[Research Paper]

2유체미립화기의 미분무를 이용한 복사열 감쇠에 대한 실험적 연구

조재근 · 이치영^{*,**†}

부경대학교 건축·소방공학부 대학원생, *부경대학교 소방공학과 교수, **부경대학교 건축·소방공학부 교수

Experimental Study on Thermal Radiation Attenuation Using Water Mist of Twin-fluid Atomizer

Jae Geun Jo · Chi Young Lee^{*,**†}

Graduate Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

^{*}Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University,^{**}Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received July 20, 2021; Revised August 16, 2021; Accepted August 17, 2021)

요 약

본 연구에서는 2유체미립화기를 이용하여 미분무에 의한 복사열 감쇠 성능을 검토하였다. Small atomizer의 경우 물 공급 유량은 36~105 g/min, 공기 공급 유량은 10~30 L/min, Large atomizer의 경우 물 공급 유량은 37~300 g/min, 공기 공급 유량은 20~60 L/min 조건에서 실험을 수행하였다. 본 실험 조건에서 Small atomizer와 Large atomizer의 복사열 감쇠율은 각각 6.1~11.9%와 5.2~14.6%로 측정되었다. 물 공급 유량과 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였고, 유사한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 더 큰 복사열 감쇠율을 나타내었다. 본 연구를 통해, 2유체미립화기의 공기(기체)의 분사 면적이 복사열 감쇠 성능을 결정하는 중요한 인자일 수 있음을 확인하였다. 또한, 단위 물 공급 유량 당 복사열 감쇠율 검토를 통해 2유체미립화기가 단일유체미립화기에 비해 동일한 물 공급 유량 조건에서 더 높은 복사열 감쇠율을 나타낼 가능성이 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the thermal radiation attenuation performance of water mist was investigated using twin-fluid atomizers. The water and air flow rates of Small atomizer were 36~105 g/min and 10~30 L/min, whereas those of Large atomizer were 37~300 g/min and 20~60 L/min, respectively. In the present experimental range, the thermal radiation attenuation of Small atomizer and Large atomizer were 6.1~11.9% and 5.2~14.6%, respectively. With the increase in water and air flow rates, the thermal radiation attenuation increased, and under similar water and air flow rate conditions, Small atomizer showed higher thermal radiation attenuation than Large atomizer. Based on the present experimental data, it was found that the air (gas) discharge area is a potentially important factor in determining the thermal radiation attenuation performance. Additionally, through the analysis of thermal radiation attenuation per unit water flow rate, it was confirmed that the twin-fluid atomizer can result in higher thermal radiation attenuation than the single-fluid atomizer under the same water flow rate condition.

Keywords : Twin-fluid atomizer, Water mist, Thermal radiation attenuation

1. 서 론

미분무소화설비는 최소설계압력에서 헤드(head)로부터 방출되는 물입자 중 99%의 누적체적분포가 400 μm 이하로 분무되는 소화설비⁽¹⁾로, 스프링클러설비(sprinkler system)와 같은 기존의 수계소화설비에 비해 적은 물의 양으로 소화가

가능하고 수손에 의한 피해를 줄일 수 있다는 장점⁽²⁾을 가지고 있다. 이러한 미분무소화설비에서 분사되는 미분무는 다양한 화재 상황(즉, A, B, C급 화재)에 적응성이 있는 것⁽¹⁾으로 알려져 있다. 한편, 미분무는 화재 소화 뿐 아니라 다양한 상황(예를 들면, 문화재, 위험물 시설 등)의 화재 방호에도 활용될 수 있다⁽³⁻⁵⁾. 미분무는 액적의 열흡수(absorption) 및 산

[†] Corresponding Author, TEL: +82-51-629-6493, FAX: +82-51-629-7078, E-Mail: cylee@pknu.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

란(scattering) 효과를 통해 화염으로부터 방사되는 복사열을 차단하는 복사열 감쇠 효과⁽³⁾가 있으며, 이러한 복사열 감쇠 효과는 화원 특성, 미립화기(atomizer) 종류, 공급 유량, 공급 압력, 액적 크기, 액적 분포, 분사각, 분무폭 등 여러 인자(factor)에 의해 지대한 영향을 받는다. 미분무에 의한 복사열 감쇠 특성을 더욱 다양한 화재 안전 분야에 적용하기 위해서는 다양한 노즐의 미분무에 의한 복사열 감쇠 성능을 확인하고 이를 극대화하기 위한 연구가 활발하게 수행될 필요가 있다.

