

Robot S/W를 활용한 3시간 내화 적용 모듈러 건축물의 성능기반 내화설계

최준영¹ · 조봉호^{2*}

¹석사과정, 아주대학교, 건축공학과, ²교수, 아주대학교, 건축공학과

Performance-Based Structural Fire Design of Modular Buildings with 3-Hour Fire Resistance Using Robot S/W

Choi, Joon Young¹, Cho, Bong Ho^{2*}

¹Graduate Student(Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

Abstract - As the domestic modular market grows, the demand for high-rise modular building is increasing, but the growth has been marginal. The biggest problem with high-rise modular is the fireproofing standard which is currently based on the specification of fireproofing materials to meet the 3 hours of its performance in buildings over 13 floors and the efficiency is lower than RC buildings. In overseas, performance-based structural fire design is used to apply fireproofing materials appropriately leading to good efficiency. In this research, performance-based structural fire design of modular buildings using Robot S/W based on Eurocode 3 was conducted and its efficiency was compared with specification-based design.

Keywords - 3-hour fire resistance, Modular building, Performance-based structural fire design, Robot S/W, Eurocode 3

1. 서론

모듈러 건축은 공장에서 모든 공정을 완료한 후 현장에서 조립, 완성하는 방식으로 다가구 주택, 학교, 병원 등에서 적용되고 있으며, 공기 단축, 재사용, 공사비 절감의 장점을 가지고 있다^[1]. 현재 국내 모듈러시장은 지속적으로 증가하고 있지만 국내 모듈러 고층화는 해외에 비하여 매우 더딘 수준이며 그 걸림돌 중에서 내화규제가 가장 큰 화두로 떠오르고 있다.

2022년 4월 기준 ‘건축물의 피난, 방화구조 등의 기준에 관한 규칙’ 제3조 제8호^[2]에 따라 13층 이상 건물의 보·기둥 구조는 3시간 이상, 바닥은 2시간의 내화성능을

확보해야 한다. 또한 위 규칙의 제3조에 따라 RC 구조는 모두 내화구조로 인정받으나, 철골조인 모듈러는 위 규칙에 명시된 사양을 기반으로 건설기술연구원의 내화실험 인증을 받아야만 내화구조로 인정받을 수 있다^[3].

현재 국내에서는 이러한 사양기반 설계법을 대부분 사용하고 있다. 이러한 설계 방법은 쉽지만, 일률적이며 경제성이 떨어진다. 2022년 기준 내화 실험 인증제품을 참고하면 모듈러 건물에서 3시간의 내화성능을 구현하기 위해 보와 기둥에 방화 석고보드 57 mm 이상을 적용하여 인증을 받았으며^[4] 이를 전층에 일괄적으로 적용하는 방식으로 설계하고 있다.

위와 같은 사양기반 내화설계와 달리 해외에서는 건물의 용도, 구조부재의 성능과 화재 형상을 고려하여 적절한 설계가 가능한 성능기반 내화설계를 적용하고 있으며^[3], 이에 대한 기준이 모두 제시되어 있다. 이를 통해 모듈러 내화에 대한 실험이나 설계법에 대한 연구가 진행되고 있다^[5].

한국도 KDS 41 30 10: 2022 강구조 설계기준^[6]에 성능기반 내화설계에 대한 내용이 언급되어 있으나, 상세

Note.-Discussion open until December 31, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 29, 2023; revised on May 19, 2023; approved on May 31, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-219-3572 Fax. +82-31-219-2945

E-mail. bhcho@ajou.ac.kr

한 설계방법은 제시되어 있지 않다. 모듈러 내화구조에 관한 국내 연구 역시 부재 성능실험 및 평가 분석 위주로 진행되고 있으나^[7], 활발히 이뤄지고 있지 않다.

본 연구에서는 Eurocode 3에 기반한 강구조의 성능기반 내화설계 방법 중 상세설계법을 설명하고, 이에 기반한 Autodesk Robot S/W^[5]를 이용하여 모듈러 건축물의 성능기반 내화설계의 예제를 통해 성능 측면에서 기존의 사양기반 내화설계와 비교분석을 수행하고자 한다.

2. 성능기반 내화설계

성능기반 내화설계는 Fig. 1과 같이 진행된다. KDS 41 30 10: 2022 강구조 설계기준에 따르면 주요 구조부재에 대한 내화성능은 국내 건축법규에서 정한 내화시간 이내에 소요하중에 대한 하중지지력을 유지해야 한다고 정의되어 있다^[4]. 실제로 Eurocode 3에서도 구조부재가 기준시간 이내에 하중지지력을 유지할 수 있도록 내화지침을 제시하고 있다^[8].

