[Research Paper]

물 분무 액적 특성이 화재진압에 미치는 영향에 대한 수치해석

이재호

한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

Numerical Analysis of the Effects of Droplets Characteristics of Water Spray on Fire Suppression

Jaiho Lee

Senior Researcher, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Central Research Institute

(Received October 16, 2019; Revised October 28, 2019; Accepted October 28, 2019)

요 약

본 연구에서는 물 분무 액적 특성 변화가 화재 진압에 미치는 영향을 FDS 6.5.2를 이용하여 수치적으로 분석하였다. 물 분무 노즐의 소화계수, 액적 분포함수, 중간체적 직경 및 초당 액적 수 변화에 대한 화재진압 특성은 정규 열방출률 곡선의 감소율과 냉각시간의 측면에서 평가되었다. 소화계수가 증가하면 정규열방출률 곡선이 더 급격하게 감소하고, 중간체적입경 변화가 화재진압에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 단일 액적분포에서 초당액적수의 증가에 따라 정규 열방출률 곡선은 더 완만하게 감소하였으며, 다중분포에서는 초당액적수가 작은 조건에서만 정규 열방출률 곡선이 급격하게 감소하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the effects of the characteristics of droplets of water spray on suppression of fire were analyzed numerically using fire dynamics simulator (FDS) 6.5.2. Additionally, the fire suppression characteristics by the water spray nozzle, including the extinguishing coefficient (EC), droplet size distribution function (SDF), median volumetric diameter (MVD), and droplets per second (DPS), were evaluated in terms of the decreasing normalized heat release rate (HRR) curve and cooling time. It was observed that with increase in the EC, the normalized HRR curve decreased rapidly, and the changing MVD affected the suppression of fire. In case of mono-disperse, the normalized HRR curve decreased slowly with the increase in DPS. On the contrary, in case of multi-disperse, the normalized HRR curve decreased rapidly even with a small increase in DPS.

Keywords : Fire suppression, Size distribution function, Water spray, Water mist, Median volumetric diameter

1. 서 론

원자력발전소 화재 방호는 심층방어 개념으로 설계된다⁽¹⁾. 심층방어 화재 방호는 화재 발생을 미리 예방하고, 화재가 발생하더라도 화재를 조기에 감지하여 진압하고, 화재진압이 실패하더라도 원자로를 안전하게 정지시켜 방사성 물질이 외부로 누출되는 것을 방지하는 것을 목적으로 한다. 이러한 심층방어 화재 방호의 하나로 원자력발전소 내 각 방화 지역에는 적절한 화재 감지 및 진압 설비가 마련되어 있다⁽¹⁾.

물 분무 소화설비는 원자력발전소에서 가장 많이 사용되는 주요 소화설비이다. 그러나 방화지역의 특성에 따라

서 주제어실 이중바닥, 전산실, 가연성 액체 연료 저장시설에는 주로 청정소화 약제 또는 이산화탄소 소화설비와 같은 가스계 소화설비가 사용된다. 특히 원자력발전소에서 사용되는 침수식 이산화탄소 소화설비는 경제성과 소화 능력을 고려할 때 매우 우수한 소화설비이다. 그럼에도 불구하고 이산화탄소 소화설비는 안전성 측면에서 위험하므로 다른 청정소화설비 또는 물 분무 소화설비로 대체되고 있다⁽²⁾.

미분무수 소화 시스템은 매우 작은 크기의 액적을 사용하기 때문에 소화에 필요한 분사 유량을 적게 요구하며, 전기부도체이기 때문에 일반화재, 유류화재, 전기화재 등을 포함한 대부분의 화재를 진압할 수 있다. 미분무수 노즐의

[†]Corresponding Author, E-Mail: jaiholee@khnp.co.kr. TEL: +82-42-870-5459, FAX: +82-42-870-5449

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

분사압력, 액적 크기, 분사 유량, 분사 각도 등과 같은 분무 특성은 화재진압에 매우 중요한 변수로 작용 된다. 또한, 화재진압 시간은 화재의 크기, 격실의 크기, 환기 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 이전의 연구들⁽³⁻⁷⁾은 노즐 특성 및 격실 조건 변화가 화재진압 특성에 미치는 영향을 실험 및 수치적인 방법으로 연구해 왔다.

