

# 통계적 액적군집수에 따른 스프링클러 분무해석의 민감도에 관한 연구 A Sensitivity Study of the Number of Parcels to the Numerical Simulation of Sprinkler Sprays

김성찬<sup>†</sup> · 이상우 · 박원주

Sung-Chan Kim<sup>†</sup> · Sang-Woo Lee · Won-Ju Park

경일대학교 소방방재학부  
(2008. 12. 4. 접수/2009. 2. 13. 채택)

## 요 약

본 연구는 스프링클러 분무의 통계적 액적수가 화재 필드모델의 해석결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행되었다. 분무거동 및 화재유동을 해석하기 위해 사용된 해석모델은 미국의 표준기술연구원에서 개발된 FDS 5.2이며, 화재 시뮬레이션에서 각 스프링클러에서 생성되는 분무액적들은 액적크기, 속도, 온도 등의 특성이 유사한 통계적 라그랑지안 입자의 군집으로 표시된다. 본 연구에서는 실제 스프링클러에서 생성되는 액적수에 대한 계산에 이용되는 통계적 액적군집수의 비를 이용하여 분무액적의 통계적 군집수의 변화가 공간내부의 분무특성 및 화재해석 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 수치해석 결과에 대한 통계적 분무액적수의 독립성을 확보하기 위해서는 FDS 모델에서 제공되는 기본값보다 다소 큰 값을 요구하고 있으며 FDS 분무 모델을 이용한 화재진압 시뮬레이션 수행시 통계적 군집수에 대한 고찰과 추가적인 민감도 해석이 필요로 한다.

## ABSTRACT

The present study has been performed to investigate the effect of statistical number of droplets on the simulation of the sprinkler spray using fire field model. In order to simulate the sprinkler spray characteristics, the present study uses NIST Fire Dynamics Simulator version 5.2. A group of Lagrangian particles with similar droplet characteristics, such as diameter, velocity, temperature and so on, is represented by parcel concept to decrease the total number of droplets tracked in the simulation. The present study introduces a new parameter to represent the ratio between real number of droplets and computational parcels. The dependency of the number of parcels on the fire suppression characteristics and spray patterns is quantitatively examined for different ratio between the real number of droplets and computational parcels.

**Keywords :** Sprinkler, Fire model, Fire suppression, Spray

## 1. 서 론

복잡한 화재현상을 이해하고 공학적으로 접근하기 위한 전산화재해석(Computational Fire Analysis) 분야는 1990년대 이후 많은 연구가 진행되어 왔으며 그중에서도 Field model을 이용한 화재 특성의 상세해석 분야는 계산용 컴퓨터 뿐만 아니라 개인용 컴퓨터의 발전과 함께 비약적인 성장이 이루어졌다.<sup>1-3)</sup>

초기의 Field model은 기하학적으로 단순한 공간에 대하여 난류모델을 포함한 대류 열유동해석을 위주로 개발되기 시작하여 최근에는 연소해석, 복사열전달, 열해리(pyrolysis), 다상 유동(multiphase flow), 병렬계산(parallel processing), 비정렬 다중격자 기법등을 적용하여 복잡 다양한 화재현상을 규명하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다.

현재 화재해석에 이용되고 있는 Field model 중에서 NIST의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator)<sup>4)</sup> 프로그램

<sup>†</sup>E-mail: sungkim@kiu.ac.kr

은 LES(large eddy simulation) 난류해석 기법에 기초하여 기본적으로 열 및 물질유동장과 함께 화재현상을 해석하는 다양한 모델과 편리한 인터페이스를 제공함으로써 많은 화재공학자들에게 널리 이용되고 있다. 동시에 해석 결과의 신뢰성 확보를 위하여 다양한 조건의 실험결과와 직접적인 비교검토를 통해 코드의 타당성을 검증해 나가고 있으며 실제로 화재사고의 재구성이나 화재 제어 시스템 설계에 직접 응용하는 사례가 증가하고 있다.<sup>5-8)</sup>

