

용융형 스프링클러 헤드의 응답시간 지수 및 작동시간에 관한 연구

A Study on Response Time Index and Operating Time for Fusible Link Sprinkler Head

이 병 곤* 태 순 호**
Lee Byung Kon Tae Soon Ho

ABSTRACT

In this study, the general solution of heat balance equation including conductive heat loss were suggested and were determined the constants with the results of experiment in hot tunnel in order to derive the general equation for the response time and to investigate the response time index which represent the characteristics of response of sprinkler head in actual fires.

Two types of test were considered, the plunge test, in which the air temperature is represented by a step function, and the ramp test, in which the air temperature increases at a constant rate.

As a result, simple equations were derived, which can be predicted the response time for the ramp type fire with the rate of temperature rise and gas velocity, for the plunge type fire with temperature and gas velocity.

Also other useful data, such as the effective temperature, time constant, response time index and conduction parameter were obtained.

1. 서 론

소화설비에는 여러 가지가 있으나 일반적으로 많이 이용되는 것이 물을 소화제로 사용하는 스프링클러 설비이다. 스프링클러 설비에서 가장 중요한

인자중의 하나는 스프링클러 헤드의 열응답 특성으로서 헤드의 작동시간에 따라 화재조기진압의 성패를 가져오며, 초기화재 진압의 실패시는 인명 피해 및 막대한 재산피해를 초래한다.

이런 피해를 방지 하기 위하여 스프링클러 헤드의 여러 가지 다른 온도나 온도상승율에서 열응답 특성을 규명하고 개발중인 속도형(fast response) 스프링클러 헤드에 적용하기 위하여 최근 영국의 Fire

* 正 會 員 : 충북대학교 산업안전공학과

** 正 會 員 : 서울산업대학교 산업안전공학과

Research Station(F.R.S.)에서는 일련의 계통적인 연구를 통하여 화재상황을 simulation한 풍동을 제작하여 일정한 온도상승율로 온도를 상승시키는 상승율실험 및 일정한 고온의 기류에 스프링클러 헤드를 갑자기 투입해서 실험하는 플런지실험으로 응답시간지수(Response Time Index : RTI)의 측정방법과 이론을 제시하였다.^{1,2,3,4,5,6)}

또한 이와는 별도로 미국의 Factory Mutual Research Corporation(F.M.R.C.)에서는 플런지실험만으로 응답시간지수를 측정하는 방법과 이론을 제시하였으며⁷⁾, 실험결과에서 구한 응답시간지수는 F.R.S.의 상승율실험에서 구한 것과 최소작동기류온도로 표시하면 차이가 없음을 Theobald등⁴⁾이 확인하였다.

본 연구에서는 국내에서 제조되는 표시온도 72°C 용융형 스프링클러 헤드의 열응답 특성을 시험하여 응답시간지수를 구하고 화재시의 스프링클러 헤드 작동시간을 예측할 수 있는 일반식을 제시하기 위하여 전도를 고려한 열평형식의 상수를 이용하여 식을 구하고, 고온기류의 풍동을 제작하여 F.R.S.와 F.M.R.C.의 상승율실험 및 플런지실험 방법과 동일한 실험조건으로 실험상수 들을 결정하고 이 제안식의 적합성을 검토하였다.

2. 이 론

2.1 전도열손실을 고려하지 않은 열응답 이론

스프링클러 감열체의 열응답에 대하여 Heskstad⁷⁾는 후레임으로의 전도열손실을 고려하지 않고 고온기류의 열이 강제대류에 의해서 모두 감열체에 저장되고 용해열과 같은 작동에 필요한 추가적인 열은 없다고 가정하여 감열체의 열평형식을 전개하면,

$$m.c.c.(dT_c / dt) = h_c A_c (T_g - T_c) \dots\dots\dots (2.1)$$

시간상수 정의에 의하여,

$$\tau_c' = m.c.c. / h_c A_c \dots\dots\dots (2.2)$$

으로, 식(2.2)의 우변은 한 형태의 헤드에서는 일

정한 값이된다. 이 값을 응답시간지수(Response Time Index)⁸⁾라고 하며, 한 형태의 스프링클러 헤드에서는 일정한 값을 갖는다.

$$RTI = \tau_c' U^{1/2} \dots\dots\dots (2.3)$$

식(2.2)를 τ_c' 대신에 RTI로 표시하면,

$$d(\Delta T_c) / dt = (U^{1/2} / RTI) (\Delta T_g - \Delta T_c) \dots\dots\dots (2.4)$$

로 된다. 식 (2.4)에서 플런지실험 형태($\Delta T_g = \beta =$ 일정)에 대해 풀면,

$$\Delta T_c = \beta (1 - \exp(-t / \tau_c')) \dots\dots\dots (2.5)$$

가 되며, 식(2.5)의 β 를 $\Delta T_{g\beta}$ 로, τ_c' 를 RTI / $U^{1/2}$ 로 치환하고 작동시의 값으로 표시하면,

$$RTI = \frac{-t_{op} U^{1/2}}{\ln(1 - \Delta T_{ea} / \Delta T_g)} \dots\dots\dots (2.6)$$

가 된다. 여기서 t_{op} 는 작동시간, ΔT_{ea} 는 작동시의 ΔT_c 이다. 또한 식(2.4)에서 상승율실험 형태($\Delta T_g = \beta t$)에 풀면,

$$\Delta T_c = \beta (t - \tau_c' (1 - \exp(-t / \tau_c'))) \dots\dots\dots (2.7)$$

이며, 식(2.7)에서 $t \gg \tau_c'$ 면, $\Delta T_c = \beta (t - \tau_c')$ 가 되어 이식을 작동시간(t_{op})에 대해 풀면,

$$t_{op} = \frac{\Delta T_{ea}}{\beta} + \tau_c' \dots\dots\dots (2.8)$$

가 된다.

