

물분무에 의한 화재제어 특성에 관한 연구

김 성 찬, 유 홍 선**

중앙대학교 대학원, *중앙대학교 기계공학부

A Study on the Fire Suppression Characteristics Using a Water Mist

Sung Chan Kim, Hong Sun Ryou**

Graduate School of Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received November 25, 2002; revision received February 26, 2003)

ABSTRACT: The present study investigates the fire suppression characteristics using a water mist fire suppression system. Numerical simulations of fire suppression with water mist are performed with considering the interaction of fire plume and water droplet, droplet evaporation, and combustion of pool fire. The predicted temperature fields of smoke layer are compared with that of measured data. Numerical results agree with the experimental results within 5°C in the case without water mist. In the case of fire suppression with water mist, numerical results dose not predict well for temperature field in the gradual cooling region after water mist injection. But the predicted results of initial fire suppression are in good agreement with that of measured data. The reason of the discrepancy between predicted and measured data is due to the variation of burning rate during the injection of water mist. The effect of burning rate on the fire suppression is left as future study.

Key words: Water mist(물분무), Compartment fire(구획화재), Fire suppression(화재제어), Numerical simulation(수치해석)

기 호 설 명

A_f : 화원의 면적 [m^2]	ΔH_C : 연소열 [kJ/kg]
C_D : 항력계수	m_d : 액적질량 [kg]
$c_{p,w}$: 물의 비열 [kJ/kgK]	\dot{m}_f : 연료증발률 [kg/m ² s]
D_b : 화원의 한 변의 길이 [m]	Nu : Nusselt 수
F : 누적체적분율	Pr : Prandtl 수
g : 중력가속도 [m/s ²]	Q : 발열량 [kW]
h : 열전달계수 [W/m ² K]	r_d : 액적반경[m]
h_v : 증발열 [kJ/kg]	Re : Reynolds 수
	Sh : Sherwood 수
	Sc : Schmidt 수
	T : 온도 [K]
	u : 속도벡터 [m/s]
	Y : 질량분율

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5280; fax: +82-2-813-3669

E-mail address: cfdmcc@cau.ac.kr

그리스 문자

Γ	: 확산계수
η	: 연소효율
μ	: 점성계수 [kg/ms]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]

하첨자

d	: 액적
f	: 연료
g	: 기상
m	: 평균

1. 서 론

일반적으로 화재억제에 이용되는 수계소화설비는 환경 친화적이고 경제적이며 시스템의 구성이 비교적 간단하기 때문에 많은 분야의 소화방재도 구로써 활용되고 있다. 이러한 대부분의 수계소화설비는 가압장치를 이용하여 물을 가압한 후 노즐을 통해 분사하여 화염 및 연층의 냉각이나 증발된 액적으로 인한 산소차단 및 액적의 복사열 차단 등 다양한 효과로 인하여 화재를 억제하게 된다. 이러한 수계소화설비는 분사되는 액적의 크기에 따라 소화기구(fire suppression mechanism)의 효과가 달라지게 되고 적용 분야 또한 차이를 보이게 된다. 화재소화시스템에 이용되는 분무액적의 크기는 약 100~1000 μm 범위의 액적을 이용한다.⁽¹⁾ 스프링 쿨러와 같이 주로 화염의 냉각에 의해 화재를 억제하는 경우의 액적의 크기는 상대적으로 크고 water mist와 같이 주로 액적증발에 의한 질식효과를 기대하는 경우의 상대적으로 작은 크기의 액적이 효과적이다. 그러나 액적의 크기가 상대적으로 큰 경우 분무액적으로 인한 수손의 우려가 크고 소화시 많은 양의 물 소모로 인한 환경오염의 우려가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 가스계 할론 등과 같은 가스계 소화설비가 이용되었으나 최근 환경오염에 따른 사용제한으로 인하여 미세한 크기의 액적을 생성하여 화재를 제어하는 water mist 시스템에 대한 관심 및 연구가 활발히 진행 중이다. Water mist에 대한 연구로는 미국의 USCG(United States

