

강구조 내화성능의 이론적 평가방법에 관한 조사연구

성 시 창 / 방내화시험실 연구원

ABSTRACT

Prior to do real fire test, theoretical prediction of the fire resistant performance of the structural elements is often less time consuming and less costly to calculate it, than to determine the performance experimentally.

This study is aimed at introduction of the estimating methods of the fire resistant performance of the steel structural elements not by the actual fire tests but by the mathematical models.

1. 서 론

최근 건축물의 대형화 및 고층화 추세에 따라 건축물의 화재안전대책으로서 내화구조 설계기법의 도입은 필수적이라 할 수 있다.

건축물의 내화구조 설계 개념은 건물화재시 내부 온도의 상승에 따라 모든 구조 부재들의 강도 및 강성이 약해지고, 나아가 구조부재의 팽창을 야기하여 건물의 붕괴를 가져온다는 사실을 바탕으로 한다.

통상의 건물화재시 구조부재가 화재에 견딜 수 있는지의 여부는 다음과 같은 요소들에 의해 좌우된다.

- 화재심도
- 부재의 화재 노출시간
- 적용 하중
- 구조 시스템
- 부재의 내화성능

특히, 강구조재로서 철강재는 우수한 소성변형성, 시공성, 설계에서의 유연성 및 내구성 등의 장점으로 인하여 각광을 받고 있으나, 고온에 노출될 경우 항복점과 탄성계수가 현저하게 저하되어 본래의 구

조재로서의 능력을 상실하는 등의 문제점을 갖고 있어, 이에 대한 세심한 배려가 요구된다.

본고에서는 관련문헌을 통하여 화재에 노출되는 강재의 일반적 특성 및 표준화재 실험을 바탕으로 한 기존의 연구자료를 조사하여 구조강재의 내화성능을 예측하는 평가기법에 대한 수학적 모델을 소개하고자 한다.

2. 화재노출시 강재의 강도변화

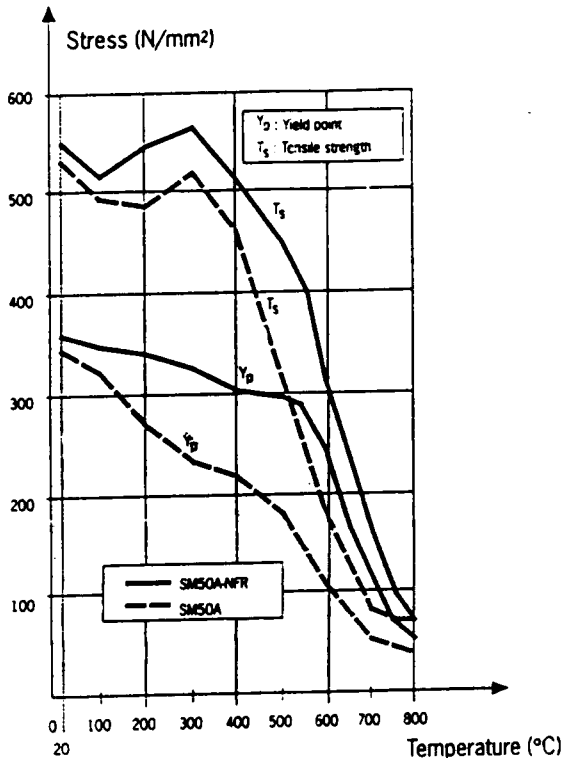
일반적으로 강재는 고열에 노출되어 강재의 표면 온도가 350℃ 이상이 되면 상온 항복강도의 2/3 이하로 저하되어 건축물의 허용능력을 확보하지 못하는 것으로 본다.

따라서 강재의 표면은 내열성이 있는 내화피복재로 보호하여 강재가 급격한 온도상승에 따라 구조기능을 상실하지 않도록 하여야 한다.

이러한 내화피복재의 시공은 건물구조의 경량화 및 넓은 공간의 확보 등의 잇점에도 불구하고 건축시공비를 증가시킴으로써 일반콘크리트 피복 공법과

의 가격 경쟁력에서 불리하게 작용하고 있다.

