

실(室) 화재시 온도계산

李福永/연구원

소방공학이나 소방시설의 설계를 하는 경우 실 내에서 발생할 수 있는 가연물의 종류, 성상에 따른 예상발생온도를 계산하는것은 소방시설의 설계와 관련하여 생각한다면 매우 중요한 사항이다.

예로서 실내 가연물의 구성에 따라 그 실에서 FLASH-OVER가 발생할 수 있나를 예견하는 것이 그 중요한 예이다.

이는 화재시 온도를 예상하는 문제로 보통 600°C에 도달했을때 FLASH-OVER가 발생한다고 한다.

실제 화재시에 온도는 매시간마다 다를 뿐만 아니라 실내 각 위치에 따라서 각각 그 양상이 다르다.

실(室)화재를 수학적으로 모형화 하려면 평균 상층부 가스온도(T_u)와 저층부 가스온도(T_l)를 근사화 시켜야 한다.

화재 초기에는 실전체의 온도는 주위온도와 같고 화재가 확대됨에 따라 뜨거운 가스층(온도: T_u)은 천정에서 바닥으로 확대되며 최종적으로 FLASH-OVER가 발생되면 뜨거운 가스층은 거의 바닥면까지 이르게 된다.

대부분의 응용에서 하루 가스온도는 화재초기의 주위온도로 취하는것이 통상적이며 상층부 가스온도(T_u)는 시간함수로 계산하고 FLASH-OVER이후의 온도변화 추정은 실제조건과 같아

야만 단순화 해석이 가능하여 건축물의 내화시간을 추정할 수 있다.

FLASH-OVER이전의 연소가스 발생으로 인한 두려움등이 피난활동을 어렵게 하고 FLASH-OVER이전 최소한의 화재시 내구성을 갖는 구조물의 붕괴, 연소확대 등은 건축물의 내화성이 없다고 생각하게 된다.

실제 표준 화재내구성 시험의 표준 시간-온도 곡선의 "0"점은 화재초기 시점이 아닌 FLASH-OVER가 발생하는 시점으로 해석하여 시험을 한다.

1. 화재시 온도계산

화재시 전 연소과정의 시간경과별 온도변화를 정확하게 알기 위하여는 COMPUTER를 이용하면 편리하나 PROGRAMING에 있어 많은 시간이 필요하고 세부필요자료가 많아 화재경과별 온도를 정확하게 계산하여야 하지만 FLASH-OVER 이후에는 PROGRAM을 단순화시켜서 사용하고 있다.

이 PROGRAM은 복잡한 경우의 충분한 계산 유도에는 충분치가 못하지만 연소물에 대한 방열율(RATES OF HEAT RELEASE)이 정확하지 못하기에 각 계산과정에서 단순화 하더라도 큰 영향은 없으나 실내 연소물의 방열율은 이론적인

것이 아닌 실험에 근거한 자료라야 한다.

또한 모든 가연물에 대하여 시험을 할 수 없는 고로 상세한 계산을 수행해야 하는 경우 이런 조건하에서는 정확하게 유도해 낼 수가 없다.

그러한 이유로 표준시간-온도곡선은 단순히 시험방법에 국한된 것으로 실제 화재온도와는 거리가 있음을 감안하여야 하며 다양한 가연물에 대한 내화시험을 할 수 없으므로 표준로 시험이 필요하게 된 것이다.

2. 방열율(RATES OF HEAT RELEASE)

화재시 화재온도를 예측하는데에는 방열율이 중요한 변수로서 유효한 시험자료가 확보되어야 한다.

(1) POOL FIRE

위험물 저장소의 화재는 화재의 초기단계에만 자유연소상태로 계산하여야 하며 후기단계에서는 다른 가연물질과 달라서 실제 화재의 진행중에 있는 방열율은 POOL에서의 실제 연소율을 적용하여야 하며 모형등이 실제와 다른것을 통하여 얻은 자료를 적용하여서는 안되고 위험물 저장소 화재의 전 과정에 대한 자료라야 한다.

