

노즐 특성 변화에 따른 미분무수와 화염과의 상호작용에 관한 수치해석

배강열[†]·정희택*·김형범*

Numerical Analysis on Interaction between Fire Flame and Water Mist according to the Variation of Nozzle Performance

Kang-Youl Bae, Hee-Taeg Chung and Hyoung-Bum Kim

Key Words: Water Mist(미분무수), Fire Flame(화염), Nozzle Performance(노즐특성), Droplet Size(입자크기), Spray Velocity(분사속도), Fire Suppression(화제억제)

Abstract

In the present study, the numerical investigation on the effects of water-mist characteristics has been carried out for the fire suppression mechanism. The FDS are used to simulate the interaction of fire plume and water mists, and program describes the fire-driven flows using LES turbulence model, the mixture fraction combustion model, the finite volume method of radiation transport for a non-scattering gray gas, and conjugate heat transfer between wall and gas flow. The numerical model is consisted of a rectangular enclosure of $L \times W \times H = 1.5 \times 1.5 \times 2.0$ m and a water mist nozzle that be installed 1.8m from fire pool. In the study, the parameters of nozzle for simulation are the droplet size and the spray velocity. Finally, the droplet size influences to fire flume on fire suppression than spray velocity because of the effect of terminal velocity, and the optimal condition for fire suppression is that the droplet size and the spray velocity are $100\mu\text{m}$ and 20m/s , respectively.

기호설명

$c_{p,w}$: 물의 비열
 d : 미분무수 직경
 D : 노즐의 오리피스 직경
 m_d : 미분무수 질량
 Nu : Nusselt 수
 P : 노즐의 작동 압력
 Pr : Prandtl 수
 r_d : 미분무수의 반지름
 Re : Reynolds 수

Sh : Sherwood 수
 T_d : 미분무수의 온도
 T_g : 가스의 온도
 V : 미분무수의 분사 속도
 V_T : 종단속도
 Y_d : 수증기의 질량분율
 Y_g : 가스의 증기 질량분율
 Γ : 공기 중 수증기의 확산계수
 ρ : 가스의 밀도

1. 서론

스프링클러와 같은 수계소화설비는 화재를 진화하고 제어하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있으며, 아직까지 믿음직한 화재억제(fire suppression) 수단이고 가장 효과적인 것 중의 하나이다. 그러나, 현실적으로 물분사에 의해 전기

[†] 회원, 경상대학교 항공기부품기술연구소
E-mail : kybae@gnu.ac.kr
TEL : (055)751-6691 FAX : (055)758-3468
* 경상대학교 기계항공공학부

적인 응용품들을 포함한 화재의 진화와, 항공기 및 선박의 기계실등과 같이 물 공급이 한정된 곳에는 할론 1310과 할론 1211 등 CFC 계통의 소화약제가 1960년대 말에 개발되어 최근까지 유류 화재와 전기화재 등의 화재진압에 사용하고 있다. 이러한 CFC 계통의 소화약제는 환경오염물질을 내포하고 있으며, 지구 온난화지수와 오존파괴지수가 높아 세계 각국은 몬트리올 의정서를 통하여 할론 소화설비의 단계적 철수 및 사용 중단을 결정하였다.

현재 주로 사용되고 있는 스프링클러(sprinkler)는 액적의 크기가 크기 때문에 유류화재에 부적합하고, 일반 화재 시 다량의 물을 사용하기 때문에 소화 후 물에 의한 2차 재해를 가중시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 이러한 스프링클러의 단점을 보완하기 위하여 현재 분무수를 이용한 소화에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