Jenft 등⁽⁵⁾은 한 개의 격실 내 4개의 미분무수 노즐을 이용하여 오일 풀 화재를 진압하는 과정을 실험과 시뮬레이션 분석결과를 통해 비교 검증 하였다. 그들은 미분무수 분사 시점에 따라서 화재진압시간이 달라지는 것을 확인하였다. 열방출률(Heat release rate, HRR)이 최댓값에 도달하기 전 성장단계에서 미분무수를 분사할 때 화재는 65초 만에 진압되었다. 반면에 열방출률이 최댓값에 도달한 완전 발달된 영역에서 미분무수를 분사하는 경우에 화재는 10초 만에 진압되었다. Lee⁽⁶⁾는 원자력발전소에 미분무수를 적용하는 것을 목적으로 화원의 직선 상부에 있는 한 개의 미분무수 노즐을 이용하여 화재를 진압하는 것에 관한 수치연구를 수행하였다. 화재 진압시간은 격자 크기, 환기 조건, 소화계수 및 단위 초당 액적 수에 영향을 받았다. 또한, Lee⁽⁷⁾는 크기가 작은 원자력발전소 전기실(Electrical room)에 미분무수 화재진압 시스템 적용을 위한 기초연구로 실내 환기 조건이 미분무수 화재진압시간에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. Lee⁽⁷⁾는 구역모델(Zone model)과 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 모델의 결과를 비교 검증하기 위해서 시간 평균한(Time averaged) 열방출률 개념을 사용하였다.

본 연구의 목적은 전산유체역학 모델인 Fire dynamics simulator (FDS) 6.5.2를 이용하여 물 분무 액적의 특성변화가 화재진압에 미치는 영향을 수치적으로 분석하는 것이다. Jenft 등⁽⁵⁾이 실험 및 시뮬레이션을 통해 연구한 내용을 기반으로 하여, 분무 액적 특성으로 중간체적입경(Median volumetric diameter, MVD), 입경분포함수(Size distribution function, SDF) 및 초당액적수(Droplets per second, DPS)가 변화할 때 열방출률 곡선의 감소율(Decreasing rate)이 어떻게 변하는지 확인하였다. 또한 다양한 입경분포함수 조건에 대해서 분무의 중간체적입경 변화에 따른 냉각시간(Cooling time)의 변화를 확인하였다.

2. 수치해석

2.1 방법론

본 연구에서는 물 분무 노즐을 이용하여 화재를 진압하는 과정을 FDS 6.5.2를 사용하여 수치 계산하였다. FDS는 화재 현상을 수치 분석하기 위해서 미국 국립표준연구소(NIST)에서 개발한 전산 유체역학 코드이다⁽⁸⁻⁹⁾. 복잡한 연소 현상을 포함한 화재는 대부분 난류 유동이며, 물 분무에 의한 화재진압은 다상 유동으로 해석되어야 한다. 본 연구를 위해서 FDS에 적용된 모델은 다음과 같다⁽⁸⁻⁹⁾.

- 난류 모델 : 큰 에디 모사 (Large Eddy Simulation, LES)
- 연소 모델 : 에디 소산 연소 모델 (Eddy Dissipation Combustion Model)
- 이상 유동 : 오일러-라그랑지 기법 (Eulerian-Lagrangian Method)
- 열복사 : 미 산란(MIE Scattering) 이론에 기초한 열복사모델(Thermal Radiation Model)

물 분무 노즐 출구에서 분사된 물은 미립화(Atomization) 과정을 겪는 동안 크기가 서로 다른 무수히 많은 액적으로 분열된다. 분열된 액적의 입경 크기는 노즐의 제원에 따라서 매우 다양하게 분포할 수 있다. 따라서 노즐에서 분사된 액적 크기를 대표하는 대표 입경이 사용된다. FDS에서 사용되는 대표 입경은 중간 체적 입경(Median volumetric diameter, MVD)이며, FDS 모델에서는 보통 다음과 같은 SDF가 사용된다⁽⁸⁻⁹⁾.

