

철골 및 합성기둥 내화성능 확보를 위한 내화페인트 열적 물성치 규명과 소요두께 제안

김선희¹ · 옥치열² · 최성모³

서울시립대학교 건축공학과 공학박사¹, 한국건설기술연구원², 서울시립대학교 건축공학과 교수³

Clarification of the Thermal Properties of Intumescent Paint and Suggestion of the Required Fire Protection Thickness for Steel and Composite columns

Kim, Sun-Hee¹ · Chi Yeol Ok² · Choi, Sung-Mo³

¹Ph. D, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Korea

²Korea Institute of Construction Technology, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Korea

Abstract: Other countries(USA, Europe) have performed the fire resistance design of buildings by the alternative performance design methods, which are based on fire engineering theories. However, in Korea, the process on the alternative fire resistance performance design has only suggested without any applications for real steel structures. Therefore, In the case of steel structures stagnant research on refractory measures face difficulties in introducing fire resistance design. In this study, first of all, Intumescent paint was analyze the thermal properties(thermal conductivity, specific heat and density). In Sequence, using the section factor by H-standard section propose of section concrete filled steel tube and hollow. finally presents a reasonable thickness Intumescent paint takes time to target performance of the proposed cross-section steel tube.

Key Words: Standard Section, Section factor, Intumescent paint, Fire protection thickness, Thermal properties

1. 서론

1.1 국내 내화인정 방법

건설재료의 개발과 신기술공법이 개발됨에 따라 이전에는 구현할 수 없었던 형태의 건축물들이 소개되고 있다. 이러한 건축 경향은 복합화, 대형화되면서 건축 전반의 기술 발전이 하루가 다르게 가속화하고 있다. 그럼에도 국내에서는 아직까지도 사양에 기반한 내화설계가 중심이 되어 비경제적으로 내화피복이 사용되고 있다. 즉, 다양한 건축물의 특성을 충분히 반영하여 내화설계가 이루어지지 않고 있으므로 불가피하게 계획을 변경하게 되거나 또는 불필요하거나

과한 기준을 적용하여 내화피복을 적용하고 있는 실정이다. 한편, 국외에서는 성능위주설계를 도입하여 이러한 문제를 해결하고 있다. 현재 국내에서도 내화 성능설계법 적용을 위한 다양한 연구가 진행 중이며, 성능기반 설계법으로 변화하고자 하는 움직임이 지속적으로 소개되고 있다. 성능적 내화설계법은 사양적 내화설계법과는 달리 설계대상 건축물의 여러 조건(화재실과 개구부의 크기, 내벽 재료의 특성 등)을 고려하면서 구조부재에 요구되는 화재시 성능(내화성능 목표수준)을 설정함과 동시에 일어날 수 있는 화재성장 및 화재시 부재의 열적·역학적 성상을 해석적으로 예측하고 그 결과에 근거하여 설정한 목표수준을 달성하기 위한 수단을 개별 건축물의 다양한 조건에

주요어: 표준단면, 단면계수, 내화 페인트, 내화피복두께, 열적 성질

Corresponding author: Choi, Sung-Mo

Department of Architectural Engineering, University of Seoul, 90 Jennong-dong, Dongdaemun-Gu, Seoul 130-743, Korea.
Tel: +82-2-6490-5416, Fax: +82-2-6490-2749, E-mail: smc@uos.ac.kr

Received January 28, 2015 / Revised March 3, 2015 / Accepted March 3, 2015

따라 합리적으로 입안하는 설계방법이다. 국내의 현 건축법 내에서 내화구조로 인정 및 활용할 수 있는 방안은 다음 표 1과 같이 다섯 가지로 구분된다.

Table 1. Fire Resistance Structure Accreditation Method

No.	인증 방법	내용	비고
1	개별 인증	한국건설기술연구원장이 건설교통부장관이 정하여 고시하는 내화구조의 성능기준에 적합하다고 인정한 것 (대상건물에만 적용가능)	제정 1999
2	표준 인증	한국건설기술연구원장이 인정한 내화구조 표준으로 된 것	개정 2005
3	KS 규격화	산업표준화법」에 따른 한국산업규격(☉)으로 내화성능이 인정된 구조로 된 것	개정 2005
4	성능적 내화 설계법	한국건설기술연구원장이 인정한 성능설계에 따라 내화구조의 성능을 검증할 수 있는 구조로 된 것	개정 2006
5	일반화 인증	한국건설기술연구원장이 건설교통부장관이 정하여 고시하는 내화구조의 성능기준에 적합하다고 인정한 것 (인증부재는 모든 구조물에 적용가능)	제정 2012

『성능적 내화설계 방법』 조항이 2006년 추가 개정되면서, 내화성능을 가진 합성구조의 내화성능설계 및 현장 적용의 가능성이 높아졌다 할 수 있다. 그 중 내화구조부재 개별인증 방법과 일반화인증방법은 품질시험을 반드시 거쳐야 하는 번거로움이 있으며 국가에서 인정받은 가열로에서 시험을 거쳐야 된다. 현재 국내의 내화인증 시험방법에는 표 2와 같이 재하가열 시험과 비재하 가열시험으로 구분된다.

