미분무수 분사 특성에 따른 가열 챔버 내 냉각 성능 수치 해석

수 먼* · 이상욱†

Numerical Analysis of Effects of Water Mist Injection Characteristics on Cooling Performance in Heated Chamber

S. M. Sumon and S.-W. Lee

Key Words: Water mist(미분무수), Cooling performance(냉각 성능), Injection characteristics(분사 특성), Droplet size(액적 크기), Fire suppression(화재 억제), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

Abstract

Water mist fire suppression systems which use relatively small droplets of water with high injection pressure are increasingly being used in wider applications because of its greater efficiency, low flooding damage and low toxicity. However, the performance of the system significantly relies on the water mist characteristics and it requires better understanding of fire suppression mechanism of water mist. In the present study, computational fluid dynamics simulations were carried out to investigate cooling performance of water mist in heated chamber. The gas phase was prepared with natural convection heat transfer model for incompressible ideal case and then the effects of water mist injection characteristics on cooling capabilities were investigated upon the basis of the pre-determined temperature field. For the simulation of water mist behavior, Lagrangian discrete phase model was employed by using a commercial code, FLUENT. Smaller droplet sizes, greater injection angles and higher flow rates provided relatively higher cooling performance.

1. 서 론

최근 세계적인 환경 오염 규제의 강화에 따라 오존층 파괴 규제 물질로 규정되어 있는 할론 가스나 온실 효과의 원인인 CO₂를 기반으로 한 소화 시스템을 대체할 수 있는 새로운 소화 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라 상대적으로 소량의 물을 고압 분사시켜 미세 액적을 생성함으로써 미세 액적의 넓은 표면적을 통한 기화열 흡수를 이용하는 미분무수 소화 시스템은 우수한 냉각 성능으로 인하여 관심이 크게 높

아지고 있다. 특히 미분무수 소화 시스템은 독성이 없고 환경 친화적이며, 일반적인 스프링클러에서 발생할 수 있는 침수 피해를 최소화할 수 있는 이점을 가지고 있다. 일반적으로 직경 1 mm 이하의 분무 액적(droplet)이 전체 유량의 99% 이상을 차지하는 경우 미분무수 소화 시스템으로 정의하고 있으며, 노즐에서의 분사 방식에 따라 보통 20 μm에서 500 μm 사이의 크기를 갖는다. 이러한 액체 미립화를 이용한 미분무수는 고온에서의 기체 냉각 등 여러 응용 분야에서 매우 유용하게 이용될 수 있음이 알려져 있다.

미분무수 소화 시스템의 냉각 및 화재 억제 특성에 대한 이해를 위하여 실험 및 CFD 기법이 이용될 수 있으나, 실험은 노즐 분사 특성 및 미분무수 파라미터에 대한 변경이 상대적으로 자유롭지 못한 제한점이 있기 때문에 최근 들어 실험과 병행하여 CFD 모델을 이용한 수치 해석 연구가 활발히 이루어지고 있다. Adiga 등⁽¹⁾

(2012년 3월 5일 접수 ~ 2012년 6월 6일 심사완료, 2012년 6월 17일 게재확정)

*울산대학교 자동차선박기술대학원

†책임저자, 회원, 울산대학교 기계공학부

E-mail : leesw@ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2765 FAX : (052)259-1680

