

이동식 미분무수 노즐의 소화 특성에 대한 수치 시뮬레이션 Thermal Numerical Simulation on Fire Suppression Characteristics through Mobile Mist Spray Nozzles

배강열 · 정희택 · 김형범 · 정인수 · 김 창
K. Y. Bae, H. T. Chung, H. B. Kim, I. S. Jung and C. Kim

(접수일 : 2009년 6월 18일, 수정일 : 2009년 9월 18일, 채택확정 : 2009년 10월 6일)

Key Words : Mobile Mist Spray Nozzle(이동식 미분무수 노즐), Fire Suppression(화제억제), FDS(Fire Dynamic Simulator), Extinguishing Time(소화시간)

Abstract : In the present study, the numerical investigation has been carried out to see the effects of water mist sprays on the fire suppression mechanism. The special-purposed program named as FDS was used to simulate the interaction of fire plume and water mists. This program solves 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 computational domain was composed of a rectangular space dimensioned as $L \times W \times H = 4.0 \times 4.0 \times 2.5 \text{ m}^3$ with a mist-injecting nozzle installed 1.0 m high from the fire pool. In this paper, two types of nozzles were chosen to compare the performance of the fire suppression. Numerical results showed that the nozzle, type A, with more orifices having smaller diameters had poorer performance than the other one, type B because the flow injected through side holes deteriorated the primary flow. The fire-extinguishing time of type A was 2.6 times bigger than that of type B.

기호설명

$c_{p,w}$: 물의 비열[kJ/kg · K]

d : 미분무수 직경[μm]

D : 노즐의 오리피스 직경[mm]

h_d : 미분무수 열전달 계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

m_d : 미분무수 질량[kg]

\dot{m}''_f : 연료의 단위면적당 화염강도[kW/m²]

M_O : 산소 몰분율[mol/mol]

M_w : 수증기 몰분율[mol/mol]

N : 오리피스의 수[ea]

N_u : Nusselt 수

P : 노즐의 작동 압력[bar]

P_r : Prandtl 수

Q : 유량[l/min]

Q_R : 복사강도[kW/m²]

r_d : 미분무수의 반지름[m]

Re : Reynolds 수

Sc : Schmidt 수

Sh : Sherwood 수

T_d : 미분무수의 온도[$^{\circ}\text{C}$]

T_g : 가스의 온도[$^{\circ}\text{C}$]

V : 미분무수의 분사 속도[m/s]

Y_d : 수증기의 질량분율[kg/kg]

Y_g : 가스의 증기 질량분율[kg/kg]

α : 지면으로부터 노즐까지의 경사각도[$^{\circ}$]

θ : 미분무수의 분사 각도[$^{\circ}$]

Γ : 공기 중 수증기의 확산계수

정희택(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부(공학연구원)

E-mail : htchung@gnu.ac.kr, Tel : 055-751-6165

배강열 : 경남 테크노파크

김형범 : 경상대학교 기계항공공학부

정인수 : 경상대학교 대학원 기계항공공학부

김 창 : (주)원

1. 서 론

스프링클러와 같은 수계소화설비는 화재를 진화

하고 제어하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있으며, 아직까지 믿음직한 화재억제(fire suppression) 수단이고 가장 효과적인 것 중의 하나이다. 그러나 절연성이 요구되는 전기제품이나 항공기 및 선박의 기계실등과 같이 물 공급이 한정된 곳에는 할론 1310과 할론1211 등 CFC 계통의 소화약제가 1960년대 말에 개발되어 최근까지 유류화재와 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 스프링클러는 액적의 크기가 크기 때문에 유류화재에 부적합하고, 일반 화재에는 다량의 물을 사용하기 때문에 소화 후 물에 의한 이차 재해를 가중시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 이러한 스프링클러의 단점을 보완하기 위하여 미분무수를 사용한 화재억제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근의 연구결과로 김성찬 등^{1~2)}은 밀폐된 공간에 다중의 미분무수 노즐을 설치하여 분무각이 화재실내부의 온도분포에 미치는 영향에 대해 실험과 수치해석을 비교하여 분무각이 증가함에 따라 화재실내부의 평균온도가 감소함을 보였고 수치해석에 이용한 FDS 모델은 온도장에 대해서 비교적 타당한 결론을 얻었다. 김호영 등³⁾은 개방공간에서 단일 노즐을 이용하여 실험을 진행한 결과 노즐의 높은 분사압력과 적은 액적크기가 소화를 증대시키며 개방공간에서의 산소차단효과는 매우 미미한 것으로 보고하였다. 김명배 등^{4~6)}은 실험을 통하여 효율적인 소화를 위해서 미분무수는 일정한 크기를 가지

고 있어야 하며, 노즐의 높이와 압력변화에 따른 소화 한계를 제시하였다. Hua 등⁷⁾은 개방공간에서 수치해석을 통하여 hollow cone 형태의 노즐보다 solid cone 형태의 노즐이 더욱더 빠른 시간에 소화가 진행되며 소화시간과 미분무수의 유량에 관한 상관관계를 제시하였다. 배강열 등⁸⁾은 CFD 기법을 이용하여 분사 유체의 온도 변화에 따른 미분무수 노즐의 성능 특성을 연구하였다.

