

미분무 액적특성이 살수밀도에 미치는 영향 연구

A Study on the Effects of Droplets Characteristics of Water Mist on the Spray Density on the Floor

김중훈¹ · 박원희² · 김운형³ · 명상엽^{4*}Jong-Hoon Kim¹, Won-Hee Park², Woon-Hyung Kim³, Sang-Yup Myoung^{4*}¹Director, H2K Solution Inc., Uiwang, Republic of Korea²Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Republic of Korea³Professor, Department of Fire Safety Management, Kyungmin University, Uijeongbu, Republic of Korea⁴Adjunct Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Osan University, Osan, Republic of Korea

*Corresponding author: Sang-Yup Myoung, samsy@naver.com

ABSTRACT

Purpose: In this study, the effect of changes in the variables related to water droplets on the spray density on the floor in the analysis of the water mist fire protection system using FDS was analyzed. **Method:** When the spray of the water mist nozzle was analyzed in FDS, Particles Per Seconds, Particle Velocity, Size Distribution, and Spray Pattern Shape that can be set in relation to droplets were input to review the analyzed results. **Result:** In the analysis results, when the number of particles per second was set above a certain value, the spray density of the floor was similar. In the case of Particle Velocity, as the velocity decreases, the spray density of the central portion increases but decreases at a distance of 0.15m or more. From the analysis of the change in the size distribution function, it was found that an increase in the γ value increases the spray density of the central part, but the value at a remote location decreases. Compared to the result of applying the Gaussian distribution, the median value decreases dramatically when the uniform distribution is applied, but the value at the adjacent position increases. **Conclusion:** Variables related to the droplet properties of the FDS affect the spray density of the floor. Therefore, in order to increase the reliability of results before performing analyses such as fire suppression or cooling, a sufficient review of input variables is required.

Keywords: Water-Mist, Nozzle, Numerical Analysis, Spray Density, Particles Per Second, Particle Velocity, Size Distribution, Spray Pattern Shape

요약

연구목적: 본 연구는 미분무 소화설비의 FDS모델링 수행에 있어 액적과 관련된 변수의 설정 변화가 살수밀도에 미치는 영향을 알아보았다. **연구방법:** 미분무 노즐의 살수 현상을 FDS에서 해석할 경우 액적과 관련하여 설정할 수 있는 항목 중 초당액적수, 액적속도, 입경분포함수, 분사패턴형태의 값을 입력하여 분석된 결과를 검토하였다. **연구결과:** 분석결과에서, 초당미립자수 설정은 일정 값 이상이 되면 유사한 바닥면의 살수밀도를 보여주었다. 액적속도는 낮아짐에 따라 중심부분의 살수밀도를 높이지만 0.15m 이상 떨어진 거리에서는 낮아짐을 알 수 있었다. 입경분포함수의 변화에 대한 분석에서, γ 값의 증가는 중심부분의 살수밀도의 증가를 가져오지만, 떨어진 위치에서의 값은 감소를 가져온다는 점을 알 수 있었다. 가우시안 분포를 적용한 결과에 비하여 균등분포를 적용하는 경우 중앙값은 극적으로 낮아지지만 인접위치에서의 값은 증가함을 보여준다. **결론:** FDS의 액적특성에 관련된 변수들은 각각 바닥면의 살수밀도에 영향을 준다. 그러므로 화재 진압이나 냉각 등의 해석에 들어가기 전 신뢰성을 확보하기 위하여 입력변수에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

