

## 스프링클러헤드 감열부의 열적 특성에 관한 연구

유우준 · 문효준 · 염문천\* · 유홍선†

중앙대학교, \*한국소방산업기술원

### An Investigation on the Thermal Characteristics of Heat-Responsive Element of Sprinkler Head

Woo-Jun You · Hyo-Jun Moon · Moon-Cheon Youm\* · Hong-Sun Ryou†

Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

\*Dept. of Test & Certification, Korean Fire Institute of Industry & Technology

(Received April 13, 2012; Revised May 17, 2012; Accepted June 8, 2012)

#### 요 약

본 연구에서는 국내의 스프링클러헤드 감도시험 기준에 적용하고 있는 반응시간지수(RTI, Response Time Index)를 사용하여 대류향과 전도향 그리고 시간 변화량을 고려한 감열부의 열전달 현상을 해석적으로 분석하였다. 원형 실린더 형상을 갖는 감열부의 열적 특성을 분석하기 위해서 비제차 2차 편미분 형태의 에너지 방정식을 사용하여 감열부 표면의 온도가 일정하고 대칭(Symmetric)인 경계조건을 적용하여 시간 증가에 대한 감열부의 반지를 방향 온도분포를 구하였다. 그 결과 본 연구의 감열부 열적 특성에 관한 분석 기법은 스프링클러헤드의 감도시험 및 감열부의 설계를 위한 자료의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### ABSTRACT

In this study thermal characteristics of heat-responsive element considering conduction, convection and rate of change of element using Response Time Index (RTI) applied to sensitivity test of sprinkler head at home and abroad are theoretically investigated. Analytic solution of temperature distributions with radial direction and time is obtained from energy transport equations, non-homogeneous 2th order partial differential equation, applying to constant wall temperature and symmetric condition in order to analyze thermal characteristics of heat-responsive element for circular cylindrical geometry. Base on the results, the analytic method of this study is fundamental data to practical use for sensitivity test of sprinkler head and design of heat-responsive element.

**Keywords :** Heat-responsive element, Response time index, Sprinkler head, Sensitivity test, Energy transport equation, Wall temperature, Symmetric condition, Design method

#### 1. 서 론

일반적인 화재 현상은 가연성 물질이 발화점 이상의 온도에 도달하면서 주변의 산화제와 연소반응을 일으키고 유독가스를 배출함과 동시에 고온의 열 및 연기가 확산되는 특징을 갖고 있다<sup>(1,2)</sup>. 특히, 발화 지점에서 지속적으로 생성되는 열기는 천장 부근까지 상승하여 제트기류(Ceiling Jet)를 형성하게 되고 수평방향으로 빠르게 이동하면서 주변의 가연물로 화재가 확산되어 막대한 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다<sup>(3)</sup>. 각 국가에서는 이러한 화재 발생을 조기에 진압하기 위해서 수계·가스계 등 다양한 소화설비 방식을 적용하고 있으며<sup>(4,5)</sup>, 이 중에서 스프링클러설비는

화재 발생에 의해서 수평방향으로 이동하는 고온의 열기가 스프링클러헤드 또는 감지기의 감열체에 전달되어 자동으로 화재를 진압하는 전형적인 수계소화설비로 감열체의 열적 특성은 스프링클러설비의 작동성능에 매우 중요한 인자로 구분할 수 있다<sup>(6)</sup>. 따라서 유럽 및 아시아 등의 세계 여러 국가에서는 화재 발생시 감열체의 열전달 현상과 상관관계를 갖고 있는 주요 매개변수를 반응시간지수(RTI, Response time index)로 정량화하여 스프링클러헤드 및 차동식 감지기 등의 감도시험 규격에 적용하고 있다<sup>(7-9)</sup>.