(2) 목재, 합판, 플라스틱

1) 두께가 5mm이하인 판의 경우

$$Q' = (\Delta hc) V_p \rho_f A_f [KW]$$

Δhc : 가연물의 발열량[KJ/kg]

V_p : 회귀속도[m/s]

ρ_f : 밀도[kg/m³]

A_f : 표면적[m²]

D : 두께[m]

$V_p = 2.2 \times 10^{-6} D^{-0.6}$ [m/sec]: 목재

$= 1.4 \times 10^{-6} D^{-0.6}$ [m/sec]: PMMA

$= 3.1 \times 10^{-6} D^{-0.6}$ [m/sec]: 가열경화 polyester

$= 3.8 \times 10^{-6} D^{-0.6}$ [m/sec]: 경질 폴리

우레탄 폼

2) 두께가 5mm이상인 판의 경우

$$Q' = (\Delta hc) V_p \rho_f A_f [KW]$$

$V_p = 8.5 \sim 10 \times 10^{-6}$ [m/sec]: 목재

3) 각형목재를 균일한 층으로 쌓은 목재시험체의 연소상태는 세가지 유형으로 분류할 수 있다.

① 각각 떨어져 있는 나무토막의 표면연소에 대하여

$$Q' = (\Delta hc) V_p \rho_f A_f \left(1 - \frac{2V_{pt}}{D}\right) [KW]$$

V_p : 회귀속도로 두께가 5mm이하인 시간판에 대한 계수

t : [sec]

A_f : 나무토막 한쪽 면적의 합[m²]

② 서로 인접한 다공성 목재에 대하여

$$Q' = (\Delta hc) \rho_f A_f 4.4 \times 10^{-4} (S/H) [KW]$$

S : 목재 사이의 공간[m]

H : 목재 높이[m]

③ 배기상태에서의 목재에 대하여

$$Q' = (\Delta hc) 0.12 A_f \sqrt{h} [KW]$$

A_f : 화재시 창, 배기구 등 개구부 면적[m²]

h : 개구부 높이[m]

실제 목재의 방열율은 상기 세식의 최소치이지만 두꺼운 플라스틱판, 플라스틱 crib에 대해서는 설계에 이용하기에는 충분하지가 못하다.

(3) 가구

포장된 가구의 방열율의 논의와 다른 형태의 가구에 대한 부가적인 자료는 본고에서는 다음으로 미루기로 한다.

3. 개략적인 온도계산

(1) FLASH-OVER 이전

화재초기단계, FLASH-OVER이전의 화재상태에서의 상층부 가스온도 계산은 다음의 경험식을 이용하여 구한다.

$$T_u = T_o \left[1 + \frac{1.69^{2/3}}{(\sqrt{g C_p \rho_o})^{1/3} T_o^{2/3} (A \sqrt{h})^{1/3} (h_c A_w)^{1/3}} \right]$$

$g = \text{중력가속도} : 9.8[\text{m}/\text{sec}^2]$
 $C_p = \text{가스의 비열} : 1.0[\text{KK}/\text{kg}]/\text{K}$
 $\rho_0 = \text{주위공기 밀도} : 1.18[\text{kg}/\text{m}^3]$
 $T_0 = \text{주위온도} : 290\text{k}$
 $A_w = \text{벽면적}[\text{m}^2]$
 $h_k = \text{열전달계수} : \sqrt{\frac{0.18}{t}}[(\text{KW}/\text{m})/\text{K}]$

상기 정수를 대입하면 위식은

$$T_u = T_0 \left[1 + \frac{0.02369^{2/3}}{(h_k A_w A \sqrt{h})^{1/3}} \right]$$

로 되며 화재초기단계에서 벽이 Gypsum-board
 로된 실에 유효한 식이다.

