

유로코드를 이용한 강구조물의 내화설계

Structural Fire Design of Steel Structures Using Eurocodes



민 정 기*
Min, Jeong-Ki

1. 서론

현재 국내의 강구조물 내화설계에 있어서 강구조 부재의 피복두께는 구조설계자의 판단 없이 건축물의 용도별 층수 및 높이에 따른 규모에 따라 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」의 별표 1의 “내화구조의 성능기준”(국토교통부령 제1호)에 기초하여 이루어지고 있다. 이러한 기준에 의한 내화설계방식이 합리적인 판단 근거 없이 전 층에 대해서 동일한 내화피복을 요구하는 반면에 유럽에서는 1970년대부터 강구조물의 내화성능을 향상시키기 위한 연구를 진행하여 유로코드(Eurocode)를 통해 합리적인 성능기반 설계 개념을 도입하고 있다.

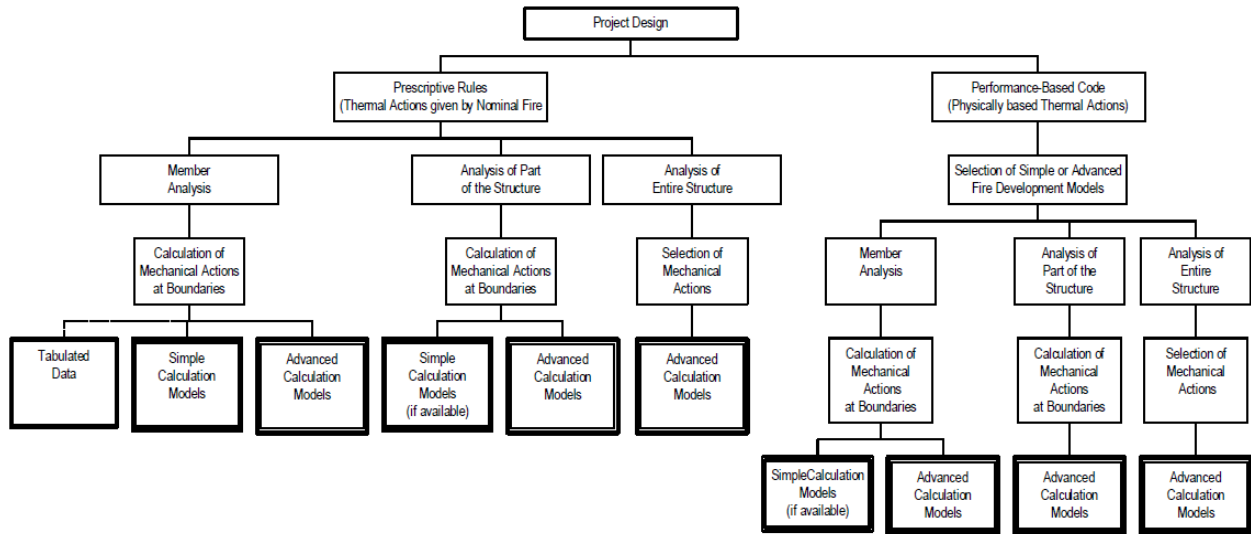
국내의 경우 성능기반 내화설계의 기초적 개념인 철골구조 단면형상계수를 KS F 2848을 통해 도입하고 있으나 관련 설계기법 및 기반연구의 미비로 현장 적용에 어려움이 있고 실제 활용이 미비한 실정이다. 본 기사에서는 유럽의 내화설계 개념과 체계에

대해 설명하고 내화설계 방법론에 대해 설명한다. 또한, 3층 강구조물 예제에 대해서 유로코드에 제시되어 있는 방법에 따라 축력을 받는 기둥의 내화설계 순서를 보여주고 그에 따른 결과를 비교하여 구조설계자들에 강구조물의 내화설계에 대한 이해의 폭을 넓히고자 한다.

