

# 스프링클러 소화설비에 의한 소화시간

손 봉 세

(본협회 부설 방재시험소 연구원)

〈전호에서 계속〉

## 4. 예측방정식의 상수결정

〈그림3〉은 그룹ABC의 경우에 대한  $T/T_0$ 와  $Q_w$ 의 관계를 나타내고 있으며 각각의 경우에 대한  $Q$ 와  $H$ 는 〈표1〉에서 주어진 값을 이용한다.  $m=-2$ 는 기울기로부터 얻어진다. 본 실험에서  $dm, h, C_{pm}, r_0, t_0, r_w$ 와  $g$ 의 값은 다음과 같다.

$$dm = 1mm = 1 \times 10^{-3}m$$

$$h = 3,780kcal / kg(\text{습도가 } 9 \sim 12\% \text{인 삼목})$$

$$C_{p} = 0.24kcal / kg^{\circ}C$$

$$r_0 = 1,161kg / m^3$$

$$t_0 = 20^{\circ}C$$

$$r_w = 998.2kg / m^3$$

$$g = 9,807m / s^2 = 35,3 \times 10^3m / min$$

결과적으로  $A = 1.172 \times 10^{-4}m^2min / kg^{5/3}$ 이고  $r$ 의 값은 (8), (6), (9)의 방정식으로 부터 얻어진다.

$$\Delta t = 43.9 \frac{(Qh/60)^{2/3}}{H^{5/3}} \dots \dots \dots (8)$$

여기서

$\Delta t$ : 화염의 가스온도와 실내온도의 차( $^{\circ}C$ )

$Q$ :  $kg / min$

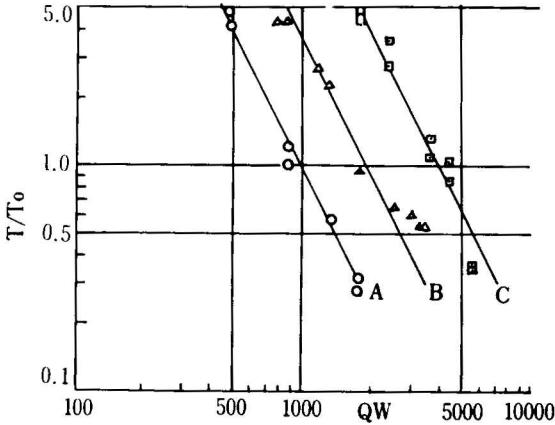
$h$ :  $kcal / kg$

$H$ :  $m$

$$r (kg / m^3) = 1.2931 \times \frac{273}{293 + \Delta t} \dots \dots \dots (9)$$