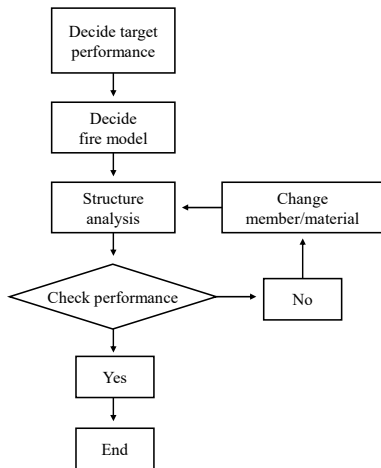


Fig. 1. Process of performance-based structural fire design

2.1 성능기반 내화설계 방법론

성능기반 내화설계 방법에는 부재의 붕괴온도만 고려하는 한계온도설계법, 부재 내력과 소요강도를 고려하는 상세설계법, 그리고 유한요소해석을 이용하는 고급설계법이 있다^[7]. 부재의 붕괴온도로만 설계하는 한계온도설계법은 부재의 구조적 거동을 고려하지 않고 오직 붕괴온도로만 평가하기 때문에 과설계의 우려가 있으며, 고급설계법은 가장 정확하나, 전문적인 지식과

많은 시간이 요구된다^[9].

상세설계법은 특정 시간의 부재 온도 분포를 바탕으로 부재의 소요강도와 설계강도를 비교하여 특정 시간 및 온도에서 재료의 특성을 이용하여 설계하는 방법^[9]으로, 본 연구에서는 상세설계법을 채택하여 설계를 진행하였다.

2.1.1 상세설계법

부재의 소요강도와 설계강도를 통해 내화성능을 평가하는 상세설계법의 설계범위는 Table 1과 같이 부재 단위, 부분 골조 단위, 전체구조 단위로 나뉘며 Fig. 2와 같이 화재로 인해 강도가 감소할 때 소요강도와 교점을 찾아 붕괴온도를 구할 수 있다.

Table 1. Analysis type for structural fire design

Member	Frame	Global

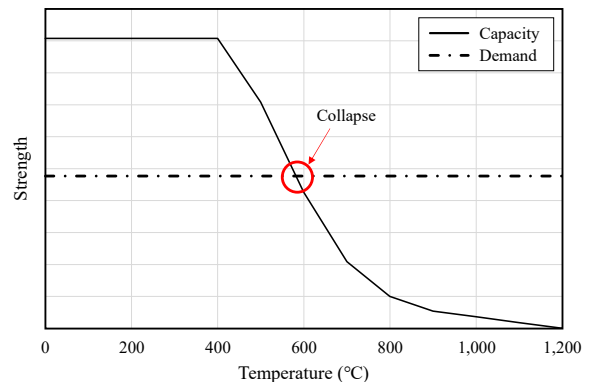


Fig. 2. Temperature-strength curve in fire

부재단위설계법은 골조에서 보, 기둥 부재별로 나누어서 설계하는 방법으로 간단한 수 계산이나 구조해석을 통한 설계가 가능하다. 부재의 온도 상승으로 인한 열변형만 고려하며, 부재의 지점 조건은 화재가 지속되는 동안 변하지 않는 것으로 가정한다.

Eurocode 3에서는 가장 적절하고 설계자 입장에서 쉽고 간단한 부재단위해석법을 권장하고 있다^[8]. 본 연구에서도 부재단위해석법을 통해 내화설계를 실시하였다.

2.2 소요강도 산출

KDS 41 12 00: 2022에서 화재하중은 다음의 하중조합으로 제시하고 있다^[10].

$$(0.9 \text{ or } 1.2)D + 0.5L + A_k + 0.2S \quad (1)$$

여기서, D : 고정하중,

L : 활하중,

A_k : 돌발사고 A 에 대한 하중,

S : 적설하중.

본 연구에서는 적설하중과 돌발하중을 제외한 하중조합인 $1.2D + 0.5L$ 을 적용하여 산출하였다. 실제로 EN 1993-1-2: 2005는 화재 시 하중저감계수에 따라 조합을 제시하고 있는데, 보통 $1.0D + 0.5L$ 을 적용한다^[9].

2.3 화재곡선 채택

화재곡선은 실제 화재가 어떻게 진행될 것인지에 대한 가정이다. 화재곡선은 시간-온도 그래프로 구성되어 있으며, EN 1991-1-2: 2002는 다양한 화재곡선을 제시하고 있는데, 가장 대표적인 곡선은 국제표준기구에서 제시하는 ISO 834 공칭화재곡선으로 식 (2)와 같다^[11].

$$T = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2)$$

여기서, T : 화재 시 온도(°C),

t : 시간(분).

설계자가 실 및 개구부 크기, 구성 재료를 통해 직접 설계하는 변수화재곡선을 이용할 수 있으며 실의 면적 500 m^2 , 높이 4 m 이하일 때, 식 (3) - 식 (4)와 같다^[11].

$$\begin{aligned} \theta_g = & 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*}) \\ & - 1325(0.204e^{-1.7t^*} + 0.472e^{-1.9t^*}) \quad (3) \end{aligned}$$

$(0 \leq t \leq t_{\max}^*)$

$$\theta_g = \theta_{\max} + 625(t^* - t_{\max}^* \cdot t) \quad (t_{\max}^* \leq 30) \quad (4)$$

여기서, θ_g : 연료로 인한 화재 시 온도(°C),

$t^* = \Gamma t$: 화재 확산 시간(분),

Γ : 화재 확산 계수.

