

## 풍동실험과 화재실험을 통한 열감지기의 동작특성에 관한 연구

# Study on the Operation Characteristics of Heat Detectors through Fire and Wind Tunnel Experiment

Hocheol Ryu<sup>a</sup>, Doohyun Kim<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Safety Engineering of Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 361-763 Korea

<sup>b</sup> Professor of Department of Safety Engineering of Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 361-763 Korea

### ABSTRACT

Abstract : The heat detector detects heat in the fire and is an important core element of the automatic fire alarm system used generally for every fire prevention objects. The heat detector is distinguished in spot type and spread type and in spot type, there are differential and thermistor types. These heat detectors give a great influence on the loss of people and property according to the sensitivity of response such as operation time and operation temperature in actual fire and in overseas people apply it for the development of products that can be operated in the early stage of fire including certification, quality management, and comparison standard by introducing response time index through the theory of heat balance that considers the heat loss and ventilation tests. In Korea, the response time index is introduced and used in the head of sprinkler products, but it is not applied to the heat detector at present. It is necessary to introduce the response time index that shows the sensitivity of response of the heat detector the installation standard for the heat detector that the response time index is applied should be different according to the fire weight, danger degree of fire, and shape of buildings. Through this study, it tries to help reduce lives and property of people through the swift warning by installing detectors suitable for the building structure.

### KEYWORDS

fire detector  
operating time  
operating temperature  
sensitivity of response  
response time  
index

열감지기는 화재시 발생하는 열을 감지하는 것으로 모든 소방대상물에 일반적으로 사용되는 자동화재탐지설비의 중요한 핵심 요소이다. 열감지기는 스포트(spot)형과 분포형으로 구분되며, 스포트형에는 차동식과 정온식이 있다. 이러한 열감지기는 실제 화재시 작동시간 및 작동온도 등 반응의 민감도에 따라 인명과 재산 손실에 큰 영향을 준다. 국내에서는 스프링클러 헤드제품에 응답시간지수를 도입하여 사용하고 있으나, 열감지기에 대해서는 현재 적용이 되어지지 않고 있으며, 반응의 민감도를 표시하는 응답시간지수의 도입이 필수적으로 본 연구에서는 국내 생산된 정온식 스포트형 열감지기와 다이아프램형 및 반도체형식의 차동식 스포트형 열감지기에 대하여 풍동실험 및 화재실험을 통하여 응답시간지수, 작동시간, 작동온도 등에 대하여 연구하였다. 응답시간지수를 적용한 열감지기를 설치하여 신속한 경보로 인한 국민의 생명과 재산손실을 줄이는데 도움을 주고자 한다.

열감지기  
작동시간  
작동온도  
응답시간지수  
화재실험

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-010-5463-9414. Fax. 82-43-250-9716

1 Tel. 82-43-250-9713. Email. [ti9713@hanmail.net](mailto:ti9713@hanmail.net)

2 Tel. 82-43-267-2461. Email. [dhk@chungbuk.ac.kr](mailto:dhk@chungbuk.ac.kr)

### ARTICLE HISTORY

Received Apr. 17, 2015

Revised Apr. 27, 2015

Accepted May. 20, 2015

## 1. 서론

열감지기는 화재시 발생하는 열을 감지하는 것으로 모든 소방대상물에 일반적으로 사용되는 자동화재탐지설비 중에서도 가장 중요한 핵심 요소이다. 열감지기는 스포트(spot)형과 분포형으로 구분되며, 스포트형에는 주위온도가 일정한 온도상승률 이상이 되었을 때 작동하는 차동식과 주위온도가 일정한 온도 이상이 되었을 때 작동하는 정온식이 있다. 정온식 스포트형 열감지기는 바이메탈의 반전을 이용한 형식이 생산, 사용되고 있다. 차동식 열감지기의 대표적인 형식은 다이아프램형과 반도체식이 있다. 다이아프램형은 감열실내의 공기가 팽창을 이용한 형태이며, 반도체형은 반도체 감온소자(thermistor)를 이용한 신호를 화재 수신반에 보낸다.