- 중간 체적 입경 (분포함수 적용 없음)
- 대수 정규(Log Normal, LN) 분포
- 로진-레믈러(Rosin-Rammler, RR) 분포
- 로진-레믈러(MVD보다 큰 액적) 및 대수 정규(MVD와 같거나 작은 액적) 분포 (RRLN)

대수정규(LN) 분포 및 Rosin-Rammler(RR) 분포함수는 각각 다음과 같이 표현된다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$F(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D} \exp\left(-\frac{\left[\ln\left(\frac{D'}{D_{0.5}}\right)\right]^2}{2\sigma^2}\right) dD' \quad (1)$$

$$F(D) = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{D}{D_{0.5}}\right)^\gamma\right) \quad (2)$$

여기서 D 는 액적의 입경, $D_{0.5}$ 는 MVD, γ 와 σ 는 실험상수이며, $\sigma = 1.15/\gamma$ 의 관계를 가진다.

FDS의 분무 모델은 각 분포함수의 최소 및 최대 입경 범위 안에서 주어진 시간 동안에 분사되는 입경을 임의로 선정한다⁽⁸⁻⁹⁾. 물 분무로 인하여 생성되는 액적의 수는 시뮬레이션 입력변수인 초당액적수(Droplets per second, DPS)로 사용자에게 의해서 결정될 수 있다. 그러나 DPS는 단순히 수치계산을 위해서만 사용되는 값이라서 DPS가 변하더라도 시뮬레이션 입력 값으로 주어진 분사 유량은 변하지 않는다. 다만 DPS를 너무 작게 하면 증발 계산 과정에서 수치적인 불안전성(Instability)이 발생하여 물리적으로 타당하지 않은 결론이 도출되고, 이 값이 너무 크면 계산시간이 증가하게 되므로 분석자는 적절한 DPS를 선정해야 한다⁽⁸⁻⁹⁾.

FDS는 노즐에서 분사되는 액적 수가 실제의 경우보다 적게 입력되더라도 액적 크기를 분포함수 범위 내에서 적절

Figure 1. Cumulative volume fraction of Rosin-Rammler-Log-Normal, Rosin-Rammler, and Log-Normal distributions with $D_{\min} = 20 \mu\text{m}$, $D_{\max} = 250 \mu\text{m}$, $\gamma = 2.4$, $\sigma = 0.48$.

Figure 2. Computational domain for FDS simulation.

히 골고루 생성하기 위해서 계층화된 액적 샘플링 기법을 사용한다⁽⁸⁻⁹⁾. 계층화된 액적 크기 샘플링을 위해 액적 입경 범위를 폭이 같은 7개의 구간(Bin)으로 나눈 후에, 누적수분율(Cumulative number fraction, CNF)을 이용하여 주어진 시간 간격 동안 7개의 구간에서 생성되는 액적의 크기를 임의로 계산한다⁽⁸⁻⁹⁾.

Figure 1은 본 연구에 적용된 7개 구간으로 나누어진 Rosin-Rammler 및 Log-normal 분포함수에 대한 누적부피분율(Cumulative volume fraction, CVF)의 대표적인 예를 보여준다. CNF와 CVF의 관계는 다음과 같다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$F_n(D) = \frac{\int_0^D \frac{F'_V(D')}{D} dD'}{\int_0^\infty \frac{F'_V(D')}{D} dD'}; \quad F'_V \equiv \frac{dF_V}{dD} \quad (3)$$

여기서 F_n 은 누적수분율, F_V 는 누적부피분율, D 는 입경을 의미한다.