식 (3)은 화재가 완전히 성숙하는 단계이고, Γ 는 실의 정보에 따라 달라진다. θ_{\max} 는 식 (3)에서의 최대 온도로

t_{\max}^* 에 의해 결정된다. 이후 냉각단계는 t_{\max}^* 가 30분 이하일 때 식 (4)로 결정된다^[11]. Fig. 3에 나타난 바와 같이 두 화재곡선의 가장 큰 차이점은 냉각단계 고려 여부이며, ISO 834 화재곡선이 변수화재곡선보다 보수적인 화재 형상임을 알 수 있다. 본 연구에서는 ISO 834 화재곡선을 채택하였다.

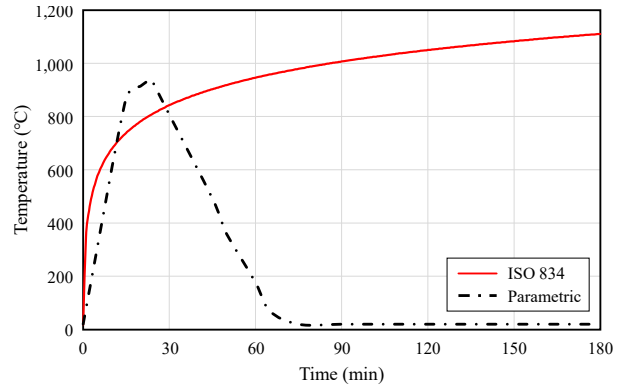


Fig. 3. Nominal (ISO 834) and parametric fire curve

2.4 구조재의 설계강도 산정

소요강도와 화재곡선이 모두 정해지면, 부재가 화재 온도에 따라 어느 정도의 강도를 발휘하는지를 알아야 한다. 단위 부재를 어떻게 보는지에 따라 그 설계식이 다른데, EN 1993-1-2: 2005에 부재별로 설계식이 제시되어 있으며, 상온에서의 식은 일반적인 강구조 설계와 같다^[8].

화재 시 설계강도는 화재로 인한 온도 상승과 그로 인한 부재의 항복강도 저감계수 $k_{y,\theta}$ 는 Table 2를 적용하며, 2.1.1절의 Fig. 2와 같이 한계온도를 계산한다. 휨재의 경우 식 (5)를 만족해야 하며, 휨재에서 전단강도에 대해 식 (6)를 만족할 경우 전단력에 대해 고려하지 않는다. 보-기둥 부재는 식 (7)을 만족해야 한다.

$$M_{fi,ed} < k_{y,\theta} M_{Rd} \quad (5)$$

$$V_{fi,ed} < 0.5k_{y,\theta} V_{Rd} \quad (6)$$

$$\frac{N_{fi,ed}}{k_{y,\theta} N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,fi,ed}}{k_{y,\theta} M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,fi,ed}}{k_{y,\theta} M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (7)$$

여기서, $k_{y,\theta}$: 항복강도 저감계수,

$M_{fi,ed}$: 화재 시 소요 휨강도,

M_{Rd} : 상온에서의 설계 휨강도.

$N_{f,ed}$, $V_{f,ed}$ 는 각각 화재 시 소요압축 및 전단강도를 의미하며, $N_{b,Rd}$, V_{Rd} 는 각각 설계 압축강도와 전단강도를 의미한다. 식 (5)는 보가 완전 횡지지일 경우 적용하며, 단면의 판폭두께비에 따라 등급이 나뉘며, 적용되는 단면계수가 다르다. 또한, 완전 횡지지가 아닌 경우 식 (5)의 설계 휨강도는 횡비틀림 좌굴강도를 적용한다^[8].

Table 2. Strength reduction factor for steel at elevated temperature^[6]

Steel temperature (°C)	Reduction factor for yield strength	Reduction factor for thin walled section (Class 4)
20	1.000	1.000
200	1.000	0.890
400	1.000	0.650
600	0.470	0.300
800	0.110	0.070
1,200	0.000	0.000

2.5 내화피복 산출

2.4절에서 화재 시 설계강도에 대한 한계온도를 산출한 후, 내화피복을 구해야 한다. 먼저 내화피복 재료의 물성치와 부재의 화재 시 노출면에 따른 형상계수를 통해 질량계수를 산출해야 한다. 이후, Table 3에서 공칭 화재곡선일 때, 질량계수와 시간을 이용하여 특정 시간에서의 온도를 산정할 수 있다. 질량계수 M_f 는 약산식으로 식 (8)과 같다.

$$M_f = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \Phi/2} \quad (8)$$

여기서, Φ : 내화 피복에 저장된 열의 비율,

λ_p : 내화재료의 열전도계수(W/mK),

d_p : 내화 피복두께(m),

A_p : 단위 길이당 부재 단면적(m²/m),

V : 단위 길이당 부재의 부피(m³/m).

