

# 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 하부 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 조  
건하에서는 정확하게 유도해 낼 수가 없다.

그러한 이유로 표준시간-온도곡선은 단순히  
시험방법에 국한된 것으로 실제 화재온도와는 거  
리가 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 후기단계에서  
는 다른 가연물질과 달라서 실제 화재의 진행중  
에 있는 방열율은 POOL에서의 실제 연소율을  
적용하여야 하며 모형등이 실제와 다른것을 통하  
여 얻은 자료를 적용하여서는 안되고 위험물 저  
장소 화재의 전 과정에 대한 자료라야 한다.

### (2) 목재, 합판, 플라스틱

1) 두께가 5mm이하인 판의 경우

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

$\Delta hc$ : 가연물의 발열량 [KJ/kg]

$V_p$ : 회귀속도 [m/s]

$\rho_f$ : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$A_i$ : 표면적 [m<sup>2</sup>]

$D$ : 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

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

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

3) 각형목재를 균일한 층으로 쌓은 목재시험  
체의 연소상태는 세가지 유형으로 분류할 수 있  
다.

① 각각 떨어져 있는 나무토막의 표면연소  
에 대하여

$$Q' = (\Delta hc) V_p \rho_f A_i \left(1 - \frac{2V_p t}{D}\right) [KW]$$

$V_p$ : 회귀속도로 두께가 5mm이하인  
시간판에 대한 계수

$t$ : [sec]

$A_f$ : 나무토막 한쪽 면적의 합 [m<sup>2</sup>]

② 서로 인접한 다공성 목재에 대하여

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

$S$ : 목재 사이의 공간 [m]

$H$ : 목재 높이 [m]

③ 배기상태에서의 목재에 대하여

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

$A_i$ : 화재시 창, 배기구 등 개구부 면  
적 [m<sup>2</sup>]

$h$ : 개구부 높이 [m]

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

### (3) 가구

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

## 3. 개략적인 온도계산

### (1) FLASH-OVER 이전

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

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

$g = \text{중력가속도} : 9.8 [\text{m/sec}^2]$

$C_p = \text{가스의 비열} : 1.0 [\text{KK/kg}]/\text{K}$

$\rho_o = \text{주위공기 밀도} : 1.18 [\text{kg/m}^3]$

$T_o = \text{주위온도} : 290\text{k}$

$A_w = \text{벽면적} [\text{m}^2]$

$h_k = \text{열전달계수} : \sqrt{\frac{0.18}{t}} [(\text{KW/m})/\text{K}]$

상기 정수를 대입하면 위식은

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

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

## (2) FLASH-OVER이후

상층부 가스온도( $T_u$ )는 각기 상이한 물리적 현상에 따른 변수( $\theta$ )로 나타내진다.

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

여기서  $T^*$ 은 실험정수로서 1725K이고 변수  $\theta_n$ 은 다음과 같다.

1) 연소를 화학량 변수:  $\theta_1$

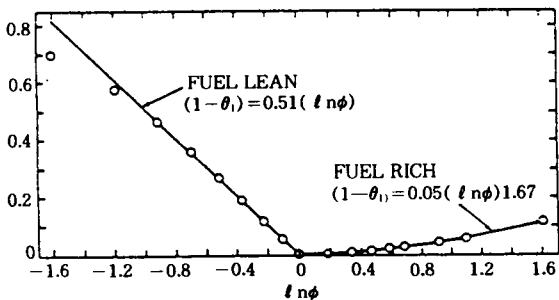
$$\text{무차원 화학량계수 } \phi = \frac{m_f}{m_{f, \text{st}}}$$

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

과잉연료공급 및 과잉산소공급이 아닌 조건에서

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

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



<그림 1> Effect of equivalence ratio  $\theta$ .

며 연소생성물 중  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ 를 발생하는 연료에 있어서는 쉽게 유도해 낼 수가 있다.

화학량 계수  $\phi$ 는 1이고,  $\phi > 1$ 이면 과잉연료공급상태이고  $\phi < 1$ 이면 연료부족상태의 연소이다.

효율상수  $\theta_1$ 은 <그림 1>과 화학량으로부터 유도해 낼 수가 있다.

그림에서 알수 있듯이 연료과잉상태와 연료부족상태의 양상이 다를을 알수 있다.

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

연료과잉시  $\theta_1 = 1 - 0.05 (l n \phi)^{1.67} (\phi > 1)$ 로 나타낸다.

여기서  $m$ 대신 방열율( $Q'$ )을 이용하면

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

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

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

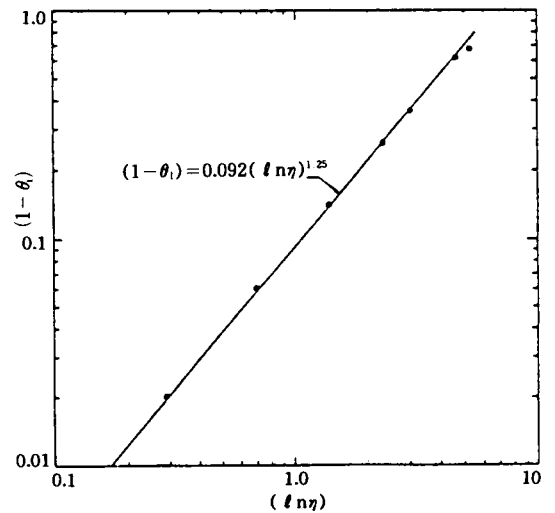
$Q'$ 의 값은 상기식으로부터 구할 수가 있고 POOL화재에서  $\theta_1 = 1 - 0.092 (-l n \eta)^{1.25}$ 가 된다.