이러한 RTI는 1970년대 초반 FMRC(Factory Mutual Research Corporation)의 Heskestad & Smith에 의해서 최초로 제시되었으며, 집중열용량법(Lumped heat capacity

† Corresponding Author, E-Mail: cfdmec@cau.ac.kr  
TEL: +82-10-3269-5280, FAX: +82-31-287-9066

ISSN: 1738-7167  
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.3.079

method)을 적용한 이론식으로 현재 UL, JIS 및 국내의 감도시험 기준에서 적용하고 있다<sup>(10,11)</sup>. 하지만, 1980년대 중반 J. S. Pepi는 낮은 기류 및 온도 조건에서 열손실에 의해서 스프링클러헤드가 미작동 되는 연구 사례를 제시한 바 있으며<sup>(12,13)</sup>, 그 이후 FMRC와 BS-EN에서는 전도에 의한 열손실을 적용한 수정된 반응시간지수(RTI<sub>v</sub>, Modified response time index)와 손실변수(C parameter)에 관한 실험식을 사용하여 감도시험 기준에 적용하고 있다<sup>(14)</sup>. 그러나 손실변수를 구하기 위해서는 기류의 온도와 속도를 일정하게 증가시키면서 감열체의 반응성을 고려한 반복시험에 의해서 손실변수를 추정하는 방법을 사용하기 때문에 비효율적이라는 단점이 있으며, Joe et al.<sup>(15)</sup>은 손실변수가 다양한 기류 온도와 속도조건에서 감열부 및 접합부의 열손실을 고려할 수 없다는 문제점을 제기한 바 있다. Gustafsson N. E<sup>(16)</sup>는 이러한 문제점을 해결하고 스프링클러헤드 접합부에서의 열손실을 고려한 상변화인자(CHP, Change of Phase Parameter)를 적용하여 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 제시한 바 있으나 RTI<sub>v</sub>와 동일한 손실변수를 적용하기 때문에 감열체 내부의 열전도 현상을 정확하게 구현하기 어려운 한계를 갖고 있다. FRS(Fire Research Station)에서는 손실변수의 중요성을 인지하여 FMRC에서 사용하고 있는 RTI<sub>v</sub>의 관계식을 사용하고 있지만 단위시간당 감열체의 온도상승률(°C/min)을 도입하여 손실계수의 추정값을 FMRC의 결과와 비교하여 스프링클러헤드의 감도시험에 적용하고 있다<sup>(9)</sup>. 하지만, 현재까지의 연구결과에서 보듯이 RTI<sub>v</sub> 및 CHP 등의 관계식은 에너지 방정식에서 유도된 것으로 열손실을 구하기 위해서 2차 미분형태의 전도항을 계수로 가정하여 구한 것을 확인할 수 있다. 이러한 과정에서 식이 단순화될 수 있는 이점은 있지만 감열체 내부의 단위시간동안 온도변화율을 구할 수 없고 손실계수를 구하기 위해서는 반복시험에 의존할 수밖에 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 감열체의 대류 열전달 현상과 전도에 의한 반지름 방향 온도변화율을 구하기 위해서 2차 미분형태의 전도항을 사용하여 감열체의 온도분포 해석해를 구하였으며, 해석 모델을 사용하여 감열체의 물리적 특성을 고려한 열적 현상을 분석해 보고자 한다.

## 2. 반응시간 지수 모델

### 2.1. RTI, RTI<sub>v</sub>, CHP 관계식 분석

Figure 1은 화재가 발생하여 열기가 천장 부근에 도달한 후 수평방향으로 이동하면서 감열부에 전달되는 현상을 보여주고 있으며, 에너지 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{D(\rho T)}{Dt} + \text{div}(\rho Tu) = \text{div}(k_s \text{grad} T) + S_T \quad (1)$$

여기서  $\rho$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $k_s$  그리고  $S_T$ 는 각각 밀도, 온도, 시간,

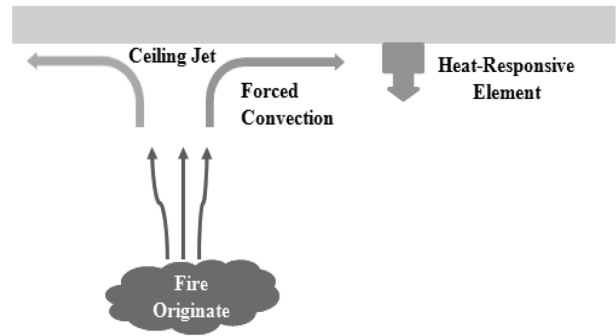


Figure 1. Thermal phenomena of heat-responsive element.

