

# 물분무노즐의 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향

김 성 찬\*· 유 흥 선<sup>†</sup>· 박 현 태\*· 방 기 영

## Effect of Spray Angle of Water Mist Nozzle on Temperature Field of Compartment Fire

Sung Chan Kim, Hong Sun Ryou, Hyun Tae Park, and Ki Young Bang

**Key Words:** Fire suppression(화재제어), Water mist(물분무), Spray angle(분사각), Numerical simulation(수치해석)

### Abstract

The present study investigates the effect of injection angle of water mist on fire suppression characteristics by numerical simulation. In order to validate the temperature field by numerical simulation, the predicted results are compared with experimental data. It shows that the temperature difference between measurements and predictions are within 10°C. Numerical simulations of fire suppression are performed for 4 different injection angle(60°, 90°, 120°, and 180°). The global mean temperature over the fire compartment decrease with increasing of spray angle. The result shows that the heat transfer between droplets and gas phase are enhanced with the increasing of spray angle. Near the fire source, temperature field by the wide spray angle is slightly higher than that of narrow injection angle because of direct cooling of fire source.

#### 기호설명

$u_d$	: 액적의 속도 [m/s]
$m_d$	: 액적의 질량 [kg]
$T_d$	: 액적의 온도 [K]
$g$	: 중력가속도 [ $m/s^2$ ]
$C_D$	: 항력계수
$h$	: 대류열전달 계수 [ $W/m^2K$ ]
$A_d$	: 액적의 표면적 [ $m^2$ ]
$Re$	: Reynolds 수
$Nu$	: Nusselt 수
$Pr$	: Prandtl 수
$Sh$	: Sherwood 수

$Q$	: 발열량 [kW]
$\Delta H_c$	: 연소열 [kcal/kgK]

### 1. 서 론

수계소화설비(Water Based Fire Suppression System)는 물을 분무액적의 형태로 분사하므로써 표면적을 증가시켜 화염 및 연층의 냉각, 분무증발에 의한 산소차단 및 분무에 의한 복사열 차단을 유도하여 화재를 억제하는 설비이다. 이러한 수계소화설비는 생성되는 액적의 크기에 따라 분류되며 스프링쿨러나 물분무(Water mist)등이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 스프링쿨러는 비교적 간단한 가압시스템을 이용하여 1mm 이상의 액적을 분사하여 화원과 가연물의 직접적인 냉각을 통하여 화재를 제어한다. 그러나 스프링쿨러설비의 경우 지나친 물소모량으로 인하여 소화과정중에 발생하는 수손으로 인한 피해와 부차적으로 방출된 물에 의한 수질오염의 우려가 크다.

<sup>†</sup> 중앙대학교 기계공학부

E-mail : cfdmcc@cau.ac.kr

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

\* 중앙대학교 기계공학과 대학원

또한 유류화재에 적용시 물의 비중이 상대적으로 크기 때문에 적절한 소화효과를 도모하기 힘들다. 한편 물분무 시스템은 상대적으로 높은 압력을 이용하여 미세한 물분무 액적을 생성함으로써 분사되는 유량을 최소화하고 미세한 액적의 증발을 통한 산소차단 및 화염냉각을 통해 화재를 제어함으로써 수손 및 환경오염을 최소화하고 질식효과에 의한 유류화재에 적용이 가능하다. 이러한 물분무 화재제어 시스템은 감지장치, 가압 및 배관설비 및 분무노즐로 구성되는데 가압, 배관설비가 동일할 경우 화재 제어성능은 분무노즐에서 분사되는 분무특성에 의해 결정되게 된다. 화재진압에 영향을 미치는 분무특성으로는 분무액적의 크기, 분사유량, 분사압력, 분무형태(Spray pattern), 분사각등이며 일반적으로 알려진바로는 분사유량과 분사압력의 영향이 가장 크며 분사유량과 분사압력이 동일한 경우 액적증발에 의한 열전달 효과에 가장 큰 영향을 미치는 액적크기가 매우 중요한 요인이 된다. 따라서 물분무에 대한 주요연구도 이러한 분사압력 및 유량, 분무액적의 크기의 영향에 집중되어져 왔으며 상대적으로 많은 연구 성과가 이루어져왔다.<sup>(1-4)</sup> 그러나 분사각이나 분무형태가 화재제어특성에 미치는 영향에 관한 연구는 매우 드문실정이다. 특히 분사각의 영향을 파악하기 위해서는 동일한 분사유량, 분사압력, 분무액적의 크기를 가지면서 분사되는 각도만 변경할 수는 노즐을 제작하기가 매우 어려운 문제이므로 실험적이 고찰이 매우 힘들다. 이러한 이유로 수치해석적 접근을 통해 분사각변화가 화재제어에 미치는 영향을 정성적으로 파악할수 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석적 접근에 의해 다른 분사조건을 동일하게 유