FDS에서는 DPS로 입력된 수치적인 액적의 총 질량이 실제 주어진 시간 간격 동안 노즐을 통과하는 질량 유량과 같아지도록 다음과 같이 가중치 상수를 고려한다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$\dot{m}\delta t = C \sum_{i=1}^N C_i \frac{4}{3} \pi \rho_w \left(\frac{D_i}{2} \right)^3 \quad (4)$$

여기서 $\dot{m}$ 은 물 분무 질량 유량, δt 는 분사 시간, C 는 전역 가중치 상수(Global weighting constant), N 은 δt 동안 생성되는 액적의 수, C_i 는 생성된 각 액적에 대한 가중치 상수, ρ_w 는 액적의 밀도, D_i 는 임의의 입경이다.

2.2 입력변수 조건

본 연구에서는 Jenft 등⁽⁵⁾이 실험 및 수치 분석에서 사용한 것과 같은 격실과 미분무수 노즐 조건을 기반으로 분무 액적 특성 변화가 화재 진압시간에 미치는 영향을 수치 분석하였다. Figure 2는 본 연구에 적용된 격실 형상 및 치수를 보여준다. 격실 벽면에는 유리 창문과 강철로 된 문이 있으며 한쪽 벽면 위에는 배기를 위한 송풍기(Blower)가 설치되어 있고, 강철 문 하단에는 외부 공기가 자유롭게 출입할 수 있도록 개구부가 존재한다. 액체 연료 풀(Liquid fuel pool)은 격실 중앙에 위치하고, 연료 풀 표면 위 2.15 m 높이에 4개의 물 분무노즐이 일정한 간격으로 위치하고 있다.

Table 1은 본 연구에 적용된 시뮬레이션 변수에 대한 입력 값들을 보여준다. 본 연구의 모든 시뮬레이션 조건에서 Jenft 등⁽⁵⁾이 민감도 분석을 통해서 적정성을 확인한 5 cm 입방격자를 사용하였다. 연료로는 디젤유($\text{C}_{12}\text{H}_{23}$)가 사용되었으며, 연료에서 발생하는 단위 면적당 최대 열방출률은 833 kW/m^2 로 Jenft 등⁽⁵⁾이 실험을 통해서 측정된 열방출률 성장곡선을 시뮬레이션 입력 값으로 사용하였다. Figure 3은 본 연구에 적용된 정규 열방출률(Normalized HRR) 성장곡선을 나타낸다. 정규 열방출률($\dot{Q}/Q_p$)은 연료의 최대 열방출률 값에 대한 화재 발생 후 각 시간에서의 열방출률 값의 비이다.

Jenft 등⁽⁵⁾의 연구에서는 화재 발생 후 340 s가 경과 하면 열방출률이 최대가 되는데, 물 분무가 시작되는 시점을 화재 발생 후 64 s의 초기 분사와 301 s의 늦은 분사로 나누어 실험과 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서는 초기 분사의 경우를 기반으로 시뮬레이션 조건을 선정하였다. 본 연구에 적용된 분무 지속시간

Table 1. Simulation Input Parameters

Parameters	Input Values
Domain	4.3 m × 4.5 m × 3.2 m
Cell size	5 cm × 5 cm × 5 cm
Cell Number	86 × 90 × 64
Room size	4.2 m × 4.3 m × 3.05 m
Fuel	Diesel (C ₁₂ H ₂₃)
Heat release rate per unit area	833 kW/m ²
Pool size	30 cm × 30 cm × 10 cm
Heat of combustion	42,200 kJ/kg
Median volumetric diameter (MVD)	Various ranging from 112 to 2,000 μm
K-factor	2 l/min/bar ^{0.5}
Injection pressure	10 bar
Flow-rate	6.3 lpm (calculated)
Droplet velocity	30 m/s
Spray Angle	Full cone type 130°
DPS (x10 ³)	1~200

Figure 3. Evolution curve of normalized heat release rate (HRR) by peak HRR ($\dot{Q}_p$) for the spray duration time (t^*).