이러한 열감지기는 실제 화재시 작동시간 및 작동온도 등 반응의 민감도에 따라 인명과 재산 손실에 큰 영향을 준다. 이에 대한 생산제품 검사는 검정규격에 의한 작동 및 부작동 시험만을 시행하고 있으나, 외국에서는 열손실을 고려한 열평형식의 이론과 풍동실험을 통하여 반응 민감도를 나타내는 응답시간지수(Lee, B. K. and Tae, S. H,1991)를 도입하여 인증, 품질관리, 비교기준 및 화재 초기에 작동할 수 있는 제품의 개발에 응용하고 있다. Smith 등은 스프링클러 헤드의 풍동실험에서 열전달계수는 일정한 형태의 값이 되는 것을 응답시간지수라 명명하였다. Theobald 등은 감열부에서 본체로의 열손실이 작동시간에 지대한 영향을 끼친다는 것을 확인하고, 이러한 영향을 감안한 열평형식과 일반해를 제시하였다. 태순호 등은 국내산 스프링클러 헤드의 응답시간지수와 작동시간에 대하여 연구하였다. 국내에서는 스프링클러 헤드제품에 응답시간지수를 도입하여 사용하고 있으나, 열감지기에 대해서는 현재 적용되지 않고 있다. 응답시간지수란 감지기가 열을 감지하여 작동한 시간을 말하는데 이는 대피시간 및 소화진화시간과 관련되어 매우 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 국내 생산된 정온식 스포트형 열감지기와 차동식 스포트형 열감지기에 대하여 풍동실험 및 화재실험을 실시하여 작동시간, 작동온도를 측정하였고 응답시간지수와 작동시간의 이론식을 바탕으로 정온식과 차동식 열감지기의 응답시간지수를 제안하였다. 제안한 응답시간지수를 적용한 열감지기를 건물의 형상에 따라 설치하면 자동화재탐지설비의 오작동이 줄어 화재경보의 신뢰성이 높아질 것으로 판단된다.

## 2. 응답시간지수와 작동시간의 이론식

### 2.1 열손실이 없을 때의 열평형식과 응답시간지수

얇은 금속판으로 되어 있는 감열부의 온도상승률은 비정상 전도열전달의 집중 열용량법으로 해석할 수 있다(Ryu, H. C. and Tae, S. H, Lee, B. K,1993).

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

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

스프링클러 헤드의 고온 기류 풍동실험에서 열전달계수( $h$ )는 기류의 온도에 무관하게 저속에서는 기류속도( $U$ )의 제곱근에 비례하는 것을 확인(G.Heskestad, H. F. Smith, 1976)하였고,  $h$ 를  $U^{1/2}$ 으로 바꾸면  $\tau U^{1/2}$ 은 한 형태에서는 일정한 값이 되며 이를 응답시간지수(Response Time Index : RTI) 라고 하였다.

### 2.2 전도열손실을 고려한 열평형식과 응답시간지수

감열부에서 본체로의 열손실이 작동시간에 지대한 영향을 끼친다는 것을 확인(C. R. Theobald, S. A. Westley and S. Whitbread, 1988) (P.F. Thorne, C.R. Theobald and S.J. Melinek, 1988)하고, 이러한 영향을 감안한 열평형식과 일반해를 제시하였다.

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

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

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

$$T_{op} = T_{EFF} + \beta \tau' \tag{3}$$

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

윗식에서,  $T_{EFF}$ 는 최소작동기류온도이다.

식(4)에서 시간상수( $\tau$ )를 RTI로 표시하면 작동시간은,

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

가된다. 작동시간은 실험에서  $\tau'$ ,  $T_{EFF}$ 를 구하고 온도상승률( $\beta$ )을 알면, 상승률 형태의 화재에서 작동시간( $t_{op}$ )(Ryu, H. C. and Lee, B. K, 1994)를 예측할 수 있다.

