

# 구획화재에서의 스프링클러 작동시간 예측 연구

## Prediction of sprinkler activation time in compartment fire

김 명 배\*  
Kim, Myung-Bae  
한 용 식\*  
Han, Yong-Sik

### Abstract

A general description of sprinkler activation time in compartment-fire-generated smoke layers is made. For calculation of the time hot layer temperature is obtained from two-layer zonal model and time constant of sprinkler is measured. Upper-layer thickness at the instant of sprinkler activation is also presented with changes of opening area. The output of the present study provide inputs for the interaction modeling of sprinkler spray and compartment fire environment, which simulates fire suppression phenomena. Futhermore, experiments are performed in mock-up with gasoline pool fire in order to evaluate the reliability of the model.

Key words : Sprinkler, Zone model, Smoke layer, Response time index

### 국문요약

구획화재에서 스프링클러 작동순간의 연층온도와 연층높이를 구하는 모델링 방법을 기술하였다. 스프링클러 작동모델에서의 시정수는 실험으로부터 얻어진 RTI(Response time index)와 스프링클러 주위의 유속을 평가할 수 있는 실험식으로 부터 구하였고, 시간에 따른 연층온도 변화는 기존의 2층 zone model을 이용하였다. 모델에 의한 계산결과를 검증하기 위하여 가솔린 pool 화재를 이용한 실험을 수행하여 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 본 연구의 결과인 스프링클러 작동순간의 연층온도와 높이는 스프링클러 분무와 화재 plume의 상호작용을 해석하기 위한 필요한 입력자료로 사용할 수 있다.

### 1. 서 론

어떤 공간의 화재안전성 평가를 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하기 위하여, 기존의 model<sup>1)</sup>에서

\* 한국기계연구원 산업설비연구부

취급하는 연기유동 및 피난 계산에 더하여 연기와 화재 진압시스템의 하나인 스프링클러 분무(spray)와의 상호작용에 대한 모델링도 포함되어야 한다. 이러한 상호작용은 보편적으로 많이 사용되고 있는 zone model에 의하여 취급되기 어려우며 따라서 field model 개념에 근거하여 그 상호작용의 물리적 특성이 평가되어야 한다. 그러나

field model은 연소반응 메커니즘이 알려져 있는 가연물을 대상으로 관련된 계산을 수행할 수 있으므로 일반적으로 field model을 적용하기에는 선결해야 될 문제점이 많이 있다.

이와 같은 어려운 점을 피하기 위하여 Alpert<sup>2)</sup>는 연소반응을 풀지 않고 적절한 공간에 volumetric heat source를 주어 에너지방정식과 유동방정식 그리고 스프링클러 액적에 대한 운동방정식을 풀어 연기유동과 스프링클러 분무의 상호작용을 수치적으로 해석하였다. 이러한 방법에 의한 field model은 하나의 구획(compartment)에는 적용 가능하지만 여러 개의 구획으로 구성된 공간에 적용하기에는 계산량이 급격히 증가하여 많은 문제점이 유발된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Cooper<sup>3)</sup>는 연기유동은 2층 zone model을 사용하고 스프링클러 액적과 연기유동과의 관계는 field model에 근거를 둔 복합모델(hybrid model)을 사용하여 연기유동과 스프링클러 분무의 상호작용을 해석하였다. Cooper의 계산에서 필요한 입력자료중의 하나는 스프링클러 작동시 연층의 높이이며, 이 양에 따라 스프링클러 분무에 의한 연기유동의 물리적 특성이 변화하게 된다. Evans<sup>4)</sup>는 zone model 프로그램 ASET를 사용하여 연층의 온도와 높이를 계산하여 스프링클러 작동시간을 예측하였는데, ASET의 특성상 밀폐된 구획만을 대상으로 하였기 때문에 보편성이 결여되어 있다.

