

강구조 부재의 표면온도 산정 및 내화피복두께에 관한 연구 Study on the Surface Temperature and Fire Protective Thickness for Structural Steel Elements at Fire Conditions

권인규

In-Kyu Kwon

강원대학교 소방방재학부
(2010. 4. 16. 접수/2010. 8. 16. 채택)

요 약

건축물 주요구조부의 내화성능은 인명과 재산보호를 위해서 반드시 확보되어야 하고, 일정 규모의 가열로에 의한 재하가열시험과 비재하가열시험으로 검증, 적용되고 있다. 이러한 내화성능의 검증에는 많은 비용, 시간이 소요되므로 합리적인 부재와 공법의 개발이 활발하게 이루어지지 못하는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 H형강을 바탕으로 콘크리트 및 방화석고보드를 활용한 기둥부재와 보부재를 제안한 후, 각각을 표준온도가열곡선의 열원으로 강재의 표면온도를 계산하여 내화성능을 예측하였다. 또한 철근콘크리트 바닥을 대상으로 온도해석을 통하여 건축물의 내화성능기준별 적정 내화피복두께를 제시하였다.

ABSTRACT

Fire resistance is very essential for all buildings to save peoples who live within buildings or use and to protect the properties when the buildings are covered with fire. The fire resistance were evaluated by loading or nonloading fire tests which are known very expensive and require lots of time. That causes the lacks of research activities and there are only small cases of fire resistance. The purposes of this paper are to analyze the temperature analysis for various structural elements such as columns and beams those are can be applied to buildings and to suggest the reasonable fire protective thickness of concrete slab according to the required fire resistance time.

Key words : Fire resistance, Fire test, Standard fire curve, Fire protective thickness

1. 서 론

건축물에서의 화재발생은 재실자와 소방 구호자의 인명 손실, 재산 피해 및 환경 훼손을 유발하는 등 인류의 행복한 삶 추구를 저해하는 요소이다. 따라서 각 국가별로 건축물에서의 화재발생을 예방하고, 피해 규모를 최소화시키기 위한 노력하고 있으며, 건축 법규 및 빌딩코드 등에 최소한 규정을 제시하고 있다.¹⁾

우리 나라에서 건축물의 내화성능 확보는 건축법규에 제시된 내화구조의 활용, 내화구조 인정을 획득한 구조 및 방법의 적용 그리고 산업표준화법에

제시된 타입의 활용 등의 사양적 내화설계로 진행되고 있다.

사양적 내화설계에서 새로운 내화구조의 개발은 비용과 시간이 많이 소요되어 다양한 내화구조 개발이 미진한 실정이며, 내화시험 이전에 내화성능을 예측할 수 있는 사전 정보가 요구되고 있다. 또한 계산을 통한 내화성능을 검증할 수 있는 공학적 내화설계의 국내 기준화를 위해서도 화재 시 구조부재의 온도예측에 관한 자료의 축적이 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 H형강에 콘크리트와 방화석고보드가 적용된 기둥부재 및 보부재를 대상으로 온도 계산에 따른 내화성능을 평가하고, 철근콘크리트 슬래브를 대상으로 내화성능기준별²⁾ 내화피복두께의 제시를 연구의 목적으로 한다.

E-mail: kwonik@kangwon.ac.kr

2. 구조용 강재를 활용한 주요 구조부재의 개발

건축물의 기둥부재와 보부재에는 다양한 재료와 형식이 적용되고 있으며, 구조성능과 내화성능을 향상시키기 위하여 구조용 강재와 콘크리트의 합성화가 부각되고 있다. 합성화의 대표적인 구조부재로서는 콘크리트 충전강관 기둥부재와 T형보 형식의 TSC보가 있다.^{3,4)}

강구조 건축물의 구조 형식으로 적용될 수 있는 재료는 콘크리트와 건식재료의 복합체로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 H형강 웹에 콘크리트를 충전하는 형식과 H형강을 방화석고보드로 감싸는 타입을 제안한다.

