

## 액적분열을 고려한 미세물분무 화재제어에 대한 수치해석

### Numerical Study on Fire Suppression using a Water-mist System Considering Droplet Breakup

고승우\* · 고권현\*\* · 유홍선†

Seung-Woo Ko · Kwon-Hyun Ko · Hong-Sun Ryou

#### Abstract

This paper describes the effect of the droplet breakup process on fire suppression using a water-mist system, which is considered as an alternative to sprinkler fire suppression system. In the evolution of the water-mist, the droplet breakup process is an important phenomenon because it may significantly affect the droplet evaporation rate. The Fire Dynamics Simulator (FDS, Ver. 4.0) code, which is widely used for the simulation of fire dynamics, is used for the present simulation, and it is modified to consider the droplet breakup phenomena. The Prediction by the modified code shows good agreement with experimental data for the temperature. The original FDS predicts higher temperature about 30°C than experimental data. From the results, it is concluded that the droplet breakup phenomena must be considered for more precise simulation of fire suppression process.

**Keywords** : Droplet Breakup(액적분열), Water-mist(미세물분무)

#### 1. 서론

산업사회를 위협하는 많은 인위재해 중에서도 화재에 의한 피해는 인명손실 뿐만 아니라 경제적 손실과 사회적 혼란을 가지고 오고 있다. 특히 최근 빈번히 발생했던 대형화재로 인해 많은 인원이 밀집되는 대중 공간, 교통시설 및 국가 산업의 중요 시설물에 대한 적절한 화재 방호 시스템의 필요성에 대한 인식이 증대되고 있다. 이러한 화재 제어장치로서 가스계 소화설비인 Halon계 소화약제나 이산화탄소 소화설비 등이 주로 사용되어 왔다. 그러나 Halon의 경우 1987년 몬트리얼 협정에 의해 환경파괴물질로 규정되어 사용이 제한되고 있다. 이에 대한 대안으로서 미세물분무에 대한 관심이 고조되어 왔으며 선진국에서는 미세물분무 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일반적으로 미세물분무에 의한 화재 제어는 미세 액적에 의한 화염 및 플럼(plume)의 냉각효과, 액적 증발과정에서 발생하는 체적 팽창으로 인한 산소차단 효과 등에 의해 이루어진다.

기존의 스프링클러와 달리, 미세물분무의 경우 작동 압력 및 분사 속도가 매우 크기 때문에 주변 기상과의 공기역학적 상호작용에 의한 액적분열 현상이 활발히 발생하여 액적의 크기 및 속도 등의 특성을 크게 변화시킨다. Reitz와 Diwakar [1]는 기상의 밀도 변화에 따른 공기 역학적 액적분열 특성을 파악하고 액적 분열 과정에 대한 수치해석 모델을 제시한 바 있다. Yoon 등[2]은 화재제어용 노즐에서 분사되어지는 액적의 초기 입경분포에 대하여 Rosin-Rammler 분포를 이용하여 수치해석을 수행하였으며 액적의 입경 분포에 대한 실험 결과와의 비교를 통하여 노즐 출구에서의 액적 분포 특성에 대하여 분석한 바 있다. Yao 등[3,4]은 미세물분무에 의한 연층의 전파 억제, 연층 냉각 효과에 대한 연구를 수행하였고, 물분무와 연층의 상호작용 모델을 제시하였다. 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator ver 4.0)는 대표적인 화재 시뮬레이션 코드로써 다양한 화재 관련 분야에서 널리 사용되고 있다[5,6]. 그러나 FDS 코드는 스프링클러에 대한 해석 모델만이 포함되어 있어 미세물분무에서의 공기역학적 분열 과정을 고려할 수 없다. 액적의 특성, 특히 액적의 크기는 증발하는 수증기의 양, 그리고 이로 인한 화재 제어 및 소화 특성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 액적분열 과정을

† 책임저자 : 정희원, 중앙대학교 기계공학부, 교수  
E-mail : cfdmec@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669

\* 비회원, 중앙대학교, 대학원 석사과정

\*\* 비회원, 미국 표준과학 연구소(NIST), 연구원

적절히 모사하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 FDS 코드에 Reitz와 Diwakar[1]가 제시한 액적분열 모델을 적용하여 실내 공간내의 화재 제어 과정에 대한 수치해석을 수행하였다. 액적분열 모델을 이용한 수치해석 결과는 FDS 코드에 의한 해석 결과 및 실험 결과와 비교하고 화재 공간의 천정 온도 및 화염 주변의 산소, 수증기 농도 등의 예측에 미치는 액적분열 모델의 영향을 파악하였다.