본 연구는 위에서 언급한 복합모델에 의한 화재 모델링 프로그램을 개발하기 위하여 그 첫단계인 스프링클러의 작동시간 예측을 위한 model로 스프링클러 작동시의 연층높이와 연층온도 등을 얻을 수 있도록 한 것으로, 기존의 2층 zone model 프로그램과 실험으로부터 얻어진 스프링클러의 시정수를 사용하였다. 또한, 스프링클러 열감지부 모델링의 정확성을 평가하기 위하여 mock-up 내의 가솔린 pool 화재를 이용하여 실험치와 계산치를 비교하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 model 대상의 조건

본 연구의 대상인 하나의 구획으로 구성된 공간의 조건은 표 1 및 2와 같다.

표 1. 구획 및 화재조건

구획높이	구획 폭	구획 깊이	초기화재 크기
2.3m	3.3m	4.3m	500 kW

표 2. 개구부 면적 조건

조건	1	2	3	4	5
높 이 (m)	0	1.0	1.0	1.5	2.0
폭 (m)	0	0.5	1.0	1.0	1.0
면 적 (m)	0	0.5	1.0	1.5	2.0

### 2.2 2층 zone model을 이용한 연기유동계산

2층 zone model에 의한 계산결과 중에서 스프링클러 작동시간 예측을 위하여 필요한 변수는 시간 변화에 따른 연층온도  $T_g$ 와 연층높이이다. 이 두가지 물리량은 고온층(hot layer)의 질량 보존식과 에너지 보존식 그리고 상태 방정식을 이용하여 얻을 수 있는 것으로 본 연구에서는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 Building and Fire Research Laboratory에서 개발한 CFAST를 이용하였다.

### 2.3 용융 element 스프링클러 (Fusible sprinkler) model

내부에 용융 element를 가지고 있는 스프링클러의 작동은 다음과 같은 용융 element의 에너지 보존 방정식을 이용하여 모델링 된다.

$$mc \frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) \quad (1)$$

경계조건은  $T_g = T_\infty$  at  $t=0$

여기서

- $m$  : 용융 element의 용량
- $c$  : 용융 element의 비열
- $h$  : 대류 열전달 계수
- $A$  : 용융 element의 표면적
- $T_e$  : 용융 element의 온도
- $T_g$  : 연층의 또는 고온층의 온도
- $t$  : 시간

식(1)의 좌변은 용융 element가 받는 열에너지이며, 우변은 대류 열전달에 의한 고온의 연기층으로부터 스프링클러 용융 element로의 열에너지 전달을 의미한다. 여기에서 복사나 전도에 의한 열전달은 무시하였다. 시정수  $\tau$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\tau = \frac{mc}{hA} \quad (2)$$

시정수는 용융 element의 열에 의한 민감도를 표시하는 지표이며, 식(1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{1}{\tau}(T_g - T_e) \quad (3)$$

식(3)을 풀면 다음과 같이 정리된다.

$$T_e = T_g - (T_g - T_\infty)e^{-t/\tau} \quad (4)$$

여기에서  $T_g$ 는 2층 zone model의 결과로부터 얻어지는 값이며 시간의 함수이다. 시정수  $\tau$ 를 해석적으로 구하기는 어려우며 실험으로부터 얻어진다. 이를 위하여 국내에서 생산되는 스프링클러에 대하여  $T_g$ 의 범위 80~130°C, 유속 3.4~6.6m/s의 범위에서 실험을 하여 RTI(Response Time Index) 값을 얻었는데 평균값으로 150m<sup>1/2</sup>s<sup>1/2</sup>을 취하였다. 실험에서 얻어진 시정수 값은 실험조건에 따라 편차가 크기 때문에 상대적으로 편차가 적은 RTI 값을 이용하여 다음 식으로<sup>5</sup> 시정수  $\tau$ 를 계산하였다.

$$\tau = RTI / \sqrt{u} \quad (5)$$

여기에서  $u = 0.946(Q/H)^{1/3}$ .  $Q$ 는 화원의 열발생율(kW)이며  $H$ 는 구획의 높이(m)이고  $u$ 는 스프링클러 용융 element 주위에서의 연기의 유속(m/s)이다. 스프링클러는  $T_e = 72^\circ\text{C}$ 가 되는 순간에 작동한다고 가정하면 식(4)로부터 스프링클러의 작동시간을 예측할 수 있게 된다.