2.2 전도를 고려한 열응답 이론

2.1의 열응답 이론에서는 강제대류에 의한 열전달만을 고려하고 프레임으로의 전도 열손실에 대해서는 고려하지 않았으나, 최근 Theobald등은¹⁴⁾⁵⁾ 프레임으로의 열손실이 열응답에 상당한 영향을 준다는 것을 확인하고 이를 고려한 열평형식과 일반해를 제시하였는데 이를 약술하면 다음과 같다.

- ① 기류로부터 감열체로의 대류열전달
- ② 기류로부터 프레임으로의 대류열전달
- ③ 감열체에서 프레임으로의 전도열손실

④ 프레임에서 파이프로의 전도열손실이다.

실제화재에서는 복사 열전달이 있으나 연기에 의해 대부분 흡수 되며, 복사열전달은 대류열전달의 약 10분의 1정도에 지나지 않아서 복사열전달은 무시한다⁴⁾

그러면, 열평형식은 각각 다음과 같다.

감열체의 열평형식

$$m_e c_e \frac{dT_e}{dt} = h_e A_e (\Delta T_g - \Delta T_e) - h_{ef} A_{ef} (\Delta T_e - \Delta T_f) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{1}{\tau_e'} (\Delta T_g - \Delta T_e) - \frac{1}{\tau_e' R_{ef}} (\Delta T_e - \Delta T_f) \dots\dots\dots (2.10)$$

프레임의 열평형식

$$m_f c_f \frac{dT_f}{dt} = h_f A_f (\Delta T_g - \Delta T_f) - h_{fp} A_{fp} \Delta T_f \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{\tau_f'} (\Delta T_g - \Delta T_f) - \frac{1}{\tau_f' R_{fp}} \Delta T_f \dots\dots\dots (2.12)$$

2.2.1 플런지실험(plunge test)에 대한 해

식 (2.10), (2.12)를 풀면,

$$\Delta T_e = A \Delta T_g (1 - \exp(-t / \tau_e)) + B \Delta T_g (1 - \exp(-t / \tau_f)) \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\Delta T_f = K_f \Delta T_g (1 - \exp(-t / \tau_f)) \dots\dots\dots (2.14)$$

며, (2.13)과 (2.14)에서 시간상수는

$$\tau_e = \frac{-t}{\ln(1 - \frac{\Delta T_e}{A \Delta T_g} + \frac{B}{K_f A} \frac{\Delta T_f}{\Delta T_g})} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\tau_f = \frac{-t}{\ln(1 - \frac{\Delta T_f}{K_f \Delta T_g})} \dots\dots\dots (2.16)$$

식 (2.13)에서 τ_e 와 τ_f 를 하나의 시간상수 τ'' 로 표시하면

$$\Delta T_e = (A+B) \Delta T_g (1 - \exp(\frac{-t}{\tau''})) \dots\dots\dots (2.17)$$

식(2.17)에서 시간상수 τ'' 를 작동시 값으로 표시하면,

$$\tau'' = \frac{-t_{op}}{\ln(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{(A+B)\Delta T_g})} = \frac{-t_{op}}{\ln(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{K\Delta T_g})} \dots\dots\dots (2.18)$$

가 되며, 여기서, $\Delta T_{ea} = T_{nom} - T_{e(0)}$ 로, T_{nom} 은 헤드의 표시온도(T_{nom})⁹⁾이며,

식(2.18)을 최소작동기류온도로 바꿔쓰면,

$$\tau'' = \frac{-t_{op}}{\ln(1 - \frac{T_{EFF} - T_{e(0)}}{\Delta T_g})} \dots\dots\dots (2.19)$$

가 되며, 식(2.19)에서 작동시간은 다음식으로 나타내어진다.

$$t_{op} = - \frac{RTI_p}{U^{1/2}} \ln(1 - \frac{T_{EFF} - T_{e(0)}}{\Delta T_g}) \dots\dots (2.20)$$

최근 F.M.R.C.의 Heskestad⁹⁾는 식(2.9)중의 프레임의 온도를 초기주위온도($T_{e(0)}$)와 같다고 가정한 다음의 식을 해석하였다.

$$m_e c_e \frac{dT_e}{dt} = h_e A_e (T_g - T_e) - C'(T_e - T_{e(0)}) \dots\dots (2.21)$$

여기서, C' 는 전도열저항을 표시한다.

