B-5

보가 있는 공간에서의 화재 시 스프링클러 반응시간에 관한 연구

김종훈, 이수경, 강계명*
서울산업대학교 안전공학과, 서울산업대학교 재료공학과*

A Study on the Sprinkler Response Time in Space with Roof Beam when Fire Occurred

Kim, Jong Hoon, Lee, Su Kyung, Kang, Kye Myeong*
Seoul National University of Technology, Dept. of Safety Eng.
Seoul National University of Technology, Dept. of Material Eng*.

1. 서론

최근 국내에서 인식되고 있는 문제점 중 하나가 보의 깊이가 0.7~1.2m에 이르는 공간에서의 스프링클러 헤드 설치위치에 관한 문제이다. 보의 깊이가 0.45m를 넘는 공간의 경우 스프링클러 헤드의 간격 설정에 어려운 점이 생긴다. 이에 관하여 국내 규정에서는 천장 및 반자와의 거리는 0.3m 미만으로, 단 천장이나 반자가 불연재료일 경우 0.45m 미만으로 할 수 있다고 되어있다. 또한 헤드와 보의 하단부와의 거리에따라 보와 헤드간의 간격의 제한이 결정된다. 결국 이로 인하여 보와 보 사이가 3m가 넘는 경우 보와 보 사이의 중앙과 보의 하단부에 헤드를 배치하고 있다. 그러나 보의 하부에 설치하는 헤드가 과연 화재 시 요구되는 시간이내에 작동을 해주는 지에 대해서는 알 수가 없으며, 특히 보의 깊이가 큰 경우 화재에서 생성되는 부력을 가진 고온의 가스가 상부에 축적되면서 하부로 내려오기 때문에 보의 측면부에 설치되는 헤드보다 늦게 작동 될 가능성이 있다. 만약 보의 하단에 설치된 화재가 빠르게 성장하는 조건에서 열방출률(Heat Release Rate)이 스프링클러로 제어가 가능한 범위를 넘어서기 이전에 스프링클러가 작동하지 않는다면 문제가 될 수 있다. 또한 0.75m를 넘는 깊이의 보가 있는 공간에 스프링클러 헤드를 설치하여야 하는 경우에 천장면에서 0.45m 이상 떨어뜨려 설치하면 정상적으로 작동되는 지의 문제가 있다. 그러므로 본 연구에서는 보의 깊이가 0.45m, 0.75m, 1.2m의 세가지 경우로 나누어 이에 대하여 측면 하단부와 보의 하부에 설치된 스프링클러의 반응

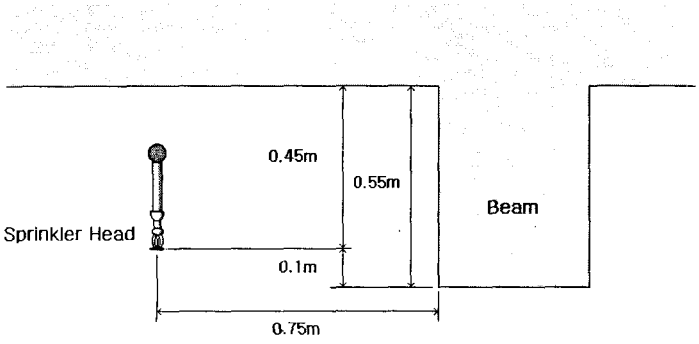

Fig. 1. 보가 있는 구획에서의 스프링클러 헤드 설치 위치

시간을 화재모델링과 스프링클러 헤드 반응시간 예측기법을 이용하여 분석함으로서 보의 하부 설치와 천장면에서 아래로 0.45m이상 내려오는 부분에의 설치에 대한 적합성을 알아보고자 했다.