기둥부재로 제안하는 타입은 H형강(H-300x300x10x15)에 내화피복재료가 전혀 부착되지 않은 무피복 H형강 기둥부재(C-S1), H형강 웹에 철근 콘크리트를 완전히 충전한 웹 충전형 기둥부재(C-S2) 그리고 웹 철근콘크리트 충전형 기둥부재의 플랜지 양쪽에 방화석고보드를 부착한 기둥부재(C-S3) 및 H형강의 플랜지와 웹을 피복한 철골철근콘크리트 기둥H(C-S4) 등 4가지이다.

보부재로 제안되는 타입은 H형강(H-400x200x8x13)을 기본으로 사용하는 T형보 무피복 강재보(B-S1)와 하부 플랜지와 웹에 방화석고보드로 마감한 방화석고보드 마감형 보부재(B-S2) 및 웹에 콘크리트를 충전한 웹 충전 콘크리트보(B-S3)모두 3가지이다(Table 1).

3. 주요 구조부재의 화재 시 온도해석

건축물 화재 시 구조부재의 거동은 화재실의 설계화재 크기에 좌우된다. 실내의 가연물량이 많고, 산소 공급이 원활한 공간에서의 화재 발생은 화재실의 급격한 온도상승과 더불어 구조부재의 온도상승을 유발시켜, 부재의 내력 저하 및 추가적인 부재력(압축력, 인장력, 휨모멘트 및 전단력)의 발생으로 구조성능이 급격히 저하된다. 이와 같이 화재 시의 구조 거동 평가와 성능보완을 위해서는 공학적 내화설계가 요구된다.

Table 1에 제안된 기둥부재와 보부재의 H형강의 화재 시 표면온도 계산과 건축법규에서 요구되는 내화성능기준별 철근콘크리트 슬래브의 적정 내화피복두께 산정을 위하여 KS F 2257-1의 표준화재 온도곡선에 따라 최대 3시간까지 온도계산을 수행한다.

3.1 온도해석

각 구조부재의 온도해석은 스웨덴 국립 화재연구소 SP에서 개발된 유한요소 프로그램인 TASEF⁵⁾(Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire)를 이용하였으며, 온도해석을 위한 각종 재료의 온도변화에 따른 열특성은 Table 2와 같다.^{6,7)}

공기층과 온도해석 단면과의 경계층 온도변화는 다음 식(1)에 의한 복사 및 대류 열전달로 이루어진다.

Table 1. Sections for Temperature Analysis of Columns and Beams

구분	단면			
기둥				
기호	C-S1	C-S2	C-S3	C-S4
보				-
기호	B-S1	B-S2	B-S3	

Table 2. Thermal Data of Major Materials for Temperature Analysis

구분	특성					비고
	밀도(kgf/m ³)	열전도율		비열(J/kg°C)		
		T(°C)	λ(W/m)			
강재	7840	0 800 2000	60 27 27	450		TASEF
콘크리트	2300	0 20 400 800 1000 1200	1.36 1.11 0.907 0.637 0.57 0.548	0 100 200 400 1200	900 900 1000 1100 1100	Eurocode 3% moisture
석고보드	678	0 250 500 800 1000 1200	0.22 0.15 0.13 0.11 0.1 0.1	0 250 500 800 1000 1200	950 950 950 2000 2000 2000	SFPE-Handbook 2nd section chap. 10

Table 3. Modelling for Columns

무피복 기둥	웹브 충전형 기둥	웹브충전형 + 플랜지 방화석고보드마감 기둥	합성형 기둥

$$q = \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) + \beta(T_w - T_a)^\gamma \quad (1)$$

여기서,

ε: 방사율

σ: Stefan Boltzman 상수(5.67 × 10⁻⁸W/m²°C)

T_w, T_a: 고형재료 및 주변부 온도(°C)

β: 대류 계수(W/m² °C)