기존에는 단일유체미립화기(single-fluid atomizer)를 이용한 복사열 감쇠 성능에 대한 연구가 일부 수행된 바 있다. 단일유체미립화기는 한 종류의 유체(액체)를 이용하여 일정한 양의 해당 액체를 많은 수의 액적으로 분할시키는 미립화기⁽⁶⁾를 의미하는데, 일반적으로 액체를 높은 압력과 속도로 오리피스(orifice)에 통과시켜 미분무를 형성⁽⁶⁾하고 이를 이용하여 복사열을 감쇠시킨다. Murrell 등⁽⁷⁾은 3종류의 중실원추형(full cone)과 1종류의 중공원추형(hollow cone) 미립화기를 이용하여 복사열 감쇠 성능에 대한 실험을 수행하였고 각 미립화기의 성능을 비교하였다. 그들은 공급 압력 및 공급 유량이 증가함에 따라 액적 크기가 감소하고 복사열 감쇠 성능이 증가한다고 보고하였고, 그들의 실험에서 복사열 감쇠율은 2.8~35.5%로 나타났다. Balner와 Barcova⁽⁸⁾는 히터(heater)와 열유속계 사이에 다양한 분무 특성의 수막을 분사하여 복사열 감쇠 성능을 측정하였다. 액적 크기에 비해 높은 유량과 넓은 유량 분포가 복사열 감쇠에 더 큰 영향을 미칠 수 있다고 보고하였고, 그들의 실험에서의 복사열 감쇠율은 15.2~51.2%로 나타났다. 본 연구 그룹⁽⁹⁾에서는 기존 실험 연구들^(7,8)에서 확인하기 어려웠던 미분무 분사 특성(즉, 액적 크기, 물 공급 유량, 분사각)이 복사열 감쇠에 미치는 독립적인 영향을 fire dynamics simulator (FDS)를 이용하여 검토하였다. 미분무의 액적 크기는 100~300 μm , 물 공급 유량은 1~3 L/min, 분사각은 60~180° 조건에서 전산시뮬레이션을 수행하였고, 최대 및 평균 복사열 감쇠율은 액적 크기 변화에 의해 각각 33.7~75.6%와 12.1~20.8%, 물 공급 유량 변화에 의해 각각 39.2~61.7%와 11.9~20.9%, 분사각 변화에 의해 각각 51.3~57.7%와 15.0~17.8%로 나타났다.

한편, 드렌처 헤드(drencher head)도 한 종류의 유체(예를 들면, 물)를 이용하여 다수의 액적을 생산하는데, 반사판에 물을 충돌시켜 물분무를 형성하고 이를 이용하여 복사열을 감쇠시킬 수 있다. Cheung⁽¹⁰⁾은 프로판올 풀화재(propanol pool fire) 조건에서 드렌처 헤드를 통해 분사된 물분무 수막의 복사열 감쇠 성능에 대한 실험을 수행하였다. 화원 크기, 공급 유량, 공급 압력이 증가할수록 복사열 감쇠 성능은 증가하였다. 공급 압력이 4 bar에서 6 bar로 증가할 때 복사열 감쇠 성능은 약 36%에서 57%로 증가하였고, 유량이 1.02 L/s에서 1.30 L/s로 증가할 때 복사열 감쇠 성능은 31.8%에서 59.2%로 증가한다고 보고하였다. 또한, 오리피스

직경이 작을수록 방사되는 액적 크기가 감소하여 복사열 감쇠 성능이 증가한다고 보고하였다. Chow 등⁽¹¹⁾은 3가지 종류의 드렌처 헤드를 이용하여 헤드 종류에 따른 복사열, 연기, 독성 가스 차단 효과에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 복사열 감쇠 성능은 68.1~75.6%라고 보고하였다. Lee 등⁽¹²⁾은 드렌처 헤드의 특성(예를 들면, 오리피스의 직경, 반사판의 거리, 반사판의 직경)을 변화시켜 이러한 인자가 복사열 감쇠에 미치는 영향에 대한 실험을 진행하였고 그 결과, 복사열 감쇠율은 12~26%로 나타났다.