(2) FLASH-OVER이후

상층부 가스온도(T_u)는 각기 상이한 물리적
 현상에 따른 변수(θ)로 나타내진다.

$$T_u = T_0 + [T^* - T_0] \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot \theta_4 \cdot \theta_5$$

여기서 T^* 은 실험정수로서 1725K이고 변수 θ_n 은
 다음과 같다.

1) 연소율 화학량 변수: θ_1

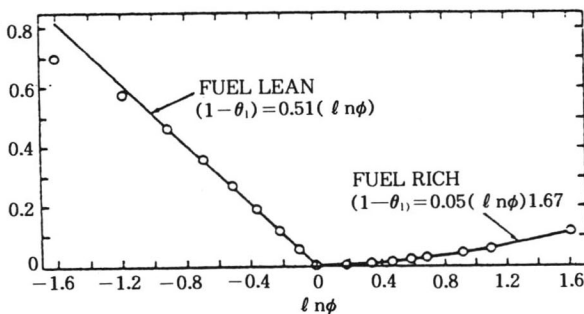
$$\text{무차원 화학량계수 } \phi = \frac{m_f}{m_{f, st}}$$

$m_f = \text{연료의 중량열분해율}[\text{kg}/\text{sec}]$

과잉연료공급 및 과잉산소공급이 아닌 조건에
 서

$$m_{f, st} = \frac{0.5A\sqrt{h}}{r}$$

r 는 연료 1kg을 연소시키는데 r kg의 공기가 필
 요한 때 $(1+r)$ 이 되고 r 값은 C·H·O를 함유하



<그림 1> Effect of equivalence ratio θ .

며 연소생성물 중 CO_2 , H_2O , N_2 를 발생하는 연료
 에 있어서는 쉽게 유도해 낼 수가 있다.

화학량 계수 ϕ 는 1이고, $\phi > 1$ 이면 과잉연료공
 급상태이고 $\phi < 1$ 이면 연료부족상태의 연소이다.

효율상수 θ_1 은 <그림 1>과 화학량으로부터
 유도해낼 수가 있다.

그림에서 알수 있듯이 연료과잉상태와 연료부
 족상태의 양상이 다름을 알수 있다.

연료부족시 $\theta_1 = 1 + 0.51 \ln \phi (\phi < 1)$

연료과잉시 $\theta_1 = 1 - 0.05 (\ln \phi)^{5/3} (\phi > 1)$ 로 나타
 난다.

여기서 m 대신 방열율(Q')을 이용하면

$$\phi = \frac{Q'}{Q'_{st}} \text{ 이고}$$

화학량적 방열율 $Q'_{st} = 1500A\sqrt{h}[\text{KW}]$ 로

$$\phi = \frac{Q'}{1500A\sqrt{h}} \text{ 가 된다.}$$

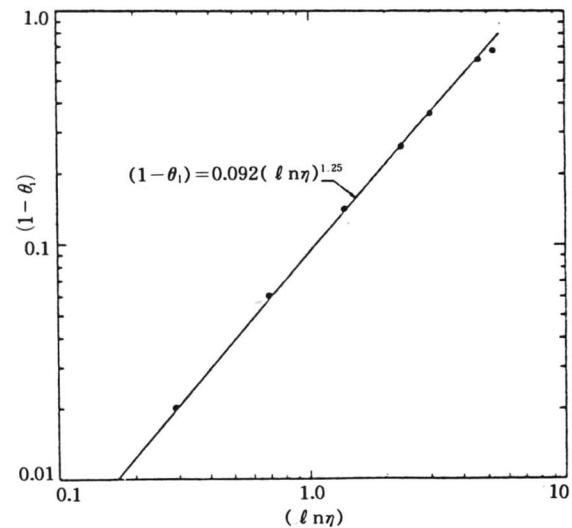
Q' 의 값은 상기식으로부터 구할 수가 있고
 POOL화재에서 $\theta_1 = 1 - 0.092 (-\ln \eta)^{1.25}$ 가 된다.

