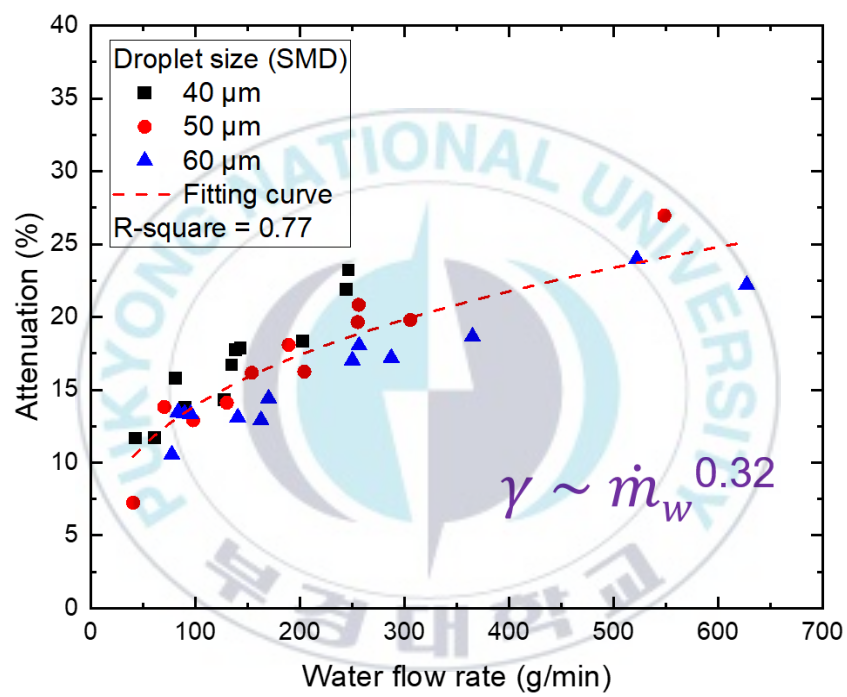


Figure 4.6 Dependency of water flow rate effect
(Spray angle = 20°, SMD constant).

Table 4.4에 VMD의 측정데이터를 토대로 복사열 감쇠율에 대한 물 공급 유량의 독립적인 영향을 평가한 결과를 나타내었다. 분사각 20°, VMD가 40–60 μm 인 경우, 물 공급 유량이 39.8 g/min에서 614.1 g/min 증가함에 따라 복사열 감쇠율은 7.2%에서 27.4%로 증가하였다.

Figure 4.7에 Table 4.4를 토대로 데이터 피팅한 결과를 나타내었고, R-square 값은 0.81로 나타났다. 본 실험 조건에서 VMD의 측정데이터를 토대로 복사열 감쇠율에 대해 물 공급 유량의 지수는 0.33으로 나타났다. 따라서 식 (8)과 같은 상관관계를 도출하였다.

$$\gamma \sim \dot{m}_w^{0.33} \quad (8)$$


Table 4.4 Summary of dependency of water flow rate effect (VMD)

Spray angle (°)	VMD (μm)	Water flow rate (g/min)	Thermal radiation attenuation (%)	Twin-fluid nozzle
20	40	47.1–181	10.0–20.7	Small_ETN20
	50	51.1–269	12.4–23.5	Large_ETN20 Small_ITN20 Middle_ITN20
	60	39.8–614.1	7.2–27.4	Large_ITN20