그러나 많은 Field model에서 제한적으로 검증된 물리적 모델을 복잡한 화재현상에 보편적으로 적용함으로써 때때로 많은 오류를 야기하기도 한다. 이러한 오류는 일반적으로 연소모델이나 난류모델등과 같이 물리적 현상을 묘사하는 과정에서 적용된 가정이나 모델 자체의 제약에서 발생할 수 있고 물리적 모델을 해석하기 위해 적용된 물성값의 부정확함에서 발생하는 경우도 있다. 뿐만 아니라 수치적 오류나 격자민감도와 같이 실제현상을 수치적으로 구현하는 과정에서 발생할 수 있다. 이러한 수치적 오류를 최소화하기 위해서는 화재 모델링에 있어서 격자나 경계조건, 통계적 조건등과 같은 수치 해석조건들이 해석결과에 영향을 미치지 않도록 독립성을 가져야 한다. 예를 들어 스프링클러나 물분무와 같이 화재 현상과 함께 분무거동을 해석해야하는 경우에 있어서는 액적의 거동에 관한 물리적 모델, 열 및 물질 전달 모델등과 같이 물리적 모델에서 발생하는 오류 이외에 실제 분무현상을 묘사하기 위해 적용된 통계적 액적 군집수(parcel)에 따라 해석결과가 달라질 수 있다. 공간상의 액적분포는 실제 액적수를 대표하여 나타내는 통계적 액적 군집수에 의해 직접적으로 영향을 받게 되는데 이러한 공간상의 액적분포는 분무해석 결과의 불확실성 뿐만 아니라 화재 억제모델에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 화재 제어와 관련된 수치해석의 결과의 독립성에 영향을 미치게 된다.

따라서 화재현상에 대하여 물리적으로 타당한 모델을 제공하는 것과 동시에 지속적이고 안정적인 결과를 제공하기 위하여 수치해석 조건의 민감도를 평가하고 최적의 수치적 조건을 설정하는 것은 매우 중요한 문제이다.

본 연구에서는 FDS 모델을 이용하여 스프링클러 분무 액적의 통계적 군집수에 따른 공간상의 분무 분포 특성 및 가연물의 화재 소화 특성을 비교분석한다. 이를 바탕으로 화재-분무 시뮬레이션에 영향을 미치는 통계적 액적수의 독립성에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 해석방법

### 2.1 분무해석 및 화재진압 모델

본 연구에서는 스프링클러 분무의 수치해석 과정에서 통계적 액적수가 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator, version 5.2)<sup>4)</sup>를 이용하여 공간내부에서의 분무분포특성 및 열전달 및 화재진압 특성을 정량적으로 분석한다. FDS 모델에서 기상(gas phase)의 거동은 Eulerian 방법으로 해석하고 개별 액적의 거동은 Lagrangian법에 의해 해석된다. 기상과 액적사이에는 상호 생성항을 고려하여 화재유동과 분무유동사이의 운동과 열 및 물질전달 특성을 연결한다. 초기 스프링클러에서 방출되는 액적의 크기분포는 평균액적직경(mean droplet diameter)보다 작은 액적에 대해서는 log-normal 분포를 사용하고 평균액적직경보다 큰 액적에 대해서는 Rosin-Rammler 분포를 적용한다. 스프링클러 헤드에서 방출되는 평균액적크기에 기초하여 시간동안 방출되는 평균 액적의 수는 다음과 같다.