2. 유로코드 내화설계

유로코드에서 강구조의 내화설계법은 Eurocode3: Design of Steel Structures의 Part 1,2: General rules - Structural fire design에 수록되어 있다. 총 4개의 장으로 구성되어 있으며, 각각의 장은 1장 일반(General), 2장 설계의 기초(Basis of design), 3장 재료 특성(Material properties), 4장 구조화재 설계(Structural fire design)를 포함한다. 1장의 일반은 EN 1993과 EN 1993-1-2의 범위, 용어 및 기호를 설명한다. 2장의 설계의 기초는 요구사항, 하중, 재료 특성의 설계값, 검증방법을 소개한다. 3장의 재료 특성에서는 온도 증가에 따른 탄소강 및 스테인리스강의 강도, 변형률, 열팽창 계수, 열전도도, 열용량, 질량 밀도, 열안정성 등을 소개한다.

* 한국건설생활환경시험연구원, 선임연구원



〈그림 1〉 설계 절차(Eurocode 3, Part 1-2, 2005)

테인리스강의 역학적 특성과 열특성을 다룬다. 4장의 구조화재설계에서는 인장, 압축, 보, 휨과 압축을 받는 부재와 피복되지 않거나 피복된 강재의 온도계산에 대한 단순계산법(Simple Calculation Methods)을 보여주고 화재에 노출된 구조물의 현실적인 해석을 가능하게 하는 고급계산법(Advanced Calculation Methods)과 고급계산모델(Advanced Calculation Models)의 검증에 대해 설명한다. 〈그림 1〉은 사양적인 규정(표준가열곡선의 적용)과 성능기반코드(단순 혹은 고급 화재발달 모델의 사용)에 따른 부재해석, 부분구조물의 해석, 전체구조물의 해석에 대한 구조화재설계의 전체적인 해석 절차를 보여준다.

3. 내화설계 방법론

유로코드 3에서 설명하고 있는 구조화재공학 내화설계는 크게 표를 이용한 방법(Tabulated Data), 단순계산법(Simple Calculation Methods), 고급계산법(Advanced Calculation Methods)으로 구분할 수 있다. 본 기사의 목적은 구조설계자가 실무에서 수계산을 통해 활용할 수 있는 내화설계 단순계산법을 소개하는 것이다. 내화설계 방법론에 있어서 수행절차는 다음과 같다. 1) 화재시 저감계수 산정을 통

해 설계하중을 계산한다. 2) 화재에 의해 발생하는 구조물의 영향을 파악하기 위하여 화재 모델을 설정한다. 3) 결정된 화재 모델을 바탕으로 피복되거나 피복되지 않은 부재의 온도를 계산한다. 4) 요구되는 내화시간에 따라 부재의 설계 강도를 산정한다. 5) 화재 시 산정된 부재의 설계강도가 화재 시 설계하중을 만족하도록 피복두께를 결정한다.

3.1 화재 시 설계하중 산정

화재가 발생했을 때, 구조물에 적용되는 하중은 화재 발생으로 인한 적재물의 연소에 의해 상온 시에 적용된 최대 설계하중보다 작아지게 된다. 따라서 상온 시와 서로 다른 하중 조합이 사용된다. 유로코드에서는 고정하중(G)에 대해서 하중 계수 1.0, 영구 활하중은 하중계수 0.9, 영구 활하중이 아닌 다른 활하중(Q)에 대해 하중계수 0.5를 적용한다. 이를 바탕으로 식 (1)과 같이 저감계수(η_{fi})를 산정하여 상온에서의 설계하중(P_u)을 곱해서 화재 시 저감된 설계하중을 산정한다.

$$\eta_{fi} = \frac{G + 0.5Q}{1.2G + 1.6Q} \tag{1}$$

3.2 화재모델 설정

화재모델은 부재의 온도에 직접적으로 영향을 미쳐 부재강도의 감소와 관련된다. 따라서 화재모델의 설정은 내화설계에 있어서 중요한 부분 중의 하나이다. 이 기사에서는 최대한 자세한 설명을 배제한다. 가열곡선에 대한 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 (Buchanan, 2001)을 통해 얻을 수 있다.

먼저 쉽게 사용할 수 있는 화재곡선은 흔히 가열로에서 구조물의 내화성을 판단할 때 이용하는 표준 화재 곡선이 있다(식 (2)).

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (2)$$

여기서, T 는 온도, t 는 시간(분)이다.

이 식 (2)를 통해서 부재의 온도는 감소 없이 화재 시간의 증가와 함께 계속적으로 증가한다.

