

정온식 열감지기의 응답시간지수 및 작동시간

Response Time Index and Operation Time of Fixed temperature Heat detector

류 호 철* 태 순 호** 이 병 곤***
Ryu, Ho Cheol Tea Soon Ho Lee Byung Kon

Abstract

Fixed temperature heat detectors that respond to the heat generated in fire plume and alarm when the temperature reaches a specified point, give a great influences to the loss of life and property according to their reaction sensitivity.

In this study, hot wind tunnel tests and compartment fire experiments were performed to investigate the response time and temperature of fixed temperature heat detector.

As a result, simple equations were derived which can be predicted the response time and temperature of the fixed temperature heat detector for the ramp type fire. Also other useful data, such as the effective temperature, time constant, response time index(RTI) were obtained.

Key Words : 정온식 열감지기, 시간상수, 응답시간지수, 작동시간, 작동온도

1. 서 론

열감지기는 화재시 발생되는 열에 의해서 화재의 발생을 감지하여 화재경보를 발하는 것으로 모든 건축물, 아파트, 공장등에 가장 많이 사용되는 소방설비이다.

열감지기는 실내의 국부적인 부분의 열을 감지하는 스포트(spot)형상과 넓은 영역을 감지하는 분포형으로 구분되나, 현재 대부분의 건물, 공장

에는 스포트형이 사용되고 있으며, 스포트형에는 주위온도가 일정한 온도상승률 이상이 되었을 때 작동하는 차동식과 주위온도가 일정한 온도 이상이 되었을 때 작동하는 정온식이 있다. 정온식 스포트형 열감지기도 여러가지 형식이 있으나, 바이메탈의 반전을 이용한 형식이 생산, 사용되고 있다.

이러한 열감지기는 실제 화재시 작동시간 및 작동온도등 반응의 민감도에 따라 인명과 재산 손실에 큰 영향을 준다. 열감지기에 대한 검정시험은 한국소방검정공사 등에서 검정규격에 의한 작동 및 부작동시험만을 시행하고 있으나, 미국, 영국

* 충북대학교 대학원 산업안전공학과
** 서울산업대학 산업안전공학과
*** 충북대학교 산업안전공학과 교수

등에서는 열손실을 고려한 열평형식의 이론과 풍동실험을 통하여 반응 민감도를 나타내는 응답시간지수를 도입하여 인증, 품질관리, 비교기준 및 빠른 응답의 속도형 개발에 응용하고 있다.^{1, 2)}

이에 따라 국산 제품에서도 응답시간지수의 도입이 필수적으로 91년도의 국산 응용형 스프링클러 헤드의 응답시간지수와 작동시간에 대한 연구를³⁾ 토대로, 본 연구에는 국내의 비교적 규모가 큰 열감지기 제조업체의 바이메탈식 정온식 스포트형 열감지기 1종에 대하여 응답시간지수와 작동시간, 작동온도등에 대한 연구를 수행하였다.

2. 응답시간지수와 작동시간의 이론식

2.1 열손실이 없을 때의 열평형식과 응답시간지수

열손실이 없을 때 정온식 스포트형 열감지기 감열부의 시간에 따른 온도상승은 감열부가 얇은 금속판으로 비정상 전도열전달의 집중 열용량법으로 해석한다.

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

(1)식에서 mc/hA 를 시간상수 τ 로 표시하고, 시간상수(τ)에 대류열전달계수(h)를 곱한 값은 $\tau h = mc/A$ 로서 일정한 값을 갖는다.

Heskestad & Smith⁴⁾는 스프링클러 헤드의 고온 기류 풍동실험에서 열전달계수(h)는 기류의 온도에 무관하게 저속에서는 기류속도(U)의 제곱근에 비례하는 것을 확인하고 h 를 $U^{1/2}$ 으로 대치하면 $\tau U^{1/2}$ 은 한 형태에서는 일정한 값이 되며 이를 응답시간지수(Response Time Index : RTI)라고 명명하였다.

이러한 Heskestad 등의 스프링클러 헤드에 대한 연구는 정온식 열감지기에도 그대로 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 전도열손실을 고려한 열평형식과 응답시간지수

최근 Theobald 등²⁾은 감열부에서 본체(프레임)

로의 열손실이 작동시간에 상당한 영향을 준다는 것을 확인하고 이를 고려한 열평형식과 일반해를 제시하였다.

$$m_e c_e \frac{d\Delta T_e}{dt} = h_e A_e (\Delta T_g - \Delta T_e) - h_{ef} A_{ef} (\Delta T_e - \Delta T_f) \quad (2)$$

여기서, h_{ef} 는 열전도계수로 대류열전달과 유사하게 표시한 것이다.

