

[Research Paper]

# 미세물분무에 의한 열복사 감쇠 효과에 대한 수치해석 연구

고권현

동양대학교 안전공학부 교수

## Numerical Study on the Attenuation Effect of Water Mist on Thermal Radiation

Gwon Hyun Ko

Professor, School of Safety Engineering, Dongyang University

(Received July 22, 2020; Revised July 31, 2020; Accepted August 10, 2020)

### 요 약

본 연구에서는 미세물분무의 특성이 열복사 감쇠에 미치는 영향을 살펴보기 위한 수치해석 연구를 수행하였다. 고온의 복사 패널로부터 전파되는 열복사가 미세물분무를 통과하여 약화되는 과정을 FDS를 이용하여 해석하였고, 미세물분무의 분사유량, 액적평균입경과 분무각에 따른 영향을 분석하였다. 해석 결과로부터 분사유량의 증가와 액적크기의 감소가 열복사 감쇠 효과를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 복사열이 통과하는 분무 공간 분포의 영향을 살펴보기 위해 분사각을 변화시켜 열복사 특성을 분석하였으며 분사각이 클수록 복사 감쇠 효과가 커지는 것을 확인하였다. 이것은 유사한 액적크기분포와 유량조건에서도 액적들이 공간적으로 더 넓게 퍼져 있는 경우 복사의 감쇠 효과가 더 커질 수 있음을 보여준다.

### ABSTRACT

A numerical study was conducted to investigate the effects of the spray characteristics of water mist on the attenuation of thermal radiation. The attenuation process of the thermal radiation, generated from a hot surface panel, passing through the water mist was calculated via Fire Dynamics Simulator (FDS), and the effects of the flow rate, droplet mean diameter, and spray injecting angle of the water mist were analyzed. The results indicated that the increase in flowrate and decrease in droplet size led to an increase in the attenuation of thermal radiation. As the thermal radiation passed through the spray droplets, the effect of the spatial distribution of spray droplets was verified by calculating the thermal radiation attenuation at different spray injecting angles. The results indicated that the radiation attenuation increases as the spray angle increases. This implies that a wider distribution of spray droplets, irrespective of the droplet size and flowrate, increases the attenuation effect on thermal radiation.

**Keywords :** Thermal radiation, Attenuation, Water mist, FDS simulation, Spray angle

## 1. 서 론

열복사(Thermal radiation) 현상은 화염의 전방에 위치한 가연물을 직접적으로 가열함으로써 화재의 전파에 지대한 역할을 한다. 열복사에 의한 가연물의 예열은 화염의 전파 속도를 증대시키며 때로는 불꽃의 직접적인 접촉 없이 가연물 표면에 점화를 발생시키기도 한다. 스프링클러나 미세물분무(Water mist)와 같은 수계소화시스템은 화염원의 냉각이나 산소의 유입 차단과 같은 직접적인 소화 효과와

더불어 화염원으로부터 전파되는 열복사를 차폐하거나 약화시키는 역할을 수행함으로써 화재 전파를 지연시킨다. 이러한 열복사 감쇠효과는 가스 저장탱크 등의 폭발위험 설비나 직접적인 물 살포가 어려운 목재문화재의 방호를 위한 수막설비에서 활용되고 있다<sup>(1-3)</sup>.

Dembele 등<sup>(4)</sup>는 열복사의 감쇠효과에 미치는 물분무의 특성 인자를 파악하기 위한 실험 및 이론 연구를 수행하였다. 비교적 낮은 작동압력과 분사속도를 갖는 물분무 노즐을 활용하였으며 열복사를 파장대별로 분석하고 화염에서