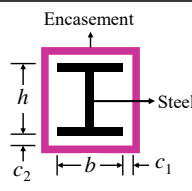
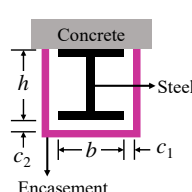
내화재료와 부재의 물성치를 활용하여 식 (8)을 통해 내화 피복된 부재의 질량계수를 구할 수 있으며, 산출 후 Table 3에서 공칭화재곡선에서의 열전도계수 값을 읽어 특정 시간에서의 온도 값으로 그에 따른 한계온도를 구할 수 있다^[12].

화재 시 노출면과 피복 형태에 따른 부재의 형상계수 A_p/V 는 부재의 단면적과 플랜지 너비 및 웨브의 높이로 산출할 수 있으며, Table 4와 같이 별도의 표를 제시하고 있다^[6].

Table 3. Temperature of protected steel in °C, exposed to the ISO 834 fire curve with different massivity factor^[12]

Time (min)	Massivity factor (W/m ³ K)							
	100	200	300	400	600	800	1000	1500
0	20	20	20	20	20	20	20	20
30	54	84	113	140	188	232	271	354
60	94	156	211	261	345	414	472	578
90	134	225	302	367	472	552	612	712
120	173	289	383	459	573	654	709	767
150	211	349	455	537	654	723	746	876
180	248	404	519	603	714	751	821	967

Table 4. Section factor (A_p/V) for protected steel members with hollow encasement^[6]

Sketch	Description	Section factor A_p/V
	Hollow encasement of uniform thickness*	$\frac{2(b+h)}{\text{steel cross section area}}$
	Hollow encasement of uniform thickness, exposed to fire on three sides*	$\frac{2h+b}{\text{steel cross section area}}$

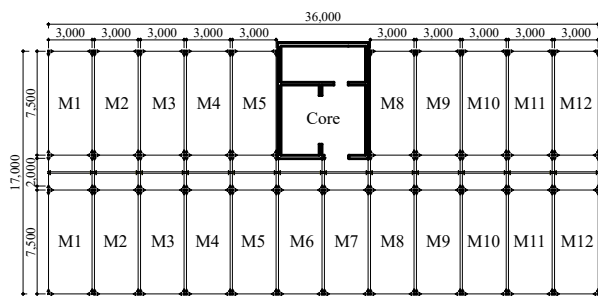
*The clearance dimension c_1 and c_2 should not exceed $h/4$.

Table 3에서 질량계수가 낮을수록 온도의 상승 정도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 이를 낮추기 위해서는 형상계수가 낮은 구조부재를 사용하거나 내화피복을 늘리거나 내화성능이 좋은 재료로 바꾸는 방법이 있다. 이를 통해 한계온도에 대한 내화피복 설계를 진행할 수 있다.

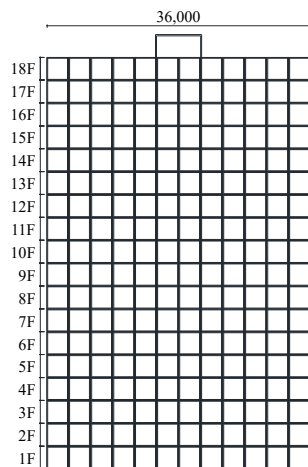
3. 모듈러 건축물의 성능기반 내화설계 예제

3.1 예제 건축물 및 설계 가정

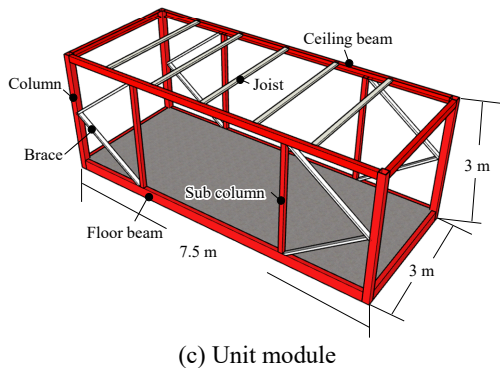
본 연구를 위해 18층 규모의 모듈러 주택을 시공한다고 가정하고 구조설계가 완료된 주택에서 내화설계만 진행되지 않은 건물에 대해 수행하였다. Fig. 4(c)와 같이 단위 모듈은 7.5 m × 7.5 m × 3 m로 구성하였으며, 건물의 평면 및 입면은 Fig. 4(a), Fig. 4(b)와 같다. 내화재료는 석고보드 적용을 가정하였으며, 단위 모듈의 부재 구성은 Table 5와 같다.



