

미세물분무 작동에 대한 FDS 예측 성능 평가

고권현*

¹동양대학교 건축소방행정학과

Estimation of FDS Prediction Performance on the Operation of Water-Mist

Gwon Hyun Ko^{1*}

¹Dept. Architecture and Fire Prevention Administration, Dongyang University

요약 본 논문은 미세물분무 작동에 따른 화재 거동 및 제압 특성을 예측하는 데 있어서 FDS(Fire Dynamic Simulator)의 예측 성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 미세물분무의 초기액적분포 입력을 위해 Rosin-Rammler /log-normal 분포를 사용하였으며 모델 상수의 영향을 살펴보았다. 또한 미세물분무의 분사압력에 따른 화재 제압특성을 이전의 실험 결과와 비교함으로써 해석 모델을 검증하고 열유동 특성 및 가스 농도 변화를 분석하였다. 결과로부터 동일한 평균입경을 갖는 미세물분무도 액적분포의 특성에 따라 하부 위치에서의 액적 크기 및 속도에 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다. 분무특성에 대한 실험결과와의 비교를 통해 적절한 초기입경분포를 결정하였으며 이를 이용하여 화재 시뮬레이션을 진행하였다. FDS 화재 시뮬레이션 결과는 온도의 변화 및 화재 제압 특성에 대하여 실험 결과와 좋은 일치를 보여주었다. 또한 미세물분무의 작동압력에 따른 열유동장 변화, 가스상 농도 변화의 예측에 있어 유용한 데이터를 제공할 수 있음을 확인하였다.

Abstract The aim of the present study was to estimate the prediction performance of a FDS (Fire Dynamic Simulator) to simulate the fire behaviors and suppression characteristics by operating a water-mist. Rosin-Rammler/log-normal distribution function was used to determine the initial droplet distribution of water-mist and the effects of its model constant were considered. In addition, the simulation models were validated by a comparison of the predicted fire suppression characteristics with water-mist injection pressures to the previous experiments, and the thermal flow behaviors and gaseous concentration variations were analyzed. The results showed that water-mists with the same mean diameter were affected by the characteristics of the droplet size distribution, which have different size and velocity distributions at the downstream location. The fire simulations conducted in this study determine the initial droplet size distribution tuned to the base of the spray characteristics measured by previous experiments. The simulation results showed good agreement with the previous measurements for temperature variations and fire suppression characteristics. In addition, it was confirmed that the FDS simulation with a water-mist operation supplies useful details on estimations of the thermal flow fields and gaseous concentration under water mist operation conditions.

Key Words : Fire simulation, water-mist, fire suppression, droplet size distribution

1. 서론

미세물분무(water mist) 소화 설비는 기존의 스프링클러(sprinkler) 소화설비와 할론(halon)으로 대표되는

가스계 소화설비의 효과적인 대체 설비로써 많은 관심을 받고 있다. 미세물분무는 스프링클러에 비해 미세한 액적 분무를 활용함으로써 수손(water damage)에 의해 2차 피해를 최소화할 수 있고 액적 증발이 원활하여 질식

본 논문은 2013년 동양대학교 교내연구과제 연구비지원을 통해 수행되었음.

*Corresponding Author : Gwon Hyun Ko(Dongyang Uni.)

Tel: +82-54-630-1258 email: kogh@dyu.ac.kr

Received July 10, 2014

Revised August 6, 2014

Accepted August 7, 2014

효과(suffocation effect)에 의한 화재 제압이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 이러한 장점으로 인해 환경 문제로 사용이 어려운 가스계 소화약제에 대한 효과적인 대안으로 기대되고 있다[1].