일정한 온도상승률($\Delta T_g = \beta t$)에 대한 식(2)의 해는³⁾,

$$T_{op} = T_{EFF} + \beta \tau' \quad (3)$$

$$t_{op} = \frac{T_{EFF} - T_{g(0)}}{\beta} + \tau' \quad (4)$$

윗식에서, T_{EFF} 는 최소작동기류온도이다.

식(4)에서 시간상수(τ')를 RTI로 바꾸어 표시하면 작동시간은,

$$t_{op} = \frac{T_{EFF} - T_{g(0)}}{\beta} + \frac{RTI}{U^{1/2}} \text{ (min)} \quad (5)$$

가 된다. 작동시간은 실험에서 τ' , T_{EFF} 를 구하고 온도상승률(β)을 알면, 상승율 형태의 화재에서 작동시간(t_{op})을 예측할 수 있다.

3. 실험장치

3.1 풍동실험

풍동실험은 Fig.1과 같은 강판제의 heater (3kw)가 부착된 순환식 풍동에서 행하며 온도 상승율은 programmable temperature controller를 사용하여 조절한다. 실험방법은 유속을 기준온도 25℃일 때의 1m/s, 온도상승은 초기 주위온도에서 30℃까지는 5℃/min로 상승시키며 30℃에서 5분간 유지시킨 후, 온도상승율을 2℃/min에서 25℃/min까지 변화시켜서 실험한다. 기류에 대

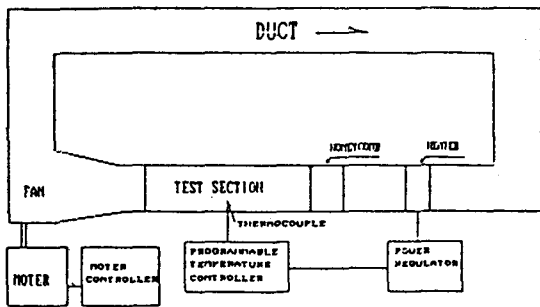


Fig. 1 Schematic view of heated wind tunnel

한 열감지기의 방향은 화재가 열감지기의 바로 밑에서 발생하는 경우 이외에는 수평방향으로 기류가 유동하므로 본 연구에서는 수평방향에 대해서만 실험하였다.

3.2 실제 화재실험

Fig.2는 폭 3.2m, 길이 4.5m, 높이 2.6m의 내화벽돌 및 철판구조물의 실제규모의 화재실험실의 개략도이다. 화재실험실의 천정에 열감지기를 설치하고, 열전대로 작동온도를 측정하며, 유속은 전자식 마이크로 마노메터로 측정하였다.

실험은 2.7cm x 2.7cm x 30cm인 목재를 1층에 6개씩 4-8층으로 쌓은 wood crib형태로 연소시켜, 시간에 따른 온도변화율과 감지기의 작동온도를 측정하며, 작동시간은 소량의 알콜로 점화할 때부터의 시간을 측정하였다.

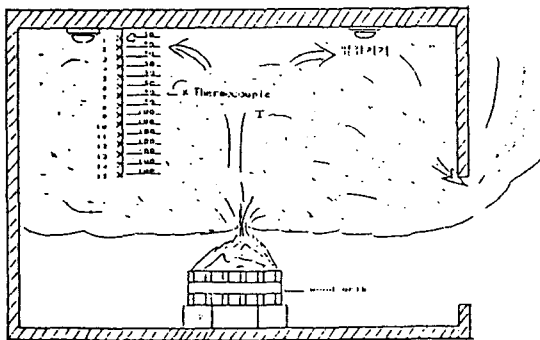
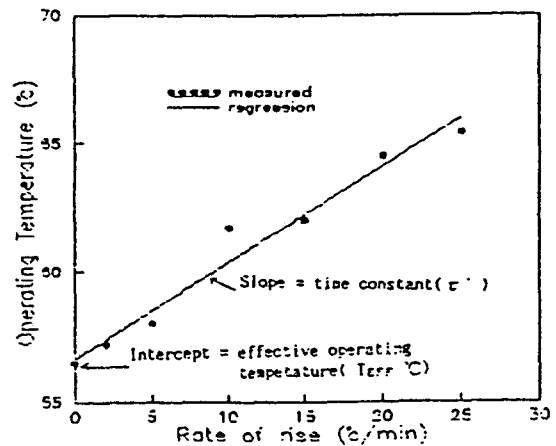