### 3. 실험장치

#### 3.1 풍동실험

풍동(wind tunnel)실험((Lee, B. K. and Tae, S. H,1991)은 Fig.1.과 같은 히터( heater,3kw)가 부착된 풍동에서 행하였으며, 온도상승률은 programmable temperature controller를 사용하여 조절한다. 실험방법은 유속을 기준온도 25°C일 때의 1m/s, 온도상승은 초기 주위온도에서 30°C까지는 5°C/min로 상승시키며 30°C에서 5분간 유지시킨 후, 온도상승률을 2°C/min에서 25°C/min 까지 변화시켜서 실험한다. 감지기의 감도 시험방법은 계단상승실험(RAMP TEST)과 직선상승실험(PLUNGE TEST)이 있는데, 본 연구에서는 계단상승시험에 대해서만 실험하였다.

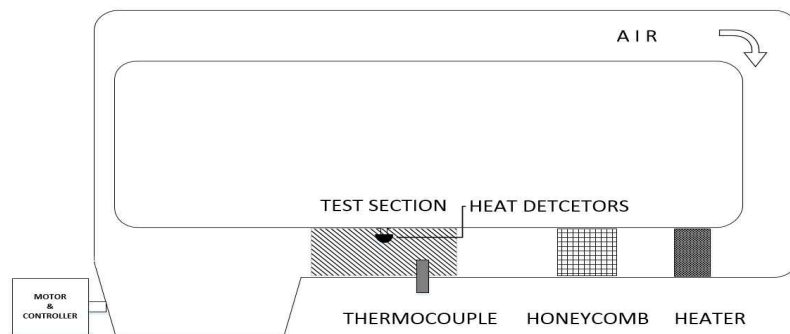


Fig. 1 Schematic view of heated wind tunnel

#### 3.2 실제 화재실험

Fig.2는 열감지기의 위치에 따른 작동시간을 분석하기 위하여 4.2(L)×2.6(W)×2.5(H)m의 벽돌조로 되어 있는 화재실험실(Jung, K. S. and Lee B. K,2003)을 나타낸 것이다. 천정면은 석고보드에 철판을 덧대어 만들어진 구조이며, 출입문은 1.3(L)×1.9(H)m의 구조이다. 화재실험실의 천정에 차동식 스포트형 감지기(DC 24V, 2종, 재용형, 보통형 비방수형)를 설치하여 수신기로 연결하였고, 열전대를 설치하여 작동온도를 측정하였으며, 유속은 전자식 마이크로 마노미터로 측정하였다. 감지기의 말단이 수신기에 연결되어 감지기 동작 시 이를 경보하도록 하였다. 감지기와 수신기 사이의 전선은 내화전선(FR cable)을 사용하여 화재실험시의 화염과 열에 견디도록 하였다.

실험은 2.7cm×2.7cm×30cm인 목재를 1층에 6개씩 4-8층으로 쌓은 목재(wood cribs)를 연소시켜, 시간에 따른 온도변

화율과 감지기의 작동온도를 측정하며, 작동시간은 소량의 알코올로 점화할 때부터의 시간을 측정하였다. 목재에 점화가 되면 알코올을 제거하였다.