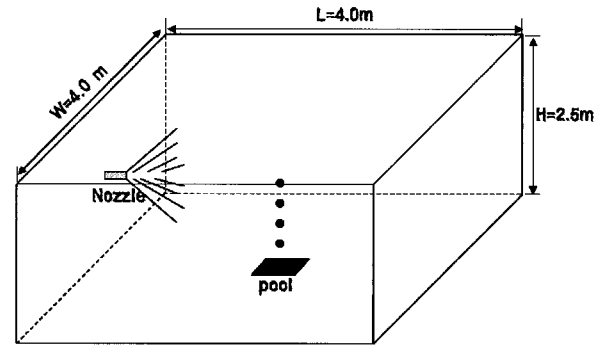


Fig. 1 Schematic view of the flow field domain

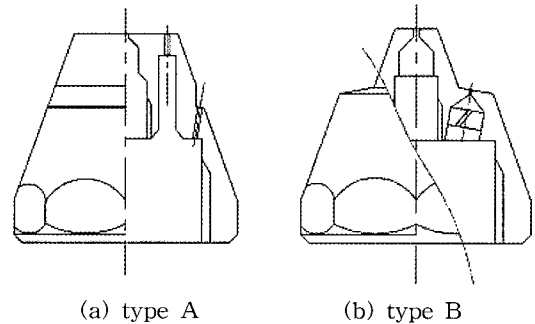


Fig. 2 Schematic view of the test nozzles

이에 본 연구에서는 미분무수 시스템을 이동식 소화시스템에 적용하기 위하여, 미분무수 노즐의 오

Table 1 Specifications of the test nozzle

Description	Symbol	Unit	type A		type B	
			Center	Side	Center	Side
Orifice diameter	D	mm	1.8	0.3	2.6	0.7
Number of orifice	N	ea	2	24	1	8
Flow rate	Q	l/min	10.20	0.5498	21.29	1.513
Operating pressure	P	bar	100	100	100	100
K-factor	K	-	1.204	0.05498	2.189	0.1513
Diameter of water mist	d	μm	120	45	150	60
Spray angle of water mist	θ	°	7.5	40	7.5	39
Spray velocity of water mist	V	m/s	25	25	50	45

리피스(orifice) 수와 위치변화에 따른 소화성능을 수치해석을 통하여 분석하였다. 화염과 미분무수의 상호작용에 의한 온도변화, 열발생을 변화, 산소농도변화, 복사강도변화, 수증기농도변화를 통하여 소화 메커니즘의 관점에서 연구를 진행하고, 차후 다양한 노즐의 소화특성 향상을 위한 설계시의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 수치해석 이론

2.1 적용모델 및 해석조건

본 수치해석에서 적용된 화재 공간은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 $L \times W \times H = 4 \times 4 \times 2.5 \text{ m}^3$ 의 직육면체 형상이다. 화염원은 $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ 의 단면적과 0.1 m 높이의 풀(pool)형 화원을 화재 공간의 중앙부에 설치하였다.

이동식 소화시스템에 사용되는 미분무수 노즐은 중앙부에 주분사용 오리피스와 원주방향으로 상대적으로 직경이 같은 다수의 오리피스로 구성된다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 2가지 형상의 노즐을 채택하여 소화특성을 비교하였다. A형은 기존에 사용되는 노즐로 주분사 노즐 2개가 중앙부에 위치하며 직경이 0.3mm인 오리피스가 원주 방향으로 24개 장착된 구조이다. B형은 분무 특성 개선을 위해 새로 설계된 노즐 형상으로 주분사 오리피스는 1개이고 원주 오리피스도 8개로 A형에 비해 총 오리피스 수가 적고 상대적으로 직경이 크다. 각 노즐의 분무 특성은 (주)원의 노즐 성능 시험 결과로부터 결정되었다⁹⁾. Table 1로 정리된 노즐의 특성은 화재 유동장의 소화 시뮬레이션을 위한 초기조건으로 사용된다.

2.2 전산 해석 기법

수치해석은 NIST에서 화재 및 소화의 목적으로 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) ver. 4.07을 사용하였다¹⁰⁾. FDS에서는 기본적으로 2가지의 난류와 연소모델을 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 있는데, 본 연구에서는 LES와 혼합분율 연소모델을 사용하였다. 노즐로부터 분사된 미분무수의 크기는 로그정규분포(Log-Normal distributions)와 Rosin-Rammler 분포

가 적용되었고, 기상과 미분무수와의 유동해석은 Eulerian-Lagrangian 방법이 적용되었다¹¹⁾. 미분무수 입자의 열 및 물질전달에 관한 식은 다음과 같다.