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

$A_f = \text{POOL 면적} [\text{m}^2]$

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

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



<그림 2> Effect of pool parameter  $\theta$ .

$$[KW/m^2]/K^4$$

Tb = 액체의 비점[K]

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

2) 안정상태에서 벽에대한 손실계수:  $\theta_2$

천정을 포함한 벽면의 특성에 따른 영향에 의한 계수로서

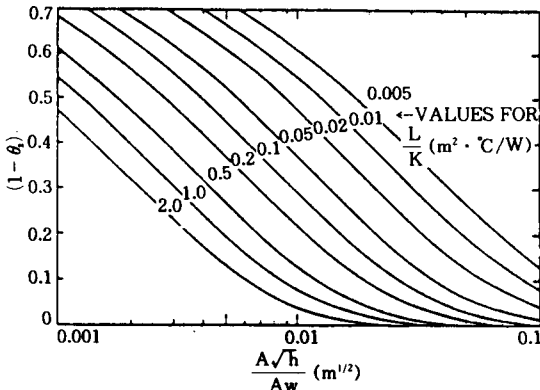
$$\theta_2 = 1 - 0.94 \text{Exp} \left[ -54 \left( \frac{A\sqrt{h}}{Aw} \right)^{2/3} (L/K)^{1/3} \right]$$

나타낸다.

Aw = 벽면적[m<sup>2</sup>]

L = 벽두께[m]

K = 열전도도[KW/m]/K



<그림 3> Effect of wall steady state losses.

3) 벽의 일시적 손실계수:  $\theta_3$

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.

이 경우 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.

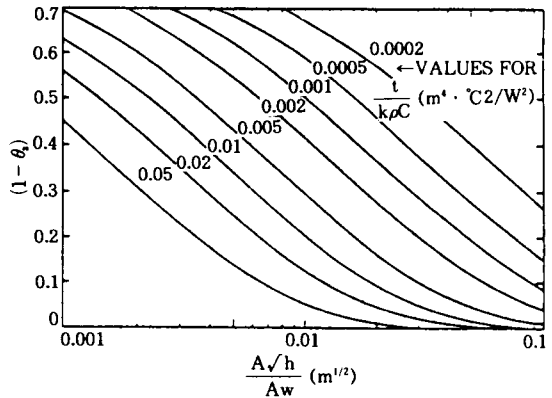
순간적인 화재인 경우 다음의 두가지 가능성을 고려해야 하는데

첫째로, 모든 화재에 있어서 순간적 특성에 의해 나타나는 불안정한  $\theta_3$ 와 관계된 벽손실 효과이며, 둘째로 일정치 않은 연료소모율이다.

실제 계산에서  $m_f$ 가  $\theta_3$ 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:  $\theta_4$

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.

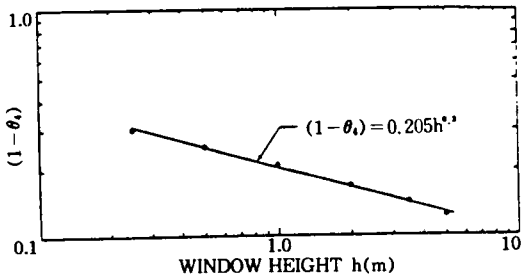
복사열 손실은 개구부 면적에 비례하므로 짧은 개구부는 높이가 더 크게 된다.

$\theta_4$ 를 간단히 표시하면

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

5) 연소효율에 관한 영향:  $\theta_5$

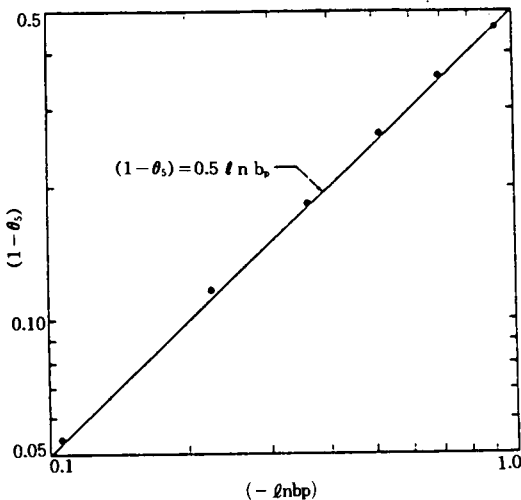
방화구획이란 잘되어 있다하더라도 완전하지는 못하여 단지 기류혼합이 되지 않을 정도로 최



<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  $\theta_s = 1 + 0.5 \ell n b_p$ 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  $r = 14.7$ ,  $\Delta h_p = 2.4 \times 10^6 [J/K]$ 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

$$Q'_{10} = 0.5Q'_{stoich}$$

여기서  $Q'_{stoich} = 1500A\sqrt{h}$ 이므로

$$Q'_{10} = 750A\sqrt{h} [KW] \text{가 된다.}$$

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

$Q'_{10} = 378A\sqrt{h} + 7.8Aw$ 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.