

실질적으로 어느정도의 내화성이 요구되는가?

How Much Fire Resistance is Really Needed?

by T. Z. Harmathy

김 화 중*
전 명 훈**

ABSTRACT

표준화재실험에서 구조물의 파괴되는 시각에 의한 정규화된 열하중의 개념을 이용한 화재시험과 실화재에서 건물부재의 성능을 상호 관련시키는 방법은 실화재의 파괴가능성을 결정짓는 6개의 입력변수와 관련시킬 수 있다. 이 기술은 어떤 규정된 수준의 파괴 확률을 성취하기 위하여 요구된 내화성에 관한 정보를 제공한다.

실질적으로 어느정도의 내화성이 요구되는가? 중요한 설계 문제의 하나인 이것은 아직까지 거의 논의되지 않았다. 건축산업이 고도로 통제됨에 따라서 건축법규에 상세히 기술되어 있는 내화성 요구는 주로 예상되는 화재 위험성의 어렵셈(집작), 혹은 판례에 기본을 두고 있으며, 건물에 있는 연소가능물질량의 비례로서 가정된다.

표준화재 실험

벽, 바닥, 보, 기둥 또는 다른 건물부재이든 간에 내화성을 요구하는 것은, 북미의 경우 ASTM 119인 표준화재실험에 의해 평가된다. 이 실험에서는 건축부재의 대표적인 시험체가 대개 한쪽면만이 시험로의 고온 기체에 노출되어 있

다. 노의 온도는 초기에 매우 급격히 증가하는 규정된 곡선을 따라 제어된다. 부재의 내화성은 시험체가 구조적 취약함 또는 좋은 열전도체가 되어 화재의 확산에 대해 효과적인 차단물이 되지 못하게 되는 시간에 의하여 결정된다.

건축법규에 제시된, 요구된 내화성을 만족하는 건물부재를 선택하는 것이 실화재에 있어서 완벽한 기능을 할 것이라는 보장은 없다. 건물 내부에 있는 연소가능 물질의 양이 화재의 위험성(destructive potential)에 영향을 주는 여러 개의 요소 중 단지 하나라는 것은 1950년대 중반부터 알려져 왔다. 분명하게 화재실험에 의한 내화성요구는 만약 (1) 실화재의 위험성이 모든 중요변수의 함수로서 나타날 수 있고, (2) 표준화재의 실험과 실화재에 있어서 건물부재의 내화성능 관계가 이해될 수 있을 경우에만 정당화될 수 있다. 기본이 되는 이론의 상세없이 설계식에 중점을 둔 실화재와 화재실험의 건물부재

* 正會員, 경북대학교 건축공학과 교수·공박
** 正會員, 경북대학교 건축공학과 대학원

성능을 상호 관련시키는 방법이 여기에 제시된다. 이 관계를 알게되면, 화재실험에 있어서 상술된 성능의 내화성요구는 직접적인 설계진행이 된다.

정규화된 열하중 개념

정규화된 열하중 개념은 실화재의 위험성을 화재실험의 결과와 연관시키는 편리한 방법이다. 개념의 요점은 참고문헌 1에 요약되고 설명되어 있다.

정규화된 열하중 $H(h^{1/2}R; s^{1/2}K)$ 는 실화재 혹은 화재실험의 파괴가능성을 측정하는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$H = \frac{E}{\sqrt{k\rho c}} \quad (1)$$

여기서 E ($Btu ft^{-2}; J m^{-2}$)는 건물요소가 화재에 노출된 동안 단위면적이 흡수하는 총열량이고 $\sqrt{k\rho c}$ ($Btu ft^{-2} h^{-1/2} R^{-1}; J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$)는 화재에 노출된 쪽의 건물부재 표면재료의 열흡수성(k 는 열전도율, ρ 는 밀도, c 는 비열)이다.

설 계 식

구획에 대한 정규화된 열하중은 기본적으로 6개의 변수에 의존하는 화재와 관련된다는 것은 이미 제시되었다.

