

# 스프링클러헤드의 열응답 특성해석

## (An analysis on the thermal response characteristics of sprinkler heads)

김 동 석/기획운영실

### 1. 서 언

스프링클러 설비가 인명 안전용으로 사용한다는 개념은 비교적 최근에 적용된 개념이다. 약 100년 동안 스프링클러 설비는 재산보호용 설비로 이용되어져 왔으나 최근 선진 각국에서는 화재의 초기 단계에서 작동하는 열응답속도가 빠른 스프링클러 헤드의 꾸준한 연구개발로 인명안전용 및 락크식 창고 방호용헤드가 실용화 단계에 들어섰다.

인명 안전용의 열응답속도가 빠른 스프링클러 설비는 병원, 호텔, 점포, 극장, 레저센타 등 화재시 화재전파가 널리퍼져 후레시오버에 도달하기 전에 화염과 연기에 의한 위험을 최소화 하기 위하여 재래의 헤드보다 더 빠르게 감응작동하는 헤드가 필요하며 락크식 창고에서의 수직화염 전파의 급속성과 재래식 스프링클러의 느린 응답성에 의해 스프링클러 헤드를 피해서 빠르게 전체 고층선반으로 확대되는 화염전파를 막기 위해 빠른 열응답 특성의 헤드가 필요하다.

본고에서는 스프링클러 헤드의 열응답성의 이론적 해석 및 실험적 평가에 의해 특수장소에서의 헤드의 적합성을 나타내는 기준인 헤드의 시간상수의 개념을 도입한 작동시간에 의한 헤드분류의 시험방법을 소개하고자 한다.

### 2. 스프링클러 헤드의 열응답 특성이 이론적 접근

(Theoretical approach to the response characteristics of sprinkler heads)

### 가. 용어 정의

(1)공칭작동온도( $\theta$  nom)–Nominal release temperature

헤드를 교반이 가능한 액조에 넣고 액조용액을 0.5°C/min의 준정적 상태의 가열속도로 헤드가 작동할 때까지 가열할 때, 헤드가 주위와 열적평형 상태에서 작동하지 않고 전디는 최고주위온도.

(2)유효작동온도( $\theta$  eff)–Effective operating temperature

헤드가 비평형 상태에서 작동하는데 필요한 최소 기류온도.

유효 작동온도는 온도변화가 감열체가 가열되는 율과 비교해서, 감열체로부터 후레임으로의 열손실이 허용되는 동적조건에 적용된다.

(3)시간상수(Z)–Time constant

감열체에 대한 시간상수는  $mc/hA$ 로 정의된다.

여기서  $mc$ 는 질량과 비열의 곱으로 열용량을 나타내며,  $hA$ 는 열전달계수와 노출면적의 곱이다.

30초의 시간상수를 갖는 스프링클러헤드의 실제 상승온도는 선형기류의 상승온도보다 30초 늦어진 다.

(4)시간응답지수(RTI)–Response time index.

시간 상수의 값은 기류속도의 제곱근  $u^{1/2}$ 에 따라 변하는 대류 열전달 계수에 달려 있다. RTI는 기류속도가 1m/sec시의 시간상수 값이며  $Zu^{1/2}$ 로 정의된다. 이 값은 서로 다른 기류속도에서 측정된 시간 상수의 값의 변화를 보상한다.

### 나. 열전달의 수학적 모델(The mathematical model of heat transfer)

고온 기류에 스프링클러 헤드가 놓여졌을때, 열전달 과정의 수학적 모델을 세우기 위해 기류로부터 감열체로의 열전달을 고려한다.

화재 초기에는 대류에 의한 열전달이 대부분이며, 실제 화재시 화염으로부터 복사 열전달이 있을 수 있으나, 이 복사열은 대부분은 연기에 의해 흡수된다. 만일 복사온도가 가스온도와 같다면, 순 복사열전달은 대류 열전달의 약1/10이며 여기서는 대략적으로 복사열전달을 무시할 수 있거나 유효 열전달 계수에 포함된다고 가정할 수 있다.

감열체에 대해 다음의 열전달 공식이 성립한다.