식(2.21)의 최종해는,

$$t_{op} = - \frac{RTI_p}{U^{1/2}} \ln(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{\Delta T_g} (1 + \frac{C}{U^{1/2}})) \dots\dots (2.22)$$

2.2.2 상승율실험(Ramp Test)에 대한 해

식(2.10), (2.12)를 풀면,

$$\Delta T_e = A\beta(t - \tau_e(1 - \exp(\frac{-t}{\tau_e}))) + B\beta(t - \tau_f(1 - \exp(\frac{-t}{\tau_f}))) \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\Delta T_f = K_f\beta(t - \tau_e(1 - \exp(\frac{-t}{\tau_e}))) \dots\dots\dots (2.24)$$

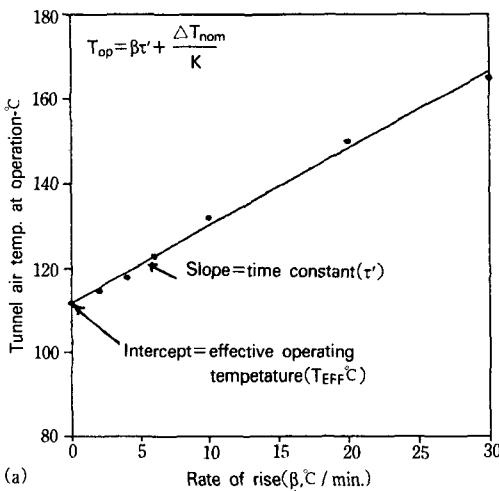
로 되며, 식 (2.23)에서 $t \gg \tau$ 이면,

$$\Delta T_e = A\beta(t - \tau_e) + B\beta(t - \tau_r) \dots\dots\dots (2.25)$$

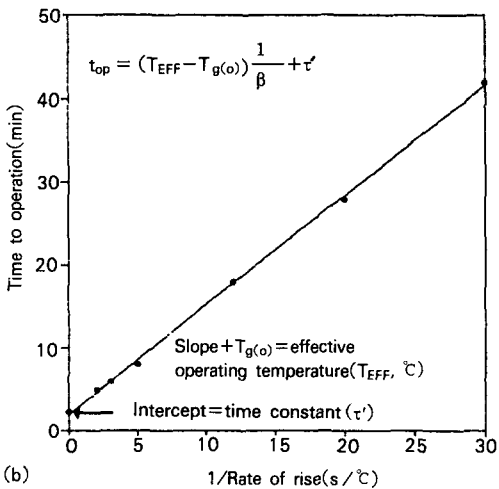
이며, 시간상수 τ_e, τ_r 를 하나의 시간상수 τ' 로 표시하면, 다음과 같다.

$$\Delta T_e = K\beta(t - \tau') \dots\dots\dots (2.26)$$

가 되며, 식(2.26)에서



(a)



(b)

Fig.1 Determination of effective operating temperature (T_{EFF}) and time constant (τ') from rate-of-rise test results

$$t = \frac{\Delta T_e}{K\beta} + \tau' \dots\dots\dots (2.27)$$

이며,

$$\beta t_{op} = \Delta T_{g,op} = \frac{T_{nom} - T_{e(0)}}{K} + \beta\tau' \dots\dots\dots (2.28)$$

로 바꿀 수 있다. (2.28)에서

$$T_{op} = \Delta T_{g,op} + T_{g(0)} = T_{EFF} + \beta\tau' \dots\dots\dots (2.29)$$

가 된다. 윗식에서 최소작동기류온도 (T_{EFF})와 시간상수 (τ')는 한 종류의 헤드에서, 한 형태의 실험조건에서는 일정한 값으로 작동온도 (T_{op})는 상승율 (β)의 선형직선으로 표시되며, Fig. 2-2(a)와 같이 그 기울기가 시간상수가 되며 y축과의 교점이 최소작동기류온도가 됨을 알 수 있다.

식(2.28)과 (2.29)에서 작동시간은,

$$t_{op} = \frac{T_{EFF} - T_{g(0)}}{\beta} + \tau' \dots\dots\dots (2.30)$$

로 표시되어 실험에서 τ', T_{EFF} 를 구하고 온도상승율 (β)을 알면, 상승율실험 형태의 화재에서 작동시간 (t_{op})를 예측할 수 있는 계산식을 얻을 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig.2와 3은 스프링클러 헤드의 열특성을 측정

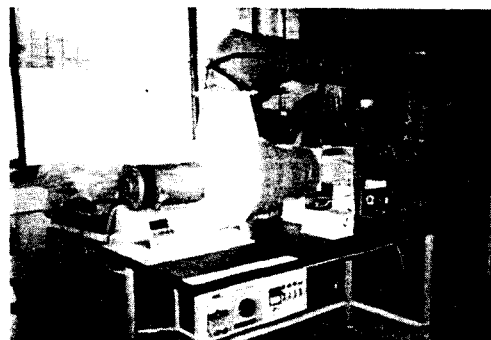


Fig.2 Photograph of experimental apparatus

하기 위하여 강관(두께 2mm)으로 제작한 풍동이다. 유속은 pitot tube에 연결된 digital micromanometer (range 0-19.99mmH₂O)로 측정하였다. 온도 조절을 위하여 programmable temperature controller(max. tem. 1300℃, 6 pattern. 96 segment, time ± 0.01%, sampling cycle 0.5 second)를 사용하였으며 시험 부의 0.5mm K type(Cr/Al) thermocouple로 온도를 측정하였다.