Fig. 2 Schematic diagram of compartment

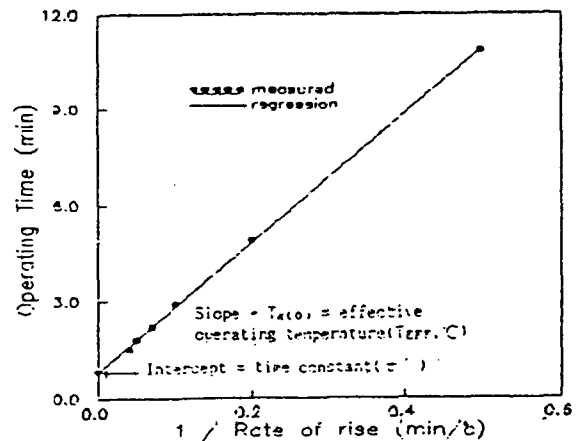
4. 결과 및 고찰

4.1 풍동실험

Fig.3(a)는 풍동실험에서의 온도상승율에 대한 작동온도이며, (b)는 온도상승율의 역수에 대한 작동시간으로 그림중의 실험값을 회귀분석(regression)한 선이다. Fig.3(a)에서 작동온도(T_{op})는 식(3)과 같이 상승율(β)의 선형직선으로 표시되어, 그 직선의 기울기가 시간상수(τ)가 되며 y 축과의 교점이 최소작동기류온도에서 주위온도를



(a)



(b)

Fig. 3 Determination of effective operating temperature and time constant

값이 되며, y축과의 교점이 시간상수(τ')가 된다.

Fig.3(a)에서는 최소작동기류온도가 56.6℃, 시간상수가 0.375분이고, Fig.3(b)에서는 최소작동기류온도가 51.1℃, 시간상수가 0.8분으로 차이가 났는데, 그것은 실험에서 온도상승은 PID 컨트롤러(controller)에 의해 제어되는데 목표값과 같이 시간에 따라 직선적으로 상승하지 않고 약 3-5℃의 편차 범위내에서 제어되기 때문에 생기는 차이에 기인한다. 그래서 본 연구에서는 두개의 값을 산술 평균하였다. 이 산술평균한 최소작동기류온도(T_{EFF})는 54℃, 시간상수(τ')는 0.6분(36초)이며, $RTI(=\tau U^{1/2})$ 는 유속이 1m/s이므로 36 ($m^1/2s^{1/2}$)이다.

식(5)에 의하여 작동시간은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$t_{op} = \frac{23}{\beta} + \frac{0.6}{U^{1/2}} \text{ (min)} \quad (6)$$

여기서, β 는 온도상승률(℃/min), U는 유속(m/sec)이다.

식(6)에서 온도상승률(β)과 유속(U)을 알면, 화재시 정온식 열감지기의 작동시간(t_{op})을 예측할 수 있으며, 작동시간은 온도상승률과 기류속도의 제곱근에 반비례하는 것을 알 수 있다.

또 작동시의 기류온도는 식(3)에서 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$T_{op} = 0.6\beta + 54 \text{ (℃)} \quad (7)$$

식(7)에서 온도상승률(β)을 알면 정온식 열감지기의 작동온도(T_{op})을 예측할 수 있으며, 작동시 기류온도는 온도상승률에 비례한다.

Table 1은 풍동실험에서의 작동시간과 작동온도를 식(6), (7)로 계산한 값을 비교한 것으로서 제안식은 풍동실험값을 잘 나타낸다.

Table 1에서 정온식 열감지기 1종의 표시온도는 70℃이나 그 이하의 온도에서 작동하는 것은, 정온식 열감지기 1종의 검정기준세척⁵⁾에서 온도상승률이 1℃/min이하에서는 54℃이상, 1℃/min 이상에서는 62℃ 이상에서 작동하도록 되

Table 1. Comparison of calculated and measured value of operating temperature and time in wind tunnel test.