[감열체 열량증가]=[기류로부터 감열체로의 전달 열량]-[감열체로부터 후레임으로의 전달열량]

$$meCe \frac{d\theta e}{dt} = UeAe(\Delta\theta g - \Delta\theta e) - UefAef(\Delta\theta e - \Delta\theta f) \dots\dots ①$$

$$\frac{d\theta e}{dt} \frac{1}{Ze'} = (\Delta\theta g - \Delta\theta e) - \frac{1}{Ze'} \frac{Re}{Ref} (\Delta\theta e - \Delta\theta f) \dots\dots ②$$

- A : 면적                    e : 감열체
- U : 열전달계수            g : 가스
- $\theta$  : 온도                    f : 후레임
- R : 열흐름 저항            ef : 감열체로부터 후레임으로
- fe : 후레임으로부터 감열체로
- $\Delta\theta$  : 초기온도로부터 온도증가
- Ze' : 독립시간상수(열이득만 포함)  
= meCe/UeAe

또한 일반적으로 고온 기류온도의 증가는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta g = \beta t^n \text{ 또는 } \Delta\theta g = \beta \exp(t) \dots\dots ③$$

$\beta$  : 공기온도 상승의 선형율

**다. 상승율시험(Ramp test or 'rate of rise' test)**

$$n=1, \Delta\theta g = \beta t$$

②식의 Laplace 변환에 의해 다음식이 유도된다.

$$\Delta\theta e = A\beta[t - Ze(1 - \exp(-t/Ze))] - B\beta[t - Zf(1 - \exp(-t/Zf))] \dots\dots ④$$

- A, B : 상수
- Ze, Zf : 쌍형시간상수(열손실과 열이득 포함)
- Ze = Ze'(1+Re/Ref)

만일 감열체로부터 후레임으로의 열전달을 무시한다면 A=1, B=0로부터

$$\Delta\theta e = \beta(t - Ze(1 - \exp(-t/Ze))) \dots\dots ⑤$$

⑤식은 감지기의 열감도를 기술하는 pickard 公式이며 스프링클러헤드에도 타당하다.

또한  $t \gg Ze$ 이면 ④식은

$$\Delta\theta e = A\beta(t - Ze) + B\beta(t - Zf) \dots\dots ⑥$$

또는

$$\Delta\theta e = k\beta(t - Z') \dots\dots ⑦$$

$$\left[ \begin{array}{l} Z' : \text{집합시간상수(Collective time constant)로서} \\ Z' = \frac{AZe + BZf}{A + B} \text{로서 정의됨} \\ k = A + B \end{array} \right]$$

⑦식으로부터

$$t = \frac{\Delta\theta e}{k\beta} + Z' \dots\dots ⑧$$

$$\beta t = \frac{\Delta\theta e}{k} + \beta Z' \dots\dots ⑨$$

Ramp test의 조건으로부터

$$\Delta\theta g = \frac{\theta \text{ nom} - \theta e(0)}{k} + \beta Z' \dots\dots ⑩$$

그러므로 작동온도  $\theta \text{ op} = \Delta\theta g + \theta g(0) = \theta \text{ eff} + \beta Z'$

여기서

$$\theta \text{ eff} = \theta g(0) + (\theta \text{ nom} - \theta e(0))/k \dots\dots ⑪$$

**라. 투입시험(plunge test)**

$$n=0, \Delta\theta g = \text{상수}$$

②식에 대한 Laplace 변환에 의한 해는

$$\Delta\theta e = A\Delta\theta g(1 - \exp(-t/Ze)) + B\Delta\theta g(1 - \exp(-t/Zf)) \dots\dots ⑫$$

$$\Delta\theta f = kf \Delta\theta g(1 - \exp(-t/Zf)) \dots\dots ⑬ \text{ [kf : 상수]}$$

⑫식은

$$Ze = -t/\ln(1 - \frac{\Delta\theta e}{A\Delta\theta g} + \frac{B}{kA} \frac{\Delta\theta f}{\Delta\theta g})$$

⑬식은

정상상태(Steady-state)시  $\Delta\theta e = (A+B)\Delta\theta g$  감열체로부터 후레임으로의 열전달을 무시한다면

$$Ze = -t/\ln(1 - \frac{\Delta\theta e}{\Delta\theta g})$$

### 3. 실제시험방법

#### 가. 시험장치

그림1에 표시된 가열풍도는 주로 화재 초기단계에 나타나는 조건들을 가능한한 유사하게 모형화하기 위해 설계 제작되었다.