은 극미분무수(ultra fine water mist)의 소화 특성을 이해하기 위하여, 바닥에 설치된 다중 노즐 극미분무수 분사 시스템의 성능 예측 실험과 CFD 해석을 수행하였다. 또한 Sinai 등⁽²⁾은 ANSYS CFX를 이용하여 여러 분무 특성 파라미터의 변화에 따른 소화 성능 해석 후 실험 값과 비교함으로써 CFD 코드의 민감도(sensitivity)를 검증하는 연구를 수행하였다. Kalata 등⁽³⁾은 분사 노즐의 위치 결정 및 최적 냉각을 위하여 기체 온도에 따른 분무의 기화 특성에 대한 실험을 수행한 뒤, CFD 해석 결과와 비교하였으며, Georgeous & Bucklin⁽⁴⁾은 레이저 유속계 및 위상차 기법을 이용하여 분무 액적 크기 및 액적 속도를 측정하였다. Bae 등⁽⁵⁾은 화재역학 시뮬레이터(Fire Dynamics Simulator, FDS) 프로그램을 이용하여 미분무수와 화염과의 상호 작용 및 분사 특성에 따른 화재 억제 성능에 대한 영향을 조사하였으며, Gant 등⁽⁶⁾은 수평 노즐 분사에 대한 CFD 해석을 통하여 수직 노즐 분사 시스템의 성능과 비교 분석하였다. 또한, 정희택 등⁽⁷⁾은 미분무수 소화 성능 예측을 위하여 노즐 내부 유체 유동장 해석과 함께 미분무 유동장에 대한 CFD 해석을 수행한 뒤 실험 결과와 비교하여 수치 기법의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 화재 억제 시스템으로서의 미분무수 시스템의 설계 자료 도출 및 성능 예측을 위한 목적으로, 일정한 크기의 밀폐된 사각 챔버 모델을 적용하여 분사 특성 파라미터의 변화에 따른 챔버 내 냉각 성능 해석을 수행하였다. 수치 해석은 CFD 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT(ANSYS, Inc., PA)의 Discrete phase model(DPM)를 이용하였다.

2. 수학적 모델링 및 방법

본 연구에서는 화재 발생에 의한 온도 상승으로 형성된 밀폐된 고온 챔버 내에서 노즐로부터 분사되는 미분무수의 다상 유동장 냉각 특성에 대한 수치 해석을 수행하였다. 해석 모델링을 보다 단순화하기 위하여 복잡한 화학 반응을 동반하는 화재 연소 모델을 포함하지 않고, 챔버 내에 단순히 일정한 크기의 열원(heat source)을 적용한 비압축성 이상 기체 열유동장을 고려하였으며, 미분무수는 이산화 액적(discrete droplet) 모델로서 챔버 내 연속적인 기체 유동장과 질량, 운동량 및 열 교환을 통하여 상호 작용하는 것으로 고려하였다.

2.1 기체 연속유동장 모델링

챔버 내의 기체 연속유동장은 Eulerian 관점에서 다음과 같이 연속방정식, 운동량 보존 방정식 및 에너지 보존 방정식을 적용하여 해석하였다.

2.1.1 연속방정식

다음과 같이 질량 보존에 관한 연속방정식을 고려하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

여기서, ρ 는 기체밀도, S_m 은 미분무수 액적과의 상호작용인 기화(evaporation)에 의한 단위체적당 질량 생성량(mass source)을 나타낸다.

2.1.2 운동량 보존 방정식

아래 식 (2)와 같이 레이놀즈 평균 나비에-스톡스방정식(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)을 적용하였으며, 레이놀즈 응력항인 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 는 부력항이 고려된 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 모델링하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \overline{\tau - \rho u_i u_j} + \vec{S}_p \quad (2)$$

여기서, τ 는 전단응력(shear stress)항이며, S_p 는 미분무수 액적과의 상호작용에 의한 단위체적당 운동량 생성량(momentum source)항을 나타낸다.

2.1.3 에너지 보존 방정식

에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [(k \nabla T + (\tau \cdot \vec{V}))] + S_e \quad (3)$$

여기서 k 는 열전도계수, S_e 는 단위체적당 열생성량(heat source)이다. 에너지 $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{|\vec{V}|^2}{2}$ 로 표현되며, h 는 엔탈피(enthalpy)를 나타낸다.

2.2 미분무수 이산화 액적 모델링

기체 유동장 내 노즐에서 분사된 액적(droplet)의 거동 및 연속적인 기체 유동장과의 상호작용에 대한 모사를 위하여 Lagrange 기법을 바탕으로 한 DPM을 적용하였으며, 이에 관한 수학적 모델링은 다음과 같다.