(a) Plan



(b) Elevation



(c) Unit module

Fig. 4. Structure plan and unit module

Table 5. Material properties for unit module

Member	Standard	Steel grade
Column	□-200×200×12	SM355
Floor beam	C-250×100×9/9	
Ceiling beam	C-150×100×9/9	
Brace	□-100×50×6	SM275
Joist	□-100×50×4	
Sub column	□-100×100×6	

설계 전 화재곡선은 ISO 834 공칭화재곡선을 채택하였고, EN 1993-1: 2005 내화 기준이 탑재된 Autodesk Robot Structural Analysis 프로그램을 사용하여, 화재곡선과 부재와 내화 피복에 대한 값을 입력하고 요구시간에 맞게 강도의 구현 여부를 검토하는 과정을 반복하였으며, 국내 내화기준에 맞게 기둥과 보에 대해 3시간의 내화성능을 확보하도록 설계하였다.

3.2 소요강도 산출

2.2절에서 언급한 1.2D + 0.5L의 하중조합을 통해 소요강도를 산출하였다. 각 층의 M1에서 소요강도가 가장 크며, 이를 기준으로 한 기둥과 보의 소요강도는 각각 Table 6 및 Table 7과 같다.

Table 6. Maximum required strength for each floor of column

Floor	Demand		
	Compression (kN)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)
1F	1,712.34	17.26	21.32
9F	954.21	14.15	15.70
18F	91.32	0.29	1.24

Table 7. Maximum required strength for each floor of beam

Member	Floor	Demand	
		M_y (kN·m)	Shear (kN·m)
Floor beam	1F	55.23	32.33
	9F	51.18	30.72
	18F	48.17	28.32
Ceiling beam	1F	11.97	8.68
	9F	12.67	10.87
	18F	11.97	8.68

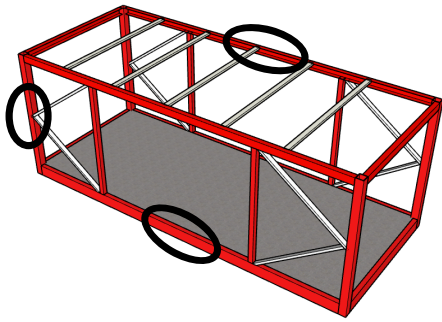


Fig. 5. Critical part of module (M1 of 1F)

3.3 내화피복두께 산출

3.3.1 기둥의 피복두께

기둥의 화재 시 설계강도는 층마다 접합이 이뤄지는 모듈러의 특성상 유효 좌굴 계수는 Fig. 6(a)와^{[8],[13]} 달리 Fig. 6(b)와 같이 0.7을 적용하였으며, 2.4절의 식 (7)에 따라 강도 비율로 표현하여, 그 비율(limit ratio)이 1을 넘지 않도록 검토하였다. 그 결과 Fig. 7과 같은 양상을 보이며, 1층·9층·18층의 경우 각각 425 °C, 548 °C, 955 °C에서 붕괴한다. 화재 발생을 고려할 때, 기둥은 전면이 노출될 수 있으므로 4면 노출 상황을 고려하여 피복두께를 산출해야 한다.

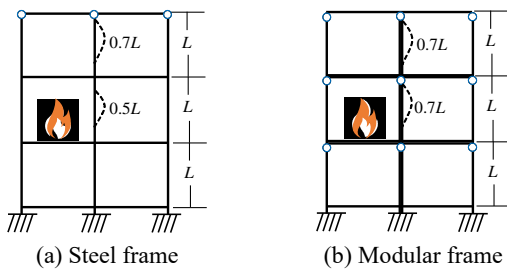


Fig. 6. Effective buckling length of column at fire

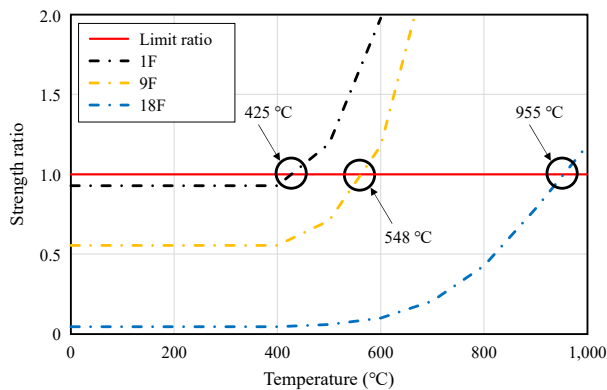


Fig. 7. Strength ratio-temperature curve for each floor of column

위의 한계온도를 토대로 피복두께를 산출하면 1층, 9층, 18층 기둥의 경우 각각 50 mm, 38 mm, 15 mm로 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 공칭화재곡선일 때, 각 부재는 3시간 이후 한계온도에 도달하므로 그 성능을 만족하는 것을 볼 수 있다.