Table 2. Fire Resistance Test Method

부재	하중 조건	변형한계	온도(℃)	
			허용	한계
보	재하	D=L2/400d (mm)	/	/
		dD/dt=L2/9000d (mm/min)		
	비재하		538 (1000°F)	649 (1200°F)
기둥	재하	C=h/100 (mm)	/	/
		dC/dt=3h/1000 (mm/min)		
	비재하		538 (1000°F)	649 (1200°F)

여기서 문제는 국내 가열로 장비로는 실대 부재크기의 시험이 한계가 있고 H형강을 제외하고 각형과

원형강관에 대한 표준단면 크기가 제시되고 있지 않다는 점이다. 이러한 이유로 일회적(一回的)인 실험값에 의존하여 매년 인증실험을 진행하고 있어 막대한 시간과 비용이 소비되고 있다. 즉, 국내에서는 강구조물의 경우 내화대책에 대한 연구가 정체되어 있어 내화성능설계 도입에 어려움을 갖고 있다. 따라서 성능위주 설계법을 추진하고 있는 현 시점에 기존 내화인증 실험결과를 기반으로 열적특성을 분석하고 표준단면을 제안하고자 한다.

1.2 철골기둥의 내화성능 기준

플랜트 산업의 발달과 건축 산업의 초고층화, 복합화로 밀접한 관계가 있는 내화도료 시장도 함께 성장하는 추세이다. 여기에 발 맞춰 국내 내화도료 시장 또한 90년대 90%이상의 내화도료를 수입에 의존하던 때와는 달리 지속적인 연구개발을 통해 국내 내화도료시장의 점유율을 늘려가고 있다. 특히 내화페인트는 내화뿔칠에 비해 건축물의 이미지를 그대로 살릴 수 있고 유지관리가 용이하다. 최근 내화페인트 인증 현황을 목표시간 별로 표 3에 정리하였다. 피복두께가 절감됨에 따라 시공성이 향상되며, 근래들어 3시간 내화성능 확보된 내화페인트가 개발되면서 고층 및 주요 구조물 적용됨에 따라 보다 효율적인 내화설계가 요구되고 있다. 하지만, 내화페인트가 도포된 구조물의 내화성능을 검토하기에 현실적으로 어려운 점이 있다. 국내·외로 내화페인트에 대한 열적특성을 제시한 자료 및 규준은 현재 전무하며, 내화 페인트의 열적거동에 대한 연구결과 또한 미흡한 수준이다. 이를 반영하듯이 내화페인트 인증 시에 물성치를 이용하여 성능을 예측하는 것이 아니라 개별적인 재료시험을 통하여 한계 및 허용온도 한계에 의해 성능을 평가하고 있다. 따라서, 내화페인트의 열적 특성을 파악하기 위한 자료로 열전달 해석을 통해 내화페인트의 열 상수(열전도율, 비열 그리고 밀도)를 예측, 검증하고자 한다. 또한 Section factor를 이용하여 강관(각형, 원형)의 표준단면을 제시하고 강관에 내화페인트가 도포될 경우 목표 내화시간에 따른 소요두께를 검토해 보고자 한다.

Table 3. Thickness of Intumescent Paint Status

철골기둥		철골 보	
내화성능 (hour)	피복두께 (mm)	내화성능 (hour)	피복두께 (mm)
1	0.70~0.75	1	0.70~0.85
2	2.75~2.90	2	1.95~3.55
3	17.40	3	17.25

2. 내화페인트 도료된 철골기둥의 내화성능

2.1 비재하 가열실험 개요

일반적으로 강구조 건축물에 사용되는 저 탄소강은 온도가 530℃를 초과하게 되면 구조내력이 급격히 저하되어 결과적으로 구조물의 붕괴로 이어지게 된다. 화재발생시 화재공간의 온도는 약 1,000℃내외까지 상승하게 되는데, 이 때 철골을 보호할 수 있는 피복재가 없는 상태에서는 약 20분 이내에 임계온도를 초과하여 구조적 기능을 보장할 수 없게 된다. 철골 피복용으로 사용되는 내화도료는 화재 시 철골부재가 고온에 노출되는 것을 막아 구조적 성능을 유지할 수 있도록 한다. H형강 철골기둥에 4가지 타입(도막두께)의 내화페인트를 갖는 실험체를 대상으로 표 4와 같이 비재하 가열실험을 수행하였다.

Table 4. Experimental Parameters

Case	내화성능 (min.)	피복 두께(mm)	특징	구성 재료
a1	60	1.90	무기질 불연재	액상규산 나트륨
a2	120	4.25		
b1	60	0.7	유기질 불연재	아크릴계
b2	120	3.35		

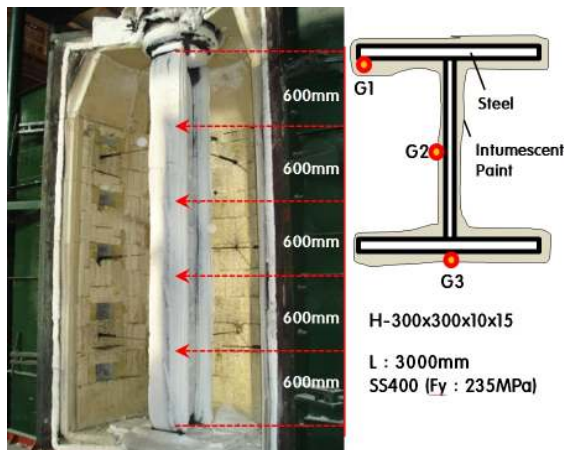


Fig. 1 Specimens Shape and the Temperature Measuring Location

내화페인트 도장시스템은 방청도료+내화도료+상도도료 구성되는데 방청도료는 일반적으로 한국산업표준을 만족하는 사양에 따라 사용되며, 상도도료는 내화도료를 보호하기 위해 내구성이 있는 불소수지도료, 아크릴 실리콘수지 도료, 폴리우레탄수지도료 등이 사용되고 있다. 국내에서 사용하는 내화페인트는 무기, 유기, 수성, 유성으로 분류 할 수 있다. 유성유기도료는 톨루엔, 자일렌 등의 유기화합물을 용제로