2.2.1 액적 운동 및 분열(breakup)

이산화 액적의 궤적은 다음과 같이 Lagrange 관점에서 액적에 작용하는 힘의 평형 방정식을 적분함으로써

계산한다.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D(\vec{V} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}_z(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (4)$$

여기서, $\vec{u}_p$ 는 액적 속도, $\vec{F}_D(\vec{V} - \vec{u}_p)$ 는 단위질량당 액적에 작용하는 항력으로서, $\vec{F}_D = \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p d_p^2}$ 로 계산되며, 레이놀즈수는 액적 직경 d_p 를 특성길이로 하여 $Re = \frac{\rho|\vec{V} - \vec{u}_p|d_p}{\mu}$ 로 표현된다. 액적의 운동 제적에 대한 보다 정확한 해석을 위해서 항력계수 C_D 값의 정확한 결정이 중요하며, 본 해석에서는 액적 형상의 변형을 고려할 수 있는 동적 모델⁽⁸⁾을 적용하였다. 즉, 액적이 완전구(sphere)형상일 때 레이놀즈수에 따라 아래의 값을 적용하였다.

$$C_{D,sphere} = \begin{cases} 0.242 & Re \geq 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right) & Re \leq 1000 \end{cases} \quad (5)$$

또한 액적이 찌그러짐(distortion)에 의해 원형 판(disk)로 변형함에 따라 아래 식 (6)과 같이 선형적으로 변화하도록 하였다.

$$C_D = C_{D,sphere}(1 + 2.632y) \quad (6)$$

여기서 y 는 액적의 찌그러짐 변형을 나타내는 값으로 아래 식 (7)과 같이 Taylor 액적 분열 모델(Taylor analogy breakup model)을 이용하여 구한다.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{C_F \rho u^2}{C_b \rho_p r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_p r^3} y - \frac{C_d \mu_p y}{\rho_p r^2} \frac{dy}{dt} \quad (7)$$

위 식에서 σ 는 액적의 표면장력이고, r 은 변형 전의 액적 직경이며, 각 상수들은 실험값 및 이론 해석을 기준으로 하여 $C_b = 0.5$, $C_k = 8$, $C_d = 5$, $C_F = 1/3$ 을 적용하였다⁽⁹⁾.

위 식에서 y 는 일반적으로 0과 1사이의 값을 가지며, 만약 두 액적이 충돌과 함께 y 값이 1보다 커지게 되면 액적이 보다 작은 액적으로 분열함을 의미한다.

또한, 난류에 의한 액적 분산 효과를 고려하기 위하여, 난류 변동 유속의 Gaussian 분포를 가정한 discrete random walk 모델을 적용하였다.

2.2.2 액적의 충돌 및 분열

미분무 액적의 노즐 분사 후, 액적 상호간의 충돌 모델링의 고려가 필요하며, 본 해석에서는, 직접적인 액적간의 충돌 해석에 의한 엄청난 계산량을 피하기 위하여,

아래 식 (8)에 의해 대표되는 충돌 확률 계산 기법으로 대신하였다.

$$p_1 = \pi(r_1 + r_2)^2 v_r \Delta t / \Lambda \quad (8)$$

여기서, r_1 과 r_2 는 각 충돌 액적의 반경, v_r 은 액적간의 상대 속도, Λ 는 연속 기체상 수치 격자의 체적을 나타낸다. 이 때, 충돌 확률 p_1 은 0과 1사이의 값을 갖는다.

2.3 두 상(phase) 사이의 상호작용

액체와 기체의 두 상(phase) 사이의 기계적, 열적 상호작용은 본 해석에서 중요한 역할을 차지하며 다음과 같이 고려된다.

2.3.1 운동량 교환

미분무 액적이 분사되었을 때 연속 기체 유동장으로 부터 미분무 액적으로의 운동량 전달은 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\vec{F} = \Sigma \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p d_p^2} (\vec{u}_p - \vec{V}) \dot{m}_p \Delta t \quad (9)$$

여기서 $\dot{m}_p$ 는 액적의 질량 유량이며, 이러한 운동량 교환은 연속 기체 유동장 방정식에서는 운동량 생성원(source)로써 유입된다.