이 풍도의 주요부품은 기류속도조절철편, 공기속도 조절용 조리개형 가동셔터, 3상 18kw히터, 작동구역 입구에 위치한 0.12mm의 열전대의 출력에 의해 제어되는 동력공급 장치가 있어야 한다.

크기는 길이 28m, 높이 1.1m, 폭 0.7m이고 두께 1.6mm의 알루미늄판으로 만들어져 있으며, 일정질량 흐름의 끝이 개방된 장치이고, 터널의 고온기류의 속도는 온도로 예측할 수 있다.

이 풍도의 성능은 1-60°C/min의 선형상승률로 작동구역의 온도를 200°C까지 유지시킬 수 있으며, 1-30°C/min의 선형상승률로 증가시켜 250°C까지 유지할 수 있으나 그 이상의 온도는 수명에 영향을 줄 수 있다.

#### 나. 시험시 고려되어야 할 인자(因子)

##### (1)기류에 대한 헤드의 위치

###### ㉠층상위치(the layer position)

인명안전이 주요 목적인 헤드의 시험시 기류 방향에 수직으로 헤드를 설치하여 시험한다.

###### ㉡연도위치(the flue position)

락크식 창고 방호용헤드의 시험시 기류의 방향에 평행으로 헤드를 설치하여 시험한다.

###### (2)기류에 대한 스프링클러 방향

기류를 감열체로부터 편향시키는 후레임의 음영효과(screening effect)를 고려하여 방향을 설정한다.

###### (3)보호판(disc shields)의 유무

락크식 창고에서 상향 위치 헤드 작동시 하향 위치의 헤드가 상향헤드의 방수에 의한 냉각을 방지하는 보호판의 설치 유무를 고려한다.

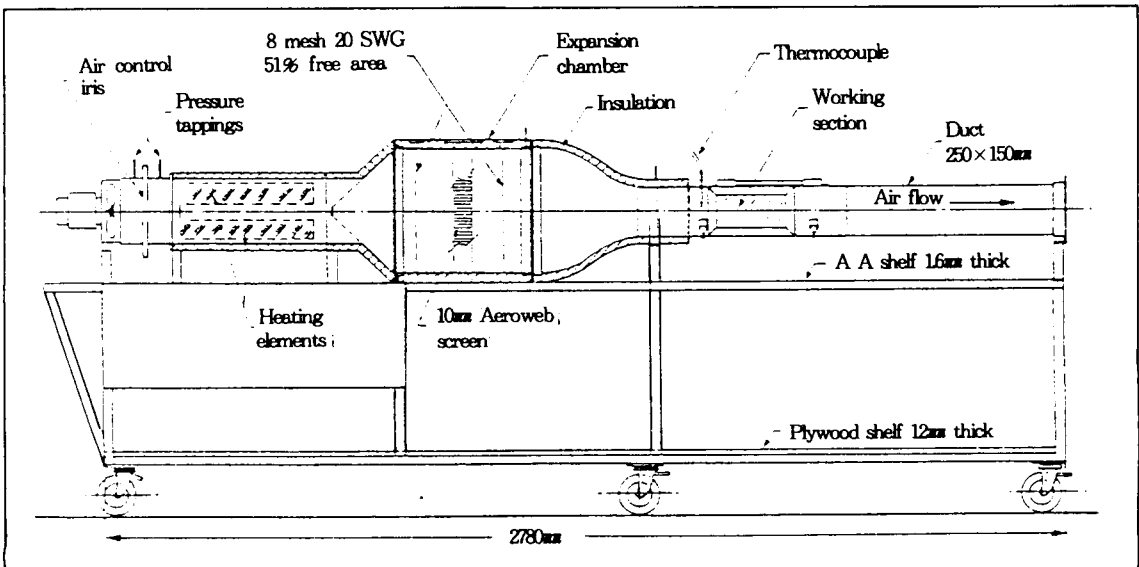
###### (4)시험배관내 물의 유무(wet or dry)

헤드 설치 배관내 물의 유무에 따라 열용담특성에 영향을 주므로 일반적으로 물을 채운 불리한 조건에서 시험한다.