(t^*)은 다음과 같이 표현된다.

$$t^* = t - t_{act} \quad (5)$$

여기서 t^* 는 물 분무 지속시간, t 는 화재 발생 후 경과 시간, t_{act} 는 물 분무가 시작된 시점을 의미한다.

Jenft 등⁽⁵⁾은 지름이 0.8 mm인 오리피스가 7개씩 설치된 멀티홀(Multi-hole) 방식의 미분무수 노즐을 사용하였다. 본

연구에서는 Jenft 등⁽⁵⁾이 실험에서 적용한 것과 같은 물 분무 조건을 시뮬레이션에 입력하기 위해서 한 개의 미분무수 노즐에서 분사되는 전체 유량과 각 오리피스의 단면적을 고려하여 오리피스 출구에서의 제트 속도를 30 m/s로 가정하였다. 또한, 분무 입경 특성변화가 화재진압에 미치는 영향을 분석하기 위해서 동일한 물 분무 속도로 다양한 입경 분포함수에 대해 소화계수를 2~20 m²/(kg·s), 중간 체적 입경을 112~2,000 μm, 초당액적수를 10³~10⁵의 범위에서 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소화계수 변화

FDS 물 분무 모델은 열분해율(Pyrolysis rate)이 지수함수 형태로 감소한다는 다음과 같은 실험 결과를 기반으로 한다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{act}} = \exp(-k \times t^*) \quad (6)$$

여기서 $\dot{Q}$ 은 물 분사 시작 후 열방출률, $\dot{Q}_{act}$ 는 물 분사 바로 직전의 열방출률, k (1/s)는 단위면적당 분사되는 물의 양인 $\dot{m}''$ (kg/m²)에 비례하는 실험계수, t^* 는 분무 지속시간을 의미한다. 따라서 화재가 완전성장하기 전에 물이 조기 분사되는 경우에는 $\dot{Q}/\dot{Q}_{act}$ 가 $\dot{Q}/\dot{Q}_p$ 보다 크지만, 완전성장한 화재에 물이 분사되면 $\dot{Q}/\dot{Q}_{act}$ 와 $\dot{Q}/\dot{Q}_p$ 는 거의 동일하다. FDS 물 분무 화재 진압모델에서 사용되는 연료의 질량 감소속도는 식(6)으로부터 다음과 같이 표현된다⁽⁸⁻⁹⁾.

$$\dot{m}''_f(t) = \dot{m}''_{f,0}(t) \exp\left(-\int EC \times \dot{m}''_w(t) dt\right) \quad (7)$$

여기서, $\dot{m}''_f(t)$ 는 연료의 질량감소속도(Mass loss rate, kg/(m²·s)), $\dot{m}''_{f,0}(t)$ 는 물분무가 적용되지 않을 때 연소속도(Burning rate, kg/(m²·s)), EC 는 소화계수(m²/(kg·s)), $\dot{m}''_w(t)$ 는 바닥면에 도달하는 소화수 질량(kg/m²)을 의미한다.

시뮬레이션 입력 값으로서 소화계수는 반드시 실험에 의해서 도출되어야 하나⁽⁸⁻⁹⁾, Lee⁽⁶⁾는 소화계수를 찾기 위한 별도의 실험을 수행하지 않고, 단순히 화재가 진압되는 시간을 기반으로 시뮬레이션을 위한 최적의 소화계수를 도출하는 방법을 제시하였다.

Figure 4는 소화계수 변화에 따른 열방출률 곡선의 감소를 변화를 나타낸다. 데이터 심벌(Symbol)은 0.01 s 간격으로 취득한 값을 400개씩 시간 평균한 값이며 에러 바(Error bar)는 평균값에 대한 데이터의 표준편차를 의미한다. 따라서 데이터 심벌은 4초 간격으로 정규 열방출률 값의 변화를 나타낸다. Lee⁽⁶⁻⁷⁾의 이전의 연구에서와 같이 Figure 4는 소화계수가 증가할수록 열방출률 곡선의 감소율이 증가하는 패턴을 보여주고 있다. 또한 물 분무 지속 시간이 증가함에 따라 정규 열방출률의 표준편차는 점차적으로 감소하게 된다.