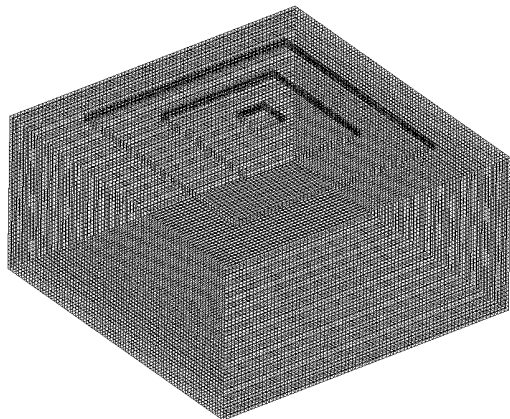


Fig. 1. Grid system of fire compartment.

지하면서 분사각만을 변화시키므로써 분사각의 변화가 화재 제어에 미치는 영향을 파악하였으며 물분무 화재 제어시스템에서 요구되는 분사각의 적정수준의 정도를 파악하고자 한다. 본 연구의 내용은 한가지 분무노즐에 대한 실험와 수치해석 결과를 비교하여 수치해석해의 타당성을 파악하고 이를 바탕으로 분사각을 변화시키면서 수치해석을 수행하여 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 수치해석적 접근 및 검증

### 2.1 수치해석

화재의 발생과 물분무에 의한 화재제어효과를 수치해석적으로 파악하기 위하여 본 연구에서 이용된 수치해석 코드는 미국의 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발중인 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 3를 기본으로 하였다. 난류유동장의 해석은 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 적용하였으며 연소모델은 혼합분율모델(Mixture fraction model)을 적용하고 있으며 복사열전달의 해석은 유한체적법에 의해 해석되었으며 벽면과 연층의 열전달을 고려하기 위하여 벽에서의 1차원 전도열전달을 해석하여 벽면으로의 열손실을 고려하였다. 기상과 분무액적과의 유동해석은 Eulerian- Lagrangian 방법을 적용하였으며 분무액적의 거동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_d u_d) &= m_d g - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (u_d - u) |u_d - u| \\ C_D &= \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 1 < Re < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re \end{cases} \\ Re &= \frac{\rho |u_d - u| D_d}{\mu_g} \end{aligned} \tag{1}$$