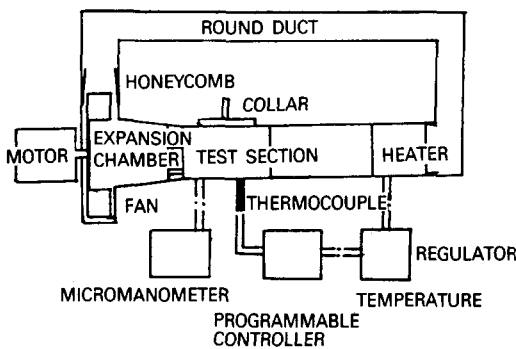


Fig.3 Schematic view of wind tunnel

실험용 스프링클러 헤드는 그림 4와 같은 국내 2개 제조업체의 표시온도(T_{nom}) 72℃, 최고 주위온도 39℃의 폐쇄 하향 용융형 스프링클러 헤드를 사용하였다.

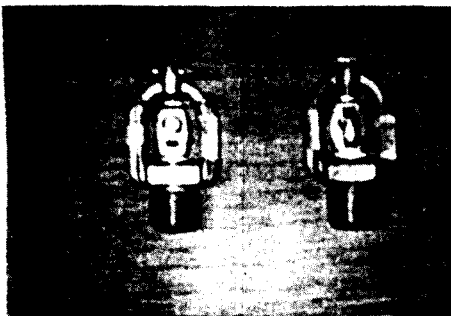


Fig.4 Photograph of fusible link sprinkler heads used in experiment

3.2 실험방법

실험은 일정한 온도상승율로 온도를 상승시키면서 실험하는 상승율실험과 일정한 고온기류에 갑자기 헤드를 넣어서 실험하는 플런지실험을 다음과 같이 시행하였다.

실험1. 상승율실험

상승율실험의 응답시간지수(RTI_r) 및 최소작동 기류온도는 F.R.S.에서 제시한 실험조건과 같이 유속은 기준온도 25℃일 때의 1m/s에서 실험하며, 헤드의 작동시간식에 대한 적합성을 검토하기 위해서 실제화재시의 기류속도와 유사하게 유속을 1m/s-3 m/s로 변화시켜 실험하였다.

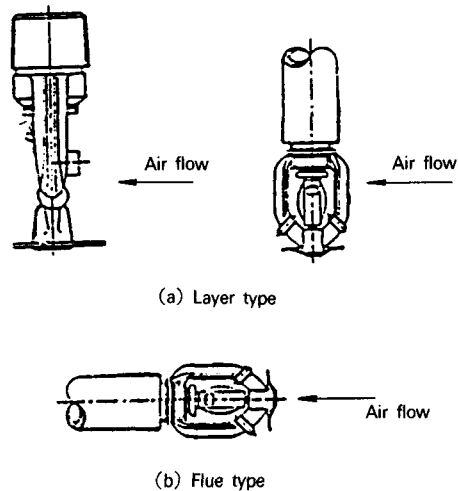


Fig.5 View of sprinkler head orientation to gas flow.

온도상승은 programmable temperature controller로 프로그래밍하여 일정한 온도상승을 유지시키며 작동시간은 온도가 상승을 시작하는(출발온도 30℃) 시점부터 헤드가 작동할 때까지의 시간을 측정하며, 작동온도는 헤드가 작동할 때의 온도(T_{op})를 측정 하였다.

실험2. 플러지실험

플러지실험의 응답시간지수(RTI_p)를 구하기 위하여 F.M.R.C.에서 제시한 실험 조건과 같이 기류 온도 135°C, 유속 1.5m/sec에서 실험하였으며, 작동시간과 기류온도, 작동시간과 유속의 관계를 구하기 위하여 기류온도 135°C에 유속변화 1m/s-4m/s 및 유속 1.5m/s일 때 기류온도 105°C ~ 145°C로 변화를 주어 실험하였다.