- A_F : 건물구획의 평균바닥면적, $ft^2(m^2)$
 - A_t : 구획의 평균표면적, $ft^2(m^2)$
 - hc : 구획의 높이, $ft(m)$
 - $\sqrt{k\rho c}$: 구획의 경계 흡열량, $Btu ft^{-2} h^{-1/2} R^{-1}$ ($J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$) (여기서 k 는 열전도율, ρ 는 밀도, c 는 비열이다.)
 - ϕ : 환기인자, 화재동안 구획내로 유입되는 공기의 비율특성, $lb h^{-1} (kg s^{-1})$
 - L : 비례화재하중 (단위 바닥면적당 가연물량), $lb ft^{-2} (kg m^{-2})$
- 여러크기의 구획이 있는 건축물에서, 구획의 평균표면적은 아래와 같이 평가된다.

$$A_t = 2 A_F + 4 hc \sqrt{A_F} \quad (2)$$

여기서 A_F 는 여러개의 구획으로 나누어져 있는 전체 바닥의 평균면적을 의미한다.

만약 구획의 경계들이 다른 건축재료로서 마감되었다면 흡열량은 표면 평균치 (surface-averaged value)로 다음과 같이 계산된다.

$$\sqrt{k\rho c} = \frac{1}{A_t} (A_1 \sqrt{k_1 \rho_1 c_1} + A_2 \sqrt{k_2 \rho_2 c_2} + \dots) \quad (3)$$

여기서 아래의 숫자가 표기된 A 들은 경계의 표면적을 의미하며 이 숫자들은 이 표면을 구성하는 다양한 재료들을 나타낸다. 보통 건축재료의 흡열량은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 보통 건축재료들의 열흡수성

Material	$\sqrt{k\rho c}$	
	$Btu ft^{-2} h^{-1/2} R^{-1}$	$J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$
Marble	6.67	2,270
Normal-weight concrete	6.44	2,190
Brick	4.46	1,520
Lightweight concrete density: 90.5 lb ft ⁻³ (1450 kg m ⁻³)	2.73	930
Plasterboard	2.18	740
Vermiculate plaster	1.96	670
Wood	1.28	440
Mineral wool	0.25	90

환기인자와 등가화재하중은* 무작위 변수이다. 소개된 계산개념에서 환기요소는, 타고있는 구획의 환기량이 최소일때 발생하는 가장 불리한 변수를 채택한 것이다. 이때 통풍에 의한 공기의 유입은 증가되지 않는다.

이 최소치는

$$\phi_{min} = \rho_a A_v \sqrt{g h v} \quad (4)$$

이며 여기서

ρ_a : 대기중 공기의 밀도, $\approx 0.0755 lb ft^{-3}$ at 68F ($\approx 1.21 kg m^{-3}$ at 20C)

A_v : 타고있는 구획을 환기시키는 개구부[대개 깨진 창문, 드물게 열린 창문]의 면적, $ft^2(m^2)$

$h v$: 환기구의 높이, $ft(m)$

g : 중력가속도 (gravitational constant), $\approx 4.17 \times 10^8 \text{ ft h}^{-2} (\approx 9.8 \text{ m s}^{-2})$

약간의 스웨덴 자료로부터 발전된 약간의 거주정도에 대한 비례하중정보가 표 2에 나타나있다. 여기에는 산술평균 L_m 과 표준편차 σ_L 가 기록되어 있다.

표 2. 스웨덴 자료에 의한 등가하중에 대한 정보

Occupancy	Specific fire load			
	Mean, L_m		Standard deviation, σ_L	
	lb ft ⁻²	kg m ⁻²	lb ft ⁻²	kg m ⁻²
Dwelling	6.17	30.1	0.90	4.4
Office	5.08	24.8	1.76	8.6
School	3.59	17.5	1.05	5.1
Hospital	5.15	25.1	1.60	7.8
Hotel	2.99	14.6	0.86	4.2

* 등가화재하중 : 가연물의 열량을 목재의 열량으로 환산하여, 목재의 무게로 나타낸 값 (訳者註)

화재하중의 평균치와 환기요소의 가장 불리한 (최소) 값 때문에 구획경계 (전체로서의 구획)의 정규화된 열하중은 아래의 반실험식 (semi-empirical equation)으로 나타낼 수 있다.

$$H' = C_1 \frac{(11.0\delta + 1.6) A_F L_m}{A_{21} \sqrt{k\rho c} + C_2 \sqrt{\phi_{min} A_F L_m}} \quad (5)$$

여기에서

$$C_1 = \begin{cases} 456 \text{ Btu } \ell \text{ b}^{-1} \\ 1.06 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1} \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.223 \text{ Btu } \ell \text{ b}^{-1} \text{ R}^{-1} \\ 935 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \end{cases}$$

