

열방출률을 이용한 화재감지기의 오동작 특성분석

홍성호, 김두현, 김상철*

충북대학교 안전공학과, *세명대학교 안전공학과

The Analysis of False Alarm by Fire Detector Using Heat Release Rate

Sung-Ho Hong, Doo-Hyun Kim, Sang-Chul Kim*

Chungbuk National Univ., *Semyung Univ.

1. 서론

화재감지기는 화재발생 초기에 화재로부터 발생하는 열, 연기, 불꽃 등을 감지하여 소방관계자에게 통보하여 대형화재로의 확대를 방지하기 위한 장치이다. 현재 국내 소방법에는 자동화재탐지설비의 부분으로서 열, 연기, 불꽃감지기 등의 화재감지기설치를 규정하고 있다. 그러나 이러한 화재감지기는 설계시의 의도와는 다른 오보를 자주 발생시킨다. 예를 들어 열감지기의 경우는 화재가 아닌 경우에 발생하는 열에 의해서도 화재신호를 발생시키고, 연기감지기의 경우에도 역시 화재에 의한 연기이외의 신호에도 화재신호를 발생시킨다. 또한 화재가 발생했음에도 불구하고 화재경보를 울리지 않는 경우도 종종 발생한다. 이와 같은 오동작의 원인은 기존 화재감지기는 감지환경으로부터 각 감지기에 따라 하나의 고정되어 있는 열, 연기, 불꽃 등의 수치이상이 되면 화재경보를 울리게 된다. 그러나 실제 환경에서는 화재가 아닌 경우에도 이러한 화재감지기의 고정된 수치이상 발생하는 경우가 있고 화재가 발생했어도 고정된 수치이하로 열, 연기 또는 불꽃이 발생할 수 있다. 이와 같은 화재감지기의 완벽하지 못한 신뢰성 때문에 화재감지설비의 소음으로 인하여 사람들이 불편을 겪는 경우가 있고 심지어 화재감지설비의 전원을 OFF시키는 경우도 있어 실재 화재가 발생하였을 때 화재로 인한 대참사를 야기시킬 수도 있다. 이러한 화재감지기의 오동작원인분석과 감소에 대한 연구¹⁾⁴⁾는 다수 있었지만 아직도 화재감지기의 오동작과 원인분석에 대한 것은 많은 연구를 필요로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 화재감지기가 동작함에 있어 오보를 발생하는 상황과 조건을 정량적으로 분석하여 화재감지기의 오보율을 감소시키는데 도움을 주고자 하였다. 이를 위하여 Small-Scale의 화재실험을 통하여 열감지기가 동작하기 위한 열에너지방출률(Heat Release Rate : HRR)을 계산하고 동작특성을 분석하였다.

2. 에너지 모델 및 HRR

화재감지기가 오동작하는 특성은 크게 두 가지로 나타낼 수 있다. 첫 번째는 화재가 아닌 경우에 화재신호를 발신하는 것이고, 두 번째는 화재임에도 불구하고 화재신호를 보내주지 못하는 경우이다. 화재와 비화재에 대한 열 에너지 방출률을 확률밀도의 함수로 표현하면 화재의 경우는 $P(\Delta Q, x=1)$ 로, 비화재는 $P(\Delta Q, x=0)$ 로 나타낼 수 있다⁴⁾.

화재경보에 대한 경계치가 ΔQ_{th} 라 할 때 화재와 비화재의 확률밀도를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 그림에서 보듯이 ①영역은 화재상황인데 화재신호를 보내주지 못하는 경우이고 ②영역은 화재가 아닌데 화재신호를 보내는 경우가 된다.

