



재하된 H형강 휨재의 열응력해석을 이용한 한계온도 산정

윤성기¹ · 이치형² · 구본훈^{3*}

¹교수, 부산대학교, 건축공학과, ²연구원, 부산대학교, 생산기술연구소, ³석사과정, 부산대학교, 건축공학과

Calculation of Limit Temperature on H-Beam Flexural Member Through the Thermal Stress Analysis under the Lateral Load

Yoon, Sung Kee¹, Lee, Chy Hyoung², Koo, Bon Hoon^{3*}

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

²Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

³Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

Abstract - The domestic fire resistance performance test is conducted as a prescriptive design method such as quality test. In quality test there are 2 methods, unloaded fire resistance test and fire resistance test under load. In realistic, these tests, however, have problems with expense, time and diversity of structure. This study reviewed fire resistance performance of H-beam flexural member by thermal stress analysis using finite element ABAQUS program. This research is for the performance-based design reviewing applicability of domestic standard. As a result of this study, limit temperatures per each load ratio provided for proper performance of fire resistancy.

Keywords - Fire resistance, ABAQUS, H-beam flexural member, Load ratio, Thermal stress analysis

1. 서론

도시의 복잡화와 더불어 건물들의 대형화 및 고층화와 관련하여 시공의 단순함으로 인해 강재의 사용이 증대되고 있는 실정이다. 강재는 콘크리트 재료에 비해 고강도, 고품질의 재료로 좁은 부지에서 원활한 작업공간을 확보하게 하며, 짧은 공기 내에 고품질의 건설을 가능하게 한다. 그러나 강재는 화재 노출시 온도상승에 따른 강도와 강성이 현저히 저하되는 취약성이 큰 재료로 건물 및 인명 피해가 확산될 수 있다. 국내에서는 건축물의 구조재가 화재 발생시 붕괴 및 균열 등이 발생되지 않도록 내화성능을 확보하기 위해 내화

에 관련한 기준을 제시하고 있다.

국내기준^[1]에서는 건축물의 구조재가 화재 발생시 붕괴 및 균열 등이 발생되지 않도록 내화성능을 확보하기 위해 용도와 높이에 따라 법적 규제를 하고 있으며, 구조재는 사양적 내화설계와 성능적 내화설계를 이용하여 내화성능을 판단하고 있다. 사양적 내화설계는 품질시험에 의한 실험적 방법이며, 성능적 내화설계는 열전달해석 및 열응력해석을 이용하는 방법으로 국내에서는 대부분 사양적 내화설계 방법인 품질시험을 이용하여 내화설계를 한다.

사양적 내화설계는 하중이 가해지지 않는 비재하가열시험을 통해 측정되는 온도를 검토하는 방법과 하중을 가한 재하가열시험을 통해 하중지지력에 따른 처짐으로 인한 변형과 분당변형률을 이용하여 사용성을 검토하는 방법이 있다^{[2],[3]}.

하지만 이와 같은 평가방법만으로는 안전한 내화성능을 확보하기에 한계가 있다. 비재하시 측정된 온도만 가지고 내화성능을 판단하게 되면 고온에서 변화하는 강재의 응력값 등의 특성을 고려하지 않기 때문에 실제 화재상태에 적용하기에는 문제가 있다. 하중이 재하된 상태에서 내화성능 평가

Note.-Discussion open until February 28, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 27, 2015; revised July 3, 2015; approved on July 22, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-1326 Fax. +82-52-515-1326

E-mail. bondae@hanmail.net

방법은 부재의 재료적 특성과 구조적 특성을 고려하지 않으며, 단면의 형상으로만 사용성을 검토하므로 안전한 내화설계를 함에 있어 어려움이 발생한다^[4].

최근에는 휨재의 내화성능을 고려할 때 하중과 온도에 관한 부분을 동시에 검토하는 방법들이 연구되고 있으며, 나아가 내화피복 등을 이용한 휨재의 내화성능 향상을 위한 연구도 활발히 진행 중에 있으나, 내화평가를 위한 실험적 연구를 진행하기 위해서는 많은 비용 및 시간들이 요구된다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 ABAQUS나 ANSYS와 같은 상용해석 프로그램들을 이용한 해석방법이 사용되고 있으며, 프로그램의 발달로 인해 실험으로 얻어지는 많은 결과값들이 해석을 통해 증명되고 있다^{[5],[6],[7],[8],[9],[10]}.

본 연구에서는 H형강 휨재를 대상으로 ABAQUS의 열전달해석 및 구조해석을 동시에 고려하여 적용하는 모델을 제시하고자 하며, 제시된 모델을 이용한 열응력해석을 통해 기존 연구와 비교하여 해석방법의 신뢰성을 검증한다. 검증된 신뢰성을 바탕으로 H형강 휨재의 내화성능을 검토하기 위해 피복의 두께, 하중의 크기 등을 변수로 H형강 휨재의 내화성능 변화를 분석한다. 나아가 휨재의 소성모멘트를 기준으로 하중비에 따른 한계온도를 산정한다.

2. 국내의 내화성능기준

국내 건축물의 내화구조는 주요 구조부재가 표준화재온도에 견디는 내화성능을 갖춘 구조를 말하며, 현재 대형, 고층의 건축물뿐만이 아닌 다양한 건축물에서 필수적인 구조이다. 이러한 내화구조에 대한 성능은 국내기준에서는 내력기능(Load bearing capacity)과 차열성(Insulation), 차염성(Integrity) 3가지로 나타내고 있다. 내력기능은 건축물에 화재가 발생 한 경우 구조부재가 화재열을 받아 강도가 저하됨에 따라 파괴로부터 견디는 성능을 말하며, 차열성은 건축 구조부재가 한쪽 면에서 가열될 때 그 건축 구조부재 이면의 온도가 제한을 한 값 이상 상승되지 않도록 하는 성능을 말한다. 그리고 차염성은 건축 구조부재가 한쪽 면에서 가열될 때, 화염이나 고온 가스의 통과 또는 이면에서의 화염 발생을 방지하는 성능을 말한다^[1].

