

내화피복 강재의 내화성능 평가 예측에 관한 연구

성 시 창
(방내화연구실 연구원)

1. 머리말

최근 건축물의 고층화와 대형화 추세에 따라 이들 건축물의 주요 구조부인 보 및 기둥은 강재의 사용이 필연적이라 할 수 있다. 그러나 비록 강구조가 다른 어떤 재료보다도 뛰어난 내구성을 가지며 상당한 기간 건축물을 지탱하는 구조로서의 역할을 다하더라도 일단 화재에 노출되면 그 강도가 급격히 감소하는 것이 가장 큰 단점의 하나로 지적되고 있다.

일반적으로 강재는 열에 노출되면 강재의 표면온도가 300℃ 정도까지 상승하더라도 그 강도는 오히려 약 25% 정도 증가하나, 표면온도가 그 이상 상승하게 되면 강도는 저하되어 약 400℃에서는 상온에서의 강도와 같아지게 되며, 500℃ 정도에서는 상온에서의 최대허용 압축강도에 이르는 것으로 알려져 있다. 즉, 강재의 표면온도가 약 500℃를 넘지 않는다면 강재의 인장강도나 압축강도에 심각한 영향을 미치지 않는다. 500℃ 이상이 되어 약 800℃에 이르면 그 강도를 거의 상실하게 되어 강구조 본래의 골격 기능을 발휘할 수 없게 되며, 경우에 따라서는 부재가 파괴되는 현상에 까지 이르게 된다.

따라서 강구조의 시공시 비록 그러한 구조부재가 불길에 노출되더라도 충분한 내화력이 있는 외피구조로서 급격한 강도 저하가 일어나지 않도록 보호하는 것이 절대적으로 필요하다.

이러한 강구조의 내화공법을 위한 외피구조로는 첫째, 기존의 콘크리트 등의 재료를 사용한 피복공법 외에 광섬유, 퍼얼라이트, 질석 등을 그밖의 재료들과 혼합하여 스프레이 시공하는 습식(반습식 포함)공법
둘째, 내화성이 있는 석고보드 등 판형 피복재를 사용하는 건식공법

셋째, 발포성이 있는 도료를 도포한 후 열에 노출시 발포막을 형성하여 강재에 직접 불길이 도달하는 것을 차단하는 Mastic Costing 공법 등으로 크게 나누어 진다.

본고에서는 앞에서 언급한 내화피복 공법중 습식공법 또는 건식공법을 적용하는 강재부재에 대하여 실제 시험을 실시하기에 앞서 강재부재 및 피복재료의 화학적, 물리적 특성을 토대로 내화 성능을 예측하는 평가 기법에 관하여 관련 문헌 및 기존의 연구 자료를 토대로 살펴보고자 한다.

2. 내화 성능 예측 평가 기법의 소개

강재가 화재에 노출시 불에 견딜 수 있는 구조가 되도록 하기 위하여는 그 외피구조를 내화성능이 있는 재료로 피복하는 것이 필요한 앞에서 언급하였거니와, 이러한 재료가 갖는 각각의 물성, 피복 두께 등에 따라 강재의 내화성능이 달라진다.

또한 피복재가 강재에 요구되는 내화성능을 충분히 만족시키는가를 파악하기 위하여 필요한 모든 시험을 실시하는 것은 상당한 비용 및 시간이 요구된다.

본고에서는 미국(AISI)과 유럽(ECCS)에서 각기 기존의 표본 시험 결과를 토대로 한 내화 피복재의 물성 및 피복 두께와 내화 시간과의 상관관계를 규명하여 강재구조의 내화성능을 예측하는 기법을 살펴보고자 한다.