2. 스프링클러 반응시간 예측을 위한 이론과 화재모델

2.1 스프링클러 열감지부의 반응시간 예측 이론과 분석도구 개발

스프링클러의 화재 감지특성은 헤드의 감열부와 헤드자체의 열적 특성에 의하여 결정하게 된다. 특히 헤드의 민감도를 나타내는 척도로 반응시간지수(RTI : Response Time Index)를 사용한다. 또한 RTI는 천장의 높이, 화원에서 헤드나 감지기까지의 방사상 거리, 화원에서 발생되는 열등과 연동되어 스프링클러와 열감지기의 반응시간을 예측하는 모델 개발에 도입되었다. 화재에서 발생되는 열은 대류, 복사에 의하여 헤드의 열감지부에 전달되며, 전달된 열은 스프링클러의 프레임과 연결부, 그리고 파이프에 있는 물로 전도되어 손실된다. 이를 기초로 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$mc\frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) + \dot{q}_r - C'(T_e - T_0) \tag{1}$$

여기서 m, c, T_e, t, h, A, T_g, $\dot{q}_r$, C', T_o,는 각각 열감지부의 질량, 열감지부의 비열, 열감지부의 온도, 시간, 대류열전달계수, 열감지부 표면적, 상승기류의 온도, 복사 열전달량, 스프링클러 전도열전달계수, 스프링클러설비의 주위온도 이다.

그러나 열감지부에 전달되는 열은 주변에 흐르는 고온의 Ceiling Jet에 의한 대류열전달이 대부분이며 화염에서 전달되는 복사에 의한 열과 전도에 의한 손실은 대류에 비하여 작은 값을 가진다. 그러므로 식(1)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다. 또한 이식을 적분하여 정리하면 식(3)과 같게 된다.

$$mc\frac{dT_e}{dt} = hA(T_g - T_e) \tag{2}$$

$$T_e = T_g - (T_g - T_0)\mathrm{EXP}\left[-t \cdot \frac{\sqrt{U}}{RTI}\right] \tag{3}$$

이 식에서 주어진 시간(t) 내에 각 변수 (T_g, RTI, $\sqrt{U}$)는 하나의 값을 대입할 수 있다. 이는 플런지 테스트(Plunge Test)처럼 일정한 온도와 일정한 속도의 공기를 계속 공급되는 조건에 적합하며, 실제 화재발생 시에는 스프링클러 헤드 감열부의 주변을 흐르는 가스의 온도가 상승하게 된다. 그러므로 식(7)을 그냥 사용할 수는 없다. 그러므로 Fig.2-1.과 같이 시간t 에 따른 온도 T_g, T_e의 변화를 그래프로 놓고 임의의 시간 간격으로 구간을 나눈 다음, 시간의 구간 $[t_i, t_{i+1}]$에서 감열부 온도 $\mathbf{T_e}$를 $T_{e,i}, T_{e,i+1}$라고 할 수 있다. 여기서, $\mathbf{T_{e,i}}$는 $\mathbf{T_0}$와 같으며, $\mathbf{T_{e,i+1}}$은 구하고자 목적하는 $\mathbf{T_e}$라고 할 수 있다. 그러나 식(3)에서 $\mathbf{T_g}$는 구간내에서 일정한 값을 가져야 하나 $\mathbf{T_{g,i}}$에서 $\mathbf{T_{g,i+1}}$이므로 이를 해결하기 위해서 평균값 $\mathbf{T_g^*}$을 만들면 이는 다음과 같다. 또한 식 (3), (4)를 가지고 정리하면, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$T_g^* = \left(\frac{T_{g,i+1} - T_{g,i}}{2}\right) + T_{g,i} \tag{4}$$

$$T_{e,i+1} = \left\{ T_g^* - (T_g^* - T_{e,i}) \cdot \mathrm{EXP}\left[-t \cdot \frac{\sqrt{U}}{RTI} \right] \right\} \quad (5)$$

이 식을 사용하면, 임의의 시간 구간 $[t_i, t_{i+1}]$에서 T_g에 의하여 변화된 $T_{e,i+1}$, 즉 최종 감열부의 온도를 계산할 수 있다.