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

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

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

$$h_d = \frac{Nuk}{2r_d}; Nu = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

위 식에서 기호는 기호설명에 기술되어 있으며 방정식은 참고문헌 12에 설명되어 있다.

본 연구의 해석모델에 사용된 격자계는 Fig. 3과 같이 정렬격자형으로 계산 격자점은 60(X방향)×60(Y방향)×32(Z방향) 등 총 115,200개의 격자점이 사용되었다.

단위면적당 발열량은 555 kW/m^2 으로 약 50kW의 화재강도에 해당한다. 화염의 설치 위치는 노즐 분사각(nozzle angle, α)에 따라 다르다. $\alpha=0^\circ$ 인 경우 하부 0.4m에, $\alpha=45^\circ$ 인 경우에는 하부 1.8m에 설치하였다. 자연연소(freely combustion)후 30초에 미분무수가 노즐에서 분사된다. 노즐에서 분사되는 미분무수의 총량은 A형이 33.6lpm, B형이 33.4lpm으로 비슷하다. 그 외의 미분무수의 특성은 Table 1과 같다. 경계조건은 대기조건을 부여하기 위하여 개방공간으로 가정하였다.

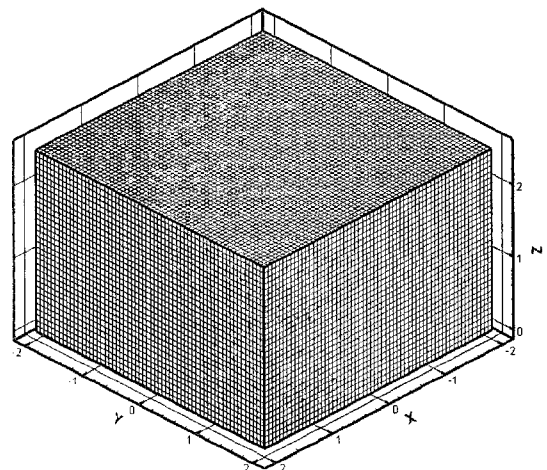
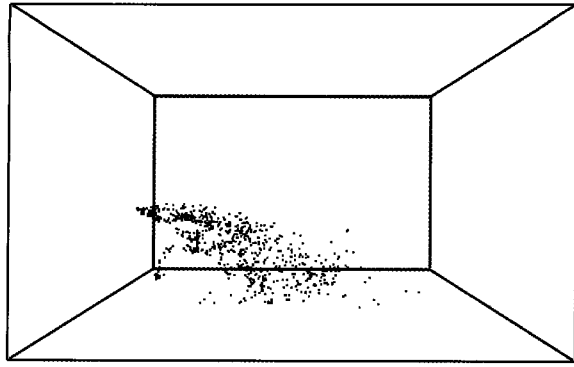
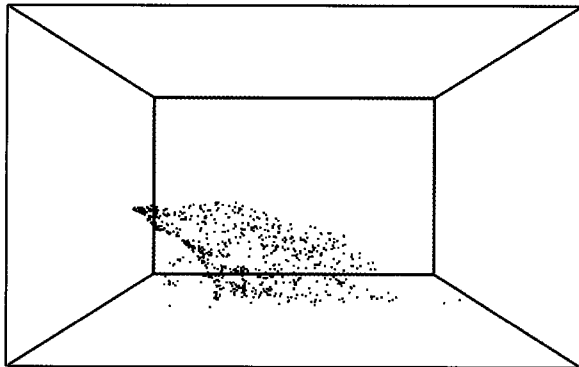


Fig. 3 Grid system for numerical simulation



(a) type A



(b) type B

Fig. 4 Spray pattern by operating main orifices only at nozzle angle, $\alpha=0^\circ$

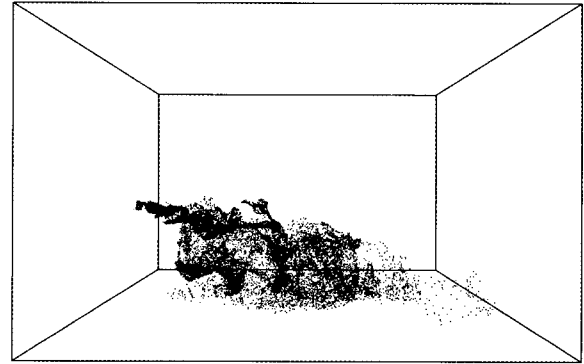
3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 2.1절에서 언급된 2가지 형태의 노즐의 소화특성을 노즐 분사각에 따라 비교하여 재설계된 노즐의 효율성을 검토하였다.