한편, 미분무를 효과적으로 발생시킬 수 있는 미립화기로 2유체미립화기(twin-fluid atomizer)를 고려해 볼 수 있다. 2유체미립화기는 단일유체미립화기와 달리 액체의 미립화를 위해 기체를 이용한다. 즉, 고속의 기체를 이용하여 비교적 저속의 액체를 미립화시켜서 미분무를 형성^(6,13)한다. 2유체미립화기는 비교적 낮은 압력에서 매우 미세한 크기의 미분무를 형성할 수 있고, 액체와 기체를 분리하여 독립적으로 공급할 수 있어서 다양한 분사 특성을 구현할 수 있다는 장점^(6,13)이 있다. 2유체미립화기를 이용한 화재 소화 성능에 대한 연구가 일부 이루어졌으며, 본 연구 그룹에서도 해당 연구를 수행^(14,15)한 바 있다. 예를 들면, Kim 등⁽¹⁴⁾은 2가지 종류의 2유체미립화기를 이용하여 밀폐된 챔버(chamber)에서 헵탄 풀화재(heptane pool fire) 소화 실험을 수행하였고, 2유체미립화기의 분사 면적 및 기체 종류가 화재 소화 시간, 연료 표면 근처 최고 온도 및 최소 산소 농도에 미치는 영향을 분석하였다. Jeong과 Lee⁽¹⁵⁾는 2유체미립화기의 미분무 분사 특성과 헵탄 풀화재 소화 성능에 대한 실험을 수행하였고, 해당 실험 결과를 단일유체미립화기를 이용한 기존 실험 결과와 비교 및 검토하였다. 그러나 기존 연구 동향 검토 결과, 2유체미립화기를 이용한 복사열 감쇠 연구는 거의 수행되지 않은 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 2유체미립화기의 분사 특성에 따른 복사열 감쇠 성능을 검토하였다. 크기가 다른 2가지 종류의 2유체미립화기를 이용하였고, 물 공급 유량, 공기 공급 유량, 액적 크기 등이 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향을 비교하고 분석하였다.

2. 실험 장치, 조건 및 데이터 처리

2.1 실험 장치 및 조건

Figure 1에 2유체미립화기의 미분무에 의한 복사열 감쇠 성능 측정을 위해 구축한 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 미분무 생성을 위해 2유체미립화기에 물과 공기를 공급하였다. 2유체미립화기에 물을 공급하기 위해 순수 제조장치(water purification system, MDM, Mini Pure I)를 통해 얻은 물을 물탱크(water tank)에 저장하였다. 저장된 물을 공급 유량 조건에 따라 마이크로 기어 펌프(micro gear pump, Longer pump, WT3000-1JB/MS213XD0PT) 또는 피스톤 로터리 펌프(piston rotary pump, Fluid Metering Inc., RHB)를

Figure 1. Schematic diagram of experimental set up.

Figure 2. Schematic diagram of twin-fluid atomizers (Bottom-view).

이용하여 공급하였다. 물 공급 유량은 전자 저울(electronic balance, AND, CB-2000, resolution: 0.1 g)을 이용하여 다양한 펌프 작동 조건에서 물을 1 min 간 2유체미립화기로 공급할 때, 감소된 물탱크의 무게를 3회 반복 측정하여 도출하였다. 즉, 실험을 통해 펌프의 revolutions per minute (RPM)이나 직류 전압(DC voltage)과 물 공급 유량 간 관계식을 도출하여 활용하였다. 한편, 2유체미립화기에 공기를 공급하기 위해 공기압축기(air compressor, GSCOMP, GSOC-400C)를 사용하였고 mass flow controller (MFC, Line Tech, M3100V)를 이용하여 공급 유량을 조절하였다. 열원은 히터(quartz heater, OMEGA, QH-081060-T)를 이용하였고 열화상 카메라(thermal imagers, FLUKE, Ti400)를 이용하여 히터 표면 중심 온도를 측정하였다. 또한, 히터로부터 방사된 복사열유속을 측정하기 위해 열유속계(heat flux gauge, Hukseflux Thermal Sensors B.V., SBG01-010)를 사용하였고 순환수조(bath circulator, DAIHAN Scientific, Maxircu™ CL-12)로 열유속계에 물을 순환시켰다. 열유속계는 히터의 정중앙에 정렬하여 설치하였고, 2유체미립화기를 통해 분사된 미분무를 열유속계와 히터에 닿지 않도록 히터와 열유속계 간의 거리는 약 417