2.2 Field Model SMARTFIRE

구획화재시 일어나는 현상을 예측하기 위한 화재모델은 크게 Zone Model과 Field Model로 구분된다. 본 연구에서는 보가 있는 공간에서의 온도 분포를 알아야하기 때문에 모델의 특성상 Field Model인 SMARTFIRE을 사용하였다. Field Model은 CFD 코드를 사용하여 각 부분의 온도분포와 기류의 속도를 알 수 있다. 특히 지금까지 사용되어온 CFD 전용 해석 패키지와는 달리 SMARTFIRE는 영국 Univ. of Greenwich에서 화재모델 해석전용으로 개발되었다. 본 모델은 기본 지배방정식들을 해석하기 위하여 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 방법을 사용한다. 또한 초기조건과 경계조건은 사용자의 입력과 전문가시스템에서 처리한다.

3. 모델링을 위한 대상의 선정과 시나리오 작성

3.1 대상공간의 선정

본 연구에서는 보가 있는 공간에서의 화재 시 스프링클러 헤드의 반응시간을 알아보기 위하여 3개의 Case를 설정하였다. 각 대상은 일반적 내화구조에의 헤드 설치를 가정하면 헤드의 간격이 약 3.2m가 되므로, 헤드를 배치하기 불리한 조건을 만들기 위하여 보의 간격을 4m로 하였다. 그리고 각 구획의 천장, 바닥, 벽 및 보 구조가 모두 콘크리트 재질로 되었으며, 환기조건은 최대한 화재의 성장과 상부의 연기 축적에 영향이 없는 조건으로 설정되었다. 각 Case의 특성값은 Table 3.1과 같다.

3.2 화재 시나리오

화재실의 조건은 초기온도 20℃, 습도 50%, 기압 1atm이며, 화재의 성장조건은 Ultra-fast이다. 최대화재성장은 5MW이며 163.1초에 도달하게된다. 화원의 직상부와 Ceiling Jet의 초기영향을 받을 수 있는 곳은 측정범위에서 제외하였다. 스프링클러는 Fusible-Link 형으로 작동온도는 72℃인 것으로 설정되었다. 또한 RTI는 150$m^{1/2}s^{1/2}$로 설정하였다. RTI가 150으로 설정한 것은 김명배, 한용식이 한국화재소방학회지에 발표한 "구획화재에서의 스프링클러 작동시간 예측 연구"에서 인용하였는데, 이 연구에서 국내에 생산되는 스프링클러의 Plunge Test를 수행하여 얻은 결과 중 Tg의 범위 80℃~130℃, 유속 3.4m/s~6.6m/s에서 RTI 평균값인 150$m^{1/2}s^{1/2}$을 인용하였다.

Table 3.1. 각 Case의 특성값 비교

	Room Size	Beam Size	Vent Size	Maximum H.R.R.	Fire Growth Curve
Case 1.	4m(H)×12m(W)×12m(D)	0.45m(H)×0.3m(W)	3m×3m	5 MW	Ultrafast
Case 2.	5m(H)×12m(W)×12m(D)	0.75m(H)×0.4m(W)	3m×3m	5 MW	Ultrafast
Case 3.	6m(H)×12m(W)×12m(D)	1.2m(H)×0.6m(W)	3m×3m	5 MW	Ultrafast

4. 모델링의 수행 및 결과의 비교분석

4.1 화재모델링의 수행

화재모델링의 수행은 3가지 Case를 대상으로 수행되었다. 헤드가 위치되는 곳은 화원에서 가장 가까운 보의 하부와 화재방향의 측면중 하단부분으로 설정하였고 여기에 해당되는 셀 내부의 온도변화와 기류의 속도변화를 데이터로 추출하여 ,예측공식을 해석하기 위해 C++ 언어로 개발한 컴퓨터 프로그램(Code)에 대입하여 스프링클러의 반응시간을 예측하였다.