또 다른 화재 곡선은 실의 개구부 면적, 높이, 실의 전체면적, 바닥면적, 내부 벽의 열전도성에 따라 화재 곡선을 결정하는 변수화재 곡선이다(식 (3)).

$$T = 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (3)$$

여기서, t^* 는 $t \left(\frac{F_V}{0.04} \right)^2 \left(\frac{1160}{\sqrt{k\rho c_p}} \right)^2$ 에 의해 주어진 시간으로 표현되는 가상시간이다. 또한, t 는 시간, F_V 는 $\frac{A_V \sqrt{H_V}}{A_t}$ 에 의해 계산되는 개구부계수, A_V 는 환기 개구부의 면적(m^2), H_V 는 개구부의 높이(m^2), A_t 는 실의 전체 내부표면적(m^2), $\sqrt{k\rho c_p}$ 는 내벽 재료의 열특성($J/m^2 Ks^{1/2}$)이다.

3.3 부재의 온도계산

화재에 따른 부재의 온도 상승은 피복된 경우와 피복되지 않은 경우로 나눌 수 있다.

피복되지 않은 부재의 온도는 식 (4)를 통해 계산된다.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{H_p/A}{c_a \rho_a} h_{net} \Delta t \quad (4)$$

여기서, $\Delta\theta_{a,t}$ 는 시간 t 에서 $t + \Delta t$ 까지의 강재의 온도증가, k_{sh} : 그림자 효과에 대한 보정 계수, H_p 는 단면의 노출된 부분의 길이, A 는 단위 길이 당 부재의 표면적, c_a 는 강재의 비열, ρ_a 는 강재의 단위 중량, h_{net} 는 단위 면적당 순열속 설계값, Δt 는 시간 간격이다.

피복된 경우의 부재의 온도는 식 (5)를 통해 계산된다.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p H_p/A}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \Phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (5)$$

$$\text{with } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p H_p/V$$

여기서, λ_p 는 내화 피복 재료의 열전도성, H_p/A 는 내화 피복 재료에 의해 단열된 강재의 단면 계수, $\theta_{g,t}$ 는 시간 t 에서의 상온 가스 온도, $\theta_{a,t}$ 는 시간 t 에서의 강재 온도, d_p 는 내화 피복 재료의 두께, c_a 는 온도에 따른 강재의 비열, ρ_a 는 강재의 단위 중량, Δt 는 시간 간격, $\Delta\theta_{g,t}$ 는 시간 간격 Δt 동안에 상온에서의 가스 온도의 증가, c_p 는 온도에 독립적인 내화 피복 재료의 비열, ρ_p 는 내화 피복 재료의 단위 중량이다. 이 중에서 λ_p , ρ_p , c_p 는 내화 피복재의 특성과 관련된 부분으로 각각의 내화 피복재에 따라 달라진다.

3.4 부재의 설계강도 산정

화재에 대한 부재의 설계강도를 산정하는 방법은

기본적으로 상온에서 부재의 설계강도를 산정하는 방법과 같다. 차이점은 온도의 상승으로 인한 부재의 역학적인 특성이 감소하는 효과를 고려한다는 점이다. 앞서 2장에서 설명한 바와 같이 유로코드의 구조화재설계에서는 인장, 압축, 보, 휨과 압축을 받는 부재에 대해 기술하고 있으나 본 기사에서는 압축력만 받는 기둥부재에 대해 기술한다.

3.4.1 세장비 결정

화재 발생 시에 화재 구획 안에 위치한 기둥 부재는 심각한 강도 감소를 보이는 반면에 화재가 발생된 구획의 인접실이나 상하부에 위치한 기둥은 화재로 인한 영향이 없어 강도의 감소 없이 상대적으로 높은 강성을 나타낸다. 이와 같은 화재 시 좌굴길이 (L_{cr})를 반영한 식 (6)을 통해 세장비를 결정한다. 화재 시 좌굴길이는 중간층은 0.5, 최상부층에 대해서는 0.7을 고려한다.

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr} / \sqrt{I/A}}{\pi \sqrt{E/f_y}} \quad (6)$$

여기서, I 는 단면 이차 모멘트, A 는 단면의 면적이다.

