

철골보의 내화시간 평가를 위한 구조 및 열적 변수해석

Analysis of Structural and Thermal Parameters for Evaluating Fire Resistance of Steel Beams

박 한 나¹⁾ · 안 재 권²⁾ · 이 철 호³⁾
Park, Han Na · Ahn, Jae Kwon · Lee, Cheol Ho

요약: 본 연구에서는 다양한 설계조건 하에서 철골보의 내화시간을 평가할 수 있는 산정식을 열-구조 연성해석(fully coupled thermo-mechanical analysis)을 토대로 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 산정식은 철골보의 화재거동에 미치는 주요 인자를 구조변수 및 열변수로 명시적으로 반영하므로 각 설계변수의 내화성능에 대한 영향을 설계자가 쉽게 정량적으로 파악할 수 있는 강점이 있다. 광범위한 변수해석을 수행하기에 앞서 실험대 화재실험 결과를 활용하여 본 연구의 열-구조 연성해석모델의 타당성을 검증한 후, 철골보에 붕괴처짐(run-away deflection)이 발생할 때까지 화재거동에 대한 각 변수들의 영향력을 검토하였다. 이러한 수치해석결과를 다양한 설계조건에서 철골보의 내화시간 예측에 활용할 수 있도록 다중선형회귀분석을 통해 통계학적으로 신뢰도가 높은 평가식을 제안하였다. 현행 사양설계기준에서의 활용법을 사례를 들어 예시하였고, 제시된 식으로부터 얻어지는 경제성과 장점을 입증하였다.

ABSTRACT: This paper proposes a versatile formula which can be used to evaluate the fire resistant time of steel beams under various design conditions. Towards this end, the key parameters which affect the fire performance of steel beams were first determined through thermo-mechanical considerations, and classified into two groups: structural parameters and thermal parameters. Then the degree of influence of each parameter on the fire performance was investigated through a fully coupled thermo-mechanical analysis up to the occurrence of run-away deflection. The accuracy of the numerical model used was verified using an available full-scale fire test before conducting an extensive parametric analysis. Multiple linear regression analysis was performed to obtain the formula which can be used to predict the fire resistance time of steel beams under various design conditions. The statistical analysis showed that the proposed formula is very robust. The application of the formula in practical fire design under the current code was illustrated in detail. The economy and other advantages of the proposed formula were clearly shown.

핵심용어: 내화설계, 내화성능, 화재실험, 철골보, 완전 열-구조 연성해석

KEYWORDS: Fire design, Fire resistance, Fire test, Steel beam, Fully coupled thermo-mechanical analysis

1. 서론

기존의 건축물 내화설계에서는 각 구조물의 용도와 규모에 따라 소요되는 내화시간을 법규로서 제시하고 이에 따라 부재를 내화피복하는 사양적 내화설계법(prescriptive fire design)이 주로 시행되어왔다. 이러한 설계법은 화재 시에 발생하는 열과 구조물 사이에서 이루어지는 열전달기구 및 구조물의 자체적인 열용량 등을 반영하지 못하는 한계가 있음이 잘 알려져 있다. 사양적 내화설계법의 한계를 극복하기

위하여 최근 미국, 유럽을 비롯한 선진국에서는 건축물의 용도와 규모 외에도 화재위험성, 열 및 구조적 특성, 재하하중 등을 반영하여 내화성능을 평가하는 성능기반 내화설계법(performance based fire design)을 개발, 활용하기 시작하였다. 이러한 설계법을 뒷받침하기 위한 대표적인 연구로 Yin 등(2004)은 철골보의 화재실험 결과(Liu 등, 2002)를 바탕으로 수치해석적인 연구로 접근하여 내화시간을 평가할 수 있도록 하였으며, Kodur(1998)는 CFT 합성기둥의 내화성능을 평가하는 식을 제안하기도 하였다.