#### 다. 상승률 시험(Ramp test)

이 시험은 스프링클러 헤드의 시간상수(Z)와 유효작동온도( $\theta_{eff}$ )를 결정하기 위한 시험이다.

시험체를 시험체 설치대에 설치한 후 온도 25°C,

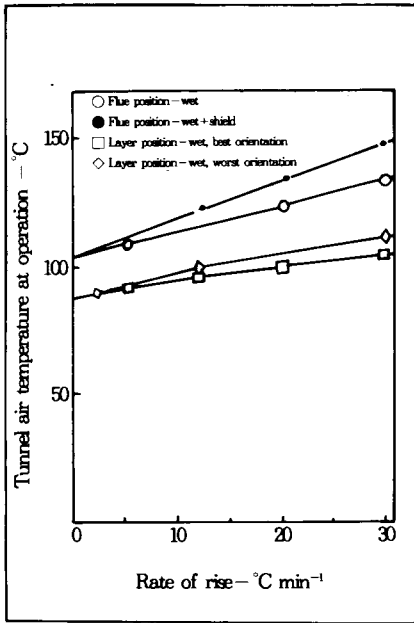


[그림 1] FRS에서 설계 제작된 가열풍도(heated wind tunnel)

기류속도 1m/sec의 조건에서 시험체를 작동구역에 투입시킨다.

25°C로부터 1분내에 30°C로 가열한 후 5분간 유지시키고 기류온도를 시작온도 30°C로부터 헤드가 작동할때까지 선택된 선형상승률로 온도를 증가시킨다.

이러한 방법으로 2°C/min-30°C/min사이의 여러 온도 상승률로 되풀이해 실시하며, 작동시 기류온도와 시간을 측정한다.



[그림 2] 빠른 응답속도의 스프링클러 헤드의 상승률 시험(Ramp test)의 시험결과

그림2는 응답속도가 빠른 스프링클러헤드의 상승률시험(Ramp test)결과의 예이다.

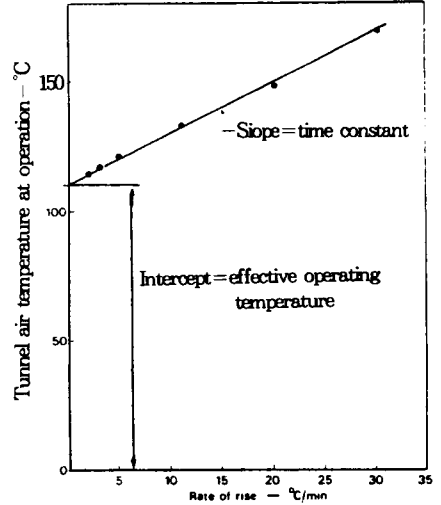
그림3과 4로부터 시간상수(time constant)Z와 유효 작동온도  $\theta_{eff}$ 를 구할 수 있다.

그림3의 직선식은  $\theta_g = \theta_{eff} + \beta Z$

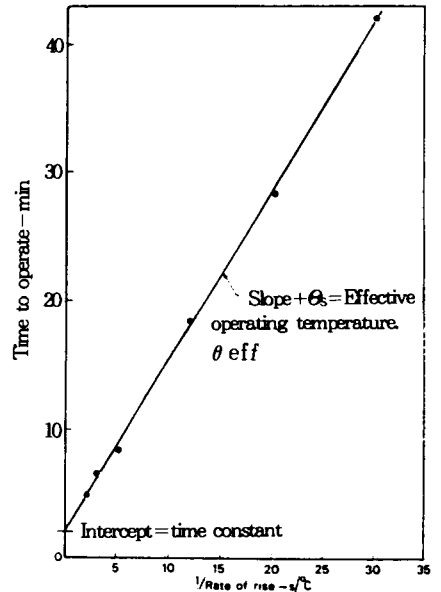
그림4의 직선식은

$$tr = \frac{\Delta \theta}{\beta} + Z \text{ 임을 알 수 있다.}$$

여기서 tr은 스프링클러헤드가 응답하는데 걸리는 시간을 나타낸다.