국내의 건축법 시행령에서는 내화구조를 용도와 층수, 높이에 따라 제시된 내화시간을 견딜 수 있는 성능을 가진 구조로서 국토해양부령으로 정하고 있으며, 크게 3가지의 용도로 일반시설, 주거시설, 산업시설로 나뉘어 기준을 제시하

고 있다. 기준에는 3가지 용도에 따라 구성부재를 벽과 보, 기둥 그리고 바닥과 지붕으로 다시 나뉘 층수와 최고높이에 대해 화재에 견딜 수 있는 시간을 30분에서 3시간까지로 구분하여 제시하고 있다.

국내에서는 일반적인 건축 구조재에 대한 내화기준으로 내화성능시험을 통한 결과에 대하여 기준을 제시하고 있다. 건축 구조재의 내화 시험 방법인 KS F 2257-1인 건축 부재의 내화시험방법에서는 일반적으로 법령에 따라 요구되는 내화시간과 내화시험에 관한 일반 요구사항을 설명하고 있으며, 특히 휨재의 내화시험은 KS F 2257-6 인 건축 부재의 내화시험방법-보의 성능 조건 세부사항에 따라 내화시험시 조건 및 가열 온도 곡선제시, 하중지지력에 따른 구조재의 일반 성능 기준에 따라 시험을 실시한다.

하중지지력에 따른 휨재의 성능 조건^[2]은 식 (1), 식 (2)와 같으며, 시험 중 급속한 변형에 대해 $L/30(\text{mm})$ 이상의 처짐이 발생할 때 기준을 적용한다.

$$\text{변형량} : D = L^2/400d \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$\text{변형률} : \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

여기서, L 은 보의 스패(mm), d 는 보의 단면의 높이(mm)이다. 보의 내화 성능 조건 기준인 KS F 2257-6에서는 건축구조재 중 보에 대한 내화 시험에 관한 조건 및 내화기준에 대해 제시하고 있다. 내화피복된 보의 내화성능 판단시 각 단면에서 측정된 온도가 평균온도 538°C , 최대온도 649°C 를 기준으로 둘 중 하나라도 넘어서는 안되며, 초과할 때의 시간을 내화시간으로 하고 있다.

3. 열전달을 고려한 구조해석

3.1 해석방법

본 연구는 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS^{[11],[12],[13]}를 이용하여 Fig. 1과 같이 진행한다. Fig. 1을 보면 해석과정은 열전달 해석단계와 구조 해석단계로 크게 2개의 단계를 걸쳐서 해석을 한다. 먼저 열전달 해석단계에서는 단면형상, 피복두께를 변수로 하여 각각의 3D모델링을 하고, 열전달해석에 사용되는 기본 물성치인 열전도율, 비열, 밀도, 열팽창률 등의 값들은 Eurocode 3^[14]에 제시된 값을 적용하며, 가

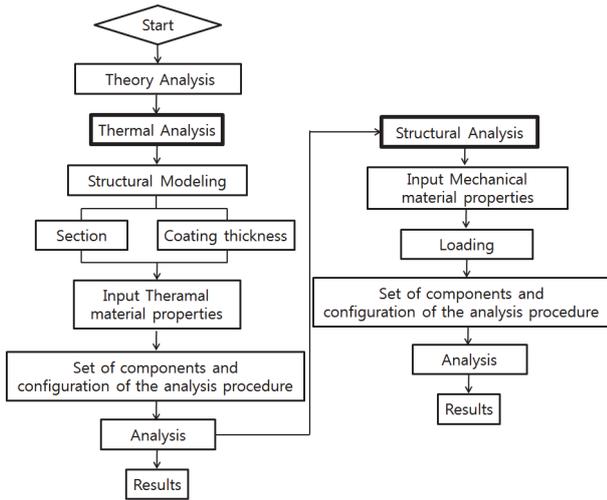


Fig 1. Flow chart

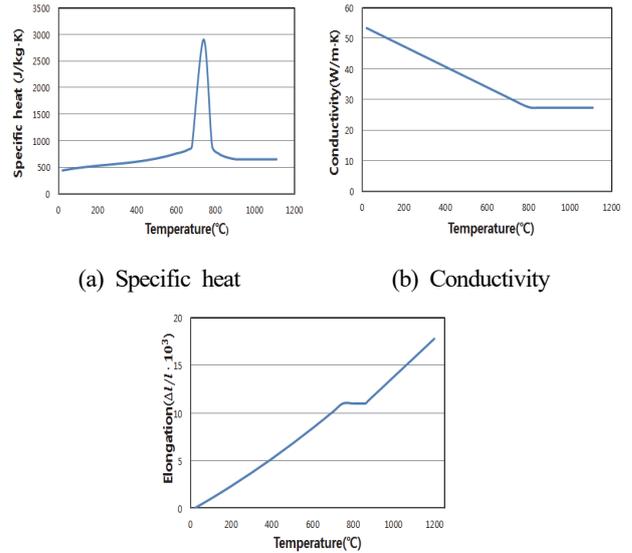
열곡선은 KS F 2257-1에서 제시된 화재곡선을 사용한다. 강재 및 피복재의 열적특성을 제외한 해석환경의 설정은 국내에서 적용되고 있는 품질시험기준을 근거로 하여 해석을 진행한다.

구조 해석단계에서는 열전달 해석을 통해 화재에 노출된 휨재 단면의 온도분포 특성을 파악한 뒤 온도분포 결과를 비선형구조해석 시 절점의 온도하중으로 적용을 한다. 휨재에 가하는 하중의 크기는 각 단면별 소성모멘트에 최대하중을 계산하여 하중비 0.8, 0.6, 0.4의 비율로 재하시킨다. 재하시킨 H형강 휨재의 열응력해석을 진행하여 나온 결과로 내화성능을 분석한 후 결과값을 이용하여 하중비에 따른 한계 온도를 제안한다.

3.2 재료의 특성

국내에서는 강재의 열적특성에 관한 기준을 제시하고 있지 않으며, 본 연구에서는 강재의 열적특성에 관한 물성치는 Eurocode 3에 제시되어 있는 기준식을 적용한다^{[14],[15]}. 강재의 밀도는 온도상승에 따라 변화없이 항상 값 7,850kg/m³을 적용하고, 그 외의 비열 및 열전도율, 열팽창률에 대한 값은 온도에 따라 함수식으로 Table 1과 같으며 그 변화는 Fig. 2와 같다.