열전도계수 그리고 열발생과 소산항(source term)을 의미하며, 그림에서 보듯이 기류의 온도가 감열부에 일정한 속도로 전달되어 작동온도까지 상승하는 과정에서 열발생항과 소산항은 무시할 수 있다. Heskestad & Smith는 스프링클러헤드의 감열부가 균질 및 등방성을 갖고 열손실이 없다는 가정으로부터 식(1)에서 전도항을 생략하고 집중열용량법을 사용하여 식(3)의 RTI를 최초 제시하였다.

$$mC_p \left( \frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) \quad (2)$$

$$RTI = \frac{-t_r u^{1/2}}{\ln[1 - (\Delta T_{ea} / \Delta T_g)^{1/2}]} \quad (3)$$

여기서  $m$ ,  $C_p$ ,  $h$ ,  $A$ ,  $T_g$ ,  $T$ ,  $RTI$ ,  $t_r$ ,  $u$ ,  $\Delta T_{ea}$  그리고  $\Delta T_g$ 는 각각 감열부의 질량, 비열, 대류열전달계수, 기류에 접하는 감열체의 면적, 기류온도, 감열부 온도, 열반응지수, 작동시간, 기류속도, 초기온도와 작동 온도차 그리고 기류 온도 차이를 의미하며, Pepi J. S.는 낮은 기류와 온도조건에서 감열부에 열손실이 발생하여 RTI의 값에 차이가 발생할 수 있는 문제를 제기한 바 있다<sup>(12,13)</sup>.

RTI<sub>v</sub>는 스프링클러헤드 접합부 전도에 의한 손실을 계수로 표현한 것으로 식(4)로부터 최종 식(5)와 같이 정리된다.

$$mC_p \left( \frac{dT}{dt} \right) = hA(T_g - T) - C'(T - T_0) \quad (4)$$

$$\frac{RTI}{\left(1 + \frac{C}{u^{1/2}}\right)} = \frac{-t_r u^{1/2}}{\ln \left[ 1 - \Delta T_{ea} \left[ \left(1 + \frac{C}{u^{1/2}}\right) / \Delta T_g \right] \right]} \quad (5)$$

여기서  $C$ 는 형상인자에 따라서 일정한 값을 갖는 상수이고  $C'$ 는 손실변수이며 기류의 온도와 속도를 변화시키면서 추정하는 값으로 감열부의 반지름 방향 변화에 대한 온도변화를 손실계수로 대체하여 내부의 열전달 현상을 해석할 수 없는 한계를 갖고 있다.

Gustafsson N. E.<sup>(16)</sup>의 CHP 모델식은 RTI<sub>v</sub>와 동일한 전도계수와 시간변화량에 대해서 요소의 온도 및 상변화를 고려

한 관계식(6)을 사용하였으며, 식(7)과 같이 표현하였다.

$$\left(\frac{d\Delta E}{dt}\right) = hA(T_g - T) - C'(T - T_0) \quad (6)$$

$$CHP = \frac{\Delta E}{mC_p} = \frac{u}{RTI} \int_{t_1}^{t_{op}} \left[ \Delta T_g - \left(1 + \frac{C}{u^{1/2}}\right) \Delta T \right] dt \quad (7)$$

여기서  $\Delta E$ 는 감열부의 에너지 변화율을 의미하며 CHP, RTI 그리고 C를 구하기 위해서는 유한요소법을 사용해야 하고 감열체의 반지름 방향 온도변화를 구할 수 없는 한계를 갖고 있다.

### 2.2 해석모델의 유도과정

기류의 온도에 의한 감열부의 열전달 현상을 분석하기 위해서 에너지 방정식의 전도항을 계수가 아닌 미분 형태를 사용하여 축방향 접합부에서 손실이 없다고 가정한 경우 반경방향 온도변화를 고려한 원형 실린더 형상의 에너지 방정식은 식(8)과 같다.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = ha(T_g - T_w) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

여기서  $r$ ,  $k_s$ ,  $a$  그리고  $T_w$ 는 각각 감열부의 반경, 열전도 계수, 단위체적당 기류와 접하는 면적 그리고 감열체 벽면에서의 온도를 의미하며, 식(8)의 물리적 의미는 감열부의 반지름방향 에너지 변화량은 대류열전달에 의해서 기류 온도가 감열부 벽면에 전달되는 양과 내부에서 열이 전도되는 손실의 합과 같다는 것을 의미하고 있다. 경계조건은 감열체 표면 온도가 기류와 작동온도의 평균 값(Film temperature)으로 일정한 조건과, 감열부 중심에서 반지름 방향 온도분포가 대칭(Symmetric)인 식(9)를 적용하였으며, 초기조건은 식(10)과 같다.