가. AISI(American Iron & steel Institute)의 내화성능 예측 평가 기법

AISI는 수차례의 시험을 통하여 강재의 내화성(T)는 피복두께(h)가 가열받는 강재의 외주길이와 강재의 단위 중량비(w/g) 등과 상관관계가 있음을 규명하였으며 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$T = h \left[a \left(\frac{W}{D} \right) + b \right] \text{----- ①}$$

여기서

T = 내화시간(분)

W = 강재의 단위중량(lb/ft)

D = 가열받는 강재의 외주길이(inch)

a, b = 실험적으로 도출한 피복재의 상수

① 식을 SI단위로 바꾸어 쓰면 다음과 같이 변환된다.

$$T = h \left[0.672a \left(\frac{W}{D} \right) + 0.039b \right] \text{----- ②}$$

여기서

T = 내화시간(분)

W = 강재의 단위중량(kg/m)

D = 가열받는 강재의 외주길이(mm)

h = 피복두께(mm)

a, b = 상수

피복재가 광섬유, 질석, 퍼얼라이트 등으로서 밀도(r)의 범위가 32~80kg/m³인 경우 상수 a, b값은 다음과 같이 적용된다.

$$a = 1,200/r$$

$$b = 30$$

피복재가 시멘트 페이스트 또는 석고를 포함하고 밀도(r)의 범위는 상기와 같을 경우 상수 a, b값은 다음과 같이 적용한다.

$$a = 1,200/r$$

$$b = 72$$

나. ECCS(European Convention For Constructional Steelwork)의 평가 기법

ECCS의 평가 기법은 피복재의 두께, 열적 특성 및 강재의 단면적, 강재의 외주길이를 고려한 것으로서 다음과 같이 서로 다른 두가지의 경우를 상정하고 있다.

첫째, 피복재의 온도를 상승시키는 열량이 적어서 이를 무시할 수 있는 경우로서, 뿔칠 시공하는 광섬유와 같은 재료를 사용하는 light weight 피복의 경우

둘째, 피복재를 통하여 흡수되는 열량이 많아 이를 반드시 고려하여야 하는 경우로서 석고 플라스틱, 콘크리트, 조적조와 같은 재료를 사용하는 Heavy weight 피복재의 경우

다. Light weight 피복의 성능예측 평가 기법

화재시 강재의 온도 상승률은 강재의 중량 및 열이 피복재를 통하여 전달되는 비율에 의하여 강재가 흡수한 열과 피복재를 통하여 전달된 열 사이에는 열적 평형상태가 존재하게 된다. 강재 단면에서 흡수된 열량(g)은 다음과 같이 표시한다.

$$g = C_s M_s \Delta T_s \\ = C_s \rho_s A_s \Delta T_s \text{----- ③}$$

여기서

C_s = 강재의 비열(J/kg℃)

M_s = ρ_sA_s = 단위 길이당 강재의 중량(kg/m)

ΔT_s = 시간의 변화에 따른 강재의 온도 변화(kg/m)

ρ_s = 강재의 밀도(kg³/m)

A_s = 강재의 단면적(m²)

피복재의 열용량이 적어서 무시할 수 있는 경우, 시간의 변화 Δt 동안 피복재를 통하여 전달될 수 있는 열량은 다음과 같이 표시된다.

$$g = \left[(1/\alpha) + (d_i/k_i) \right]^{-1} \pi i (T_f - T_s) \Delta t \text{----- ④}$$

여기서

α = 열전달 계수(w/m²℃)

d_i = 피복두께(m)

k_i = 피복재의 열전도율(w/m℃)

πi = 피복재의 안쪽 외주길이(m)

T_f = 화재온도(℃)

T_s = 강재온도(℃)

수식 ③과 ④를 ΔT_s에 대하여 정리하면

$$\Delta T_s = \left\{ \pi i \left[(1/\alpha) + (d_i/k_i) \right]^{-1} \right\} (C_s \rho_s A_s)^{-1} (T_f - T_s) \Delta t \text{----- ⑤}$$

위 식에서 1/α의 값은 화재온도에서 d_i/k_i 보다도 훨씬 작으므로 무시할 수 있다. 1/α의 값을 무시하고 ⑤식을 다시 정리하면

$$\Delta T_s = (k_i/d_i) (\pi i/A_s) (C_s \rho_s)^{-1} (T_f - T_s) \Delta t \text{----- ⑥}$$

ECCS에서 규정하는 바에 따르면 위의 식 ⑥은 강재 단면의 열용량이 그 강재를 보호하는 피복재의 열용량의 2배를 넘는 경우에 적합한 것으로 보고 있으며 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$C_s (\rho_s A_s) > 2C_i (\rho_i d_i) \text{----- ⑦}$$

여기서

C_i = 피복재의 비열(J/kg℃)

ρ_i = 피복재의 밀도(kg/m³)

상기의 조건이 성립되는 피복 상태를 'Light weight' 피복으로 분류하여 Light weight 피복에 의한 강재의 내화성능을 예측하는 방법을 예로 들어 설명하고자 한다.