mm로 설정하였다. 한편, 2유체미립화기는 히터와 열유속계 사이에 히터로부터 거리 214 mm, 높이 200 mm인 위치에 고정하였다. 측정된 복사열유속 데이터는 데이터 수집 장치(data acquisition system, KEYSIGHT, 34972A)를 이용하여 1 s 간격으로 수집하여 노트북(notebook)에 저장하였다.

본 연구에서는 기존 연구⁽¹⁴⁾에서 사용한 2가지 종류의 크기가 다른 2유체미립화기를 이용하였다. Figures 2(a)와 2(b)에 크기가 작은 2유체미립화기(즉, Small atomizer)와 크기가 큰 2유체미립화기(즉, Large atomizer)의 개략도를 각각 나타내었다. 2가지 종류의 2유체미립화기 모두, 중심에 있는 오리피스에서 물이 분사되고 중심 오리피스 주변의 환형갭(annular gap)에서 공기가 분사된다. 물과 공기가 외부에서 충돌하여 미분무를 형성하는 외부 혼합형 2유체미립화기로 분사 형태는 중실원추형(full cone)이다. Small atomizer의 경우 물이 분사되는 오리피스 내경은 0.508 mm, 공기가 분사되는 환형 부분의 간격은 0.178 mm이고, Large atomizer의 경우 물이 분사되는 오리피스 내경은 1.524 mm, 공기가 분사되는 환형 부분의 간격은 0.254 mm이다.

본 연구의 실험 조건은 다음과 같다. Small atomizer의 경

Figure 3. Exemplified experimental result of Small atomizer for data reduction (Water flow rate = 95 g/min, air flow rate = 20 L/min).

우 물 공급 유량은 36~105 g/min, 공기 공급 유량은 10~30 L/min이고, Large atomizer의 경우 물 공급 유량은 37~300 g/min, 공기 공급 유량은 20~60 L/min 조건에서 실험을 수행하였다. Small atomizer에 비해 Large atomizer의 유량 조건이 일부 더 높은데 Small atomizer와 Large atomizer의 물 및 공기 분사 면적 차이로 인해 미분무를 형성할 수 있는 조건(즉, 물 및 공기 공급 유량 조건)이 다르므로 이를 고려하여 결정하였다. 한편, 2유체미립화기의 유체 분사 면적이 미분무에 의한 복사열 감쇠 효과에 미치는 영향을 파악하기 위해 Small atomizer와 Large atomizer의 물 및 공기 공급 유량 조건 중 일부를 유사하게 설정하였다. 히터 가열 조건은 히터 및 실험 장치 안전성을 고려하여 결정하였고, 히터 중심에서의 표면 온도가 약 710 °C인 조건에서 실험을 수행하였다.

2.2 실험 데이터 처리

복사열 감쇠 성능 실험 데이터 처리 방법을 설명하기 위해 Figure 3에 물 공급 유량이 95 g/min, 공기 공급 유량이 20 L/min인 조건에서 Small atomizer에 대해 열유속계를 이용하여 측정한 시간에 따른 열유속 측정 결과를 나타내었다. 실험을 위해 히터를 약 20 min 가열한 뒤 표면 중심 온도가 약 710 °C 조건이 되었을 때 열유속계에서 측정한 열유속은 약 5.0 kW/m²로 나타났다. 미분무를 분사한 시점(약 61 s 부근)에서 열유속값이 급격히 감소하는 경향이 관찰되었고 이후 미분무를 계속해서 분사하고 있는 동안 열유속이 일정하게 유지(약 4.5 kW/m²)되는 것으로 관찰되었다. Figure 3에 나타난 시간에 따른 열유속값의 변화 경향은 모든 실험 조건에서 유사하게 나타났으며 해당 결과를 바탕으로 복사열 감쇠율(attenuation, γ)은 식 (1)^(9,16)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 열유속을 의미한다. 본 연구에서는 미분무를 분사하지 않은 경우에 대해 20~60 s, 미분무를 분사한 경우에 대해 80~120 s 시간 구간에서 측정한 열유속 데이터의 평균값을 이용하였다. Small atomizer 및 Large atomizer를 이용하여 모든 실험 조건에서 각각 4회와 2회의 반복 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 복사열 감쇠율 측정 결과