## 2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치에 대한 개략도를 나타내고 있다. 화재실의 체적은 36m<sup>3</sup>으로 크기는 3×3×4m로 제작하였으며, 강철 판재로 제작되었다. 벽의 두께는 0.1m이며 강철 판재 사이에 난연재를 삽입하여 외부로의 열전달을 최소화 하였다. 노즐의 위치는 화재실의 중앙, 높이는 2.8m 지점이며, 직분사용 5구경 노즐을 사용하였다. 노즐의 특성 및 작동조건은 Table 1에 나타내었다. 화재실 천정부에 총 8개의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 화재실 내부의 초기온도는 약 32℃이며, 밀폐된 공간에서 실험을 실시하였다. 화원 위치는 화재실 중앙에 위치시켰으며, 화원의 크기는 한 변의 길이가 각각 30cm, 60cm인 정사각형 풀을 사용하였다. 노즐의 작동시간은 화재 발생 후 화재실 내부의 온도가 72℃도달 후 반응시간을 10초로 하였다. 화원의 크기가 30cm인 경우 30초, 60cm인 경우에는 14.3초에 노즐을 작동시켰다.

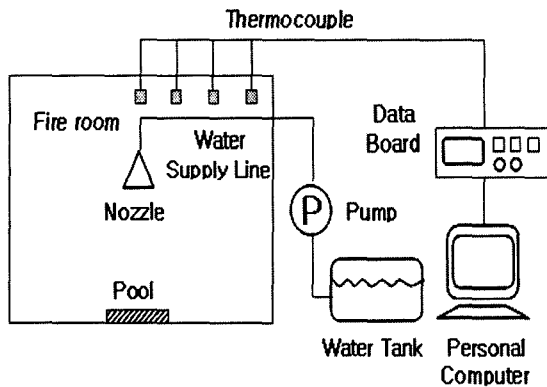


Fig. 1. Schematic diagram of the present experimental apparatus

Table 1. Characteristics of 5-hole Nozzle

K-Factor	작동압력	Flow Rate	분사각	초기 분사속도
1.14	80bar	10.87lpm	98°	67.56m/s

## 3. 수치해석 모델

### 3.1 스프레이 모델

본 연구에서 적용된 물분무의 거동을 해석하기 위하여 Eulerian-Lagrangian법에 의해 기상과 미세물분무 액적과의 유동을 해석하였으며 분무액적의 거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

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

여기서 항력계수와 레이놀즈수는 각각 다음과 같이 결정된다.

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

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

$m_d$ 는 액적의 질량,  $u_d$ 는 액적의 속도,  $u$ 는 기상의 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $r_d$  액적의 반경을 나타낸다. 액적이 분사된 후 기상의 저항으로 인하여 2차적인 액적 분열현상이 발생하게 된다. 그러나 기존의 FDS 코드에서는 이러한 현상을 고려하지 못하고 증발에 의한 액적크기의 변화만을 고려하고 있다. 본 연구에서는 Reitz 와 Diwakar[1]가 제시한 모델에 의한 분무액적의 2차 분열을 기존의 FDS 코드에 적용하였다. Reitz and Diwakar 모델(R&D 모델)에서는 웨버수에 따라 bag breakup과 stripping breakup의 두 가지 형태의 액적분열을 고려하고 있다.

$$We = \frac{\rho_d u_d^2 r_d}{\sigma} > 6.0 \text{ (bag breakup)} \quad (4)$$

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} > 0.5 \text{ (stripping breakup)} \quad (5)$$