$$\eta = \frac{A\sqrt{h}}{A_f} \frac{0.5\Delta h_p}{r\theta(T_u^4 - T_b^4)}$$

$A_f = \text{POOL 면적}[\text{m}^2]$

$\Delta h_p = \text{액체의 기화열}[\text{KJ}/\text{kg}]$

$\theta = \text{스테판-볼츠만 상수} : 5.67 \times 10^{-11}$



<그림 2> Effect of pool parameter θ .

$$[\text{KW}/\text{m}^2]/\text{K}^4$$

Tb=액체의 비점[K]

윗식에서 Tu에 대한 값은 반복된 시험으로 알아내야 하며 이와 관련된 사항은 <그림 2>에 나타내고 있다.

2) 안정상태에서 벽에대한 손실계수: θ_2

천정을 포함한 벽면의 특성에 따른 영향에 의한 계수로서

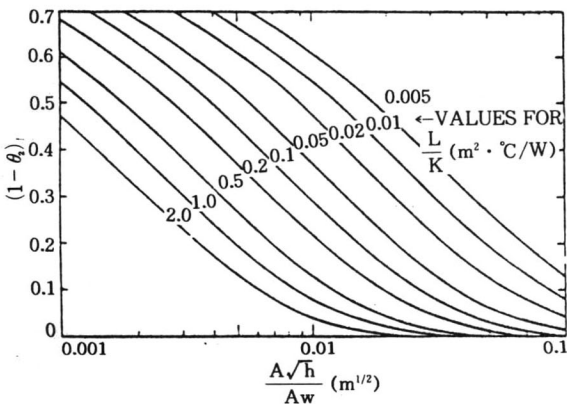
$$\theta_2 = 1 - 0.94 \text{Exp} \left[-54 \left(\frac{A\sqrt{h}}{Aw} \right)^{2/3} (L/K)^{1/3} \right]$$

나타낸다.

Aw=벽면적[m²]

L=벽두께[m]

K=열전도도[KW/m]/K



<그림 3> Effect of wall steady state losses.

3) 벽의 일시적 손실계수: θ_3

일시적인 경우 2)의 관계식에서 근사온도를 예측할 수 있으며 시간변수가 첨부되어

$$\theta_3 = 1 - 0.92 \text{Exp} \left[-150 \left(\frac{A\sqrt{h}}{Aw} \right)^{0.6} \left(\frac{t}{K\rho C_p} \right)^{0.4} \right]$$

로 된다.

이경우 안정상태의 온도가 되면 $\theta_3=1$ 이 되며 t에대한 벽의 효과가 0보다 큰때는 $\theta_2 \times \theta_3$ 에 대한 식은 적절치 못하지만 FLASH-OVER이후의 화재에 대한 설계에 있어서는 큰 영향을 미치지 않는다.

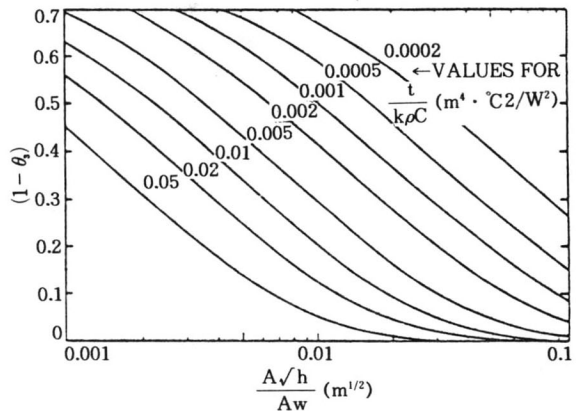
순간적인 화재인 경우 다음의 두가지 가능성을 고려해야 하는데

첫째로, 모든 화재에 있어서 순간적 특성에 의해 나타나는 불완전한 θ_3 와 관계된 벽손실 효과이며, 둘째로 일정치 않은 연료소모율이다.