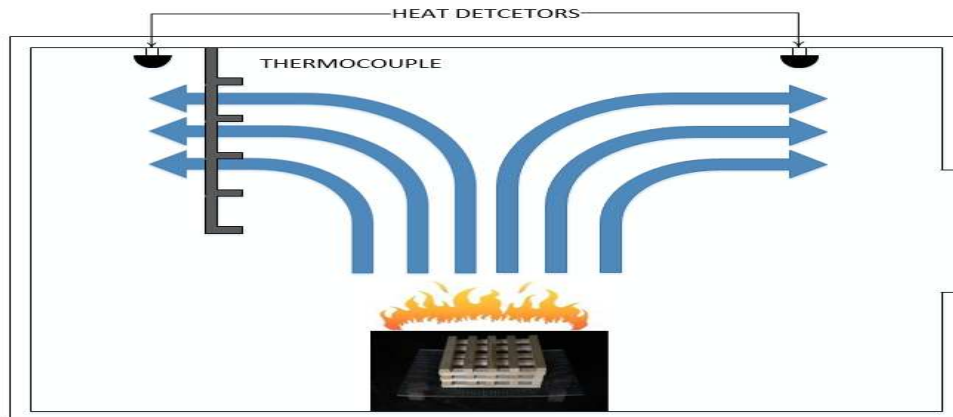


Fig. 2 Schematic diagram of compartment

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 풍동실험

Fig.3는 풍동실험에서의 온도상승률에 대한 작동온도이며, 작동온도( $T_{op}$ )는 회귀분석을 통하여 식(3)과 같이 상승률( $\beta$ )의 선형직선으로 표시되어, 그 직선의 기울기가 시간상수( $\tau$ )가 되며 y축과의 교점이 최소작동기류온도에서 주위온도를 뺀 값이 되며 y축과의 교점이 시간상수( $\tau$ )가 된다.

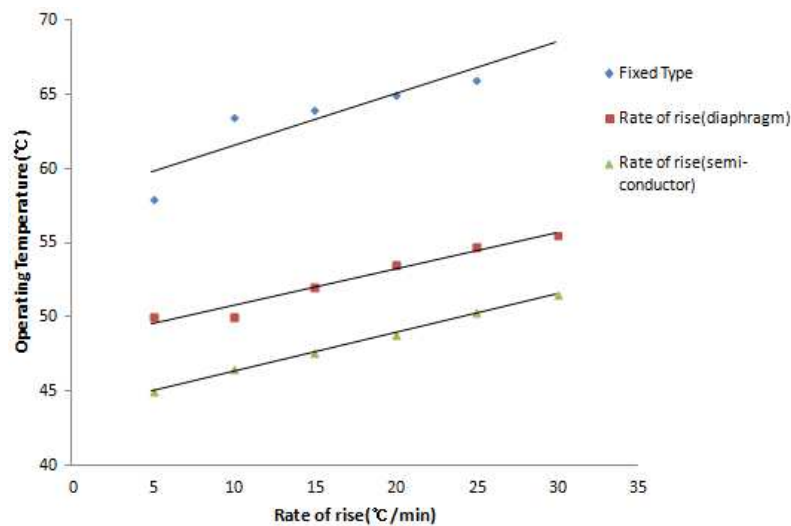


Fig.3 Determination of effective operating temperature and time constant

Fig.3의 정온식 열감지기에서는 최소작동기류온도( $T_{EFF}$ )는 54°C, 시간상수( $\tau$ )는 0.6분(36초)이며, RTI( $=\tau' U^{1/2}$ )는 유속이 1m/s이므로  $36(m^{1/2}s^{1/2})$ 이다.

식(5)에 의하여 작동시간은 다음 식으로 표시할 수 있다.

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

여기서,  $\beta$ 는 온도상승률( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ),  $U$ 는 유속( $\text{m}/\text{sec}$ )이다.

식(6)에서 온도상승률( $\beta$ )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.

$$T_{op} = 0.6\beta + 54(^{\circ}\text{C}) \tag{7}$$

식(7)에서 온도상승률( $\beta$ )을 알면 정온식열감지기의 작동온도( $T_{op}$ )을 예측할 수 있다.

마찬가지로, 다이아프램형 차동식 열감지기에서 최소 작동기류온도( $T_{EFF}$ )는  $49^{\circ}\text{C}$ , 시간상수( $\tau$ )는 0.34분이며, RTI는 20이다. 기본 이론식에 의하여 작동온도( $T_{op}$ )와 작동시간( $t_{op}$ )은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$T_{op} = 0.34\beta + 49(^{\circ}\text{C}) \tag{8}$$

$$t_{op} = \frac{18}{\beta} + \frac{0.34}{U^{1/2}}(\text{min}) \tag{9}$$

식 (8), (9)에서 온도상승률( $\beta$ )과 유속( $U$ )을 알면, 화재시 다이아프램형 차동식 열감지기의 작동시간과 작동온도를 예측할 수 있다.