여기서  $We$ 는 웨버수이며,  $\sigma$ 는 표면장력,  $\rho_d$ 는 액적의 밀도를 나타낸다. 액적의 상태가 위의 조건을 만족할 때 액적은 불안정한 상태가 되고 액적의 수명은 각각 다음과 같다.

$$t_b = C_b \left( \frac{\rho_d D_d^3}{\sigma} \right)^{1/2} \text{ (bag breakup)} \quad (6)$$

$$t_s = C_b \frac{D_d}{u_r} \left( \frac{\rho_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \text{ (stripping breakup)} \quad (7)$$

$u_r$ 은 기상과 액적의 상대속도이며  $C_b$ 는 경험상수로써 본

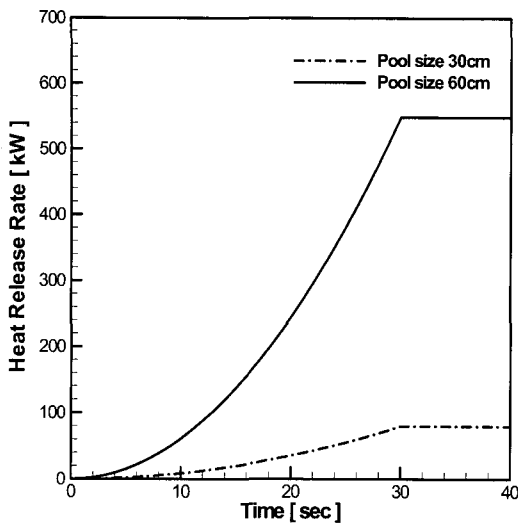


Fig. 2. Heat Release Rate for pool size 30cm and 60cm

연구에서는 Reitz와 Diwakar[1]가 사용한 10을 사용하였다. 따라서 불안정한 액적의 크기는 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$\frac{dD_d}{dt} = -\frac{D_d - D_{stable}}{t_{b(s)}} \quad (8)$$

### 3.2 발열량 산정

수치해석에서 적용된 30cm, 60cm 크기의 화원에 대한 발열량의 산정은 다음과 같다[7].

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \quad (9)$$

$\dot{Q}$ 은 발열량,  $A$ 는 화원의 면적을 나타내며,  $\Delta H_c$ 는 연소열,  $\dot{m}''$ 는 연소율을 각각 나타낸다. 탱크의 경우  $\Delta H_c$ 는 44.6MJ/kg이며, 위의 식에 의하여 발열량을 구하였으며, 연소효율은 0.7로 하였다. 풀의 크기가 30cm인 경우 79.77kW, 60cm의 경우 548.45kW이다. Fig. 2는 수치해석에서 사용된 발열량 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2는 수치해석에서 사용된 발열량 곡선을 나타낸 것이다. 격자수는 384,000(80×80×60)개이며 한 case 당 계산시간은 Pentium-4 2.4GHz를 이용하여 약 10시간 정도가 소요되었다.

## 4. 결과 및 고찰

미세물분무에 의한 화재제어에 대한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하여 액적 분열현상이 미치는 영향에 대하여 분석하였다. Fig. 3은 R&D 모델과 FDS 코드에서 예측되어진