발생하는 열복사의 차폐에 효율적인 분무 특성을 파악하고자 하였다. Usui와 Matsuyama<sup>(5)</sup>는 실규모의 화재 실험을 통해 화염에서 방사되는 복사열이 물 액적에 의해 감소되는 현상을 파악하고자 하였는데, 물분사 노즐의 종류와 유량, 액적의 평균 직경 등을 주요 파라미터로 설정하였다. 또한 미(Mie) 이론을 바탕으로 한 분석을 통해 복사열의 감소가 주로 물 액적에 의한 적외선 영역의 에너지 흡수에 의한 것이라는 결론을 도출하였다. Zhu 등<sup>(6)</sup>은 미세수막설비를 이용하여 실규모 유류화재로 발생하는 복사열 차단 효과에 대한 실험을 수행하였고 수치해석을 통해 분석한 바 있다. 최근에 국내에서 You와 Ryou<sup>(7)</sup>는 수막용 노즐의 액적 크기 분포에 따라 복사열 감소에 영향을 주는 광학 두께를 분석하는 실험 및 해석 연구를 수행하고 액적 밀도와 하중 및 액적 크기에 따른 광학 두께의 관계식을 제시한 바 있다. 또한 Lee 등<sup>(3)</sup>은 수막설비용 드렌처 헤드의 형상이 수막의 유동 특성 및 복사 감소에 미치는 영향에 관한 실험적 연구를 수행하여 드렌처 헤드의 형상 변수와 복사 감소 효과와의 상관관계를 분석하였다.

전사유체기법을 활용한 화재 시뮬레이션은 특히 성능이 우수 소방설계가 본격적으로 시행된 2010년대 이후로 화재공학 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 미국 표준과학연구소(NIST)에서 개발된 Fire dynamics simulator (FDS)<sup>(8)</sup>는 대표적인 화재시뮬레이션 도구로써 다양한 화재 현상에 적용되어 그 유효성을 인정받고 있다<sup>(9-13)</sup>. 수계소화시스템에 의한 화재 제압과 관련된 해석 연구로는 Kim과 Ryou<sup>(12)</sup>가 실규모의 밀폐공간 화재에서 미세물분무 분사 실험에 대한 해석을 수행하여 FDS의 해석 유효성을 확인하고 연층의 냉각과정을 초기의 급속 냉각과 후기 점진 냉각으로 분류한 바 있다. 또한 Sikanen 등<sup>(13)</sup>과 Ko<sup>(14)</sup>도 다양한 화재 조건에서 화염과 물분무의 상호작용을 FDS 코드를 활용하여 분석한 바 있다. 다만 이와 같은 연구들은 물분무와 화염의 열적 상호작용과 화염의 제압 성능에 집중하고 있어서 복사열의 감소 효과에 대해서는 고려하지 않는 경우가 대부분이었다.

본 연구에서는 미세물분무에 의한 열복사 감소의 FDS 해석에 영향을 미치는 다양한 인자들을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 먼저 다양한 분무 조건에서 열복사 감쇠를 측정정한 Murrell 등<sup>(15)</sup>의 실험을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 유효성을 확인한 후 액적 평균 직경, 분무 유량, 분사 각 등의 조건에 따른 열복사 감소의 특성을 분석하였다.

## 2. 해석 모델 및 조건

### 2.1 해석 모델

FDS는 화염원에서 발생하는 연기와 열의 거동에 중점을 두면서 저속의 열유동에 대한 나비에-스톡스(Navier-stokes) 방정식을 수치적으로 푼다. 액적의 거동은 라그랑지안(Lagrangian) 형태의 지배방정식에 의해 해석되는데 모든 액적을 개별적으로 추적하는 것은 사실상 불가능하기 때문

에 몬테카를로 방법에 근거한 통계적 접근을 활용하여 액적군(Parcel)의 개념을 사용한다. 액적군이란 동일한 특성을 갖는 액적들의 모임으로써 일반적으로 액적의 크기를 기준으로 수십에서 수백의 구간으로 나누고 각 구간의 대표 크기 값을 갖는 액적군에 포함된 액적의 개수를 특정 분포 함수로부터 도출한다. FDS에서는 로그-노멀/로진-람러(log-normal / Rosin-Rammler) 분포 함수가 주로 사용되며 누적체적분율(CVF)을 다음의 식에서 계산한다<sup>(8)</sup>.

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} \exp\left(-\frac{[\ln(d'/d_m)]^2}{2\sigma^2}\right) dd' & (d \leq d_m) \\ 1 - \exp(-0.693(d/d_m)^\gamma) & (d_m < d) \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $d_m$ 은 체적평균직경을 의미하며  $\gamma$ 와  $\sigma$ 는 분포함수의 특성 변수로써 본 연구에서는 FDS의 기본 설정값인 2.4와 0.6을 각각 사용하였다.