또한, Fig. 3의 반도체형 차동식 열감지기의 최소작동기류온도는  $47^{\circ}\text{C}$ , 시간상수는 0.3분이며, RTI는 18이다. 따라서 작동온도와 작동시간은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{op} = 0.3\beta + 47(^{\circ}\text{C}) \tag{10}$$

$$t_{op} = \frac{16}{\beta} + \frac{0.3}{U^{1/2}}(\text{min}) \tag{11}$$

## 4.2 실제 화재실험

화재실험실에서 열감지기의 실제 작동시간 및 작동온도를 측정하여 식(6)에서 (11)까지의 제안식의 적합성을 검토하였다.

### 4.2.1 정온식 열감지기의 작동시간 및 작동온도

Fig.4와 Fig.5는 이 평균 온도상승률과 평균유속을 사용하여 제안식으로 계산한 정온식 열감지기의 작동시간 및 작동온도와 실제 화재 실험에서 측정한 값을 비교한 것이다. 작동시간은 다소 작게 예측되었으나, 실제 실험의 시간지연과 온도상승률의 불균일, 연료의 함수율에 따른 발열량 등을 고려한다면 제안식은 상당히 근사하게 작동시간을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

또한, 작동온도는 화염원과 열감지기간의 위치와 높이, 천장의 형상 등 시간지연 요소에 따른 차이 등을 고려하면 유사하게 예측할 수 있음을 볼 수 있다.

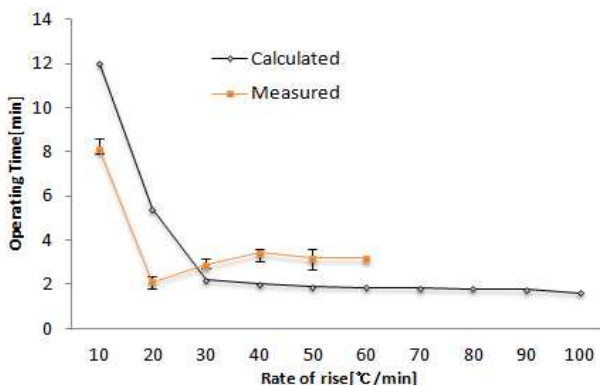


Fig.4 Comparison of calculated and measured operating time in compartment fire experiment

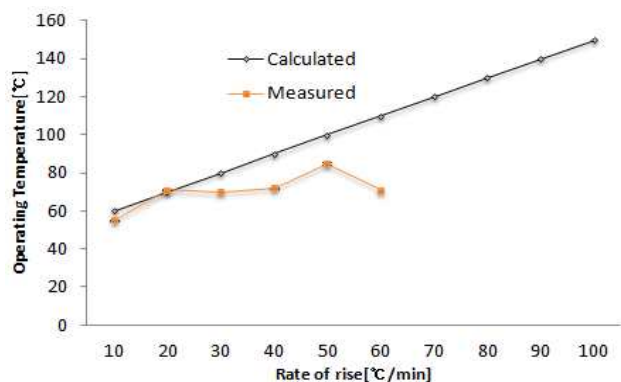


Fig.5 Comparison of calculated and measured operating temperature in compartment fire experiment

#### 4.2.2 차동식 열감지기의 작동시간 및 작동온도

Fig.6와 Fig.7은 차동식 열감지기에 대한 (8)에서 (11)의 제안식으로 계산한 작동시간 및 작동온도와 실제 화재실험에서 측정된 값을 비교한 것이다.