강재의 역학적 특성은 Eurocode 3을 이용하여 Fig. 3과 같이 온도상승에 따라 항복응력과 비례한도, 탄성계수의 비를 적용한다. 일반적인 내화시험을 통한 온도상승에 따른 강재의 유효항복응력을 보면, 300°C부터 강도 및 강성이 저감되기 시작하며 750°C까지는 강도가 급격하게 저하되고 상온



(c) Elongation

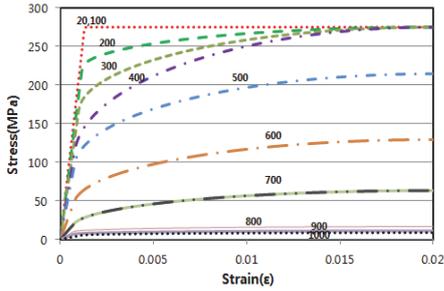
Fig. 2. Thermal properties of steel in Eurocode3

Table 1. Thermal properties of steel in Eurocode3

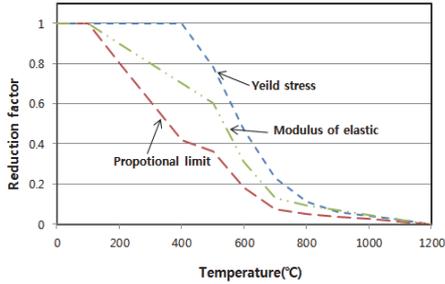
properties	determin	scope(°C)
	$C_s = 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3$	$2 \leq T \leq 600$
Specific heat (J/kg·°C)	$C_s = 666 - \frac{13002}{T - 738}$	$600 \leq T \leq 735$
	$C_s = 545 - \frac{17820}{T - 731}$	$735 \leq T \leq 900$
	$C_s = 650$	$900 \leq T \leq 1200$
Conduc-ti vity (W/m·°C)	$k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2}T$	$20 \leq T \leq 800$
	$k_s = 27.3$	$800 \leq T \leq 1200$
Elonga- tion	$\Delta l/l = -2.416 \cdot 10^{-4} + 1.2 \cdot 10^{-5}T + 0.4 \cdot 10^{-8}T^2$	$20 \leq T \leq 750$
	$\Delta l/l = 11 \cdot 10^{-3}$	$750 \leq T \leq 860$
	$\Delta l/l = -6.2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5}T$	$860 \leq T \leq 1200$

강도의 약 23%만이 남게 된다. 800°C에서는 11%, 900°C에서는 6%의 강도만이 남게 되고 이후 대략 1,500°C정도의 녹는 점까지 강도는 천천히 저감된다. Eurocode 3에서 유효항복응력은 400°C에서부터 감소하기 시작하여 500°C이후 급속한 강도의 저하를 보이며, 560°C에서 상온 상태의 60% 이하로 감소하기 시작하여 1,200°C까지 강도의 저감계수를 나타내고 있다.

내화피복을 통한 강재의 내화공법에는 일반적으로 구조재에 불을 차단하기 위해 사용하는 재료로 콘크리트 등을 사용하는 타설공법, 철망 모르타나 플라스틱을 사용하는 바르는 공법, 내화 도료를 강재에 칠하는 도장 공법, 석고보드나

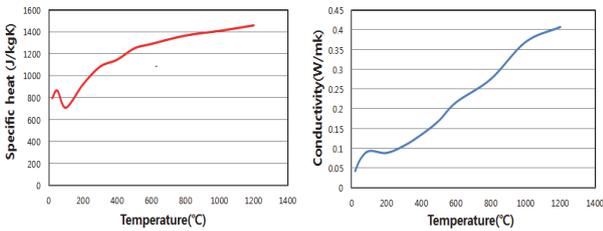


(a) Stress-strain relationship for steel at elevated temperatures



(b) Reduction factors for the stress-strain relationship of steel at elevated temperatures

Fig. 3. Mechanical properties of steel in Eurocode3



(a) Specific heat (b) Conductivity

Fig. 4. Thermal properties of spray coating material

석면시멘트판과 같이 경량 내화재료를 이용한 붙이는 공법, 펄라이트계 내화피복재를 뿔칠 시공하는 공법 등이 있다.

본 연구에서는 시공성이 우수하며 피복두께를 충분히 확보 할 수 있는 장점이 있는 뿔칠피복공법을 이용하여 휨재의 내화성능을 분석하며, 본연구에서 사용한 뿔칠 내화피복재 (SF RM, Spray Applied Fire Resistive Material)는 미국 국립표준기술 연구소의 NIST NCSTAR 1-6A^[16]를 참고한다. 피복재의 열적특성은 비열과 열전도율 모두 Fig. 4와 같이 온도가 상승함에 따라 값 또한 상승하는 경향을 보이며, 밀도는 일정하게 240kg/m³을 적용하여 피복의 두께가 H형강 휨재의 내화성능에 미치는 영향을 분석한다.

3.3 열전달 해석

ABAQUS의 열전달해석^{[12],[13]}은 과도상태의 열전달 해석을 기본으로 하며, 해석에 사용된 요소타입은 3차원 열전달 요소인 DC3D8(8-node linear heat transfer)요소를 사용한다. DC3D8요소는 온도에 대한 자유도를 가진 8개의 절점으로 이루어진 3차원 8절점의 선형열전달해석을 뜻하며, 등질성과 등방성으로 가정한 요소이다. 해석시 H형강 휨재는 길이방향으로 전 구간에 걸쳐 화재에 균일하게 노출된다고 가정하며, H형강 휨재의 상부 플랜지 윗면을 제외한 3면의 모든 부분이 가열되는 것을 기본으로 한다.

가열방법은 가열로 내 H형강 휨재가 존재하며 가열로 인한 주위 공기가 상승함에 따른 대류의 발생으로 인한 열의 전달이 이루어지는 것으로 가정한다. 유한요소해석에 있어서 일반적으로 열전달에는 전도, 대류, 복사가 고려되며, 공기의 대류로 인한 열의 전달이 이루어지기 공기의 열전달 계수를 파악하는 것이 중요하다. 열전달계수는 레이놀드 정수 (Reynold's number)를 이용한 수식으로 도출된 값으로 본 연구에서는 강제 대류현상과 기체의 경우를 적용하여 $2.5 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2\text{°C}$ 를 적용한다.