복사 에너지의 해석은 다음의 복사수송방정식(Radiative transport equation, RTE)으로부터 계산된다.

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = -\kappa(\mathbf{x}, \lambda) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}) - \sigma_s(\mathbf{x}, \lambda) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + B(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s}) I_\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{s}') d\mathbf{s}' \quad (2)$$

여기서,  $I_\lambda$ 는 파장  $\lambda$ 의 복사강도이고,  $\mathbf{s}$ 는 복사의 방향벡터,  $\kappa$ 와  $\sigma$ 는 각각 흡수(Absorption) 계수와 산란(Scattering) 계수를 나타내며  $B$ 는 주변 매질로부터의 방사(Emission) 생성항이다. 우변의 마지막에 위치한 적분항은 다른 방향으로의 내부 산란에 대한 항이다. 식(2)를 전체의 파장범위에 걸쳐 적분함으로써 복사강도를 계산할 수 있겠으나 실제의 수치해석에서는 계산의 효율성을 위하여 몇 개의 파장 범위 대역(Band)으로 나누어 계산한 후 합하여 계산한다. 계산된 복사 강도를 에너지 방정식의 생성항으로 고려함으로써 최종적으로 복사열의 영향을 계산하게 된다. 보다 자세한 사항은 참고문헌<sup>(8)</sup>에서 얻을 수 있다.

### 2.2 해석 조건

본 연구에서는 다양한 분무 조건에서 열복사 감쇠를 측정정한 Murrell 등<sup>(15)</sup>의 실험을 대상으로 FDS 해석을 수행한다. Figure 1에 Murrell 등<sup>(15)</sup>의 실험에 대한 개략도와 해석 영역을 나타내었다. 전체 해석 영역의 크기는 4 m × 2 m × 3 m이며 바닥면을 제외하고 모두 개방된 공간이다. 표면의 온도가 900 °C로 유지되는 1 × 1 m<sup>2</sup> 크기의 복사열 패널이 한쪽 끝에 설치되어 있는데, 패널의 아래쪽까지의 높이는 1 m이다. 노즐은 공간의 중앙에 2.2 m의 높이에 설치되었고, 실험에서는 복사 패널면의 중앙에 해당하는 위치의 반대쪽 지점에서 복사열유속이 측정되었다. 노즐 끝단에서 복사 패널면 중앙까지의 높이차는 0.7 m이다. 미세물분무에

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 격자 의존성 테스트

FDS를 이용한 화재해석에서 적절한 격자 크기에 대한 기준으로 화원의 무차원 특성길이와 격자 크기의 비를 활용하는 방법이 널리 사용된다. 본 연구에서의 해석은 화원이 존재하지 않아 특성길이를 정의할 수 없으므로 격자에 따른 해의 수렴성을 비교하여 격자계를 결정하였다. Figure 2는 격자의 크기( $\delta x$ )가 각각 0.1 m, 0.05 m, 그리고 0.033 m인 격자계에 대해서 D-노즐 4 bar의 경우 복사 패널 중심에서 x 축을 따라 계산된 복사 감쇠량을 비교한 결과이다. 열복사가 물분무를 통과함에 따라 복사 감쇠량이 크게 증가했다가 서서히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 격자에 따라 다소 간의 차이는 발생하고 있으나 일정한 경향성을 보이고 있으며  $\delta x = 0.05$  m의 결과가 보다 조밀한 격자의 결과에 근접하는 모습을 보여주고 있다. 구체적으로  $\delta x = 0.033$  m인 격자계의 해석 결과와 비교할 때,  $x = 2.0$  m에서의 복사열 강도에 대한 0.1 m와 0.05 m인 격자계 해석 결과의 오차율은 각각 19%와 7%였다. 이러한 결과를 바탕으로 이후의 해석에서는  $\delta x = 0.05$  m인 격자계를 사용하였으며 이 때 총 격자수는 약 200,000개다.