4.2 모델링 수행결과의 비교 분석

1) 보의 하단부와 보의 화재방향 측면부와의 온도분포 비교

SMARTFIRE를 이용하여 각 Case에 대한 화재 모델링을 수행한 결과 보의 하단부와 보의 화재방향 측면부에서의 온도에 대한 데이터를 얻을 수 있었다.

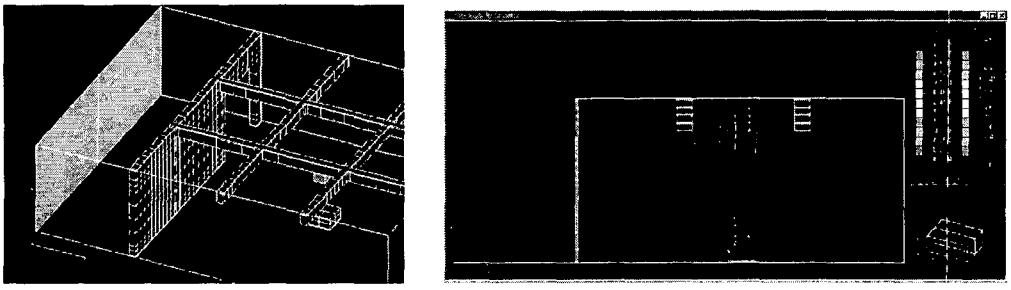

Fig. 4.1. Case 1의 헤드위치와 Case 3에서 25초일 때의 온도분포

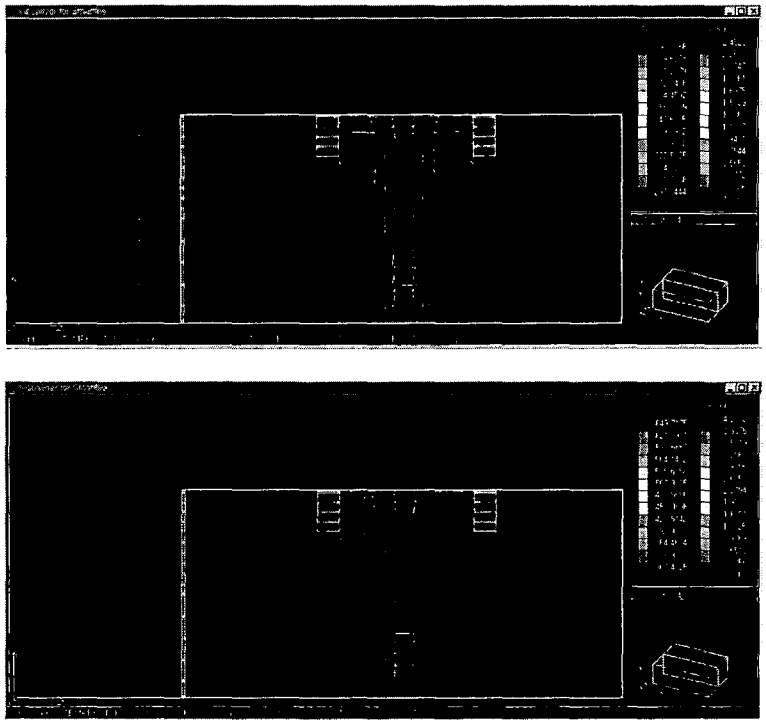

Fig. 4.2. Case 3의 경우 50초와 180초 일때의 온도분포

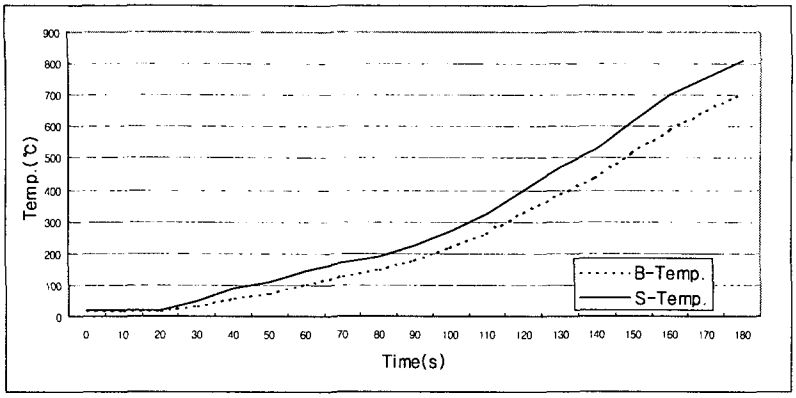

Fig 4.3. Case 3에서 보의 하부와 측면의 온도 비교

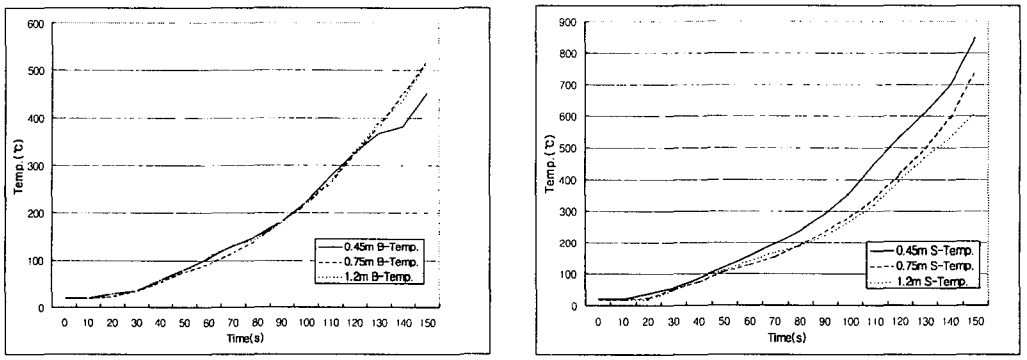

Fig. 4.4. 보의 측면과 하부에서 측정된 온도의 비교

Fig.는 보의 하단부에 대한 각 Case의 온도분포를 그래프로 비교한 것이다.

화재발생으로부터 150초까지 각 Case의 온도는 거의 동일한 것으로 나타났다.

또한 Fig.는 보의 화재방향 측면부의 온도분포를 각 Case를 비교한 것으로 0.45m가 빠르게 상승하며, 0.75m, 1.2m 순으로 1.2m인 경우가 가장 늦게 상승하는 것을 보여준다. 