그러나 최근 일본 등 선진 외국뿐만 아니라 국내에서도 일반강에 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo) 또는 기타의 합금원소를 첨가하여 강재의 금속조직제어에 의한 합금구조강, 일명 FR강(Fire-Resistance)이 개발되고 있는데, 이는 강재온도가 약 550°C에 이르기까지 항복강도의 감소를 최소화하고 600°C에 이르기까지 항복강도를 상온에서의 표준항복 강도의 2/3 이상을 유지토록 함으로써 강재의 표면온도가 600°C 까지 이르더라도 건축물의 구조안전을 확보토록 함으로써 향후 건축경제에 미치는 효과가 클 것으로 기대된다.



[그림 - 1] 일반강(SM50A)과 FR강(SM50A-NFR)의 강도비교 곡선

일반강 및 FR강의 화재 노출시 온도상승에 따른

강재의 강도 변화곡선을 그림-1에 나타내었다.

3. 강구조의 내화성능 예측기법

강구조의 내화성능은 실제 화재시험에 의해 결정하지만 또한 많은 경우 이론적 방법에 의해서도 결정할 수 있다. 그러나 현재까지 이론적 방법에 의하여 내화성능을 예측할 수 있는 부재의 수는 제한적이나마 꾸준히 증가추세에 있다.

부재의 내화성능 예측기법은 실제 화재시험에도 많은 도움을 준다. 즉, 실제 시험에 앞서 부재의 크기, 피복재료의 특성, 가열 및 재하조건 등 구조부재의 내화성능에 영향을 미치는 변수들을 쉽게 수정함으로써 실제 시험의 오차로 인한 많은 비용과 시간을 절약할 수 있다.

본 절에서는 그러한 이론적 방법의 예로서 단면요소법(Section factor)과 분석법(Analytical Methods)에 대해 소개하고자 한다.

가. 단면요소법

강구조는 단면크기, 형상, 내화피복두께, 재하량, 응력분포 및 강재길이 다양하므로 이를 모두 조합하여 실제 화재시험을 모두 실시한다는 것은 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 중요한 방법은 경험적 해석방법을 이용하는 것이다. 이는 실제 표준화재 실험을 통한 시험 자료간의 상관관계에 의한 수학적 모델을 근거로 한다.

강재의 내화성능 예측기법으로서의 단면요소법은 보통 구조부재의 크기 및 형상, 그리고 피복재의 형태 등을 변수로 하고 수식으로는 A_m/V (유럽) 또는 W/D (북미, 오스트레일리아)로 나타내는데, A_m/V 와 W/D 는 서로 역수관계로서, 즉 큰값의 A_m/V 는 작은값의 W/D 에 상당한다.

여기서,

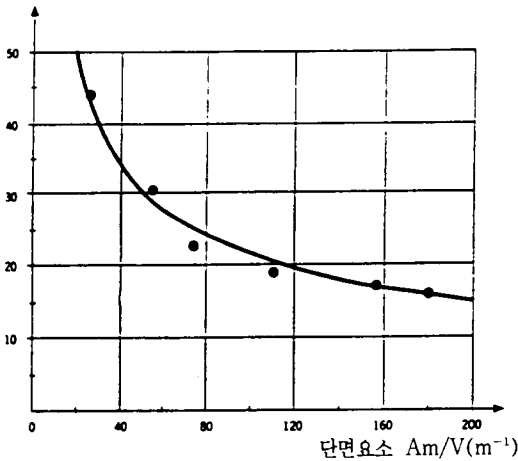
A_m : 강재단위 길이당 화재노출면적(m^2)

V : 강재단위 길이당 체적(m^3)

W : 강재단위 길이당 중량(lb)

D : 강재단위 길이당 가열받는 외부길이(in)

550°C 도달시간(분)



[그림-2] 단면요소 A_m/V 와 강재평균온도 550°C 도달시간과의 상관곡선

강재의 성능을 판정하는 강재허용온도 기준은 각 국마다 다소 차이가 있는데, 예를들면 일본, 한국은 350°C, 스웨덴 450°C, 독일 500°C, 미국 538°C 등

이다.