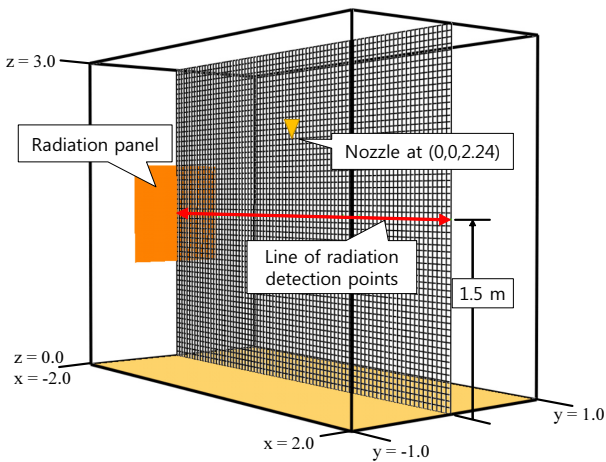


Figure 1. Schematics of the experiment of Murrell et al.<sup>(15)</sup> and the grid of computational domain.

의한 열복사의 감쇠효과는 다음의 식으로 산정된다.

$$\%enuation = (U_o - U) / U_o \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서  $U_o$ 와  $U$ 는 각각 미세물분무의 미작동 상태와 작동 상태에서 측정된 복사열유속을 의미한다.

Murrell 등<sup>(15)</sup>은 풀콘(Full-cone) 및 할로우콘(Hollow-cone) 형태의 분무를 형성하는 네 종류의 노즐을 이용하였는데, 본 연구에서는 두 종류의 풀콘 노즐에 대한 해석을 수행하였다. Table 1에 미세물분무의 해석 조건에 대해 정리하였다. 분사 압력은 1 bar에서 8 bar까지 변화시켰으며 이 때 A-노즐의 경우 유량이 0.35 lpm에서 1.0 lpm까지 변화하고, D-노즐의 경우 2.6 lpm에서 7.5 lpm까지 증가한다<sup>(15)</sup>. 평균 입경( $D_m$ )과 분사 속도의 초기 조건은 노즐 하부 0.7 m의 위치에서의 측정값을 적절히 모사할 수 있도록 선정하였다.

#### 3.2 분무 특성의 영향

Figure 3은 분사 유량에 따른 복사 감쇠 효과에 대한 해석 결과를 Murrell 등<sup>(15)</sup>의 실험 결과와 함께 보여주고 있다. 두 개의 노즐이 모두 풀콘(Full-cone) 형태의 물분무를 형성시키지만 Table 1에 나타낸 바와 같이 분사유량의 범위가 다르다. 실험 결과를 보면 A-노즐의 경우 0.35 lpm에서 1.0 lpm의 유량을 나타내며 복사 감쇠율은 2.8%에서 13.9%까지 증가하였고 D-노즐은 2.60 lpm에서 7.50 lpm의 유량 범위를 갖을 때 복사 감쇠율은 6.1%에서 35.5%까지 변화하였다<sup>(15)</sup>. 본 연구에서 수행한 해석의 결과는 A-노즐의 경우 3.7%에서 16.7%까지, 그리고 D-노즐의 경우 8.7%에서 32.4%의 범위로 예측하고 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 해석이 미세물분무에 의한 복사 감쇠의 예측

Table 1. Computation Conditions of the Water Mist Nozzles

$\Delta p$ [bar]	Nozzle A			Nozzle D		
	Flowrate [lpm]	$D_m$ [ $\mu$ m]	Injection velocity [m/s]	Flowrate [lpm]	$D_m$ [ $\mu$ m]	Injection velocity [m/s]
1	0.350	370	1.0	2.60	800	1.0
2	0.550	233	1.2	3.75	504	1.3
3	0.625	178	1.5	4.50	385	1.6
4	0.700	147	1.7	5.00	317	2.4
5	0.750	126	2.0	5.75	274	2.9
6	0.875	112	2.2	6.00	242	3.7
7	0.950	101	2.4	6.75	219	4.2
8	1.000	92	2.5	7.50	200	4.8