Ndubizu 등[2]은 메탄 확산 화염에 대해 미세물분무 작동 시 화염 부근의 온도 분포와 농도 분포 파악한 바 있으며 USCG(United States Coast Guard)에서는 비교적 큰 화재 공간인 선박의 기관실을 대상으로 상용 미세물분무 시스템의 소화 성능을 평가 하였다[3]. 또한 Liu 등[4]은 실제 규모의 화재 공간에 대하여 다양한 화원과 배기 조건 및 분사 조건에 대하여 소화 시간과 연층의 온도 분포 등을 파악하였다. Chow 등[5]와 Beihua 등[6]은 실제 화재 공간에 대하여 화염과 물분무의 상호작용을 수치해석을 통해 분석한 바 있다. 국내에서는 김명배 등[7]이 풀화재(pool fire)에 대하여 소화에 필요한 유효분사유량을 제시하고 화원의 직접냉각을 위한 분사유량의 필요성을 제시한 바 있으며 김성찬 등[8]은 워터미스트가 작동하는 밀폐공간의 풀화재에 대한 실험을 통해 초기 급속 냉각과 후기 점진 냉각으로 연층의 냉각 과정을 분류하였다.

그럼에도 불구하고 미세물분무에 의한 화재의 억제 및 진화 과정과 물분무 특성이 미치는 영향에 대한 물리적 이해는 충분치 않으며 이로 인해 미세물분무의 적용에 많은 어려움이 있는 실정이다. 특히 최근에 국내에 도입된 성능위주소방설계(performance-based design) 과정에서 중요한 위치를 차지하고 있는 화재 시뮬레이션에서 미세물분무에 의한 화재 제압에 대한 해석의 유효성 및 성능 평가는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 미세물분무를 이용한 화재 제압과정에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하고 화염과 미세물분무의 상호작용을 분석하였다. 화재 시뮬레이션에는 미국 표준과학연구소(NIST)에서 개발되어 널리 사용되는 FDS(Fire Dynamics Simulator)[9]를 이용하였으며 문헌의 실험 결과[6]와의 비교를 통해 검증한 후 미세물분무 특성에 따르는 파라미터 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 FDS(Fire Dynamics Simulator)

본 연구에서는 화재 해석 분야에서 널리 사용되고 있는 FDS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. FDS는 화

염원에서 발생하는 연기와 열의 거동에 중점을 두면서 저속의 열유동에 대한 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 수치적으로 푼다. 이 방정식들은 공간에 대해서는 2차 오더의 중심 차분법, 시간에 대해서는 2차 오더의 예측-수정 방식을 이용하여 차분된다. 연소 과정과 복사 열전달은 각각 혼합분율 모델과 유한체적법에 따라 계산된다. 난류 모델의 경우 DNS와 LES를 제공하고 있는데 본 연구에서는 LES 모델을 사용하였다. 지배방정식 및 연소 모델, 난류 모델의 상세한 내용은 참고문헌[9]에 상세히 제시되었다.

FDS에서 액적의 거동은 라그랑지안 형태의 지배방정식에 의해 해석된다.

$$\frac{d}{dt}(m_d \vec{u}_d) = m_d g - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (\vec{u}_d - \vec{u}) |\vec{u}_d - \vec{u}| \quad (1)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re \end{cases} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho |u_d - u| D_d}{\mu_g} \quad (3)$$

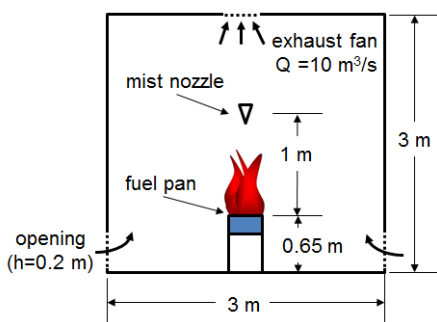
분사되는 액적의 초기 크기분포는 Rosin-Rammler/log-normal 분포를 이용하여 나타내며 분포함수는 다음과 같다.