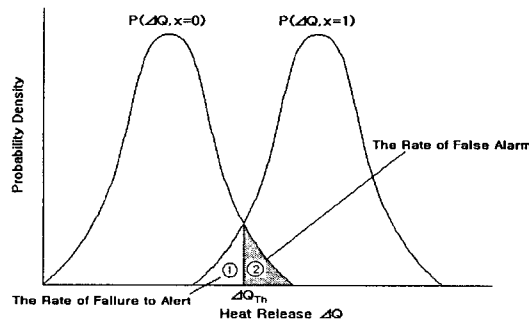


Fig. 1. Probability distribution of the energy release

본 연구에서는 열에너지 방출률에 대한 식을 이용하여 화재시 열감지기가 동작하는 열 에너지 방출률을 계산함으로써 열감지기가 동작함에 있어 그림 1에서 나타난 ①영역과 ②영역을 정량적으로 분석하는데 목적이 있다. 이러한 열에너지 방출률에 대한 식은 다음과 같다.

$$\Delta Q = \Delta h_c \cdot \dot{m}_d [W] \quad (1)$$

여기서 Δh_c : 연소열 [J/g], \dot{m}_d : 질량감소율 [g/s] 이다.

또한 이와 같은 열에너지 방출률을 계산하는데 있어서 다양한 종류의 가연물 중에 연소하기 쉬운 목재를 이용하여 화재실험을 수행하였다. Robert⁵⁾ 등은 건조한 목재에 대한 연소열을 19.4[kJ/g]으로 나타내었다. 이에 따라 본 연구에서도 건조한 목재를 이용하여 실험하였으므로 연소열은 이 수치를 인용하였다. 그리고 Delichatsios⁶⁾는 wood cribs 밑부분의 중앙에서 점화할 경우에 대한 질량감소율(\dot{m})을 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{m}_d = \dot{m}'' \cdot A_s \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 [g/s] \quad (2)$$

\dot{m}'' 는 단위면적당 연소율로 $\dot{m}'' = c/\sqrt{b} \cdot f(p)$ [g/cm²·sec]와 같다.

여기서 b : 목재의 두께 [cm]

$$c : 10^{-3} [\text{g/cm}^{3/2} \cdot \text{sec}]$$

$$A_s : \text{wood crib의 전체 표면적} = 4 \cdot n \cdot h \cdot l$$

여기서 n : wood crib의 층별개수

h : wood crib의 높이 [cm], l : 목재의 길이 [cm]

t : 점화한 순간부터의 시간 [sec]

t_0 : 화염이 crib의 최외각까지 전파하는데 걸리는 시간 [sec]

m'' 식의 $f(p)$ 는 Heskestad⁷⁾에 의하여 정의된 공극율(crib porosity) P 를 사용한 것으로 다음과 같다.

$$P = \frac{A_v}{A_s} \sqrt{s \cdot b} \quad (3)$$

여기서 A_v 는 wood crib내의 공기노출면적이다.

$f(p)$ 는 공극율 P 에 따라 다음 그림 3과 같이 표시되는 값으로 P 값이 0.07보다 크면 1이 된다.

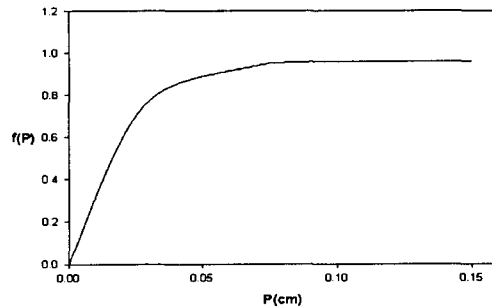


Fig. 2. The reduced specific burning rate

3. 실험장치 및 방법

그림 3은 화재실험의 실험장치에 대한 개략도이다. 실험에 사용된 열감지기는 차동식 spot형과 정온식 spot형이다. 이러한 감지기를 그림에서 보는 바와 같이 상부에 3개를 30 [cm]간격으로 평행하게 부착하였고 화재감지기가 동작하는 것은 본 연구의 실험조건이 small-scale이기 때문에 상부에 부착한 3개의 감지기가 모두 동작했을 경우로 간주하였다. 화재실험을 위하여 사용된 연소실의 면적은 1.21[m²]이고 높이는 1.7[m]이다. 또한 목재를 그림 4와 같이 crib 형태로 쌓은 후 crib의 아래 중앙부에서 에탄올을 이용하여 점화시킨 다음 감지기의 동작시간 및 화염의 전파시간 등을 측정하고 이 parameter들을 식(1)과 (2)에 대입하여 열에너지 방출률을 계산하였다. 실험을 위한 wood crib의 전체적인 크기는 수동식소화기 검정기술기준의 목재 모형을 1/10로 축소한 다음 목재의 층을 1층씩 감소시키면서 실험을 수행하였다. 또한 목재 1개의 두께는 0.35 [cm]이다.