그리고

H' : 구획화재의 정규화된 열하중 ($L = L_m$ and $\phi = \phi_{min}$), $\text{h}^{1/2} \text{ R} (\text{s}^{1/2} \text{ K})$

: 반실험요인, 차원이 없고 식(6)에 의해 규정된다.

$$\delta = \begin{cases} C_3 \sqrt{h_c^2 / \phi_{min}} \\ 1 \end{cases} \quad \text{중 작은 것} \quad (6)$$

여기서

$$C_3 = \begin{cases} 11.8 \ell \text{ b}^{1/2} \text{ ft}^{-3/2} \text{ h}^{-1/2} \\ 0.79 \text{ kg}^{1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1/2} \end{cases}$$

표준화재 시험에서의 파괴가능성 역시 정규화

된 열하중에 의해 측정될 수 있다. 화재실험에서 노의 온도는 규정된 경로에 따라 제어되므로 화재실험에 있어 건물부재에 부가되는 정규화된 열하중은 실험시간의 유일한 함수이다. 만일 실험이 파괴시까지 진행된다면, 이것은 건물부재의 내화성과 같다. 내화성과 정규화된 열하중과의 관계는

$$\tau = 0.11 + C_4 H'' + C_5 (H'')^2 \quad (7)$$

여기에서

$$C_4 = \begin{cases} 5.33 \times 10^{-4} \text{ h}^{1/2} \text{ R}^{-1} \\ 0.16 \times 10^4 \text{ h s}^{-1/2} \text{ K}^{-1} \end{cases}$$

$$C_5 = \begin{cases} 14.44 \times 10^{-8} \text{ R}^{-2} \\ 0.13 \times 10^{-9} \text{ h s}^{-1} \text{ K}^{-2} \end{cases}$$

그리고

τ : 내화성 (혹은 시험화재의 계속시간), h
 H'' : 표준화재 시험에서 구조체의 정규화된 열하중 (normalized heat load), $\text{h}^{1/2} \text{ R} (\text{s}^{1/2} \text{ K})$

식(7)에서 내화시간은 내화요구 결정의 편리를 위한 정규화된 열하중 (normalized heatload) (내화시간에 의한 정규화된 열하중 보다)을 사용하여 표현되어진다. 내화요구시간은 H'' 가 H' 보다 크거나 같은 τ 값이다. 다시 말해서, 건물요소의 규정화된 열하중 용량에 대한 τ 값이, 제시된 정규화된 열하중 보다 크거나 같다.

내화성 (즉 표준화재시험에 의해서 항복되어졌을 때)도 역시 불규칙적인 값이다. τ 의 변위의 계수인 V_τ 는 0.01과 0.15 (즉, 1%에서 15%) 사이이고, 주로 구조의 형태에 의해 좌우된다. $V_\tau \approx 0.1$ 은 모든 목적의 값으로 간주되어질 수 있다.

등가화재하중 L_m 의 무작위적 성질과 화재실험의 결과뿐만 아니라, 식(5)의 사용과 관련된 불명확성을 고려하고, 잘 알려진 신뢰성에 근거한 설계순서를 채택하여 내화성 요구도의 계산을 위해 아래의 식이 유도되어진다.

$$\tau_a = 0.11 + C_4 H_a'' + C_5 (H_a'')^2 \quad (8)$$

여기서

$$H_a'' = H' \exp(\beta \sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + 0.101^2}) \quad (9)$$

그리고 식 (9)에서

$$\Omega_1 = \frac{\sigma_L}{L_m} \cdot \frac{A_t \sqrt{k\rho c} + \frac{C_2}{2} \sqrt{\phi_{min} A_F L_m}}{A_t \sqrt{k\rho c} + C_2 \sqrt{\phi_{min} A_F L_m}} \quad (10)$$

그리고

$$\Omega_2 = 0.9 V_r \quad (11)$$

이 식들에서 아래 표기된 d 는 설계치를 나타내며 β 는 (무차원)인수로서 그림 1에서 나타난 바와 같이 허용파괴확률 P_f (무차원)의 함수이다. 파괴확률은 당연히 flashover의 상태에 달려있다.