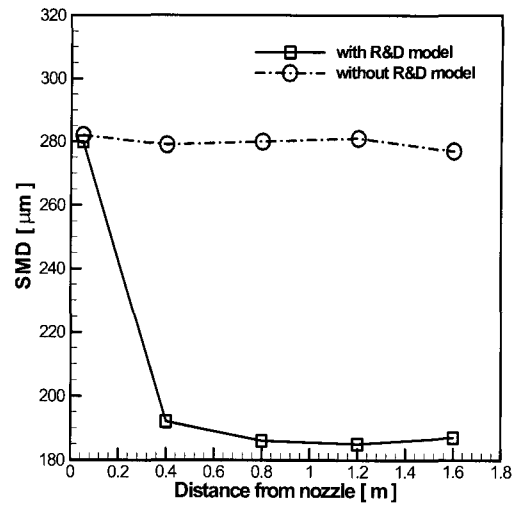


Fig. 3. Comparison of SMD between R&D model and FDS

액적의 SMD(Sauter Mean Diameter)변화를 나타내고 있다. R&D 모델을 고려한 FDS 코드해석의 예측결과를 살펴보면 노즐에서 분사되어지는 초기 액적의 SMD는 약 280 $\mu$ m이며, 노즐로부터 약 40cm 하단에서는 액적분열이 발생하여 액적의 SMD가 190 $\mu$ m로 예측되어지고 있다. 반면 FDS 코드의 경우 액적의 SMD는 280 $\mu$ m으로 유지되어지고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 4, 5는 액적 분열 모델을 고려한 FDS 코드, 기존 FDS 코드 및 실험에서의 시간에 따른 화재실 내부의천정부 평균온도 변화를 나타내고 있다. 미세 물분무과 작동하기 전까지의 천정부의 연층온도는 비교적 정확한 결과를 예측하였다. 풀의 크기가 30cm의 경우 실제 실험에서 측정된 최대온도에 비하여 약 15 $^{\circ}$ C 정도 상향 예측되었고, 이러한 현상은 외부로의 열전달 조건이 실제와는 다소 차이가 있으며 또한 실험은 수치해석과는 달리 밀폐된 공간이 아니기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 또한 정확한 발열량의 선정에도 어려움이 있어, 이러한 차이가 발생되어진다. 반면 풀의 크기가 60cm의 경우 미세물분무 작동전의 천정부 평균온도의 변화가 정확히 예측되고 있음을 알 수 있다. 미세물분무 작동 후의 온도 변화를 살펴보면 풀의 크기가 30cm인 경우 액적분열에 의한 효과가 크지 않지만 천정부의 연층온도의 냉각이 기존의 FDS 코드에서의 결과에 비하여 빠르게 이루어지는 것을 볼 수 있다. 풀의 크기가 60cm인 경우는 액적분열에 의한 액적의 표면적의 증가로 인한 효과가 확실히 나타나고 있다. 14.3초에 미세물분무가 작동된 후 온도 변화를 살펴보면 기존 FDS 코드의 경우 연층의 온도가 지속적으로 증가하고 있으나 R&D 모델을 고려한 해석 결과에서는 연층 온도 상승이 억제되고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 풀의 크기가 60cm

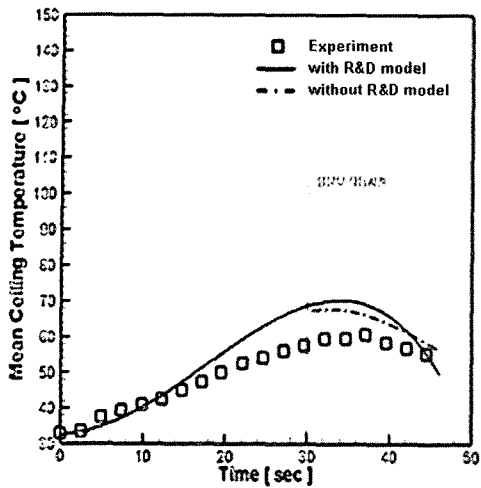


Fig. 4. Comparison of experimental and predicted mean ceiling temperature for pool size 30cm