사용하는 도료로서 국내 내화도료의 대부분이 여기에 속한다. 실험체 형상은 내화구조 인정 및 관리규정 규격 크기로 H-300x300x 10x15(mm)이며 실험체 유효가열 길이는 3m이다. 열전대 측정위치 및 실험 경계조건은 그림 1과 같다. 기둥용 비재하 가열로에서 진행됐으며 시험은 KS F 2257-1을 바탕으로 수행되었다.

2.2 단면 내 온도분포 및 내화성능

비재하 가열실험은 설치된 총 12곳의 열전대의 평균온도가 허용(538℃) 그리고 한계온도(649℃)를 만족해야 한다. H형강 기둥에 설치된 모든 열전대 온도분포를 비교하면 약 10도 내외로 유사하여 관측되어 실험결과와 분석에 사용될 자료는 측정된 평균온도로 사용하고자 한다. 그림 2는 각 내화 페인트에 따른 내화시간-온도분포를 정리하였다.

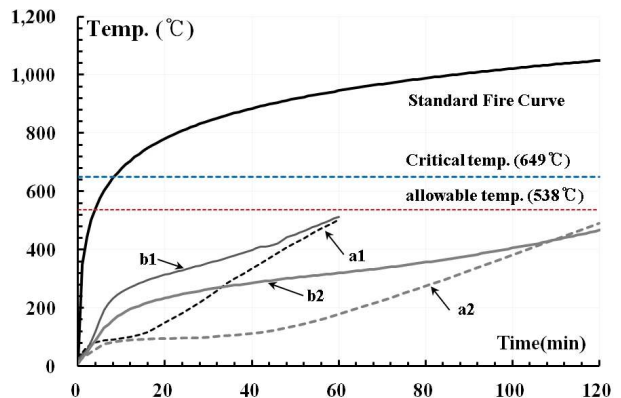


Fig. 2. Sectional Temperature Distribution

모든 실험체의 온도분포는 한계, 허용온도를 초과하지 않아 목표내화시간에 도달하였다. 무기질 내화페인트(a)의 경우 가열20분 전까지 온도상승 없이 유지되다 일정 순간에 온도 상승이 가파르게 나타났다. 반면에 유기질 페인트(b)의 경우 가열 초기부터 표준 가열 곡선과 유사하게 온도상승세를 보이다, 가열 20분 이후부터는 온도상승 기울기가 완만하게 나타는 특징을 보였다.

3. 내화페인트 열적 특성 규명

3.1 해석개요 및 방법

H형강 철골기둥에 내화페인트를 1,2시간 목표성능에 도포한 뒤 비재하 가열 실험을 진행 하였으며, 각 측정된 온도 데이터를 통해 내화페인트의 열상수를 예측해 보고자 한다. 각 재료에 따라 열적 상수가 제시되고 있지만 내화페인트의 경우 열적거동 예측이

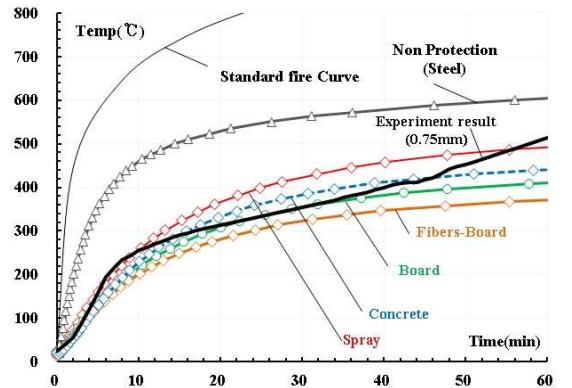
어려워 국내외적으로 명확하게 제시되지 않고 있다. 열전달 해석 프로그램은 ABAQUS(ver6.13)을 사용하였다. 강재의 경우 Euro -code 4에서 제시된 열 상수를 인용하였고 내화페인트의 비열, 열전도율은 표 5와 같이 경우의 수를 가정하였다. 가정된 근거는 내화페인트의 열적반응 성질을 볼 때 가열 초기 단열층이 생성되는 점과 고온에 장기 노출된 이후부터 탈화층이 발생하는 과정을 감안하여 건설재료로 사용되는 콘크리트와 일반 내화 피복재(뿔철계, 보드계)의 열 상수(열전도율, 비열)를 대처하여 해석을 시도하였다. 2장에 정리된 실험결과와 해석결과를 비교하여 내화 페인트 열상수를 예측하고자 한다.