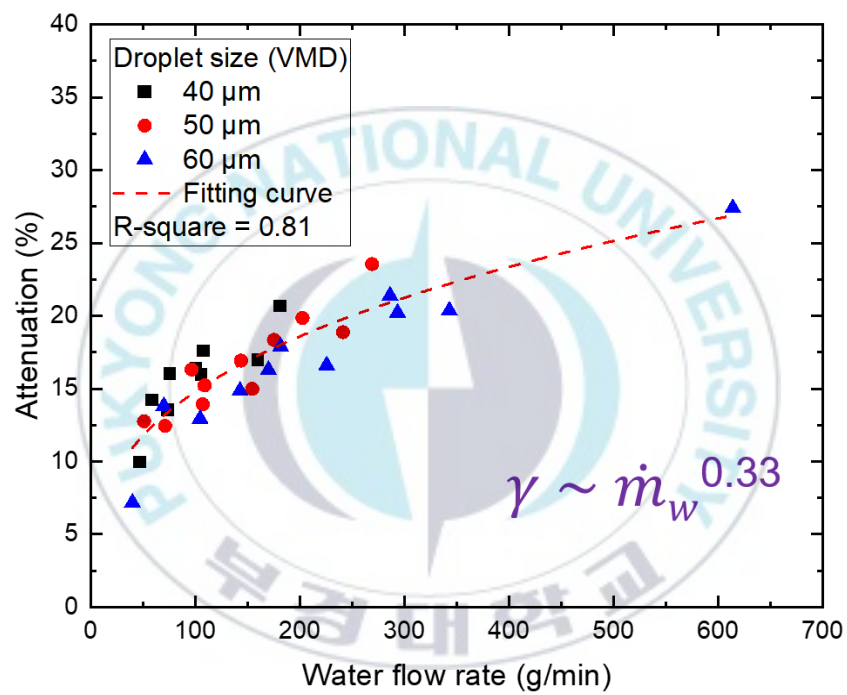


Figure 4.7 Dependency of water flow rate effect
(Spray angle = 20°, VMD constant).

4.2.2.2 액적 크기에 대한 독립적인 영향

분사각이 20°인 외부혼합형 2유체노즐 Large_ETN20과 내부혼합형 2유체노즐 Small_ITN20, Middle_ITN20, Large_ITN20을 이용하여 측정한 액적 크기, 복사열 감쇠율 결과를 토대로 선형 회귀 분석을 통해 미분무 분사 특성 조건 중 물 공급 유량, 분사각이 일정한 조건인 경우, 복사열 감쇠율에 대한 액적 크기의 독립적인 영향을 평가한 결과를 나타내었다.

Table 4.5에 복사열 감쇠율에 대한 SMD의 독립적인 영향을 평가한 결과를 나타내었다. 전체적으로 분사각 20°, 물 공급 유량이 200, 300 g/min으로 일정한 조건에서 SMD가 37.1 μm 에서 99.4 μm 로 증가함에 따라 복사열 감쇠율은 24.0%에서 11.6%로 감소하였다.

Figure 4.8에 Table 4.5를 토대로 데이터 피팅한 결과를 나타내었다. R-square 값은 0.65로 나타났고, R-square 값이 다소 낮게 나타나는 것처럼 보이나 데이터의 전체적인 경향이 유사하게 나타난다는 점을 고려하였을 때, 데이터 피팅 결과는 유효하다고 생각된다. 본 실험 조건에서 복사열 감쇠율에 대해 액적 크기의 지수는 -0.59로 나타났다. 따라서 식 (9)와 같은 상관관계를 도출하였다.

$$\gamma \sim D^{-0.59} \quad (9)$$

Table 4.5 Summary of dependency of SMD effect

Spray angle (°)	Water flow rate (g/min)	SMD (μm)	Thermal radiation attenuation (%)	Twin-fluid nozzle
20	200	37.1–81.4	11.6–22.5	Large_ETN20 Small_ITN20
	300	43.3–99.4	12.1–24.0	Middle_ITN20 Large_ITN20