### 3. 계산결과 및 토의

#### 3.1 2층 zone model을 이용한 결과

Fig. 1에는 시간변화에 따른 연층의 온도 변화

를 나타내었는데, 개구부 면적이 0인, 즉 밀폐공간 조건에서는 연층온도가 증가하다가 100초 경과시 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 밀폐공간에서의 연소가 연층높이 증가에 따른 공기소모로 억제되기 때문으로 해석된다. 다른 조건에서는 개구부 면적이 작을수록 연층 온도가 높은 경향을 보이고 있는데, 개구부 면적이 클수록 개구부로의 연기 유출량이 증가하여 열에너지가 구획 밖으로 더 많이 전달되기 때문이다.

Fig. 2에는 시간에 따른 연층의 하강을 나타내었

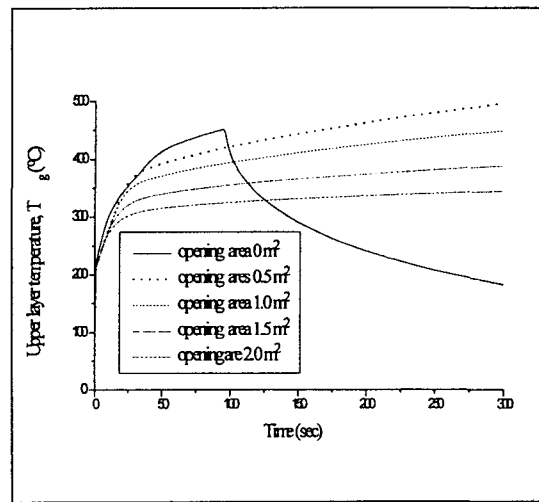


Fig. 1. Upper-layer temperature.

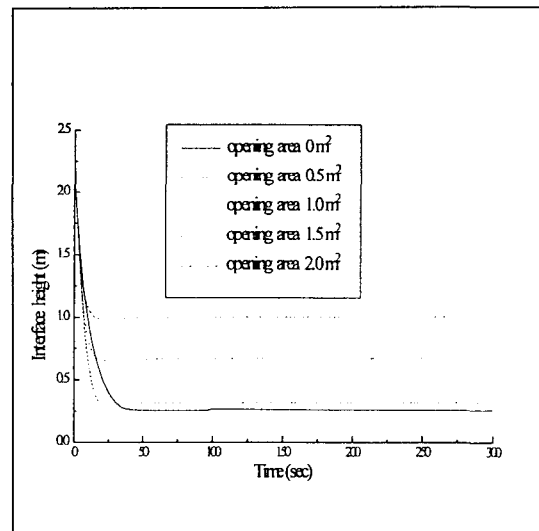


Fig. 2. Deepening of smoke layer.

는데, 모든 조건에서 초기에는 연층이 급격히 하강하다가 정상상태의 높이를 유지하게 된다. 만일 밀폐된 공간에서 연소가 지속된다면 연층은 계속 하강하는 것이 물리적으로 타당하지만, 연소가 정지된다면 밀폐된 공간에서도 정상상태의 연층높이는 존재하게 된다. Fig. 2로부터 밀폐된 공간에서의 정상상태 연층높이 도달시간이 가장 긴 것을 알 수 있으며, 개구부 면적이 클수록 정상상태의 연층높이가 증가하게 된다. 이러한 사실은 Fig. 1의 해석 부분에서 언급한 바와 같이 개구부 면적이 클수록 구획 밖으로의 연기 유출량이 증가하기 때문이다.

식 (4)에 시간변화에 따른 연층온도 값을 대입하면, 스프링클러 element의 온도 변화를 Fig. 3과 같이 얻게 된다. Fig. 3으로부터 밀폐된 구획에서의 스프링클러가 개구부가 있는 구획보다 빨리 작동온도에 도달하는 것을 알 수 있으며, 개구부 면적 변화에 따라서는 그 도달시간의 변화가 크지 않다. 스프링클러 작동순간에서의 연층높이는 Fig. 2의 결과로부터 얻어지며 Fig. 4에 나타내었다. 밀폐된 구획에서의 스프링클러 작동순간의 연층높이가 개구부 면적 2.0m<sup>2</sup>인 조건과 비슷한 것은 Fig. 2로부터 초기의 연층 하강속도가 두 조건에서 비슷하기 때문이다.