$$N_T = \frac{Q\delta t}{\left(\frac{\pi d_m^3}{6}\right)} \quad (1)$$

여기서 Q는 체적유량,  $d_m$  은 평균액적직경을 나타낸다. 일반적으로 밀집된 분무패턴을 가지는 인젝터의 경우 실제 단위시간당 방출되는 액적수는  $10^7$ 개 수준<sup>9)</sup>이며 비교적 분무패턴이 성긴 스프링클러 액적의 경우에도 수 백만개의 단위시간당 평균 방출 액적수를 가지게 된다. 따라서 실제 화재상황에서 다수의 스프링클러가 작동할 경우 공간 내에는 수 억개 이상의 액적이 존재하게 된다. 이와 같이 많은 개별 액적들을 수치적으로 모두 추적하거나 해석하는 데는 한계가 있다. 그런 이유로 대부분의 수치해석 모델에서는 모든 개별 분무액적을 직접 추적하지 않고 액적의 크기나 속도, 온도등의 물리적 특성이 유사한 액적군에 대하여 통계적 대표성을 가지는 parcel의 개념을 적용하여 계산액적수를 대폭 축소한 후 각 parcel들에 대해 운동, 열 및 물질전달 방정식을 해석하는 방식을 이용한다. FDS 모델에서의 분무액적의 거동은 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,  $m_d$ 는 액적의 질량,  $\mathbf{u}_d$ 는 액적의 속도벡터,  $\mathbf{u}$ 는 기상의 속도벡터를 나타낸다.  $C_d$ 와  $Re_d$ 는 액적의 항력계수와 액적의 레이놀즈수를 나타내고 다음과 같이

계산된다.

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (Re_d < 1) \\ \frac{24(1 + 0.15Re_d^{0.678})}{Re_d} (1 < Re_d < 1000) \\ 0.44 (1000 < Re_d) \end{cases} \quad (3)$$

$$Re_d = \frac{2\rho|\mathbf{u}_d - \mathbf{u}|r_d}{\mu(T)}$$

FDS 모델에 적용된 분무에 의한 가연물의 화재 진압 과정은 가연물의 연소율이 표면에 도달한 분무의 질량유량에 지수적으로 감소하는 것으로 가정된 모델을 적용하고 있다.<sup>10)</sup>

$$\dot{m}_f''(t) = \dot{m}_{f,o}''(t) \cdot e^{-\int E m_w(t) dt} \quad (4)$$

여기서  $\dot{m}_f''(t)$ 는 분무가 없는 경우의 초기 가연물의 연소율이고  $\dot{m}_{f,o}''(t)$ 는 가연물에 도달한 국부적인 분무의 질량유량을 나타낸다. E는 연료에 대한 경험상수로 썬 실험에 의해 결정된다.

따라서 식 (4)에서 보는 바와 같이 고체가연물에 도달하는 분무의 국부적인 질량유량은 직접적으로 화재의 발열량에 영향을 미치게 된다. 따라서 FDS 모델에서의 화재 소화과정은 이러한 국부적인 분무 유량에 직접적인 영향을 받을 것으로 판단되며 계산된 국부적인 분무 유량이 액적군집수에 대하여 독립성을 가져야만 화재-분무 시뮬레이션 결과에 대하여 신뢰성을 확보할 수 있다.

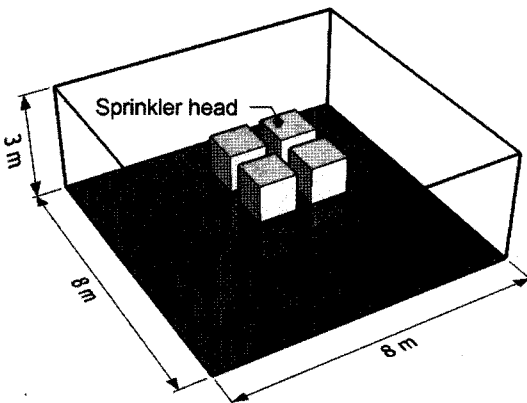


Figure 1. Schematic of the physical domain for the case of fire suppression.