Coast Guard)에서 실시한 선박의 엔진룸 크기의 공간에 대하여 다양한 상용 water mist 시스템 및 배기조건에 대하여 각 시스템의 소화성능을 시험하였다.⁽²⁾ Downie 등은 메탄 확산화염에 대하여 단일 물분무 노즐을 이용하여 화염과 물분무와의 상호작용시의 플럼 영역의 온도 및 가스 농도의 영향을 파악하였다.⁽³⁾ 김명배 등은 가솔린 풀화재시 water mist의 분사로 인한 유입공기의 증가가 화염의 연소율을 증가시키며 임계압력 및 임계유효유량에 대한 소화한계를 설정하였으며 화염냉각에 의한 소화효과가 지배적임을 제시하였다.⁽⁴⁾ 그러나 노즐과 화원 사이의 거리가 짧고 화원의 크기가 상대적으로 작기 때문에 실제 화재 공간에 대한 소화 특성으로 적용되기에는 다소 무리가 있다. 한편 최근 들어 다양한 수치해석 기법의 발달로 인하여 water mist에 의한 화재억제효과를 수치해석적 기법을 이용한 연구가 진행되고 있다. Hua et al.⁽⁵⁾은 분무액적의 유동, 연소, 열 및 물질전달을 고려하여 분무패턴, 분무액적의 크기 및 분사량과 같은 변수에 대하여 화재진압의 효과를 수치해석적으로 파악하였다. 그러나 수치해석에 의한 정성적인 결과만을 파악하였으며 실험결과에 대한 정량적인 비교가 부족하였다. 이상의 연구동향에서 보는 바와 같이 water mist에 의한 화재억제 실험은 주로 몇몇 연구소를 제외하고는 실험실 규모의 후드에서 소화기구를 파악하고 있으며 수치해석적 접근 또한 실험결과와의 비교를 통하여 결과의 타당성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 water mist에 의한 화재소화 특성해석을 위한 선행과제로 실험에 의해 물분무에 의한 화재억제효과를 파악하고 이를 기존에 알려진 수치해석적 방법에 의해 얻어진 결과를 비교함으로써 수치해석의 타당성 및 문제점을 고찰하고자 한다. 이러한 과정을 통하여 화재 유동장에 대한 수치해석의 적용성 및 문제해결을 위한 기본적인 자료로써 활용될 수 있다.

2. 실험 및 수치해석

2.1 실험

화재공간은 길이 4m, 폭 4m, 높이 2.3m의 강철로 된 밀폐공간으로 상부는 후드형태로 제작하

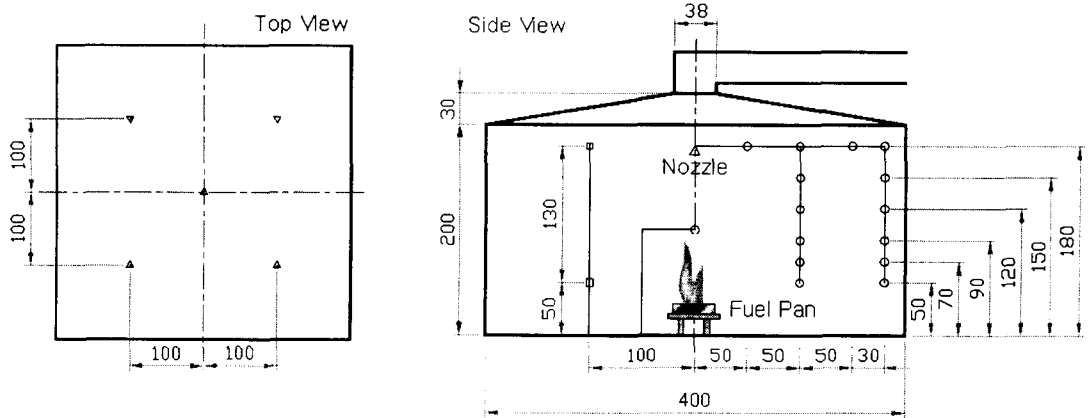


Fig. 1 A Schematic of the experimental setup (unit: cm).

Table 1 Heat release rate of Methanol fire

Pool size [m]	Heat release rate [kW]
0.3×0.3 ($D_p=0.3$)	22.89
0.4×0.4 ($D_p=0.4$)	32.57