### 3.2 Mock-Up 에서의 스프링클러 작동실험

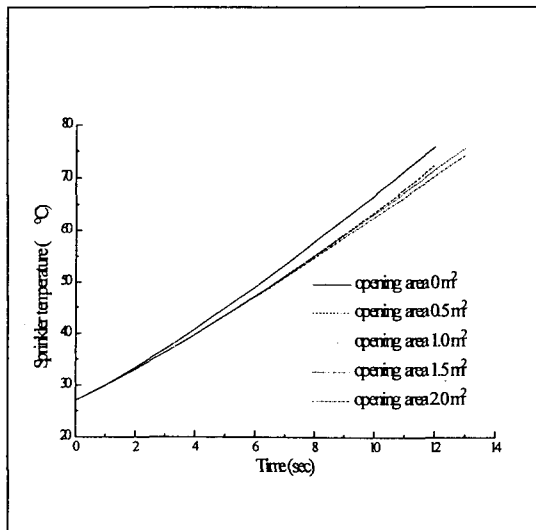


Fig. 3. Behaviour of sprinkler temperature.

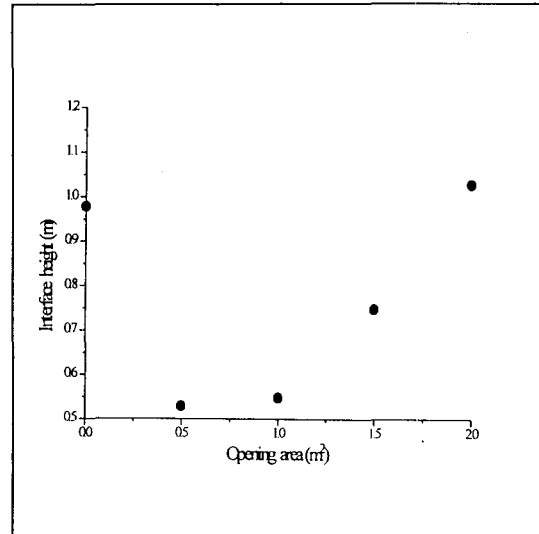


Fig. 4. Smoke-layer height at sprinkler activation.

전술한 2층 zone model을 이용한 스프링클러의 작동시간 예측은 zone model의 연층온도 계산결과와 신뢰성에 바탕을 두고 있기 때문에 실험을 통하여 그 타당성이 입증되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 2.35(W)×2.08(H)×3.48(D) m 크기의 방화 판넬로 제작된 Mock-Up을 제작하여 연층과 하층부의 온도분포를 측정하였다. Mock-Up의 중앙에 스프링클러 헤드를 설치하고 연층 및 하층의 온도 분포를 측정하기 위하여 Mock-Up의 바닥으로부터 20cm 간격으로 열전대를 설치하였다. 한편 스프링클러 열감지부 요소에도 열전대를 설치하여 주위 온도 상승에 따른 스프링클러 열 감지부의 온도변화 및 개방시간을 측정할 수 있도록 하였다. 화원은 직경 30cm의 가솔린 pool 화재로 하였다.

Fig. 5에 온도측정결과와 2층 zone model에 의한 계산결과를 비교하였는데 그 경향이 잘 일치하고 있으나, 초기의 온도상승이 스프링클러 열감지부의 온도상승에 절대적인 영향을 미치므로 zone model의 결과를 사용한 스프링클러의 작동시간 예측은 다소간의 오차를 포함할 것이다. Fig. 6에는 주위온도 상승에 따른 스프링클러 열 감지부 요소의 온도변화를 나타내었는데 식(4)에 의한 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 식(4)에서 연층온도  $T_g$ 는 측정된 값으로 하

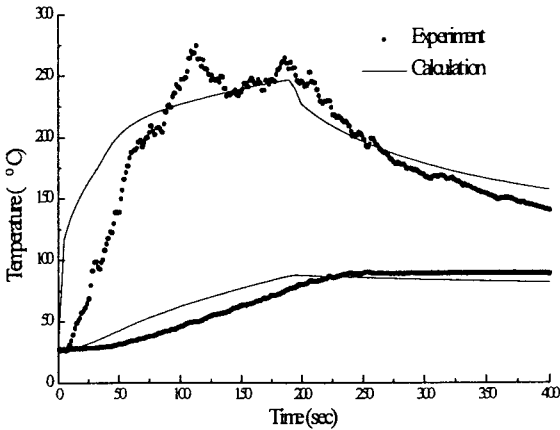


Fig. 5. 2층 Zone model과의 비교.