최근의 연구결과로 김성찬등은⁽¹⁻²⁾ 밀폐된 공간에 다중의 미분무수 노즐을 설치하여 분무각이 화재실내부의 온도분포에 미치는 영향에 대해 실험과 수치해석을 비교하였으며, 분무각이 증가함에 따라 화재실내부의 평균온도가 감소함을 보였고 수치해석에 이용한 FDS 모델은 온도장에 대해서 비교적 타당한 결론을 얻었다. 김호영등은⁽³⁾ 개방공간에서 단일노즐을 이용하여 실험을 진행한 결과 노즐의 높은 분사압력과 적은 액적크기가 소화를 증대시키며 개방공간에서의 산소차단 효과는 매우 미미한 것으로 보고하였다. 김명배등은⁽⁴⁻⁶⁾ 실험을 통하여 효율적인 소화를 위해서 미분무수는 일정한 크기를 가지고 있어야 하며, 노즐의 높이와 압력변화에 따른 소화한계를 제시하였다. Hua등은⁽⁷⁾ 개방공간에서의 수치해석을 통하여 hollow cone 형태의 노즐보다 solid cone 형태의 노즐이 더욱더 빠른 시간에 소화가 진행되며 소화시간에 따른 미분무수의 유량과의 상관관계를 제시하였다.

위에서 논의된 실험적 연구들은 미분무수의 크기 및 유량이 화염을 소화시키는 것에 중점을 두었으며, 수치해석적 연구들도 화염모사의 알고리즘 개발 및 소화특성에 관한 연구가 대부분으로, 화염과 미분무수사이의 소화 메커니즘(온도변화, 산소농도변화, 복사강도변화, 수증기분포변화)에 대한 논의는 찾아보기 힘들다. 또한 대부분은 연구들은 미분무수에 일정한 분사속도를 고려하였

기 때문에 화염과 미분무수 분사속도의 상호작용에 대해서는 찾아보기 힘들다.

이에 본 연구에서는 수치해석을 통하여 일정한 밀폐공간내에 미분무수의 크기 및 속도변화에 따른 화염과의 상호작용을 소화 메커니즘의 관점에서 연구를 진행하여 각 인자들의 특성을 규명하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 해석모델 및 경계조건

본 수치해석에서 사용된 모델은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 $L \times W \times H = 1.5 \times 1.5 \times 2.0$ m의 직사각형의 형상에 하부벽면의 중앙부분에 0.106×0.106 m의 화원(pool)이 위치하고 있다. 그리고 상부벽면에서 0.2m 아랫부분에 미분무수를 분사하기 위한 노즐을 설정하였으며 노즐과 화원과의 거리는 1.8m로 설정하였다.

미분무수가 분사된 후 화염(fire flame)주위의 온도변화를 관찰하기 위하여 화원의 표면을 포함하여 화원으로부터 0.7m의 간격으로 5개의 열전대를 설정하였으며, 벽면경계조건으로는 외부로의 열의 입출입이 없는 단열조건과 외부와 산소의 입출입이 없는 밀폐공간으로 가정하였다.

Table 1은 수치해석에서 사용된 노즐의 특성과 변수를 나타낸 것이다. 노즐의 선정은 기존의 단일노즐의 연구에서⁽⁸⁾ 사용된 노즐을 선정하였다.

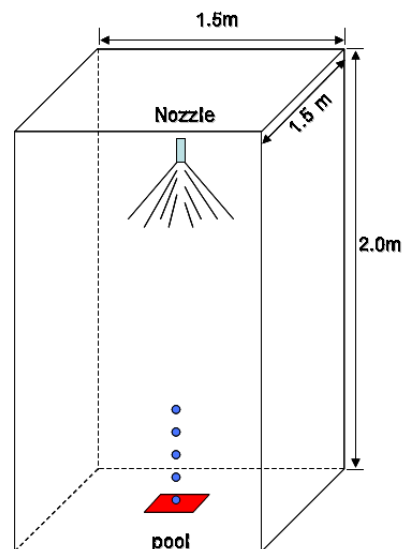


Fig. 1 Schematic diagram for numerical analysis

Table 1 Nozzle parameters used in simulation

Spray pattern	P (kgf/cm ²)	K-factor	Spray angle(°)
Solid cone	3	0.866	51
d (μm)	50, 100, 150, 200, 250, 300		
V (m/s)	5, 10, 15, 20		

미분무수의 크기 및 분사속도는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서⁽⁹⁾ 실험에 의해 제공된 범위를 넘어서지 않는 영역에서 변수의 폭을 설정하였다.