열전달해석 시 방사되는 에너지의 값을 적용하며 그 중 슈테판-볼츠만 상수로 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{k}^4$ 를 적용한다.

재료의 복사율은 강재의 표면상태에 따라 값이 다르므로 정확한 값을 찾기는 어렵다. 기존연구들에서는 Table 2와 같이 연구를 통해 복사율의 값을 제시하고 있으며 본 연구에서는 Eurocode3에 제시된 값을 적용하여 해석을 수행한다.

Table 2. Emissivity of the steel

Research Reports	Emissivity	Research Reports	Emissivity
Eurocode3 (2001)	0.625	Holman (1981)	0.8
Wang (2002)	0.7	Lamont (2001)	0.7
ASCE FP (1992)	0.9	Bejan (1993)	0.79

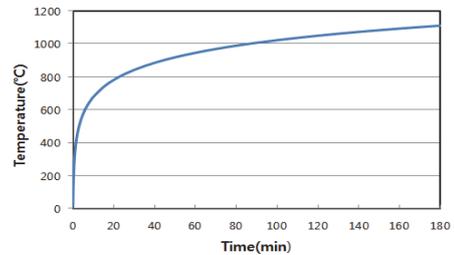


Fig. 5. Standard fire temperature heating curve

화재가열곡선은 KS F 2257-1에 규정하고 있는 Fig. 5와 같은 표준화된 화재곡선을 사용하며 식 (3)과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (3)$$

여기서, T 는 온도이며 t 는 시간(초)를 말하며 T_0 는 상온에서의 온도를 말한다.

3.4 구조 해석

구조해석은 Fig. 1에 나타나있는 것과 같이 열전달 해석 후 수행하며 구조해석의 유한요소법은 변형에 대한 무한의 자유도를 가진 연속의 물체를 유한개의 요소로 분할하여, 요소의 특성에 유사한 수학적 모델로 나타내고 그것들을 조합하는 전체의 방정식을 만들어 해석하는 방법이다.

본 연구에서는 해석 시 선형 기본값으로 설정되어 있는 요소로써 요소의 크기나 형상 등에 크게 구애받지 않고 사용할 수 있는 선형등매개변수 요소 (Linear isoparametric element)를 사용한다. 요소타입을 C3D8R(An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control)요소로 가정하며, C3D8R요소는 소성, 크리프, 응력경화, 대변형, 대변형도를 고려할 수 있는 3차원 8절점 연속요소로 해석시간은 1차원요소나 2차원 요소를 이용하는 것보다는 오래 걸리지만 실제 구조물과 유사한 거동을 알 수 있는 장점이 있다. 요소는 각 절점으로 연결되어 있고 그 변형 상태는 이것들의 절점 변위에 의하여 정의된다. 각 요소에 작용하는 응력은 모두 절점을 통해서만 전달되는 것으로 가정한다. 다음으로 부재에 원하는 성능에 만족하는 하중을 고려하여 가력하고, 휨재의 지지조건을 설정하여 준다.

4. 열응력 해석의 신뢰성 검증

개발한 모델링기법의 신뢰성을 검증을 위해 외국의 기존 연구자료 중 하중이 가해진 상태의 무피복된 H형강 휨재에 열을 가했을 때의 하중시간에 따른 변위와 응력의 변화를 비교하여 검증한다. 기존 연구^{[17],[18]}에서 제시한 H형강 휨재의 모델은 Fig. 6과 같이 상부플랜지 윗면을 제외한 3면이 KS F 2257의 화재곡선을 사용한 화재에 노출되어 있으며, 무피복의 단순지지된 H- 602×228×10×15 휨재를 대상으로 한

다. 휨재에 재하시킨 하중은 등분포하중 w 는 25kN/m의 값을 가지며, 항복강도는 275MPa이고 휨재의 길이는 8m이다. 결과값 비교는 해석이 종료된 시점에서 발생한 최대 처짐의 응력과 변위를 측정하여 비교하며, Fig. 7은 ABAQUS를 이용한 휨재의 해석이 종료 된 시점의 변형의 모습이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 해석 중 온도와 응력, 변형률의 관계를 나타내고 있으며, 5분에는 8%, 10분에는 7%, 15분에는 10%의 차이를 보이며, 기존 연구는 20분 이후 H형강 휨재의 처짐이 크게 발생하며 24분에 해석이 종료되었다. 본 연구에서는 처짐의 경향이 기존 연구와 유사하며 26분에 해석이 종

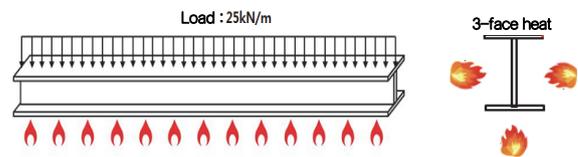


Fig. 6. Model

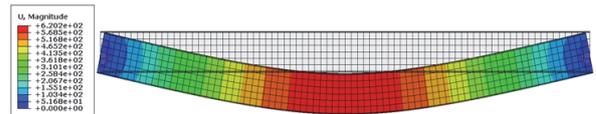


Fig. 7. Deflection due to the thermal stress analysis

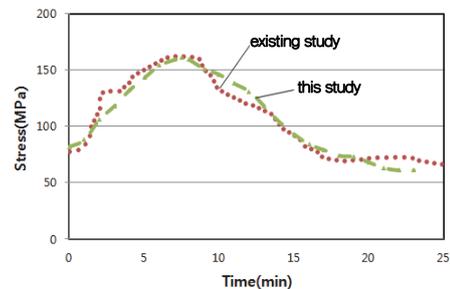


Fig. 8. Stress change of the lower flange

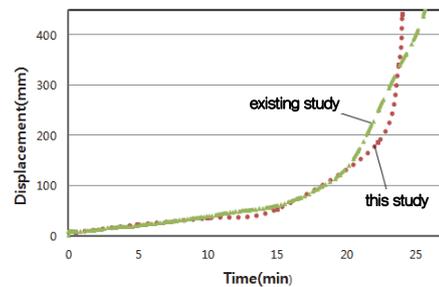


Fig. 9. Displacement of the beam

료되었다. 시간에 따라 처짐과 응력이 변화되는 경향은 비슷하나 약간의 차이가 나타나는 이유로 기존 연구는 응력-변형률의 값은 항복강도 275 MPa를 온도에 상관없이 일정한 값을 사용하였으나, 본 연구에서는 응력과 변형률의 값을 Eurocode 3에 맞추어 온도에 따라 달라지는 응력값을 적용하여 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

5. H형강 휨재의 내화성능

5.1 해석모델

본 연구는 화재시 H형강 휨재의 내화성능을 파악하기 위해 국내 및 Eurocode 3을 기준으로 해석을 하며 변수는 단면형상, 피복재의 두께, 하중비로 한다.