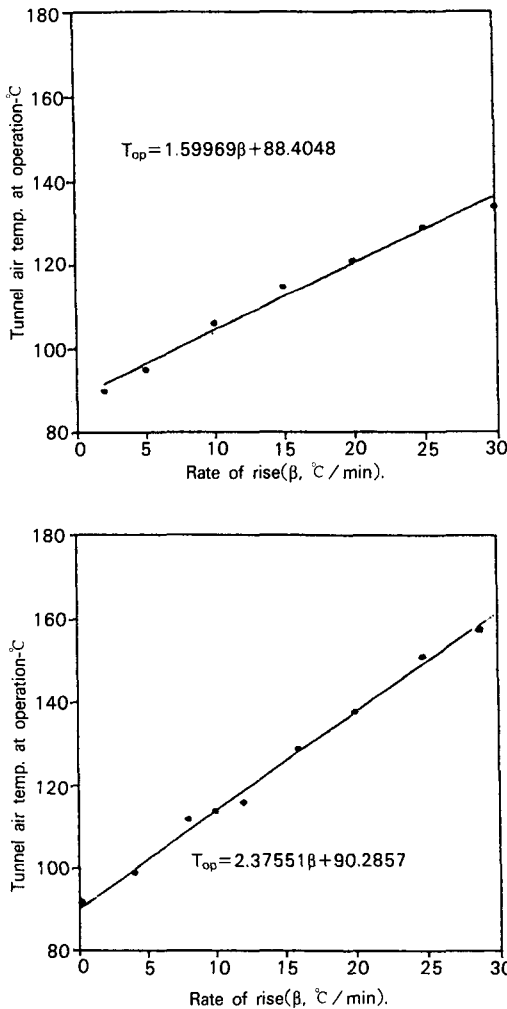


Fig.6. Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for dry layer best type.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 상승율실험의 형태별 최소작동기류온도 및 시간상수

Fig. 6(a),(b)는 두 회사 제품의 스프링클러 헤드를 기류온도 25°C, 유속이 1m/s일 때 dry layer best 형태에 대한 상승율실험 결과로, 각각의 상승율에 대한 작동온도를 표시한 그림으로 식(2.29)와 같이 작동온도는 상승율의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 중의 실선은 선형 최적기법에 의하여 회귀직선을 도식한 것이며, 그림 중의 식은 이 회귀직선의 방정식을 나타낸다. 회귀직선의 y축 절편이 최소작동기류온도(T_{EFF})를 나타내며, 직선의 기울기가 시간상수(τ)를 나타낸다. 이 그림과 회귀직선의 식에서 A사의 최소작동기류온도는 88°C, B사의 최소작동기류온도는 90°C임을 알 수 있다. 헤드와 기류가 같은 온도에 도달하는 시간지연을 나타내는 시간 상수는 A사의 경우 약 1.6분(96초), B사의 경우 약 2.4분(142초)으로 B사의 경우는 더 큰 시간지연을 보이는데, 이것은 양사 헤드감열체의 형상 및 납의 질량차이(A사 : 0.683g, B사 : 1.123g) 등 열용량과 부착형태, 프레임으로의 전도열손실 차이 때문이다.

Fig. 7은 A사의 dry layer worst 형태에 대한 것이며, 그림 8은 A사의 dry flue 형태에 대한 것이며, 그림 9는 A사의 wet layer best 형태에 대한 것이며, 그림 10은 A사의 wet layer worst 형태에 대한 것이다.

Fig.11은 A사의 wet flue 형태에 대한 것이다.

4.2 절 상승율 실험의 형태별 작동시간

스프링클러 헤드의 작동시간에 대한 식은 식(2.30) 중의 시간상수를 응답시간지수(RTI_r)로 치환한 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$t_{op} = \frac{60\Delta T_{EFF}}{\beta} + \frac{RTI_r}{U^{1/2}} \quad (\text{sec}) \quad (4.1)$$

여기서, 온도상승율(β)의 단위는 (°C/min), 기

류속도(U)의 단위는 (m/sec)이다.

dry layer best의 경우 양사의 작동시간은 표시 온도 72°C, 초기주위온도를 15°C로 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{op,A} = \frac{3240}{\beta} + \frac{106}{U^{1/2}} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$t_{op,B} = \frac{3300}{\beta} + \frac{156}{U^{1/2}} \dots\dots\dots(4.3)$$

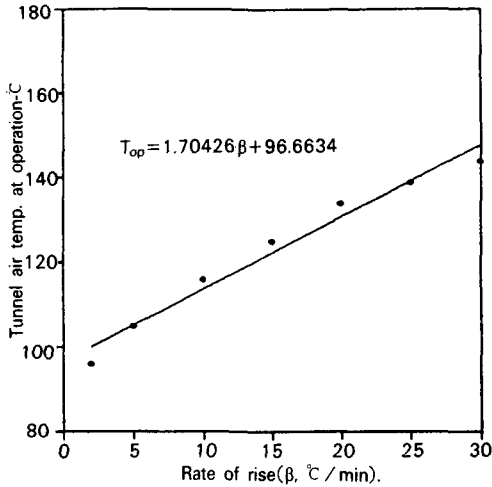


Fig.7 Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for dry layer worst type.

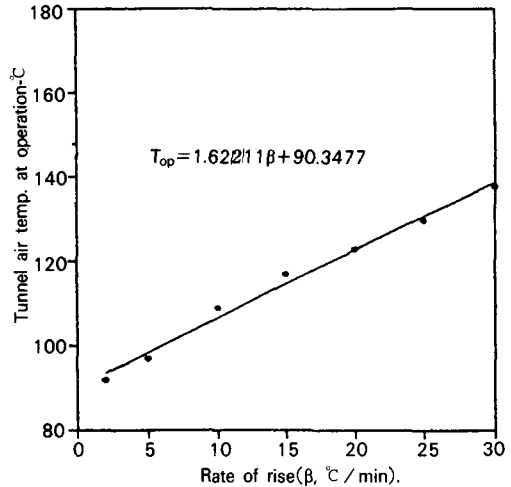


Fig.9 Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for wet layer best type.