이는 보가 있는 구획에서의 화재발생시 보의 하단부보다는 보의 화재방향 측면부가 화재의 성장에 따라 빠르게 온도가 상승함을 알 수 있다. Case 1.의 경우 150초 때 두 부분의 온도차이는 397.1℃이며, Case 2의 경우는 223.9℃, Case 3의 경우는 99.5℃를 나타내 천장이 높을수록, 보의 깊이가 깊을수록 두 부분의 온도차이는 벌어지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 시간이 지날수록 더 커질 것이다.

2) 스프링클러 헤드의 작동시간에 대한 비교

화재 모델링과 반응시간 예측 공식을 사용한 예측의 결과로 반응시간을 얻을 수 있었다. 위에서 서술한 바와 마찬가지로 0.45m보다는 1.2m의 보에 설치되는

헤드가 더 빠르게 반응을 하는 결과를 볼 수 있었다. 그러나 Table 4-1.에서 보는 바와 같이 보의 하부와 보의 화재방향 측면에 설치되는 스프링클러 헤드의 반응시간 차이는 34초미만으로 판명되었다. 그러므로 두 위치에 설치되는 헤드의 반응시간 차이는 많은 시간차이를 보이지 않으며, 본 연구에서 설정한 Ultra -Fast의 화재성장 조건에서 5 MW에 도달하는 시간인 163.1초 이전에 모두 반응하는 것으로 나와 화재를 진압하는 측면에서는 어느 부분에 설치하든 지는 문제가 되지않는 것으로 나타났다.