2.2 지배방정식 및 격자계

수치해석은 NIST에서 화재 및 소화의 목적으로 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) ver. 4.07을 사용하였다. FDS에서는 기본적으로 2가지의 연소모델과 난류모델을 제공하고 있다. LES(Large Eddy Simulation)에서는 혼합분율 연소모델(Mixture Fraction Combustion Model)과 DNS(Direct Numerical Simulation)에서는 유한비율반응모델(Finite-Rate Reaction Model)을 제공하고 있는 데, 본 연구에서는 LES와 혼합분율 연소모델을 사용하였다. 노즐로부터 분사된 미분무수의 크기는 로그정규분포(Log-Normal distributions)와 Rosin-Rammler 분포를 이용하였으며, 기상과 미분무수와의 유동해석은 Eulerian- Lagrangian 방법을 적용하였다. 그리고, 기상과 미분무수사이의 열 및 물질전달에 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi r_d Sh \rho D \Gamma (Y_d - Y_g) \quad (1)$$

$$m_d c_{p,w} \frac{dT_d}{dt} = A_d h_d (T_g - T_d) - \frac{dm_d}{dt} h_v \quad (2)$$

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

$$h_d = \frac{Nu k}{2r_d}; Nu = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

본 연구의 해석모델에 사용된 격자계는 직교격자계로 125,000개이며 Fig. 2에 나타내었다. 해석시간은 에탄올의 자연연소(freely combustion) 90초, 미분무수를 분사한 후 90초를 포함하여 총 해석은 180초 동안 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 실험과⁽³⁾ 수치해석결과를 비교한 그래프이다. 온도를 측정된 지점은 실험과 수치해석 모두 화원의 표면으로부터 7cm씩 측정된 결과값을 나타낸 것으로 미분무수를 분사하기 전인 자연연소시간까지의 온도분포는 실험과 수치해석 모두 비슷한 분포형태를 보이고 있어 수치해석이 실험의 결과를 잘 재현하고 있다.

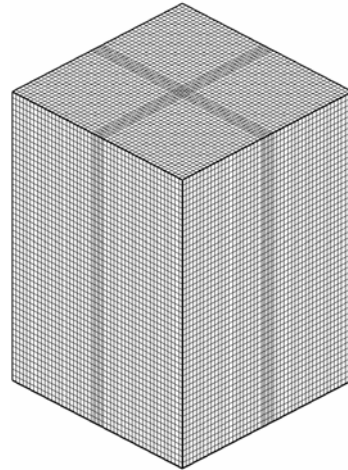
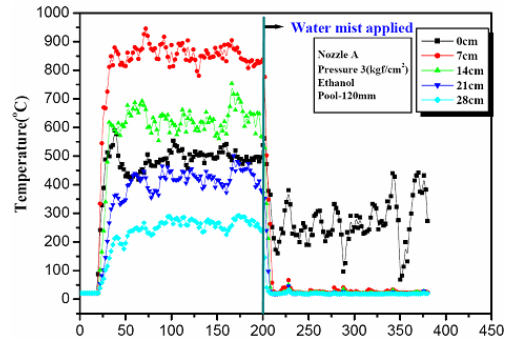
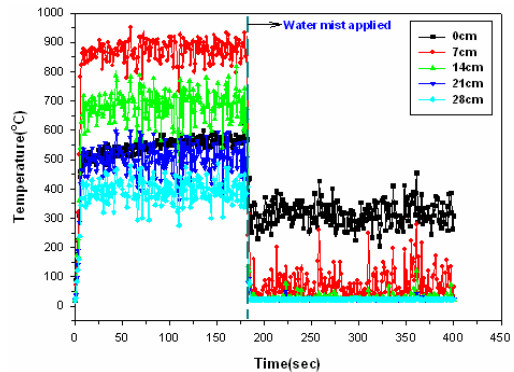