제안식의 계산 시 온도상승률은 매 실험에서의 평균값 0.6m/s를 사용하였다. Fig. 6의 다이어프램형 차동식 열감지기에서 제안식의 작동온도는 측정값보다 크게 예측되었는데, 그것은 온도상승률의 평균값을 사용한 것과 목재의 수분 함유율 등 실험시의 오차 등에 기인한다. 또한 반도체형 차동식 열감지기에서 제안식의 작동온도는 측정값과 같거나 다소 크게 예측된다.

Fig. 7에서의 제안식의 작동시간은 편차가 있으나 측정값과 유사하게 예측되어, (8)에서 (11)의 제안식은 실제 화재에서도 이러한 오차범위 내에서 작동온도와 작동시간을 비교적 유사하게 예측할 수 있다.

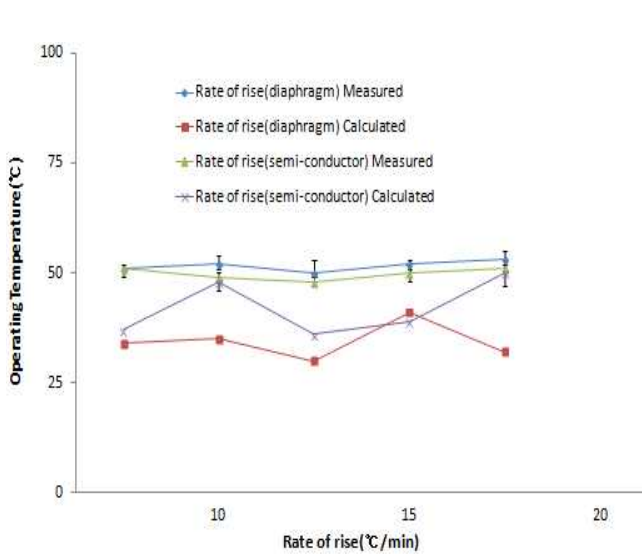


Fig. 6 Comparison of calculated and measured operating temperature in compartment fire experiment

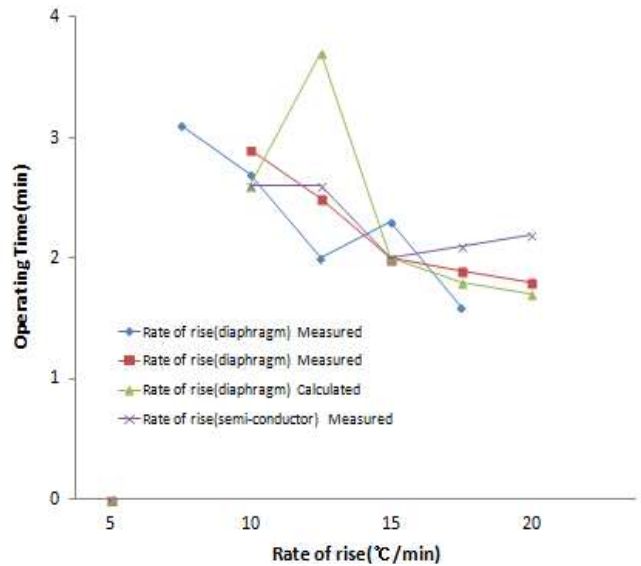


Fig. 7 Comparison of calculated and measured values of operating time in compartment fire experiment

#### 4.3 정온식과 차동식 열감지기의 비교

Table 1은 본 연구에 사용한 정온식과 차동식 열감지기의 다이어프램형과 반도체형의 응답시간지수(RTI)를 비교한 것으로, 정온식에 비하여 차동식 열감지기가 응답시간지수가 작으며, 다이어프램형보다 반도체형이 응답시간지수가 작아 반도체형이 다이어프램형보다 응답이 더 민감함을 알 수 있었다.

