

내화보드피복 철골기둥의 내화성능 예측 연구

성시창 || 건축구조부 책임연구원

1. 서론

건축물 화재시 화염에 노출된 구조 강재가 고온에서 견딜 수 있도록 하기 위해서는 강재의 구조 내력이 급속히 상실되지 않도록 사전 조치하는 것이 반드시 필요하다. 그러한 방법의 하나는 강재의 외피를 내화재료로 피복하는 것이며, 내화재료의 물성 및 피복두께 등에 따라 강재의 내화성능이 달라질 수 있다.

그러나, 내화재료가 강재에 요구되는 내화성능을 충분히 만족시키는 지를 파악하기 위해 필요한 모든 시험을 실시하는 것은 상당한 비용과 시간이 요구되므로 사실상 실현하기가 쉽지 않다. 이에 따라 미국이나 유럽 등 선진 외국에서는 기존의 표본 시험결과를 바탕으로 내화재료의 물성 및 피복두께와 내화성능 간의 상관 관계를 규명하고 강재의 내화성능을 예측하는 기법을 꾸준히 연구하여 적용하고 있다.

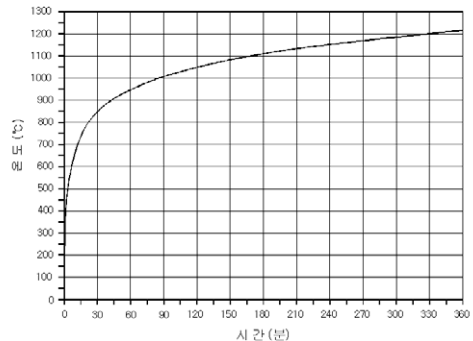
본 고에서는 미국과 유럽 등 선진 외국에서 활용하고 있는 강재의 내화성능 예측 기법을 통하여 강구조 부재 중 내화보드피복 철골기둥의 내화성능을 예측하고, 실험 크기로 제작하여 실험실의 가열로에서 화재시험을 실시한 내화보드피복 철골기둥과 내화성능을 상호 비교하는 것으로 하였다.

2. 강구조 부재의 내화성능 평가

강구조 부재의 내화성능을 평가하기 위해서는

실제 크기의 구조부재를 가열로에 설치한 후 [그림 1]의 표준화재시간-온도곡선에 따라 가열하여 그 성능을 평가하는 실제 화재시험 이외에도 다음과 같은 방법을 활용할 수 있다.

- 1) 실험적 상관관계
- 2) 열전달 분석
- 3) 구조분석



[그림 1] 표준화재시간 - 온도 곡선

실험적 상관관계는 수많은 표준시험을 실시하여 얻은 분석자료를 바탕으로 하며, 반면 표준시험에서 제시되는 화재노출, 하중, 그리고 경간을 고려할 경우에만 적용할 수 있다는 한계를 갖고 있다. 적용 조건이 다를 경우에는 이 방법을 적용할 수 없다.

열전달 분석은 구조부재가 정해진 임계온도에 도달하는데 필요한 시간을 구하거나 구조분석에 필요한 입력 정보를 제공하는 것이다. 한편, 구조분석은 구조공학용으로 수행되는 계산방식과 유사

하지만, 고온에서 특성을 평가한다는 점과 열팽창을 고려한다는 점에서 차이가 있다. 구조분석에서는 하중과 온도의 종료점을 알고 있어야 하며, 그렇지 않을 경우 해당 수치를 가정해야 한다.

3. 강구조 부재의 내화성능 예측 기법

강구조 부재의 내화성능은 앞에서 언급한 바와 같이 실제 화재시험에 의해 결정하지만 또한 많은 경우 이론적 방법에 의해서도 결정할 수 있다. 그러나 현재까지 이론적 방법에 의하여 내화성능을 예측할 수 있는 부재의 수는 제한적이거나 무조건 증가추세에 있다.




강구조 부재의 내화성능 예측기법은 실제 시험에 앞서 부재의 크기, 피복재료의 특성, 가열 및 재

하조건 등 구조부재의 내화성능에 영향을 미치는 변수들을 쉽게 수정함으로써 실제 시험의 오차로 인한 많은 비용과 시간을 절약할 수 있다. 이러한 예측기법으로서 미국의 AISI(American Iron & Steel Institute)와 유럽의 ECCS(European Convention for Constructional Steelwork)의 평가기법을 간략히 소개하고자 한다.