Table 4.1. 각 Case의 스프링클러 반응시간 비교

	보의 하부	보의 화재방향 측면	시간차이
Case 1.	119 초	85 초	34 초
Case 2.	109 초	87 초	22 초
Case 3.	106.5 초	88.5 초	18 초

6. 결론

본 연구는 구획에서의 화재 시 스프링클러의 반응시간을 알아보기 위하여 163.1초에 열방출률(Heat Release Rate)이 5MW에 도달하는 Ultra-fast 조건의 화재가 공간의 중앙에서 발생하는 것을 설정하고 공간의 높이와 보의 크기가 다른 3가지 경우를 설정하여 모델링을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

1) 0.45m(H)×0.3m(W)의 보가 설치된 12m(W)×12m(D)×4m(H)의 공간에서의 경우, 보의 화재방향 측면에 설치되는 스프링클러 헤드의 경우 85초, 보의 하부에 설치되는 헤드의 경우는 119초에 각각 반응하는 것으로 예측되었다.
2) 0.75m(H)×0.4m(W)의 보가 설치된 12m(W)×12m(D)×5m(H)의 공간에서의 경우 보의 화재방향 측면에 설치되는 스프링클러 헤드의 경우 87초, 보의 하부에 설치되는 헤드의 경우는 109초에 각각 반응하는 것으로 예측되었다.
3) 1.2m(H)×0.6m(W)의 보가 설치된 12m(W)×12m(D)×6m(H)의 공간에서 경우 보의 화재방향 측면에 설치되는 스프링클러 헤드의 경우 88.5초, 보의 하부에 설치되는 헤드의 경우는 106.5초에 각각 반응하는 것으로 예측되었다.
4) 보의 화재방향 측면부분의 온도가 보의 하단부에 비하여 신속하게 상승하며, 시간이 지날수록 두 부분의 온도 차이는 더욱 벌어지는 것을 알 수 있었다.
5) 그러나, 보의 하부와 보의 화재방향측면에 위치된 스프링클러헤드의 반응시간은 Case 1은 34초, Case 2는 22초, Case 3은 18초를 나타내어 보의 구조에 따라 차이를 보이고 있으나, 모두 5MW에 도달하기 이전에 모두 작동되어 스프링클러 헤드 설치 시에는 두 위치 모두 무방한 것으로 나타났으며, 보의 깊이가 깊은 경우 0.45m 이하로 헤드의 감열부가 내려가도 충분한 시간에 작동하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Russell P. Fleming, "Theory of Automatic Sprinkler Performance", Fire Protection Handbook 18th edition, National Fire Protection Association, 1997.
2. W. D. Davis, "The Zone Model Jet: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the Presence of a Smoke Layer", NIST Publication, 1999.
3. 김명배, 한용식, 윤명오, " 스프링클러의 열응답성", 한국화재 · 소방학회지, 1996. 9.
4. E. R. Galea, J. Ewer, and M. K. Patel, "SMARTFIRE : An Intelligent CFD Base Fire Model", Journal of Fire Protection Engineering, 1999.
5. Harold E. Nelson and Richard L. P. Custer, "Applying Models to Fire Protection Engineering Problems and Fire Investigations", Fire Protection Handbook 18th edition, National Fire Protection Association, 1997.
6. Richard W. Bukowski, "Fire Hazard Analysis", Fire Protection Handbook 18th edition, National Fire Protection Association, 1997.
7. 김명배, 한용식, "구획화재에서의 스프링클러 작동시간 예측연구", 한국화재 · 소

방학회지, 1996.
8. 이병곤, "표준형 및 속동형 스프링클러 헤드의 반응시간지수와 소화성능에 관한 연구(1)", 소방안전(통권 100호), 한국소방안전협회, 1998.
9. Robert E. Solomon, "Automatic Sprinkler System Handbook", National Fire Protection Association, 1994.