Fig. 2 Grid system for numerical model



(a) experimental result



(b) numerical result

Fig. 3 Comparison of flame temperature between experimental and numerical result

최대온도분포는 화원으로부터 7cm 떨어진 곳에서 실험과 수치해석 모두 800에서 900℃로 매우 잘 일치하며, 특히 화원의 표면의 온도분포는 200에서 300℃의 온도분포를 두 경우 모두 보여주고 있는 것으로 보아 수치해석이 실험을 매우 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

미분무수의 입자크기변화 및 분사속도의 변화에 대한 화염의 평균온도분포는 Fig. 4에서 보여주고 있다. 입자의 크기가 50 μm와 100 μm인 경우가 가장 화제억제효과가 다른 크기에 비하여 뛰어난 성능을 보이고 있는데 이것은 작은 입자의 경우 자연연소에 의해 형성된 온도장과의 상호작용에 의하여 입자가 큰 경우보다 빠른 증발로 인하여 온도장내의 온도를 빠르게 냉각시키기 때문이다. 분사속도의 측면에서는 입자의 크기가 작은 경우 분사속도가 증가하더라도 화제억제에는 큰 효과가 없는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 크기가 큰 경우에는 분사속도가 증가할수록 화제억제의 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

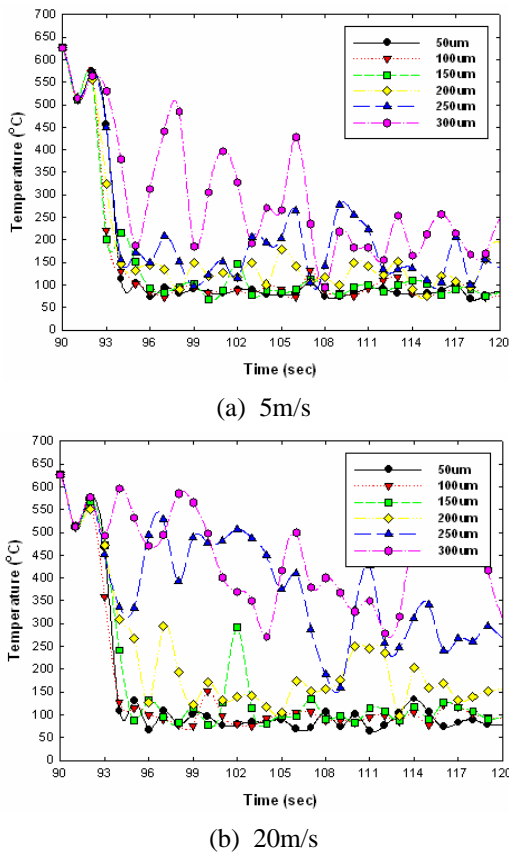


Fig. 4 Mean temperature distributions near fire flame at V=5 and 20m/s

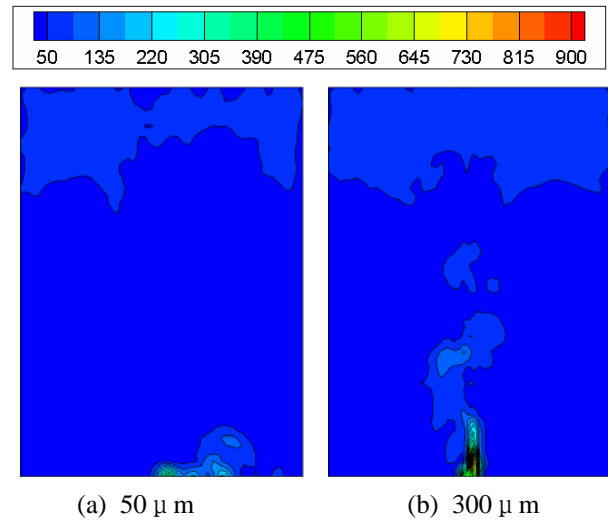