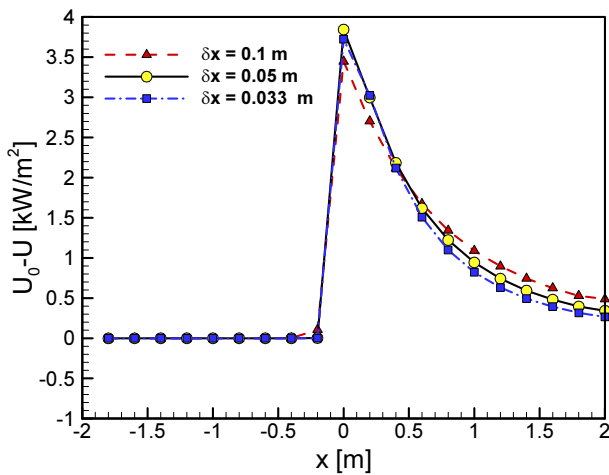


Figure 2. Predicted decreases in radiation by water mist with different grid sizes for the case of  $\Delta p = 4$  bar injection with nozzle D.

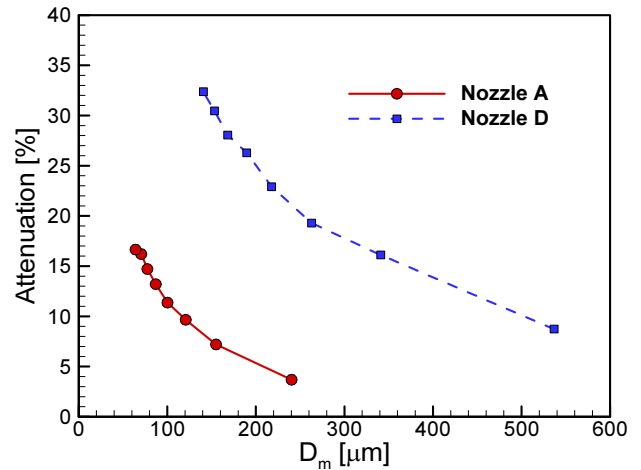


Figure 4. Predicted attenuation of thermal radiation with volumetric mean diameter for the spray nozzles A and D.

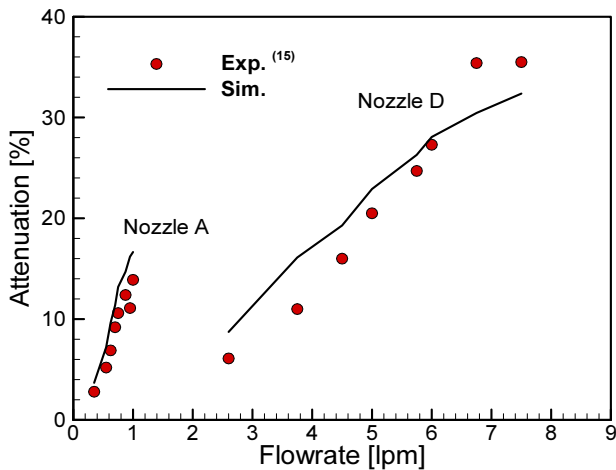


Figure 3. Comparison of predicted and measured<sup>(15)</sup> attenuation of thermal radiation for the spray nozzles A and D.

에서 정량적인 값과 함께 전체적인 경향성을 잘 예측하고 있으며 해석 결과의 유효성을 보여주는 것으로 판단된다.

두 종류의 노즐 모두에서 공통적으로 유량의 증가에 따라 복사 감쇠 효과가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 유량의 증가는 복사선의 진행을 차폐하는 분무 체적의 양이 증가함을 의미하기 때문에 직관적으로 이해할 수 있다. 유량과 복사 감쇠 사이의 이러한 관계는 이전의 문헌<sup>(2,4,5)</sup>에서도 찾을 수 있는데, 유량의 증가함에 따라 공간 내에 액적 밀도가 증가하고 이에 따라 액적에 의한 복사열 흡수가 증가하게 되는 것이다. 그러나 Figure 3에서 확인되는 바와 같이 D-노즐의 경우 5 lpm 이하의 유량에서는 A-노즐의 1 lpm의 경우보다 낮은 복사 감쇠 효과를 보인다. 이것은 다음의 Figure 4에서 보는 바와 같이 각 노즐로부터 생성되는 액적들의 크기 특성이 다르기 때문으로 생각된다.