### 2.2 해석 조건

해석대상 공간은 Figure 1에서 보는바와 같이 8m × 8m × 3m이며 천정과 바닥 면을 제외한 측면은 대기 중에 개방된 것으로 가정한다. 본 연구에서는 통계적 액적군집수, 즉 parcel수에 따른 분무액적의 패턴을 분석하기 위하여 우선적으로 화재가 없는 경우에 대하여 공간 내에서의 분무 유량 분포를 비교분석하였다. 분무해석결과를 바탕으로 공간내부에 고체가연물이 존재하는 경우에 대하여 parcel수에 따른 화재 진압 특성 및 공간 내 열 및 물질전달 특성을 상호 비교하였다. 따라서 분무 형태만을 계산하는 경우 계산영역에서 가연물은 제거된다. 스프링클러 헤드는 높이 2.9m의 중앙에 위치하고 스프링클러 분무의 초기특성은 액적의 평균직경이 1000μm, 액적의 초기속도는 10m/s, 분사 유량은 190lpm, 분사각이 60~160°이며 스프링클러는 분무 단독 해석의 경우 계산시작과 함께 분사되도록 설정하였고 공간내부에 화재가 존재하는 경우에는 화재 시작 60초 후에 작동하도록 설정하였다. 본 연구에서는 parcel수에 따른 분무 특성 및 화재진압 특성을 분석하기 위하여 1초당 이론적으로 방출되는 평균액적수( $N_T$ )에 대한 계산에서 적용되는 parcel의 수( $N_p$ )의 비를 다음과 같이 정의한다.

$$k = \frac{N_p}{N_T} \quad (5)$$

여기서 k는 실제 액적수에 대한 계산에 적용된 parcel의 통계적 대표값을 의미하고 적용된 k값은 Table 1과 같고 FDS 모델에 적용된 기본parcel 수( $N_p$ )는 1000이다.

공간내부에 가연물이 존재하는 경우 가연물의 물성은 Table 2와 같다. 가연물은 바닥에 위치한 0.4m × 0.4m 크기의 가열판에 의해 약 10초 후 자연접화가 유도되고 약 50초간의 화재발달단계를 거쳐 60초에 스프링클러가 작동하는 것으로 설정하였다. 스프링클러 작동전 FDS 프로그램에 의해 계산된 최대발열량은 약 3.0MW정도이다.

FDS 모델의 결과는 해석 대상에 따라 계산격자에 매우 민감하기 때문에 격자에 대한 독립성 평가가 매우 중요하다. FDS 모델에서의 계산격자는 화원의 무차원 특성길이( $D^*$ )를 기초로 하여 설정하는 방식이 널리 이용되고 있는데 무차원 특성길이는 다음과 같이 정의된다.<sup>11)</sup>

Table 1. Number of Parcels and k Value

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
$N_p$	300	600	1,000	6,000	60,000
k	$5.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$

**Table 2.** Properties of Combustible Material

Conductivity [W/mK]	Specific Heat [kJ/kgK]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Heat of Reaction [kJ/kg]	Heat of Combustion [kJ/kg]
0.25	1.0	500	1,578	25,200

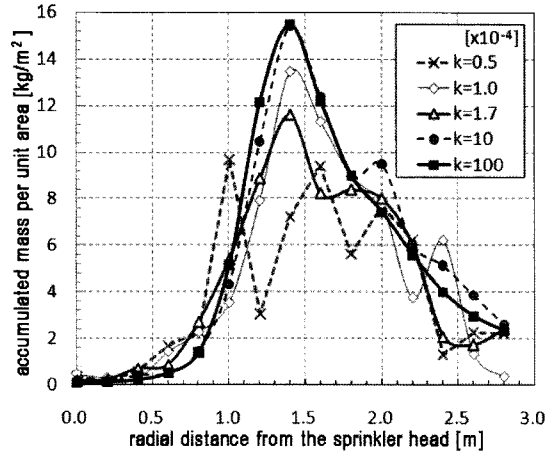
$$D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho C_p T_\infty \sqrt{g}} \quad (6)$$

일반적으로 환기조건이 원활한 화재에 대하여 격자수는  $4 < D^* \delta x < 16$  정도에서 해의 독립성을 가지는 최소 격자를 제공하는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup> 본 연구에서는 약  $D^* \delta x$ 를 18 정도로 설정하여 격자의 독립성에 대한 추가적인 계산을 배제하고 액적수의 통계적 대표 값이 분무특성 및 화재진압특성에 미치는 영향만을 파악한다.