핵심용어: 미분무, 노즐, 수치해석, 살수밀도, 초당 미립자수, 액적속도, 입경분포함수, 분사패턴형태

Received | 31 December, 2020

Revised | 10 March, 2021

Accepted | 10 March, 2021

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

미분무소화설비는 미세한 물 입자를 분사하여 가연물의 표면을 직접 적시는 냉각효과, 미분무의 체적팽창을 통한 산소차단효과 및 가연성 기체를 희석시키는 효과, 화원주변의 증발을 통한 냉각소화효과, 그리고 복사열 차단등의 효과를 통해 화재를 신속히 진압하는 설비이다. 대부분 물을 사용하므로 친환경적이고, 전기화재에 대한 적응성이 있어 할론과 같은 가스계 소화설비를 대체하고 철도차량, 선박, 항공기와 같이 물의 저장에 제한적인 대상에 대한 효과적인 소화시스템으로 도입되었다. 미분무소화설비의 화재안전기준(NFSC 104A)에서 미분무(Water mist)란 물만을 사용하여 소화하는 방식으로 최소설계압력에서 헤드로부터 방출되는 물입자 중 99%의 누적체적분포가 $400\mu\text{m}$ 이하로 분무되고 A,B,C급 화재에 적응성을 갖는 것을 말한다고 정의하고 있으며, 최고사용압력에 따라 1.2MPa 이하를 저압, 1.2MPa에서 3.5MPa사이를 중압, 3.5MPa 초과를 고압 미분무 소화설비로 구분하고 있다. 또한 NFPA 750에서는 노즐의 동작압력 범위 내에서 물입자 중 99%의 누적체적분포가 $1,000\mu\text{m}$ 이하로 정의하고 있다.

미분무소화설비는 유류화재와 전기화재에 대해 적응성이 있으나, 목재 심부화재에 대해서는 성능이 취약한 것으로 알려져 있다. Roh et al.(2012)는 목조문화재에 대한 미분무 소화설비의 적용 실험에서 방수압력 8 Bar, 노즐당 방수량 35 LPM의 저압 미분무소화설비를 적용하여 목재를 진압해본 결과 소화능력이 부족하다는 결론을 제시하였다. Kwak et al.(2014)는 미분무소화설비의 전기함에 대한 화재진압성능에 대한 실험적 연구를 통해 차폐가 되는 전기함의 화재에 대해서도 미분무 소화설비가 효과 있음을 제시한바 있다. Lee(2019)는 물분무 액적특성변화가 화재진압에 미치는 영향을 FDS를 사용하여 고찰해본바 있다. 단일 액적분포에서 초당액적수의 증가에 따라 정규 열방출률 곡선은 더 완만하게 감소하였으며, 다중분포에서는 초당액적수가 작은 조건에서만 정규 열방출률 곡선이 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. Vaari et al.(2012)는 미분무소화시스템을 사용한 도로터널 화재 진압에 대하여 FDS를 사용하여 해석하는 일련의 과정을 보고서를 통해 제시한바 있다. 이러한 실증적인 연구들도 있었지만 Ko(2014)는 미세물분무작동에 대하여 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 적용한 예측성능평가를 수행하여 FDS 화재 시뮬레이션 결과는 온도의 변화 및 화재 제압 특성에 대하여 실험 결과와 좋은 일치성을 보여주었다.

본 연구는 미분무 소화설비의 FDS모델링 수행에 있어 액적과 관련된 변수의 설정 변화가 살수밀도에 미치는 영향을 알아 보았다. 본 연구에서 살수밀도를 결과로 설정한 이유는 미분무 살수에 의한 고온체의 표면에 대한 냉각 및 발화억제 능력을 모델링해보기 위한 사전 연구로서 수행되기 때문이다. 그러므로 이를 위하여 검토한 항목은 초당액적수(Particles Per Seconds), 액적속도(Particle Velocity), 입경분포함수(Size Distribution), 분사패턴형태(Spray Pattern Shape) 등이다. 이들 변수는 미분무 소화설비를 FDS에서 구현하는데 가능한 설정 값으로 이들의 변화에 따른 살수밀도(Accumulated Mass Per Unit Area)의 변화를 알아보았다.

수치해석모델

본 연구는 화재분야에서 사용되는 FDS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 이 모델은 화원에서 발생하는 열과 연기의 유동에 중점을 두고 저속 열유동($Ma < 0.3$)에 대한 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 수치적으로 푼다. 난류모델은 DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation)를 제공하며 본 연구에서는 LES모델을 사용하였다. 지배방정식 및 연소모델, 난류 모델, 그리고 여러 서브모델에 대한 상세한 내용은 McGrattan et al.(2020)에 의해 작성된 매뉴얼에 상세히 제시되었다.