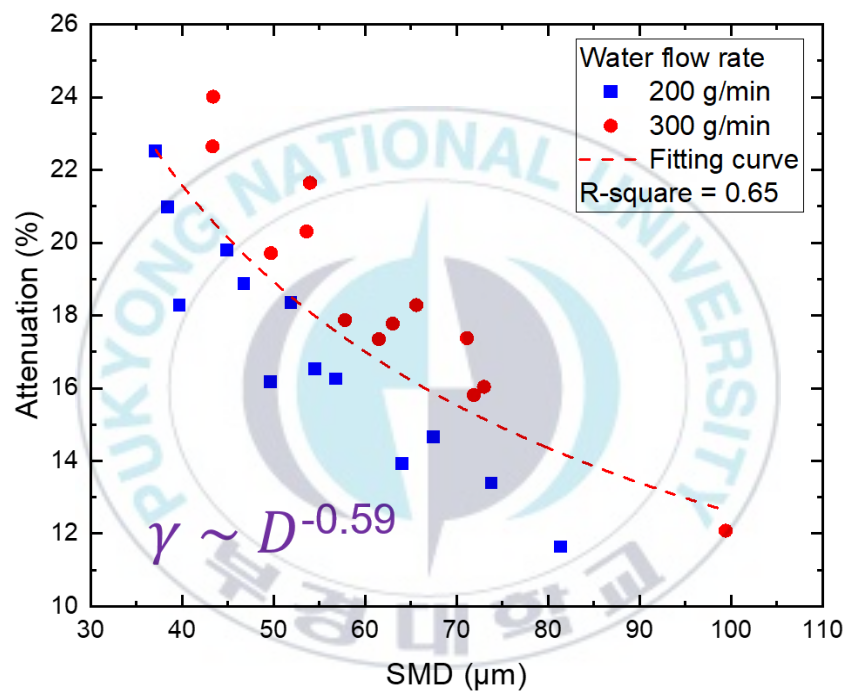


Figure 4.8 Dependency of SMD effect
(Spray angle = 20°, water flow rate constant).

Table 4.6에 복사열 감쇠율에 대한 VMD의 독립적인 영향을 평가한 결과를 정리하였다. 전체적으로 분사각 20°, 물 공급 유량이 200, 300 g/min으로 일정한 조건에 대해 VMD가 41.9 μm 에서 107.6 μm 로 증가함에 따라 복사열 감쇠율은 24.0%에서 11.6%로 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 4.9에 Table 4.6을 토대로 데이터 피팅한 결과를 나타내었다. R-square 값은 0.59로 나타났고, Figure 4.8과 유사하게 R-square 값이 다소 낮게 나타나지만, 데이터의 전체적인 경향을 고려하였을 때 데이터 피팅 결과는 유효하다고 판단된다. 본 실험 조건에서 복사열 감쇠율에 대해 액적 크기의 지수는 -0.53으로 나타났다. 따라서 식 (10)과 같은 상관관계를 도출하였다.

$$\gamma \sim D^{-0.53} \quad (10)$$

Table 4.6 Summary of dependency of VMD effect

Spray angle (°)	Water flow rate (g/min)	VMD (μm)	Thermal radiation attenuation (%)	Twin-fluid nozzle
20	200	41.9–98.3	11.6–22.5	Large_ETN20 Small_ITN20
	300	49–107.6	12.1–24.0	Middle_ITN20 Large_ITN20

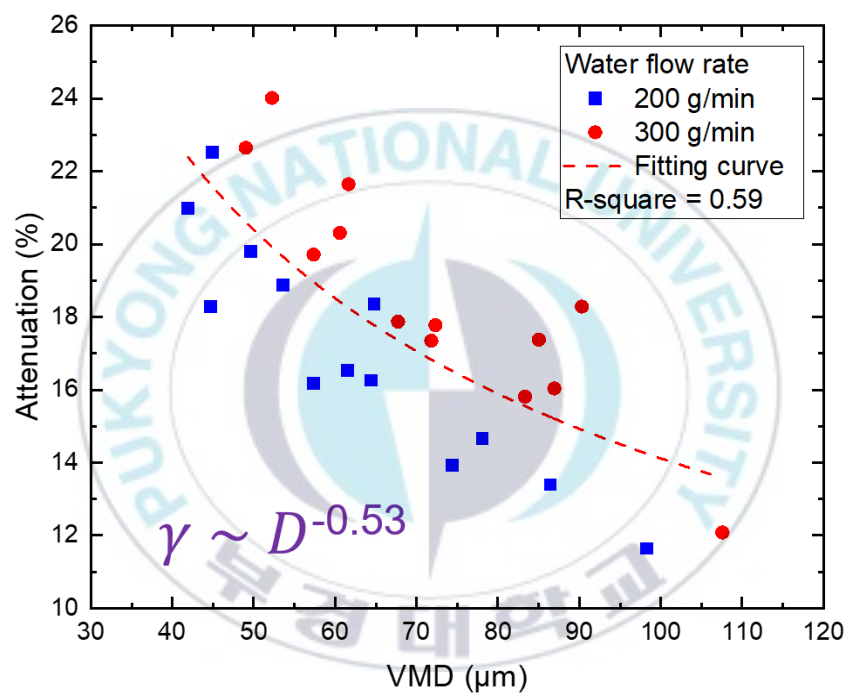


Figure 4.9 Dependency of VMD effect
(Spray angle = 20°, water flow rate constant).