β (℃/min)	Measured		Calculated	
	t_{op} (min)	T_{op} (℃)	t_{op} (min)	T_{op} (℃)
2	10.8	57.2	12.1	55.2
5	4.9	58.0	5.2	57.0
10	2.9	61.7	2.9	60.0
15	2.2	62.0	2.1	63.0
20	1.8	64.5	1.8	66.0
25	1.5	65.4	1.5	69.0

어 있기 때문에 이 기준에 의하면 본 연구에 용한 열감지기는 온도상승을 10℃/min이상에는 적합하나 5℃/min이하에서는 다소 부적합하다.

4.2 실제 화재실험

3.2절의 화재실험실에서 열감지기의 실제 작동시간 및 작동온도를 측정하여 식(6)에서 (7)까지의 제안식의 적합성을 검토하였다.

Fig.7는 실제 규모의 화재실험실에서 2.7cm x 2.7cm x 30cm인 목재를 1층에 6개씩 6층으로 쌓은 wood crib를 연소시켰을 때 각 위치에서의 시간에 따른 온도변화의 예로서, 화재초기의 낮은 온도상승률이 화재성장과 함께 급격히 커진 후 소멸기까지 거의 일정하게 유지된다. 이와 같이 실제 화재에서는 온도상승률이 일정하지 않다.

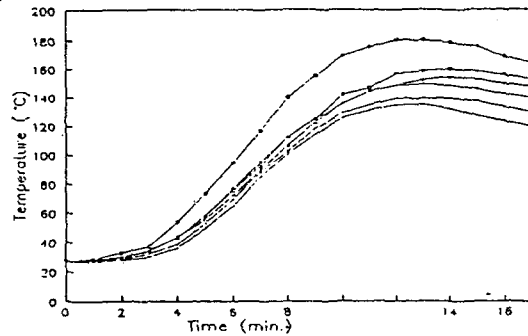


Fig. 4 Variation of temperature in compartment fire experiment.

Table 2는 같은 크기의 목재 6개씩 4층으로 쌓아 연소시킬때의 온도상승율을 정온식 열감지기가 작동하는 시간까지 시간별로 나타낸 것으로서, 대략 2℃/min에서 20℃/min까지 일정하지 않아 제안식의 계산시는 평균 온도상승율을 사용하였다.

Table 2. Rate of temperature rise in compartment fire experiment.

(unit : ℃ /min)

Lapse Time/No.	1	2	3	4	5	6
Initial - 1 min	1.3	8.3	2.14	1.7	2	2
1-2 min	1.6	13.8	5.4	1.6	4.5	4.5
2-3 min	5.1	16.6	10.4	5	8.5	8.5
3-4 min	7.9	20.7	13.2	15.3	13.5	13.5
4-5 min	11.5	-	19.4	16.9	16.2	16.2
mean	5.5	14.9	10.1	8.1	8.9	8.9

또한 초기 화재시의 연기의 유속은 대략 0.5-0.7m/s로서, 평균유속 0.6m/s를 사용하여 작동시간을 계산하였다.

Table 3은 이 평균 온도상승율과 평균유속을 사용하여 제안식으로 계산한 정온식 열감지기의 작동시간 및 작동온도와 실제 화재실험에서 측정값을 비교한 것이다. 작동시간은 다소 작게 예측되었으나, 실제 화재실험시의 작동시간은 소량의 알콜로 점화할 때부터 측정된 시간으로 목재연료에 점화되기까지는 10-20초 정도 시간이 걸리며 또 연기가 열감지기까지 도달하는 시간만큼 지연된다. 또한 사용한 목재연료의 수분함유율에 따라 연소시 발생하는 연기의 양과 연기의 온도상승은 큰 차이가 있다. 이러한 실제 실험의 시간지연과 온도상승율의 불균일, 목재의 수분함유율 차이로 인한 영향등을 고려하면 제안식은 Table 6에서와 같이 상당히 근사하게 작동시간을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

또한, 작동온도는 화염원과 열감지기간의 위치와 높이, 실제화재시의 시간지연에 따라 차이가 있어 다소 작게 예측되었으나, 이러한 영향을 고려하면 작동온도도 매우 근사하게 예측할 수 있음을 볼 수 있으며, 따라서 상기 작동시간과 작동온도의 제안식은 실제적인 사용에 적합하다고 사료

Table 3. Comparison of calculated and measured values of operating temperature and time in compartment fire experiment.