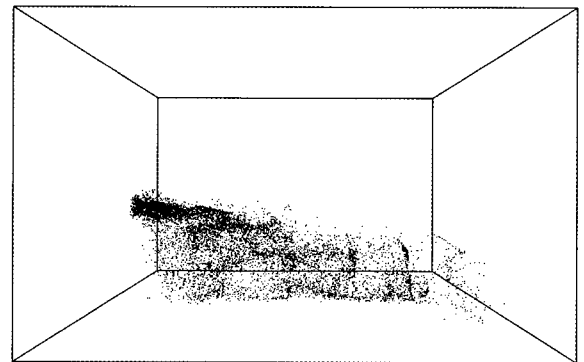
Fig. 4는 노즐의 분사각, $\alpha = 0^\circ$ 에서 중앙부의 주 오리피스(main orifice)만 작동한 경우의 분사형태를 보여주고 있다. B형 노즐의 경우 A형보다 초기 분사 속도가 크기 때문에 분사거리가 약간 크게 나타나지만 분사형태는 전반적으로 비슷한 양태를 나타내고 있다.

Fig. 5는 노즐의 분사각, $\alpha = 0^\circ$ 에서 원주의 오리피스를 포함한 오리피스 전부가 작동한 경우의 분사형태를 보여주고 있다. A형 노즐의 경우 중앙부분에 있는 주유동이 직진성을 가지기 보다는 주위 공간으로 넓게 분포하는 경향을 보인다. 이는 중앙부분의 주유동을 발생시키는 오리피스에 대하여 반경방향으로 10mm의 거리를 두고 24개의 원주 오리피스가 주유동과 평행하게 배치되어 있기 때문에 주유동이 원주 오리피스에 의한 주변 유동장과 상

호 작용하여 혼합되기 때문이다. B형의 경우에는 주위에 분포된 8개의 오리피스가 주유동을 발생시키는 오리피스와 간격이 13mm로 약간 넓고 설치각도 10° 로 기울어져 있기 때문에 주유동과 원주 유동과의 상호작용이 적어 주유동의 직진성이 보존된다.



(a) type A



(b) type B

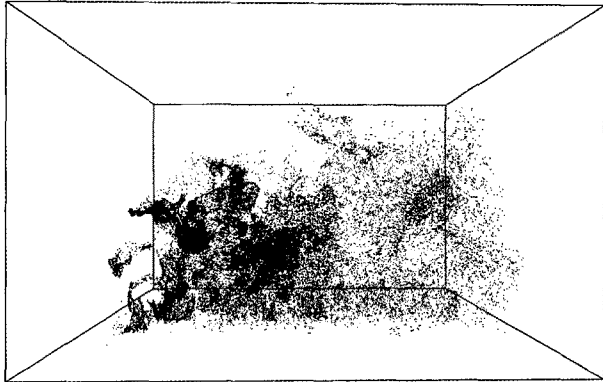
Fig. 5 Spray pattern by operating the whole orifices at nozzle angle, $\alpha=0^\circ$

Fig. 6은 노즐의 분사각이 $\alpha = 45^\circ$ 인 경우 분사형태를 묘사한 것이다. Fig. 5의 경우와 유사하게 A형 노즐의 경우에는 주유동이 주위에서 형성된 유동의 영향으로 인하여 분사형태가 직진성을 유지하지 못하고 있으나 B형의 경우에는 주유동이 주위유동의 영향을 매우 적게 받기 때문에 초기에 분사된 분사각을 유지하면서 2 m이상의 거리까지 분사되는 것을 확인할 수 있다.

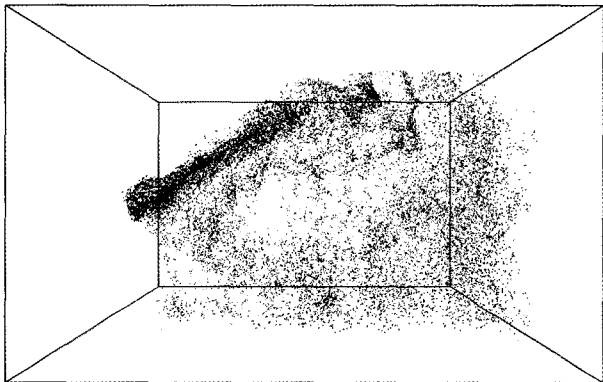
Fig. 7은 노즐의 분사각 $\alpha = 0^\circ$ 에서 노즐 분사 후 1초에서 미분무수의 속도장을 묘사한 그림이다.

A형 노즐의 경우에는 B형보다 화염에 의하여 생성된 화재 공간 내부의 공기부력을 효과적으로 감소시키지 못하고 있다. 이것은 Fig. 5의 결과에서도 논의 되었듯이 A형 노즐은 주유동이 주위의 원주

오리피스 유동장과의 혼합으로 인하여 넓게 분포되어 미분무수의 침투 속도(penetration velocity)가 상대적으로 줄어들어서 화염 억제효과가 감소한 것이다.