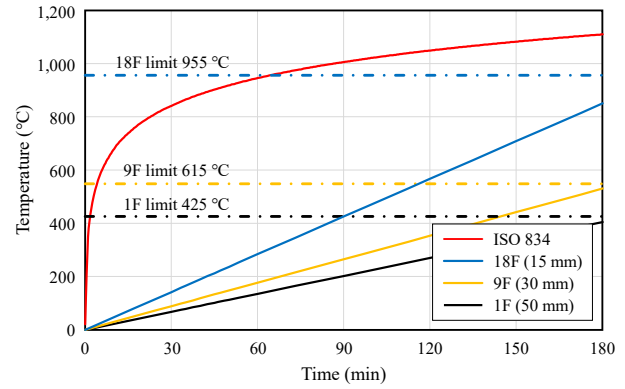


Fig. 8. Time-temperature curve for each floor of column with nominal fire curve

3.3.2 보의 피복두께

보의 경우 바닥보(FB)와 천장보(CB)에 따라 그 설계식이 다르다. 바닥보의 경우 콘크리트 슬래브가 시공되기 때문에 완전 횡지지이므로 2.4절의 식 (5)로 설계강도가 산출된다. 바닥보는 Class 3 부재로 탄성 휨모멘트 강도로 반영되며^[8], 화재 시 설계 휨강도는 Fig. 9과 같은 양상을 보이며, 605 °C에서 붕괴한다.

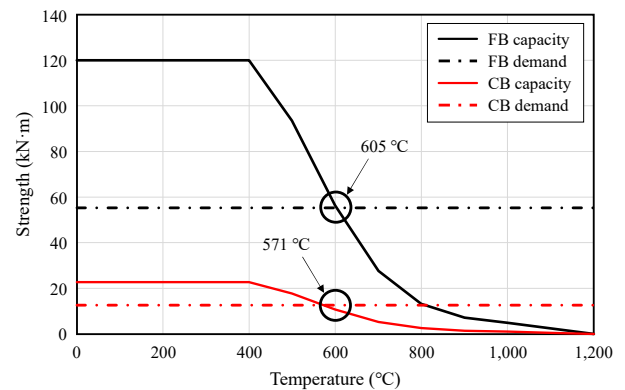


Fig. 9. Strength-temperature curve for each beam

천장보의 경우 모듈러의 특성상 상부 바닥보와 접합되면서 천장보의 상부 플랜지가 노출되지 않으므로 3면 노출로 볼 수 있으며, 천장 조이스트로 횡지지가 되지만, 완전 횡지지로 보기 어렵기 때문에 횡비틀림 좌굴강도로 설계강도가 산정된다^[8]. 천장보는 바닥보와 마찬가지로

로 Class 3 부재이며 화재 시 설계 휨강도는 Fig. 9과 같은 양상을 보이며, 571 °C에서 붕괴한다.

위의 한계온도와 2.4절의 식 (6)을 토대로 전단에 대해 검토한 결과 Table 8과 같이 별도로 전단강도에 대한 검토를 하지 않아도 되며, 피복두께는 바닥보와 천장보 모두 50 mm로 산출된다. Fig. 10에서 공칭화재곡선일 때, 바닥보와 천장보는 3시간 이후 붕괴온도에 도달한다.

Table 8. Result of the shear strength for each beam

Member	Floor	Strength* (kN)	Demand (kN)	Result
Floor beam	1F	43.83	32.33	OK
	9F		30.72	
	18F		28.32	
Ceiling beam	1F	22.86	8.68	OK
	9F		10.87	
	18F		8.68	

*The strength is the value at the limit temperature of bending.

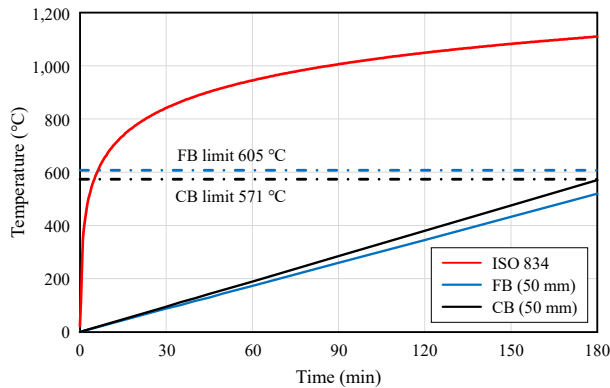


Fig. 10. Time-temperature curve for each beam with nominal fire curve

보의 설계 결과 천장보·바닥보의 피복두께가 50 mm로 산출되어 이를 절감하기 위한 설계를 실시하였다. CB-C와 FB-C의 부재를 각각 C-150×100×12/12, C-250×100×12/12로 변경한 결과 Fig. 11과 같이 부재의 구조성능이 향상되면서 한계온도도 Fig. 9 대비 58 °C(바닥보), 46 °C(천장보) 상승하였다. 이를 토대로 피복두께를 50 mm에서 30 mm로 절감하였다. 변경된 피복두께는 Fig. 12와 같이 성능을 만족하며, Fig. 13(b)와 같이 모듈의 실면적 확보와 내화에 필요한 석고보드 물량 절감이 가능하다. 이러한 방식으로 성능기반 내화설계는 구조부재 성능에 따라 내화 피복을 유동적으로 변경할 수 있다.