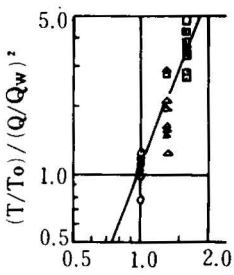
〈표 1〉 스프링클러에 의한 소화시험결과

| 군 No. 별 | 화목 중량 W (kg) | 검화에 서 방수 까지의 시간 $T_0$ (min) | 방수에 서 소화 까지의 시간 T (min) | 화목에 대 한 방수율 QW (kg/min $0.36m^3$ ) | 방수전 의 질량 연소율 $Q=0.3 W/T$ (kg/min) | 화목 상 부에서 의 천정 까지의 거리 H (m) | 화염 에서의 공기 밀도 (kg/ $m^3$ ) |      |
|---------|--------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|------|
| A       | 1            | 5.55                        | 1.76                    | 8.50                               | 0.48                              | 0.95                       | 2.62                      | 0.82 |
|         | 2            | 5.95                        | 1.88                    | 7.66                               | 0.48                              |                            |                           |      |
|         | 3            | 5.57                        | 1.76                    | 2.12                               | 0.85                              |                            |                           |      |
|         | 4            | 5.70                        | 1.80                    | 1.75                               | 0.85                              |                            |                           |      |
|         | 5            | 5.90                        | 1.87                    | 1.10                               | 1.35                              |                            |                           |      |
|         | 6            | 5.55                        | 1.76                    | 1.03                               | 1.35                              |                            |                           |      |
|         | 7            | 5.45                        | 1.72                    | 0.55                               | 1.77                              |                            |                           |      |
|         | 8            | 5.55                        | 1.76                    | 0.50                               | 1.77                              |                            |                           |      |
| B       | 1            | 7.70                        | 1.65                    | 7.08                               | 0.76                              | 1.40                       | 2.56                      | 0.74 |
|         | 2            | 7.20                        | 1.55                    | 6.76                               | 0.85                              |                            |                           |      |
|         | 3            | 7.75                        | 1.66                    | 4.50                               | 1.19                              |                            |                           |      |
|         | 4            | 7.38                        | 1.58                    | 3.60                               | 1.30                              |                            |                           |      |
|         | 5            | 7.27                        | 1.56                    | 1.53                               | 1.77                              |                            |                           |      |
|         | 6            | 7.14                        | 1.53                    | 1.42                               | 1.77                              |                            |                           |      |
|         | 7            | 7.88                        | 1.69                    | 1.12                               | 2.48                              |                            |                           |      |
|         | 8            | 7.95                        | 1.71                    | 1.02                               | 2.97                              |                            |                           |      |
|         | 9            | 7.53                        | 1.61                    | 0.87                               | 3.17                              |                            |                           |      |
|         | 10           | 7.30                        | 1.57                    | 0.83                               | 3.29                              |                            |                           |      |
| C       | 1            | 9.55                        | 1.39                    | 6.63                               | 1.77                              | 2.06                       | 2.50                      | 0.65 |
|         | 2            | 8.79                        | 1.28                    | 5.75                               | 1.77                              |                            |                           |      |
|         | 3            | 9.14                        | 1.33                    | 4.72                               | 2.40                              |                            |                           |      |
|         | 4            | 9.75                        | 1.42                    | 3.80                               | 2.40                              |                            |                           |      |
|         | 5            | 9.52                        | 1.38                    | 1.80                               | 3.29                              |                            |                           |      |
|         | 6            | 9.85                        | 1.43                    | 1.58                               | 3.29                              |                            |                           |      |
|         | 7            | 9.15                        | 1.33                    | 1.35                               | 4.33                              |                            |                           |      |
|         | 8            | 9.14                        | 1.33                    | 1.13                               | 4.33                              |                            |                           |      |
|         | 9            | 9.27                        | 1.35                    | 0.50                               | 5.58                              |                            |                           |      |
|         | 10           | 9.25                        | 1.34                    | 0.47                               | 5.58                              |                            |                           |      |



(그림 3)  $T/T_0$ 와  $Q_w$ 의 상호관계

$t_0$ : 표준상태에서 공기온도(20°C, 1 atm) 20°C  
 $rw$ : 물의 밀도 998.2kg / m'  
 $g$ : 중력 가속도  $35.3 \times 10^3$  m / min<sup>2</sup>  
 $Q$ : 스프링클러헤드가 작동하기 전의 질량연소비(kg / min)  
 $Q_w$ : 연료표면에 대한 방수율(kg / min)  
 $M$ : 스프링클러헤드가 작동할 때까지의 연료감소량(kg)  
 $H$ : 화목표면상부에서 천정까지의 거리(m)  
 $r$ : 화염에서의 가스밀도(kg / m'<sup>3</sup>)  
 $dm$ : 물분무입자의 평균직경(m)  
 방정식(11)에 의하여 스프링클러 작동에서부터 소화까지의 시간계산이 가능하다.



(그림4)는 상에서 언급한 실험을 통해 얻은 결과와 값을 이용하여  $(T/T_0)/(Q/Q_w)^2$ 과  $\left[ A \cdot \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{r}{dm} \right)^{3/2} \right]$ 의 관계를 나타내고 있다. 그림과 회귀 분석에 의하면  $k=1.05$ ,  $n=2.5$ 이고 둘 값의 상호관계인수는 0.91이 된다. 그러므로 방정식(7)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{T}{T_0} = 1.05 \left( \frac{Q}{Q_w} \right)^2 \left[ A \cdot \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{r}{dm} \right)^{3/2} \right]^{2.5} \dots\dots\dots (10)$$