$$T(R, t) = T_w \quad \text{at } r=R \quad (9)$$

$$dT/dr = 0 \quad \text{at } r=0$$

$$T(r, 0) = T_0 \quad \text{at } t=0 \quad (10)$$

여기서  $R$ 과  $T_0$ 는 감열부의 반경과 초기온도를 의미하며, 식(8)은 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$a_1 T'_t - T''_r - \frac{1}{r} T'_r - a_2 a_3 = 0 \quad (11)$$

여기서  $a_1$ ,  $a_2$  그리고  $a_3$ 는 각각  $a_1 = \rho C_p / k_s$ ,  $a_2 = ha / k_s$ ,  $a_3 = (T_g - T_w)$ 이며, 2차 미분 형태를 갖는 비제차 편미분 방정식(11)은 정상상태의 해석해와 과도상태의 해석해 식(12)로 구분할 수 있다<sup>(17)</sup>.

$$T(r, t) = T_s(r) + TT_t(r, t) \quad (12)$$

식(12)를 식(11)에 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 T_s}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_s}{dr} - a_2 = 0 \quad (13)$$

$$a_1 \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_t}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

여기서  $T_s$ 와  $TT_t$ 는 감열체의 반지름방향을 고려한 온도 분포와 반지름방향 및 시간을 고려한 온도분포를 의미하며, 식(13)의 경계조건은 다음과 같다.

$$T_s(R) = T_w, \quad dT/dr = 0 \quad \text{at } r=0 \quad (15)$$

식(13)에 경계조건 식(15)을 적용하면  $T_s(r)$ 은 식(16)과 같이 구할 수 있다.

$$T_s(r) = \frac{a_2}{4} (r^2 - R^2) + T_w \quad (16)$$

반지름 방향과 시간을 고려한  $TT_t$ 의 경계 및 초기 조건 식(17), (18)과 같다.

$$TT_t(R) = 0 \quad \text{at } r=R, \quad (17)$$

$$dT_t/dr = 0 \quad \text{at } r=0$$

$$TT_t(r, 0) = T_0 - T_s(r) = f(r) \quad (18)$$

여기서  $f(r)$ 은 식(14)의 초기조건이 반지름 방향에 관한 함수임을 의미하며, 식(14)는 변수분리를 적용하여 식(19), (20)으로 표현할 수 있다.

$$F_1(t) = c_1 \exp \left[ -\frac{(\lambda^2 + a_2)t}{a_1} \right] \quad (19)$$

$$F_2(r) = c_2 J_0(\lambda r) + c_3 Y_0(\lambda r) \quad (20)$$

$F_1(t)$ 와  $F_2(r)$ 에 경계조건 식(17)을 적용하면  $TT_t(r, t)$ 는 식(21)과 같다.

$$TT_t(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\lambda_n r) \exp \left[ -\frac{\lambda_n^2}{a_1} t \right] \quad (21)$$

식(21)의  $A_n$ 은 eigenvalue function으로 sturm-Liouville에 의해서 식(22)과 같다<sup>(17,18)</sup>.

$$A_n = -\frac{2}{R^2 J_1^2(\lambda_n R)} \int_0^r r f(r) J_0(\lambda_n r) dr \quad (22)$$

여기서  $J$ 는 Bessel 함수를 의미하며  $\lambda_n$ 은 감열부 반경  $R$ 일 때  $J_0$ 을 0으로 만들어 주는 값의 계열을 의미한다. 따라서 최종 감열체 내부 온도 분포를 고려한 열반응 지수 모델의 해석해는 식(23)과 같이 구할 수 있다.

$$T(r, t) = T_s(t) + \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left( -\frac{\lambda_n^2 t}{a_1} \right) \frac{J_0(\lambda_n r) (K_1 + K_2)}{\lambda_n^2 R J_1^2(\lambda_n R)} \quad (23)$$