Figure 4. Variation of normalized heat release rate ($\dot{Q}/\dot{Q}_p$) for different extinguishing coefficients (EC); (Simulation condition: VMD = 112 μm , Rosin-Rammler-Log-Normal distribution, DPS = 5,000).

3.2 중간 체적 직경 변화

실제 물 분무는 서로 다른 입경을 가지는 다수의 액적들로 다중분산(Multi-disperse) 되므로 단일분산은 매우 이상적인 조건이다. 그러나 본 연구에서는 어떠한 입경 크기가 화재진압에 가장 효과적인지 판단하기 위해서 단일분산 조건에서 입경 변화에 대한 화재진압특성을 살펴보았다.

Figure 5(a)는 단일분산(Mono disperse) 조건에서 입경 변화에 대한 정규 열방출률 곡선의 감소율을 나타낸다. 화재가 완전히 성장해서 최대 열방출률 값에 도달 전에 물분무가 시작되는 조기분사 조건이 적용되었기 때문에 t^* 가 0초인 경우에 정규 열방출률 값은 1보다 작다. 단일 분산을 적용한 경우 정규 열방출률 곡선은 2,000 μm 입경조건에서 가장 완만하게 감소하고, 500 μm 입경조건에서 가장 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

FDS에서 다중분산을 위해 입경분포함수(Size distribution function, SDF)를 적용하는 경우에는 액적의 최대 및 최소 입경 크기와, 분포함수의 계수 및 전체분무 체적의 50%에 해당하는 중간체적입경을 입력변수로 지정한다. Figure 5(b)는 Rosin-Rammler 분포 함수만을 적용하고, Figure 5(c)는 Rosin-Rammler와 Log-Normal 분포함수를 동시에 적용한 경우, 중간 체적직경 변화에 대한 정규 열방출률 변화를 보여준다. 각 중간 체적직경 변화조건에서 최소입경은 20 μm , 최대입경은 무한대로 일정하게 유지하였다. 다중분산 조건의 경우 분포함수에 상관없이 입경변화에 대해 거의 동일한 결과가 나타난다. 그러나 다중분산의 경우 단일분산의 경우보다 입경변화에 대해서 열방출률 곡선 감소율이 최대인 것과 최소인 것의 차이 폭이 더 좁아진다. 다중분산

Figure 5. Variation of normalized heat release rate ($\dot{Q}/\dot{Q}_p$) for different MVD conditions: (a) no SDF, (b) Rosin-Rammler, (c) Rosin-Rammler-Log-Normal. (EC = 4 and DPS = 5,000).

Figure 6. Cooling time for different size distribution functions for each HRR criteria.

Figure 7. Variation of normalized heat release rate ($\dot{Q}/\dot{Q}_p$) for different MVD conditions with each corresponding D_{min} and D_{max} . (Simulation condition: EC = 4, Rosin-Rammler-Log-Normal distribution, DPS = 5,000).

의 경우 분포함수에 따라서 생성되는 액적이 다양해지므로 단일액적 크기를 적용한 경우보다 입경변화에 대한 열방출률 곡선 변화의 민감도가 더 작아진다.