[그림 3] 상승률 시험결과로부터 유효작동온도( $\theta_{eff}$ )의 결정



[그림 4] 상승률 시험결과로부터 시간상수(Z)의 결정

#### 라. 투입시험(plunge test)

헤드를 시험실 온도  $\theta_a$ 로 일정시간 유지한 후 기류온도  $\theta_g$ 가 135°C, 기류속도 u가 15m/sec로 작동하는 가열된 풍도에 투입한다.

이 시험목적은 앞의 이론식에서 나타난 것처럼 고온기류에 헤드가 투입된 후 헤드가 작동하는데 걸

리는 시간을 구해 다음표현의 시간상수를 구하기 위해 이용된다.

$$Z_p = t / \ell_n \left( 1 - \frac{\Delta \theta_e}{\Delta \theta_g} \right)$$

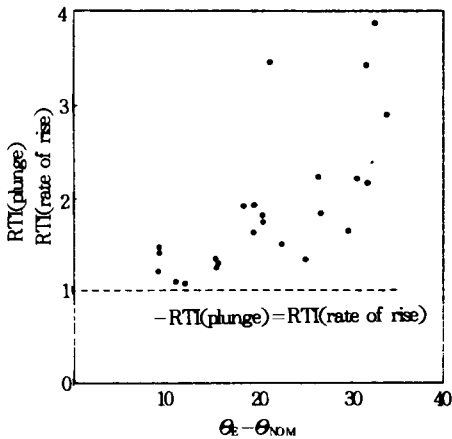
여기서  $\Delta \theta_e = \theta_{nom} - \theta_{ambient}$   
 $\Delta \theta_g = \theta_g - \theta_{ambient}$

### 마. 시험결과분석

#### (1) Ramp test 와 Plunge test의 비교

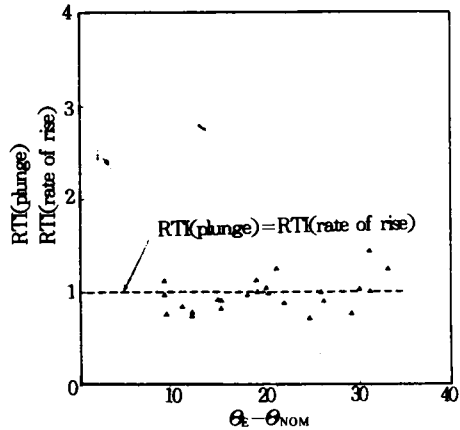
Ramp test 와 Plunge test 각각은 영국의 FRS (Fire Research Station)와 미국의 FMRC(Factory Mutual Research Corporation)에서 개발된 시험방법이다.

이 두 시험의 불일치는 기류속도에 의해 발생하는 열전달의 차이로 이를 보상하는 시간응답 지수 RTI값이 그림5에서 보는 바와 같이 큰 편차를 보임을 알 수 있다. 이런 차이는 기본적으로 동적 조건에서 얻어지는 plunge test 작동시간 결과로부터 Z를 얻기 위해  $\theta_{nom}$ 을 이용하기 때문이다. 이 두 방법사이의 근사적 일치는 그림6에서와 같이 정확한 Z를 계산하기 위해  $\theta_{nom} - \theta_{ambient}$  대신  $\theta_{eff} - \theta_{ambient}$ 를 도입할 때 이루어지며 그림6은  $\theta_{eff}$ 를 이용한 RTI비를 나타낸다.