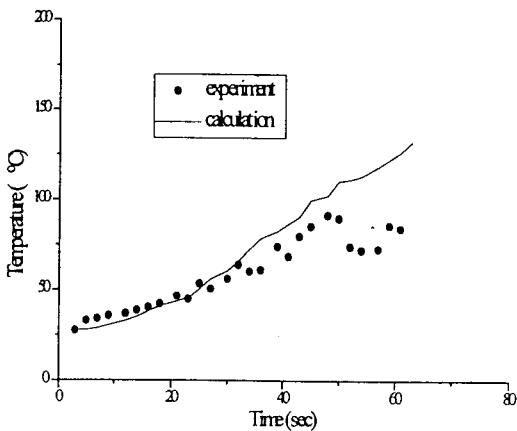


Fig. 6. 스프링클러 감지부의 온도변화.

였다. Fig. 6으로부터 스프링클러의 개방시간은 약 60초 정도임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 스프링클러 분무와 연기유동과의 상호작용을 해석하는데 필요한 기본 입력자료를 얻기 위해서 스프링클러 작동시의 연층높이를 구하는 것을 주목적으로 하였다. Field model이 나

대로 zone model을 보완시켜 줄 수 있는 것은 사실이지만 zone model이 field model에 의하여 대체되기에는 선결해야 할 문제점이 매우 많이 있다. 따라서 스프링클러 작동시간을 예측하기 위하여 연기유동은 2층 zone model에 근거하여 해석되었으며, 스프링클러 용융 element의 시정수는 별도의 실험을 통하여 구한 값을 사용하였다. 실험을 통하여 얻어진 시정수는 실험조건들에 대해서 변화폭이 크기 때문에 상대적으로 편차가 적은 RTI(Response Time Index) 값으로 환산하였고, 주어진 구획에서 스프링클러 작동시간을 계산하기 위하여 화재규모와 구획높이에 따른 연기속도에 관한 실험식을 이용 실험에서 얻어진 RTI 값을 시정수로 환산하였다.

계산대상 조건에서는 밀폐된 구획에서의 스프링클러 작동시간이 제일 짧았으며, 개구면적 변화에 따라서는 작동시간의 차이가 미소하였다. 반면에 스프링클러 작동순간의 연층높이는 개구면적 증가에 따라 뚜렷하게 상승하여, 개구부가 연기 유동에 미치는 영향이 지배적이라는 사실을 다시 확인하였다.

2층 zone model의 결과는 측정된 연층온도와 그 경향이 일치하지만 초기의 온도상승이 스프링클러 작동시간에 지배적인 영향을 미치는 것을 고려할 때, 2층 zone model을 이용한 스프링클러 작동시간 예측은 오차를 포함할 수 있다. 그러나 스프링클러 열감지부의 model은 열전도등의 현상을 고려하지 않아도 비교적 정확한 것이 입증되었다.

#### 참 고 문 헌

1. 田中峰義, “煙流動及び避難性狀豫測 のための實用計算 프로그램 解説書”, 日本建築センター (1992).
2. R.L. Alpert, “Numerical modeling of the interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes”, Fire Safety J., Vol. 9, pp. 157-163 (1985).
3. L.Y. Cooper, “The interaction of an isolated Sprinkler Saray and a tow-layer compartment fire environment. Phenomena and Model

- Simulations.”, Fire Safety J., Vol. 26, pp. 89-107 (1996).
4. D.D. Evans, “Calculating Sprinkler Actuation Time in Compartments”, Fire Safety, J., Vol. 9, pp.147-155 (1985)
  5. R.L. Alpert, “Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors”, Fire Technology, Vol. 8, pp.181-195 (1972)