Figure 4에 Small atomizer를 이용한 복사열 감쇠율 측정 결과를 나타내었다. Figure 4(a)에 나타난 물 공급 유량의 경우, 모든 공기 공급 유량 조건에서 물 공급 유량이 비교적 적은 영역에서는 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 경향이 관찰되었다. 그러나 특정 물 공급 유량 조건 이후에서는 물 공급 유량 증가에 따른 복사열 감쇠율의 증가율이 감소하거나 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율 변화가 미미한 것처럼 관찰되었다. Figure 4(b)에 나타난 공기 공급 유량 영향의 경우에서도 유사한 경향이 관찰되었다. 즉, 공기 공급 유량이 10 L/min에서 20 L/min으로 증가할 때 복사열 감쇠율은 급격하게 증가한 반면, 공기 공급 유량이 20 L/min에서 30 L/min으로 증가할 경우에는 복사열 감쇠율 변화가 비교적 완만하게 증가하거나 미미한 것으로 관찰되었다. 본 연구의 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Small atomizer의 복사열 감쇠율은 약 6.1~11.9%로 측정되었다.

(a) Effect of water flow rate

(b) Effect of air flow rate

Figure 4. Thermal radiation attenuation for Small atomizer.

(a) Effect of water flow rate

(b) Effect of air flow rate

Figure 5. Thermal radiation attenuation for Large atomizer.

Figure 5에 Large atomizer를 이용하여 다양한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 측정한 복사열 감쇠율 실험 결과를 나타내었다. Figure 5(a)의 물 공급 유량 영향의 경우, 비교적 적은 물 공급 유량 조건에서는 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 급격하게 증가하는 경향이 관찰되었다. 반면, 비교적 많은 물 공급 유량 조건에서는 전체적으로 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 경향은 동일하지만 일부 조건에서는 물 공급 유량에 의한 복사열 감쇠율이 완만하게 증가하는 것처럼 관찰되었다. Figure 5(b)의 공기 공급 유량 영향의 경우에서도, 공기 공급 유량이 적은 조건에서는 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 급격하게 증가한 반면, 공기 공급 유량이 많은 조건에서는 공기 공급 유량 변화에 따른 복사열 감쇠율의 변화가 비교적 작은 것처럼 관찰되었다. 본 연구의 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Large atomizer의 복사열 감쇠율은 약 5.2~14.6%로 측정되었다.

3.2 복사열 감쇠율 측정 결과 분석

미분무에 의한 복사열 감쇠율은 2유체미립화기에 공급되는 물과 공기의 유량 뿐 아니라 미분무의 액적 크기에 의해서도 지대한 영향을 받을 수 있다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾. Kim 등⁽¹⁴⁾은 본 연구에서 이용한 Small atomizer와 Large atomizer의 미분무 액적 크기(Sauter Mean Diameter, SMD)를 측정된 바 있고, Figures 6(a)와 6(b)에 각각의 미립화기에 대한 측정 결과를 나타내었다. Figure 6(a)에 나타난 바와 같이 Small atomizer의 미분무 액적 크기 측정은 물 공급 유량이 31~85 g/min, 공기 공급 유량이 10~30 L/min인 조건에서 수행되었다. 측정 결과, 물 공급 유량이 증가하고 공기 공급 유량이 감소함에 따라 SMD가 증가하는 경향이 관찰되었다. Small atomizer에서 분사되는 미분무의 SMD는 공기 공급 유량이 10 L/min인 경우 33.8~46.0 μm , 20 L/min인 경우 14.5~21.4 μm , 30 L/min인 경우 11.7~18.2 μm 로 나타났다. Large atomizer의 경우 Figure 6(b)에 나타난 바와 같이 물 공급 유량이

Figure 6. Droplet size of water mist for Small atomizer and Large atomizer⁽¹⁴⁾.