실제 계산에서 m_f 가 θ_3 에 의하여 설정된 시간(최대반응의 63%가 되는 시간)을 초과하여 급변하게 변하는 화재로 간주한다.

$$\theta_3 = 0.63$$

$$t = 2.92 \times 10^{-6} (K\rho C_p) \left(\frac{Aw}{A\sqrt{h}} \right)^{1.5}$$



<그림 4> Effect of wall transient losses.

4) 개구부 높이에 의한 영향: θ_4

정상연소율과 배기상수 $A\sqrt{h}$ 에 따른 벽손실량은 완전한 열평형상태로 되지는 않는다.

$A\sqrt{h}$ 로 주어진 개구부는 좁고 길거나, 넓고 짧게 만들수 있다.

개구부가 짧으면 면적은 크게 된다.

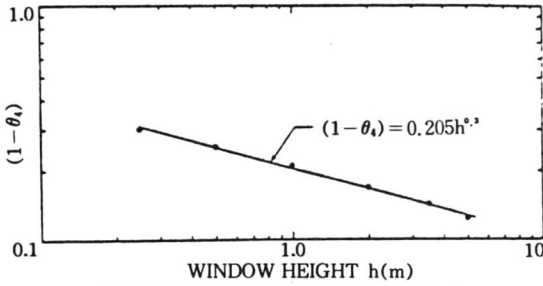
복사열 손실은 개구부 면적에 비례하므로 짧은 개구부는 높이가 더 크게 된다.

θ_4 를 간단히 표시하면

$\theta_4 = 1 - 0.205h^{-0.3}$ 이 되고 이 관계는 <그림 5>와 같이 나타난다.

5) 연소효율에 관한 영향: θ_5

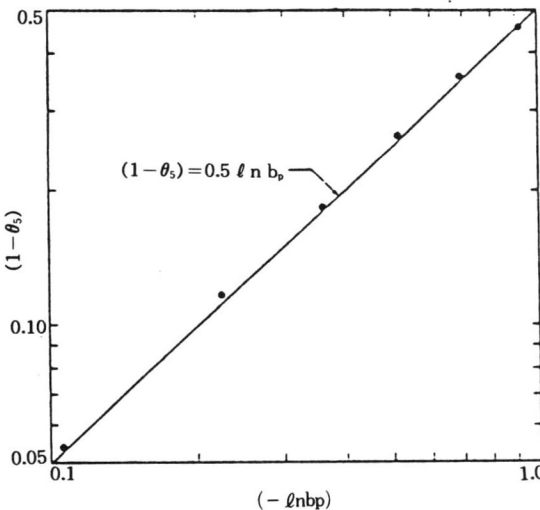
방화구획이란 잘되어 있다하더라도 완전하지는 못하여 단지 기류혼합이 되지 않을 정도로 최



<그림 5> Effect of window height.

대연소효과 b_p 는 기류혼합이 안된 상태이다.

실제 화재시 부정확하고 빠른 동적상태로 인하여 b_p 는 정확한 값을 취할 수는 없으나 0.5~0.9 범위에서 취하며 b_p 에 의한 영향계수 $\theta_5 = 1 + 0.5 \ln b_p$ 로 되며 <그림 6>에서 이 관계를 나타내고 있다.



<그림 6> Effect of b_p , the maximum combustion efficiency.

(3) 적용 예

예 1)

가소성물질의 POOL화재에 있어서 안정상태온도는 화학량조건으로 결정된다.