### 3. 해석결과

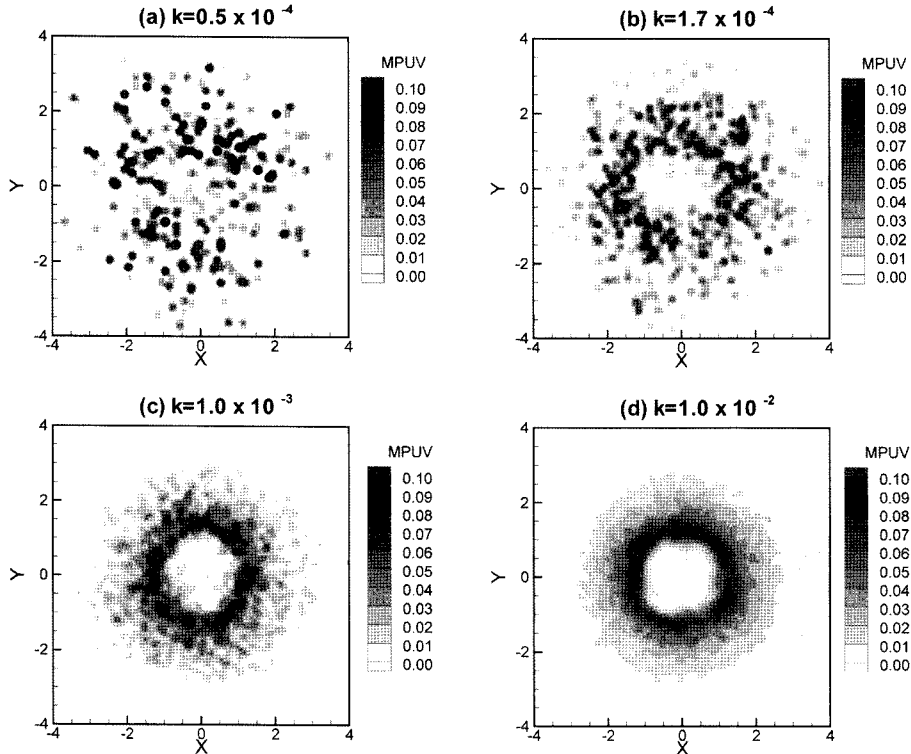
#### 3.1 분무거동 특성에 미치는 영향

Figure 2는 k 값에 따른 분무패턴을 분석하기 위하



**Figure 2.** Accumulated water mass per unit area for different k value.

여 바닥면의 중심에서 반경방향으로의 60초 동안 누적된 스프링클러 분무의 단위면적당 누적질량을 나타낸다. 분무 패턴은 노즐 하단에서 가장 작고 반경방향으