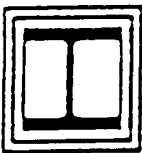
그러나 나철골 기둥에 대한 유럽의 연구자료에서는 설계기준에서 정한 최대하중을 가하여 수차례의 표준화재시험결과 강재의 평균온도가 550°C를 약간 상회하는 시점에서 구조기능을 상실하는 것으로 보고 있다.

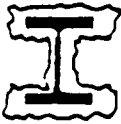
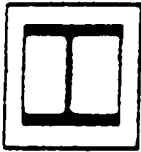
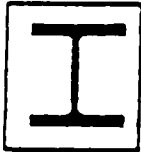


이 시험에 근거하여 H단면을 갖는 나철골 기둥의 단면요소 A_m/V 값의 변화에 따라 강재가 구조기능을 상실한다고 보는 평균온도 550°C에 이르는 데 소요되는 시간을 그림-2와 같이 도출하고 있다.

그림-2에서 A_m/V 값이 $55m^{-1}$ 이하인 기둥은 30분 이상의 내화성능을 갖는 것으로 나타난다. 즉, A_m/V 값이 크면 강재단면의 온도상승율이 높아지는 반면 A_m/V 의 값이 작으면 온도상승율이 낮아진다.

한편 미국에서는 수차례의 시험을 통하여 강재의 내화공법에 따라 내화성능(T)은 피복두께(h), 가열 받는 강재의 외부길이(D) 및 강재의 단위중량(W) 등과 상관관계가 있음을 규명하고 이를 발전시켜 표-1과 같은 수학적 모델을 제시하고 있다.

[표-1] 내화피복공법별 내화성능예측의 수학적 모델

Member/Protect.	Mathematical Expressions	Symbols
 Column/Unprotected	$R = 10.3(W/D)^{0.7}$, for $W/D < 10$ $R = 8.3(W/D)^{0.8}$, for $W/D \geq 10$ (for critical temperature of 1000 °F)	R = fire endurance time(min) W = weight of steel section per linear foot (lb/ft) D = heated perimeter(in)
 Column/Gypsum wallboard	$R = 130 \left[\frac{hW_1}{2D} \right]^{0.75}$ where $W_1 = W + \left[\frac{50hD}{144} \right]$	h = thickness of protection(in) W_1 = weight of steel section and gypsum wall board (lb/ft)

Member/Protect.	Mathematical Expressions	Symbols
 <p>Column/Spray-applied materials</p>	$R = [C_1(W/D) + C_2]h$ cementitious material : $C_1=69, C_2=31$ Mineral fiber material : $C_1=63, C_2=42$	C_1 & C_2 = material constants for specific protection
 <p>Column/Concrete cover</p>	$R = R_c [1 + 0.03m]$ where : $R_c = 10(W/D)^{0.7} + 17 \left(\frac{h^{1.6}}{k_c \rho_c} \right)$ $\left[1 + 26 \left(\frac{H}{\rho_c c_c h(L+h)} \right)^{0.8} \right] D = 2(b+d)$	R_c = fire endurance at zero moisture content of concrete (min) m = equilibrium moisture content of concrete (% by volume) b = depth of section (in) K_c = thermal conductivity of concrete at ambient temp. (Btu/hr · ft °F) ρ_c = concrete density (lb/ft ³)
 <p>Column/Concrete-encased</p>	For concrete-encased columns use : $H = 11W + \frac{\rho_c c_c}{144} (b_1 d \cdot A_s)$ $D = 2(b_1 + d)$ $L = (b_1 + d)/2$	H = thermal capacity of steel section at ambient temp. (= 0.11W Btu/ft °F) C_c = specific heat of concrete at ambient temp. (Btu/lb °F) L = inside dimension of one side of square concrete box protection (in) A_s = cross-sectional area of steel column (in ²)
 <p>water filling of columns</p>	$V_w = 2.73 \times A \times g \times 10^6$ $g = 3250$ for 3/4 hour rating $= 4825$ for 1 hour rating $= 12865$ for 2 hour rating $= 22990$ for 3 hour rating	V_w = storage water required for a specified fire rating (m ³) g = heat transferred to column per unit area (kW/m ²) A = surface area of column (m ²)
 <p>Beam/Spray-applied material</p>	$h_1 = \left[\frac{W_2/D_2 + 0.6}{W_1/D_1 + 0.6} \right] h_2$	h_1 : predicted fire resistance (min) h_2 = tested fire resistance (min) W_1, W_2 = weight of steel section (lb/ft) D_1, D_2 = heated perimeter of steel section (in)