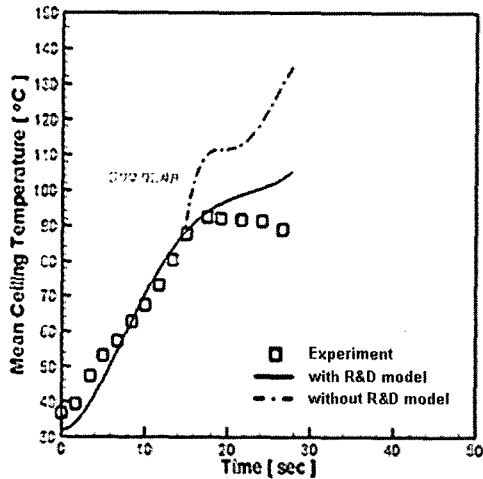
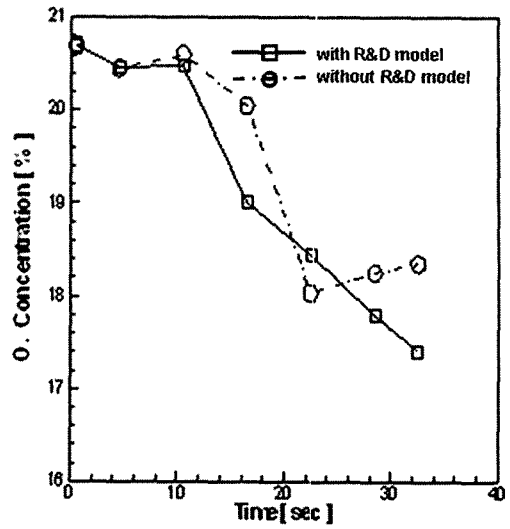
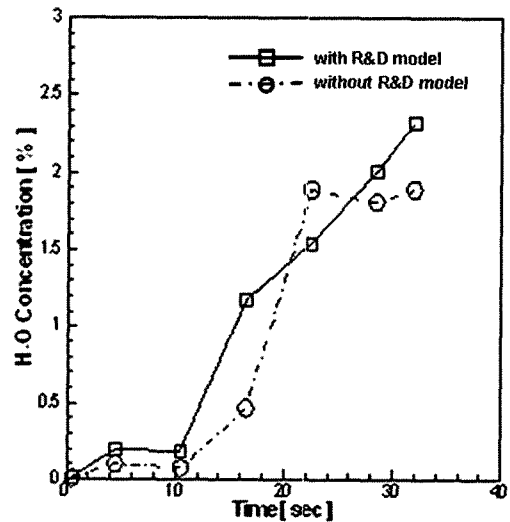


Fig. 5. Comparison of experimental and predicted mean ceiling temperature for pool size 60cm



(a) O<sub>2</sub> concentration



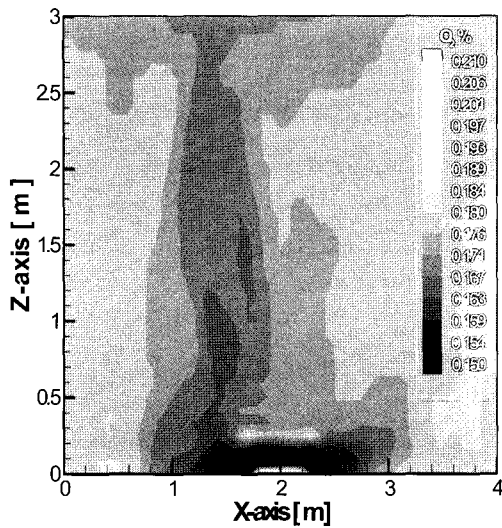
(b) H<sub>2</sub>O concentration

Fig. 6. Variation of concentration for Pool size 60cm

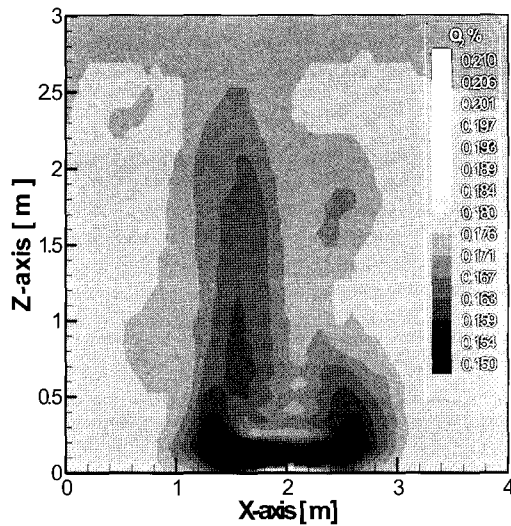
인 경우의 화원 주변의 시간에 따른 산소농도와 수증기 농도의 변화를 보여주고 있다. 미세물분무에 의한 화재제어에서 화원 주변의 산소차단에 의한 질식효과는 중요한 화재 소화 메커니즘 중의 하나이며 액적의 증발함에 따라 발생하는 수증기에 의하여 화원으로의 산소공급을 차단한다. R&D 모델을 고려한 경우 미세물분무 작동이후 화원 주변의 산소농도가 급격히 감소하는 것에 비하여 기존 FDS 코드에 의해 예측된 산소농도는 18%까지 감소한 이후에는 더 이상 감소하지 않는 것을 알 수 있다. 화원 주변에서의 수증기 농도는 액적의 증발율을 나타낸다. R&D 모델을 고려한 경우 미세물분무 작동 후 수증기의 농도가 지속적으로 높아지며, 기존 FDS 코드에 의한 결과에 비하여 수증기의 농도가 약 0.9% 정도 높