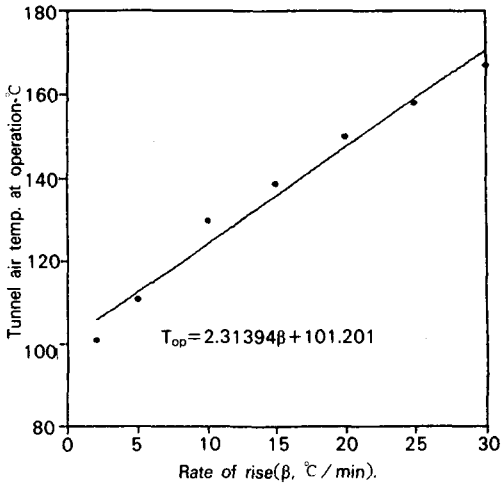


Fig.8 Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for dry flue type.

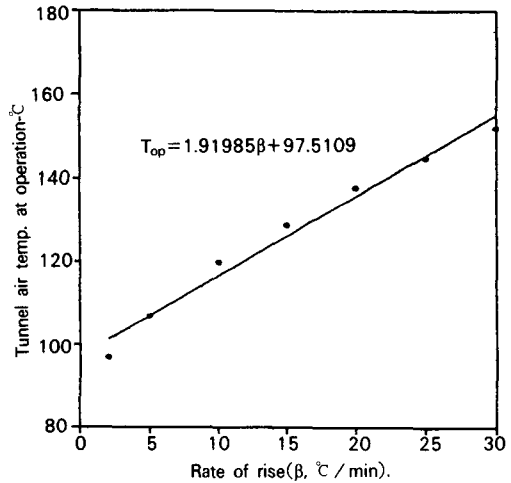


Fig.10 Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for wet layer worst type.

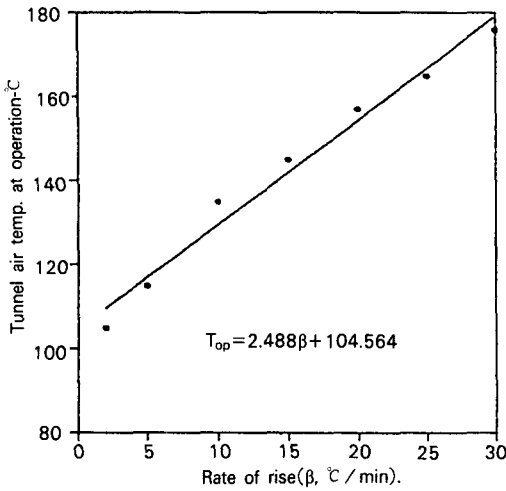


Fig.11 Determination of effective operating temperature and time constant from rate-of-rise test for wet flue type.

Layer 형태와 flue 형태의 평균값을 취하면 각각 다음의 일반식으로 표시된다.

$$t_{op,A} = \frac{3480}{\beta} + \frac{114}{U^{1/2}} \quad (\text{layer type}) \dots\dots\dots (4.4)$$

$$t_{op,A} = \frac{3900}{\beta} + \frac{172}{U^{1/2}} \quad (\text{flue type}) \dots\dots\dots (4.5)$$

식(4.4),(4.5)에서 layer나 flue 형태를 구분하지 않는 일반식을 제시하기 위하여 두 식을 산술평균하면 A사의 경우 작동시간은 다음과 같은 일반식으로 나타내어 진다.

$$t_{op,A} = \frac{3720}{\beta} + \frac{143}{U^{1/2}} \dots\dots\dots (4.6)$$

Table 1은 유속이 1m/sec일 때 각각의 온도상승율에 대한 식(4.6)으로 계산한 작동시간과 측정값을 비교할 것으로 layer 형태 측정값과의 오차는 최대 16%, flue type인 경우는 최대 17%이내로 일치하여 오차는 다소 커지나 일반적으로 사용할 수 있다.

4.3 플린지 실험의 응답시간지수와 작동시간

Table 2 유속 1.5m/sec, 기류온도 135°C로 일정하게 유지한 플린지실험의 각 형태별 작동시간, 시간상수, 응답시간지수를 나타낸 것이며, τ는 플린지 실험에서 전도를 고려한 시간상수로 식(2.28)에 의하여 구한 값으로, 상승율실험의 시간상수(τ)보다 약 10-15% 단축된다. 형태별 경향은 상승율실험의 경우와 유사하다.

플린지실험의 응답시간지수(RTI_p)는 시간상수(τ)에 유속(1.5m/sec)의 제곱근을 곱한 값이다. Theobald³⁾가 확인한 바와 같이 최소작동기류온도(T_{EFF})로 구한 플린지실험의 응답시간지수(RTI_p)는 상승율실험에서 구한 응답시간지수(RTI)와 거의 일치함을 볼 수 있다.