2.3.2 질량 교환

미분무 액적의 기화로 인한 두 상(phase) 사이의 질량 교환은 다음 식에 의해 계산된다. 이러한 질량 교환은 기체 유동장의 연속방정식에서 질량 생성원으로 유입된다.

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (10)$$

Fig. 1 Configuration of simulation model

이 때 $m_{p,0}$ 는 초기 액적의 질량을, Δm_p 는 수치 격자 체적 내에서 액적의 질량 변화량을 나타낸다.

2.3.3 열 교환

연속 기체 유동장에서 미분무수 액적으로의 열교환은 액적의 열에너지 변화를 다음과 같이 계산함으로써 고려할 수 있다.

$$Q = \frac{\dot{m}_{p,0}}{m_{p,0}} [-(m_{p,i} - m_{p,o})H_{latref}] - m_{p,o} \int_{T_{ref}}^{T_{p,out}} c_{p,p} dT + m_{p,i} \int_{T_{ref}}^{T_{p,in}} c_{p,p} dT \quad (11)$$

여기서 H_{latref} 는 기준조건에서의 잠열(latent heat), $c_{p,p}$ 는 액적의 비열(specific heat)이며, $m_{p,i}$ 와 $m_{p,o}$ 는 각각 수치 격자의 유입 및 유출시 액적의 질량을 나타낸다.

3. 수치해석 모델링

미분무수에 의한 정육면체 챔버 내 냉각 성능 수치 시뮬레이션은 두 부분으로 나누어 수행하였다. 1차적으로 화재 발생을 가정하여 밀폐된 알루미늄 정육면체 챔버 내부의 일정한 열원에 의한 비정상 내부 온도 상승을 해석하였다. 이 경우 기존 문헌^(10,11)을 참고하여 선정된 180 kW/m^2 의 크기의 정육면체 형태의 열원을 챔버 바닥면에 두어 화재로 인한 열 공급 현상을 모사하였다. 이 후 가열된 챔버 내 기체장 속에 DPM 기법을 적용하여 챔버 천정에 위치한 노즐로부터의 미분무수 분사를 모사하였다. 정육면체 형상의 챔버는 가로, 세로 및 높이 $L \times W \times H = 2 \times 2 \times 2 \text{ m}$ 로 결정하였으며, 바닥면의 열원

은 $L \times W \times H = 0.4 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}$ 의 정육면체 형상으로 구현하였다. 미분무수 분사 특성에 의한 냉각 성능의 영향을 조사하기 위하여 분사 각도, 분사 유량, 미분무 액적 직경 등에 변화를 주어 반복 계산을 수행하였다. Table 1에 본 연구에 적용한 미분무 분사 특성에 대하여 나타내었다.

4. 해석결과 및 토의

Fig. 2에서는 화재를 모사하기 위하여 1차적으로 밀폐된 챔버 내 존재하는 일정한 열원에 의한 연속 기체 유동장의 온도 상승에 대한 해석 결과를 보였다. 이 때 미분무수의 노즐 분사 이전이므로 미분무수 액적과의 상호작용은 고려되지 않았다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 챔버 내 수직 중앙면(mid-plane)과 천정 표면(ceiling)에서의 온도 분포를 나타낸다. 열원에 의한 기체 유동장 가열에 의하여 중심부에서 먼저 온도 상승이 이루어지고 자연 대류 현상에 의해 상승 기류가 발생한 뒤 천정면 근처에서 바깥쪽으로 순환하는 유동장이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이와 함께 알루미늄 재질로 적용된 챔버 벽면을 통한 열전도 현상에 의하여 벽면에서의 온도가 내부 공기의 온도보다 상대적으로 빨리 상승하는 것을 볼 수 있다. 일정한 열원에 의하여 챔버 내부의 평균 온도 및 천정면에서의 평균 온도는 선형적으로 증가하였다 (Fig. 6 참조).