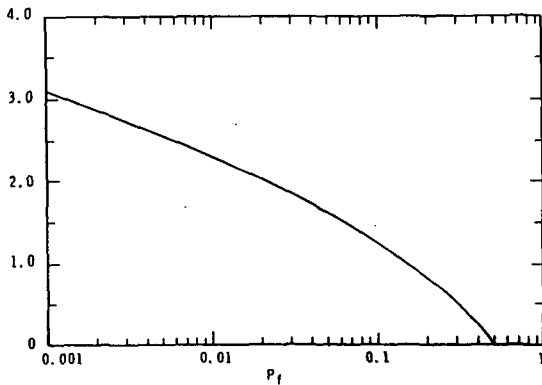


그림1. 요인 β 와 화재하에서의 파괴확률 P_f 의 상관관계

허용할 수 있는 파괴확률 P_f 를 결정한 뒤에 내화성요구는 식 (5), (6)과 (8)~(11)에 의해 계산된다.

설계의 예와 고찰

조건 : 10층의 사무소 건물로 층별 면적은 $4,900 \text{ ft}^2 (454 \text{ m}^2)$ 이다. 각 층에는 16개의 구획들이 있고, 그것들의 높이는 $8.2 \text{ ft} (2.5 \text{ m})$ 이고 평균 바닥면적은 $280 \text{ ft}^2 (26 \text{ m}^2)$ 이다.

그 요소들은 통상적인 재료(벽체와 천정은 plasterboard이고 바닥은 wood parquet로서 구획되어져 있다. 그 구획은 각각 높이 $5 \text{ ft} (1.52 \text{ m})$, 폭 $3.33 \text{ ft} (1.02 \text{ m})$ 의 창이 2개 있다. 파

괴확률이 0.05(5%)보다 작게 되도록 내화성요구도를 계산하면, 주어진 flashover(즉, 주어진 발화)보다 1.05%작다.)

평균바닥 면적

$$A_F = 280 \text{ ft}^2 (26 \text{ m}^2)$$

구획표면적의 평균 [식(2)]

$$A_t = 2 \times 280 + 4 \times 8.2 \sqrt{280} = 560 + 549 = 1,109 \text{ ft}^2 (103 \text{ m}^2)$$

구획경계의 평균 흡열량 [식(3)과 표 1]

$$\begin{aligned} \sqrt{k\rho c} &= \frac{1}{1,109} [(280 + 549) \times 2.18 + 280 \times 1.28] \\ &= 1.95 \text{ Btu ft}^{-1} \text{ h}^{-1/2} \text{ R}^{-1} (665 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}) \end{aligned}$$

환기인자의 최소치 [식(4)와 $\rho_a = 0.0755 \text{ lb ft}^{-3}$ (1.21 kg m^{-3}) 그리고 $g = 4.17 \times 10^8 \text{ ft h}^{-2}$ (9.8 ms^{-2})]

$$\begin{aligned} \phi_{min} &= 0.755 \times 2 \times 5 \times 3.33 \sqrt{4.17 \times 10^8 \times 5} \\ &= 11.5 \times 10^4 \text{ lb h}^{-1} (14.5 \text{ kg s}^{-1}) \end{aligned}$$

사무소 건축물의 등가 열하중 [표 2]

$$\begin{aligned} L_m &= 5.08 \text{ lb ft}^{-2} (24.8 \text{ kg m}^{-2}) \\ \sigma_L &= 1.76 \text{ lb ft}^{-2} (8.6 \text{ kg m}^{-2}) \end{aligned}$$

δ 요소 [식(6)]

$$\beta = 1.64$$

실화재에서의 정규화된 열하중 [식(5)]

$$\begin{aligned} H' &= 456 \frac{(11.0 \times 0.82 + 1.6) \times 280 \times 5.08}{1,109 \times 1.95 + 0.223 \sqrt{11.5 \times 10^4 \times 280 \times 5.08}} \\ &= 1,370 \text{ h}^{1/2} \text{ R} (45,680 \text{ s}^{1/2} \text{ K}) \end{aligned}$$

Ω_1 [식(10)]

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \frac{1.76}{5.08} \times \frac{1,109 \times 1.95 + 0.112 \sqrt{11.5 \times 10^4 \times 280 \times 5.08}}{1,109 \times 1.95 + 0.223 \sqrt{11.5 \times 10^4 \times 280 \times 5.08}} \\ &= 0.248 \end{aligned}$$

Ω_2 [식(11) $V_r = 0.1$]

$$\Omega_2 = 0.9 \times 0.1 = 0.09$$

설계값으로서 정규화된 열하중 [식(9)]

$$\begin{aligned} H'' &= 1,370 \times \exp[1.64 \sqrt{0.248^2 + 0.09^2 + 0.101^2}] \\ &= 2,180 \text{ h}^{1/2} \text{ R} (72,600 \text{ s}^{1/2} \text{ K}) \end{aligned}$$