Figure 4는 두 종류의 노즐에 대해서 분무 액적의 평균

입경과 복사 감쇠율의 관계에 대한 계산 결과를 나타내고 있다. 여기서 평균 입경은 복사 측정선을 통과하는 노즐 하부 0.7 m에서 계산되었다. 두 종류의 노즐 모두에서 액적의 평균 입경이 작을수록 복사 감쇠 효과가 커지는 경향을 보여준다. 앞서 Figure 3의 결과에서 최대 1 lpm의 A-노즐의 경우에 비해 보다 높은 유량을 갖는 3-4 lpm 범위의 D-노즐에서 오히려 더 낮은 복사 감쇠효과를 나타내는 것을 보았는데, 이러한 현상은 비록 적은 유량이어도 액적의 크기가 작을 경우 더 큰 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 보여주는 것이다. 복사열 감쇠에 미치는 액적 크기의 영향은 크게 두 가지로 설명된다. 첫째로 액적의 크기가 작아지면 동일한 유량에서 생성되는 액적의 개수가 많아지고 복사열을 흡수하는 액적의 표면적도 증가하게 된다<sup>(5)</sup>. 두 번째로는 상대적으로 작은 액적들이 항력에 의한 감속효과로 인해 낮은 속도를 갖게 되고 복사열이 통과하는 공간에 머무르는 시간이 더 길어지게 된다<sup>(2)</sup>. 정리하면 복사 감쇠의 효과는 분무 유량이 높을수록, 그리고 분무액적의 평균입경이 작을수록 커지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 분무 공간분포의 영향

복사열이 통과하는 액적 분포의 폭이 열복사의 감소에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 분무의 분사각을 조절하여 결과를 살펴보았다. Figure 5는 D-노즐을 사용한  $\Delta p = 4$  bar의 경우에 대해서 분사각을 30°, 45° 그리고 60°로 설정하여 계산한 분무 액적의 크기 분포를 보여주고 있다. 액적의 크기 분포는 일반적인 분무 분포의 특성을 잘 보여주고 있다. 즉 분무의 진행으로 유도되는 유동의 영향으로 상대적으로 작은 액적들이 중심부로 모이고 바깥쪽으로는 비교적 큰 액적들이 위치하게 되는 것이다. 분사각이 증가함에 따라 위치에 따른 크기분포 기울기가 서서히 완만해지면서 주위로 퍼지는 경향을 보여주고 있다. 세 경우 모두 전체 평균입경은 거의 일정하지만 분사각이 증가할수록 더 넓게

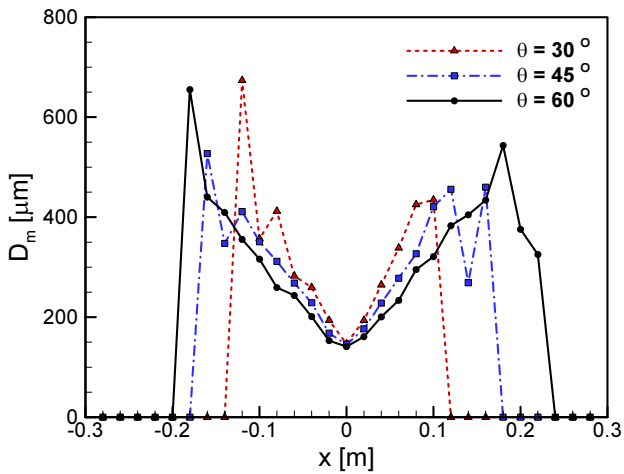


Figure 5. Predicted droplet size distributions with different spray injecting angles for the case of  $\Delta p = 4$  bar of nozzle D.