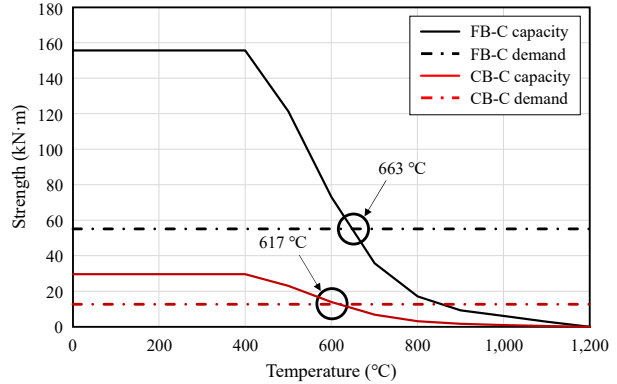


Fig. 11. Strength-temperature curve for FB-C and CB-C

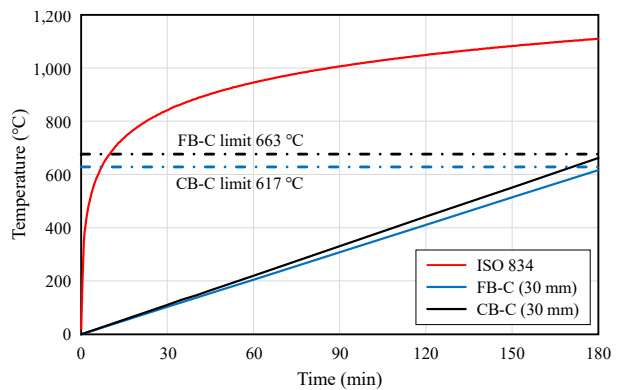


Fig. 12. Time-temperature curve for FB-C and CB-C with nominal fire curve

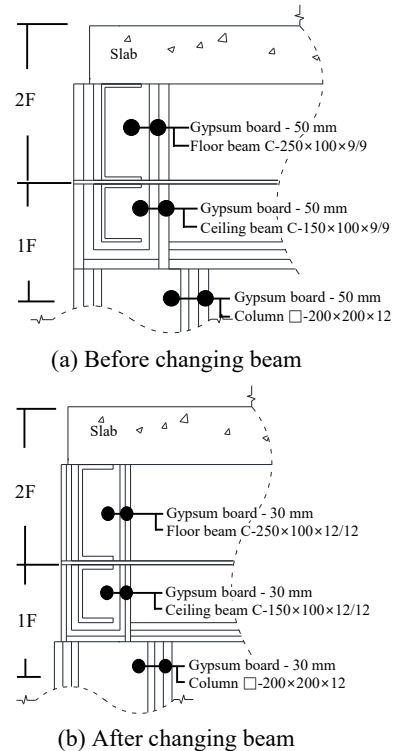


Fig. 13. Upper and lower module section (1F - 2F)

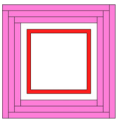
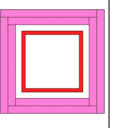
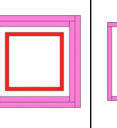
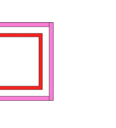
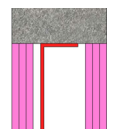
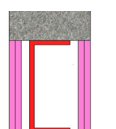
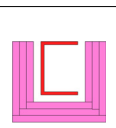
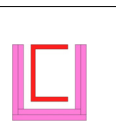
4. 내화설계 결과

4.1 내화피복두께 산출결과

3장의 설계를 반복한 결과 전체 내화피복 산출결과는 Table 9과 같다. 기둥은 모듈의 생산성을 고려하여 층별로 피복두께가 유사하게 산출되는 층끼리 묶어서 적용하였다.

바닥보와 천장보의 경우 석고보드 30 mm를 일괄 적용할 수 있으며, 기둥의 경우 층별로 소요하중에 따라 두께가 다른 것을 볼 수 있다. 건설기술연구원의 내화구조 인증제품을 참고하면^[4] 대부분 제품이 보와 기둥에 57 mm 이상으로 3~4장의 석고보드를 부착한 것에 비해 성능기반 설계 후 확연히 그 두께가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Calculation result of fireproof coating thickness

Member	Design method			
	Specification-based design	Performance-based design		
		1F - 6F	7F - 15F	16F - 18F
Column	 57 mm	 50 mm	 38 mm	 15 mm
Floor beam*	 57 mm	 30 mm		
Ceiling beam*	 57 mm	 30 mm		

*The uncovered side is the joint of the module.

4.2 내화성능 비교

사양기반 내화설계와 성능기반 내화설계 간의 구조 성능을 비교한 결과 사양기반 내화설계는 과설계 상태인 것을 확인하였다. Fig. 14은 1층, 9층, 16층의 화재 발생 후 3시간일 때, 모듈 기둥의 압축강도를 비교한 결과

이다. 고층으로 갈수록 사양기반 내화설계는 과설계된 상태이며, 특히 16층에서 사양기반 내화설계는 소요하중 대비 약 8.4배 이상 과설계된 것을 볼 수 있다.