**Figure 3.** Water mass per unit volume for different k value at z=0.3.

로 갈수록 누적분무량은 증가하여 약 1.5m 위치에서 최대값을 가진다. 이후 분무량은 중심으로부터 거리가 증가함에 따라 꾸준히 감소하게 된다. 그러나 k 값이 상대적으로 작은 경우 하나의 parcel이 대표하는 액적들의 수가 많기 때문에 바다 면에서의 누적 분무질량은 개별 parcel의 거동에 매우 민감하게 된다. 이런 이유로 k 값이 작아짐에 따라 분무패턴의 불규칙성이 발생하고 k 값이 증가함에 따라 이러한 불규칙성은 감소하게 된다. 이러한 분무 패턴의 불규칙함은 실제 화재 소화에서 가연물의 표면에 도달하는 분무의 양을 예측하는데 오류를 범할 수 있으며 이러한 오류는 가연물의 소화에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. Figure 3은 바닥에서 0.3m 높이에서 k 값에 따른 단위체적당 스프링클러 분무의 순간적인 질량 분포를 나타낸다. 앞서 언급한바와 같이 k 값이 작은 경우 분무의 유효반경 내에서도 분무가 도달하지 못하는 영역이 존재하고 일부분은 지나치게 과도하게 분무량을 예측하는 경향이 있다. 그러나 k 값이 증가함에 따라 분무가 도달하지 못하는 영역은 감소하고 분무량이 집중되는 경향도 크게 완화되어 분무패턴의 불규칙성이 크게 감소함을 보여준다. k 값이 0.001 이상에서 순간적인 분무분포의 거시적 특성을 잘 나타낸다.

3.2 화재진압 특성에 미치는 영향

Figure 4는 공간내부에 가연물이 존재하는 경우 k 값의 변화에 따른 화재진압 특성의 영향을 파악하기 위하여 발열량의 시간 변화를 상호 비교하였다. 고체 가연물은 계산 시작후 약 10초 경과 후에 가열원에 의해

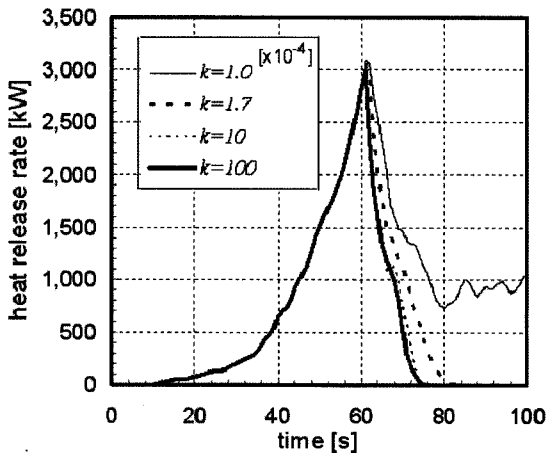


Figure 4. Comparison of heat release rate for various k values.

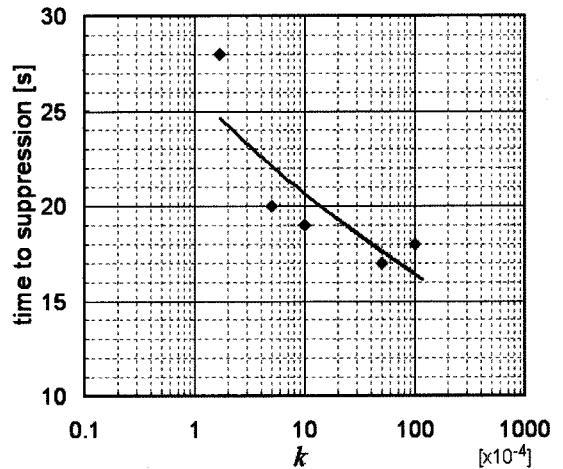
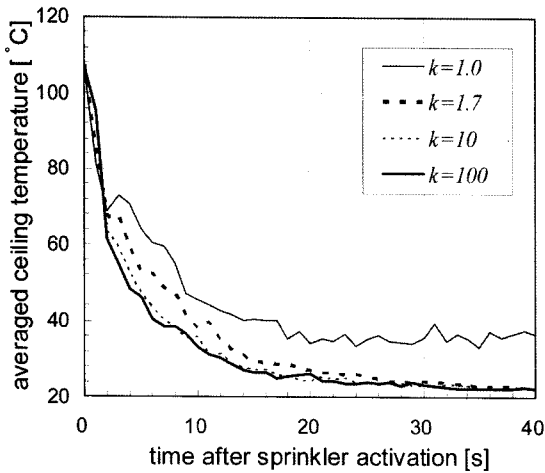


Figure 5. Time to fire suppression as function of k value.