해석조건

본 연구는 FDS에서 미분무 헤드의 살수를 모사하는 경우 액적특성에 대한 설정이 바닥면의 살수밀도에 어떠한 결과를 미치는지에 대하여 알아보고자 수치해석을 수행하였다. 본 수치해석의 대상은 다음 연구에서 비교할 실험 환경을 최대한 그대로 반영하여 수행되었다. 대상 공간은 가로(1m), 세로(1m), 높이(1m)로 설정하였으며, 4개의 벽면에 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 의 개구부를 만들었고, 철 재질로 된 구조물을 설정하였다. 계산영역의 크기는 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 였으며, 격자의 크기는 0.05 m 였다.

미분무는 노즐 출구에서 분사되는 물이 미립화 과정을 겪는 동안 다양한 크기의 무수한 액적이 분열되어 생성된다. 따라서 FDS에서 미분무 살수를 모사하기 위해서는 크게 미립자(Particle)에 대한 설정부분과 장치특성(Device Properties)에 대한 설정이 필요하며, 이는 FDS내에서 각각 &PART와 &PROP에서 설정하게 된다. 기본적인 분사헤드의 물리적인 특성인 방수량(Flow rate), 살수각도(Spray Angle) 등의 설정은 본 연구에서 실제 미분무헤드의 특성치를 측정하여 적용하였다.

본 연구에 사용하는 미분무 노즐은 단일 마이크로 노즐에서 80 Bar의 압력에서 DV 90에서 물방울 평균 입자 크기가 $80\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 방수량은 1.58 L/min 이며 살수각도는 40° 로 적용되었다. 노즐의 모습과 살수각도 측정은 Fig. 1과 Fig. 2를 참고한다.



Fig. 1. Water mist nozzle

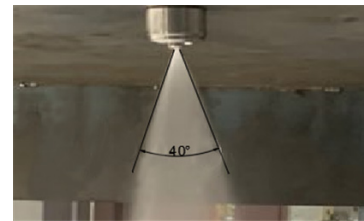


Fig. 2. Spray angle

해당 노즐의 분사평균액적크기는 측정된 값에 의하여 $80\mu\text{m}$ 로 설정하였으며, 이는 FDS의 기본 값(default) 설정에 의하여 ROSIN-RAMMLER-LOGNORMAL 분포함수의 적용을 받는다 이는 다음의 입경분포함수에서 같이 설명한다. 본 연구에서 비교하고자 했던 변수는 초당 미립자수 (Particles Per Second), 액적속도(Particle Velocity), 입경분포함수(Size Distribution), 분사패턴형태(Spray Pattern Shape) 였다. 이 부분은 실험에 의하여 측정하기가 곤란한 경우가 있기 때문에 이러한 분석을 수행하는 것은 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

초당 미립자수(Particles Per Second)

노즐에서 물의 분사로 인해 생성되는 액적의 수는 시뮬레이션 입력변수인 초당 미립자수 (Particles per second)로 사용자에게 의해서 설정될 수 있다. 이는 1초당 계산영역내로 삽입되는 액적의 수를 말하며, 기본 값은 5,000개이다. 그러나 초당 미립자수는 단순히 수치계산을 위해 사용되는 값이라 그 수의 변화가 있더라도 수치해석을 위한 입력 값으로 주어진 방수량은 변하지 않는다. 다만 초당미립자수를 너무 작게 하면 계산 과정에서 수치적인 불안전성(Instability)이 발생하여 물리적으로 타당하지 않은 결과가 도출되며, 이 값이 너무 크면 계산에 소요되는 시간만 증가하게 되므로 적절한 값의 설정이 중요하다고 매뉴얼에서는 서술하고 있다. 본 분석에서는 초당 미립자수를 10,000개, 50,000개, 100,000개, 200,000개를 설정하여 결과를 비교하였다.