γ: 복사능

구조부재의 온도계산 시 방사율(ε)은 0.8을 적용하였으며, 화재면에 노출되는 부재 면의 대류계수(β)는 25W/m² °C 그리고 비화재면의 노출부의 대류계수는 10W/

m² °C를 적용하였다.⁸⁾

기둥부재 온도해석에 적용된 H형강은 내화시험에 사용되는 H-300x300x10x15이며, 온도해석은 H형강이 대칭 단면이므로 기둥부재 단면의 1/2을 모델링하여 수행하였다(Table 3). 모델링에서 철근의 표기는 생략하였으며, 철근에 의한 각 부재의 위치별 온도상승은 매우 미미하다. 따라서 철근의 온도는 해당 부분의 콘크리트온도로 설정가능하며, 보통 콘크리트강도 수준이므로 폭발현상은 고려하지 않았다.

기둥부재, 보부재 및 콘크리트 바닥부재의 온도계산은 비재하가열시험 조건과 동일한 방식으로 이루어졌

Table 4. Modelling for Beams

무피복 보	방화석고보드마감 보	웹 충전형 보

으며, 기둥부재 및 보부재의 온도계산은 4면 노출, 3면 노출로 설정하였다.

보부재에 적용된 H형강의 크기는 일반적으로 내화 시험에 적용되는 H-400x200x8x13이며, 콘크리트 바닥 두께는 150mm로 설정하였다. 온도해석을 위한 각각의 모델은 다음 Table 4와 같다.

3.2 온도해석 결과

3.2.1 기둥부재

시간변화에 따른 기둥부재 각 모델의 온도변화는 Figure 1~2와 같다. Figure 1은 각 모델의 H형강 웹재의 중앙부분 온도를 나타내고 있으며, Figure 1은 각 모델의 형강 하부 플랜지의 중심부에서 75mm 이격된 곳의 온도를 나타내고 있다.

무피복 H형강 기둥부재의 웹은 가열초기부터 표준화재온도곡선에 수렴하는 결과를 보임으로써 일정 시간의 내화성능확보가 어렵다고 판단되었으며, KS F 2257-5에 규정된 허용온도인 538°C에 수렴하는 시간은

약 8분 정도이고, 화재 시 온도 상승이 상대적으로 빨리 상승할 것으로 판단되는 플랜지에서 강재의 최고온도 649°C에 도달되는 시간은 약 15분 정도로 나타났다.

웹 충전형 기둥부재 웹의 온도분포는 무피복 H형강 기둥부재와 동일하게 급격한 온도 상승을 보였으며, 허용온도에 도달되는 시간은 약 23분 정도, 플랜지에서의 649°C에 도달되는 시간은 약 24분으로 계산되었다. 따라서 H형강 웹에 철근 콘크리트 타설로써 내화성능의 향상을 기대하는 것은 다소 한계가 있다고 판단되었다.

H형강 웹에 콘크리트를 타설하고 H형강 상부 및 하부 플랜지에 방화석고보드 12.5mm 1겹을 각각 시공한 웹 충전형 + 상하부 플랜지 방화석고보드 부착 기둥부재의 웹부분은 3시간까지 완만한 온도상승을 보였으며, 3시간 경과 시에는 약 500°C로 계산되었다. 또한 플랜지에서 649°C에 도달되는 시간은 약 2시간으로 나타났다. 따라서 웹충전형 + 양 플랜지 방화석고보드 부착형 기둥부재는 2시간 이상의 내화성능의 확

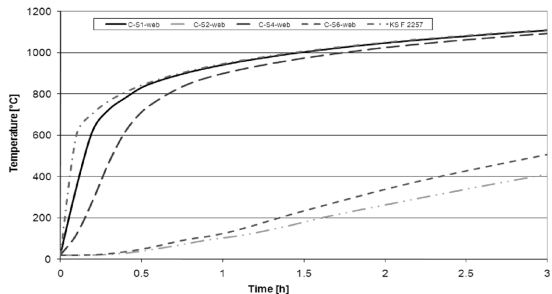


Figure 1. Temperature history from center of H section' web.