점화되고 화염전파에 의해 발열량은 급격히 증가한다. 스프링클러가 작동하기 직전의 최대 발열량은 약 3MW 정도로 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 parcel수에 상관없이 모든 경우에 있어서 스프링클러 작동으로 인해 발열량이 급격히 감소하지만 parcel의 수가 가장 적은 경우( $k = 0.5 \times 10^{-4}$ ,  $k = 1.0 \times 10^{-4}$ ) 계산종료시간까지 화재는 소화되지 않고 약 1.0MW 이상의 발열량을 유지하는 것으로 나타났다. k값이 증가함에 따라 스프링클러 작동이후 시간에 따른 발열량 감소율은 크게 나타났으며 1개의 parcel이 1000개의 액적을 대표하는  $k = 0.001$  이상에서는 k 값의 증가에 따라 발열량 감소율은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. Figure 5는 액적수의 통계적 대표 값이 화재소화시간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 k 값에 따른 화재소화 시간을 비교하였다. 소화시간은 스프링클러 작동이후 공간 내 발열량이 1W 이하가 되는데 걸리는 최소시간으로 정의하였다. k 값이  $0.5 \times 10^{-4}$ 과  $1.0 \times 10^{-4}$ 인 경우는 화재소화가 이루어지지 않았기 때문에 도식적으로 나타나지 않는다. k 값이 증가함에 따라 소화시간은 급격히 감소하고 k 값이 0.001과 0.01의 경우 소화시간은 약 1초 정도로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 따라서 화재소화 시뮬레이션 결과에 독립성을 가지는 k 값은 약 0.001 정도이며 이 값은 FDS 계산에서 사용되는 기본 설정값에 비해 약 6배 정도 많은 parcel수를 의미한다.

Figure 6은 스프링클러 작동이후 시간에 따른 천정부에서의 연층의 온도변화를 나타낸다. k 값이 가장 작은  $1.0 \times 10^{-4}$ 인 경우를 제외하고는 화재소화 후 천장



**Figure 6.** Comparison of mean ceiling temperature history after sprinkler activation for various k values.

부 온도가 초기온도 상태로 돌아감을 알 수 있다. 또한 k 값이 증가할수록 시간에 따른 온도감소율이 크고 초기온도 상태로 돌아가는 시간도 빨라짐을 알 수 있다. 전체적으로 k=0.001과 k=0.01의 경우는 매우 유사한 결과를 보여주고 있으며 연층의 냉각에 대해서도 독립성을 가지게 된다.

#### 4. 결 론

수치해석을 통해 복잡한 화재현상을 예측하는 것은 모델의 제약이나 화재 물성의 부정확함, 계산용량의 제약 그리고 해석과정의 가정 등으로 인해 여전히 어려운 문제이며 해석결과가 여러 요소에 의해 직간접적인 영향을 받기 때문에 화재 시뮬레이션 과정에 세심한 주의를 필요로 한다. 본 연구는 스프링클러 분무의 화재소화 시뮬레이션에서 액적의 통계적 대표값이 해석 결과의 독립성에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 분무 패턴분석에서 k 값이 작은 경우 하나의 parcel 이 대표하는 액적들의 수가 많기 때문에 공간에서의 분무패턴은 개별 parcel의 거동에 매우 민감하게 된다. 따라서 k 값이 작은 경우 하류에서 불규칙한 분무패턴 이 발생하고 k 값이 증가함에 따라 분무패턴의 불규칙 정도는 감소하게 된다.

2) 분무해석에 독립성을 가지지 못하는 k 값은 때때로 공간내의 분무분포에 직접적인 영향을 미치게 되어 분무가 도달하지 않거나 혹은 지나치게 과대 예측된 분무량을 제공하게 된다. 이러한 분무량 예측의 오류

는 화재소화 해석 결과의 신뢰성에 직접적인 영향을 미치게 된다.