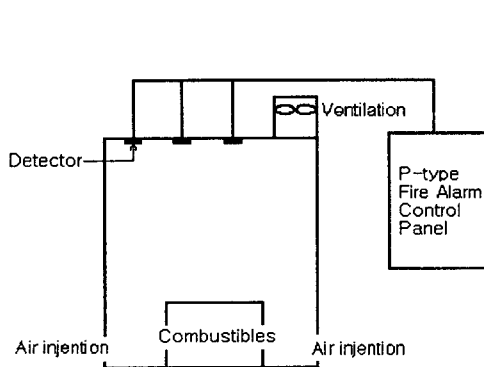


Fig. 3. Schematic of experimental setup for fire simulation

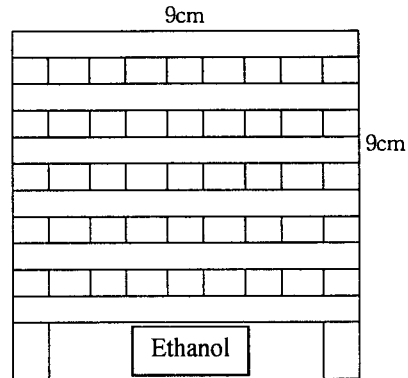


Fig. 4. The shape of wood crib

4. 결과 및 분석

그림 5와 6은 wood crib의 층수에 따른 차동식과 정온식감지기의 동작시간을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 본 연구의 연소실 내에서는 wood crib의 층수가 10층 이상이면 화재감지기는 30초 이내에 동작하였다. 따라서 wood crib의 층수가 10층 이상인 경우는 full-scale로 확대했을 때 확실한 화재상황이라고 간주할 수 있기 때문에 본 연구에서는 crib의 층수가 10층 미만인 경우에 대해서만 고려하였다.

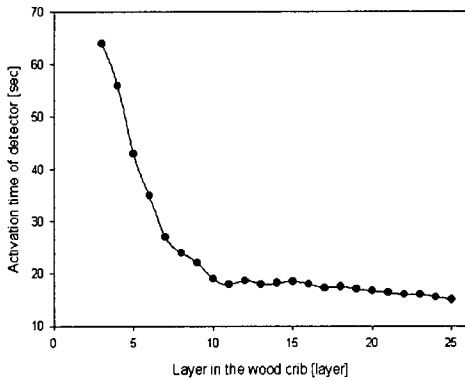


Fig. 5. The activation time of detector vs. the layer in the wood cribs (for rate of rise type)

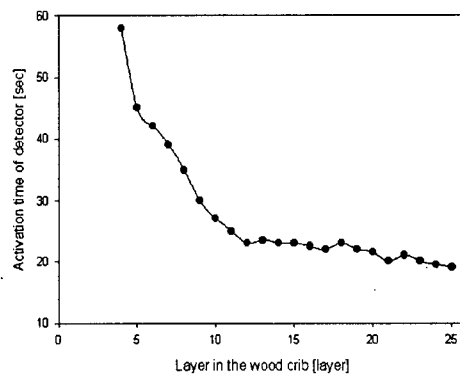


Fig. 6. The activation time of detector vs. the layer in the wood cribs (for fixed type)

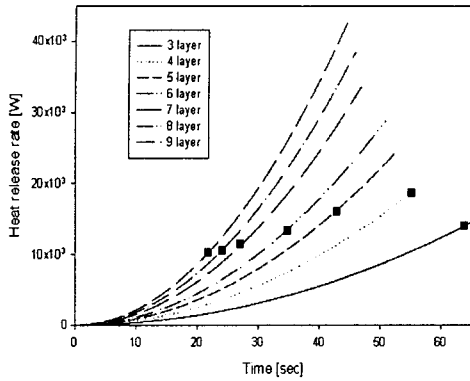


Fig. 7. Heat release rate vs. activation time of detector (for rate of rise)