3.1 AISI의 평가기법

AISI는 수차례의 시험을 통하여 강구조의 내화성능(T)은 피복두께(h), 가열받는 강재의 주변길이와 강재의 단위중량비(W/D) 등과 상관관계가 있음을 규명하였으며, 이를 수식으로 표시하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 강구조의 내화성능 예측 수학적 모델

구조/피복형태	수학적 모델	기호
기둥/무피복	$R = 10.3(W/D)^{0.7}$ $W/D < 10$ 인 경우 $R = 10.3(W/D)^{0.8}$ $W/D \geq 10$ 인 경우 (임계온도 538°C)	R = 내화시간 (분) W = 단위길이당 강재 단면 중량 (lb/ft) D = 가열된 주변길이 (in)
 기둥/석고보드피복	$R = 130 \left[\frac{hW'}{D} \right]^{0.75}$ 여기서 $W' = W + \left[\frac{50hD}{144} \right]$	h = 피복두께 (in) W' = 강재 단면과 석고보드의 중량 (lb/ft)
 기둥/뿔칠피복	$R = [C_1(W/D) + C_2] h$ 시멘트계 : $C_1=69, C_2=31$ 광섬유계 : $C_1=63, C_2=42$	C_1 & C_2 = 재료 상수
 T-보/뿔칠피복	$h_1 = \left[\frac{W_2/D_2 + 0.6}{W_1/D_1 + 0.6} \right] h_2$	h_1 = 예측 내화성능 (분) h_2 = 시험 내화성능 (분) W_1, W_2 = 강재 단면 중량 (lb/ft) D_1, D_2 = 강재 단면의 가열 주변 길이 (in)

3.2 ECCS(European Convention for Con-
structional Steelwork)의 평가기법

ECCS의 평가기법은 피복재의 두께, 열적 특성 및 강재의 단면적, 강재의 주변길이를 고려한 것으로서, 피복재의 온도를 상승시키는 열량이 적어서 이를 무시할 수 있는 경우로서 광섬유와 같은 뿔철 재료를 사용하는 경량피복 (lightweight)의 경우와, 피복재를 통하여 흡수되는 열량이 많아 이를 반드시 고려해야 하는 경우로서 석고보드, 콘크리트, 조적조와 같은 재료를 사용하는 중량피복 (heavyweight)의 경우의 2가지로 상정한다.

3.2.1 Lightweight 피복의 성능 예측 기법

화재시 강재의 온도 상승률은 강재의 중량 및 열이 피복재를 통해 전달되는 비율에 의하며, 강재가 흡수한 열과 피복재를 통해 전달된 열 사이에는 열적 평형상태가 존재하게 된다. 강재 단면에서 흡수된 열량(q)은 다음과 같이 표시된다.

$$q = C_s M_s \Delta T_s = C_s \rho_s A_s \Delta T_s \dots\dots\dots ①$$

여기서, C_s = 강재의 비열(J/kg °C)

$M_s = \rho_s A_s$ = 단위길이당 강재의 중량(kg/m)

ΔT_s = 시간 변화에 따른 강재의 온도 변화

ρ_s = 강재의 밀도(kg/m³)

A_s = 강재의 단면적(m²)

피복재의 열용량이 커서 무시할 수 있는 경우 시간의 변화 Δt 동안 피복재를 통해 전달될 수 있는 열량은 다음과 같이 표시된다.

$$q = [(1/\alpha) + (d_i/k_i)]^{-1} P_i (T_r - T_s) \Delta t \dots\dots\dots ②$$

여기서, α = 열전달 계수(w/m²°C)

d_i = 피복두께(m)

k_i = 피복재의 열전도율(w/m°C)

P_i = 피복재의 내부 주변길이(m)

T_r = 화재온도(°C)

T_s = 강재온도(°C)

수식 ①과 ②를 ΔT_s 에 대하여 정리하면

$$\Delta T_s = \{P_i [(1/\alpha) + (d_i/k_i)]^{-1} (C_s \rho_s A_s)\}^{-1} (T_r - T_s) \Delta t \dots\dots\dots ③$$

위 식에서 $1/\alpha$ 의 값은 화재온도에서 d_i/k_i 보다도 훨씬 작으므로 무시할 수 있으므로 ③을 다시 정리하면

$$\Delta T_s = (k_i/d_i) (P_i/A_s) (C_s \rho_s A_s)^{-1} (T_r - T_s) \Delta t \dots\dots\dots ④$$