제 5 장 결 론

본 연구에서는 2유체노즐의 미분무 분사 특성이 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 전산시뮬레이션을 통해 물 공급 유량, 액적 크기, 분사각이 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대해 선행적으로 평가하였다. 실험을 통해 8종류의 외부 및 내부혼합형 2유체노즐의 분사 특성(공급 압력, 액적 크기, 분사각, 분무폭, 유량 분포)을 측정하였고, 다양한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 2유체노즐의 미분무에 의한 복사열 감쇠율을 측정하였다. 최종적으로 실험데이터를 토대로 물 공급 유량과 액적 크기가 복사열 감쇠에 미치는 독립적인 영향에 대한 검토를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 전산시뮬레이션 수행 결과, 최대 복사열 감쇠율 변화의 경우, 미분무 분사 특성의 최솟값에 대해 3배 증가하였을 때 최대 복사열 감쇠율은 물 공급 유량의 경우 약 57.4% 증가하고, 액적 크기의 경우 약 55.5% 감소하며, 분사각의 경우 약 11% 감소하는 것으로 관찰되었다. 평균 복사열 감쇠율 변화의 경우, 미분무 분사 특성의 최솟값에 대해 3배 증가하였을 때 평균 복사열 감쇠율은 물 공급 유량의 경우 약 75.5% 증가하고, 액적 크기의 경우 약 42.1% 감소하며, 분사각의 경우 약 18.5% 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 2유체노즐의 압력 측정 결과, 물 공급 압력은 1.3–59.6 kPa, 공기 공급 압력은 29.8–316.1 kPa로 나타났다. 전체적으로 유사한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 노즐의 오리피스 및 환형 갭(외부혼합형의 경우)의 면적

이 작을수록 압력이 높게 나타나는 것으로 관찰되었다.

(3) 미분무의 액적 크기 측정 결과, SMD(Sauter Mean Diameter)는 19.9–99.4 μm , VMD(Volume Median Diameter, $D_{V0.5}$)는 21.1–107.6 μm 로 측정되었다. 본 실험 조건에서 전체적으로 액적 크기가 약 110 μm 이하인 미세한 미분무가 형성됨을 확인하였다.

(4) 미분무 가시화를 통한 분사각 및 분무폭 측정 결과, 분사각은 5종류의 경우 20°, 3종류의 경우 70°로 측정되었다. 분사각이 20°인 경우, 분무폭은 약 200 mm로 측정되었고, 분사각이 70°인 경우, 분무폭은 약 300–320 mm로 측정되었다. 한편, 유량 분포 측정 결과, 본 연구에서 이용한 모든 2유체노즐의 분사 형태는 중실원추형으로 확인되었다.

(5) 2유체노즐의 미분무에 의한 복사열 감쇠율 측정 실험 결과, 복사열 감쇠율은 전체적으로 6.9–52.4%인 것으로 나타났다. 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였는데 이는 형성된 수막 내에 미분무의 액적 개수와 전체 표면적, 액적 밀도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한, 액적 크기가 감소함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였는데 액적 크기 감소에 의해 액적 개수 및 전체 표면적, 액적 체류 시간이 증가되기 때문으로 생각된다. 한편, 분사각이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 나타났는데 분사각이 증가에 따른 분무폭 증가에 의해 복사열 감쇠에 영향을 주는 미분무 경로가 증가하기 때문으로 판단된다.