(a) type A

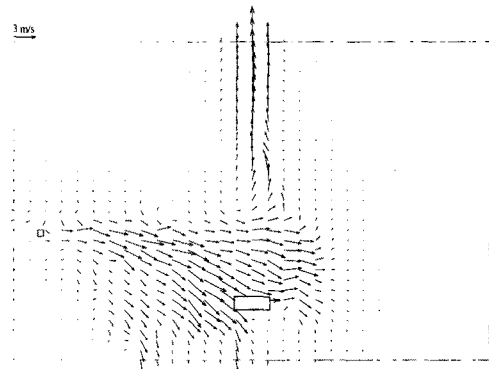


(b) type B

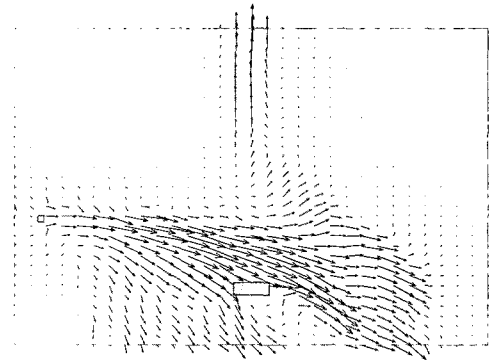
Fig. 6 Spray pattern by operating the whole orifices at nozzle angle, $\alpha=45^\circ$

Fig. 8은 노즐의 분사각 $\alpha = 45^\circ$ 인 경우에 대한 속도벡터를 도시한 그림이다. A형 노즐의 경우에는 B형의 경우보다 넓은 분사영역을 가지지만 주유동의 직진성이 주위에 분포된 노즐의 유동으로 인하여 감소하기 때문에 1.8 m 높이에 설치된 화원까지 미분무수의 영향이 미치지 못하고 있다. 반면 B형 노즐은 주유동이 초기에 분사된 분사각을 유지하면서 2m이상의 거리까지 분사되기 때문에 상부에 설치된 화원에 미분무수가 직접적인 영향을 주어 화염의 억제효과가 A형의 경우보다 훨씬 뛰어남을 확인할 수 있다.

미분무수 분사 1초 후의 온도분포를 표시하면 Fig. 9, Fig. 10과 같다. 분사각이 0° 인 경우 자연연소에 의해 화염이 형성된 후 초기에 미분무수의 분

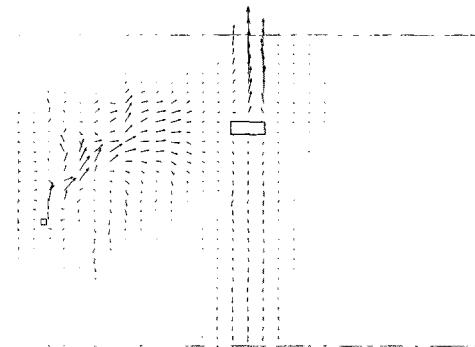


(a) type A

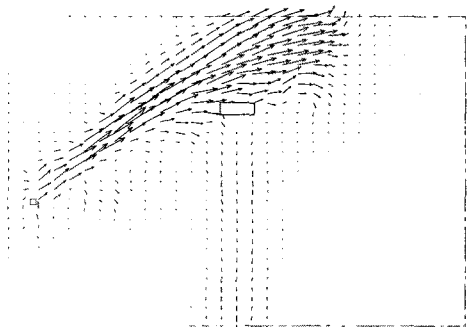


(b) type B

Fig. 7 Velocity vector at $\alpha=0^\circ$ after 1sec of mist injection



(a) type A



(b) type B

Fig. 8 Velocity vector at $\alpha=45^\circ$ after 1sec of mist injection

사영향으로 인하여 화염이 두 개의 부분으로 나누어지는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 분사가 화원을 중심으로 이루어지기 때문에 자연연소에 의하여 생성된 화염이 두 개의 영역으로 나누어지게 되는 것이다. Fig. 10(a)와 같이 A형의 경우 두 개의 영역으로 나누어졌지만 상부와 화원부근에서 약 150 °C 이상의 높은 온도분포를 보이고 있다.