3.4.2 고온에서의 세장비 결정

화재로 인한 특정 고온 시 세장비는 유효 항복강도에 대한 저감계수($k_{y,\theta}$)와 영계수에 대한 저감계수($k_{E,\theta}$)를 고려하여 식 (7)로부터 구한다.

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} \quad (7)$$

3.4.3 불완전 계수

사용된 부재의 불완전 계수는 식 (8)로부터 계산된다.

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (8)$$

3.4.4 좌굴계수

좌굴 계수는 식 (9)의 계산으로부터 계수(ϕ_θ)를 결정하여 식 (10)으로부터 계산된다.

$$\phi_\theta = 0.5(1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2) \quad (9)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \lambda_\theta^2}} \quad (10)$$

3.4.5 화재 시 설계강도

화재 시 설계강도는 식 (10)에서 구한 좌굴계수를 반영하여 식 (11)로부터 결정된다.

$$\phi P_{n,fi} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (11)$$

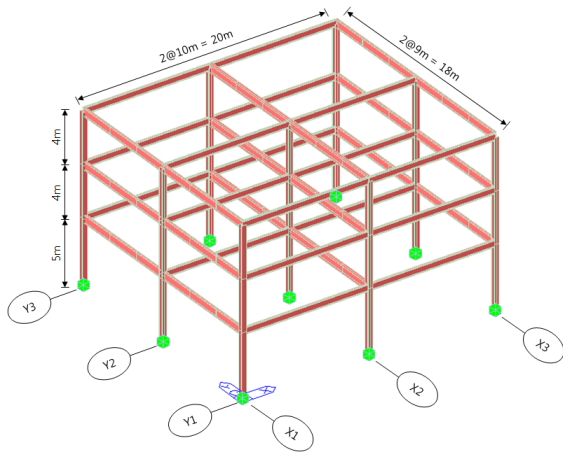
3.5 피복두께 결정

최종적으로 아래 식 (12)와 같이 3.1절로부터 구한 화재 시 설계하중과 식 (11)로부터 구한 화재 시 설계강도를 비교하여 부재가 좌굴에 의해 붕괴되는지를 확인하고 필요시 내화피복을 적용하여 다시 3.3절과 3.4의 과정을 거쳐 좌굴이 발생되지 않도록 요구되는 내화시간에 필요한 피복두께를 결정한다.

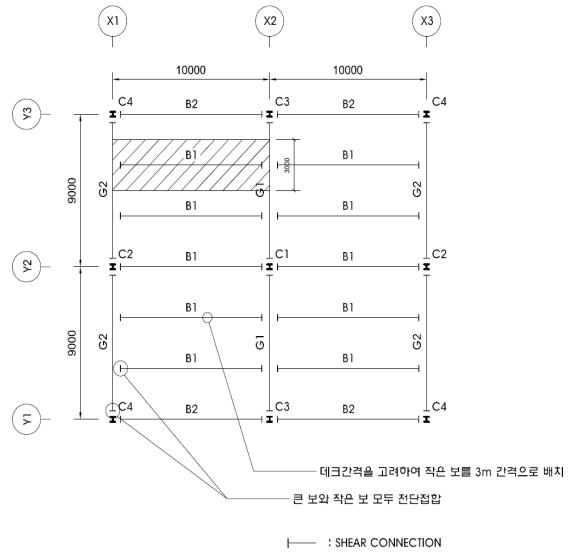
$$P_{u,fi} \leq \phi P_{n,fi} \quad (12)$$

4. 3층 강구조물 내화설계 예

대상 구조물은 서울에 위치한 사무소 용도의 건물로써 바람이나 지진 등의 수평하중은 고려하지 않고, 수평하중에 대해서만 구조설계를 하여 보와 기둥이 모든 하중을 저항하는 시스템으로 구성하였다. 평면 형상은 전 층이 동일하며, 지상 1층의 층고는



〈그림 2〉 대상건물의 3차원 형상



〈그림 3〉 평면 형상 및 부재의 명칭

5m이고, 2층과 3층은 4m이다. X방향으로는 10m 간격으로 2개의 기둥 경간, Y방향으로는 9m 간격으로 2개의 기둥 경간으로 구성되어 전체 평면은 20m×18m이다. 〈그림 2〉와 〈그림 3〉은 각각 대상 구조물의 3차원 형상과 평면 형상 및 부재의 명칭을 나타내며, 〈표 1〉은 큰 보 및 기둥에 대한 가정단면의 요약을 나타낸다.