액적속도(Particle Velocity)

헤드에서 방출되는 액적의 속도를 측정하는 것은 매우 어려운 일이며 국내외 문헌에서도 이를 지적한바 있다. Vaari et al.(2012)의 연구에서 노즐을 통해 방출되는 물의 속도를 베르누이식에 의해 계산하였으며, 압력이 모두 유속으로 전환된다는 가정 하에, 다음 식 (1)을 사용하여 유속($V_{d,0}$)을 계산하였다. Vaari et al.(2012)의 연구에서는 노즐의 마찰손실로 0.95를 적용하고 있지만, 이는 불명확한 값이다. 그러므로 본 연구에서는 C값을 0.95, 0.75, 0.55 등 3가지를 설정하고 그로 인한 속도를 계산하여 결과에 대한 비교분석을 수행해보았다. C값의 변화에 따른 액적속도관계는 Fig. 3에 그래프로 나타내었다.

$$V_{d,0} = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_d}} \tag{1}$$

C=0.95 : 노즐에서의 마찰손실

Δp : 노즐 내 외부의 유체의 압력

ρ : 유체의 밀도

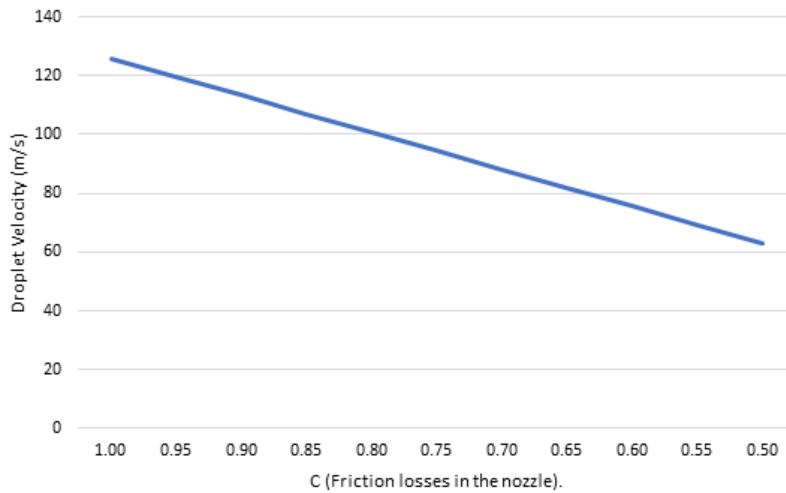


Fig. 3. Droplet velocity with friction losses

입경분포함수(Size Distribution)

분사되는 액적의 초기 크기분포는 Rosin-Rammler/log-normal 분포를 이용하여 나타내며 분포함수는 다음과 같다.

$$F(D) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D} \exp\left(-\frac{[\ln(D/D_{v,0.5})]^2}{2\sigma^2}\right) dD & (D \leq D_{v,0.5}) \\ 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{D}{D_{v,0.5}}\right)^\gamma\right) & (D > D_{v,0.5}) \end{cases}$$

FDS에서는 ROSIN-RAMMLER-LOGNORMAL을 기본값으로 제공하며, γ 는 2.4를 기본값으로 한다. σ 는 $\sigma=1.15/\gamma$ 의 관계에 의하여 설정된다. 본 연구에서 사용되는 헤드는 분사평균액적크기로 $80\mu\text{m}$ 라는 값은 측정되어 있으나 σ 와 γ 값을 산출하기 위한 정보는 제공되지 않았다. 그러므로 σ 와 γ 값의 변화에 따른 결과도 알아보하고자 하였다. γ 값은 2.0, 2.5, 3.0, 5.0으로 설정하였으며 관계식에 따라 σ 값은 각각 0.58, 0.46, 0.33, 0.23으로 설정되어 적용하였다.

분사패턴형태(Spray Pattern Shape)

노즐의 액적 분사에 있어 밀도 분포도 중요하게 된다. FDS는 기본 값으로 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 적용하도록 하고 있다. 다른 선택으로 균등분포(Uniform distribution)를 선택할 수도 있다. 현재 FDS의 사용자 지침에서는 가우시안 분포를 기본 값으로 한다는 정보를 주지만, 세부 설정 값에 대한 정보는 제공되지 않고 있다. 본 연구에서는 기본값의 가우시안 분포와 균등분포 적용의 차이점을 알아보하고자 하였다. 각 분석 케이스를 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Cases for the analysis