Fig. 5 Temperature contours of center section at V=5m/s, d=50 and 300 μm

Fig. 5는 분사속도가 5m/s인 경우 입자의 크기가 50 μm와 300 μm에 대한 분사 후 6초에 대한 중앙단면에서의 등온선분포결과이다. 입자의 크기가 작은 경우 분사직후 형성된 온도장과의 상호작용으로 인한 증발로 빠른 냉각효과를 보이고 있으나, 입자가 큰 경우에는 작은 경우보다 큰 증발열을 필요로 하기 때문에 화제억제효과는 감소하게 되고 화염의 형태를 불안정하게 만드는 것이다. Fig. 6은 수증기의 분포를 보여주고 있다. 50 μm인 경우 미분무수분사 후 6초 후에는 화원의 중심부에서의 수증기 분포가 300 μm인 경우보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

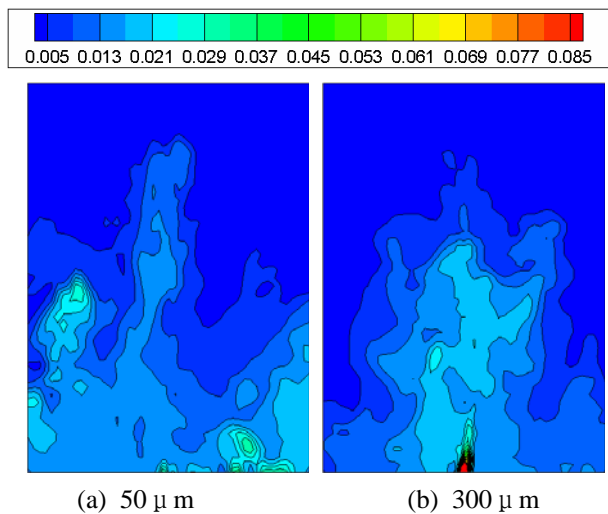


Fig. 6 Water vapor mass fraction of center section at V=5m/s, d=50 and 300 μm

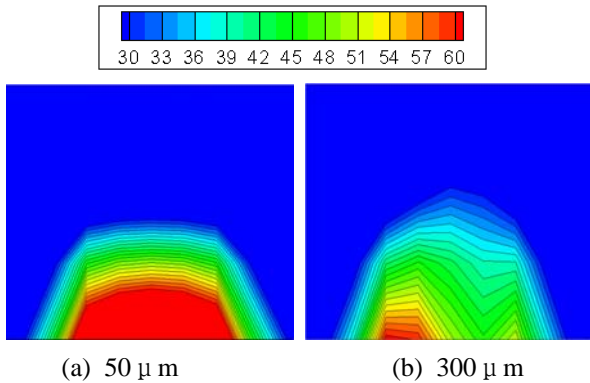


Fig. 7 Radiant intensity of center section at $V=5\text{m/s}$ and $d=50$ and $300\ \mu\text{m}$

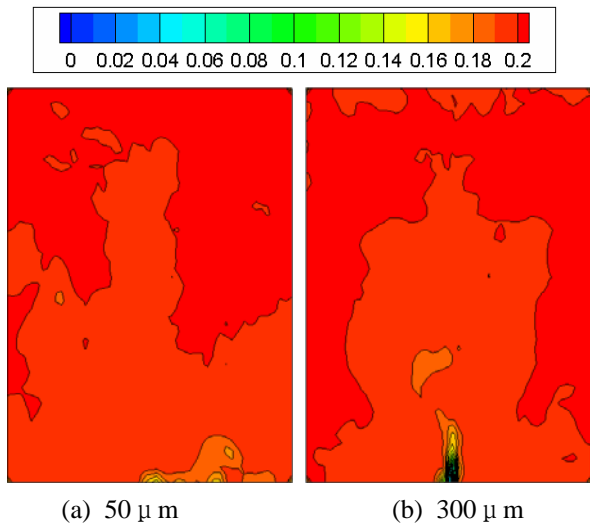


Fig. 8 Oxygen mole fraction of center section at $V=5\text{m/s}$ and $d=50$ and $300\ \mu\text{m}$

이것은 $50\ \mu\text{m}$ 인 경우 초기에 화원근처까지 미분무수에 의해 화제억제가 이루어지기 때문에 수증기의 분포가 높게 나타나게 되지만, $300\ \mu\text{m}$ 인 경우 초기에 미분무수가 화제억제효과가 약하기 때문이다.