단면은 일반적으로 많이 사용되는 H형강 휨재 H-400 × 200 × 8 × 13, H-500 × 200 × 10 × 16, H-600 × 200 × 11 × 17를 대상으로 높이를 변수로 하며, 스패의 길이는 8m로 한다.

피복두께는 무피복에서 50mm까지 10mm씩 증가시킨 후 총 6종류의 피복의 두께에 따라 해석을 진행한다. 하중은 각 단면의 최대지하중을 기준으로 하중비 0.8, 0.6, 0.4로 재하하며, 열응력 해석시 피복재는 강도가 없고 완전 접촉으로 열에 따른 탈락현상이 없다고 가정한다. 강재의 강도는 항복응력 275MPa로 온도에 따른 저감계수를 적용한 물성치를 사용한다.

5.2 비재하시 허용온도에 따른 내화성능 결과

허용온도에 따른 내화성능을 평가하는데 있어 온도를 측정하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서는 온도측정 지점을 강재 내 상부플랜지 5절점, 웹부분 3절점, 하부플랜지 5절점 총 13절점을 정하여 온도를 출력하며, 열전달은 KS F 2257에 제시된 화재곡선을 사용하여 3시간 이상 상부플랜지의 윗면을 제외한 나머지 3면을 가열하여 해석한다. 내화성능 평가는 국내 허용온도 내화기준인 평균온도 538°C와 최대온도 649°C와 비교를 통해 평가하며, 허용온도를 통한 내화성능 판단 시 평균온도와 최대온도 둘 중 하나의 온도를 초과하는 시간을 내화시간으로 판단한다.

Fig. 10은 H-400 × 200 × 8 × 13 휨재의 결과로 피복두께를 변수로 한 3시간의 열전달해석 후 열분포이다. 피복의 두께가 두꺼울수록 화재시 휨재에 미치는 열의 영향은 작을 것을 알 수 있으며, H형강 휨재의 웹부분이 하부 플랜지부분

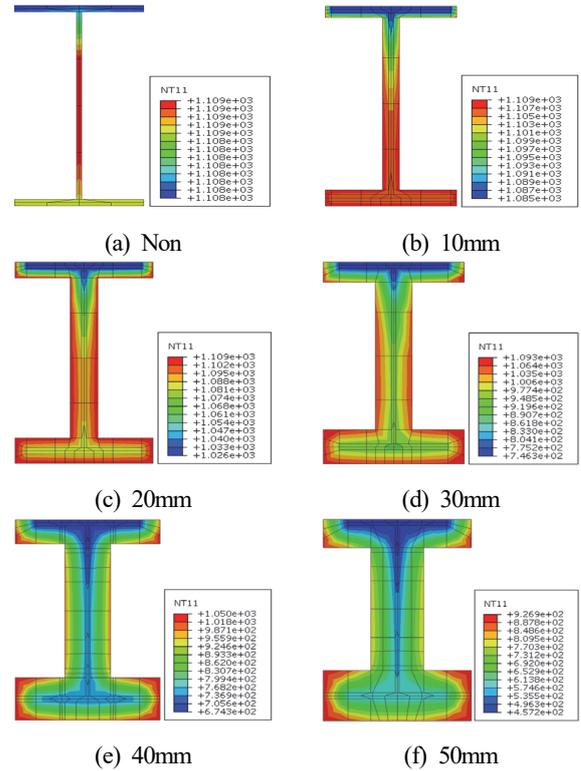


Fig. 10. Temperature distribution of the coating

보다 열전달이 더 잘 이뤄짐을 알 수 있었다. Table 3과 Table 4는 H형강 휨재의 피복두께에 따른 내화시간을 나타낸 것으로 대부분 평균온도 기준인 538°C에서 내화시간이 결정되는 것을 알 수 있었다. H형강 휨재는 1시간의 내화성능을 확보하기 위해서는 10~15mm의 피복두께가 필요하며

Table 3. According to the mean temperature (538°C) refractory time (min)

H-Section	Thickness of cover(mm)					
	Non	10	20	30	40	50
400×200×8×13	14	51.1	66.7	104	151	201
500×200×10×16	15.4	57	76.3	104	171	205
600×200×11×17	16.1	59	79.5	122	180	197

Table 4. According to the maximum temperature(649°C) refractory time (min)

H-Section	Thickness of cover(mm)					
	Non	10	20	30	40	50
400×200×8×13	14.4	53.9	72	114	165	210
500×200×10×16	15.9	58.6	79.4	114	188	215
600×200×11×17	16.5	61.6	83.5	136	200	218

2시간의 내화성능을 확보하기 위해서는 29~33mm, 3시간 이상의 내화성능을 확보하기 위해서는 39~45mm의 피복 두께가 필요함을 알 수 있었다.

5.3 재하시 하중지지력에 따른 내화성능 결과

일반적인 건물의 휨재는 하중이 작용을 하고 있으며 그 하중으로 인한 휨재의 처짐이 발생하게 된다. 화재시 강재의 온도상승으로 인한 부재의 내력저하로 인해 휨재의 처짐량이 급속도로 발생할 수 있어 정확한 화재시 하중지지력에 대한 휨재의 사용성이 검토되어야 한다.