ECCS에서 규정하는 바에 따르면 위의 식 ④는 강재 단면의 열용량이 그 강재를 보호하는 피복재의 열용량의 2배를 넘는 경우에 적합한 것으로 보고 있는데 이를 수식으로 표현하면 ⑤와 같으며 이 조건이 성립되는 피복상태를 'Lightweight' 피복으로 분류한다.

$$C_s (\rho_s A_s) > 2 C_i (\rho_i d_i) \dots\dots\dots ⑤$$

여기서, C_i = 피복재의 비열(J/kg°C)

ρ_i = 피복재의 밀도(kg/m³)

3.2.2. Heavyweight 피복의 성능 예측 기법

피복재가 석고보드, 조적조, 콘크리트와 같은 재료인 경우 앞에서 제시한 수식 ⑤가 성립하지 않는데 즉, 피복재 열용량의 2배가 강재 단면의 열용량보다 크게 되는 경우로서 이러한 조건이 성립되는 피복상태를 'Heavyweight' 피복으로 분류한다. 이 경우 ECCS에서 상정한 강재의 온도변화 ΔT_s 는 ⑥과 같다.

$$\Delta T_s = \{[(k_i P_i)/(d_i A_s C_s \rho_s)] / \{C_s \rho_s [(C_s \rho_s) + (C_i \rho_i d_i)/(2A_s)]\} (T_r - T_s) \Delta t \dots\dots\dots ⑥$$

4. 내화보드피복 철골기둥의 내화성능 비교 평가

내화성능 예측 기법에 의한 강구조 부재의 내화성능을 파악하기 위하여 국내 생산 판재인 내화석

고보드를 건식 붙임공법에 따라 철골기둥에 피복한 내화보드피복 철골기둥에 대하여 앞에서 살펴본 강구조 부재의 내화성능 예측 기법에 따라 내화성능을 예측하고, 이를 국제규모의 표준 가열로에서 표준화재시간-온도곡선에 따라 비재하 가열시험을 실시하여 얻은 내화성능 시험자료와 비교하였다.

4.1. 시험체 선정 및 구조 사양

시험체는 강재(H-형강)에 석고보드를 붙임공법에 따라 피복하는 것으로 하였으며, 강재의 크기는 300mm × 300mm × 10mm × 15mm(단위중량 : 94 kg/m)이고 석고보드는 국내에서 생산되는 두께 15mm의 방화석고보드 2겹(바탕석고보드 1겹 및 마감석고보드 1겹)을 사용하는 것으로 하였다. 바탕석고보드와 마감석고보드는 나사못을 사용하여 결합하였다.

시험체에 사용되는 강재 및 방화석고보드의 물성은 제조자의 제조 사양 및 ECCS 기술위원회에서 제시하는 물성을 참조하였으며, 이에 따라 강재의 밀도는 7,850 kg/m³, 비열은 520 J/kg°C로 하였다. 또한, 방화석고보드의 밀도, 열전도율 및 비

열은 각각 850 kg/m³, 0.18w/m°C, 1,700 J/kg°C로 하였다.

시험체의 구조 단면은 [그림 2]와 같으며, 가열로에 설치되어 가열되는 기둥의 유효가열 길이는 3m로 하였다.

4.2. 내화성능 예측 기법에 의한 내화성능

4.2.1. AISI의 평가 기법에 의한 내화성능 예측
내화성능(R)은 <표 1>에 제시한 바와 같이

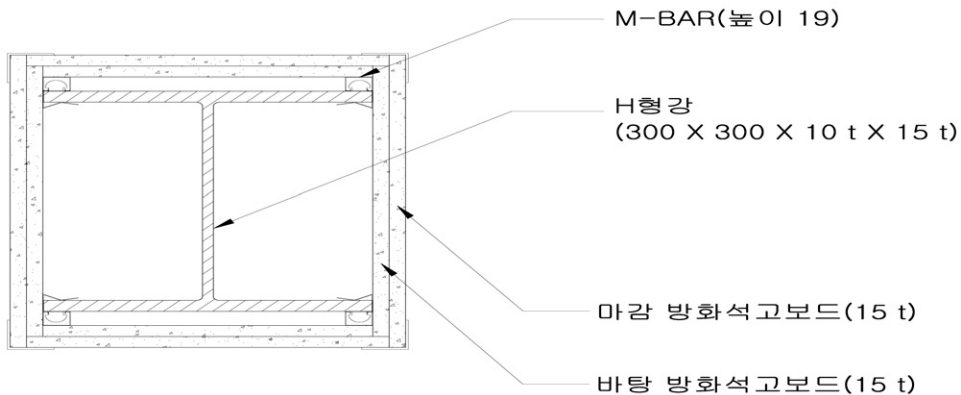
$$R = 130 \left[\frac{hW^1/D}{2} \right]^{0.75}, W^1 = W + \left[\frac{50hD}{144} \right]$$