3) 스프링클러 작동이후 초기 화재진압과정은 k 값에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보이지만 전체 화재소화 과정은 k 값에 따라 크게 차이를 보인다. 특히 k 값이 상대적으로 작은 경우 소화시간은 비교적 큰 차이를 나타내고 k 값이 상대적으로 큰 경우 소화시간의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 본 연구결과와 k 값이 0.001 이상에서는 분무형태나 발열량변화, 화재소화시간 및 천장부 온도분포등에서 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이 값은 FDS 모델에서 제공되는 설정 값보다 6배 더 큰 값으로써 해석결과에 대한 통계적 분무액적수의 독립성을 확보하기 위해서는 기본적인 FDS 모델의 설정 값에 대한 고찰과 추가적인 민감도 해석이 필요하다.

본 연구는 비록 공간화재에서 독립성을 가지는 계산격자에 대해 연구가 수행되었으나 계산격자의 민감도와 분무 액적수의 통계적 대표 값이 동시에 고려되지는 않았다. 따라서 추가적인 연구를 통하여 계산격자와 액적수의 통계적 대표 값 사이의 상호 관계를 고려한 민감도 조사가 종합적으로 이루어질 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 지식경제부 지정 경일대학교 자동차부품 시험지역혁신센터의 지원을 받아 수행하였음.

#### 참고문헌

1. J. Ewer, E.R. Galea, M.K. Patel, S. Talyer, B. Knight, and M. Petridis, "SMARTFIRE: An Intelligent CFD Based Fire Model", J. of Fire Protection Engineering, Vol.10, No.1, pp.13-27(1999).
2. S.C. Kim and S.H. Lee, "Numerical Prediction of Smoke Concentration in a Compartment Fire by using the Modified Volumetric Heat Source Model", Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol.18, No.4, pp.344-350(2006).
3. S.C. Kim and H.S. Ryou, "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Characteristics Using a Water Mist in an Enclosure", Building and Environment, Vol.38, No.11, pp.1309-1316(2003).
4. K.B. McGrattan, K. Bryan, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, NIST, Gaithersburg, MD(2008).
5. R.G. Gann, A. Hamins, K.B. McGrattan, G.W.

- Mulholland, H.E. Nelson, T.J. Ohlemiller, W.M. Pitts, and K.R. Prasad, "Reconstruction of the Fires in the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster", NIST NCSTAR 1-5(2005).
6. K.B. McGrattan and A. Hamins, "Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire", *Fire Technology*, Vol.42, No.4, pp.273-281(2006).
  7. M.H. Salley, J. Dreisbach, K. Hill, R. Kassawara, B. Najafi, F. Joglar, A. Hamins, K.B. McGrattan, R.D. Peacock, and B. Gautier, "Verification and Validation: How to Determine the Accuracy of Fire Models", *Fire Protection Engineering*, No.34, pp.34-44(2007).
  8. N.P. Bryner, D. Madrzykowski, and W.L. Grosshandler, "Reconstructing the Station Nightclub Fire: Computer Modeling of the Fire Growth and Spread", 11th Proceeding of Interflame 2007, Vol.2, pp.1191-1192 (2007).
  9. S.V. Apte, M. Gorokhovski, and P. Moin, "LES of Atomizing Spray with Stochastic Modeling of Secondary Breakup", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.29, pp.1503-1522(2003).
  10. A. Hamins and K.B. McGrattan, "Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a Rack-Storage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model", *Proceedings of the 7th IAFSS Symp.*, pp.457-468(2002).
  11. G. Cox, "Combustion Fundamentals of Fire", Academic Press, New York(1995).
  12. US Nuclear Regulatory Commission, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application", NUREG-1824, Washington, DC(2007).