화학량적으로 연소하므로 $\eta = 1$, $\theta_1 = 1$, 벽면적

$A_w = 200$, 창면적 $A = 2m^2$, 창높이 $h = 1m$, 벽의 열전도율 $K = 0.17 [W/m]/K$ (Gypsum board와 유사함), 두께 $h = 0.04m$ 이면, 안정상태에서의 벽손실계수 $\theta_2 = 0.8$ 이 되고 안정상태로 해석하므로 $\theta_3 = 1$, 주어진 h 에서 $\theta_4 = 0.795$, $b_p = 0.9$ 로 취하면 $\theta_5 = 0.947$ 이 되고 $T = 25^\circ C$ 로 하면

$T_f = 25 + 1700(1.0)(0.8)(1.0)(0.795)(0.947) = 1049^\circ C$ 가 된다.

Polyethylene연료인 경우는 $\gamma = 14.7$, $\Delta h_p = 2.4 \times 10^6 [J/K]$ 이며 $A_f = 1.04$ 가 된다.

예 2)

일시적(순간적)인 POOL FIRE.

$\eta = 0.1$, $t = 300sec$, 벽밀도 $\rho = 790kg/m^3$, $C_p = 840 [J/kg]$ 이고 다른것은 예1에서와 같다면 $T_f = 507^\circ C$ 가 된다.

예 3)

안정된 상태에서의 화재에서 $m_f = 0.12 [kg/sec]$, 다른 변수는 예1과 같다면

$T_f = 1028^\circ C$

(4) FLASH-OVER의 추정

화재시 온도를 계산함에 있어 FLASH-OVER가 발생할 것인지의 여부는 매우 중요하며 FLASH-OVER 발생 시점에서의 열손실은 총 출화에너지의 50%로 가정하면(1980, Babrauskas의 시험결과) FLASH-OVER가 발생할 수 있는 최소화재 방열율

$$Q'_{f_0} = 0.5Q'_{stoich}$$

여기서 $Q'_{stoich} = 1500A\sqrt{h}$ 이므로

$$Q'_{f_0} = 750A\sqrt{h} [KW]$$
가 된다.

Babrauskas는 FLASH-OVER가 발생할 수 있는 방열율의 시험을 계속하여 1984년에 산출식을 발표하였다.

$Q'_{f_0} = 378A\sqrt{h} + 7.8Aw$ 로 이식은 석고판과 유사한 벽으로 된 경우에 적용할 수 있으나 가연물의 성상에 따른 시험방법에 따른 산출식은 연구할 여지가 아직도 있음을 밝혀둔다.

<참고 문헌>

References Cited

-
- Babrauskas, Fire protection HANDBOOK 16 TH, sec 21, ch15
- Babrauskas, V. 1984. "Upholstered Furniture Room Fires—Measurements, Comparison with Furniture Calorimeter Data, and Flashover Predictions." *Journal of Fire Sciences*. Vol 2. pp 5–19.
- Babrauskas, V. 1981. "A Closed-Form Approximation for Post-Flashover Compartment Fire Temperatures." *Fire Safety Journal*. Vol 4. pp 63–73.
- Babrauskas, V. 1980. "Estimating Room Flashover Potential." *Fire Technology*. Vol 16. pp 94–103, 112.
- Babrauskas, V. 1979. "COMPF2—A Program for Calculating Post-Flashover Fire Temperatures." *TN 991*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- Jones, W. W. 1984. "A Model for the Transport of Fire, Smoke, and Toxic Gases(FAST)." *NBSIR 84–2934*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- Jones, W. W. 1983. "A Review of Compartment Fire Models." *NBSIR 83–2684*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- Lawson, J. R., et al. 1984. "Fire Performance of Furnishings as Measured in the NBS Furniture Colorimeter, Part I." *NBSIR 84–2787*. National Bureau of Standards. Gaithersburg, MD.
- Quintiere, J. G. 1983. "A Simple Correlation for Predicting Temperature in a Room Fire." *NBSIR 83–2712*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- Thomas, P. H. 1981. "Testing Products and Materials for Post-Flashover Compartment Fire Temperatures." *Fire and Materials*. Vol 5. pp 103–111.