A, B사의 dry layer best 형태에 대하여 각각의 작동시간을 구하면 다음과 같다.

$$t_{op,A} = -\frac{102}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{73}{\Delta T_r} \right) \dots\dots\dots (4.7a)$$

Table 1. Comparison of calculated with eq.(4.6) and measured values of operating time for the rate-of-rise test with air velocity U=1m/s

t	β	2	5	10	15	20	25	30
t _{op} (calculate eq.(4.6))		2003	887	515	391	329	292	267
t _{op} (measure : layer)		1913	862	495	364	297	254	224
t _{op} (measure : flue)		2160	1008	618	446	372	312	282

Table 2. Values of parameter of plunge test for various type

Classification			Plunge test							
Type	Position	Orientation	t _{op}		τ ⁿ		RTI _p		C	
			A	B	A	B	A	B	A	B
Dry	Layer	Best	78	100	83	128	102	157	0.48	0.52
		Worst	105	124	91		111		0.72	
	Flue		161	210	120		147		0.85	
Wet	Layer	Best	86	102	88		107		0.52	
		Worst	118	127	100		123		0.75	
	Flue		167	213	123		151		0.96	

$$t_{op,A} = - \frac{102}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{57}{\Delta T_g} \left(1 + \frac{0.34}{U^{1/2}} \right) \right) \dots\dots\dots (4.7b)$$

$$t_{op,B} = - \frac{157}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{75}{\Delta T_g} \right) \dots\dots\dots (4.8a)$$

$$t_{op,B} = - \frac{157}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{57}{\Delta T_g} \left(1 + \frac{0.39}{U^{1/2}} \right) \right) \dots\dots\dots (4.8b)$$

윗 식들의 계산시, ΔT_{ea}는 표시온도(T_{nom}=72°C)와 초기주위온도(15°C)와의 차이이며, ΔT_g는 기류 온도(T_g=135°C)와 초기주위온도와의 차이이다.

각 형태별 응답시간지수와 전도손실매개변수들의 차이로 인하여 일반식을 제하기는 어려우나 식(4.7), (4.8)에 대하여, 편의상 A사 제품의 dry layer best, worst, wet layer best, worst의 4개의 값을 산술평균하여 layer 형태의 평균값으로 취하고, dry flue, wet flue의 산술평균으로 flue형태의 평균값을 취하면 각각 다음의 일반식으로 표시된다.

layer type

$$t_{op,A} = - \frac{111}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{78}{\Delta T_g} \right) \dots\dots\dots (4.9a)$$

$$t_{op,A} = - \frac{111}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{57}{\Delta T_g} \left(1 + \frac{0.48}{U^{1/2}} \right) \right) \dots\dots\dots (4.9b)$$

flue type

$$t_{op,A} = - \frac{149}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{88}{\Delta T_g} \right) \dots\dots\dots (4.10a)$$

$$t_{op,A} = - \frac{149}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{57}{\Delta T_g} \left(1 + \frac{0.52}{U^{1/2}} \right) \right) \dots\dots\dots (4.10b)$$

식(4.9), (4.10)에서 layer나 flue 형태를 구분하지 않는 플런지 실험의 일반식을 제시하기 위하여 두 식을 산술평균하면 A사의 경우 작동시간은 다음과 같은 일반식으로 나타내어 진다.

$$t_{op,A} = - \frac{130}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{83}{\Delta T_g} \right) \dots\dots\dots (4.11a)$$

$$t_{op,A} = - \frac{130}{U^{1/2}} \ln \left(1 - \frac{57}{\Delta T_g} \left(1 + \frac{0.50}{U^{1/2}} \right) \right) \dots\dots\dots (4.11b)$$

5. 결 론

국내에서 제조되는 표시온도 72°C의 용융형 스프링클러 헤드의 전도열손실을 고려한 열평형식의 일반해와 일정한 온도상승의 상승율실험 및 일정한 온도의 플런지실험을 한 결과 본 연구의 실험조건 하에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1, 일정한 온도 상승율의 고온기류에서 용융형 스프링클러 헤드의 작동시간은 온도상승율(β)과 기류속도의 제곱근(U^{1/2})에 반비례하며, 온도상승율

β ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)와 유속 U (m/sec)을 경우의 작동시간을 예측할 수 있는 계산식을 다음과 같이 구하였다.

$$t_{opA} = \frac{3720}{\beta} + \frac{143}{U^{1/2}} \text{ (sec)}$$

(A사의 일반적인 경우)

$$t_{opA} = \frac{3300}{\beta} + \frac{156}{U^{1/2}} \text{ (sec)}$$

(B사의 dry layer best 경우)

2, 일정한 온도의 고온기류하에서 용융형 스프링클러 헤드의 작동시간은 기류속도의 제곱근($U^{1/2}$)과 기류온도에 지수승으로 역비례하며, 기류온도 T_g ($^{\circ}\text{C}$)와 유속 U (m/sec)을 알 경우 작동시간을 예측할 수 있는 식을 다음과 같이 구하였다.

$$t_{op} = -\frac{130}{U^{1/2}} \ln\left(1 - \frac{83}{\Delta T_g}\right) \text{ (sec)}$$