Fig. 7은 미분무수 분사 후 복사강도의 형태를 나타낸 것이다. $50\ \mu\text{m}$ 의 경우에는 분사 후 시간이 지날수록 복사강도의 불안정성이 사라지고 전체적으로 안정된 형태를 보여주고 있지만, $300\ \mu\text{m}$ 의 경우에는 시간이 지라더라도 초기의 불안정성이 사라지지 않고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 산소농도분포를 도시한 그림이다. 화염부근에서는 연소에 의하여 산소가 계속 소모되기 때문에 낮은 분포를 보이고 있으며, 화염부근을 제외한 다른 부분에서는 높은 산소농도분포를 보여주고 있다.

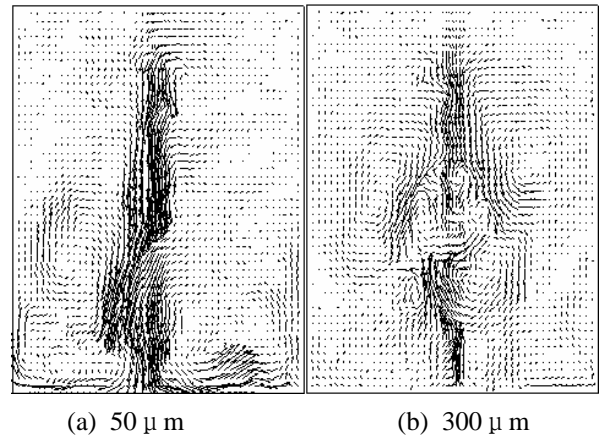


Fig. 9 Velocity vector of center section at $V=5\text{m/s}$, $d=50$ and $300\ \mu\text{m}$

Fig. 9는 시간에 따른 가스상의 속도분포를 보여주고 있다. $50\ \mu\text{m}$ 의 경우에는 화염에 의하여 생성된 부력을 억제하는 효과를 확실하게 볼 수 있지만, $300\ \mu\text{m}$ 의 경우에는 미분무수 분사 후 6초까지도 부력의 억제효과가 제대로 이루어지지 않고 있다.

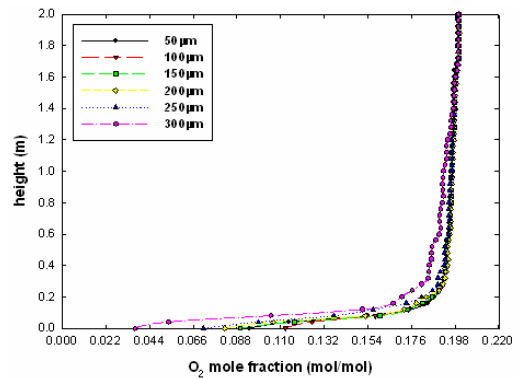


Fig. 10 Mean oxygen mole fraction from 90 to 100sec along center line at center section

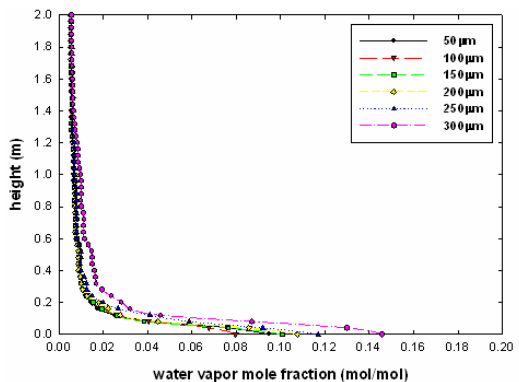


Fig. 11 Mean water vapor mole fraction from 90 to 100sec along center line at center section