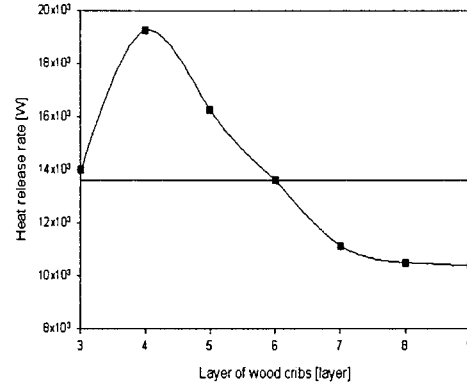


Fig. 8. HRR to activate detector vs. the layer of wood cribs (for rate of rise type)

그림 7은 실험을 통하여 얻은 parameter를 가지고 식 (1)과 (2)를 통하여 계산한 값을 나타낸 것으로 차동식 감지기의 동작을 표시한 시간에 따른 HRR을 나타낸 그림이다. 각 그래프에서 검은 사각형으로 표시된 것이 감지기가 동작한 순간을 나타낸다. 그림에서 보듯이 목재의 층수가 많을수록 더 높은 값을 나타냈지만 감지기가 동작하는 순간의 HRR 값은 대체적으로 비슷한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 그림 8은 차동식 감지기가 동작하는 순간의 HRR값을 따로 나타낸 그림으로서 wood crib의 층수에 따른 차동식 감지기가 동작하는 HRR을 보여준다. 그림에서 나타난 바와 같이 차동식 열감지기가 동작하는데 필요한 HRR의 값은 약 10~19 [kW]인 것을 알 수 있다. 또한 그림의 수평선은 이 수치들을 평균한 값으로서 약 13.59 [kW]가 된다. 본 연구에서는 이 수치를 차동식 감지기가 동작하기 위한 에너지의 경계값으로 제안한다. 이 값은 그림 1에서 나타낸 ΔQ_{th} 값에 해당한다. 따라서 차동식 감지기가 설치된 장소에서 조리등 기타 다른 원인으로 열이 발생했을 때의 HRR값이 이 값을 넘게 되면 감지기는 화재가 아닌 상황에서도 화재경보를 발신하게 되는 오동작을 발생시킨다. 이 경우가 그림 1에서 나타난 ②영역이 될 수 있다. 또한 그림 8에서 보면 목재의 층수가 4층인 경우에는 이 값보다 상당히 높은 값에서 감지기가 동작하였다. 화재감지기가 동작하는 HRR값이 13.59[kW]라고 했을 때 이 경우에는 화재감지기가 설치되어 있어도 제 시간에 동작하지 않은 상황이 된다. 이와 같은 상황이 화재임에도 불구하고 화재경보를 발신하지 못하는 경우, 즉 그림 1에서 표시된 ①영역으로 간주할 수 있다. 물론 본 연구의 실험에 사용된 화재실은 약 2 [m²]이므로 full-scale로 직접 적용하기에는 무리가 있지만 다른 변수가 없다고 가정할 경우에 본 연구에서 제시한 HRR값을 이용하여 면적비만 고려하면 임의의 장소에서 차동식 감지기가 동작하는 HRR값을 추정할 수 있다.

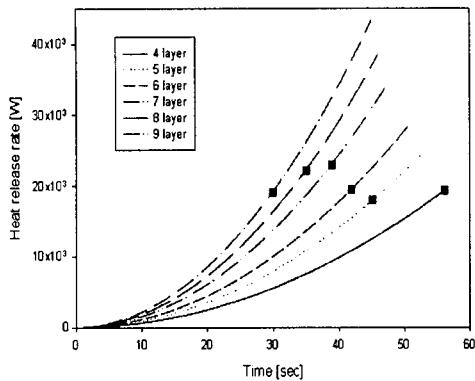


Fig. 9. Heat release rate vs. activation time of detector (for fixed type)