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} \times \exp\left(-\frac{\ln(d'/d_m)^2}{2\sigma^2}\right) dd' & (d_m < d) \\ 1 - \exp(-0.693(d/d_m)^\gamma) & (d \leq d_m) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 d_m 은 분무의 평균액적을 의미하며 σ 는 분무 특성을 고려하여 설정하는 실험 상수이다[9]. 기상과 액적 사이의 열 및 물질전달은 잘 알려진 Ranz & Marshall 모델을 이용하여 해석되며 관련 수식은 참고문헌[9]에서 찾을 수 있다.

2.2 수치해석 조건

본 연구에서는 디젤 연료 화염에 대하여 미세물분무를 이용한 진압 과정을 분석한 Beihua 등[6]의 실험에 대



[Fig. 1] Schematics of fire-watermist interaction tests conducted by Beihua et al. [6].

해서 FDS를 이용하여 해석하였다. Fig. 1의 개략도에서 보는 바와 같이 3 m × 3 m × 3 m 크기의 화재실 중앙 0.65 m 높이에 디젤유 화원이 있으며 화원 표면에서 1.0 m 위에 미세물분무 노즐이 위치한다. 화재의 크기는 12.3 kW이며 노즐 출구의 직경은 0.8 mm이다. 노즐에서의 분사압은 0.4 MPa와 1.0 MPa의 두 가지 조건이며 각각의 경우 0.526 lpm과 0.833 lpm의 유량으로 분사된다[6].

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 해석 격자를 보여준다. FDS 해석에서의 계산 격자는 화원의 다음과 같이 정의되는 무차원특성길이(D^*)를 기초로 하여 설정하는 방식이 널리 이용되고 있다[9].

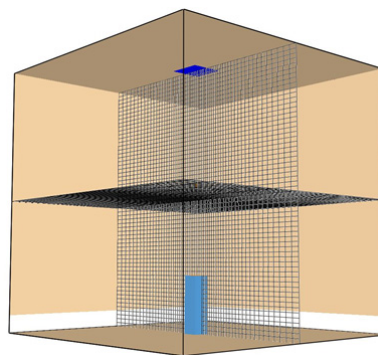
$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5)$$

여기서 \dot{Q} 는 화원의 발열량을 의미하며 ρ , C_p , T_∞ 는 각각 주변 공기의 밀도, 정압비열, 온도를 나타낸다. 일반적으로 격자 크기에 대한 무차원 특성길이의 비, 즉 $D^*/\Delta x$ 가 15 이상으로 설정하는 것이 적절하다고 알려져 있다 [5,8]. 본 연구에서 채택된 격자의 수는 약 400,000 개로써 $D^*/\Delta x$ 의 값은 약 18이다. 화재실 상부 배기구 덕트의 경계조건은 출구 조건, 각 벽면 하부의 개방부는 압력경계 조건, 그 외에는 벽 경계조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세물분무 특성 해석

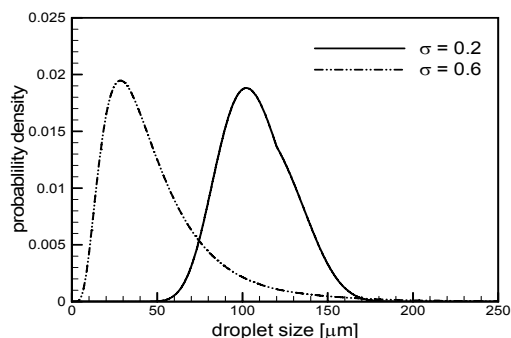
미세물분무에 의한 화재 제압 해석에 앞서 액적 크기 및 속도에 대한 설정을 확인하는 것이 중요하다. 미세물



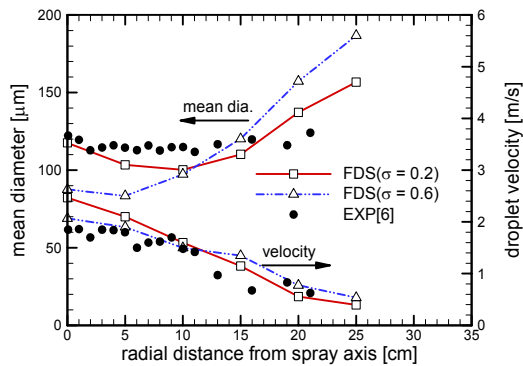
[Fig. 2] Perspective view of the grid system adopted in this study.