휨재에 작용하는 하중크기에 따라 한계 값을 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 Table 5에 나타내었고, Table 6은 휨재의 소성모멘트를 계산한 뒤 등분포하중으로 변환하여 최대지지하중을 기준으로 하중의 크기를 0.8, 0.6, 0.4의 비로 분류하여 나타내었다. 사용성 한계에 따른 내화성능을 평가하기 위한 변위측정은 KS F 2257-6에 제시된 것과 같이 H형강 휨재의 하부플랜지 중 최대변위를 측정하였다. 하중지지력에 대한 내화성능평가는 한계변형과 분당한계변형률의 값을 기준으로 두 값 모두 초과하는 시간을 내화시간으로 한다.

Fig. 11은 H-400×200×8×13 휨재의 결과로 하중비 0.8에서 시간과 변형량 및 분당변형률의 관계를 피복두께별로 나타내었고, Table 7은 변수별 H형강 휨재의 내화시간을 나타낸 것이다. 피복재가 두껍고 하중비가 작을수록 열로 인한 H형강 휨재의 처짐과 온도 상승폭도 작아짐을 알 수 있었다.

H형강 휨재는 하중비 0.8에서 1시간의 내화성능을 확보하기 위해서는 피복두께가 16~22mm가 필요하며 2시간을

Table 5. Consideration of the limitations

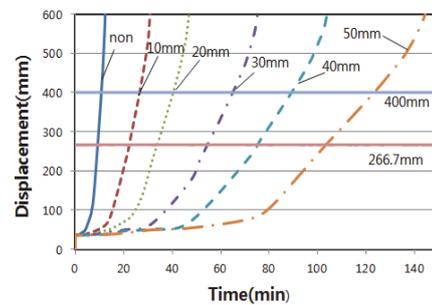
H-Section	Limit deformation	Limit deformation per minute	L/30 (mm)
	D (mm)	dD/dt (mm/min)	
400×200×8×13	400	17.8	266.7
500×200×10×16	320	14.2	266.7
600×200×11×17	267	11.9	266.7

Table 6. Applied load due to the load ratio (kN/m)

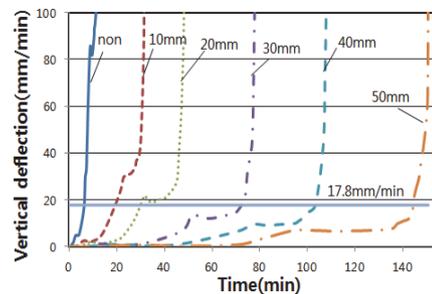
H-Section	Load ratio			
	1.0	0.8	0.6	0.4
400×200×8×13	44.2	35.4	26.5	17.7
500×200×10×16	72.1	57.7	43.2	28.9
600×200×11×17	98.4	78.7	59.1	39.4

Table 7. Fire resistance time to the limit of the deformation (min)

H-Section	Load ratio	Thickness of cover(mm)					
		non	10	20	30	40	50
400×200×8×13	0.8	12	39	52	89	132	178
	0.6	12	48	62	97	149	189
	0.4	15	57	74	116	173	207
500×200×10×16	0.8	12	44	62	88	149	175
	0.6	14	52	69	96	170	193
	0.4	17	62	75	114	187	209
600×200×11×17	0.8	13	46	69	109	157	174
	0.6	15	56	72	117	180	196
	0.4	18	66	84	139	208	216



(a) Displacement at load ratio of 0.8



(b) Displacement at load ratio of 0.8 per minutes

Fig. 11. H-400×200×8×13 beam limitation

확보하기 위해서는 32~37mm, 3시간 이상을 확보하기 위해서는 43~50mm의 피복두께가 필요함을 알 수 있었다. 하중비 0.6에서는 내화성능 1시간을 확보하기 위해서는 피복두께가 12~18mm, 2시간을 확보하기 위해서는 30~34mm, 3시간 이상을 확보하기 위해서는 40~46mm의 피복두께가 필요하다. 하중비 0.4에서는 내화성능 1시간을 확보하기 위해서는 피복두께가 8~15mm, 2시간을 확보하기 위해서는 26~30mm, 3시간 이상을 확보하기 위해서는 35~41mm의 피복두께가 필요함을 알 수 있다.

5.4 하중비에 따른 한계온도 산정

앞 절에서는 내화설계시 국내 내화기준으로 H형강 휨재의 내화시간 및 필요피복두께를 산정하였고, Table 8 ~ Table 10를 보게되면 내화기준을 적용시 하중의 크기에 따라 요구되는 필요피복두께가 달라짐을 알 수 있었다. 그 결과 효과적이고 안전한 내화설계를 위해 휨재에 가해지는 하중에 따라 필요피복두께를 산정하기 위해 내화기준 적용방안에 대해 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과로 내화기준을 적용하기 위한 방안은 하중비에 따라 기준적용을 다르게 적용할 것으로 제안한다. Fig. 12는 하중비에 따른 사용성기준(S)과 한계온도기준(T)의 필요피복두께의 비교를 나타내었고, 허용온도기준인 538°C는 하중비 약 0.6정도의 강도를 고려한 기준이며, 그 결과 기준이 되는 하중비는 최대지지하중 크기에 0.6정도가 적절함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 내화설계에 있어 과대 또는 과소한 시공이 될 수 있는 단점이 있으며, 본 연구에서는 이러한 문제점에 대한 방안으로 부재에 가해지는 하중과 허용되

는 온도를 동시에 고려한 내화설계가 이뤄져야 한다고 생각하여 하중비에 따른 한계온도를 산정하고자 한다.

외국에서는 안전한 내화성능을 확보하기 위해 하중비에 따른 한계온도를 뉴질랜드와 Eurocode 3에서는 계산식을 이용하며, BS 5950 : Part8에서는 제시된 표로 하중비에 따라 한계온도를 산정하며 Table 11에 나타내었다. 본 연구에서는 한계온도 산정을 하중비에 따라 사용성이 제한될 때 휨재의 온도를 평균하여 한계온도로 하며 결과를 Table 12에 나타내었고 하중비 0.8에서는 489°C, 하중비 0.6에서는 548°C, 하중비 0.4에서는 626°C로 산정하여 제안한다.