기상과 액적사이의 열 및 물질전달에 관한 식은 Ranz and Marshall 식을 이용하였다.<sup>(5-6)</sup>

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

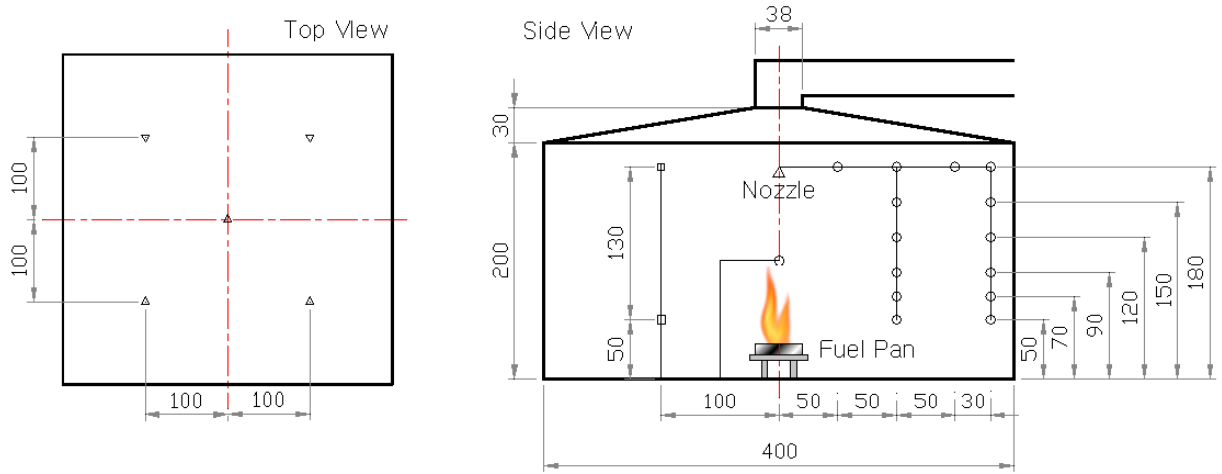


Fig. 2. A Schematic of the experimental setup. [unit:cm]

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d Sh \rho D (Y_d - Y_g) \quad (3)$$

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

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

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

분사되는 초기 액적의 크기분포는 실험에서 측정된 액적크기분포와 비교하여 비교적 정확한 분포를 예측한 Rosin- Rammmler 분포를 이용하였으며 분포함수는 다음과 같다.

$$F(d) = 1 - e^{-0.693(\frac{d}{d_m})^7} \quad (4)$$

여기서  $\gamma$ 는 실험상수로써 2.4를 이용하였다.<sup>(7)</sup> 수치해석에 이용된 격자계는 직교격자계로 상부 후드부의 경사면은 계단식 격자를 이용하여 표현하였으며 계산에 이용된 격자수는 약 340,000개이며 전체 계산격자계는 Fig. 1과 같다. 화재 발생 이후 600초까지 계산하는데 걸린시간은 Pentium - IV 1.7GHz를 이용하여 약 30시간정도 소요되었다.

Table 1 Heat release rate of hexane fire

Pool size[m]	Heat Release Rate [kW]
0.3 × 0.3	115
0.4 × 0.4	195

### 2.2 실험조건

Figure 2는 화재공간의 크기와 화재실내부의 온도측정을 위한 열전대의 위치를 나타내고 있다. 분무노즐은 5개를 설치하였으며 화원은 화재실의 중앙에 위치하고 있다. 실험에서 이용된 화원은 정사각형의 풀화재(Pool fire)로써 각변의 길이는 각각 0.3m, 0.4m이며 연료는 n-Hexane을 이용하였고 화원의 발열량은 다음과 같은 식에 의해 산정되었다. 전체 발열량은 Table 1과 같다.

$$Q = \dot{m}_f \Delta H_C A_f \quad (5)$$

실험에 이용된 물분무 노즐은 본연구를 통해 개발된 압력형 와류노즐로써 개략적인 분무 특성은 Table 2와 같고 분사유량은 6lpm이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석 결과의 검증

Table 2 Specifications of the tested nozzle

Sauter Mean Diameter (SMD)	121 $\mu$ m
Spray angle	Outer : 90° Inner : 70°
Operating pressure	13 bar
K-factor	1.66
Spray pattern	Hollow cone type

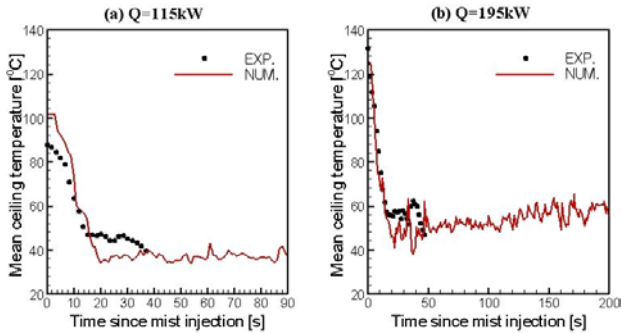


Fig. 3. Comparison of mean ceiling temperature.