31~85 g/min, 공기 공급 유량이 20~60 L/min인 조건에서 미분무의 액적 크기를 측정하였다. Small atomizer의 경우와 동일하게 물 공급 유량이 증가하고 공기 공급 유량이 감소함에 따라 SMD가 증가하는 경향이 관찰되었다. Large atomizer에서 분사되는 미분무의 SMD는 공기 공급 유량이 20 L/min인 경우 41.9~52.5 μm , 30 L/min인 경우 28.5~31.9 μm , 40 L/min인 경우 19.2~24.2 μm , 60 L/min인 경우 12.2~15.7 μm 로 나타났다. 한편, 2종류의 2유체미립화기 모두에서 공기 공급 유량이 물 공급 유량에 비해 SMD 변화에 더욱 지대하게 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 즉, 일정한 공기 공급 유량 조건에서 물 공급 유량 변화에 따른 SMD 변화에 비해 일정한 물 공급 유량 조건에서 공기 공급 유량 변화에 따른 SMD 변화가 더 큰 것으로 나타났다. 한편, SMD는 복사열 감쇠 효과에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나이다.

미분무의 물 공급 유량 및 액적 크기가 복사열 감쇠율에 미치는 영향의 경우, 물 공급 유량은 증가하고 액적 크기는 감소함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 것으로 보고되었다^(3,7,10,19). Small atomizer에 대한 결과인 Figures 4(a)와 6(a),

Large atomizer에 대한 결과인 Figures 5(a)와 6(b)을 토대로 물 공급 유량의 영향을 살펴보면, 일정한 공기 공급 유량 조건에서 물 공급 유량이 증가함에 따라 전체적으로 복사열 감쇠율이 증가(Figures 4(a)와 5(a))하였는데, 이 때 미분무의 SMD는 대체로 서서히 증가(Figures 6(a)와 6(b))하는 것으로 나타났다. Figures 6(a)와 6(b)에 나타난 바와 같이 물 공급 유량의 증가에 따른 미분무의 SMD 변화가 크지 않은 것을 고려할 때 물 공급 유량이 증가함에 따라 형성된 수막 내 미분무의 전체적인 액적 개수 및 표면적, 액적 밀도가 증가하였을 것으로 추측되며, 이러한 원인이 복사열 감쇠율을 증대시켰을 것으로 판단된다. 하지만 일부 공기 공급 유량이 낮은 조건이나 물 공급 유량이 높은 조건에서 물 공급 유량에 따른 복사열 감쇠율의 변화가 크지 않은 것으로 관찰되었는데 이러한 결과에 대한 원인 중 하나는 해당 조건에서 충분한 미립화가 되지 않았기 때문으로 추측된다. 한편, Small atomizer에 대한 결과인 Figures 4(b)와 6(a), Large atomizer의 결과인 Figures 5(b)와 6(b)를 토대로 공기 공급 유량의 영향을 분석해 보면, 일정한 물 공급 유량 조건에서 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사

Figure 7. Comparison of thermal radiation attenuation between Small atomizer and Large atomizer.

열 감쇠율이 증가(Figures 4(b)와 5(b))하였고, 이 경우 미분무의 SMD는 확실하게 감소(Figures 6(a)와 6(b))하는 것으로 나타났다. 분사되는 공기가 복사열 감쇠에 미치는 영향은 미미한 것으로 알려져 있다⁽²⁰⁾. 따라서 일정한 물 공급 유량 조건에서 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 원인은 미분무의 액적 크기가 감소하기 때문으로 판단된다. 일정한 물 공급 유량 조건에서 미분무의 액적 크기 감소는 복사열을 흡수할 수 있는 액적 개수 및 표면적을 증가시키고 액적의 체류시간도 증가시킬 수 있다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾. 이러한 복합적인 원인에 의해 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증대된다고 판단된다.