ECCS 기술위원회에서 제시하는 피복재의 물성을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 피복재의 열적특성

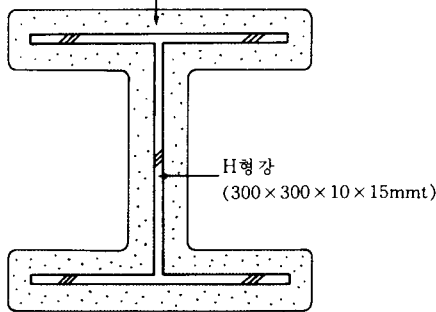
피복재	밀도(ρ_i : kg/m ³)	열전도율(k_i : w/m ² °C)	비열(c_i : J/kg°C)
뿔철 시공한 광섬유	250~350	0.10	1,100
퍼라이트, 절석	300~800	0.15	1,100
석고 플라스터	800	0.20	1,700

또한 유럽 기준에 따른 강재의 비열은 520J/kg °C, 강재의 밀도는 7,850kg/m³로 정한다.

적용 예를 위하여 강재 및 피복재의 조건을 <그림 1>과 같이 표시하였다.

<그림 1> 강재의 Light weight 피복 예

뿔철 시공한 광섬유 피복재(밀도:300kg/m³)



이 강재의 경우

$A_s = 0.0123m^2$, $p_s = p_i = 1.815m$ 이며,
 강재 단면의 열용량 $C_s C_p s A_s$ 을 계산하면 $520J/kg$
 $°C \times 7,850kg/m^3 \times 0.0123m^2 = 50.300J/m^2$
 단열재의 열용량의 2배 $2c_i(\rho_i d_i p_i)$ 를 계산하면
 $2 \times 1,100J/kg^2 \times 300kg/m^3 \times 0.035 \times 1.815m =$
 $41,930J/m^2$ 가 된다.

식 ⑦에 의거 $50,300J/m^2 > 41,930J/m^2$ 이므로 Light weight 피복으로 분류된다.

Δt 를 10분(600초)으로 하고 식⑥에 의한 ΔT_s 값을 구하면

$\Delta T_s =$

$$(k_i/d_i)(\rho_i/A_s)(C_s p_s)^{-1}(T_f - T_s)\Delta t =$$

$$(0.10/0.035)(1.815/0.0123)(7,850 \times 520)^{-1}(T_f - T_s) \times 600 =$$

$$0.06186(T_f - T_s)$$

T_f 는 시간의 변화에 따른 화재온도로서 여기서는 우리나라의 내화시험 방법인 KSF2257(건축구조 부분의 화재시험 방법)에서 정한 표준온도를 적용하였으며 이에 의한 강재의 온도상승 예측 결과는 <표 2>와 같이 계산된다.

<표 2> 강재의 온도상승 예측결과 (lightweight insulation)

시간 (분)	T_f (°C)	$T_f - T_s$ (°C)	ΔT_s (°C)	T_s (°C)
0	20			20
5	540	520	32	
10	705			52
15	760	708	44	
20	795			96
25	820	724	45	
30	840			141
35	860	719	44	
40	880			185
45	895	710	44	
50	905			229
55	915	686	42	
60	925			271
65	935	664	41	
70	945			312
75	955	643	40	
80	965			352
85	975	623	39	
90	980			391
95	985	594	37	
100	990			428
105	995	567	35	
110	1000			463
115	1005	542	34	
120	1010			497