수치해석 결과의 정확성을 파악하기 위하여 실험에서 천정의 네군데 위치에서 측정된 온도의 평균값과 수치해석에서 계산된 평균온도를 비교하였다. Figure 3은 두가지 화원에 대하여 물분무 작동이후 천정에서의 평균온도를 보여주고 있다. 실험에서 화재는 두 경우 모두 약 50초 이내에서 소화가 이루어 졌다. 그러나 수치해석에서는 소화가 이루어지지 않고 화재가 지속적으로 유지되었다. 이는 수치해석에서 화재 소화에 대한 조건에 기인한 것으로 현재 FDS 코드에서는 전체공간내부에 대한 산소의 몰분율(Mole fraction)이 일정한 값보다 작은경우에만 소화가 일어나는 것으로 모델링이 되어 있다. 그러나 실제화재의 경우 공간전체의 산소농도보다는 화원근처에서 액적증발과 함께 체적팽창으로 인한 산소차단 효과가 국부적으로 발생하고 이와 함께 물분무에 의한 화원의 냉각과 같은 복합적인 요인에 의해 소화작용이 이루어 지는 것으로 사료된다. 한편 물분무 작동이후 초기 냉각시간동안에 온도분포는 수치해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있

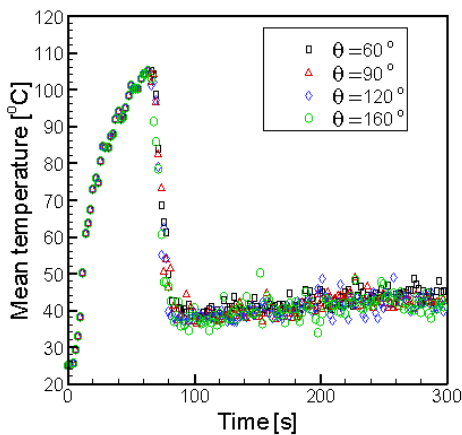


Fig. 4. Mean ceiling temperature for 30cm hexane fire.

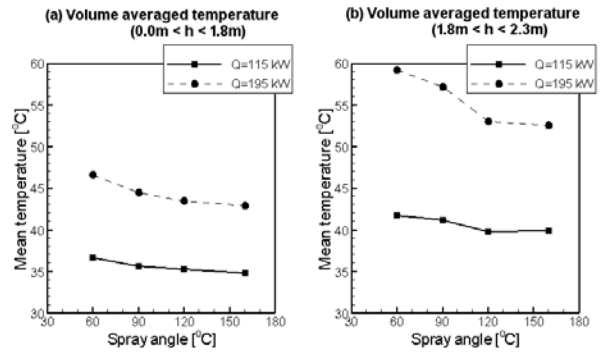


Fig. 5 Comparisons of volume averaged temperature for different spray angle.

Table 3 Mean temperature after mist discharge

Fire size	Spray angle ( $\theta$ )			
	60°	90°	120°	160°
115 kW	44.9°C	43.5°C	43.0°C	42.5°C
195 kW	45.6°C	43.6°C	43.5°C	43.0°C

으며 최대 오차는 약 10°C 정도로 만족할 만한 결과를 제공하였다. 따라서 FDS 코드에 대한 온도장의 결과는 타당성을 가지고 있으며 분사각 변화에 따른 공간내부의 온도장 변화를 통하여 물분무 노즐의 분사각 영향을 파악하고자 한다.

3.2 분사각의 영향

분사각 변화의 영향을 파악하기 위하여 분사유량은 6lpm으로 고정하였으며 분사각은 4가지 경우( $\theta = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 160^\circ$ )를 고려하였다. 물분무 작동이전 자연연소(Free burn)시간은 1분으로 설정하였다. Figure 4는 115kW hexan화재에 대한 천정의 네 위치에서의 온도를 평균하여 시간변화에 따라 표시하였다. 천정의 온도분포의 변화는 점화이후 지속적으로 증가하다가 물분무 작동이후 급격히 감소하며 이후 일정한 온도로 유지되고 있다. 네가지 분사각변화에 대해서 온도분포의 큰 변화를 보이지 않고 있다. Table 3에서는 물분무 작동이후 천장의 평균온도를 두가지 화원에 대하여 비교한 결과를 보여주고 있다. 천정의 온도는 분사각이 증가함에 따라 감소하고 있으며 두가지 화원모두 최대 2.5°C 정도의 온도차이를 보이고 있다. Figure 5는 물분무 작동후 30초후 바닥에서의 높이 1.8m를 기준으로 상부층의 전체 체적에 대한 평균온도와 하부층의 평균온도를 보