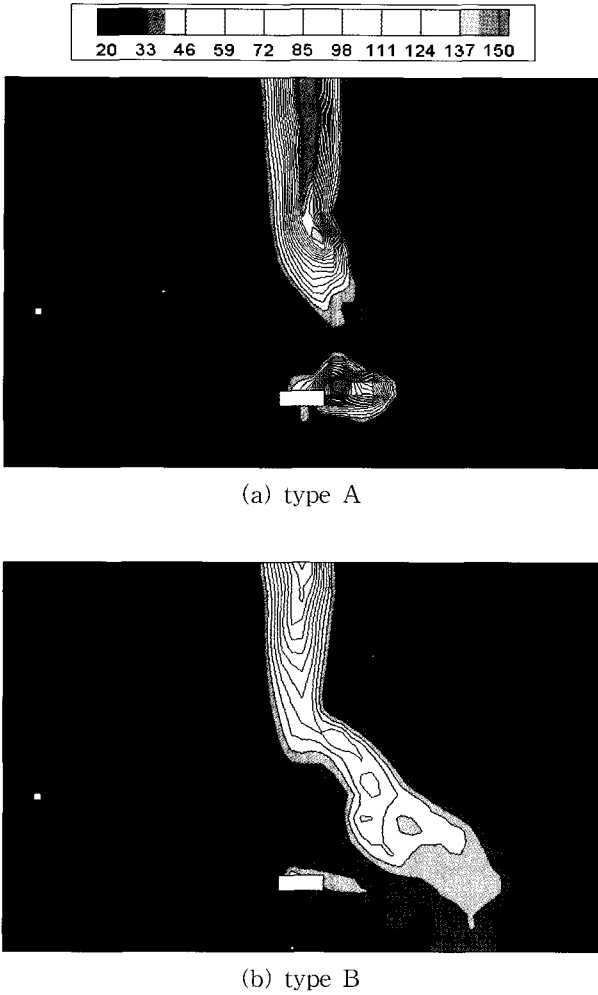
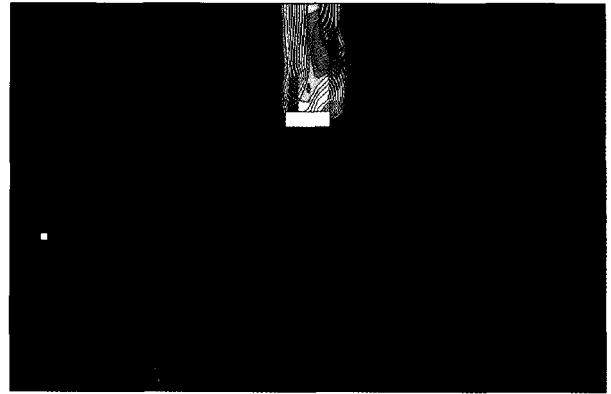
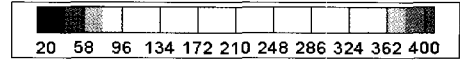


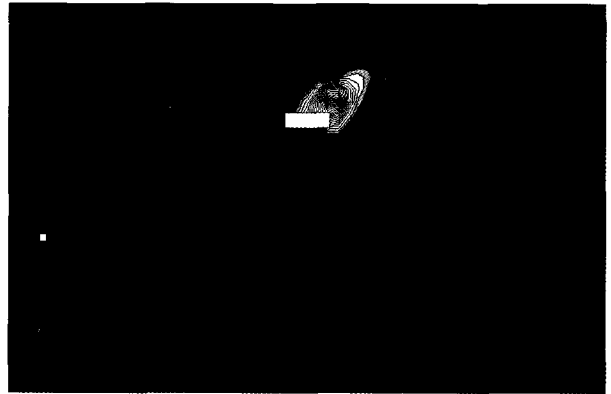
Fig. 9 Temperature contours at $\alpha=0^\circ$ after 1sec of mist injection

B형의 경우에는 직접적으로 화원에 미분무수의 영향이 미치지 때문에 A형보다 약 50 % 정도의 온도감소를 확인 할 수 있다. 그리고 노즐의 분사각도가 45°인 경우에도 B 타입의 노즐이 효과적인 화염 억제효과를 보여주고 있다.

Fig. 11은 시간에 따른 미분무수의 분사에 의한 화염의 강도변화를 도시한 그림이다. 본 연구에서 사용되고 있는 혼합분율 연소모델은 미분무수에 의한 화염강도의 감소를 고려하기 위하여 다음과 같은 방정식을 적용하였다¹¹⁾.



(a) type A



(b) type B

Fig. 10 Temperature contours at $\alpha=45^\circ$ after 1sec of mist injection

$$\dot{m}''_f(t) = \dot{m}''_{f,0}(t)e^{-\int k(t)dt} \quad (5)$$

$$k(t) = am''_w(t) \quad (6)$$

위의 식에서 a 는 실험상수로서 본 연구에서는 0.3의 값을 사용하였다.

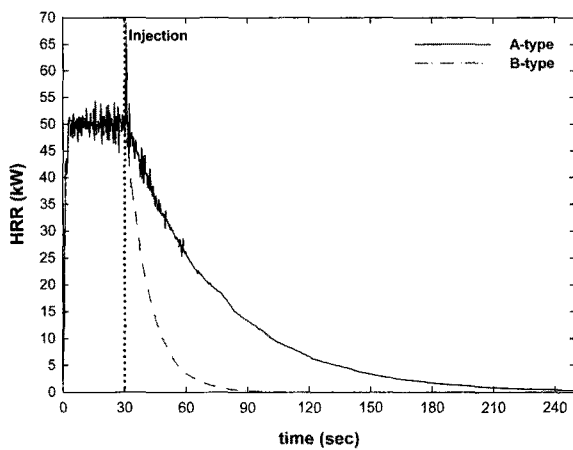
Fig. 11에서 노즐의 분사각도가 0°인 경우 B형 노즐이 A형에 비하여 기울기가 큰 화염강도의 감소를 보여주고 있는데 이는 식(5)와 식(6)에서 알 수 있듯이 단위면적당 발생하는 화염강도에 많은 질량의 물이 도달하게 되면 수증기의 증발에 의하여 감소되는 열량이 커지기 때문이다. 노즐이 A형에 비하여 기울기가 큰 화염강도의 감소를 보여주고 있는데 이는 식(5)와 식(6)에서 알 수 있듯이 단위면적당 발생하는 화염강도에 많은 질량의 물이 도달하게 되면 수증기의 증발에 의하여 감소되는 열량이 커지기 때문이다. 또한 노즐의 분사각이 45°인 경우