h 는 피복두께 (in), D 는 기둥 단면의 주변길이(in), W^1 는 강재 단면과 석고보드의 중량(Ib/ft)이므로 각각의 수치를 적용하여 계산하면, 시험체의 내화성능(R)은

$$R = 130 \times \left[\frac{1.18 \times 82 / 47.2}{2} \right]^{0.75} = 133(\text{분}) \text{으로 예측된다.}$$

4.2.2. ECCN의 평가 기법에 의한 내화성능 예측
위의 시험체 사양에서 강재의 $A_s = 0.012 \text{ m}^2$, $P_i = 1,238 \text{ m}$ 이며, 강재단면의 열용량($A_s C_{sps}$)은 $520 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 7,850 \text{ kg/m}^3 \times 0,012 \text{ m}^2 = 48,984 \text{ J/m}^\circ\text{C}$,

(단위: mm)



[그림 2] 선정된 기둥 시험체의 구조 단면

〈표 3〉 시험체의 온도상승 예측 계산 결과

시간 (분)	Tf (°C)	Tf -Ts(°C)	ΔTs (°C)	Ts(°C)
0	20			20
5	576	556	33	
10	679			53
15	738	685	40	
20	781			93
25	814	721	42	
30	841			135
35	864	729	43	
40	884			178
45	902	724	43	
50	918			221
55	932	711	42	
60	945			263
65	957	694	41	
70	968			304
75	978	674	40	
80	988			344
85	997	653	38	
90	1005			382
95	1014	632	37	
100	1021			419
105	1029	610	36	
110	1036			455
115	1042	587	35	
120	1049			490
125	1055	565	33	
130	1061			523
135	1067	544	32	
140	1072			555

피복재인 방화석고보드의 열용량의 2배(2C_i피복재)를 계산하면
 $2 \times 1,700 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 850 \text{ kg/m}^3 \times 0.03 \text{ m} \times 1.238$
 $m = 107,335 \text{ J/m}^\circ\text{C}$ 로서, 피복재의 열용량의 2배 값(=107,335 J/m²°C)이 강재단면의 열용량 (=48,984 J/m²°C)보다 크므로 'Heavyweight' 피

복으로 분류한다.

Δt를 10분(=600초)로 하고 ⑥식에 따라 ΔT_s를 구하면

$$\Delta T_s = [(k_i - P_i)/(d_i - A_s C_{sps})] \{ (C_{sps}) [(C_{sps}) + (C_{pi} d_i P_i)/(2A_s)]^{-1} (T_f - T_s) \Delta t$$

$$= [(0.18 \times 1.238)/(0.03 \times 248,984)] \{ (520$$

$$\begin{aligned} & \times 7,850)[(520 \times 7,850) + (1,700 \times 850 \\ & \times 0.03 \times 1,238) / (2 \times 0.012)]^{-1} (T_f - T_s) \\ & \times 600 \\ = & 0.000152 \times 4,080,200 \times (4.080,200 \\ & + 2,236,125)^{-1} (T_f - T_s) \times 600 \\ = & 0.0589 (T_f - T_s) \end{aligned}$$

T_s 는 시간의 변화에 따른 화재온도로서, KS F 2257-1(건축부재의 내화시험방법)의 표준화재온도에 의한 시험체의 온도상승 예측 결과는 <표 3>과 같다.

건축부재의 내화시험 규격인 KS F 2257-1 및 기둥부재의 내화시험 규격인 KS F 2257-7에서 규정한 비재하 기둥부재의 평균 허용온도 기준은 53 °C로서, <표 3>의 강재온도(T_s)를 평균온도로 가정하면 시험체의 내화성능은 130분 ~ 135분으로 예측되며, 2시간 내화성능에서의 시험체의 강재 온도는 약 490 °C에 달하는 것으로 나타났다.

4.3. 실제 화재시험에 의한 내화성능

앞에서 설명한 내화보드피복 철골기둥 시험체는 국제규격에 의한 표준 크기로서, 기둥용 가열로에 설치한 후 2시간 동안 비재하 가열시험을 실시하였다.