분무 노즐의 출구에서 액적 크기와 속도를 알고 있다면 해석의 정확성을 향상시킬 수 있겠으나 대부분의 경우 노즐 근처에서의 측정이 쉽지 않다. 화재 공학 분야에서는 노즐의 설치 위치와 화염 예상 지점과의 거리를 고려하여 노즐 하부 1.0 m 지점에서의 분무 특성이 주로 제공된다. 본 연구에서는 화원이 없는 상태에서 해석을 수행하고 액적 초기 조건에 따른 하부 지점에서의 액적 특성을 실험과 맞추는 방법을 사용하여 화재 제압 해석의 정확성을 확보하고자 하였다.

Fig. 3은 초기 분사 액적의 크기 분포를 Rosin-Rammler/log-normal 분포를 이용하여 구한 결과를 보여준다. 실험[6]에서 제시된 1.0 m 하부의 평균직경 120 μm 을 기준으로 σ 값이 0.2와 0.6인 경우의 결과를 보여준다. Eq. (4)에 제시된 실험 상수 σ 값은 액적 분포의 폭을 결정한다. 그림에서 보는 바와 같이 $\sigma = 0.6$ 의 경우에는 5 ~ 200 μm 의 범위에, $\sigma = 0.2$ 의 경우는 50 ~ 190 μm 의 범위에 걸쳐 분포된 액적 크기를 제시한다.



[Fig. 3] Probability density functions for droplet size distribution that are used as input conditions for calculation of water-mist behaviors.

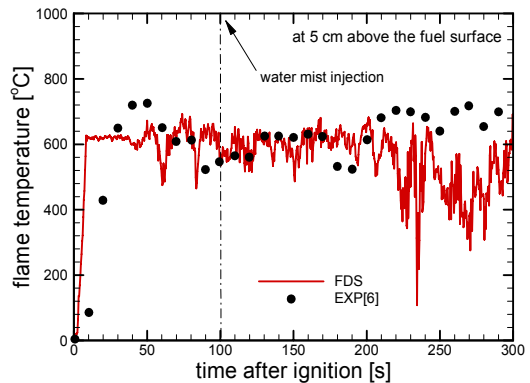


[Fig. 4] Comparison on radial distribution of mean diameter and velocity of droplets between measurements[6] and predictions using $\sigma = 0.2$ and 0.6 for $P_{inj} = 1.0$ MPa case.

Fig. 4는 1.0 MPa의 분사압 조건의 경우 두 가지의 초기 액적 분포를 FDS 해석에 적용하여 노즐 하부 1.0 m에서의 액적 크기 및 속도 분포를 실험[6]과 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 액적 분포의 폭인 좁은 $\sigma = 0.2$ 을 사용한 해석 결과가 실험과 보다 근접한 결과를 보이고 있다. 먼저 액적의 평균 직경 분포를 보면 $\sigma = 0.2$ 의 경우가 초기 액적 크기 범위가 작기 때문에 하부에서의 액적 크기 분포가 상대적으로 균일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 액적 속도의 경우에는 $\sigma = 0.6$ 의 경우가 좀 더 실험에 근접한 결과를 보이거나 액적 크기 분포 차이에 비하면 그 차이가 크지 않았다. 따라서 이후의 해석에서는 $\sigma = 0.2$ 의 설정을 사용하여 해석을 수행하였다.