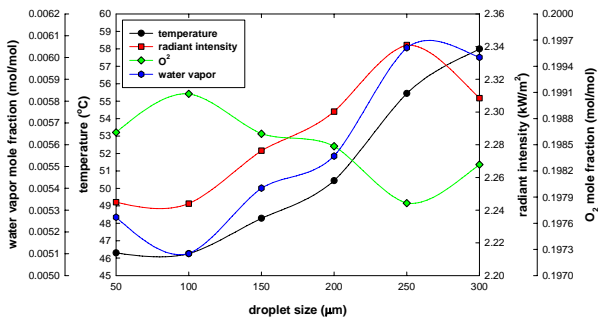


Fig. 12 Mean value of center section from 90 to 100sec

Fig. 10과 11은 미분무수 분사 후 10초까지의 평균값을 단면의 중앙부분(center line)에서 도시한 그림이다. 산소농도분포는 입자의 크기가 작은 경우가 전체적으로 높은 온도분포를 보이고 있어 화제억제효과가 뛰어남을 알 수 있다. 수증기농도분포에서는 입자의 크기가 작은 경우 낮은 분포를 보여주고 있다.

Fig. 12는 미분무수분사 후 10초 동안의 결과값을 단면평균한 값을 나타낸 것이다. 입자의 크기가 커질수록 종단속도에 도달하는 거리가 증가하기 때문에 증발되지 못한 미분무수의 영향으로 복잡한 비선형적인 변화를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 노즐 특성 변화에 따라서 미분무수와 화염과의 상호작용에 관하여 수치해석을 실시하였다. 해석결과 입자의 크기가 작은 경우에는 종단속도와 분사속도에 따른 종단속도에 도달하는 거리가 매우 짧기 때문에 분사속도의 영향이 매우 미미하며, 입자의 크기가 큰 경우에는 미분무수가 빠르게 증발하지 못하기 때문에 전체적으로 화제억제의 효과가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 50 μm의 경우보다 100 μm의 경우가 뛰어난 화제억제 효과를 보이고 있기 때문에 미분무수는 적절한 크기의 입자를 가져야 함을 알 수 있었으며, 본 연구의 범위에서 최적조건은 입자크기 100 μm와 분사속도 20m/s를 도출하였다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단(과제번호 : KRF-2005-

005-J09901) 및 산업자원부 지역산업기술개발사업 “선박용 첨단 수계 소화시스템 개발”의 연구 결과물로서, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, S. C. and Ryou, H. S., 2003, "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression using a Water Mist in an Enclosure," *Building and Environment*, Vol. 38, Issue 11, pp. 1309~1316.
- (2) Kim, S. C. and Ryou, H. S., 2004, "The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire," *Journal of Fire Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 305~323.
- (3) Kim, H. Y., Oh, S. Y. and Chung, J. T., 2004, "Effect of Spray Characteristics of Water Mist on the Extinction of a Liquid Pool Fire," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 12, pp. 1591~1599.
- (4) Kim, M. B., Jang, Y. J. and Kim, J. K., 1996, "Burning Rate of a Pool Fire with Downward-directed Spray," *Fire Safety Journal*, 27, pp. 37~48.
- (5) Han, Y. S., Kim, M. B. and Shin, H. D., 1997, "Extinguishment by the Cooling Effect of the Fuel Surface with Pool Fires," *Trans. of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 15~23.
- (6) Kim, M. B., Jang, Y. J. and Yoon, M. O., 1997, "Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist," *Fire Safety Journal*, 28, pp. 295~306.
- (7) 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*, 37, pp. 631~657.
- (8) Lee, K. D. and Shin, C. S., 2001, "Extinguishing Characteristics of Water Mist by Discharge Properties," *Trans. of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 41~48.
- (9) David, T. S., 2002, "Spray Characteristics of Fire Sprinklers," *NIST GCR 02-838*