Fig. 3은 Fig. 2와 같이 일정한 열원에 의해 30초 동안의 가열로 얻어진 온도 분포를 가진 기체 유동장을 초

Table 1 The water mist injection properties

Properties	Value
Injection type	Solid cone
Particle type	Droplet
Material	Water-liquid
Injection velocity	60 m/s
Mass flow rate	1.25 kg/s, 0.75 kg/s
Cone angle	30°, 60°, 90°
Droplet diameter	0.1 mm, 0.3 mm
Diameter distribution	Uniform
Turbulent dispersion	Discrete random walk model

Fig. 2 Temperature profile in fire at (a) the mid-plane (b) the ceiling

Fig. 3 Effects of injection angle on cooling performance of chamber. (a) $\alpha = 30^\circ$ (b) 60° (c) 90°

기 조건으로 하여 챔버 내에 미분무수를 분사하였을 때 초기 분사각도의 변화에 따른 냉각성능을 보여 주고 있다. 분사 각도가 30° 인 경우, 분사된 미분무수가 챔버의 중심으로부터 상대적으로 좁은 영역 안에 제한되어 위치함으로써 챔버 내 전체적인 냉각성능은 상대적으로 높지 않은 것으로 나타났다. 챔버 중심부에서의 냉각효과와는 분사각도에 상관없이 거의 동일한 것으로 예측되었으나, 분사각도 90° 인 경우 분사된 미분무수가 넓은 영역으로 퍼지면서 전체적인 챔버 내 온도를 상대적으로 빨리 낮추는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 노즐에서의 초기 분사각도를 달리하였을 경우 미분무수 액적의 궤적 및 분포를 가시화하였다. 분사 노즐 아래 약 0.1 m 부근에서 중력에 의한 영향에 의해 초기 분사각도 보다 작은 각도를 갖고 미분무수 액적이 분포함을 알 수 있다. 또한, 분사각도 30° 인 경우 미분무수가 챔버 중심으로부터 매우 제한적인 영역 내에서만 존재하며, 분사각도가 90° 인 경우 챔버 내 상당히 넓은 영역에 분포하여 챔버 냉각성능을 향상시키게 됨을 알 수 있다. 이러한 냉각 성능은 미분무수 액적 직경의 크기에 따라 다른 영향을 받는데 Fig. 5에서 보는 것과 같이 액적 직경 $d=0.1$ mm 인 경우 미분무수 분사 후 2초 후에 상당한 온도 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 액적 직경 $d=0.3$ mm인 경우 챔버 내 기체 유동장 냉각효과가 매우 제한적임을 알 수 있다. Fig. 6,

Fig. 4 Particle trajectories of water mist with different injection angles. (a) $\alpha = 30^\circ$ (b) 60° (c) 90°

Fig. 5 Effects of droplet diameter on cooling performance of chamber. (a) $d = 0.1$ mm (b) 0.3 mm

Fig. 7 및 Fig. 8에서는 미분무수 분사 특성에 의한 챔버 내부 온도의 시간에 따른 변화를 비교하기 위하여 챔버 내부 온도의 체적평균을 구하여 그래프로 나타내었다.

Fig. 6에 보인 것처럼 초기 분사각도에 의한 시간에 따른 챔버내 온도 변화를 보면, 모든 경우에 분사 후 5초 이내에 온도가 급격히 떨어진 후 온도 하강 속도 기울기가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 분사각 30° 인 경우, $t=50$ s (미분무수 분사 후 20초)일 때까지도 분사각 90° 인 경우에 비해 상대적으로 충분히 냉각이 이루어지지

Fig. 6 Comparison of temperature change in time for different injection angles

Fig. 7 Comparison of temperature change in time for different mass flowrates

Fig. 8 Comparison of temperature change in time for different droplet diameters

않음을 알 수 있다.