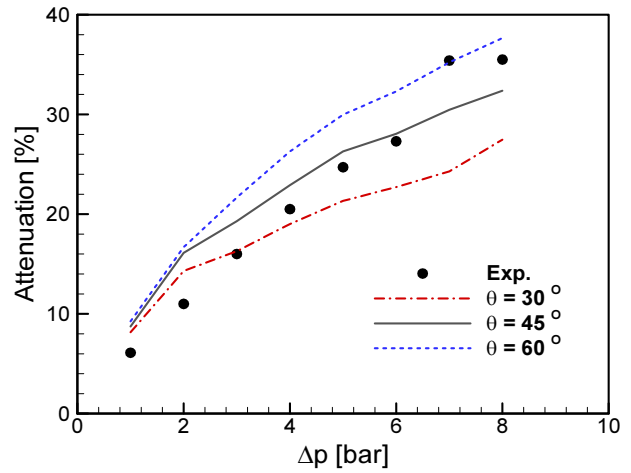


Figure 7. Predicted attenuation of thermal radiation with different spray injecting angles for the cases of nozzle D.

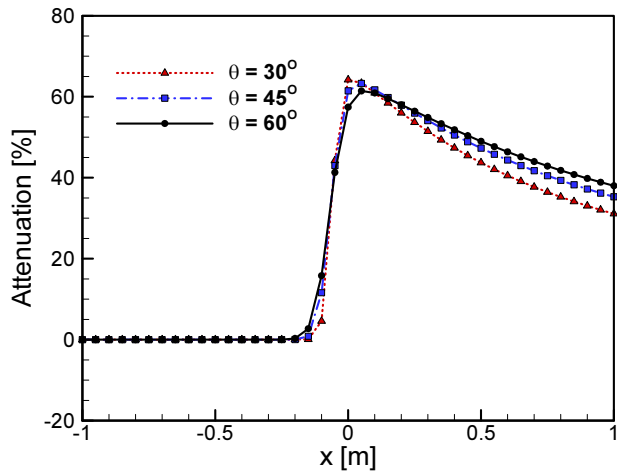


Figure 6. Predicted variation of thermal radiation attenuation with different spray injecting angles for the case of  $\Delta p = 4$  bar injection with nozzle D.

분포하는 결과를 보여주고 있다. 자세히 살펴보면, 분사각이 30°, 45° 그리고 60°로 증가함에 따라서 액적 분포의 폭은 0.24 m, 0.36 m 그리고 0.42 m로 증가하고 있다.

Figure 6은 분무각에 따른 x-방향의 복사 감쇠율 분포를 비교하고 있다. x-방향을 따라가면서 살펴보면, 액적 분포 폭이 상대적으로 작게 형성되는 30°의 경우에는 복사율 감쇠 변화가 상대적으로 늦게 시작되고 최고점도 일찍 발생한 후에 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 비해 넓은 액적 분포 폭을 갖는 60°의 경우에는 분무 중심에 이르기 전에 빠르게 감소가 시작되고 넓은 범위에서 영향을 받게 되며 복사 감쇠율의 감소 경향도 천천히 진행되는 것을 알 수 있다. 이러한 특성에 따라 분무를 통과하여 1 m 지점에서 약 7%에 가까운 차이를 보이게 된다.