3.2 화재해석 유효성 평가

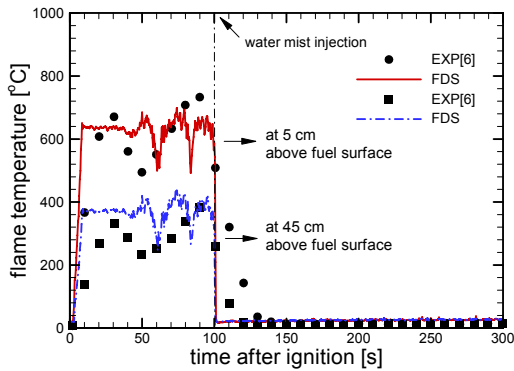
Fig. 5는 미세물분무 분사압 $P_{inj} = 0.4$ MPa의 경우에 대해서 화원 표면으로부터 5 cm 상부 위치의 온도 변화에 대한 실험[6] 및 수치해석 결과를 상호비교하고 있다. 먼저 실험 결과를 살펴보면 점화 이후의 전체 시간에 걸쳐 약 500 °C에서 700 °C 사이에서 과도적으로 변화하고 있으며 미세물분무 작동 이후에 이러한 경향 다소 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 미세물분무에 의한 냉각 효과는 미비한 것으로 판단할 수 있다. FDS 해석 결과를 살펴보면 점화 초기의 온도 상승에 있어 실험 결과보다 다소 앞서고 있으나 이는 점화 초기 발열량 성장률에 대한 실험 데이터가 제공되지 않아 일정하게 설정했기 때문이다. 그러나 이러한 초기의 화재 성장률의 영향이 전



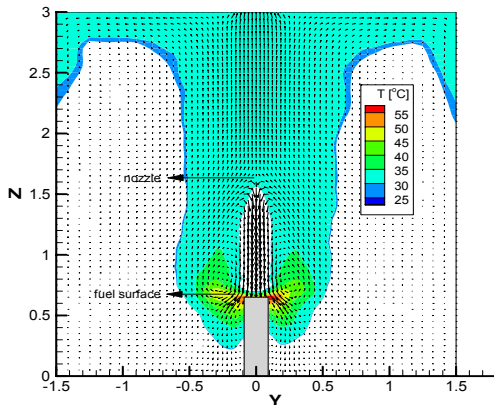
[Fig. 5] Comparison between prediction and experimental data[6] for the temperature variation at local detecting point for $P_{inj} = 0.4$ MPa case.

체 화염 거동의 예측에 미치는 영향은 매우 제한적임을 알 수 있다. 화재 후반부의 해석에 나타나는 비교적 큰 섭동은 미세물분무 액적의 증발에 따른 영향과 화염 자체의 과도적 특성이 동반하여 나타나는 것으로 생각된다. 화염 자체의 과도적 특성을 고려할 때, 해석 결과의 유효성은 순시적인 예측 값보다는 전체적인 경향성에 근거하여 판단할 수 있다. 이러한 관점에서 Fig. 5의 해석 결과가 화재의 특성을 적절히 따르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 $P_{inj} = 1.0$ MPa의 경우에 대해서 화원 표면 상부 5 cm와 45 cm의 위치에서 온도 변화에 대한 실험 [6] 및 수치해석 결과를 나타내고 있다. 실험 결과를 보면 앞선 $P_{inj} = 0.4$ MPa의 경우와 달리 미세물분무 분사 이후에 급격한 온도의 감소를 나타내고 있다. 화재는 미세물분무 분사 이후 수초 만에 완전히 소화되었으며 [6] 화원 상부의 온도도 이러한 결과를 반영하고 있다. FDS 해석 결과의 경우도 이러한 화재 제압의 경향을 잘 반영하고 있다. 다만 해석 결과의 경우 실험 결과에 비해 온도 변화가 좀 더 급격하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이것은 해석의 오류이기 보다는 Beihua 등 [6]의 설명과 같이 측정에 사용된 열전대의 냉각 시간에 따른 반응 지연의 결과로 생각할 수 있다. 즉, Beihua 등 [6]이 육안으로 관찰한 화재의 소화는 수초 내에 진행되었으나 미세물분무 분사 이전에 달궈진 열전대 접합부의 냉각은 주변 기상의 온도 감소에 비해 많은 시간이 소요되기 때문이다. 이러한 점을 고려할 때, 본 연구에서 사용한 FDS 모델링이 미세물분무에 의한 화재 제압과정의 해석에 매우 유효적절하다고 판단할 수 있겠다.