또한 질량 유량 변화의 경우, Fig. 7에 보인 것처럼 $\dot{m} = 1.25 \text{ kg/s}$ 일 때, $\dot{m} = 0.75 \text{ kg/s}$ 인 경우에 비해 분사 직후 급속히 온도 냉각이 이루어지나, $t = 50\text{s}$ 에서는 챔

버 내 온도가 거의 유사한 결과를 보였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 미분무수 액적 직경의 변화에 따른 냉각 효과는 액적 직경 $d = 0.3 \text{ mm}$ 인 경우에 비해 $d = 0.1 \text{ mm}$ 인 경우 분사 직후 냉각효과가 우수하게 나타났으나, 분사 후 10s 이후 ($t = 40\text{s}$)에서는 두 경우 모두 유사한 평균 온도를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 분사 초기 고온에서 액적 직경이 작은 경우 쉽게 기화가 되어 기화 열에 의한 냉각효과가 높으나, 일정 온도 이하로 냉각된 후에는 액적의 기화가 감소하면서 두 경우 모두 유사한 냉각 효과를 보이는 것으로 여겨진다.

그러나 화재 초기에 급속한 냉각 작용으로 인한 화재 억제 효과에 있어서는 액적 직경이 작은 경우 상대적으로 우수한 성능을 가질 것으로 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 DPM 기법을 사용하여 미분무수 분사 특성에 따른 냉각 성능 변화에 대한 수치 해석을 수행하였다. 미분무수 분사각이 큰 경우, 분사 유량이 높은 경우, 분사 액적의 크기가 작은 경우 상대적으로 냉각 성능이 높은 것을 확인할 수 있었다. 분사 액적의 직경의 경우, 추후 보다 광범위한 영역에 대하여 해석이 필요하리라 생각되며, 이와 함께 동일한 조건에서의 실험을 통하여 해석 모델링 및 결과에 대한 보다 상세한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) K. C. Adiga, R. F. Hatcher, R. S. Sheinson, F. W. Williams and S. Ayers, "A computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent", Fire Safety Journal, Vol. 42, 2007, pp. 150~160.
- (2) Y. Sinai, P. Stopford, M. Edwards and S. Watkins, "CFD modeling of fire suppression by water spray: sensitivity and validation for a pool fire in a room", The 8th International IBPSA Conference, Netherlands, 2003.

- (3) W. Kalata, K. Brown and R. J. Schick, "Dimensional, thermal and evaporative spray plume characteristics using computational fluid dynamics", The 11th Triennial International annual conference and liquid atomization and spray systems, U.S.A, 2009.
- (4) M. St-georage and J. M. Bucklin, "Detailed single spray experimental measurements and one dimensional modeling", International Multiphase Flow Journal, Vol. 20, 1994, pp. 979~992.
- (5) K. Y. Bae, H. T. Chung, H. B. Kim and Y. S. Han, "Numerical investigation on the effects of water mist characteristics on fire suppression", 2007 Fall KSME Conference, Korea, 2007.
- (6) S. E. Gant, "CFD modeling of water spray barriers", Health and safety laboratory report, 2006.
- (7) H. T. Chung, C. H. Lee, B. I. Choi, Y. S. Han, and Y. W. Ock, "Application of CFD technigue to performance prediction of spray characteristics of water-mist fire suppression nozzles", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 11, 2006, pp. 56~61.
- (8) A. B. Liu, D. Mather and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays", SAE Technical Paper 930072, SAE, 1993.
- (9) FLUENT Inc., "ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide", Fluent Inc. Lebanon., 2009.
- (10) 이창효, 정희택, 최병일, 한용식, 옥영욱, "미분무수 소화시스템의 분무 및 소화 특성 예측을 위한 유동장 수치 시뮬레이션", 대한기계학회 2006년도 춘계학술대회 논문집, 2006, pp. 710-715
- (11) 배강열, 정희택, 김형범, 김찬희, 이창효, 김창, "이동식 미분무수 노즐의 소화 특성에 대한 수치 시뮬레이션", 한국동력기계공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집, 2007, pp. 44~50.