(A사의 일반적인 경우)

$$t_{op} = -\frac{157}{U^{1/2}} \ln\left(1 - \frac{75}{\Delta T_g}\right) \text{ (sec)}$$

(B사의 dry layer best 경우)

3, 실제 설치되어 전도열손실이 있는 용융형 스프링클러 헤드가 일정한 온도의 고온기류하에서 작동할 최소작동기류온도를 구하였으며, dry layer best 형태의 조건에 대하여 A사 제품의 경우는 88°C , B사 제품의 경우는 90°C 이었다. 또한, 전도열 손실을 고려한 상승율실험의 응답시간지수(RTI)는 dry layer best 형태의 조건에 대하여 A사 제품의 경우는 $130(\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$, B사 제품의 경우는 $207(\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$ 을 얻었으며, 이 값은 최소작동기류온도로 표시한 플런지실험의 응답시간지수(RTI_p)와 잘 일치함을 확인하였다.

4, 고온기류의 유동방향에 대한 deflector 및 frame의 위치에 따라 열전달이 현저히 달라서 작동시간, 응답시간지수, 최소작동기류온도가 다르게 나타나게 되며, layer best 형태의 조건에서는 열전달이 커서 작동시간이 가장 짧고, flue 형태는 deflector의 열유동장애로 작동시간이 가장 길다.

5, 일정한 온도상승율의 고온기류에서 전도열손

실은 헤드의 열응답에 큰 영향을 주며, 온도상승율이 작으면 작동시간이 길어서 그 영향이 크다.

기 호

- A : 면적(m^2)
- c : 비열($\text{KJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- C : 전도매개변수($\text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$)
- h : 열전달계수($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)
- k : 전도계수($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)
- L : 감열체의 특성길이(m)
- m : 감열체의 질량(kg)
- n : ΔT_g 의 시간(t)에 대한 함수의 지수
- R : 열흐름 저항($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
- t : 시간(s)
- t_r : 스프링클러 헤드의 작동시간(s) (Hesketad와 Bill)
- T : 온도($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{(o)}$: 초기온도($^{\circ}\text{C}$)
- T_{EFF} : 최소기록작동온도($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT : 초기온도에 대한 온도 증가($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT_{ea} : 헤드작동시의 ΔT .
- U : 기류속도(m/s)
- β : 기류온도 상승율($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
- σ : 밀도(kg/m^3)
- τ : 시간상수(s)
- τ' : 조합시간상수(상승율 실험의 실제시간상수) (s)
- τ'' : 플런지 실험의 시간상수 (s)
- τ_e' : 순수 감열체 시간상수 (s)
- τ_f' : 순수 프레임 시간상수 (s)
- τ_c : 감열체에서 프레임으로 전도 고려한 시간상수 (플런지 실험) (s)
- τ_i : 프레임에서 파이프로 전도 고려한 시간상수 (플런지 실험) (s)
- Nu : Nusselt 수(hL/k)
- Re : Reynold 수($\rho UL/\mu$)
- Pr : Prandtl 수($C_p \mu/k$)
- μ : 점성계수($\text{kg}/\text{m s}$)

v : 동점성계수(m^2/s)

하 첨 자

A : A사 스프링클러 헤드
 B : B사 스프링클러 헤드
 e : 감열체
 f : 프레임
 ef : 감열체에서 프레임
 fp : 프레임에서 파이프
 g : 기류
 op : 헤드작동

참 고 문 헌

1. C.R.Theobald, "Thermal Response of Sprinkler", Part I. FRS Heated Wind Tunnel, Fire Safety Journal, Vol. 12, pp51-63, 1987.
2. C.R.Theobald, Sarah A. Westley and S. Whitbread, "Thermal Response of Sprinklers Part II. Characteristics and Test Methods", Fire Safety Journal, Vol. 13, pp99-114, 1988.
3. S.J.Melinek, "Thermal Response of Sprinklers-A Theoretical Approach", Fire Safety Journal, 13, pp169-180, 1988.
4. P.F.Thorne, C.R.Theobald and S.J.Melinek,

"The Thermal Performance of Sprinkler Heads", Fire Safety Journal, Vol. 14, pp89-99, 1988.

5. C.R.Theobald, "FRS Ramp Test for The Thermal Sensitivity of Sprinkler", Journal of Fire Protection Engineer, Vol. 1(1), pp89-99, 1989.
6. P.F.Beeveer, "Estimating The Response of Thermal Detectors", J. of Fire Prot. Engr., Vol. 2(1), pp11-24, 1990.
7. Gunner Heskestad and Robert Bill, JR., "Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects", Fire safety Journal, Vol. 14, pp113-125, 1988.
8. Heskestad, G. and, Smith, H.F., "Investigation of a New Sprinkler Sensitivity Approval Test : The Plunge Test", FMRC22485, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, MA, December, 1976.
9. 한국소방검정고사, 스프링클러 헤드의 검정기술기준, 소방용기계기구등의 검정기술기준 KOFES 05021, pp1-12, 1989.
10. C.R.Theobald and Sarah A. Westley, "Factors Affecting the Sensitivity of Sprinkler", Fire Surveyor, June, pp5-11, 1988.