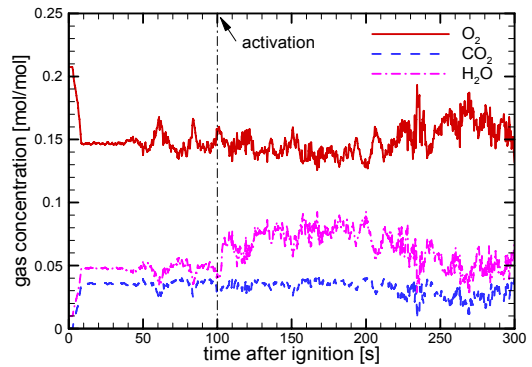
[Fig. 6] Comparison between prediction and experimental data[6] for the temperature variation at local detecting points for $P_{inj} = 1.0$ MPa case.



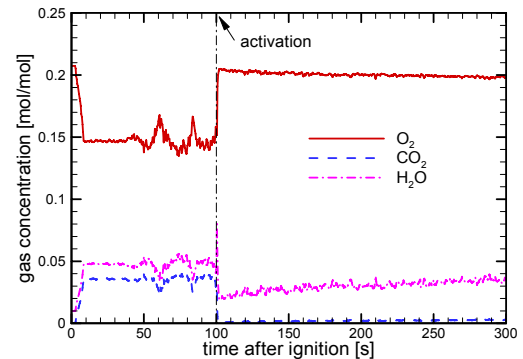
[Fig. 7] Predicted thermal-flow fields averaged during 30 seconds after water-mist activation.

3.3 화재 결과 분석

Fig. 7은 미세물분무 작동 이후의 열유동장에 대한 예측 결과를 보여주고 있다. 온도장은 시각적 편의를 위한 25 °C 이상에 대해서만 나타내었다. 화원 상부 1.0 m에 위치한 노즐로부터 분사된 미세물분무의 영향으로 강한 기상 유동이 발생하게 되며 이러한 유동이 화원면에 직접적인 영향을 주며 화재를 제압하고 있다. 노즐 하부의 온도는 25 °C 이하의 상온으로 예측되었으며 미세물분무의 직접적인 영향으로 아직 열이 남아있는 연소가스가 외부로 밀려나는 형태를 확인할 수 있다. 이렇게 밀려난 연소가스는 미세물분무 외곽을 통해 상승하여 천정면에 이르러 일부는 배기구를 통해 배출되는 결과를 보여주었다.



(a) for $P_{inj} = 0.4$ MPa case



(b) for $P_{inj} = 1.0$ MPa case

[Fig. 8] Comparison of predicted gaseous species concentrations at local point of 45 cm above the fuel surface between (a) $P_{inj} = 0.4$ MPa and (b) $P_{inj} = 1.0$ MPa cases.

Fig. 8은 $P_{inj} = 0.4$ 와 1.0 MPa의 경우에 대해서 화원 상부 45 cm에서 계산된 가스 성분의 농도 변화를 보여주고 있다. Fig. 8(a)의 경우 Fig. 5의 온도 결과와 유사하게 미세물분무 분사 이후에도 화재가 지속되어 산소 및 이산화탄소의 농도 변화가 크지 않은 모습을 보이고 있다. 분사 이후에 수증기의 농도가 증가하는 것은 물분무 액적의 증발에 따른 것으로 판단할 수 있다. Fig. 8(b)를 보면 미세물분무 분사 이후에 산소의 농도가 약 20 %까지 회복되고 있으며 이산화탄소의 발생은 거의 없어지는 모습을 보인다. 이것은 미세물분무의 분사로 화재가 제압되어 연소 반응이 거의 발생하지 않고 있음을 보여준다. 분사 이후 연소반응이 발생하지 않는 상황에서도 수증기의 농도가 일정 수준에서 유지되고 있는데 이는 공간에 남아있는 열기에 의한 증발의 결과로 생각된다. Fig. 8에