(그림5)는 방정식(10)과 시험결과를 비교하고 있다. 스프링클러가 작동할 때까지 연료의 감소량  $M=QT_0$  이므로 방정식(10)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T &= 1.05 \left( \frac{Q}{Q_w} \right)^2 \left[ A \cdot \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{r}{dm} \right)^{3/2} \right]^{2.5} \left( \frac{M}{Q} \right) \\ &= 1.05 A^{2.5} \frac{Q^{3.5} M}{Q_w^2 H^{2.5}} \left( \frac{r}{dm} \right)^{3.75} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

여기서

$T$ : 스프링클러 작동에서 소화까지의 시간(min)

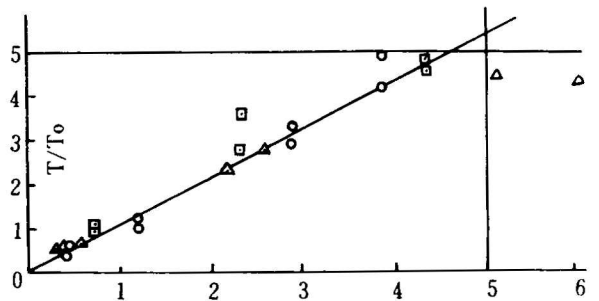
$$A: \frac{h}{C_p r_0 t_0 r_w^{3/2} g^{1/2}} \text{ (m}^7 \text{ min/kg}^{5/2}\text{)}$$

$h$ : 연료의 단위중량당 열방출비(kcal / kg)

$C_p$ : 공기 정압비열 0.24kcal / kg°C

$r_0$ : 표준상태에서의 공기밀도

(20°C, 1 atm) 1.161kg / m'<sup>3</sup>



(그림 5)  $T/T_0$ 와  $\left( \frac{\gamma}{Q_w} \right)^2 \cdot \left[ A \cdot \frac{Q}{H} \cdot \left( \frac{\gamma}{dm} \right)^{3.75} \right]^{2.5}$ 과의 관계

### 5. 수치 계산

여기에서 화목의 연소비가 항상 일정한 화재모형을 사용하여 스프링클러의 작동시간과 소화시간을 계산한다. 스프링클러헤드 4개를 매우 큰 방의 천정에 3.25m씩 떨어지도록 정방형으로 설치한다. 화목은 4개의 스프링클러헤드가 설치된 천정 중앙 하단에 오도록 하고 화목상부 표면에서 천정까지의 거리는 2.5m가 되도록 설치하였다. 그러므로 화목의 중앙에서 스프링클러헤드까지의 수평거리는 2.3m가 된다. 천정에서의 가스상승온도( $\Delta T_g$ )와 속도( $U$ )는 다음 식으로 부터 얻어진다.

$$\Delta T_g = \frac{14 \dot{Q}^{3/2}}{H r^{2/3}} \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (12)$$

$$U = \frac{0.32 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}} \text{ (m/s)} \dots\dots\dots (13)$$

여기서

$r$ : 화목중앙에서 부터의 수평거리(m)

H: 화목상부표면에서 천정까지의 거리(m)

Q: 열방출비(kcal/s)

상기방정식(12), (13)을 이용하여<그림2>에서 보는 바와 같이 화목을 6, 8, 10단씩 쌓은 각각의 화재 모형에 대한 스프링클러가 설치된 장소의 가스온도와 속도를 계산하였다. 그 계산결과가 <표2>이며 이 경우 열방출비는 나무의 단위중량당 열방출량을 3,870kcal/kg으로 계산하였다. 본 논문의 실험에 사용한 스프링클러헤드는 한 종류로써 일본에서 제작한 것이다.(Nohmi Bosai Kogyo Co., Ltd) 이 스프링클러헤드의 작동온도범위는 72℃이고 시간상수(θ)와 공기속도(μ)의 관계는 다음 식으로 표시된다.

$$\theta = 2.32\mu^{0.66} [\theta : \text{min}, \mu : \text{m/s}] \dots\dots\dots (14)$$