	β (℃/min)	Calculated		Value of compar. fire	
		t_{op} (min)	T_{op} (℃)	t_{op} (min)	T_{op} (℃)
1	5.5	4.78	57.3	6.2	65.6
2	14.9	2.14	63.0	3.7	77.2
3	10.1	2.88	60.1	4.3	60.1
4	8.1	3.44	58.9	5.0	68.3
5	8.9	3.18	59.3	5.2	65.2
6	8.9	3.18	59.3	5.5	71.1

된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 도표를 이용하여 작동시간과 작동온도를 구할 수 있도록 기류속도를 1m/s로 하여 상기 제안식으로 작동시간과 작동온도를 그림으로 표시한 것으로, 적당한 온도상승율을 가정하면 그림에서 작동시간과 작동온도를 예측할 수 있다.

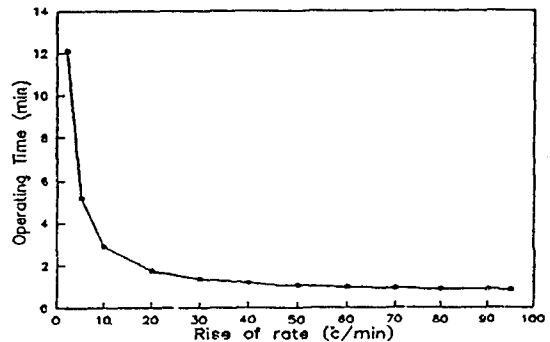


Fig. 5 Prediction of operating time

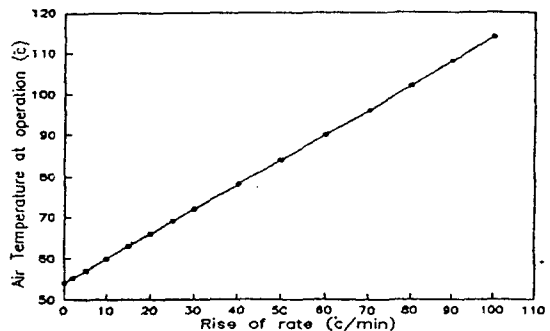


Fig. 6 Prediction of operation temperature

5. 결 론

국산 정온식 열감지기 1종의 응답시간지수와 작동시간에 대하여 수평방향 기류에 대한 풍동실험과 목재연료를 사용한 실제 화재실험을 통하여 본 실험조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에 사용한 열감지기의 작동시간과 작동온도를 예측할 수 있는 간단한 식을 제시하였다.

2. 본 연구에 사용한 정온식 열감지기의 수평기류에 대한 최소작동기류온도는 54℃, 시간상수는 0.6분, 응답시간지수(RTI)는 36이었고, 수직기류에 대한 최소작동기류온도는 71.4℃, 시간상수는 0.6분, 응답시간지수(RTI)는 36이었다.

참 고 문 헌

1. C. R. Theobald, S. A. Westley and S. Whitbread, "Thermal Response of Sprinklers Part I. Characteristics and Test Methods." *Fire Safety Journal*, vol.13, pp.99-114, 1988
2. P. F. Thorne, C. R. Theobald and S. J. Melinek, "The Thermal Performance of Sprinkler Heads", *Fire Safety Journal*, vol.14, pp89-99, 1988
3. 이병곤, 태순호, "용융형 스프링클러 헤드의 응답 시간지수 및 작동시간에 관한 연구", *산업안전학회지*, vol.6, No.4, pp34-44, 1991
4. G.Heskestad, H. F. Smith, "Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test: The

Plunge Test," FMRC 22485, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, 1976.

5. 동방전자 품질관리실 점정기준세척, 1992.

기 호

- c : 감열부의 비열(kJ /kg.℃)
- h : 대류열전달계수(W/m²℃)
- m : 감열부의 질량(kg)
- A : 감열부의 표면적
- t : 시간(min)
- T : 온도(℃)
- T_{g(t)} : 초기주위온도(℃)
- T_{EFF} : 최소작동기류온도(℃)
- ΔT : 초기주위온도에 대한 온도증가(℃)
- U : 기류속도(m/s)
- β : 기류의 온도상승율(℃ /min)
- τ : 열손실이 없을 때의 시간상수(min)
- τ' : 열손실이 있을 때의 시간상수(min)

하첨자

- e : 감열체
- f : 프레임
- ef : 감열체에서 프레임
- g : 기류
- op : 작동시의 값