여기서  $K_1$ 과  $K_2$ 는 식(21), (22)를 정리한 것으로 다음과 같다.

$$K_1 = 2\lambda_n(T_0 - T_w)J_1(\lambda_n R) \quad (24)$$

$$K_2 = a_2 a_3 R J_2(\lambda_n R)$$

대류열전달계수  $h$ 는 Heskestad et al.<sup>(12)</sup>의 문헌자료에 의해서 식(25)를 적용하였으며,  $a_1$ 과  $a_2$ 는 식(26)과 같은 관계를 갖고 있다.

$$h = \frac{B(k_s/v^{1/2})}{L^{1/2}} u^{1/2} = f(B, k_s, v, L) u^{1/2} \quad (25)$$

$$a_1 = RTI \frac{ha}{k_s u^{1/2}}, \quad a_2 = \frac{u^{1/2} V}{RTI k_s} \quad (26)$$

여기서  $B$ ,  $v$  그리고  $L$ 은 각각 감열체의 기하학적 형상을 고려한 상수, 동점성계수 그리고 감열체의 선형화된 특성길이를 의미하며, 형상 인자인  $f(B, k_s, v, L)$ 를 구하기 위해서는 기류의 온도와 속도 변화에 영향을 받지 않는 RTI 값을 측정하여 식(27)과 같이 구할 수 있다.

$$f(B, k_s, v, L) = \frac{mC_p}{RTI \times A} \quad (27)$$

2.3 온도분포 해석결과

스프링클러헤드의 감열부는 Figure 2와 같이 다양한 종류의 금속이 결합된 형태로 구성되어 있기 때문에  $a_1$ 과  $a_2$  그리고 형상인자를 구하기 위해서 감열부 전체를 체적 평균한 열전도계수와 비열을 측정해야 한다. 특히, 금속 재료가 접하는 부분에서 발생하는 손실은 혼합 구조 전체의 비열을 증가시키고 열전도를 감소시킬 수 있으나, 현재 감열부를 구성하는 혼합 물성에 관한 실험 자료가 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 감열부의 밀도, 비열 그리고 열전도계수에 따라서 열이 감열부에 확산되는 정도를 분석하기 위해서 열확산계수( $\alpha = k_s / \rho C_p$ )를 Table 1과 같이 가

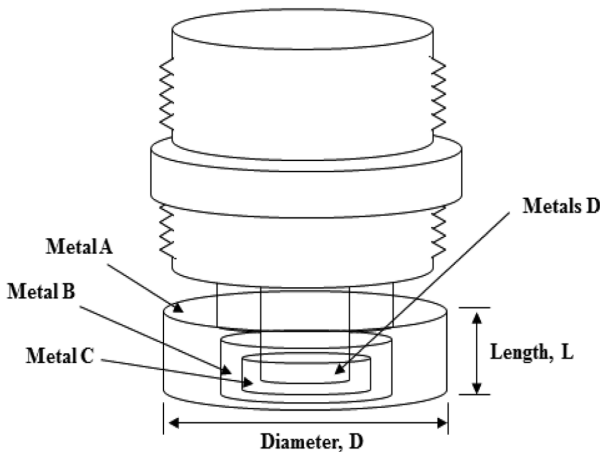


Figure 2. Schematic of sprinkler head.

Table 1. Specification of Measurement<sup>(3)</sup>

Input Values	Case A	Case B
Thermal Diffusivity, a	1.63 mm <sup>2</sup> /s	2.00 mm <sup>2</sup> /s
Geometry Coefficients	m=20 g, Radius=0.015 m, Length=0.010 m	
Experiment Coefficients	T <sub>g</sub> =473 K, T <sub>0</sub> =293 K, T <sub>e</sub> =345 K, u=1.0	
RTI/Operation time	80 (m · s) <sup>1/2</sup> /27.3 sec	