(6) 복사열 감쇠율(γ)에 대한 물 공급 유량($\dot{m}_w$)의 독립적인 영향을 평가한 결과, SMD가 거의 일정한 조건의 경우, $\gamma \sim \dot{m}_w^{0.32}$ 에 비례하였고, VMD

가 거의 일정한 조건의 경우, $\gamma \sim \dot{m}_w^{0.33}$ 에 비례하였다. 복사열 감쇠율에 대한 액적 크기(D)의 독립적인 영향을 평가한 결과, 물 공급 유량이 거의 일정한 조건에서 SMD의 경우, $\gamma \sim D^{-0.59}$, VMD의 경우, $\gamma \sim D^{-0.53}$ 에 비례하는 상관관계를 확인하였다. 본 실험 조건에서는 액적 크기가 물 공급 유량에 비해 복사열 감쇠율 변화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.



후 기

본 학위 논문의 “제2장 선행 전산시뮬레이션” 내용은 본 학위 논문의 저자가 학위 과정 중 한국화재소방학회 논문지에 게재한 아래와 같은 논문의 내용을 바탕으로 작성하였음.

- 조재근, 이치영, 2021, Fire Dynamics Simulator를 이용한 미분무의 분사 특성이 복사열 감쇠에 미치는 영향 검토, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 35, No. 1, pp. 1-10.



References

1. National Fire Agency, "Fire Statistical Yearbook" (2019).
2. NFSC 104A, "National Fire Safety Code for Water Mist Fire Extinguishing System" (2021).
3. W. C. Park, "The Latest Fire Suppression System", DongHwa Technology Publishing Co., Republic of Korea (2014).
4. J. M. Buchlin, "Thermal Shielding by Water Spray Curtain", Journal of Loss Prevention in the Process Industries Vol. 18, pp. 423–432 (2005).
5. 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).
6. T. Log and P. C. Brookes, "'Water Mist' for Fire Protection of Historic Buildings and Museums", Museum Management and Curatorship, Vol. 14, No. 3, pp. 283–298 (1995).
7. J. M. Buchlin, "Mitigation of Industrial Hazards by Water Spray Curtains", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 50, pp. 91–100 (2017).
8. Integrated Fire Systems, "Water Spray Fire Sprinkler Systems" (2018).
9. S. Y. Myeong et al., "Development for the Water Mist Package on Wooden Cultural Properties and Temples" (2010).
10. J. G. Jo and C. Y. Lee, "Examination on Effects 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).
11. S. Y. Lee, "Atomization of Liquid", Minumsa, Seoul (1996).
12. H. S. Jun, "Liquid Atomization", Munundang, Seoul (2009).

13. A. H. Lefebvre and V. G. McDonell, "Atomization and Sprays", 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, USA (2017).
14. K. Usui and K. Matsuyama, "An Experimental Study on Attenuation of Radiant Heat Flux from Flame through Water Droplets", Proceedings of the 11th International Symposium, International Association for Fire Safety Science, pp. 1196–1207 (2014).
15. Lechler, Inc., Solid Stream Nozzles - Catalog
16. Lechler, Inc., Nozzles, Nozzle Systems and Droplet Separators for the Shipbuilding - Catalog
17. 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).
18. D. Balner and K. Barcova, "Attenuation of Thermal Radiation through Water Mist", Process Safety Progress, Vol. 37, No. 1, pp. 18–24 (2018).
19. 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).
20. W. Y. Cheung, "Radiation Blockage of Water Curtains", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 9, No. 1, pp. 7–13 (2009).
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. 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).

23. P. Zhu, X. Wang, Z. Wang, H. Cong and X. Ni, “Experimental and Numerical Study on Attenuation of Thermal Radiation from Large-scale Pool Fires by Water Mist Curtain”, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 33, No. 4, pp. 269–289 (2015).
24. 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).
25. A. Collin, S. Lechene, P. Boulet and G. Parent, “Water Mist and Radiation Interactions: Application to a Water Curtain Used as a Radiative Shield”, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 57, pp. 537–553 (2010).
26. Spraying Systems Co., Korea, Air atomizing nozzles - Catalog
27. H. IKEUCHI CO., LTD., “Pneumatic Spray Nozzles” (2021) - Catalog
28. A. Jones and P. F. Nolan, “Discussions on the Use of Fine Water Sprays or Mists for Fire Suppression”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 8, No. 1, pp. 17–22 (1995).