Case No.	Particles per second	Case No.	Particle Velocity		Case No.	Size Distribution		Case No.	Spray Pattern Shape
			C	$V_{d,0}$ (m/s)		σ	γ		
1-1	10,000	2-1	0.95	119.58	3-1	0.58	2.0	4-1	Gaussian
1-2	50,000	2-2	0.75	94.41	3-2	0.46	2.5	4-2	Uniform
1-3	100,000	2-3	0.55	69.23	3-3	0.33	3.5		
1-4	200,000				3-4	0.23	5.0		

결과인 살수밀도의 측정은 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 의 버킷(Bucket)을 설정하여 중심점을 기준으로 영역의 정 중앙인 0m, 0.15m, 0.3 m, 0.45 m 이격되도록 배치하였다. 버킷영역의 평균을 기준으로 60초 동안의 축적된 질량을 측정하여 살수밀도(AMPUA, Accumulated Mass Per Unit Area)의 변화를 알아보았다.

수치해석결과

본 연구에서 Table 1의 각 케이스들에 대하여 FDS를 사용하여 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

초당 미립자수(Particles Per Second)

초당미립자수의 변화에 대한 비교는 액적속도는 119.58m, 분사패턴형태와 입경분포함수는 기본 값을 적용하여 수행하였다. 초당 미립자수를 10,000개, 50,000개, 100,000개, 200,000개를 설정하여 결과는 Table 2와 Fig 4의 그래프로 표시하였다. 초당미립자수는 그 수가 증가함에 따라 결과 차이가 나타나고 있다. Case 1-1의 10,000개 입자설정과 Case 1-4의 200,000개 입자설정의 결과는 중심점의 경우 60초 동안 누적된 AMPUA값을 비교하면 $4.63\text{kg}/\text{m}^3$ 의 차이를 나타내고 있다.

10,000개에서 50,000개로의 증가에서는 $4.86\text{kg}/\text{m}^3$ 가 증가하지만 그 이후로의 값은 큰 변화가 없는 것으로 나타나고 있다.

0.15m 떨어진 위치에서의 측정에서는 Case 1-1이 $4.54\text{kg}/\text{m}^3$, Case 1-2은 $4.04\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 가 감소한 것으로 나타나고 있다. 이후는 큰 차이가 없으며, 0.3m, 0.45m 이격거리에서의 값은 큰 차이를 나타내고 있지 않다.

Table 2. AMPUA Values at each point in Case 1

Case No.	AMPUA (kg/m ³)			
	0m	0.15m	0.3m	0.45m
1-1	55.42	4.54	0.2	0.02
1-2	60.28	4.04	0.17	0.02
1-3	59.99	4.14	0.17	0.02
1-4	60.05	3.98	0.17	0.02

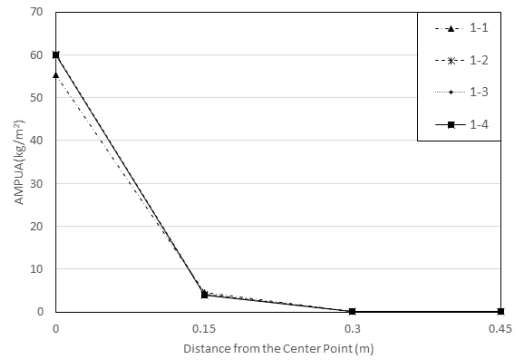


Fig. 4. Comparison by results of case 1

액적속도(Particle Velocity)

액적속도의 변화에 대한 비교는 초당미립자수는 100,000개, 분사패턴형태와 입경분포함수는 기본 값을 적용하여 수행하였다. 액적속도 변화에 따른 결과 비교는 Table 3과 Fig. 5의 그래프로 표시하였다. 액적속도의 감소에 따라 중심점의 경우 60초 동안 누적된 AMPUA값은 증가하는 것을 알 수 있다. 액적속도는 약 25m/s씩 감소하게 되는데 119.5825m/s에서 94.41m/s로 감소하게 되면, 가운데 지점의 AMPUA는 3.75kg/m³ 증가하며, 94.41m/s에서 69.23m/s로 감소하면 가운데 지점의 AMPUA는 5.59kg/m³ 증가하게 된다. 액적속도가 느려지면, 중심점은 AMPUA값이 증가하지만, 0.15m, 0.3m, 0.45m 떨어진 위치에서의 값은 반대로 감소하게 되는 결과를 보여준다.