게 나타나는 것을 볼 수 있다. R&D 모델을 고려한 경우, 산소 차단에 의한 질식효과가 기존의 FDS 코드의 예측결과에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 미세물분무를 이용한 화재제어에 대한 수치해석시 액적분열 및 충돌 현상을 고려하여 할 것으로 사료된다.

Fig. 7는 Pool size 60cm의 경우에 대한 산소 농도 분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 화원 주변에서의 산소농도 분포에서 확인한 차이를 확인 할 수 있다. 미세물분무에 의한 화재 진화효과 중의 하나인 산소차단에 의한 질식효과가 R&D 모델을 고려한 수치해석 결과에서는 산소농도 15% 이내의 범위가 기존 FDS의 결과에 비하여 화원주변에 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다.



(a) FDS without R&D model



(b) FDS with R&D model

Fig. 7. Contours of O<sub>2</sub> concentration in for pool size 60cm

## 5. 결론

본 연구는 미세물분무의 특성인 액적분열 모델을 고려하여 FDS 코드를 수정하였다. 이러한 R&D 모델이 고려된 코드와 기존의 FDS 코드에서의 예측결과를 실험에서 측정된 결과와 비교하여 액적분열 모델에 의한 화재 제어 특성에 관하여 알아보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액적분열에 의한 액적의 직경 변화는 화재 제어에 있어 액적의 증발율에 영향을 미친다. 천정부의 온도분포를 비교한 결과 액적분열에 의하여 증발율이 증가하여 천정부의 온도가 R&D 모델을 고려하지 않은 FDS 코드에 비하여 약 20°C 낮게 예측되고 있으며, 이는 연층부의 냉각효과가 크다는 것을 의미한다.
- (2) 액적분열을 고려한 수치해석에서의 화원주변의 산소농도가 R&D 모델을 고려하지 않은 경우에 비해 빠르게 감소하여 액적 증발에 의한 질식효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 액적의 분열로 인하여 액적의 표면적이 증가함에 따라 증발율이 증가한다는 것을 파악하였다. 이러한 결과를 통하여 액적분열을 고려한 수치해석의 경우 미세물분무에 의한 화재 제어 효과가 비교적 잘 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2006년도 중앙대학교 교내연구비에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. R. D. Reitz and R. Diwakar (1985). "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," SAE paper870598.
2. S. S. Yoon, J. C. Hewson, P. E. DesJardin, D. J. Glaze, R. R. Black, R. R. Skaggs (2004). "Numerical modeling and experimental measurements of a high speed solid-cone water spray for use in fire suppression applications," International Journal of Multiphase Flow, Vol.30, pp.1369-1388.
3. W. K. Chow, B. Yao (2001). "NUMERICAL MODELING FOR INTERACTION OF A WATER SPRAY WITH SMOKE LAYER," Numerical Heat Transfer, Part A, 39; 267-283.
4. Yao, B, Fan, W. and Liao, G (1999). "Interaction of Water mists with a Diffusion Flame in a Confined space," Fire safety Journal, Vol.33, pp.129-139.
5. 김성찬, 유홍선 (2003). "물분무에 의한 화재제어 특성에 관한 연구," 설비공학논문집 제15권 제4호, pp.261-267.
6. 김성찬, 박현태, 유홍선 (2003). "물분무를 이용한 화재제어에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제3호, pp. 367-373.
7. Quintiere J. G (1998) "Principles of fire behavior," New york, Delamar publishers.