나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 FDS 모델링이 미세물분무의 작동에 의한 화재 제압 특성과 가스농도 예측에 있어 유용한 결과를 제공할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 미세물분무를 이용한 화재 제압과정에 대한 FDS 해석의 유효성을 판단하기 위한 화재 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 미세물분무 거동의 예측에 있어 초기 분무 조건이 중요한 영향을 미친다. 초기액적분포를 결정하는 확률밀도 함수의 조정을 통해 하부 위치에서의 분무 특성을 적절하게 예측할 수 있었다. 그러나 분무 특성에 대한 정보가 없는 경우 큰 오차가 발생할 수 있으며 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.
2. 미세물분무 작동에 따른 온도 변화와 화재 제압 과정에 대한 실험 결과[6]와의 좋은 일치를 바탕으로 본 연구에서 설정한 FDS 모델링과 초기액적분포의 유효성을 검증할 수 있었다.
3. FDS 해석을 통해 미세물분무 작동 조건에 따른 온도 및 속도장, 농도 변화 등에 대한 상세한 데이터를 얻을 수 있었으며 이를 바탕으로 화재 거동 및 미세물분무 작동 특성 예측에 있어 유용한 정보를 얻을 수 있었다.

References

[1] G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, "Fire Suppression by Water Sprays", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, pp. 79-130, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00012-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00012-X)

[2] C. C. Ndubizu, R. Ananth, P. A. Tatem, V. Motevalli, "On Water Mist Fire Suppression Mechanisms in a Gaseous Diffusion Flame", Fire Safety Journal, Vol. 31, pp. 253-276, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112\(98\)00007-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(98)00007-1)

[3] G. G. Back, B. Lattimer, C. L. Beyler, P. J. DiNenno, R. L. Hansen, "Full-Scale Testing of Water Mist Fire Suppression Systems for Small Machinery Spaces and

Spaces with Combustible Boundaries", USCG Report No. CG-D-21-99, 1999.

[4] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1106/3VE8-WWT4-C3U4-FEH9>

[5] W. K. Chow and B. Yao, "Numerical Modeling for Interaction of Water Spray with Smoke Layer", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 39, pp. 267-283, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/104077801300006580>

[6] C. Beihua, L. Guangxuan, H. Zhen, "Extinction Limit of Diesel Pool Fires Suppressed by Water Mist", Journal of Fire Sciences, Vol. 27, pp. 5-26, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734904108095337>

[7] M. B. Kim, Y. J. Jang, M. O. Yoon, "Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist", Fire Safety Journal, Vol. 28, pp. 295-306, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112\(97\)00011-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(97)00011-8)

[8] S. C. Kim, H. S. Ryou, "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Characteristics Using a Water Mist in an Enclosure", Building and Environment, Vol. 38, pp. 1309-1316, 2003
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00134-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00134-3)

[9] K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, H. R. Baum, R. G. Rehm, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide", NIST SP 1018-5, NIST, 2007.

고 권 현(Gwon Hyun Ko)

[정회원]



- 2000년 8월 : 중앙대학교 대학원 기계공학부 (공학석사)
- 2004년 8월 : 중앙대학교 대학원 기계공학부 (공학박사)
- 2008년 6월 ~ 2010년 2월 : 중앙대학교 BK21 연구교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 동양대학교 건축소방행정학과 조교수

<관심분야>

전산유체역학, 소방방재공학, 소방기계설비