기둥의 내화시험 규격인 KS F 2257-7에서 규정하는 강재의 온도 측정방법은 기둥의 유효 가열

길이를 5등분하고 등분된 4개 단면에서 온도를 측정하되, 각 단면마다 3개소씩 모두 12개소에서 강재온도를 측정토록 하고 있다. 강재온도의 허용기준은 각 단면별로 평균 538 °C를 초과하지 않도록 하고 측정된 어느 부위에서도 최고 649 °C를 넘지 않아야 한다.

크기가 300mm×300mm×10mm×15mm인 H-형강에 국내에서 생산되는 두께 15mm의 방화석고보드 2겹을 피복한 내화보드피복 철골기둥에 대하여 2시간 비재하 가열시험을 실시하여 측정된 강재의 평균온도는 <표 4>와 같다.

각 단면에서 측정된 강재온도를 평균한 결과, 120분 경과시 강재 평균온도는 450 °C로 나타났고, 매 15분 경과시 평균 강재온도 상승값은 약 90 °C로서 130분 경과시에는 강재 평균온도가 540 °C에 근접할 것으로 예상되어 시험체의 내화성능은 약 130분에 달할 것으로 예상된다.

5. 결 론

이 연구는 국내 생산 판재인 방화석고보드를 철골기둥에 피복한 내화보드피복 철골기둥에 대하여 선진 외국에서 개발된 강구조 부재의 내화성능 예측 기법에 따라 내화성능을 예측하고, 이를 국제규모의 표준 가열로에서 신탈 화재시험을 실시하여

<표 4> 시험체 강재 평균온도 측정결과

시간(분)	단면 1	단면 2	단면 3	단면 4	평균
15	23	19	17	15	19
30	76	65	57	53	63
45	107	105	104	102	105
60	116	114	110	109	112
75	179	175	164	159	169
90	295	294	264	242	274
105	395	394	348	316	363
120	501	479	428	391	450



얻은 내화성능 시험자료와 비교하고자 한 것으로서, 연구결과는 다음과 같다.

가. 내화보드피복 철골기둥 시험체에 대하여 선진 외국에서 개발된 강구조 부재의 내화성능 예측 기법 중 미국의 AISI 평가 기법 및 유럽의 ECCS의 평가 기법을 적용하여 내화성능을 예측한 결과, 내화성능은 각각 133분 및 130분~135분에 달하는 것으로 예측되어 유사한 결과를 보였다.

나. 내화보드피복 철골기둥에 대해 2시간 비재하 가열시험을 실시하여 강재온도를 측정하고, 측정된 강재온도를 토대로 강재의 평균 허용온도 상승을 유추한 결과, 130분 경과시 강재 평균온도가 허용 평균온도를 초과할 것으로 예상되어, 강구조 부재의 내화성능 예측 기법에 따른 시험체의 내화성능은 실제 화재시험에 의한 시험체의 내화성능과 유사한 것으로 나타났다.

다. ECCS의 평가기법에 따라 시험체의 강재온도를 예측한 결과, 2시간 내화성능시 예측되는 강재온도는 약 490 °C로서, 이는 실제 화재시험에 의한 강재온도의 평균치인 450 °C와는 약 40 °C정도의 차이가 있으나 시험체의 평균 허용온도 기준인 538 °C를 초과하지 않음으로서 시험체가 최소 2시간의 내화성능을 갖는 것으로 나타났다.

라. 이 연구는 제한된 수량의 시험체를 대상으로 한 것이므로 연구결과는 한계성이 있다. 또한 강구조 부재의 내화성능 예측은 부재의 내화성능에 영향을 미칠 수 있는 제 요소들(재료 물성의 균질성, 시공의 전문성, 피복재의 이음부 등)을 충분히 반영하기 어려우므로 이를 고려하는 것이 필요하다. **FILK**

[참고문헌]

1. NFPA, SFPE Handbook of Fire protection engineering, 2002
2. ICC, International Building Code, 2003
3. John A. Purkiss, Fire safety engineering design of structures, Butterworth-Heinemann, 1996
4. Willan L. Gamble, Predicting protected steel member fire endurance using spreadsheet programs, Fire Technology, August, 1989
5. Andrew H. Buchanan, Structural design for fire safety, John Wiley and Sons, Ltd, 2001
6. Pravin D. Gandhi, Correlations of steel column fire test data, Fire Technology, February, 1988
7. I. Cabrita Neves, The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation, Fire safety journal, 1995