4.1 설계 개념

본 예제에서는 축력을 가장 많이 받는 1층 내부 기둥(1C1)의 내화설계 과정을 설명한다. 상온에서의 구조설계에 따라 H-350×350×12×19 강재가 내화설계를 위해 사용되었다. 강재의 재질은 SS400이고 항복강도(f_y)는 235MPa이다. 선택된 부재는 「건축

물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」의 별표 1의 “내화구조의 성능기준”에 따라 1시간의 내화 성능이 요구된다.

4.2 상온에서의 설계하중

1층 내부 기둥(1C1)의 분담면적은 X방향 10m와 Y방향 9m를 곱하여 90㎡가 되고, 기둥 축력은 상부에서 하부로 누적된다. 따라서 1C1에 작용하는 축하중은 2~3층의 바닥하중과 지붕층의 바닥하중을 이용하면 3,096 kN이다.

4.3 화재 시의 설계하중

화재 시 저감계수는 상온에서의 고정하중 및 활하중에 대한 하중계수와 화재 시 활하중에 대한 저감

〈표 1〉 가정단면 요약

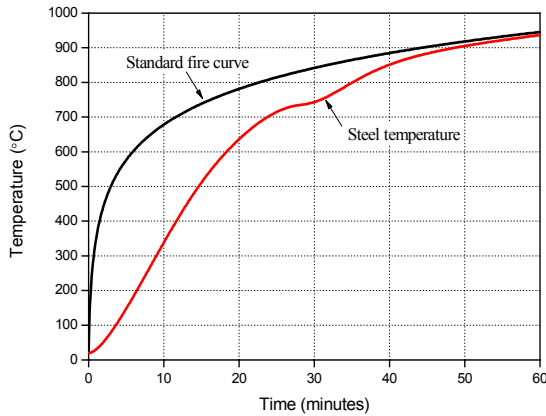
보	단면	기둥	단면
RG1	H-606×201×12×20	1~3C1	H-350×350×12×19
2~3G1	H-594×302×14×23	1~3C2	H-250×250×9×14
RG2	H-450×200×9×14	1~3C3	H-294×302×12×12
2~3G2	H-506×201×11×19	1~3C4	H-200×204×12×12
		1~3C5	H-200×204×12×12

계수를 고려하여 0.64를 얻었으며, 화재 시 설계하중은 1,981 kN으로 계산되었다.

4.4 무피복 기둥 강재의 온도

가정된 화재모델은 표준화재곡선을 가정하여 1시간이 경과했을 때 <그림 4>에서 보는 바와 같이 936.4°C에 도달하였고 그 때의 강도저감계수를 고려하여 아래와 같은 계산값을 얻었다.

936.4°C에서의 세장비 $\bar{\lambda}_\theta = 0.403$
 불완전 계수 $\alpha = 0.65$
 좌굴 계수 $\chi_{fi} = 0.76$



<그림 4> 무피복 강재의 시간에 따른 온도

4.5 화재 시 설계강도

4.4절에서 얻은 값들을 이용해 화재 시 설계강도($\phi P_{n,fi}$)는 165.5 kN으로 계산되었다. 이에 따라

$$\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = \frac{1981.4}{155.2} = 12.76 > 1.0$$

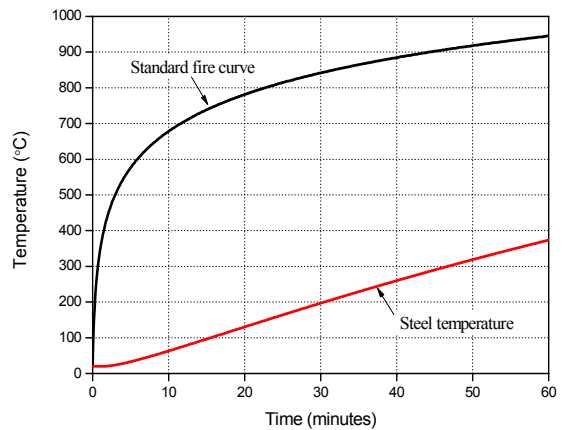
이므로 기둥은 화재 시 좌굴에서 파괴되므로 적절하지 못하다. 따라서 적절한 내화피복이 요구된다.