본 연구에서는 물 분무에 의해 화재가 진압되는 시간을 정량화하기 위해서 냉각시간(Cooling time) 개념을 적용하였다. Lee⁽⁷⁾의 이전의 연구에서 냉각시간은 연료의 최대 열방출률이 매우 작은 기준 값에 도달하는 시간으로 표현되었다. 본 연구에서는 열방출률이 1 kW 및 0.1 kW에 도달하

는 기준(Criteria)으로 냉각시간을 계산하였다. Figure 6은 두 개의 열방출률 기준 및 세 가지 입경분포함수 조건에 대해 각각 중간체적 입경(MVD) 변화에 따른 냉각시간 변화를 보여준다. 분포함수를 사용하는 경우 냉각시간은 모든 입경조건에 대해서 거의 동일하게 나타난다. 그러나 단일분산을 사용한 경우에는 입경이 500 μm 보다 큰 조건에서 냉각시간이 다중분산의 경우보다 더 커진다. 반면, 입경이 500 μm 와 112 μm 조건에서는 단일분산의 냉각시간이 다중분산의 경우보다 더 작아진다. 또한 단일분산의 최소 냉각시간은 500 μm 입경 조건이며, 다중분산의 최소 냉각시간은 250 μm 이다. 즉, 최소 냉각시간을 가지는 500 μm 및 250 μm 입경을 기준으로 입경 크기가 커짐에 따라 냉각시간이 증가하고 입경 크기가 작아짐에 따라 냉각시간이 증가하는 반대의 패턴이 일어난다. 물 분무에 의한 화재진압은 주로 분무 액적 증발에 기인하기 때문에 증발 효과 측면에서 증발로 인한 화재진압 효율이 가장 좋은 입경 크기에서 최소 냉각시간이 발생하는 것으로 판단된다.

Figure 7은 Rosin-Rammler-Log-Normal 입경 분포조건에서 최대 및 최소 입경과 중간체적입경을 동시에 변화시켰을 때 정규 열방출률 곡선 변화를 나타낸다. 중간체적입경 변화에 대한 열방출률 감소 패턴은 Figure 5(b) 및 (c)의 경우와 거의 동일하게 나타난다. 따라서 FDS 시뮬레이션에서 분포함수를 적용하는 경우에 동일한 중간체적 입경에 대해서 최대 및 최소입경 크기 변화는 화재진압 시간에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3.3 초당 액적 수 변화

FDS 물 분무 모델에서 초당 액적 수는 열방출률 곡선의 감소율에 영향을 미치는 주요 입력변수 중 하나이다. Beji 등⁽¹⁰⁾은 Rosin-Rammler-Log-Normal 분포에 대해 DPS가 증가할 때 중간체적입경이 더 잘 수렴되는 것을 확인하였다. Lee⁽⁶⁾는 격자의 크기가 클 때는 DPS 변화가 열방출률 곡선 변화에 크게 영향을 미치지 않지만, 격자의 크기가 작아지면 열방출률 곡선 감소율에 대한 DPS 입력 값의 민감도가 커지게 되는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 입경분포함수 변화 조건에서 DPS 변화가 열방출률 곡선 변화에 미치는 영향을 분석 하였다. Figure 8은 동일한 소화계수 및 중간 체적 입경 조건에서 각 입경분포함수에 대해 DPS 변화가 정규열방출률 곡선에 미치는 영향을 나타낸다. Figure 8(a)에서 단일 입자 분포의 경우 DPS 값의 변화에 대한 차이 폭이 다중 입자 분포의 경우보다 더 크게 나타난다. 액적의 크기가 동일한 단일분포에서는 DPS가 100,000개인 조건을 제외하고 DPS 값이 증가하면 열방출률 곡선이 완만하게 감소한다. 이와 관련하여 식(4)에 따르면 주어진 시간동안의 액적수인 N 값이 변하더라도 가중치가 고려되므로 분사되는 물 분무 유량에 영향을 미치지 않는다. 하지만 FDS에서는 한 개의 격자 내 분포한 액적수를 고려하여 각각의 분무 액적에 대해서 주변 기체와의 질량 및 에너지 교환을 계산

Figure 8. Variation of normalized heat release rate ($\dot{Q}/\dot{Q}_p$) for different DPS conditions: (a) no SDF, (b) Rosin-Rammler, (c) Rosin-Rammler-Log-Normal (EC = 4 and MVD = 112 μm).