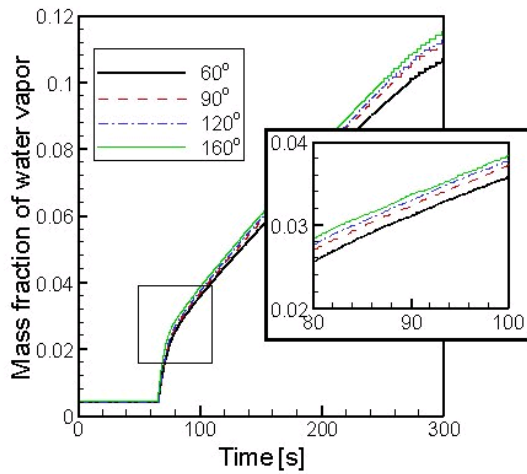


Fig. 6. Water vapor mass fraction of 30cm hexane fire.

여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 분사각이 클수록 상층부 및 하층부에서의 평균온도는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 분사각이 120° 이상에서는 온도차이가 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 분사각이 커짐에 따라 공간내부에 존재하는 분무액적들의 분포가 폭넓어 지게 되어 액적간 거리가 증가하고 그로 인하여 연층의 가스로부터 더 많은 열을 분무액적이 흡수하여 증발하기 때문에 전체적인 온도가 감소

하는 것으로 사료된다. Figure 6은 115kW 핵산화재의 시간에 따른 화재공간내부에서 증발된 수증기의 질량분율변화를 보여주고 있다. 그림과 같이 동일시간에 증발된 수증기의 질량분율은 분사각이 클수록 크게 나타났다. 그러나 분사각이 90° 이상인 경우에 대해서 수증기의 질량분율의 차이가 상대적으로 적게 나타났다. Figure 7은 115kW 핵산화재시 물분무 분사 30초후의 중앙단면에서 온도분포를 보여주고 있다. 공간내부의 평균온도와는 달리 화원부근에서의 온도분포는 분사각이 작을수록 낮고 분사각이 클수록 높게 나타났다. 이는 분사각이 작을수록 액적의 밀집도가 높고 그로인하여 화원부근에 도달하는 유량이 상대적으로 높기 때문에 화원부근에서의 냉각효과가 크게 나타나게 된다. 따라서 분사각이 클 경우 액적간 간격이 크기 때문에 열전달을 활발히 일어나므로 그에 따른 액적의 증발량도 증가하여 전체 화재 공간내부의 온도는 감소하지만 화염의 직접적인 냉각효과는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 분사각이 지나치게 작은 경우 공간내부 온도하강을 유도하는데 다소 불리한 점이 있으나 화원으로의 직접분사가 가능한 경우 화원의 직접 냉각을 통한 화재소화에 유리할것으로 생각된다. 반대로 분사각이 큰 경우 공간내부의 온도를 하