여 실험 후 연소가스와 물분무 입자를 배기팬에 의해 외부로 배출할 수 있도록 제작하였으며 실험 동안은 상부후드의 입구를 폐쇄하여 기밀을 유지하였다. 상부연층의 온도를 파악하기 위하여 중앙을 기준으로 0.5m 간격으로 천장부에 K-type 열전대를 설치하였고 연층의 수직 온도분포는 화원에서 각각 1.0m와 1.8m 떨어진 두 위치의 수직 열전대에 의해서 측정하였다. 전체적인 실험 장치의 상세도는 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 화원은 한 번의 길이가 0.3m ($D_p=0.3$)인 정사각형 화원과 0.4m ($D_p=0.4$)인 정사각형 화원으로 높이는 0.05m이다. 사용한 연료는 메탄올(CH_3OH)을 이용하였으며 사용된 연료의 양은 두 가지 화원 모두 전체 화원체적의 40% 정도로서 약 15분 이상 연소 가능한 양이다. 메탄올의 증발량은 물분무가 없는 상태에서 화원 아래에 설치된 load cell을 이용하여 측정하였다. 발열량은 다음 식에 의해 산정하였으며,⁽⁶⁾ 증발된 연료가 완전연소되는 것은 아니므로 연소효율($\eta=0.7$)을 고려하였다. 각 화원의 발열량은 Table 1과 같다.

$$Q = \eta \dot{m}_f \Delta H_C A_f \quad (1)$$

메탄올 화원의 경우 물분무에 의해 연료의 희

Table 2 Specifications of the tested nozzle

Sauter mean diameter (SMD)	121 μ m
Spray angle	Outer : 90° Inner : 70°
Operating pressure	13 bar
K-factor	1.66
Spray pattern	Hollow cone type

석효과가 발생할 수 있으나 본연구에서 이용된 분무노즐은 hollow cone type의 노즐로써 노즐의 수직 하방향에서의 유량분포가 상대적으로 적고 분사압력이 중저압이며 액적의 크기가 120 μ m 정도이기 때문에 상대적으로 큰 화원에서 발생하는 상승부력에 의해 분무액적이 직접 부력 plume 및 화염을 통과하여 fuel pan으로 도달되는 양은 극히 미소하며 이에 대한 영향은 무시하였다. Water mist 노즐은 바닥에서 1.8m 높이에 5개를 설치하였다. 사용된 분무노즐은 본연구를 통해 개발된 압력형 와류노즐로서 개략적인 분무 특성은 Table 2와 같다. 물분무의 작동조건은 천장에 설치된 열전대의 온도가 85°C가 될 때 펌프를 가동하여 water mist 시스템이 작동하도록 설정하였다.

2.2 수치해석

화재발생과 water mist에 의한 열유동장을 해석하기 위하여 사용된 수치해석 코드는 미국의 NIST에서 개발중인 FDS 2.0을 기본으로 하였다.⁽⁷⁾ FDS 2.0은 LES/DNS 해석이 가능하나 DNS 해석의 경우 지나치게 많은 격자수를 요구하고

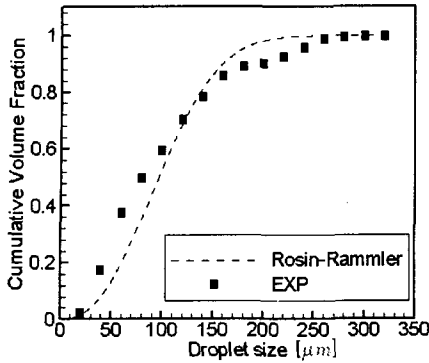


Fig. 2 Cumulative volume fraction of the droplet size.

연소모델 또한 one-step chemical reaction model로 제한되기 때문에 본 연구에서는 상대적으로 격자수가 적고 적용범위가 폭넓은 LES 난류 모델을 적용하였다. 연소모델은 mixture fraction model을 이용하였으며 FVM에 의해 복사열전달 방정식을 해석하였다. 벽과 연층과의 열전달을 고려하기 위하여 벽면에 대하여 1차원 전도방정식을 해석하여 벽면으로의 열손실을 고려하였다. 분사되는 초기 액적의 크기분포는 Fig. 2와 같이 실험에서 영상처리기술(image processing technique)을 이용하여 측정된 액적크기분포와 비교하여 비교적 정확한 분포를 예측한 Rosin-Rammler 분포를 이용하였으며 분포함수는 다음과 같다.

$$F(d) = 1 - e^{-0.693(d/d_m)^\gamma} \quad (2)$$

여기서 γ 는 실험상수로써 2.4를 이용하였다.⁽⁷⁾ 기상과 분무액적과의 유동해석은 Eulerian-Lagrangian 방법을 적용하였으며 분무액적의 거동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| \quad (3)$$

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

$$Re = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| D_d}{\mu_g}$$

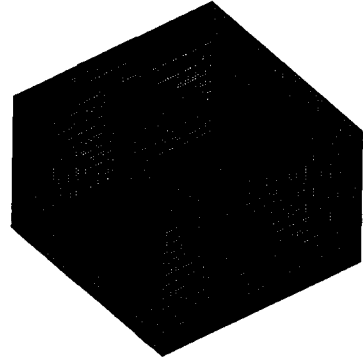


Fig. 3 Grid system of fire compartment.