Table 5. Analysis Parameter-Thermal Constant

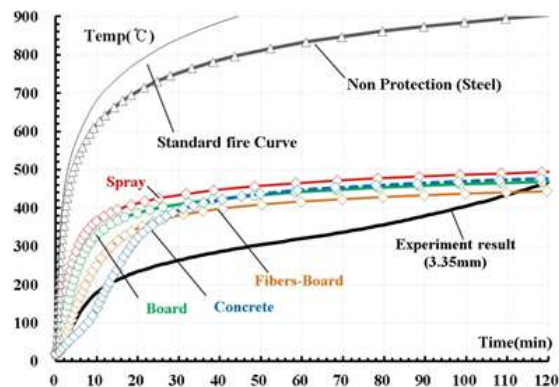
ALT	Thermal Conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kg K)	Note	Thick. (mm)
0	Non Protection	Non Protection	ONLY Steel Col.	-
1	2-0.2451($\theta_c/100$)+0.0107($\theta_c/100$) ² (20℃ ≤ θ_c ≤ 1200℃)	890+56.2($\theta_c/100$)-3.4($\theta_c/100$) ² (20℃ ≤ θ_c ≤ 1200℃)	Concrete	0.75
				3.35
2	0.12	1200	Spray	0.75
				3.35
3	0.15	1200	Board	0.75
				3.35
4	0.20	1700	Fiber board	0.75
				3.35

3.2 온도 분포 비교

해석결과 무피복 철골(ALT 1)의 경우 30분 내에 한계온도 500도에 도달되는 것을 알 수 있었다. 내화페인트의 열 상수를 예측하기 위한 해석모델로 그림 3과 같이 내화피복재에 의한 단면온도 분포는 유사한 경향성을 띠고 있다. 도막두께가 두꺼운 경우 해석결과는 보수적인 단면 온도 분포를 갖고 있다. 이러한 원인은 내화페인트가 고온에 노출되면서 단열층이 형성되는 시기는 약 300℃인데 상대적으로 피복두께가 두꺼워짐에 따라 온도차단 구간(성능)이 확보되면서 일반 내화피복재에 없는 열적 거동으로 보여진다. 도막두께가 0.75mm인 경우, 콘크리트와 내화보드 열 상승 해석결과와 가장 유사한 거동을 보이는 것으로 평가됐다. 한편, 실험결과에 의하면 가열 40분 이후부터 온도가 급격이 상승되는 것을 알 수 있는데 이런 현상은 내화페인트 단열층에 열 변형(crack)으로 강관이 직접 고온에 노출된 것으로 짐작된다.



(a) b1 - Thickness: 0.75mm



(b) b2 Thickness : 3.35mm

Fig. 3 Results of Heat Transfer Analysis

3.3 내화페인트 물성치 선택 및 비열 산정

지금까지 내화페인트의 열 상수가 제시되지 않아 내화피복재로 사용되는 콘크리트, 뿔철계, 보드계의 열상수를 대처하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 실험결과(내화페인트)와 비교하여 열 상수 범위를 제안하고자 한다.

(1) 열전도율(Thermal Conductivities: W/mk)

Joel KRUPPA(2009)은 피복된 부재의 열전도율을 식(1)과 같이 제안하였다. 열 유속과 열 에너지를 온도와 발생된 온도차를 미소 면적으로 나눠 열전도율을 구하게 된다. 내화 페인트가 도포된 실험결과를 적용하여 내화 페인트의 열전도율을 계산해 보면 약 0.15~0.9범위에 있으며 그 수치는 기존 내화 피복재와 매우 유사한 수치이다. 따라서 그림 4와 같이 온도에 따른 내화페인트의 열전도율의 상-하한 범위를 제안한다.

$$\lambda_p(t) = \left[\frac{d_p V c_a p_a}{A_p} \times \left(a + \frac{\varnothing}{3} \right) \times \frac{1}{(\theta_g - \theta_a) \Delta t} \right] \times [\Delta \theta_a + (e^{\frac{\varnothing}{10}} - 1) \Delta \theta_g] \quad (1)$$

- λ_p : Thermal Conductivities
- V : Volume of members
- C_a : Thermal Conductivities of steel
- P_a : Specific heat of steel
- A_p : Fire exposed area
- a : Constant
- θ_a : Furnace Temp.
- θ_g : Specimen Temp.

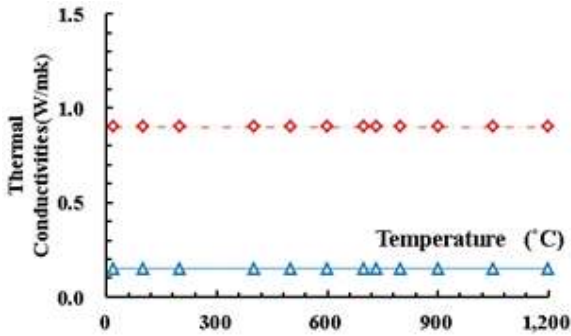


Fig. 4 Thermal Conductivity

(2) 비열 (Specific Heat: J/kgK)

비열의 경우 1kg을 1°C 올리는데 필요한 에너지를 말하며 비열에 질량을 곱하면 열용량이 된다. 즉 앞서 계산된 열용량에 내화페인트의 질량을 곱하여 비열을 유추할 수 있다. 이렇게 유추된 비열은 약 900~1200사이 에 있다. 이 수치는 일반 콘크리트와 내화 보드류 비열 사이인 것을 확인된다. 또한 내화페인트는 합성수지 원료 조합으로 만들어지기 때문에 다양한 합성수지의 비열을 조사해보면 약 900~1250범위에 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서 내화페인트의 비열을 그림 5와 같이 상·하한치를 설정하였다.