하기 때문에 열방출률의 감소율 차이가 발생할 수 있다. Figure 8(b) 및 (c)의 경우 DPS가 1,000인 경우에는 열방출률 곡선이 가장 급격하게 감소한다. 그러나 DPS 증가에 대한 열방출률 곡선의 감소율이 규칙적인 패턴을 가지지 않고, DPS 값이 100,000인 경우와 20,000인 경우에 각각 열방출률 곡선이 가장 완만하게 감소한다. 결과적으로, DPS 변화에 대해 열방출률 곡선의 감소율이 결정되기 때문에 시뮬레이션 계산시간과 열방출률 곡선의 감소율의 정확도를 적절하게 고려한 최적의 DPS는 실험결과와 비교 분석을 통해 결정될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 FDS 6.5.2를 이용하여 물 분무 액적 특성 변화가 화재진압에 미치는 영향을 수치적으로 해석 하였다. 물 분무에 의한 화재 진압은 정규 열방출률 곡선의 감소율과 냉각시간으로 평가되었다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 소화계수가 증가하면 정규열방출률 곡선이 더 급격하게 감소하며, 물 분무 지속시간(t^*)이 증가함에 따라 시간평균된 정규열방출률의 표준편차가 감소한다.
- MVD가 112 μm 에서 2,000 μm 의 범위에서 변화할 때 정규열방출률 곡선의 차이 폭은 단일액적 분포에서 더 커진다.
- 단일 액적분포의 냉각시간은 MVD가 500 μm 보다 큰 조건에서는 다중분포의 경우보다 증가 하지만, 500 μm 이하의 조건에서는 감소한다. 단일분포는 500 μm , 다중분포는 250 μm 의 조건에서 냉각시간이 최소가 된다.
- 단일분포에서는 DPS가 증가할 때 정규열방출률 곡선이 더 완만하게 감소한다. 다중분포의 경우에는 DPS가 매우 작은 경우에 정규 열방출률 곡선이 가장 급격하게 감소되지만, DPS가 2,000 이상이 되면 DPS 변화에 대한 규칙적인 패턴이 없다.

References

1. U.S. NRC, "Fire Protection for Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.189", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA (2009).
2. J. Liu, G. Liao, P. Li, W. Fan and Q. Lu, "Progress in Research and Application of Water Mist Fire Suppression Technology", Chinese Science Bulletin, Vol. 48, pp. 718-725 (2003).
3. Z. Liu, A. K. Kim and J. Z. Su, "Examination of Performance of Water Mist Fire Suppression Systems under Ventilation Conditions", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 11, pp. 164-193 (2001).
4. H. M. I. Mahmud, K. A. M. Moinuddin and G. R. Thorpe,

- “Experimental and Numerical Study of High-pressure Water-mist Nozzle Sprays”, *Fire Safety Journal*, Vol. 81, pp. 109-117 (2016).
5. A. Jenft, A. Collin, P. Boulet, G. Pianet, A. Breton and A. Muller, “Experimental and Numerical Study of Pool Fire Suppression using Water Mist”, *Fire Safety Journal*, Vol. 67, pp. 1-12 (2014).
 6. J. Lee, “Numerical Analysis on the Rapid Fire Suppression using a Water Mist Nozzle in a Fire Compartment with a Door Opening”, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 51, pp. 410-423 (2019).
 7. J. Lee, “Numerical Analysis of How Ventilation Conditions Impact Compartment Fire Suppression by Water Mist”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 136, p. 107021 (2020).
 8. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model (Version 6.5.2)”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA (2016).
 9. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator User’s Guide (Version 6.5.2)”, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA (2016).
 10. T. Beji, S. E. Zadeh, G. Maragos and B. Merci, “Influence of the Particle Injection Rate, Droplet Size Distribution and Volume Flux Angular Distribution on the Results and Computational Time of Water Spray CFD Simulations”, *Fire Safety Journal*, Vol. 91, pp. 586-595 (2017).