Table 3. AMPUA Values at each point in Case 2

Case No.	AMPUA (kg/m ³)			
	0m	0.15m	0.3m	0.45m
2-1	59.99	4.14	0.17	0.02
2-2	63.74	3.88	0.14	0.01
2-3	69.33	3.13	0.08	0

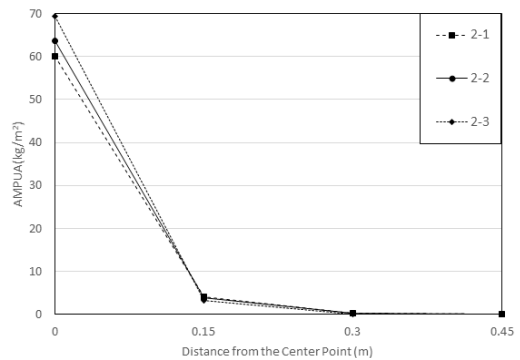


Fig. 5. Comparison by results of case 2

입경분포함수(Size Distribution)

입경분포함수에 적용되는 σ 와 γ 값의 변화에 따른 AMPUA값의 변화를 분석해보았다. 액적속도는 119.58m, 초당미립자수는 100,000개, 분사패턴형태는 기본 값을 사용하였다. γ 값의 증가에 따라 중심점에서의 AMPUA값은 약 1.2kg/m³ 증가하게 되지만, 0.15m, 0.3m, 0.45m 떨어진 위치에서의 값은 반대로 감소하게 되는 결과를 보여준다. 입경분포함수 변화에 따른 결과 비교는 Table 4과 Fig. 6의 그래프로 표시하였다.

Table 4. AMPUA Values at each point in Case 3

Case No.	AMPUA (kg/m ³)			
	0m	0.15m	0.3m	0.45m
3-1	58.72	4.26	0.19	0.02
3-2	59.99	4.14	0.17	0.02
3-3	61.22	3.61	0.14	0.02
3-4	62.49	3.46	0.1	0.02

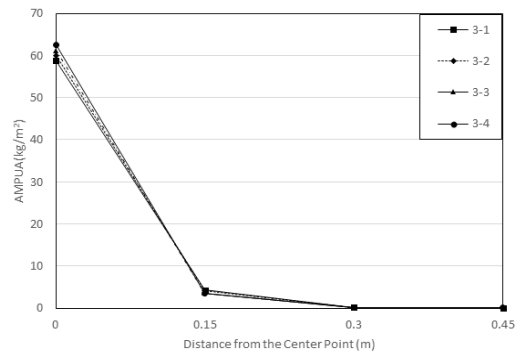


Fig. 6. Comparison by results of case 3

분사패턴형태(Spray Pattern Shape)

분사패턴은 기본 값인 가우시안 분포와 균등분포의 비교를 수행하였으며, 액적속도는 119.58m, 초당미립자수는 100,000 개, 입경분포함수는 기본 값을 사용하였다. 가우시안 분포를 사용하는 분사패턴에 비하여 모든 방사각도로 균일하게 액적을 보내는 균등분포를 적용하는 경우 결과는 많은 차이를 보이게 된다. 정 중앙에서의 차이는 37.86kg/m³ 로서 균등분포를 적용한 결과가 더 낮게 나타남을 알 수 있었다. 분사패턴형태 변화에 따른 결과 비교는 Table 5와 Fig. 7의 그래프로 표시하였다. 하지만, 0.15m, 0.3m, 0.45m 떨어진 위치에서의 값은 균등분포를 적용한 결과가 가우시안을 적용한 결과에 비하여 높게 나타남을 알 수 있었다.