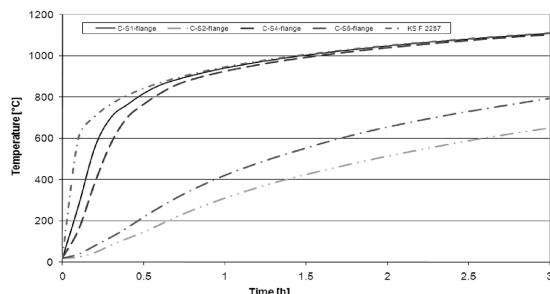


Figure 2. Temperature history of a point which is away 75 mm from the center of bottom flange.

보가 가능할 것으로 판단되었다. H형강의 양 플랜지를 콘크리트 30mm로 피복하는 합성형 기둥의 웨브는 약 3시간 경과 시에 411°C를 보였으며, 플랜지의 경우는 3시간 경과 시 최고온도 649°C에 도달되었다. 따라서 콘크리트로 H형강 플랜지를 감싸는 구조는 3시간의 내화성능확보가 가능할 것으로 판단되었다.

3.2.2 보부재

표준온도가열곡선에 따라 계산된 보부재의 온도해석 결과, 웨브 중심부와 하부 플랜지 및 상부 플랜지의 온도상승 패턴은 Figure 3~5와 같다. 각각의 그림에서와

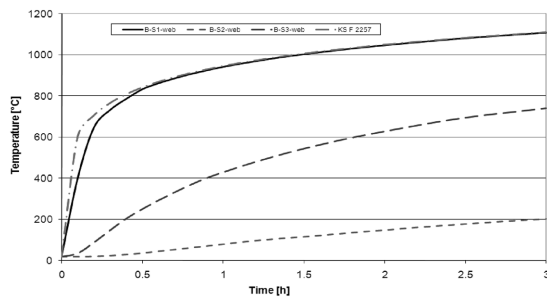


Figure 3. Temperature history of center of web.

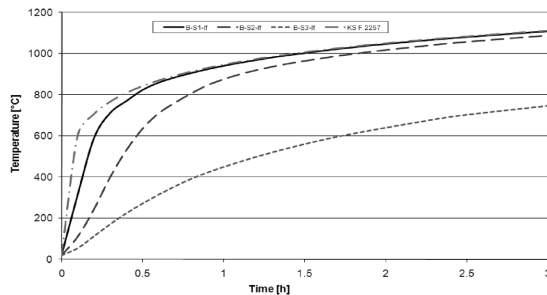


Figure 4. Temperature history of bottom flange.

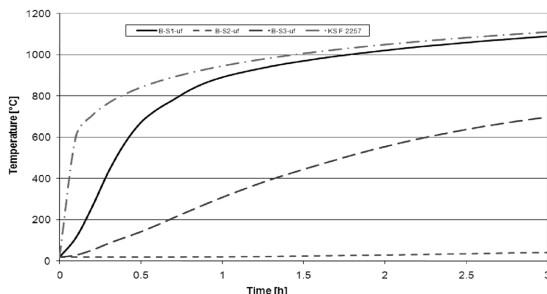


Figure 5. Temperature history of top flange.

같이 하부 플랜지의 온도 상승이력은 웨브 부분에서의 온도상승이력과 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 하부 플랜지는 복사 및 대류 열전달을 직접 받는 부분이므로 웨브와 상부 플랜지보다 온도상승이 대체적으로 높게 나타나고 있으며, 상부 플랜지의 온도분포는 무피복 보부재를 제외하고는 매우 낮은 온도상승을 보이고 있다.

건축물에서 화재 발생 시 보부재에서 급격한 처짐은 온도상승에 의한 보부재의 팽창과 보부재 자체의 내력 저하로 발생되며, 궁극적으로 구조적 붕괴를 유발하는 요인이 될 수 있다. 따라서 화재와 같은 고온 환경에서 보부재의 구조적 안전성 평가는 보부재 자체의 상승온도에 좌우된다.