정온식 열감지기는 열을 사용하는 장소에 부착하여 사용하며, 차동식 열감지기는 일반적인 거실에 주로 사용되어지고 있다. 열감지기는 오동작이나 비화재보에 때문에 수신기를 OFF 시키거나, 정비불량 등으로 인하여 제 기능을 발휘하지 못하는 경우가 종종 있는 현실이며, 이러한 이유 등으로 자동화재탐지설비의 신뢰도에도 문제가 있으며, 안전대피시간에도 많은 영향을 줄 것이다. 소방대상물의 용도별, 화재하중이나 또는 화재위험성의 경중에 따라서 응답시간지수를 적용한 열감지기를 설치하면 오동작도 적어질 뿐만 아니라, 경보 개시 시간이 상대적으로 빨라져 안전대피시간이 늘어날 것이다.

Table 1. Comparison of fixed type and rate of rise type heat detector

	fixed type	rate of rise type (diaphragm)	rate of rise type (semi conductor)
$T_{EFF}$ (°C)	54	49	47
$\tau$ (min)	0.6	0.34	0.3
RTI	36	20	18

## 5. 결 론

국산 열감지기에 대한 응답시간지수와 작동시간에 대하여 풍동실험과 목재연료를 사용한 실제 화재실험을 통하여 본 실험조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 정온식 및 차동식의 열감지기에 대하여 실험데이터와 이론식을 적용하여 최소작동기류온도, 시간상수, 응답시간지수(RTI)을 도출하였고, 작동시간과 작동온도를 예측할 수 있는 수식을 제안하였다.
- 2) 정온식보다는 차동식 열감지기가 빠르고, 차동식 열감지기에서는 반도체형이 다이아프램형보다 응답이 더 민감하였다.
- 3) 열감지기에 응답시간지수를 적용하여 설치한다면 자동화재탐지설비의 오동작이 적어져 신뢰도가 상승할 것이고, 경보 개시 시간이 상대적으로 빨라져 안전대피시간이 늘어날 것이다.
- 4) 소방대상물의 용도나, 화재하중을 고려하여 응답시간지수(RTI)를 적용한 열감지기를 도입하여야 한다.

## Reference

- Lee, B. K. and Tae, S. H.(1991) "A Study on Response Time Index and Operating Time for Fusible Link Sprinkler Head", Journal of the Korean Society of Safety, vol.6, No.4, pp.34-44,
- Ryu, H. C. and Tae, S. H, Lee, B. K(1993), "Response Time and Operating Time of Fixed Temperature Heat Detector", Fire Science and Engineering, vol.7, No.1,
- Ryu, H. C. and Lee, B. K(1994), "Operating Temperature and Time of Rate of Rise Heat Detector", Journal of the Korean Society of Safety, vol.9, No.1,
- G.Heskestad, H. F. Smith(1976), "Investigation of a New Sprinkler Seneitivity Approval Test: The Plinge Test," FMRC 22485, Factory Mutual Research Corporation, Norwood,
- C. R. Theobald, S. A. Westley and S. Whitbread(1988), "Thermal Response of Sprinklers Park I. Characteristics and Test Method." Fire Safety Journal, vol.13, pp.99-114,
- P.F. Thorne, C.R. Theobald and S.J. Melinek(1998), "The Thermal Performance of Sprinkler Heads", Fire Safety Journal, vol.14, pp.89-99,
- Jung, K. S. and Lee B. K(2003), "A Study on Response Characteristics of Ionization Smoke Detector Influenced By Air Stream ", Fire Science and Engineering, vol.17, No.2,

기 호

하첨자

c : 감열부의 비열(kJ/kg°C)

e : 감열체

h : 대류열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C)

f : 프레임

m : 감열부의 질량(kg)

ef : 감열체에서 프레임

A : 감열부의 표면적

g : 기류

t : 시간(min)

op : 작동시의 값

T : 온도(°C)

$T_{g(0)}$  : 초기주위온도(°C)

$T_{EFF}$  : 최소작동기류온도(°C)

$\Delta T$  : 초기주위온도에 대한 온도증가(°C)

U : 기류속도(m/s)

$\beta$  : 기류의 온도상승률(°C/min)

$\tau$  : 열손실이 없을 때의 시간상수(min)

$\tau'$  : 열손실이 있을 때의 시간상수(min)