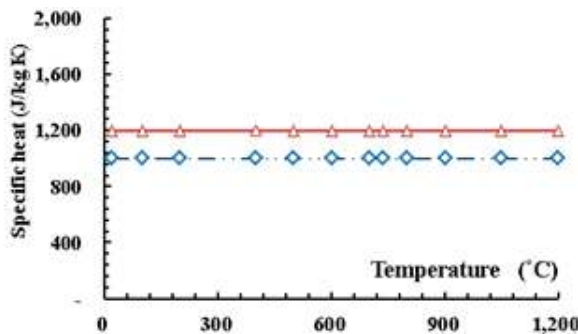


Fig 5. Specific heat

(3) 밀도 (Density: kg/m³)

내화페인트는 고온에 노출될 경우 상온 시 도막두께에 비해 약 10~20배 증폭된 두께를 갖는다. 즉 열에 의해 팽창되고 단열층이 생성된다. 이러한 점을 살펴보면 내화페인트의 밀도는 온도와 반비례관계에

있음을 알 수 있다. Bailey(2013) 연구에 따르면 내화페인트의 밀도는 20°C일 때 1,300kg/m³, 900°C일 때 10kg/m³ 수준이라고 제안한 바 있다.

J. K. Farooqi and M. A. Sheikh(2005)는 부재의 비열을 인용한 밀도를 식(2)와 같이 제안하였다. 앞서 산정된 비열을 활용하여 역으로 상온시 내화페인트의 밀도를 산정하면 약 1094.78kg/m³으로 추정되었다. 하지만 온도에 따른 피복재의 무게를 측정(예측)할 수 없어 그림 6과 같이 상온 시 1200kg/m³을 시작으로 10kg/m³까지 온도와 반비례를 갖는 밀도를 제안한다.

$$C\rho_c = C\rho_f V_f + (1 - V_f)C\rho_m \quad (2)$$

- C : Density
- ρ_c : Unit mass of steel
- ρ_f : Unit mass of the fire protection material
- V_f : fiber-volume fraction and the subscripts

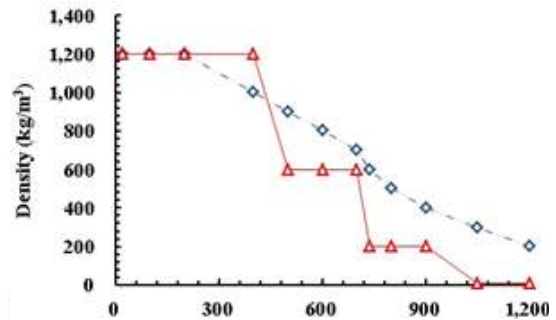


Fig. 6 Density

4. 비재하 인증시험용 표준단면 제안

4.1 H형강 표준단면

비재하 내하 시험을 위해 건설기술연구원에서는 표준단면을 정해 사용하고 있다. 이 표준단면은 단 하나의 대표가 되는 단면에 대한 실험의 결과를 범용으로 쓸 수 있도록 여러 조건을 고려하여 결정된 것이다. 현재 H형강에 대하여 결정된 표준단면은 300×300×10×15(mm)이고 해당 단면으로 시험하여 인증 받은 내화페인트와 그 두께는 타 기둥에도 그대로 적용할 수 있다. 이는 앞서 언급한 내화시험에 드는 많은 시간과 비용을 절약할 수 있고 인증의 효율화에 큰 기여를 하는 한 부분이라 볼 수 있다. 언급된 근거로 인해 결정되지 않은 일반강관과 콘크리트 충전형 강관의 표준단면을 다음과 같이 제시하고자 한다. 기준으로는 내화성, 경제성, 시공성 세 가지로 구분하였고 합성기둥의 경우 일반적으로 많이 사용되

는 크기도 ‘수요’라는 용어를 사용하여 고려하였다. 먼저 내화성은 Section factor로 판단하였다. 선행 강부재의 온도증가 속도는 단위 길이당 부재의 면적에 대한 노출(Hp/A)에 따라 결정된다. 단위는 m⁻¹이고, 단면계수(Section factor)로 정의된다. 열에 노출되는 단면이 클수록 Section factor는 커지게 되고 부재의 온도 상승도 큰 것이다. 이는 화재 시 필요한 내화페인트의 두께가 두꺼움을 의미한다. 정리하자면, Section factor와 소요 내화 두께는 비례하는 관계이다. 두 번째로 경제성은 강관량을 기준으로 판단하였다. 동일한 단면에서 폭두께비가 커지면 강관량은 작아지게 되고 비록 그 부분을 콘크리트가 채우더라도 콘크리트에 비해 강관의 자재비가 일반적으로 더 비싸기 때문에 더 경제적이라고 보았다. 반대로 폭두께비가 작아지면 강관량은 많아져 경제적으로 불리하게 된다. 마지막으로 시공성은 합성기둥에서는 강관과 달리 콘크리트를 채워 넣어야 하므로 시공상의 용이성을 뜻하고 수요는 범용적으로 많이 사용되는 크기를 의미한다. H형 표준단면 크기(유효가열 길이(L)3m 동일)를 기준으로 Section factor를 산정해 표 6에 나열하였다. 비교대상은 기성제품으로 생산되는 H형강 중 표준형상 단면적이 유사하고, 국내 가열로에 크기에 한해 비교단면을 설정하였다.