3.3 2유체미립화기 간 복사열 감쇠율 비교 및 분석

Small atomizer와 Large atomizer의 물 및 공기 공급 유량이 유사한 조건에서 복사열 감쇠율을 Figure 7에 비교하여 나타내었다. 물 공급 유량 조건은 약 36~77 g/min, 공기 공급 유량 조건은 20과 30 L/min이다. Figure 7에 나타난 바와 같이, 유사한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 더 큰 복사열 감쇠율을 나타냈다. 한편, 2종류의 2유체미립화기 모두 공기 공급 유량 및 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하는 것으로 나타났다. 물 공급 유량에 따라 공기 공급 유량이 20 L/min인 경우 복사열 감쇠율은 Small atomizer와 Large atomizer가 각각 8.3~10.8%와 5.2~8.2%로 나타났고, 공기 공급 유량이 30 L/min인 경우에는 각각 8.4~11.0%, 6.1~9.3%로 나타났다. 이와 같은 경향이 나타난 이유 중 하나는 미분무의 액적 크기 차이 때문으로 판단된다.

Figure 8에 Figure 6을 토대로 Small atomizer와 Large atomizer의 입경 측정 결과를 비교하여 나타내었다. 물 공급 유량 조건은 31~85 g/min, 공기 공급 유량 조건은 20과 30 L/min이다. 모든 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 미분무의 SMD가 작은 것

Figure 8. Comparison of droplet size for water mist between Small atomizer and Large atomizer⁽¹⁴⁾.

으로 나타났다. 이는 Small atomizer의 경우 물을 미립화하는 공기가 분사되는 환형 부분의 간격이 Large atomizer에 비해 더 작아서, 동일한 공기 공급 유량 조건에서 공기의 분사 속도가 더 높고 이로 인해 중앙의 오리피스에서 분사되는 물을 미립화하기 위한 공기의 에너지가 크기 때문이다. 따라서 동일한 유량 조건에서 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 더 작은 크기의 미분무를 생성할 수 있고, 이로 인해 더 높은 복사열 감쇠율이 나타났을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 2유체미립화기의 공기(기체)의 분사면적이 복사열 감쇠 효과를 결정하는 중요한 인자일 수 있음을 확인하였다.

서론에서 언급한 바와 같이, 미분무의 복사열 감쇠 성능에 대한 연구를 위해 기존 연구에서는 주로 단일유체미립화기 및 드렌처 헤드를 이용하였다. 이러한 상황을 고려할 때, 미분무 생성 시 많은 장점을 가지고 있는 2유체미립화기를 이용한 본 연구는 큰 의미가 있다고 판단된다. 단일유체미립화기 및 드렌처 헤드를 이용한 기존 연구 결과에 비해 2유체미립화기에 의한 복사열 감쇠율이 다소 낮은 것처럼 보이지만, 이는 본 연구에서의 물 공급 유량이 기존 연구에 비해 매우 적기 때문으로 추측된다. 예를 들면, Murrell 등⁽⁷⁾이 사용한 단일유체미립화기의 복사열 감쇠율은 2.8~35.5%로 측정되었고, 이 경우 물 공급 유량은 약 0.35~7.5 L/min (약 350~7500 g/min) 조건이었다. 한편, 본 연구에서 사용한 2유체미립화기인 Small atomizer와 Large atomizer의 복사열 감쇠율은 각각 6.1~11.9%와 5.2~14.6%로 Murrell 등⁽⁷⁾의 측정 결과보다 낮았다. 그러나 본 연구의 Small atomizer와 Large atomizer의 물 공급 유량 조건은 각각 36~105 g/min과 37~300 g/min으로 Murrell 등⁽⁷⁾의 조건에 비해 훨씬 적었다. 따라서 단위 물 공급 유량 당 복사열 감쇠율의 경우 Murrell 등⁽⁷⁾의 연구에서 사용한 단일유체미립화기는 0.00473~0.008 %/(g/min), 본 연구에서 사용한 Small atomizer와 Large atomizer는 각각 0.113~0.169 %/(g/min)과 0.0487~0.141