피복재가 석고 플라스터, 조적조, 콘크리트와 같은 재료인 경우 앞에서 제시한 수식⑦이 성립하지 않는다

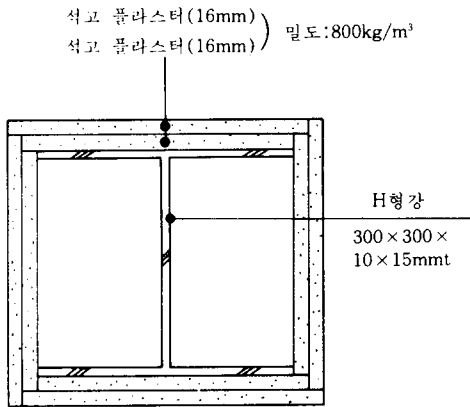
데 즉, 피복재의 열용량의 2배 값이 강재 단면의 열용량보다 크게되는 경우로서 이러한 조건이 성립되는 피복 상태를 'Heavy weight' 피복으로 분류한다.

이 경우 ECCS에서 상정한 강재의 온도변화 $\Delta T_s = [(k_{pi}) / (d_i A_s C_{\rho s})] \{ (C_{\rho s}) [(c_{\rho s}) + (c_i \rho_{pi}) / (2A_s)]^{-1} \} (T_f - T_s) \Delta t$ ⑧ 로 나타낸다.

Heavy weight 피복에 의한 강재의 내화성능을 예측하는 실례를 들어 본다.

적용 예를 위하여 강재 및 피복재의 조건을 <그림 2>와 같이 표시하였다.

<그림2> 강재의 Heavy weight 피복 예



이 경우 $p_i = 1.225m$ 가 된다.

강재의 열용량은 $50,300J/m^2C$, 피복재의 열용량의 2배 값은 $2 \times 1,700J/kgC \times 800kg/m^3 \times 0.032m \times 1.225m = 106,620J/m^2C$ 이므로 Heavy weight 피복으로 분류된다.

Δt 를 10분으로 하고 식⑧에 의한 ΔT_s 값을 구하면

$$\Delta T_s = [(0.2 \times 1.225) / (0.032 \times 0.0123 \times 520 \times 7,850)] \{ (520 \times 7,850) (520 \times 7,850) + [(1,700 \times 800 \times 0.032 \times 1.225) / (2 \times 0.0123)]^{-1} \} (T_f - T_s) 600 = 0.09132 \times 0.6536 \times (T_f - T_s) = 0.05969(T_f - T_s)$$

앞에서와 같은 방법으로 계산한 강재의 온도상승 예측 결과는 <표 3>과 같다.

<표 3> 강재의 온도상승 예측결과 (Heavyweight insulation)

시간 (분)	Tf (°C)	Tf-Ts (°C)	ΔTs (°C)	Ts (°C)
0	20			20
5	540	520	47	
10	705			67
15	760	693	63	
20	795			130
25	820	690	63	
30	840			193
35	860	667	61	
40	880			254
45	895	641	59	
50	905			313
55	915	602	55	
60	925			368
65	935	567	52	
70	945			420
75	955	535	49	
80	965			469
85	975	506	46	
90	980			515
95	985	470	43	
100	990			558
105	995	437	40	
110	1000			598
115	1005	407	37	
120	1010			635

3. 맺는 말

본고에서는 건축물의 구조 강재가 화재에 노출시 그 구조 강도를 상실하지 않도록 보호하는 강재의 내화피복에 대하여 실제 시험을 실시하기에 앞서 강재 및 피복재의 물적 특성을 바탕으로 한 내화성능 예측방법을 살펴보았다.

본고에서 제시한 강재의 온도상승을 예측하는 평가 기법은 다소 제한적이라 할 수 있으며 또한, 강재의 온도상승은 여기서 고려된 여러 변수 이외의 다른 특성들에 의해서도 달라질 수 있으므로 이를 고려하는 것이 필요할 것이다.

금후 이러한 연구 결과를 토대로 많은 비용과 시간을 절약할 수 있는 보다 합리적인 내화성능 예측 평가 기법의 개발이 요구된다. ☹