Table 6. Standard H-shaped Cross-section Hp/A Comparison

H	B	tw	tf	A(m ²)	Hp(m)	Hp/A(m ⁻¹)
0.35	0.25	0.009	0.014	0.010	1.88	190.14
0.25	0.25	0.009	0.014	0.009	1.48	164.70
0.3	0.3	0.01	0.015	0.012	1.78	152.14
0.35	0.35	0.012	0.019	0.017	2.07	121.80
0.4	0.4	0.013	0.021	0.021	2.37	110.66
0.5	0.2	0.01	0.016	0.011	2.38	214.80

표준단면을 기점으로 단면이 커지거나 작아질 때 Section factor가 커지는 경향을 나타내고 있다. 즉 표준단면은 화재 시 안정적인 단면범위에 있는 것으로 검증되었다. 또한 표준단면은 언급했듯이 H-300×300×10×15이며 각 플랜지와 웨브의 폭두께비를 검토하면 약 27과 10 수준으로 기성 H형강 철골의 경우 플랜지, 웨브의 폭두께비는 최대 30 수준인 점을 감안하면 구조적 측면에서 안정적인 단면임을 알 수 있다.

4.2 강관 단면제한

강관의 단면 제한에서는 먼저 폭·두께비 제한을 고려해야 한다. 폭두께비는 표 7과 같이 강재의 항복강도와 탄성계수에 의해 설정되며, 내화인증에 정해진 강재강도는 SS400이다. 제한범위를 적용하여 폭두께비 한계치를 산정하면 원형 강관의 경우 95.9, 각형 강관은 44 수준으로 나타난다.

Table 7. Width Thickness Ratio Limits

타입	원형	각형
일반강관	0.11E/F _y → 95.5	1.49√E/F _y → 44.0
콘크리트 충전형강관	0.15E/F _y → 130.8	2.26√E/F _y → 66.7

이를 기준으로 크기별로 적절한 폭·두께비에 따른 단면을 표 8과 같이 설정하였다. 비교대상 단면을 기준으로 Section factor를 산정한 결과를 그림 7에 정리하였다.

Table 8. Hollow Steel Section Hp/A Comparison

	D(mm)	t(mm)	D/t	A(m ²)	Hp(m)	Hp/A(m ⁻¹)	
원형	300	12	25	0.011	0.942	86.76	
	300	10	30	0.009	0.942	103.40	
	300	8	38	0.007	0.942	128.36	
	300	7	43	0.006	0.942	146.20	
	300	6	50	0.006	0.942	169.98	
	300	5	60	0.005	0.942	203.29	
	350	12	29	0.013	1.099	86.25	
	350	10	35	0.011	1.099	102.89	
	350	8	44	0.009	1.099	127.86	
	350	7	50	0.008	1.099	145.70	
	350	6	58	0.006	1.099	169.49	
	각형	B (mm)	t (mm)	b/t	A (m ²)	Hp (m)	Hp/A (m ⁻¹)
		300	12	23	0.014	1.200	86.81
		300	10	28	0.012	1.200	103.45
300		9	31	0.010	1.200	114.55	
300		8	36	0.009	1.200	128.42	
300		7	41	0.008	1.200	146.27	
350		9	37	0.012	1.400	114.04	
350		8	42	0.011	1.400	127.92	
350		7	48	0.010	1.400	145.77	
400		10	38	0.016	1.600	102.56	
400	9	42	0.014	1.600	113.67		
400	8	48	0.013	1.600	127.55		

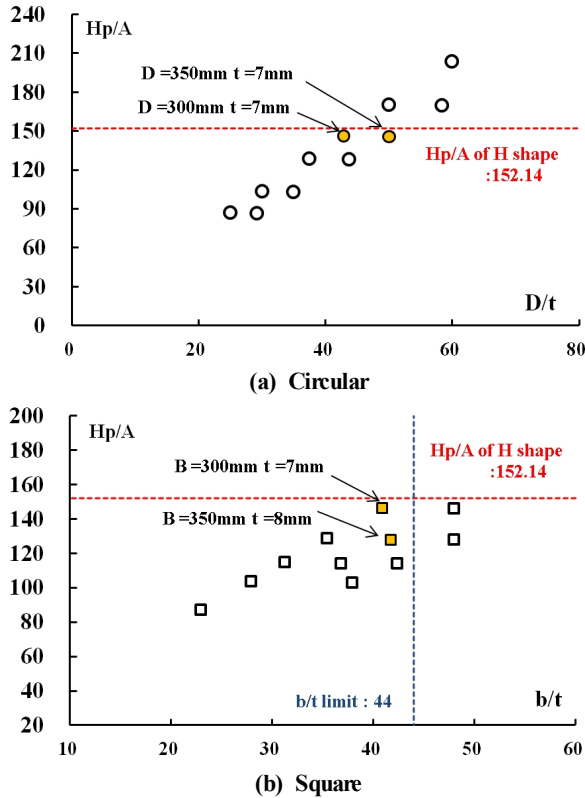


Fig. 7 Hollow Steel Section Hp/A Comparison

H형강과 동일하게 단면적 크기가 작을수록 큰 Section factor를 가졌고 더 두꺼운 내화 두께가 필요함을 의미한다. 즉 폭두께비가 클수록 더 소요 내화 두께가 큰 것으로 분석된다. 그림 3과 같이 폭두께비는 큰 단면이 낮은 Section factor를 가질 경우 내화 성능 면에서 매우 합리적인 단면이라 할 수 있다. 표준단면으로 선정된 H형 Section factor는 152이며 비교대상 중 그와 가장 근접한 수치에 있고, 폭두께비가 범위 내 존재하는 강관단면을 선정할 수 있다. 선정된 단면 중 강관 두께, Section factor가 가장 유사한 원형, 각형단면을 제안하면, 표 9와 같이 강관의 표준단면을 정리할 수 있다.