<표2> 화재모델별 스프링클러 작동시간

|                                  |           |      |       |
|----------------------------------|-----------|------|-------|
| 화목이 쌓인 단수                        | 6         | 8    | 10    |
| 질량연소비(kg/min)                    | 0.95      | 1.40 | 2.06  |
| 열방출비[Q](Kcal/s)                  | 61.3      | 90.3 | 132.9 |
| 화목상부에서 천정까지의 거리                  | 2.5m      |      |       |
| 화목과 스프링클러헤드까지의 수평거리              | 2.3m      |      |       |
| 작동 온도의 상승(ΔTa)(℃)                | 52(72-20) |      |       |
| 스프링클러헤드가 설치된 부분의 가스 상승온도(ΔTg)(℃) | 50        | 65   | 84    |
| 스프링클러헤드부의 가스 온도(℃)               | 70        | 85   | 104   |
| 헤드설치 장소(천정)의 유속(m/s)             | 1.0       | 1.1  | 1.3   |
| 스프링클러헤드의 시간 상수                   | 2.32      | 2.18 | 1.95  |
| 스프링클러헤드의 작동시간(min)               | -         | 3.51 | 1.88  |

일반적으로 일정한 온도에 노출시킨 스프링클러헤드의 작동시간(Tr)은 다음 방정식으로 표시된다.

$$Tr = -\theta \log(1 - \Delta Ta / \Delta Tg) \dots\dots\dots (15)$$

여기서

θ: 스프링클러헤드의 시간상수

ΔTa: 링크(헤드 감지부)의 초기온도와 작동온도의 차이

ΔTg: 링크(헤드 감지부)의 초기온도와 가스온도의 차이

<표2>는 방정식(14)와 (15)로 얻은 각 화재모형에 대한 스프링클러의 작동시간을 나타내고 있다. 이 표에서 6단으로 쌓은 화목의 경우 스프링클러헤드가 설치된 곳의 가스온도는 작동온도에 도달하지 못하여 스프링클러헤드는 작동하지 않았다. 방

수압력이 1kg/cm<sup>2</sup>일 때의 스프링클러헤드의 방수율은 수직거리 2.5m, 수평거리 2.3m 지점에서 2.1 l/m<sup>2</sup>/min (0.6×0.6m의 화목에 0.76kg/min)의 측정치를 가지며 물입자의 평균지름은 1mm이다.

<표3> 화재모델별 소화시간

|                                    |                      |      |
|------------------------------------|----------------------|------|
| 쌓인 화목의 단수                          | 8                    | 10   |
| 질량연소율(kg/min)                      | 1.40                 | 2.06 |
| 방수율[Q](kg/min)                     | 1 sprinkler          | 0.76 |
|                                    | 2 sprinkler          | 1.52 |
|                                    | 3 sprinkler          | 2.28 |
|                                    | 4 sprinkler          | 3.04 |
| 화목상부에서 천정까지의 거리[H]                 | 2.5m                 |      |
| 물분무입자의 평균직경[dm]                    | 1×10 <sup>-3</sup> m |      |
| 화염에서의 공기 밀도[r](kg/m <sup>3</sup> ) | 0.47                 | 0.65 |
| 스프링클러 작동시의 연료감소량[M](kg)            | 4.91                 | 3.87 |
| 소화시간[T](min)                       | 1 sprinkler          | -    |
|                                    | 2 sprinkler          | 6.27 |
|                                    | 3 sprinkler          | 2.79 |
|                                    | 4 sprinkler          | 1.57 |

<표2>의 수치를 이용하여 각 화재모형에 대한 소화시간의 산출은 한개의 스프링클러헤드가 작동했을 때와 두개에서 네개가 동시에 작동했을 때의 두 경우에 대해서 각각 방정식(11)에 의해 계산한다. 그리고 이 결과는 <표3>과 같다. 이 경우에 있어서 스프링클러 작동시까지의 연료 중량손실(M(kg))은 스프링클러 작동시간과 질량연소율(일정함)의 곱이 되는 것으로 나타났다.

## 6. 결론

물리적인 피해를 감소시키기 위한 목적으로 스프링클러 소화설비를 사용하였을 때 성공적으로 소화를 할 수 있는지의 여부와 연소의 손실을 어느 정도로 억제시킬 수 있는냐 하는 것이 문제이다. 그렇지만 더욱 중요한 것은 스프링클러 소화설비를 호텔, 병원의 입원실 등에 사용하였을 경우 피난의 안전확보를 위한 관점에서 볼 때 신속하게 화재를 감지하고 소화할 수 있는냐 하는 것이다. 그러므로 스프링클러 소화설비에 의한 소화시간은 앞으로 소화효과의 지표로서 가장 중요한 요소중의 하나가 될 것이다. ☉