[그림 5] 투입시험 및 상승률 시험에서 측정된 RTI값의 비율 나타내는 시험결과 요약

[ :  $\theta_{NOM}$ 을 이용한 RTI(plunge)값]

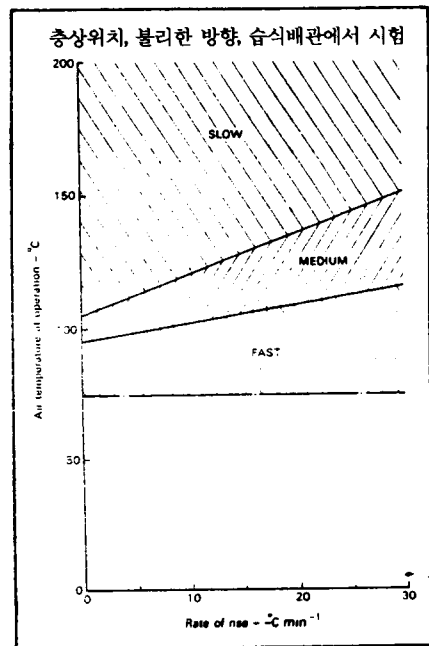


[그림 6] 유효작동온도에 근거한 상승률시험과 투입시험의 RTI값의 비율 나타내는 시험결과 요약

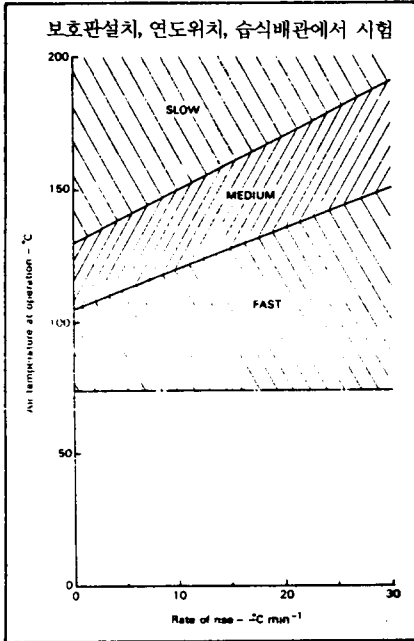
[▲ :  $\theta_{eff}$ 를 이용한 RTI(plunge)값]  
 위 그림의 검은▲을 말함.

#### (2)FRS에서 제안된 헤드분류기준

아래그림 7,8에서와 같이 FRS는 Ramp 시험을 실시하여 특수장소의 헤드선정의 기준이 되는 헤드 작동 시간에 의한 분류 기준을 제시하였다.



[그림 7] 인명 안정용 스프링클러의 분류기준



[그림 8] 락크식 참고 방호용 스프링클러의 분류기준

#### 4. 결 어

화재 초기에는 스프링클러헤드로의 주요 열전달은 주로 대류에 의해 이루어진다. 여기서는 헤드의 대류에 의한 이론적 열전달 해석 및 실제 화재초기상태를 근사적으로 모형화한 영국의 FRS에서 개발된 가열풍도(heated wind tunnel)에 의해 기류의 속도를 고려한 동적상태에서의 시험 방법과 헤드평가기준을 고찰하였다.

어떤 제품의 성능 평가를 위한 기준화는 실험방법의 이론적 해석 및 이를 근사적으로 모형화한 시험 장치의 개발과 반복적 재현이 가능한 시험 장치에 의해 실시된 많은 시험 Data를 필요로 한다. 영국의 경우 위의 시험은 인명안전을 위한 스프링클러 영국기준의 참고자료 및 건축설계의 Data로 이용되고 있다.

이 시험방법은 조기 작동형 스프링클러의 개발에 따른 관련기관의 인증기준, 제조자의 품질관리, 시공자의 스프링클러헤드의 사용 목적에 따른 제품선택의 세분화 등 여러분야에서 이용할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. Theobald, C. R., "Thermal response of sprinklers, 1. FRS Heated wind Tunnel", Fire safety Journal, 12(1), 1987.
2. Theobald, C. R. and Westiey, S. a., "Factors affecting the sensitivity of sprinklers," Fire Surveyor 17(3). 1988.
3. Theobald, C. R. and a Melinek, S. J. "The thermal performance of sprinkler Heads," Fire safety Journal, 14. 1988
4. Theobald, C. R. "FRS RAMP Test for the thermal sensitivity of sprinkler," Journal of Fire protection Engineering, Vol. 1 1989.
5. Theobald, C. R. "Heated wind tunnel for testing fast acting sprinklers," Fire Surveyor, Vol. 16. 1987