무피복 보부재는 표준온도가열곡선과 거의 같은 수준으로 온도상승이 지속되었으며, 약 8분 경과 시 웨브 온도는 약 538°C 수준에 도달되었다. 또한 하부 플랜지에서 649°C에 도달되는 시간은 약 15분으로 계산되었다. 따라서 무피복 강재 보는 내화성능의 확보가 어려운 것으로 판단되었다.

하부 플랜지와 웨브 양쪽에 방화석고보드 12.5mm 1겹이 시공된 보부재는 약 1.5시간 경과 시 허용온도 538°C에 도달되었으며, 하부 플랜지의 649°C 도달시간은 약 30분으로 나타났다. 실제 방화석고보드가 H형강에 직접 시공되는 것은 어렵기 때문에 방화석고보드와 H형강 사이에는 일정 간격의 공간이 형성될 것이며, 방화석고보드 성능만 확보된다면 30분 이상의 내화성능 확보는 가능할 것으로 판단되었다.

웨브 양쪽 부분에 콘크리트가 충전된 웨브 충전형 보부재는 3시간 경과 시 약 웨브의 표면온도가 200°C 정도이고, 하부 플랜지까지 강재의 최고온도인 649°C에 도달되는 시간은 약 132분으로 나타났다. 따라서 웨브 충전형 보부재는 2시간 이상의 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단되었다.

3.2.3 바닥부재

바닥부재가 화재와 같은 고열에 노출되면 기둥과 벽체 등의 수직부재보다 급격하게 온도가 상승된다. 즉 바닥부재는 화재 시 대류에 노출되는 정도가 심하기 때문이다. 따라서 바닥부재의 급격한 온도상승은 바닥부재의 철근 온도상승으로 이어져 내력저하가 우려되므로 적정한 내화피복두께의 확보는 구조체의 안정성 확보에 절대적으로 필요하다. 바닥부재의 콘크리트의 피복두께 설정은 실제화재(natural fire curves)크기별, 해당 구조물의 경계조건과 구성재료 특성 등을 종합적으로 평가하는 것이 가장 합리적이다. 그러나 이와 같

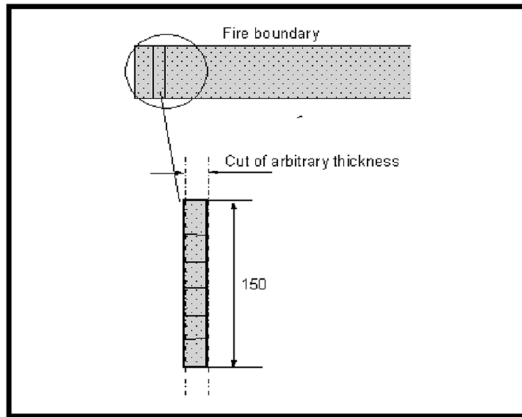


Figure 6. Model for concrete slab.

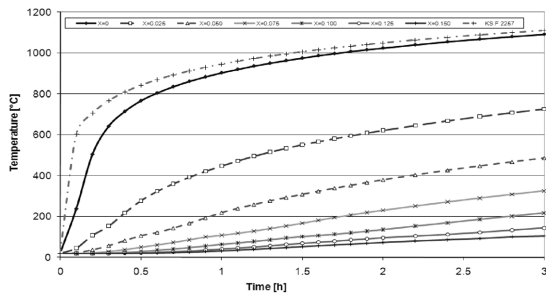


Figure 7. Temperature history according to slab's thickness.

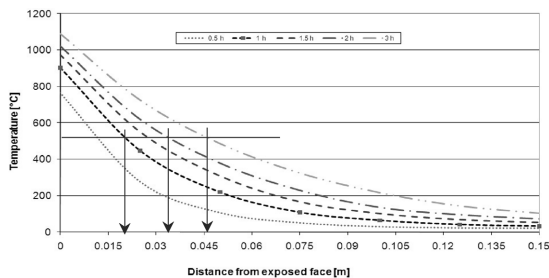


Figure 8. Required fire covering thicknesses according to fire resistance.