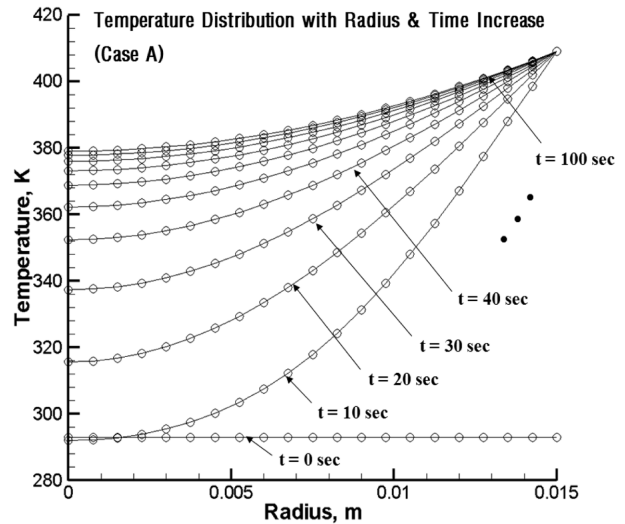


Figure 3. Temperature distributions for case A in Table 1.

정하여 온도분포 해석 결과를 분석하였다. Figure 3은 Table 1의 Case A에 해당하는 물성과 RTI 측정값이 80 (m · s)<sup>1/2</sup>, 기류속도 1 m/s, 기류온도 473 K, 초기온도 293 K 그리고 작동온도 345 K인 조건을 가정하여 감열부의 반지름 방향 및 시간 증가량에 대한 온도분포 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 가열된 표면온도에 의해서 시간이 증가함에 따라서 감열부 중심방향으로 온도가 상승하여 약 30~40초 이후 감열부 전체가 345 K 이상에 도달하는데 비해서 기류의 온도와 속도변화에 구배를 받지 않는 RTI의 작동시간 27.3초와 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 해석해의 경우 반지름방향 전도에 의한 손실을 고려하였기 때문이며 벽면의 온도 변화를 고려한 경우 감열부 전체가 345 K 이상에 도달하는 시간이 더욱 증가할 것으로 판단된다.

Figure 4는 Table 1의 Case 2에 해당하는 물성을 갖는 감열부의 반지름 방향 및 시간 증가량을 고려한 온도분포 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 열확산계수가 약 1.2배 증가한 경우 감열부의 온도를 증가시키기 위해서 필요한 열량이 증가하여 온도분포 해석해의 시간변화량을 감소시키는 반면 열전도계수가 높아져서 감열부 중심의 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. Figure 5는 Case B에 대해서 감열부의 온도가 대칭인 조건을 사용하여 시간

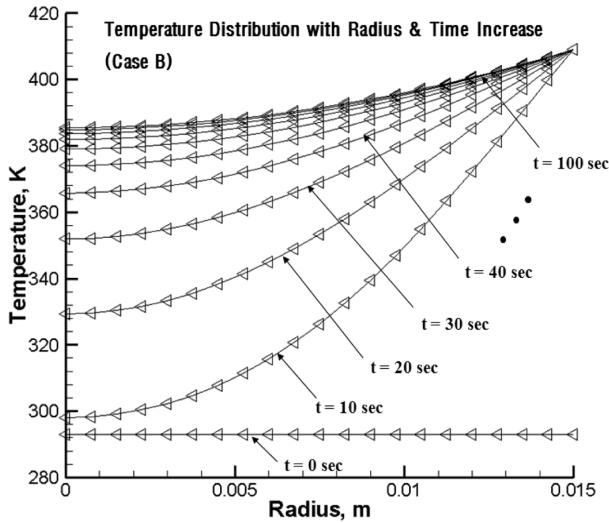


Figure 4. Temperature distributions for case B in Table 1.

이 증가함에 따라서 원형 형상의 감열부 전체의 온도분포를 가시화한 것으로 제작의 설계범위를 분석하는 기초자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다. 하지만, 보다 정확한 분석을 위해서는 감열부의 물성을 고려한 집중열용량법에 해당하는 RTI와 표면온도 증가에 관한 실험적 연구가 필요하다.