4.6 피복 기둥 강재의 온도

기둥부재에 대한 온도를 지연시킬 수 있는 방법으로 일반적으로 많이 사용되는 내화뿔칠이 적용되었다. 내화뿔칠 피복재의 재료 특성은 다음과 같다.

밀도	$\rho_p = 430 \text{ kg/m}^3$
열전도성	$\lambda_p = 0.17 \text{ W/mK}$
비열	$c_p = 1200 \text{ J/kgK}$

위의 피복 재료특성들과 함께 25mm 두께의 내화뿔칠에 대해 식 (5)를 이용해 온도를 계산하였다. 계산된 온도는 <그림 5>에서 보는 바와 같이 60분에 최대 373.5°C를 나타내는 것을 알 수 있다.



<그림 5> 내화피복 강재의 시간에 따른 온도

내화피복된 기둥강재에 대해 화재 시 설계강도는

재산정 되었다. 그 결과, $\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = \frac{1981.4}{2917.8} = 0.67 < 1.0$

이므로 기둥 부재는 화재 시 좌굴로 인한 붕괴 없이 1시간의 내화성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 언

본 기사에서는 유로코드에 제시된 내화설계 방법을 살펴보고 구조설계된 3층 강구조건물에 대해 내화설계를 통해 기둥부재의 피복두께를 결정하는 과정을 살펴보았다. <표 2>는 앞서 살펴본 3층 예제 건물에 대한 1층과 3층 기둥에 대한 강도 비교를 나타낸다. 무내화 피복이 적용된 기둥 부재는 화재 시 작 후 1시간 이후에 모두 좌굴에 의해 붕괴되는 것으로 나타났으나 내화피복을 적용한 강재의 경우 붕괴 없이 1시간의 내화성을 가지는 것을 확인할 수 있

〈표 2〉 1층과 3층 내부 기둥의 강도 비교(60분 내화성)

		상온 시	표준화재	
			60분 화재 시 (무내화피복)	60분 화재 시 (내화피복)
1층 기둥	소요압축강도 P_u	3,096 kN (=1.2G+1.6Q)	1981.4 kN (=G+0.5Q)	1981.4 kN (=G+0.5Q)
	설계압축강도 ϕP_n	3,147 kN $f_y \Rightarrow 100\%$	165.5 kN $f_y \Rightarrow 5\%$ (최대온도=944.8° C)	2917.8 kN $f_y \Rightarrow 100\%$ (최대온도=373.5° C)
	$P_u \leq \phi P_n$	O.K	N.G $\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = 12.76 > 1.0$	O.K (25 mm 내화뿔칠) $\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = 0.67 < 1.0$
3층 기둥	소요압축강도 P_u	792 kN (=1.2G+1.6Q)	578.2 kN (=G+0.5Q)	578.2 kN (=G+0.5Q)
	설계압축강도 ϕP_n	2,691 kN $f_y \Rightarrow 100\%$	175.7 kN $f_y \Rightarrow 5\%$ (최대온도=944.8° C)	3404.1 kN $f_y \Rightarrow 100\%$ (최대온도=373.5° C)
	$P_u \leq \phi P_n$	O.K	N.G $\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = 3.29 > 1.0$	O.K (25 mm 내화뿔칠) $\frac{P_{u,fi}}{\phi P_{n,fi}} = 0.17 < 1.0$

다. 또한, 3층 기둥의 경우에는 현재 “내화구조의 성능기준”에서 명시하고 있는 것과 같이 25mm 두께의 내화뿔칠을 그대로 적용했을 때 설계압축강도는 소요압축강도의 20% 미만이므로 상당한 여유를 가지고 있어 피복두께를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 강구조물의 내화설계는 구조설계자에 의해 수행되어야 할 분야라고 판단되나 국내 적용을 위해 더 많은 검증과 연구가 함께 이루어져야 하겠다.

참고문헌

1. 국가법령정보센터(<http://www.law.go.kr>)
2. ENV 1993-1-2, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General rules: Structural design for fire. Brussels: CEN; 2005.
3. Buchanan, A.H., Structural Design for Fire Safety, Wiley, Chichester, UK, 2001.