은 변수를 모두 고려하는 것은 매우 복잡하므로 본 절에서는 표준온도화재곡선을 대상으로 바닥부재의 두께별 온도를 계산하였다. 바닥부재의 온도해석 모델은 일반 콘크리트를 사용하는 두께 150mm 슬래브를 설정하였다(Figure 6).

바닥의 온도해석 결과는 Figure 7~8과 같다. Figure 7은 바닥 깊이별로 내화시간의 변화에 따른 온도의 상

승을 나타내고, Figure 8은 내화시간별 바닥 두께의 온도를 나타내고 있다.

열간성형 철근의 고온 시 기계적 특성은 구조용 강재의 기계적 특성을 사용하는 자료⁹⁾와 고온 시 철근의 기계적 특성이 구조용 강재보다 다소 낮은 점¹⁰⁾을 고려하여 본 연구에서 철근의 허용온도는 500°C라고 가정하였으며, 이를 바탕으로 요구 내화성능이 1시간인 건축물에서는 약 20mm의 내화피복두께가 필요하고, 2시간의 내화성능이 요구되는 건축물에서는 약 40mm의 내화피복두께가 요구될 것이며, 3시간 내화성능의 건축물에서는 약 50mm의 내화피복두께가 소요될 것으로 판단되었다.

4. 결 론

강구조 기반의 새로운 내화구조 개발과 내화공학 설계를 위한 사전 정보제공 및 철근콘크리트 바닥의 합리적인 내화피복두께 제시를 목적으로 H형강, 콘크리트 및 방화석고보드에 의한 기둥부재 및 보부재를 제안하고, 온도해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) H형강 무피복 기둥, 웨브 충전형 기둥, 웨브 충전형 + 상하부 플랜지 방화석고보드 마감 기둥, 합성형 기둥 및 H형강 무피복 강재보, 방화석고보드마감 보부재, 웨브충전형 보부재를 대상으로 표준온도가열곡선으로 3시간의 온도해석을 수행하여 각각 그 결과를 제시하였다.

2) 웨브 충전형 + 상하부 플랜지 방화석고보드 12mm 1겹 부착 기둥부재는 웨브에서의 강제온도 허용온도와 플랜지에서의 강제 최고온도 초과시간 등을 고려할 때 2시간 이상의 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단되었으며, H형강 양쪽 플랜지를 콘크리트로 30mm 피복한 합성형 기둥은 3시간의 내화성능확보가 가능한 것으로 판단되었다.

3) 방화석고보드 12.5mm 1겹으로 마감된 강재 보부재는 30분 이상의 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단되었고, 웨브에 콘크리트가 충전된 보부재는 2시간 이상의 내화성능 확보가 가능할 것으로 판단되었다.

4) 철근콘크리트 바닥의 1시간, 2시간 및 3시간 내화성능확보를 위해서는 약 20mm, 40mm 및 50mm의 내화피복 두께가 요구되었다.

참고문헌

1. 권인규, “강구조 건축물의 성능적 내화공학설계지침

- 개발에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.6, pp.69-76(2008)
2. 국토해양부, “내화구조의 인정 및 관리기준”(2010).
 3. 최성관, 김성배, “TSC 합성보의 화재시 거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.24, No.1, pp.27-35(2008).
 4. 포항산업과학연구원, “콘크리트 충전강관기둥 구조 및 시공지침”(2001).
 5. Elisabet Sterner, Ulf Wickstrom, “TASEF-Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire-user’s Manual”(1990)
 6. SFPE, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”(1995)
 7. V.H. Patrick and T. Heimo, “Description of Swedish System of Fire Performance Based Regulation and Temperature Analysis of Structural Sections”(2003).
 8. Ove pertterson, Sven-Erik Magnusson, Jorgen Thor, “Fire Engineering Design of Steel Structures”(1976).
 9. ECCS, “Model Code on Fire Engineering”(2001).
 10. T.T. Lie, “Structural Fire Protection”(1992).