

스프링클러 소화설비에 의한 소화시간

손 봉 세

〈본협회 부설 방재시험소 연구원〉

〈전호에서 계속〉

〈표 1〉 스프링클러에 의한 소화시험결과

4. 예측방정식의 상수결정

〈그림3〉은 그룹ABC의 경우에 대한 T/T₀와 Qw의 관계를 나타내고 있으며 각각의 경우에 대한 Q와 H는 〈표1〉에서 주어진 값을 이용한다. m=-2는 기울기로부터 얻어진다. 본 실험에서 dm, h, Cpm, r₀, t₀, r_w와 g의 값은 다음과 같다.

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

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

$$Cp = 0.24 kcal / kg \text{ } ^\circ C$$

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

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

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

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

결과적으로 A=1.172×10⁻⁴ m⁷min / kg^{5/2}이고 r의 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

Δt: 화염의 가스온도와 실내온도의 차(°C)

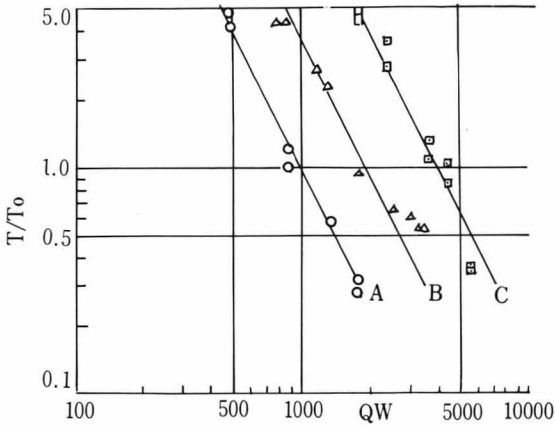
Q: kg / min

h: kcal / kg

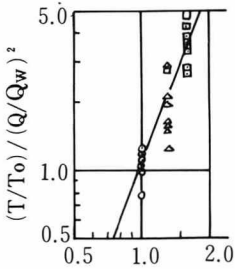
H: m

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

군 별	No.	화목 중량 W (kg)	점화에 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



〈그림 4〉

$(T/T_0)/(Q/Q_w)^2$ 와 $\left[A \cdot \frac{Q}{H} \left(\frac{r}{dm} \right)^{3/2} \right]$ 의 관계

〈그림 4〉는 상기에서 언급한 실험을 통해 얻은 결과와 값을 이용하여 $(T/T_0)/(Q/Q_w)^2$ 와 $\left[A \cdot \frac{Q}{H} \left(\frac{r}{dm} \right)^{3/2} \right]$ 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.

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

〈그림 5〉는 방정식(10)과 시험결과를 비교하고 있다. 스프링클러가 작동할 때 까지 연료의 감소량 $M=QT_0$ 이므로 방정식(10)은 다음과 같이 된다.

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

여기서

T: 스프링클러 작동에서 소화까지의 시간(min)

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

h: 연료의 단위중량당 열방출비(kcal/kg)

C_p : 공기 정압비열 0.24kcal/kg°C

r_0 : 표준상태에서의 공기밀도 (20°C, 1 atm) 1.161kg/m³

t_0 : 표준상태에서 공기온도(20°C, 1 atm) 20°C

rw: 물의 밀도 998.2kg/m³

g: 중력 가속도 35.3×10³ m/min²

Q: 스프링클러헤드가 작동하기 전의 질량연소비(kg/min)

Q_w : 연료표면에 대한 방수율(kg/min)

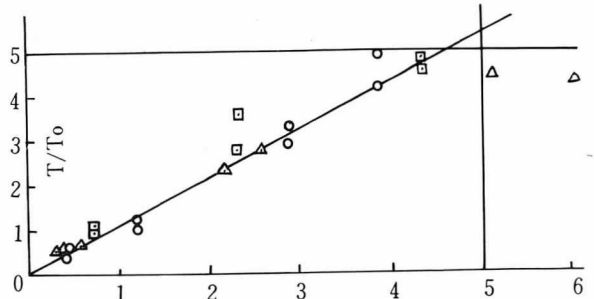
M: 스프링클러헤드가 작동할 때까지의 연료감소량(kg)

H: 화목표면상부에서 천정까지의 거리(m)

r: 화염에서의 가스밀도(kg/m³)

dm: 물분무입자의 평균직경(m)

방정식(11)에 의하여 스프링클러 작동에서부터 소화까지의 시간계산이 가능하다.



〈그림 5〉 T/T_0 와 $\left(\frac{\gamma}{Q_w} \right)^2 \cdot \left[A \cdot \frac{Q}{H} \left(\frac{\gamma}{dm} \right)^{3/2} \right]^{2.5}$ 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 정방향으로 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(ΔT_g)와 속도(U)는 다음 식으로부터 얻어진다.

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

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

여기서

r: 화목중앙에서 부터의 수평거리(m)

H: 화목상부표면에서 천정까지의 거리(m)

Q̇: 열방출비(kcal/s)

상기방정식(12),(13)을 이용하여<그림2>에서 보는 바와 같이 화목을 6, 8, 10단씩 쌓은 각각의 화재모형에 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[Q̇](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 가스온도(℃)	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/cm²일 때의 스프링클러헤드의 방수율은 수직거리 2.5m, 수평거리 2.3m 지점에서 2.1 l/m²/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[Q̇] (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 ⁻³ m	
화염에서의 공기 밀도[r](kg/m ³)	0.47	0.65
스프링클러 작동때의 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 있느냐 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 있느냐 하는 것이다. 그러므로 스프링클러 소화설비에 의한 소화시간은 앞으로 소화효과의 지표로서 가장 중요한 요소중의 하나가 될 것이다. ☹