2.4 해석모델의 감도시험 분석

온도분포 해석해를 사용한 감도시험은 Figure 6의 Plunge Test Tunnel을 사용하여 식(4)의 기류속도 및 온도범위에서 일정한 값을 갖는 RTI를 측정해야 한다. 따라서 집중열용량법을 사용한 식(4)의 온도분포( $T_{RTI}(t)$ )는 반지

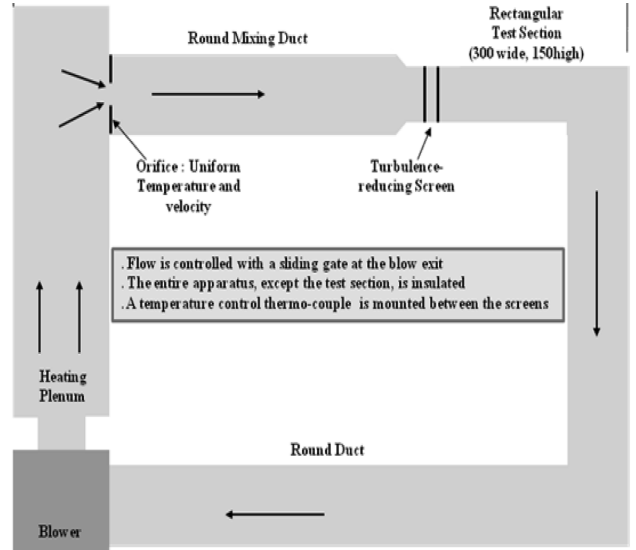


Figure 6. Plunge test tunnel for RTI.

름방향에 대해서 균질 및 균방성을 갖고 있으므로 해석해의 온도분포와 식(26)과 같은 차이를 보인다고 할 수 있다.

$$T_{RTI}(t) = loss \times \int_0^V T(r, t) dV / total\ volume \quad (26)$$

여기서  $T_{RTI}$ 는 집중열용량법을 사용하여 구한 온도분포이며, 오른쪽 항은 전도현상에 의해서 발생하는 손실(loss)과 반지름방향에 대해서 체적 평균한 온도분포로 감열부의 혼합 열전도계수와 비열 그리고 표면의 온도를 고려한 경우 전도현상에 의한 손실을 정량화 할 수 있을 것으로 판단된다.

