

Zone 모델을 이용한 스프링클러의 작동시간 예측
Prediction of Sprinkler activation time using two-layer zonal model

김 명 배*, 한 용 식*, 윤 명 오**

*대전광역시 유성구 장동 171번지 한국기계연구원 산업설비연구부

**경기도 용인시 남동 명지대학교 건축학과

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 outputs of the present study provide inputs for the interaction modeling of sprinkler spray and compartment fire environment, which simulates fire suppression phenomena.

1. 서론

어떤 공간의 화재안전성 평가를 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하기 위하여는 기존의 모델¹에서 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 모델에 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 모델을 적용하기에는 선결해야 될 문제점이 많이 있다.

이와 같은 어려운 점을 피하기 위하여 Alpert²는 연소반응을 풀지 않고 적절한 공간에 volumetric heat source를 주어 에너지방정식과 유동방정식 그리고 스프링클러 액적에 대한 운동 방정식을 풀어 연기유동과 스프링클러

분무의 상호작용을 수치 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 Cooper³는 연기유동은 2층 zone 모델을 사용하고 스프링클러 액적과 연기유동과의 관계는 field 모델에 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.

본 연구는 위에서 언급한 복합모델에 의한 화재 모델링 프로그램을 개발하기 위하여 그 첫 단계인 스프링클러의 작동시간 예측을 위한 모델로 스프링클러 작동시의 연층높이, 연층온도 등을 얻을 수 있다. 이를 위하여 기존의 2층 zone 모델 프로그램과 실험으로부터 얻어진 스프링클러의 시정수를 사용하였다. Evans⁴는 zone model 프로그램 ASET를 사용하여 연층의 온도와 높이를 계산하여 스프링클러 작동시간을 예측하였는데, ASET의 특성상 밀폐된 구획만을 대상으로 하였기 때문에 보편성이 결여되어 있다.

2. 문제의 정식화

2.1 모델 대상의 조건

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

Table 1 구획 및 화재 조건

구획높이	구획 폭	구획 깊이	초기 화재 크기
2.3 m	3.3 m	4.3 m	500 kW

Table 2 개구부 면적 조건

조건	1	2	3	4	5
높이 (m)	0	1.0	1.0	1.5	2.0
폭 (m)	0	0.5	1.0	1.0	1.0
면적 (m)	0	0.5	1.0	1.5	2.0

2.2 2층 zone 모델을 이용한 연기유동계산

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

2.3 용융 element 스프링클러 (Fusible sprinkler) 모델

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

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

경계조건은 $T_e = T_\infty$ at $t = 0$

여기에서

- m : 용융 element의 질량
- 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 element 가 받는 열에너지이며, 우변은 대류 열전달에 의한 고온의 연기층으로부터 스프링클러 용융 element로의 열에너지 전달을 의미한다. 여기에서 복사나 전도에 의한 열전달은 무시하였다. 시정수 τ 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 모델의 결과로부터 얻어지는 값이며 시간의 함수이다.

시정수 τ 를 해석적으로 구하기는 어려우며 실험으로부터 얻어진다. 이를 위하여 국내에서 생산되는 스프링클러에 대하여 T_g 의 범위 80~130°C, 유속 3.4 ~ 6.6 m/s의 범위에서 실험을 하여 RTI (Response Time Index)값을 얻었는데 평균 값으로 $150 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$ 을 취하였다. 실험에서 얻어진 시정수 값은 실험조건에 따라 편차가 크기 때문에 상대적으로 편차가 적은 RTI 값을 이용하여 다음 식으로⁵ 시정수 τ 를 계산하였다.

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

여기에서 $u = 0.946(Q/H)^{1/2}$

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 있

게 된다.

3. 계산결과 및 토의

Fig.1에는 시간변화에 따른 연층의 온도 변화를 나타내었는데, 개구부 면적이 0인, 즉 밀폐 공간 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 연층온도가 높은 경향을 보이고 있는데, 개구부 면적이 클수록 개구부로의 연기 유출량이 증가하여 열에너지가 구획 밖으로 더 많이 전달되기 때문이다.