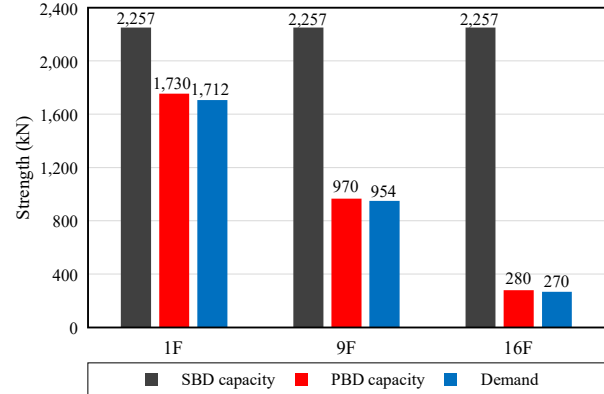


Fig. 14. Comparison of compression strength after 3 hours of fire for each floor of column

5. 결론

본 연구에서는 Eurocode 3에 기반하여 상세설계법을 통해 ISO 834 공칭화재곡선을 채택하여 단위 부재의 화재 시 설계강도와 소요강도의 관계를 통해 한계온도를 구하여 내화피복 설계 후 사양기반 설계의 피복과 비교하였다.

성능기반 내화설계를 진행한 결과 1층에서 6층까지 50 mm, 7층부터 15층까지 38 mm, 16층에서 18층까지는 15 mm의 피복두께를 산출하였으며, 바닥 보 및 천장 보의 전 층 공통으로 30 mm의 피복두께를 산출하여 사양기반 내화설계 대비 모듈당 최대 56 %를 절감하였다. 두 설계기법의 구조성능을 비교하면 사양기반 내화설계는 최상층에서 약 8.4배 이상 과설계 상태인 것을 확인하였으며, 성능기반 내화설계의 필요성을 강조하였다.

본 연구는 별도의 실험 없이 설계기준을 토대로 진행하였기 때문에, 추후 연구에서 모듈러 건축에 적용하기 위한 부재나 모듈 단위의 실험에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2022년 한국연구재단 이공학개인지초연구(NRF-2022R1F1A1075815) 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Lawson, R.M., Ogden, R., and Goodier, C.I. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, USA.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Rules on Standard for Evacuation and Fire Protection of Buildings*, Korea (in Korean).
- [3] Cho, B.-H. (2021) *Understandings of Modular Construction*, Chapter 12: Fire Performance of Modular Construction, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [4] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2021) *Current Status of Recognition of Fire Resistant Structures*, Korea (in Korean).
- [5] Paneni, C. (2018) *Development of Fire Engineering Solutions for Modular Construction*, Ph.D. Dissertation, The University of Queensland, Australia.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Steel Structures Design Standard* (KDS 41 30 10: 2022), Korea (in Korean).
- [7] Kwon, K.-H., Shin, K.-J., Lee, J.-S., Noh, D.-H., and Lee, K.-M. (2021) Evaluation of Fire Resistance of Square Steel Pipe Structural Members According to Coating Type of Fire Resistance Cover, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.3, pp.181-190 (in Korean).
- [8] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design* (EN 1993-1-2: 2005), Belgium.
- [9] KSSC, and Architectural Institute of Korea (2022) *Guidelines of Performance-Based Structural Fire Design for Steel Structure*, Korea (in Korean).
- [10] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022) *Design Load for Buildings* (KDS 41 12 00: 2022), Korea (in Korean).
- [11] European Committee for Standardization (2002) *Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire* (EN 1991-1-2: 2002), Belgium.
- [12] Franssen, J.-M., and Real, P.V. (2012) *Fire Design of Steel Structures*, John Wiley & Sons, Germany.
- [13] Koo, J.H., Lee, C.-H., Shin, D.J., and Ahn, J.K. (2021) An Evaluation of Design Equations for Steel Column at Elevated Temperatures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.1, pp.21-29 (in Korean).

요약: 본 연구에서는 Eurocode 3에 기반하여 3시간 내화가 적용된 모듈러 건축물의 성능기반 내화설계를 진행하였다. 18층 규모의 예제 건물을 통해 부재의 구조성능을 기반으로 내화피복을 결정하는 상세설계법을 통해 Robot 소프트웨어를 활용하여 기존의 사양기반 내화설계와 비교하였다. 구조부재의 설계는 기둥의 경우 압축과 휨, 보의 경우 휨과 전단에 대해 검토하였다. 그 결과 기둥의 경우 층별로 필요한 내화 피복두께가 달랐으며, 보의 경우 기존의 57 mm에서 30 mm까지 절감하였다. 16층에서 기둥의 구조성능을 비교한 결과 사양기반 내화설계는 소요하중 대비 최대 8.4배 이상 과설계가 된 것을 확인하였고, 이를 통해 성능기반 내화설계를 적용하여 내화피복량을 절감하여 경제성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

핵심용어: 3시간 내화, 모듈러 건축물, 성능기반 내화설계, 로봇 소프트웨어, 유로코드 3