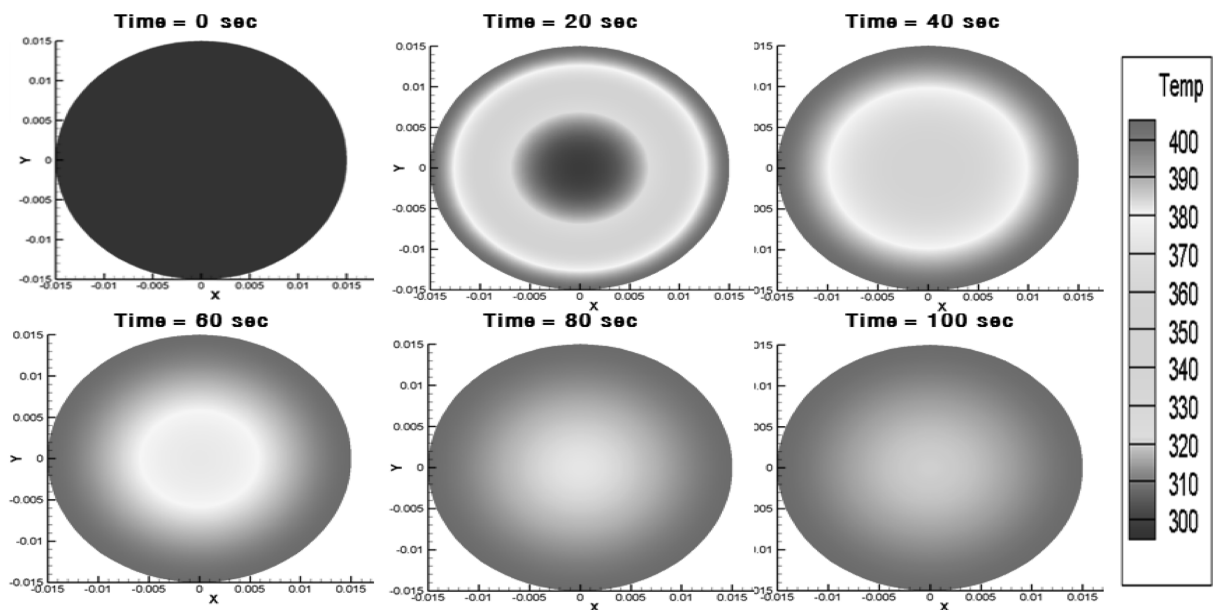


Figure 5. Visualization of temperature distributions with radial direction and time for case B.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스프링클러헤드 감열부의 열적 특성을 분석하기 위해서 에너지 방정식을 사용하여 감열부의 반지름 방향과 시간 변화량을 고려한 온도분포 해석해를 구하였다. 이를 위해서 감열부 표면의 온도가 기류와 작동온도의 평균값으로 일정한 조건과 감열부 중심에서의 온도 변화가 대칭인 경계조건을 적용하였으며, 감열부의 물질 특성 변화를 고려한 열전달 현상을 분석하였다. 그 결과 Case 1과 같은 열확산계수 및 RTI의 값을 갖는 감열부의 경우 기류온도 473 K, 초기온도 293 K 그리고 작동온도 345 K인 조건을 가정하여 감열부의 반지름 방향 및 시간 증가량에 대한 온도분포 해석결과 감열부 전체가 작동온도인 345 K 이상에 도달하는 시간과 RTI의 작동시간이 전도 손실에 의해서 차이가 발생하는 것을 확인하였으며, 벽면의 온도 변화를 고려해한 경우 감열부 전체가 345 K 이상에 도달하는 시간이 더욱 증가할 것으로 판단된다.

Case 2에 해당하는 물성을 갖는 감열부의 반지름 방향 및 시간 증가량을 고려한 온도분포 해석결과 열확산계수가 약 1.2배 증가하는 경우 감열부의 온도를 증가시키기 위해서 필요한 열량이 증가하여 온도분포 해석해의 시간 변화량을 감소시키는 반면 열전도계수가 높아져서 감열부 중심의 온도가 높아지는 것을 확인하였으며, 보다 정확한 분석을 위해서는 감열부의 물성을 고려한 집중열용량법에 해당하는 RTI의 실험적 연구가 필요할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 적용한 감열부의 열적특성에 관한 분석 기법은 감열부의 표면온도, 물리적 특성 및 RTI의 실험적 연구 결과를 적용하여 제작의 설계범위를 분석하는 기초자료의 활용 및 전도현상에 의해서 발생하는 손실값의 정량화가 가능함을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. James G. Quintiere, "Principle of Fire Behavior", Delmar Publishers, pp. 2-3 (1998).
2. D. Dougal, "An Introduction to Fire Dynamics", Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., pp. 1-3 (1998).
3. SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Fourth Edition, Volume 1, Chapter 2-2 Ceiling Jet,

pp. 18-19.

4. G. Heskestad, "Scaling the Initial Convective Flow of Power Law Fires", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 240-242 (2007).
6. V. Motevalli and C. Ricciuti, "Characterization of the Confined Ceiling Jet in the Presence of an Upper Layer in Transient and Steady-State Conditions", NIST (1991).
7. Bromann and Mark, "The Design and Layout of Fire Sprinkler Systems", Technomic Pub. Co. (1997).
8. Y. R. Kim and D. M. Lee, "A Study on the Wood's Metal of Sprinkler Head Heat Sensor", Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference, pp. 221-232 (2002).
9. O. S. Kwon and J. H. Lee, "Experimental Study on the Characteristics of Thermal Sensitivity for Fusible Alloy Type Sprinkler Head", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 9, No. 1, pp. 20-30 (1995).
10. Standard for Automatic Sprinklers for Fire-Protection Service, UL 199.
11. Standards of Model Approval and Inspection Technology for Sprinkler Head, National Emergency Management Agency Notice No. 2010-63.
12. G. Heskestad and Robert G. Bill, "Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects", Fire Safety Journal, Vol. 14, pp. 113-125 (1988).
13. J. S. Pepi, "Design Characteristics of Quick Response Sprinklers", Grinnel Fire Protection Systems Company (1986).
14. FM Class Number 2000.
15. Huakur Ingason, "Thermal Response Models for Glass Bulb Sprinklers", Swedish National Testing and Research Institute (1992).
16. Gustafsson, "A Three Parameter Model for Characterizing Sprinkler Sensitivity and Predicting Sprinkler Operating Times Part 1 and 2", Prepared for the C.E.A Sprinkler Subcommittee, WG 3 (1988).
17. Stanley J. Farlow, "Partial Differential Equation for Scientists and Engineers".
18. H. S. Chrslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Science Publications, 2th edition.