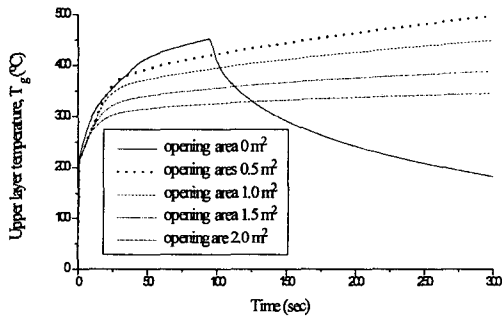


Fig.1 Upper-layer temperature

Fig.2에는 시간에 따른 연층의 하강을 나타내었는데, 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 도달 시간이 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 연기유출량이 증가하기 때문이다.

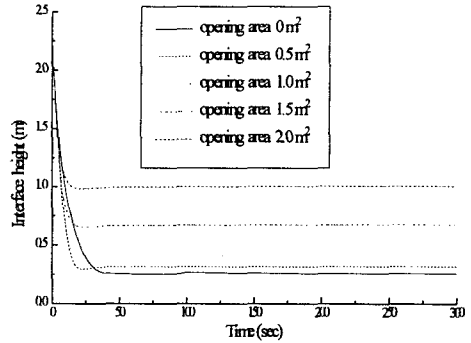


Fig.2 Deepening of smoke layer

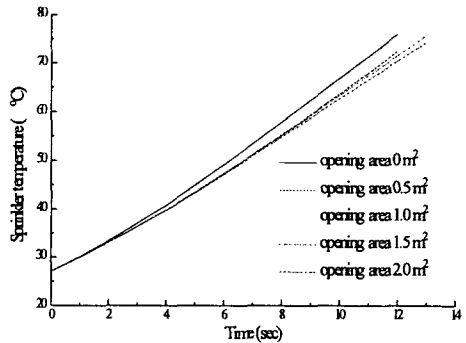


Fig.3 Behaviour of sprinkler temperature

식 (4)에 시간변화에 따른 연층온도 값을 대입하면, 스프링클러 element의 온도변화를 Fig.3과 같이 얻게 된다. Fig.3 으로부터 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.2로부터 얻어지며 Fig.4에 나타내었다. 밀폐된 구획에서의 스프링클러 작동순간의 연층높이가 개구부 면적 2.0 m²인 조건과 비슷한 것은 Fig.2로부터 초기의 연층하강속도가 두 조건에서 비슷하게 때문이다.

참 고 문 헌

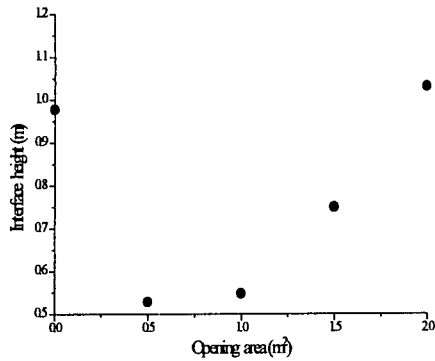


Fig.4 Smoke-layer height at sprinkler activation

4. 결론

본 연구는 스프링클러 분무와 연기유동과의 상호작용을 해석하는데에 필요한 기본 입력자료를 얻기 위한 내용으로 스프링클러 작동시의 연층의 높이를 구하는 것을 주목적으로 하였다. Field model 이 나름대로 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 model 에 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 RTI값을 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 연기유동에 미치는 영향이 지배적이라는 사실을 다시 확인하였다.

1. 田中哮義, “煙流動及び避難性狀豫測 のための 實用計算 プログラム 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 Spray and a two-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).

감사의 글

본 연구는 과학기술처 방재사업의 일부인 “공공건물 소화설비의 성능평가 기술개발” 사업의 연구결과의 일부로 관계자 여러분께 감사드립니다.