Table 8. H-400×200×8×13 beam cover thickness

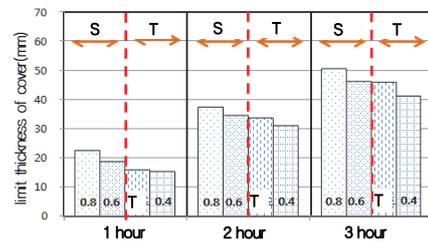
Fireproof time	Thickness of cover (mm)			
	Allowable Temp.	Load Ratio		
		0.8	0.6	0.4
1 hour	14	21	17	13
2 hour	28	32	29	25
3 hour	41	45	41	36

Table 9. H-500×200×10×16 beam cover thickness

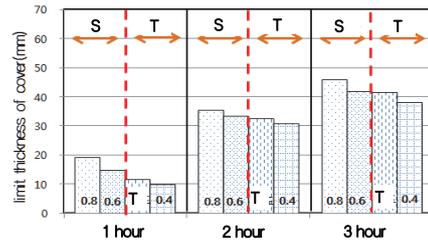
Fireproof time	Thickness of cover (mm)			
	Allowable Temp.	Load Ratio		
		0.8	0.6	0.4
1 hour	11	18	14	9
2 hour	28	31	29	26
3 hour	39	43	39	35

Table 10. H-600×200×11×17 beam cover thickness

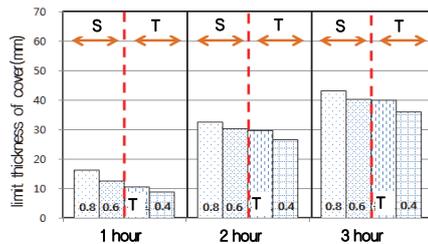
Fireproof time	Thickness of cover (mm)			
	Allowable Temp.	Load Ratio		
		0.8	0.6	0.4
1 hour	10	16	12	8
2 hour	29	32	30	26
3 hour	39	43	40	35



(a) H-400×200×8×13 beam



(b) H-500×200×10×16 beam



(c) H-600×200×11×17 beam

Fig. 12. Comparative fire resistance

Table 11. Limit temperature of international standard (°C)

Type	Load ratio		
	0.8	0.6	0.4
Eurocode3	496	554	620
BS 5950	520 (Load ratio 0.7)	555	620
New Zealand	353	491	629

Table 12. Limit temperature according to load ratio (°C)

H-Section	Load ratio		
	0.8	0.6	0.4
400×200×8×13	489	544	622
500×200×10×16	487	541	622
600×200×11×17	491	563	635
Mean	489	548	626

5.5 하중비에 따른 필요피복두께 제안

본 연구는 제시한 한계온도를 초과하는 시간을 내화시간으로 하여 내화성능을 확보하기 위한 필요피복두께를 하중과 피복재를 변수로 하여 각각의 필요피복두께를 산정한 다음 결과를 평균하여 하중비에 따라 제안한다.

Table 13은 피복을 한 H형강 휨재를 하중비에 따른 시간당 필요피복두께를 나타낸 결과로 변수에 따른 필요피복두께를 나타내며, 하중비 0.8에서는 내화성능 1시간을 확보하기 위해서는 11mm~20mm정도의 피복두께가 필요하다. 2시간을 확보하기 위해서는 22mm~36mm가 3시간을 확보하기 위해서는 45mm~52mm가 필요하다. 하중비 0.6에서는 1시간을 확보하기 위해서는 10mm~14mm정도의 피복두께가 필요하며 2시간에서는 16mm~33mm, 3시간을 확보하기 위해서는 36mm~41mm가 필요하다. 하중비 0.4에서는 필요한 피복의 두께가 가장 작으며 1시간을 확보하기

Table 13. Limit thickness of cover (mm)

H-Section	hour	Load ratio		
		0.8	0.6	0.4
400×200×8×13	1	20	14	10
	2	36	33	29
	3	50	45	39
500×200×10×16	1	15	11	9
	2	34	32	28
	3	45	41	37
600×200×11×17	1	11	10	8
	2	22	16	15
	3	52	36	20

Table 14. Mean of limit thickness of cover (mm)

Type	hour	Load ratio 0.8			Load ratio 0.6			Load ratio 0.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Thickness	15	31	49	12	27	41	9	24	32	

위해서는 8mm~10mm, 2시간에서는 15mm~28mm, 3시간을 확보하기 위해서는 20mm~39mm가 필요하다. Table 14는 Table 13을 평균하여 나타낸 결과로 하중비에 따른 시간당 필요한 피복의 두께를 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 H형강 휨재의 내화성능평가를 위해 유한요소 프로그램을 이용하여 H형강 휨재의 단면형상, 피복의 열적특성, 하중을 변수로 H형강 휨재의 내화성능을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) H형강 휨재의 내화성능을 분석하기 위해 ABAQUS를 이용하여 열전달해석 기반의 비선형구조해석을 실행할 수 있는 모델링기법을 제시하여 적용하였다. H형강 휨재를 대상으로 온도상승 따른 응력과 처짐의 변화를 기존 연구와 비교한 결과 10%이내의 차이를 보였으며 경향이 거의 일치하여 제시한 모델링기법의 타당성을 입증하였다.
- (2) 하중이 가해지지 않은 H형강 휨재에 피복의 두께에 따라 내화성능을 분석하였으며, 결과 무피복된 H형강 휨재를 기준으로 피복두께가 50mm까지 10mm씩 커질 경우, 내화시간은 무피복된 H형강 휨재를 기준으로 3.6~14배까지 크게 나타났었다. 그리고 허용온도기준 적용 시 내화시간의 결정은 대부분 평균온도 538°C에서 결정되는 것을 알 수 있었다.
- (3) 하중의 크기에 따라 H형강 휨재의 내화성능을 분석하였으며, 결과 같은 피복두께에서 발생하는 내화시간은 하중비 0.8에서는 하중비 0.6을 기준으로 했을 때에 비해 0.7~0.8배이며, 하중비 0.4에서는 1.1~1.3배가 됨을 알 수 있다.
- (4) 사용성 한계와 허용온도 기준을 이용하여 내화설계시 각각의 기준을 적용하는 적정 하중비를 알아내었다. 허용온도 기준인 538°C는 하중비가 약 0.6일 때 적용되는 기준이었으며, 내화기준을 적용하여 내화설계를 진행할 시 하중비 0.6이상에서는 하중에 따른 사용성 한계를 이용하고, 하중비 0.6이하에서는 허용온도 기준을 이용하여 내화설계를 진행할 것을 제안하였다.
- (5) 열응력해석을 이용하여 제안한 하중비에 따른 한계온도 값은 외국기준들과 비슷한 경향을 보였으며 그 결과값으로 하중비 0.8에서는 한계온도 489°C, 하중비 0.6에서

는 한계온도 548°C, 하중비 0.4에서는 한계온도 626°C로 제안한다.