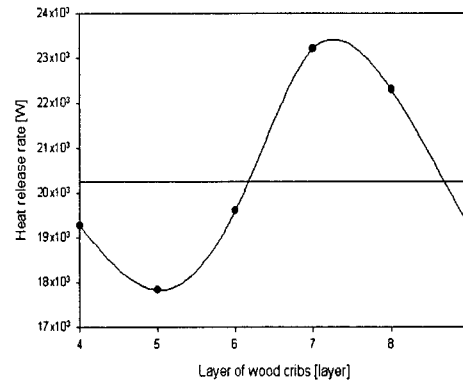


Fig. 10. HRR to activate detector vs. the layer of wood cribs (for rate of rise type)

그림 9는 차동식과 마찬가지로 정온식 감지기의 동작을 표시한 시간에 따른 HRR값을 나타낸 그림이다. 각 그래프에서 검은 사각형으로 표시된 것이 감지기가 동작한 순간을 나타낸다. 그림 10은 wood crib의 층수에 따른 정온식 열감지기가 동작하는 HRR값을 따로 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 정온식 감지기가 동작하기 위한 HRR값은 약 18~23 [kW]임을 알 수 있다. 또한 그림에 나타난 값들을 평균하면 정온식 열감지기가 동작하기 위한 HRR값은 20.24 [kW]로 계산되고 그림에서 나타난 수평선은 이 값을 의미한다. 정온식 감지기가 차동식보다 약간 높게 계산되었는데 이것은 정온식은 온도가 일정값 이상 도달해야 동작하는 감지기이기 때문에 목재에서 발생하는 열이 어느 일정온도 이상이 되어야 동작한다. 따라서 차동식보다 높은 온도영역이 되는 HRR값을 갖는 것으로 사료된다. 차동식과 마찬가지로 이 수치는 정온식 감지기가 오동작하는데 있어서의 경계값 $4Q_{th}$ 가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 화재발생 시 화재감지기의 열감지기가 오동작하는 특성을 열에너지 방출률을 이용하여 경계값을 정량적으로 나타내고 그 경계값을 기준으로 감지기의 오동작영역을 분석한 연구이다. 정온식과 차동식의 열감지기를 가지고 small scale의 실험을 한 결과 본 연구의 실험조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 차동식 감지기는 화재로부터 발생하는 열에너지 방출률이 10~19 [kW]에서 동작하였고 이 수치들에 의하여 차동식 감지기가 오동작할 수 있는 경계값은 13.59 [kW]로 나타났다.
2. 정온식 감지기는 화재로부터 발생하는 열에너지 방출률이 18~23 [kW]에서 동작하였고 이 수치들에 의하여 정온식 감지기가 오동작할 수 있는 경계값은 20.24 [kW]로 나타났다.

3. 차동식 감지기가 동작하는 열에너지 방출률보다 정온식 감지기가 동작하는 값이 6.65 [kW]정도 더높게 나타난 것을 고려하여 정해진 온도이상이었을 때 화재를 감지하는 정온식 감지기의 특성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 수치들은 small-scale에서 얻은 값이므로 full-scale에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 추후 연구로 다양한 가연물과 더 많은 감지기를 이용한 full-scale의 화재실험에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. M. Philippe, "Fire Detection for Aircraft Cargo Compartments, Reduction of False Alarm", 12th International Conference on Automatic Fire Detection, 2001.
2. J. A. Željko, "Minimization of the Optical Smoke Detector False Alarm Probability by Optimizing its Frequency Characteristic", IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.49, No.1, pp.37~42, 2000.
3. M. Thuillard, "New Methods for Reducing the Number of False Alarms in Fire Detection Systems", Fire Technology, Second Quarter, pp.250-268, 1994.
4. Shu Yan, Shu Wang, Zheng Dou, "An Energy Model in Fire Detection and Integrated Analysis on False Alarms", 12th International Conference on Automatic Fire Detection, 2001.
5. D. D. Drysdale, Thermochemistry, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, NFPA, pp.1-80 to 1-87, 1995.
6. M. A. Delichatsios, "Fire Growth Rates in Wood Cribs", Combustion and Flame, Vol. 27, pp.267-278, 1976.
7. Heskstad G., "Modeling of Enclosure Fires", 14th International Symposium on Combustion, 1971.