기상과 액적 사이의 열 및 물질전달에 관한 식은 Ranz and Marshall 식을 이용하였다.⁽⁸⁻⁹⁾

$$m_d C_{p,w} \frac{dT_d}{dt} = h_d A_d (T_g - T_d) + \frac{dm_d}{dt} h_v \quad (4)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d Sh \rho D (Y_d - Y_g) \quad (5)$$

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$h_d = \frac{Nu \cdot k}{D_d}$$

수치해석에 이용된 격자계는 직교격자계로 상부 후드부의 경사면은 계단식 격자를 이용하여 표현하였으며 계산에 이용된 격자수는 약 340,000개이며 전체 계산격자계는 Fig. 3과 같다. 실제 화재 공간은 틈새 등으로 인하여 공간 내부의 완전한 밀폐성을 유지하지 못하지만 수치해석에서는 이러한 틈새영향을 무시하였다. 화재발생 이후 600 초까지 계산하는 데 걸린시간은 Pentium-IV 1.7 GHz를 이용하여 30시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단독화재에 대한 타당성 검증

Water mist에 의한 화재 수치해석을 수행하기에 앞서 화재 유동장에 대한 정확성을 평가하였다. Fig. 4는 Water mist가 없는 경우 화재에 대

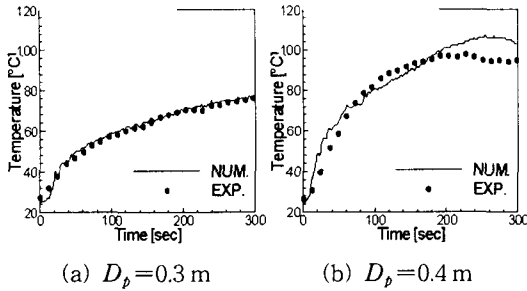


Fig. 4 Comparison of ceiling mean temperature.

하여 실험에서 측정된 위치 ($R=0.5, 1.0, 1.5, 1.8$ m)의 평균 온도분포와 수치해석에서 계산된 결과를 비교하였다. 그림과 같이 0.3m 화원에 대한 연층의 평균 온도는 매우 정확한 결과를 예측했다. 그러나 실제 각부분의 온도는 화원에 가까운 부분($R=0.5$ m)에서의 온도는 실험결과가 다소 높았고 벽근처($R=1.8$ m)에서는 수치해석결과가 다소 높게 나타났다. 그러나 천정부에 대해서 평균한 온도분포는 실험결과와 5°C 미만의 오차를 보이고 있다. 한편 0.4m 화원의 경우 화재발생 이후 200s 정도까지는 5°C 미만의 오차를 보이며 비교적 정확한 예측을 하고 있으나 후반부로 갈수록 약 10°C 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 화원이 상대적으로 크기 때문에 공간 내부의 연층의 하강이 빠르고 화원으로 유입되는 산소의 양이 감소하여 연소효율이 상대적으로 둔화되기 때문에 연층의 온도는 거의 일정해지는 것으로 사료된다. 그러나 수치해석에서는 이러한 영향이 고려되지 못하고 초기상태와 동일한 연소상태가 지속되기 때문에 천정의 온도분포가 다소 상향예측하는 것으로 사료된다. Fig.5는 화재발생 후 100초와 200초일 때 화원에서 1m 떨어진 위치에

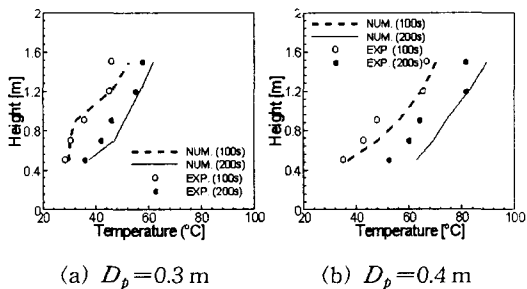


Fig. 5 Comparison of vertical temperature at 1 m from the fire source.