- (6) 설정한 한계온도를 기준으로 하중비에 따라 달라지는 필요피복두께를 제안하였다. 하중비 0.6을 기준으로 하중비 0.8은 1.17~1.37배, 하중비 0.4는 0.82~0.89배 정도로 필요피복두께가 요구됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 재원으로 2013년도 한국연구재단의 수행연구비 지원(NRF-2013R1A1A2010636)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 국토해양부(2010) 내화구조의 인정 및 관리기준(국토해양부 고시 제2010-331호).
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Fireproof Structure Recognition/Management Standards (MLTM Notice No. 2010-331)*, Korea (in Korean).
- [2] 국가기술표준원(2014) 건축 부재의 내화 시험방법 - 일반 요구사항(KS F 2257-1: 2014).
Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements (KS F 2257-1: 2014)*, Korea (in Korean).
- [3] 국가기술표준원(2014) 건축부재의 내화 시험방법 - 보의 성능 조건(KS F 2257-6: 2014), Korea (in Korean).
Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Methods Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - Specific Requirements for Beams (KS F 2257-6: 2014)*, Korea (in Korean).
- [4] 국가기술표준원(2010) 단면형상계수에 따른 구조용 강재의 내화 피복 두께 산정 방법(KS F 2848: 2010).
Korean Agency for Technology and Standards (2010) *Method for Calculating Fire Protective Thickness of Structural Steel According to Section Factor (KS F 2848: 2010)*, Korea (in Korean).
- [5] 권인규(2010) 강구조 부재의 표면온도 산정 및 내화피복 두께에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지, 한국화재소방학회, 제24권, 제4호, pp.55-61.
Kwon, I.-K. (2010) Study on the Surface Temperature and Fire Protective Thickness for Structural Steel Elements at Fire Conditions, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, KIFSE, Vol.24, No.4, pp.55-61* (in Korean).
- [6] 강성덕, 남상철, 김인기, 민병직(2009) 고온에서의 Steel H-형강 보의 처짐 및 파괴온도, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제29권, 제1호, pp.141-144.
Kang, S.-D., Nam, S.-C., Kim, I.-K., and Min, B.-J. (2009) Mid-Span Deflection and Failure Temperature of H-Shaped Steel Beam in High Temperature, *Proceedings of Annual Conference of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction, AIK, Vol.29, No.1, pp.141-144* (in Korean).
- [7] 김동익, 김형준, 이준철, 김화중(2005) 강구조 부재의 내화성능설계를 위한 평가시스템 개발, 대한건축학회 학술발표대회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제25권, 제1호, pp.615-618.
Kim, D.-I., Kim, H.-J., Lee, J.-C., and Kim, W.-J. (2005) The Development of Estimation System for Fire Endurance Rating Design of Steel Structure Member, *Proceedings of Annual Conference of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction, AIK, Vol.25, No.1, pp.615-618* (in Korean).
- [8] 김성배, 김상섭, 유덕수, 최승관(2013) 신형상U형 하이브리드 합성보의 내화성능에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.379-388.
Kim, S.B., Kim, S.S., Ryu, D.S., and Choi, S.K. (2013) Fire Resistance of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.25, No.4, pp.379-388* (in Korean).
- [9] 안재권, 이철호(2014) 재하가열시험에 의한 무내화피복 콘크리트충진 각형강관기둥의 내화성능평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제4호, pp.323-334.
Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2014) Evaluation of Fire Resistance of Unprotected Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular Columns Under Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.26, No.4, pp.323-334* (in Korean).
- [10] 안재권, 이철호(2015) 무피복 합성보의 내화성능에 대한 실험 및 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp.143-153.
Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2015) Experimental and Numerical Study of Fire Resistance of Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.27, No.2, pp.143-153* (in Korean).

- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2010) *Abaqus/CAE User's Manual, Ver. 6.10*, DSS, USA.
- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013) *Abaqus Analysis User's Manual, Ver. 6.10*, DSS, USA.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013) *Abaqus Theory Manual, Ver. 6.10*, DSS, USA.
- [14] European Committee for Standardization (1995) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design (ENV 1993-1-2: 1995)*, Belgium.
- [15] British Standard Institution (1990) *Structural Use of Steelwork in Building, Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design (BS 5950-8: 1990)*, UK.
- [16] Carino, N.J., Stames, M.A., Gross, J.L., Yang, J.C., Kukuck, S.R., Prasad, K.R., and Bukowski, R.W. (2005) *Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Passive Fire Protection*, National Construction Safety Team Act Reports (NIST NCSTAR) No. 1-6A, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [17] Seputro, J. (2004) *Effect of Support Conditions on Steel Beams Exposed of Fire*, Fire Engineering Research Report No. 01/6, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- [18] Buchanan, A., Moss, P., Seputro, J., and Welsh, R. (2004) The Effect of Stress-Strain Relationships on the Fire Performance of Steel Beams, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.26, No.11, pp.1505-1515.

요 약 : 국내의 내화성능평가는 대부분 사양적설계 방법인 품질시험을 통해 이뤄지고 있다. 하지만 시험 특성상 많은 비용과 시간을 요구하며 다양한 건축구조에 대한 내화성능평가에는 어려움이 많다. 따라서 본연구에서는 성능적 설계를 위한 연구로 유한요소 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용해 H형강 휨재를 대상으로 변수에 따른 열응력 해석을 통해 내화성능을 검토하며, 하중비별 한계온도를 제안한다.

핵심용어 : 내화, 아바쿠스, H형강 휨재, 하중비, 열응력 해석