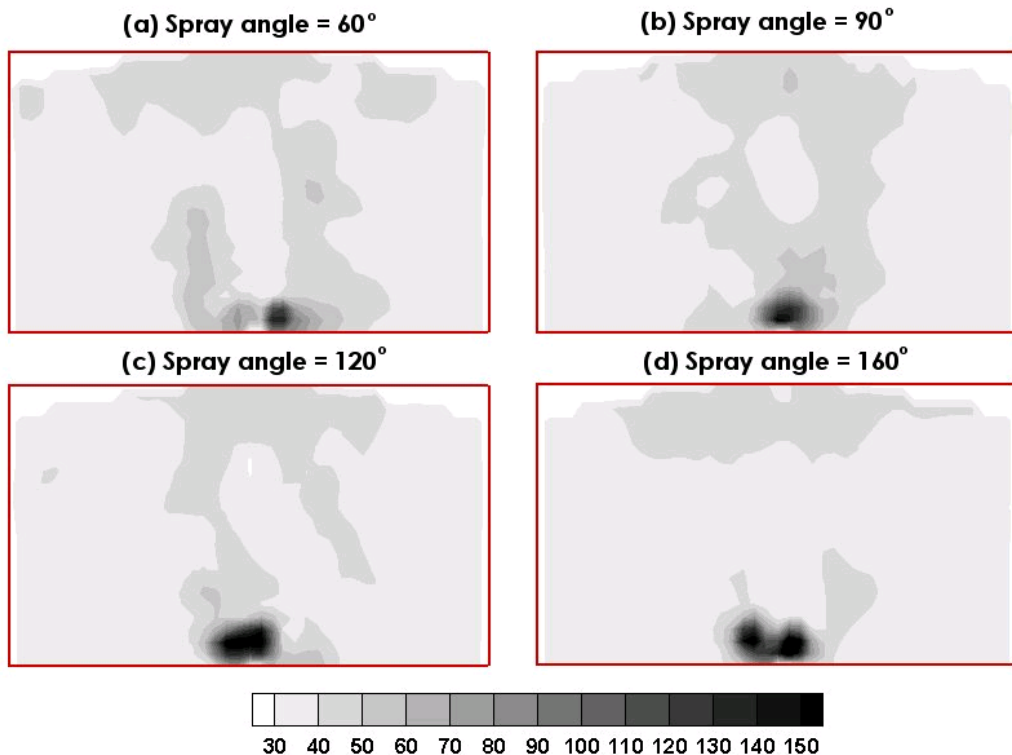


Fig. 7. Comparison of temperature field for 30cm hexane fire (30s after mist injection).

강시키는데는 효과적이거나 화원의 직접냉각을 통한 소화에는 다소 불리할 것으로 사료된다. 따라서 화재공간특성 및 목적에 따라서 적절한 분사각을 가진 노즐을 혼용할 경우 보다 효율적인 화재 제어가 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 물분무에 의한 화재제어에 대하여 실험과 수치해석을 비교하여 수치해석에서 예측된 온도장의 타당성을 확보하고 이를 바탕으로 분무의 분사각이 화재실내부의 온도분포에 미치는 영향을 수치해석적으로 파악하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치해석에서 예측된 온도장은 실험치의 온도장과 10℃ 이내로써 비교적 타당한 결과를 보여주었다.

2. 분사각이 증가함에 따라 화재실 내부의 평균온도는 감소하였으며 이는 액적이 전체 공간에 대하여 고르게 분포하게 되고 그로인하여 액적간 거리가 증가하여 공간내부에서 증발되는 수증기의 양이 증가함으로써 공간내부의 평균온도가 하강하는 것으로 생각된다.

3. 현재 FDS모델은 온도장에 대해서는 비교적 타당한 결과를 가지고 있으나 소화시간 예측에는 다소 큰 오차를 가지고 있다. 이는 소화모델의 부적절함에 기인하는 것으로 향후 국부적인 산소농도 및 화원의 직접냉각등 다양한 소화미커니즘에 대한 연구를 바탕으로 모델을 수정할 필요가 있다.

4. 화재공간의 특성을 고려하여 분사각이 다른 노즐을 적절히 혼용함으로써 보다 효율적인 화재 제어효과를 얻을수 있다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Herterich O., 1960, Water as an extinguishing agent, Alfred Hüthig Publishing Company, Heidelberg.
- (2) Ohkubo H, Nishio S., 1990, Study on accurate prediction of heat transfer characteristics of mist cooling, JSME Int. J. Ser. II, Vol. 33, No. 2, pp 326~332.
- (3) Kaleta A., 1986, Effect of drop size on extinguishing effectiveness of a water spray, Archivum Combustions, Vol. 6, No.3, pp. 201-212.
- (4) Hirst R., 1989, Underdown's practical fire precautions, 3rd edn., London, Gower Press.
- (5) Ranz, W., E., and Marshall, Jr. W.,R., 1952, Evaporating from drops, Part I, Cham. Eng. Prog., Vol. 48, pp. 141-146.
- (6) Ranz, W., E., and Marshall, Jr. W.,R., 1952, Evaporating from drops, Part II, Cham. Eng. Prog., Vol. 48, pp. 173-180.
- (7) Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide, 2000, NIST, U.S.A