Figure 7은 D-노즐의 경우에서 분무각의 변화에 따른 복사 감쇠율 변화를 실험값<sup>(15)</sup>과 함께 나타낸 것이다. 그림을

보면 분사각의 증가에 따라 복사 감쇠율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 분사압력이 증가함에 따라 그 증가폭이 커지고 있는 것을 알 수 있다. 분사각 증가에 따른 복사 감쇠율의 차이는  $\Delta p = 1$  bar에서 1% 정도이지만  $\Delta p = 8$  bar에서는 약 10% 이상의 차이를 보이게 된다. 분무의 해석에서 분사각은 노즐 입구에서 액적들에게 부여하는 속도 벡터의 방향으로 반영되는데, 노즐 근처에서는 특정한 방향을 유지하면서 진행하던 액적들도 일정 거리를 이동하는 과정에서 작용하는 항력의 영향으로 인해 최종적으로는 중력 방향으로 낙하하게 된다. 따라서 분사압과 초기 분사 속도가 낮은 경우에는 보다 빠르게 최종 낙하 상태로 접어들게 되고 분사각에 따른 액적 분포 폭의 차이가 상대적으로 작아지게 된다. 이에 비해 분사압이 높은 경우에는 특정 각도를 갖고 이동하는 액적들이 보다 멀리 이동한 후 낙하 상태로 접어들게 되어 하류에서 보다 넓은 액적 분포의 폭을 유지하게 되고 이 경우 복사 감소의 효과가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 볼 때 앞서 언급되었던 분무 유량과 액적 크기에 못지않게 분무 액적의 공간적 분포 특성이 복사 감쇠 효과에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해서 분무 액적의 크기 분포와 분사 유량이 유사한 경우에서도 분무 액적들의 분포를 넓게 조절함으로써 복사열의 감쇠효과를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 미세물분무에 의한 열복사 감쇠의 FDS 해석에 영향을 미치는 다양한 인자들을 살펴보았다. 다양한 분무 조건에서 열복사 감쇠를 측정된 Murrell 등<sup>(15)</sup>의 실험을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고 액적 평균 직경, 분무유량, 분사각 등의 조건에 따른 열복사 감쇠의 특성을 분석하였다. 두 종류의 노즐에 대하여 유량에 대한 복사 감쇠율의 결과가 실험<sup>(15)</sup>의 결과를 적절히 모사하였으며 이를

통해 FDS 해석의 유효성을 확인할 수 있었다. 분사유량이 증가할수록 복사감쇠 효과가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 분사유량의 증가로 열복사의 진행을 방해하는 액적의 양이 증가하기 때문으로 판단된다. 분무액적의 평균입경이 작을수록 감쇠효과가 증대되었다. 미세물분무에 의한 열복사 감쇠는 주로 액적에 의한 열복사 흡수에 기인하는데 액적의 크기가 작을수록 이러한 경향이 커지는 것을 알 수 있었다. 복사열이 통과하는 분무공간 분포의 영향을 살펴보기 위해 미세물분무 분사각을 조절하여 계산결과를 비교하였으며 분사각이 클수록 복사감쇠가 커지는 것을 확인하였다. 이것은 유사한 액적크기분포와 유량조건에서도 액적들이 공간적으로 더 넓게 퍼져 있는 경우 복사의 감쇠 효과가 더 커질 수 있음을 보여준다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 관계제위께 감사드립니다.

## References

1. J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior, 2nd Ed.", CRC Press, Boca Raton, FL (2017).
2. 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).
3. 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).
4. 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, No. 6, pp. 534-543 (2001).
5. 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).
6. 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).
7. W. J. You and H. S. Ryou, "Analysis on the Relations of Droplet Size Distribution and Optical Depth in Water Curtain", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 62-67 (2016).
8. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermoot, J. Floyd and M. Vanella, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide", NIST SP 1018-1 (2019).
9. A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, R. Alexander and M. Cook, "Fire Scene Reconstruction of a Furnished Compartment Room in a House Fire", Case Studies in Fire Safety, Vol. 1, No. 1, pp. 29-35 (2014).
10. W. Luther and W. C. Müller, "FDS Simulation of the Fuel Fireball from a Hypothetical Commercial Airliner Crash on a Generic Nuclear Power Plant", Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, No. 10, pp. 2056-2069 (2009).
11. I. Sellami, B. Manescau, K. Chetehouna, C. de Izarra, R. Nait-Said and F. Zidani, "BLEVE Fireball Modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian Gas Industry", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 54, pp. 69-84 (2018).
12. S. C. Kim and H. S. Ryou, "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression using a Water Mist in an Enclosure", Building and Environment, Vol. 38, No. 11, pp. 1309-1316 (2003).
13. T. Sikanen, J. Vaari, S. Hostikka and A. Paajanen, "Modeling and Simulation of High Pressure Water Mist Systems", Fire Technology, Vol. 50, pp. 483-504 (2014).
14. G. H. Ko, "Estimation of FDS Prediction Performance on the Operation of Water-Mist", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 8, pp. 4809-4814 (2014).
15. J. V. Murrell, D. Crowhurst and P. Rock, "Experimental Study of the Thermal Radiation Attenuation of Sprays from Selected Hydraulic Nozzles", Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, pp. 369-378 (1995).