서 높이방향으로의 온도분포 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 실험결과와 수치해석결과가 잘 일치하고 있으나 0.4m 화원에 대하여 200초의 온도분포는 최대 약 10°C 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같은 요인과 상대적으로 큰 화원에 의해 발생하는 연소현상에 대한 연소모델의 오차에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

3.2 물분무에 의한 화재제어

Fig.6은 water mist 작동 후 30초 후의 유동장과 온도장을 보여주고 있다. 초기 발화에 의해 형성된 상승 플럼과 연층은 분무노즐에서 분사된 water mist에 의해 냉각되고 고온의 플럼영역은 화염부에서만 국부적으로 제한되게 된다. 전체 유동장은 화염에 의해 상승되는 유동이 제한되고 분사된 water mist에 의해 발생하는 하방향 유동이 화염부를 지배하게 된다. Fig.7은 화원에서 1m와 1.8m 떨어진 천정에서의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 발화에 의해 연층의 온도는 상승하고 water mist 작동에 의해 연층의 온도는 급격히 하강하게 된다.

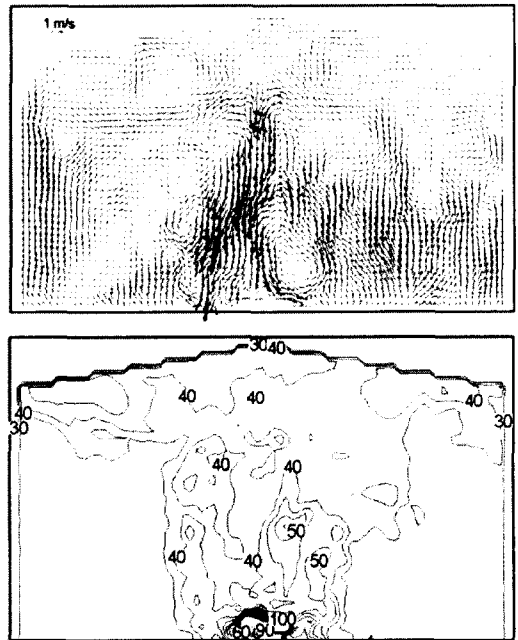
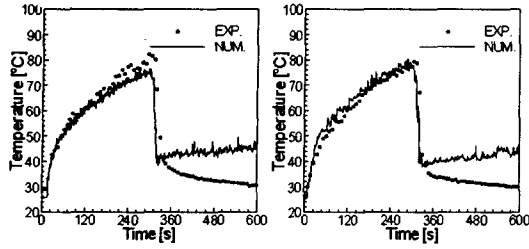
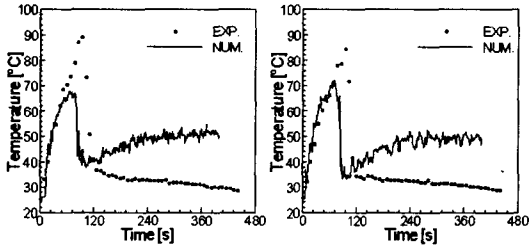


Fig. 6 Velocity and temperature field at 30 sec after mist injection.



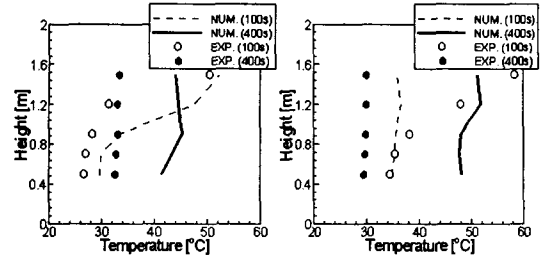
(a) $D_p=0.3$ m, $R=1.0$ m (b) $D_p=0.3$ m, $R=1.8$ m



(c) $D_p=0.4$ m, $R=1.0$ m (d) $D_p=0.4$ m, $R=1.8$ m

Fig. 7 Comparison of ceiling temperature with water mist.

이후 연층의 온도는 점진적인 하강을 보이게 되는데 수치해석의 결과는 급격한 연층 냉각 이후 계속되는 연소로 인해 연층의 온도가 지속적으로 유지되고 있음을 보여준다. 수치해석결과는 화원의 크기가 상대적으로 큰 0.4m 화원에 대하여 실험결과에 비해 다소 하향 예측을 하고 있는데 이는 상대적으로 큰 화원의 경우 난류에 의한 영향이나 연소모델의 부정확성 등으로 인해 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 전체적인 경향은 실험치와 비교적 잘 일치하고 있다. 한편 시간에 따른 연층의 온도변화에 대한 수치해석결과가 water mist 작동 이후 초기 냉각에 대한 연층의 온도는 비교적 타당한 예측을 하고 있으나 이후 온도분포는 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 오차는 water mist 분사로 인하여 화염으로 유입되는 공기의 양이 증가하고 이로 인하여 연소량이 증가하는 데 반해 수치해석에서는 이러한 연소량의 변화를 적절하게 예측하지 못함으로써 발생하는 것으로 사료된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 분사유량에 따라 화염의 성장 혹은 억제 예측할 수 있는 수치해석 모델이 요구된다. 이러한 차이는 연층의 수직 온도분포에서 좀더 명확하게 나타나는데 Fig. 8은 초기 발화 이후 100초와 400초일 때 화원에서 1.0 m 떨어진 위치에서의 수직 온도분포를 보이고