Table 9. Proposed Standard Steel Hollow Section

원형	각형

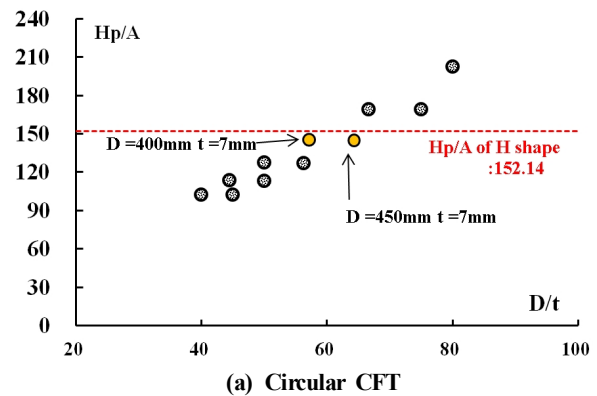
4.3 합성기둥 단면 제안

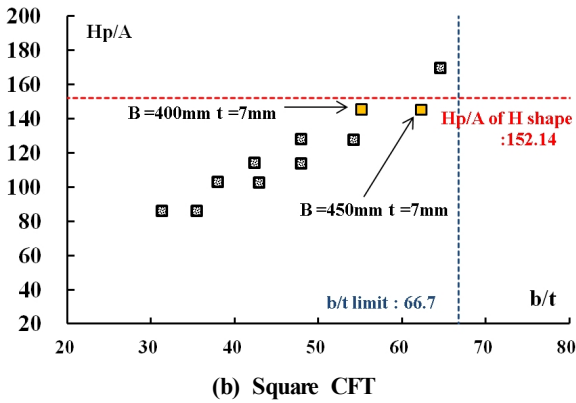
합성기둥의 경우, 앞서 분석된 H형강, 강관과는 다르게 내부에 콘크리트를 충전하는 특성이 있다. 따라서 콘크리트 충전성에 대한 문제를 고려하여 한 변의 길이와 최소지름 크기를 400mm으로 결정했다. 이외 모든 분석방법은 동일하게 하여 표 10과 같이 비교대상을 설정하였다.

Table 10. Composite Section Hp/A Comparison

	D(mm)	t(mm)	D/t	A(m ²)	Hp(m)	Hp/A(m ⁻¹)
원형	400	10	40	0.012	1.256	102.51
	400	9	44	0.011	1.256	113.61
	400	8	50	0.010	1.256	127.49
	400	7	57	0.009	1.256	145.33
	400	6	67	0.007	1.256	169.12
	400	5	80	0.006	1.256	202.43
	450	10	45	0.014	1.413	102.22
	450	9	50	0.012	1.413	113.32
	450	8	56	0.011	1.413	127.20
	450	7	64	0.010	1.413	145.04
450	6	75	0.008	1.413	168.83	
각형	B(mm)	t(mm)	b/t	A(m²)	Hp(m)	Hp/A(m⁻¹)
	400	12	31	0.019	1.600	85.91
	400	10	38	0.016	1.600	102.56
	400	9	42	0.014	1.600	113.67
	400	8	48	0.013	1.600	127.55
	400	7	55	0.011	1.600	145.40
	400	6	65	0.009	1.600	169.20
	450	12	36	0.021	1.800	85.62
	450	10	43	0.018	1.800	102.27
	450	9	48	0.016	1.800	113.38
450	8	54	0.014	1.800	127.26	
450	7	62	0.012	1.800	145.11	

분석한 결과 표준단면(H형강)과 동등한 Section factor를 갖고 폭두께비 범위 내 만족하는 충전형 단면을 그림 8과 같이 정리하며 표 11과 같이 최종 선정하였다.





(b) Square CFT
Fig. 8 Composite(CFT) Section Hp/A Comparison

Table 11. Proposed Standard CFT Section

원형	각형

5. 내화페인트 도막 두께 제안

비재하 상태에서 각 단면의 적절한 내화페인트 도막두께를 도출하고자 한다. 앞서 3장에서는 표준단면으로 제시된 H형강을 기준으로 원형과 각형강관 그리고 콘크리트 충전형 강관의 단면을 제안하였다. 제안된 단면의 내화피복 두께 산정은 식 (3)과 같이 온도변화 산정식을 이용하여 결정하였다. 단위시간당 받는 총 열용량(Q/T)과 부재온도(TC)가 538℃일 때 열용량이 같아지는 시점의 피복두께(L)을 역으로 산정하게 된다. 즉, 온도변화 산정식에 의해 단위시간당 내화성능 지표인 허용, 한계온도를 초과하지 않도록 두께를 산정하였다. 이때 총 열량(Q)은 콘크리트, 강관 그리고 내화 페인트의 열량의 합으로 산정되었다. 열용량은 비열과 질량의 곱으로 계산된다. 식 (3)으로부터 내화 페인트의 열전도율(k)이 클수록, 부재와 로 온도 차이(TH-TC)가 클수록, 열에 노출되는 면적(A)이 클수록, 내화페인트의 두께가 얇을수록(L), 부재의 온도 변화가 큰 것을 알 수 있었다.

$$\frac{Q}{T} = kA \times (TH - TC) / L \quad (3)$$

T : 단위시간
k : 내화페인트 열전도율
A : 노출단면
TC : 부재온도
C : 부재 비열
Q = 총열용량
TH : 노내온도
L : 내화재 두께

온도변화 산정식을 이용하여 제안된 표준단면의 각 목표 내화시간에 따른 피복두께를 추출한 결과 표 12와 같이 정리되었다. 전체적으로 강관에 비해 충전형인 경우 1/10정도 축소된 피복두께 사용이 가능했다. 또한 강관형상이 각형에 비해 원형일수록 내화피복 두께가 약 15% 더 소요되는 것으로 분석되었다. 각형에 비해 원형일수록 단면이 작아지므로 상대적으로 열용량이 축소되어 이와 같은 결과가 도출된 것으로 보인다. 일반강관의 경우 120분 이상부터는 시공이 불가능한 피복두께를 갖게 되어 더 이상 정리되지 않고 있다. 표 3에는 현재 내화 인증된 내화페인트의 두께를 정리한바 있다. 이때 인증된 내화페인트는 H형 표준단면에 도포된 결과이므로 직접적인 비교는 어렵지만 이론에 의한 내화 소요피복두께는 매우 보수적인 결과를 갖는 것을 알 수 있다.