나. 분석법

강구조의 내화성능을 예측하는 기법의 하나로서 분석법은 다른 방법에 비하여 정확도가 낮으나, 고성능 컴퓨터처리 또는 특별한 시험장치등이 요구되지 않는다.

분석법은 다음의 열전달방정식 및 기타의 변수를 근거로하여 부재의 내화성능을 예측하는 방법이다. 내화피복된 강재의 내화성능을 예측하기 위하여 분석법에서 적용하는 열전달 방정식은

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \text{ 로 표시한다.}$$

T: 강재온도

T₀: 초기 강재온도

T_m: 평균 화재온도

가열시간의 변화에 따른 Θ 의 함수로서의 구조부재의 온도(T)는 표-2와 같이 정한다.

[표-2] 가열시간 구조부재의 온도

가열시간(시간)	부재온도 T(°C)
1/4	T = 428 Θ + 20
1/2	T = 592 Θ + 20
3/4	T = 673 Θ + 20
1	T = 726 Θ + 20
1 1/2	T = 797 Θ + 20
2	T = 845 Θ + 20
3	T = 911 Θ + 20
4	T = 968 Θ + 20
5	T = 991 Θ + 20
6	T = 1020 Θ + 20

또한 부재의 온도 결정에 이용되는 변수들은 다음과 같이 정한다.

$$N = \rho l / (C_s M/A), \quad \tau = at / l^2$$

ρ : 피복재의 밀도

C: 피복재의 비열

l : 피복두께

C_s: 강재의 비열

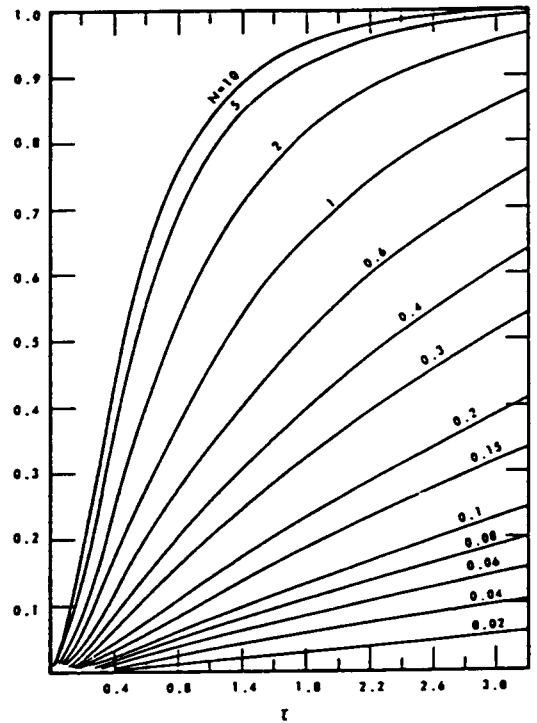
M: 단위 길이당 강재의 중량

A: 단위 길이당 피복재와 강재간 경계에서의 피복재 면적

a: 피복재의 열확산($a = \frac{k}{\rho c}$, k: 열전도율)