(a) $D_p=0.3$ m (b) $D_p=0.4$ m

Fig. 8 Vertical temperature profile.

있다. 그림에서 보는 바와 같이 water mist 작동으로 인하여 상부연층과 하층부 공기와의 혼합에 의해 전체적인 화재실 상하부의 온도분포는 분사시간이 증가할수록 균일해지게 된다. 실험의 경우 분사시간이 증가함에 따라 전체적인 온도분포는 하강하게 되지만 수치해석의 경우 오히려 상승하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과에서 알 수 있듯이 water mist 작동시의 화원의 변화에 대한 예측뿐만이 아니라 분무액적과 연층과의 열전달에 관한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 water mist에 의한 화재억제효과 및 연층의 연전달 효과를 실험 및 수치해석적으로 파악하였으며 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) Water mist가 없는 경우에 대한 수치해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였으며 연층 온도의 경우 실험값과 5°C 미만의 오차를 보였다.
- (2) Water mist에 의한 연층의 냉각은 초기 급속냉각 이후 점진적인 연층의 냉각이 이루어지며 수치해석결과는 초기 급속냉각을 비교적 잘 예측하지만 점진적인 연층의 냉각은 잘 예측하지 못했다.
- (3) 수치해석시 water mist의 분사로 인한 연소율의 변화를 적절히 모사할 수 있는 모델의 적용이 요구되며 차후 실험을 통해 이러한 현상을 모델링하여 수치해석을 수행할 경우 보다 나은 결과를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 물분무 작동에 의해 연층의 온도는 급격히 하강하고 화재실 내부에는 강한 난류혼합 및 냉각효과에 의해 상층부와 하층부의 온도는 거의

차이가 나지 않게 된다.

(5) 물분무 화재제어 시스템은 직접적인 화재 소화가 가능하고 화원의 성장을 차단하여 피난시간을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 화재실 내부의 온도를 하강시켜 화재공간 내부의 열에 의한 피해를 최소화할 수 있으며 향후 지속적인 연구를 통하여 소방관련 법규 및 소화설비 개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M10113000012-01A2-90000600) 지원으로 수행되었으며 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. Grant, G., Brenton, J. and Drysdale, D., 2000, Fire suppression by water sprays, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp. 79-130.
2. Back, G., Lattimer, B., Beyler, C., DiNenno, P. and Hansen, B., 1999, Full-Scale Testing of Water Mist Fire Suppression Systems for Small Machinery Spces and Spaces with Combustible Boundaries - Volume I and II, USCG R&D Center, Report No. CG-D-21-99-1.
3. Downie, B., Polymeropoulos, C. and Gogos, G., 1995, Interaction of a Water Mist with Buoyant Methane Diffusion Flame, *Fire Safety Journal*, Vol. 24, pp. 359-381.
4. Kim, M.B., Jang, Y. J. and Yoon, M. O., 1997, Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist, *Fire Safety Journal*, Vol. 29, pp. 295-306.
5. Hua, J., Kumar, K., Khoo, B.C. and Xue, H., 2002, A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume, *Fire Safety Journal*, Vol. 37, pp. 631-657.
6. Quintiere, J.G., 1997, *Principles of Fire Behavior*, Delmar Publishers.
7. *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide*, 2000, NIST, U.S.A.
8. Ranz, W.E. and Marshall, Jr. W. R., 1952, Evaporating from drops, Part I, *Cham. Eng. Prog.*, Vol. 48, pp. 141-146.
9. Ranz, W.E. and Marshall, Jr. W. R., 1952, Evaporating from drops, Part II, *Cham. Eng. Prog.*, Vol. 48, pp. 173-180.
10. Kim, M. B., Jang, Y. J. and Kim, J. K., 1996, Burning Rate of Pool Fire with Downward-directed Sprays, *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 37-48.