내화성요구도[식(8)]

$$\tau_a = 0.11 + 5.33 \times 10^{-4} \times 2,180 + 14.44 \times 10^{-8} \times 2,180^2 = 1.96h$$

결 론

2 시간의 내화성을 가진 건물부재를 사용하는 것은 최성기 화재시의 파괴확률이 5% 보다 크지 않을 것을 보장해 줄 것이다. 약간의 앞선 계산법이 세가지의 중요한 설계변수 : 연소가능물량(occupancy의 영향을 받음), 환기(창의 높이에 영향을 받는다)와 허용파괴확률의 관련 중요성을 강조하기 위하여 같은 건물에 대하여 약간의 계산이 수행되었다. 그 결과는 표 3에 요약되어 있다. 과거 내화성요구도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 요인으로 간주되었던 연소가능물질의 총량은 다른 두 요인에 비하여 더 중요하지 않다는 것을 나타내고 있다.

환기가 나쁜(환기지배) 화재는 환기가 잘 되는(연료지배) 화재보다 더욱 파괴적이라고 알려져 있다. 표3에 분석되어져 있는 경우들중 단지 2개만이(별표가 표시되어 있는) 연료지배 화재라는 것을 구별할 수 있다. (참고문헌 2의 공식25를 사용하여) 현대건축물들은 대부분 연료지배화재의 결과와 유사하고, 표에 나타난 내화성요구들은 일반적으로 지난 수십년간 건물에서 기대되었던 것 보다 높다.

표3. 화재하중(occupancy의 영향을 받음), 환기(창의 높이의 영향을 받는다), 그리고 내화성요구도의 허용할 수 있는 파괴확률들의 영향의 예

Occupancy	Window height, ft (m)	Fire resistance requirement h for a failure probability, given flashover, percent (for a failure probability, given ignition, percent)		
		10 (2.1)	5 (1.05)	1 (0.21)
dwelling	4.0 (1.22)	2.32	2.54	2.98
	5.0 (1.52)	1.70	1.84	2.13
	6.0 (1.83)	1.33	1.43	1.65
office	4.0 (1.22)	2.34	2.71	3.57
	5.0 (1.52)	1.71	1.96	2.52
	6.0 (1.83)	1.33	1.51	1.92
hotel	4.0 (1.22)	1.35	1.52	1.89
	5.0 (1.52)*	1.03	1.15	1.41
	6.0 (1.83)**	0.84	0.93	1.12

참 고 문 헌

- Harmathy, T. Z., and Mehaffey, J. R., "The Normalized Heat Load Concept and its Use, Fire Safety Journal, V. 12, No. 1, 1987, pp. 221-237.
- Harmathy, T. Z., "Fire severity: Basis of Fire Safety Design, "Fire Safety of Concrete Structures, sp-80, America Concrete Institute, Detroit., 1983, pp. 115-149
- Mehaffey, J. R., and Harmathy, T. Z., "Assessment of fire Resistance Requirements," Fire Technology, V. 17, No. 4, Nov. 1981, pp. 221-237.
- Petterson, O., :Magnusson, S. E. :and Thor, J., "Fire Engineering of Steel Structures, : Bulletin No. 50, Swedish Institute of Steel Construction, Stockholm, 1976.
- Mehaffey, J. R., and Harmathy, T. Z., "Thermal Response of Compartment Boundaries to Fire," Proceedings, 1st International Symposium on Fire Science. Gaithersburg, 1985, pp. 111-118.
- "Repeatability and Reproducibility of Results of ASTM E 119 Fire Tests, "Research Report No. RR:E5-1003, ASTM, Philadelphia, 1982.
- Cornell, C. Allin, "A Probability-Based Structural Code, "ACI Journal, Proceedings V. 66, No. 12, Dec. 1969, pp. 974-985.
- Zahn, J. J., "Reliability-Based Design Procedures for Wood Structures, "Forest Products Journal, V. 27, No. 3, Mar. 1977. pp. 21-28.
- Harmathy, T. Z., and Mehaffey, J. R., "Design of Buildings for Prescribed Levels of Structural Fire Safety, "Fire Safety : Science and Engineering, STP-882, ASTM, Philadelphia, 1985 pp. 169-175.