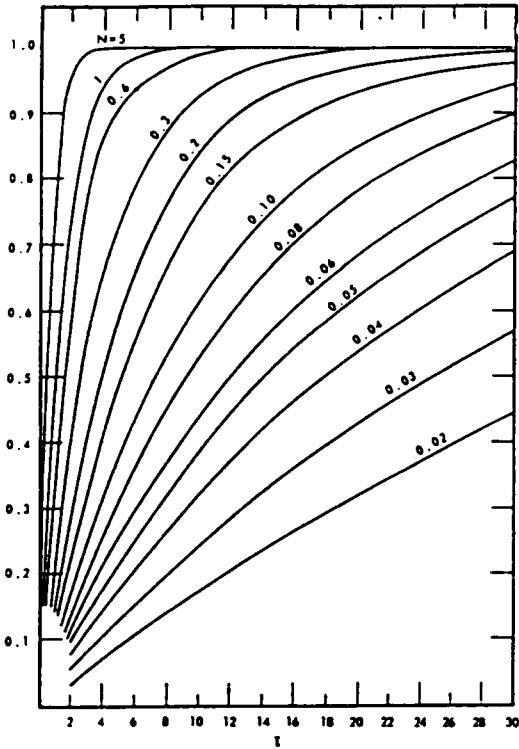
t: 가열시간

Θ 와 N, τ 의 상관관계는 그림-3 및 그림-4와 같이 나타낸다.



[그림-3] 변수 상관관계 곡선(τ 의 값이 작을 경우)

상기에서 살펴본 열전달 방정식 및 변수들을 적용하여 석면 뿔칠 시공한 강재기둥의 내화성능을 예측하기로 한다.



(그림-4) 변수 상관관계 곡선(τ 의 값이 클 경우)

주어진 조건은 다음과 같다고 가정한다.

M: 150kg/m

A: 1.5m²/m

ℓ : 0.02m

To: 20°C

a: 1.4×10^{-3} m²/h

ρ : 200kg/m³

C: 0.25Kcal/kg °C

Cs: 0.1Kcal/kg °C

t: 변수

구조부재의 내화성능을 산정하기 위하여 먼저 N, τ 값을 계산한다.

$$N = \frac{\rho \ell}{C_s M/A} = \frac{200 \times 0.25 \times 0.02}{0.1 \times 150/1.5} = 0.1$$

$$\tau = \frac{at}{\ell^2} = \frac{1.4 \times 10^{-3} \times t}{(0.02)^2} = 3.5t$$

가열시간(t)를 1시간으로 하면 변수 N과 τ 는 각각 N=0.1, $\tau=3.5$ 이고, 그림-4에서 N=0.1, $\tau=3.5$ 의 값을 적용하여 얻은 \odot 값은 0.28이다.

표-2에서 가열시간이 1시간일 경우 적용하는 온도 산정식은

$T = 726\odot + 20$ 이고 여기에 \odot 의 값을 대입하면 예측되는 강제온도(T)=273°C의 값이 된다.

동일한 방법으로 계산하여 1.5시간 가열시의 $T=331$ °C, 2시간 가열시의 $T=430$ °C의 값을 얻을 수 있다.

4. 맺음말

본고에서는 기존의 연구자료 및 문헌을 통하여 강구조 부재에 대하여 실제화재시험에 의한 내화성능 평가에 앞서 그 내화성능을 예측하는 평가기법 중 단면요소법 및 분석법을 소개 하였다.

이러한 방법은 비교적 간단한 방법으로 여러 변수로서 부재의 내화성능 예측을 가능하게 하고 부재의 내화성능과 변수들간의 상관관계를 어느정도 규명할 수 있게 한다. 또한 실제 시험에 의한 많은 비용 및 시간을 절약하여 줌으로써 건축경제상 효과를 얻을 수 있다.

따라서 향후 보다 신뢰성 있는 내화성능 평가 기법의 적용 및 그 기법의 개발에 관한 관심이 요구된다. (FII)

참고문헌

- 1) T.T.LIE, "Fire and Buildings"
- 2) "Fire Engineering Design for Steel Structure", International Iron and Steel Institute
- 3) Fire Technology, February, 1988