%(g/min)으로 나타났다. 단위 물 공급 유량 당 복사열 감쇠율이 크다는 것은 동일한 물 공급 유량 조건에서 더 높은 복사열 감쇠율을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 검토 결과를 토대로 2유체미립화기가 단일유체미립화기에 비해 동일한 물 공급 유량 조건에서 더 높은 복사열 감쇠율을 나타낼 가능성이 있음을 확인하였다. 하지만, 본 연구에서의 실험이 제한적인 조건에서 수행된 것을 고려할 때, 2유체미립화기의 미분무를 이용한 복사열 감쇠 성능을 일반화하고 향상시키기 위해서는 추후 더욱 다양한 2유체미립화기 조건(예를 들면, 미립화기 종류, 공급 유량, 공급 압력, 액적 크기, 액적 분포, 분사각, 분무폭 등)에서의 연구가 활발하게 수행될 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2가지 종류의 2유체미립화기(즉, Small atomizer와 Large atomizer)를 이용하여 미분무의 복사열 감쇠 성능에 미치는 영향을 검토하였다. Small atomizer의 경우 물 공급 유량은 36~105 g/min, 공기 공급 유량은 10~30 L/min, Large atomizer의 경우 물 공급 유량은 37~300 g/min, 공기 공급 유량은 20~60 L/min인 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과를 아래에 정리하였다.

- 1) 본 실험 조건에서 Small atomizer와 Large atomizer의 복사열 감쇠율은 각각 6.1~11.9%와 5.2~14.6%로 측정되었다.
- 2) 일정한 공기 공급 유량 조건에서 물 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였는데 이는 물 공급 유량 증가에 따라 형성된 수막 내 미분무의 전체적인 액적 개수 및 표면적, 액적 밀도가 증가하였기 때문으로 판단된다.
- 3) 일정한 물 공급 유량 조건에서 공기 공급 유량이 증가함에 따라 복사열 감쇠율이 증가하였는데 이는 미분무의 액적 크기 감소에 의해 액적 개수 및 전체 표면적이 증가하고 이와 함께 액적의 체류시간도 증가되기 때문으로 판단된다.
- 4) 유사한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 Small atomizer와 Large atomizer의 복사열 감쇠율을 비교한 결과 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 더 큰 복사열 감쇠율을 나타냈다. 이는 해당 조건에서 Small atomizer가 Large atomizer에 비해 더 작은 크기의 미분무를 생성하기 때문으로 판단된다.

5) 본 연구를 통해, 2유체미립화기의 공기(기체)의 분사면적이 복사열 감쇠 성능에 지대한 영향을 미치는 중요한 인자일 수 있음을 확인하였다.

6) 단위 물 공급 유량 당 복사열 감쇠율 검토를 통해 2유체미립화기가 단일유체미립화기에 비해 동일한 물 공급 유량 조건에서 더 높은 복사열 감쇠율을 나타낼 가능성이 있음을 확인하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1064002). 이 논문은 2021년도 한국화재소방학회 춘계학술대회(2021년 4월 22일~28일, 온라인)에서 발표한 내용(Paper No. A-10)을 수정, 보완 및 발전시켜 작성한 논문임.

References

1. NFSC 104A, "National Fire Safety Code for Water Mist Fire Extinguishing System" (2021).
2. W. C. Park, "The Latest Fire Suppression System", DongHwa Technology Publishing Co., Republic of Korea (2014).
3. 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>
4. 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). [https://doi.org/10.1016/0260-4779\(95\)00064-X](https://doi.org/10.1016/0260-4779(95)00064-X)
5. 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). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.007>
6. S. Y. Lee, "Atomization of Liquid", Minumsa, Seoul (1996).
7. 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).
8. 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>
9. 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). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.d59cca98>
10. W. Y. Cheung, "Radiation Blockage of Water Curtains", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 9, No. 1, pp. 7-13 (2009).
11. 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).
12. 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>
13. H. S. Jun, “Liquid Atomization”, Munundang, Seoul (2009).
 14. D. H. Kim, C. Y. Lee and C. B. Oh, “Effects of Discharge Area and Atomizing Gas Type in Full Cone Twin-Fluid Atomizer on Extinguishing Performance of Heptane Pool Fire under Two Heat Release Rate Conditions in an Enclosed Chamber”, *Applied Sciences*, Vol. 11, 3247 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11073247>
 15. C. S. Jeong and C. Y. Lee, “Experimental Investigation on Spray Characteristics of Twin-fluid Nozzle for Water Mist and Its Heptane Pool Fire Extinguishing Performance”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 148, pp. 724-736 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.037>
 16. 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>
 17. 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). <https://doi.org/10.1080/10407781003744722>
 18. 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). <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-1196>
 19. 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). <https://doi.org/10.1177/0734904115585796>
 20. Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, “Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications”, 5th Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA (2015).