Table 12. Proposed Fire-Resistant Paint Thickness

Case	IP Thick. (mm)					Q(J/K)
	60min	90min	120min	180min	240min	
Square -empty	18.0	25.0	38.0	-	-	70
Circular -empty	19.0	32.0	45.0	-	-	42
Square -CFT	1.8	2.6	4.0	6.2	9.1	913
Circular -CFT	2.0	3.3	5.1	6.2	9.5	653

6. 결론

본 연구에서는 현재 제시되지 않고 있는 강관의 표준단면을 제시하며 제시된 단면의 목표 시간당 필요한 소요 내화 피복두께를 산정하였다. 위의 결과를 토대로 성능위주 설계법을 추진하는 자료에 기초자료가 되고자 한다.

(1) 내화페인트(유기질, 무기질)가 도포된 H형강 기둥의 단면 온도분포를 분석한 결과 두 경우 모두 허용, 한계온도를 초과 하지 않았다. 한편, 내화시간에 따른 온도추세를 보면 무기질의 경우 온도 전이가 비교적 낮게 진행되는 특징을 나타는 것을 알 수 있었다.

(2) 비재하 가열실험을 통해 완성된 해석모델을 토대로 내화페인트의 열적성질을 분석하였다. 그 결과 내화페인트의 열전도율은 0.15~0.9사이에 존재하고 있으며, 비열은 약 900~1200사이에 있는 것으로 평가되었다.

(3) 내화페인트는 고온에 노출될 경우 열화층이 형성되어 초기 두께에 약 10배 이상 증가되는 열적 특성을 갖고 있다. 즉, 내화페인트의 밀도는 온도와 반비례 관계를 갖게 된다. 상온 상태(20℃)일 때 밀도는 약 1094.78kg/m³으로 추정된다.

(4) 국내 내화인증 표준단면은 H형강 한 가지 경우로만 제약되어 있어 Section factor (H형강의 Hp/A (m⁻¹)은 152)를 고려한 원형, 각형강관의 표준단면을 제안하였다. 제안된 표준형 강관 단면을 요약하면 아래와 같다.

Case	Diameter	Thickness	B(D)/t	Hp/A
Unit	(m)	(m)		(m ⁻¹)
Square -empty	0.3	0.07	41	146.27
Circular -empty	0.3	0.07	43	146.20
Square -CFT	0.4	0.07	55	145.40
Circular -CFT	0.4	0.07	57	145.33

(5) 제안된 표준단면의 소요 내화페인트 도막두께를 분석한 결과 강관에 비해 콘크리트 충전형 강관인 경우 1/10정도 축소된 피복두께에도 내화성능 확보가 가능한 것으로 평가되었다.

(6) 강관형상이 각형에 비해 원형일수록 내화피복 두께가 약 15% 더 소요되는 것으로 분석되었다. 이는 각형에 비해 원형일수록 단면이 작아지므로 상대적으로 열용량이 축소된 결과로 판단된다.

References

Andrew H. Buchanan, (2001), *Structural design for fire safety*, John Wiley & Sons
 Architectural Engineers, (2010), *Building Construction Technology*, Gimundang
 Building Evacuation, (2006), Rules on criteria such as structural fire protection construction standard specification.
 David Rush. (2013), Fire performance of unprotected and protected concrete filled steel hollow structural Sections, University of Edinburgh
 Fireproof structure recognition and management rulebook, (2012), Korea Institute of Construction Technology
 Rahmanian I, Wang Y. (2009), Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures A Combined

Experimental and Numerical Approach, ACTA Poly technical Vol. 49 No. 1
 Joel K , Sensitivity Study of a Simplified Assessment Method- characterization of Fire Protection Materials of Steel Elements, Fire Safety Science-Proceedings of the sixth international symposium, pp 915-926
 Farooqi J. K. and Sheikh M. A. (2005), Finite Element Modeling of Thermal Transport in Composite Unit Cell using ABAQUS/CAE, 2005 ABAQUS Users' Conference pp 1-15
 Ding J. and Wang Y. C. (2008), Realistic modelling of thermal and structural behaviour of unprotected concrete filled tubular columns in fire, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64 No. 10 pp 1086-1102
 Hwang J. W., Ha S. H., Lee Y. H., Kim W. J. and Kwak H. G. (2013), A Numerical Model to Evaluate Fire-Resistant Capacity of the Reinforced Concrete Members, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 5, pp. 497~508
 Rules on criteria such as the evacuation of the building structural fire protection, enforcement, 17/03/2012, Land, Transport and Maritime Enforcement Ordinance No. 433
 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Notice No. 2012-625, recognition and management standards, recognition and management of refractory structure detailed operating instructions of the refractory structure.