Table 5. AMPUA Values at each point in Case 4

Case No.	AMPUA (kg/m ³)			
	0m	0.15m	0.3m	0.45m
4-1	59.99	4.14	0.17	0.02
4-2	22.14	5.75	1.05	0.29

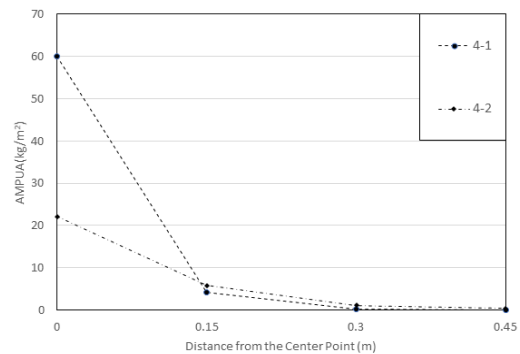


Fig. 7. Comparison by results of case 4

결론

본 연구는 FDS에서 미분무 헤드의 살수를 모사하는 경우 액적특성에 대한 설정이 바닥면의 살수밀도에 어떠한 결과를 미치는지에 대하여 알아보고자 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 비교하고자 했던 변수는 초당 미립자수, 액적속도, 입경분포함수, 분사패턴형태였다. 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 초당미립자 수에 대한 분석의 결과 60초 동안 살수하는 경우 10,000개로 설정한 결과와 50,000개 이상의 AMPUA값

은 차이를 보여주었다. 다만, 50,000개, 100,000개, 200,000개로 증가시킨 결과 바닥면에서의 AMPUA값은 대체로 유사한 값을 보여주었다. 이는 초당 미립자 수는 계산 시간에 영향을 주므로 동일한 결과가 나오는 값 중 작은 값을 선택해야 한다.

- 2) 액적속도의 낮아짐에 따라 중앙부분의 AMPUA값을 증가시키는 결과를 가져온다. 하지만 중앙으로부터 멀어지는 부분에서는 낮아지는 결과를 보여준다. 이는 속도의 증가는 액적이 도달하는 거리를 증가시킨다는 것을 알 수 있다.
- 3) 입경분포함수의 변화는 다른 변수에 비하여 비교적 작은 값의 변화를 보여주고 있다. γ 값의 증가는 중심부분의 AMPUA값 증가를 가져오지만, 떨어진 위치에서의 값은 감소를 가져온다는 점을 알 수 있었다.
- 4) 분사패턴형태는 가우시안분포와 균등분포를 비교하였다. 가우시안 분포에 비하여 균등분포는 중앙값은 극적으로 낮아지지만 인접위치에서의 값은 증가함을 보여준다는 점을 알 수 있었다.

본 연구로 FDS에서 미분무 노즐로부터 방출되는 액적에 대한 특성 설정을 위한 변수의 적용특성을 알아보았다. 차 후 해석결과와 실험 결과를 비교해보는 연구가 수행되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 소방청 ESS·수소시설 화재 안전기술 연구개발사업(“과제번호-20011568”) 및 철도연 주요사업 “대구 3호선 전동차 화재진압장치 부품(버스트 디스크) 및 화재진압장치 시제품 개발”의 지원을 받아 게재되었습니다.

References

- [1] Ko, G.H. (2014). “Estimation of fds prediction performance on the operation of water-mist.” Journal of the Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 15, No. 8 pp. 4809-4814.
- [2] Kwak, J.H., Kim, D.S., Park, M.H., Kim, Y.J. (2014). “Effect of water mist droplet size on the insulation destruction of electric cables.” Proceedings of 2014 Autumn Annual Conference, Korean Institutes of Fire Science & Engineering, Samcheok, pp. 31-32.
- [3] Lee, J.H. (2019). “Numerical analysis of the effects of droplets characteristics of water spray on fire suppression.” Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 1-8.
- [4] McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M. (2020). Fire Dynamics Simulator User’s Guide, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.
- [5] Roh, S.K., Kim, D.C., Ham, E.G. (2012). “The study of fire suppression capability of low pressure water-mist system for wooden cultural properties.” Journal of the Korea Society of Disaster Information, Vol. 8, No. 4, pp 401-410.
- [6] Vaari, J., Hostikka, S., Sikanen, T., Paajanen, A. (2012). “Numerical simulations on the performance of water-based fire suppression systems.” VTT Technical Research Centre of Finland., Finland, pp.137-139.