Table 2 Mean values in center section

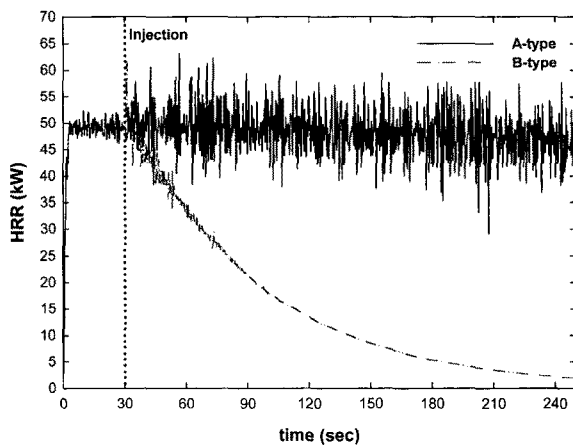
Description	Symbol	Unit	type A		type B	
			0°	45°	0°	45°
Temperature	T_g	°C	50.76	188.15	25.75	60.77
Radiant intensity	Q_R	kW/m ²	44.01	65.21	13.47	46.74
Oxygen mole fraction	M_O	mol/mol	0.194	0.151	0.201	0.187
Water vapor mole fraction	M_w	mol/mol	0.0052	0.0377	0.0014	0.0092

에는 A형의 분사형태는 1.8 m의 높이에 설치된 화원까지 도달하지 못하기 때문에 약 250초가 지난 후에도 화염강도의 감소가 매우 적음을 확인할 수 있다.

소화시간으로 정하여 살펴본 결과 분사각도가 0°인 경우 B형이 약 65초로 170초의 A형보다 2.6배정도 빠른 소화성능을 나타내었다. 분사각이 45°인 경우에도 B형 노즐에 의한 소화시간은 약 225초이나 A형의 경우에는 소화가 이루어지지 않고 있다. 이것으로 보아 주유동을 생성하는 주위에 직경이 작은, 즉 입자경이 작은 원주 오리피스를 다수 설치하는 경우보다 분무 입자경이 크더라도 원주 오리피스를



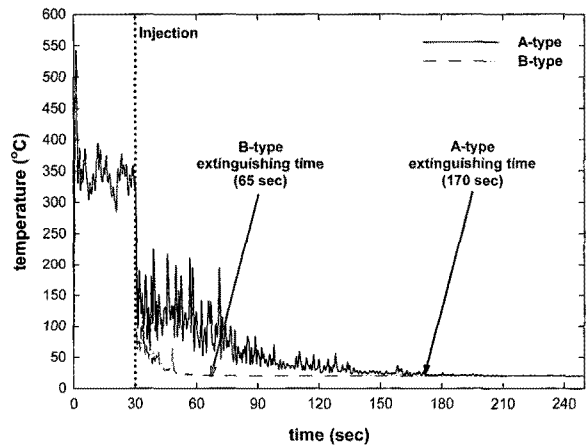
(a) $\alpha=0^\circ$



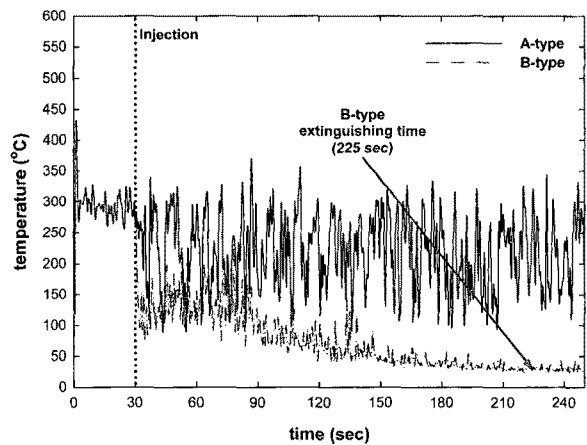
(b) $\alpha=45^\circ$

Fig. 11 Temporal variation of mean heat release rate

Fig. 12는 미분무수 분사 후 시간에 따른 천장부근의 온도분포를 노즐의 분사각도에 따라서 나타낸 그림이다. 분사각이 0°와 45°의 두 경우 모두 B형의 노즐이 뛰어난 화재억제 성능을 보여주고 있다. 그리고 천장부근의 온도가 20°C까지 감소된 시점을



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=45^\circ$

Fig. 12 Temporal variation of mean ceiling temperature

주 오리피스와 가급적 멀리 설치하여 주유동이 원주 오리피스와 혼합되지 않아 직진성을 오래 보존하도록 하는 것이 소화 특성에 유리하다.

분사 초기에 화염 주위의 온도 분포, 복사 강도, 산소 및 수증기의 비율을 분석하면 소화의 특성을 분석할 수 있다. Table 2는 Y방향으로 중앙단면에서 화원의 표면으로부터 $X \times Z = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ 의 면적과 미분무수 분사 후 60초 동안 제반 소화 특성값을 아래의 식(7)을 이용하여 면적과 시간에 대한 평균값으로 나타낸 것이다.

$$\bar{\Phi}_{ave.} = \frac{\int_{\Delta t} \int_A \Phi dA dt}{A \times \Delta t} \quad (7)$$

$$A = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2, \Delta t = 30 \sim 90 \text{ sec}$$

$$\Phi = T_g, Q_R, M_O, M_W$$

온도의 경우 B형 노즐이 A형보다 2~3배정도 낮은 온도분포를 보이고 있고, 복사강도의 경우에도 노즐설치각과 관계없이 B형 노즐이 A형보다 뛰어난 화제억제효과를 나타내고 있다.

산소물분율에서는 B형 노즐의 경우가 A형보다 약간 높은 값을 보여주고 있으나 차이가 크지 않다. 이것은 산소물분율의 경우 경계조건부에서도 언급되었듯이 모든 벽면이 개방으로 정의하였기 때문에 전체적인 산소변화는 연소에 의해 감소되는 만큼 외부에서 다시 공급되기 때문에 큰 차이를 보이지 않는 것이다.

수증기물분율은 B형이 약 3.7~4배정도 낮은 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 B형 노즐의 경우가 화염을 효과적으로 억제하여 소화를 빠른 속도로 유도하기 때문에 수증기 물분율이 빠른 시간에 감소하게 되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 이동식 소화시스템의 노즐 형상 개선을 위해서 가상의 화염을 생성하여 두 가지 형상의 노즐에 대하여 전산 시뮬레이션을 통해 성능 특성을 분석하였다. 재설계된 노즐(B형)은 기존의 노즐(A형)에 비해 원주 오리피스의 수효를 감소와 설치각의 변경으로 주유동의 직진성의 보존을 오래 유지시켜 우수한 소화특성을 나타내었다. 주요 소화 특성치인 천장평균온도에 의한 소화소요시간의 경우 B형 노즐의 경우가 A형에 비해 약 2.6배 이상

높은 소화효과를 나타내었다. 본 연구로부터 미분무수의 노즐 설계 시에 오리피스의 수보다 주유동을 방해하지 않는 효과적인 오리피스의 분포 및 설치각 등을 고려하여야 효과적인 소화성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 경상대학교 부속 공학연구원 학술연구재단의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. S. C. Kim and H. S. Ryou, 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. S. C. Kim and H. S. Ryou, 2004, "The Effect of Water Mist on Burning Rates of Pool Fire", Journal of Fire Sciences, Vol. 22, No. 4, pp. 305~323.
3. 김호영, 오상엽, 정진택, 2004, "분무수 분무특성이 액체연료 Pool 화염의 소화에 미치는 영향", 대한기계학회논문집 B권, Vol. 28, No. 12, pp. 1591~1599.
4. M. B. Kim, Y. J. Jang and J. K. Kim, 1996, "Burning Rate of a Pool Fire with Downward-directed Spray", Fire Safety Journal, 27, pp. 37~48.
5. Y. S. Han, M. B. Kim and H. D. Shin, 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. M. B. Kim, Y. J. Jang and M. O. Yoon, 1997, "Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist", Fire Safety Journal, 28, pp. 295~306.
7. J. K. Hua, B. C. Khoo and H. Xue, 2002, "A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume", Fire Safety Journal, 37, pp. 631~657.
8. 배강열 외 4인, 2008, "오리피스형 분사노즐에서 작동유체의 온도변화에 따른 K-factor에 관한

- 연구”, 한국동력기계공학회지, 제12권, 제3호, pp. 12~18.
9. (주)원, 2006, "이동식 미분무수 소화시스템 개발", 소화방재청, 최종보고서.
 10. K. M. McGrattan, 2006, "Fire dynamics simulator (version 4) technical reference guide", NIST Special Publication 1018
 11. 김성찬, 2003, "화염과 워터미스트의 상호작용에 관한 실험 및 수치 해석 연구", 중앙대학교 기계공학과 박사학위논문, pp. 69~79.
 12. 정희택 외 4인, 2006, "CFD기법을 이용한 선박 거주용 수계 소화시스템의 열·유동 성능특성 해석기법 개발", 경상대학교, 연구결과 보고서, pp. 30~31.