1) 삼성물산, 공학석사(dajigi00@snu.ac.kr)

2) 서울대학교 대학원 건축학과, 박사과정(judeajk@snu.ac.kr)

3) 교신저자, 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사

(Tel : 02-880-8735, Fax : 02-871-5518, E-mail : ceholee@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

국내에서도 2006년 6월에 개정된 건축법 시행령 「건축물 피난·방화구조기준 등에 관한 규칙 제3조 제8호 다항」의 세부운영지침에서 화재실험을 통해 구조물의 내화성능을 입증하면 한국건설기술연구원장의 인정을 통해 내화구조로 활용할 수 있도록 제도화해오고 있다. 이와 같은 법개정을 통하여 내화구조의 성능기반 내화설계에 대한 법적 근거를 확보 하였으나, 현재 건설 중인 다양한 구조부재에 대해 조건별로 화재실험을 수행하여 그 성능을 입증한 다음 구조시스템에 도입한다는 것은 사실상 불가능하다. 즉, 부재의 특성 및 화재조건을 반영하여 내화성능을 판단할 수 있는 구체적인 기준이 아직 마련되어 있지 않다. 이로 인해 건설 현장에서 시공되는 대부분의 내화구조는 합리적 근거 없이 기존의 관습적인 내화처리법을 답습하고 있는 실정이며, 이는 경제적 손실과 함께 기술적 발전을 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

국내 강구조 건축물의 경우 철골보의 내화성능을 확보하기 위하여 내화피복에 상당히 의존하고 있다. 많은 경우 철골보의 다양한 구조 및 열적 특성을 반영하지 못한 채 비경제적인 과다설계로 이어지고 있다. 본 연구에서는 철골보의 화재 거동을 고려하여 이에 영향을 미치는 특성들을 설계변수로서 분류해내고 실무적으로 간편하게 내화설계에 적용할 수 있는 철골보의 내화시간 평가식을 제안하고 활용법을 제시하였다.

2. 화재 상태에서의 철골보의 거동

2.1 온도 상승에 따른 강재의 물성 변화

구조용 강재는 온도가 상승함에 따라 물성이 변화한다. 이러한 물성 변화로 인하여 강재를 활용한 구조 부재의 고온에서의 거동이 상온에서의 거동과 확연히 달라지게 된다. 강재의 온도가 증가함에 따라 강재의 열팽창계수(α_s) 및 온도변화에 따른 변형율(ϵ_{th})은 함께 증가하는 양상을 보이는데 Eurocode(CEN, 2001)에서는 식 (1), 식 (2)와 같이 제시하고 있다. 그리고 강재의 비열(C_p) 및 열전도율(λ)은 식 (3), 식 (4)와 같이 변화한다.

$$\alpha_s = (0.004T + 12) \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad 0^{\circ}\text{C} \leq T < 1000^{\circ}\text{C} \quad (1a)$$

$$\alpha_s = 16 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad T \geq 1000^{\circ}\text{C} \quad (1b)$$

$$\epsilon_{th} = -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5}T + 0.4 \times 10^{-8}T^2 \quad T < 750^{\circ}\text{C} \quad (2a)$$

$$\epsilon_{th} = 0.011 \quad 750^{\circ}\text{C} \leq T < 860^{\circ}\text{C} \quad (2b)$$

$$\epsilon_{th} = -0.0062 + 2 \times 10^{-5}T \quad 860^{\circ}\text{C} \leq T \quad (2c)$$

$$C_p = 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3 \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C} \quad (3a)$$

$$C_p = 666 + 13002 / (738 - T) \quad 600^{\circ}\text{C} \leq T < 735^{\circ}\text{C} \quad (3b)$$

$$C_p = 545 + 17820 / (T - 731) \quad 735^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C} \quad (3c)$$

$$C_p = 650 \quad 900^{\circ}\text{C} \leq T < 1200^{\circ}\text{C} \quad (3d)$$

$$\lambda = 54 - 0.0333T \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C} \quad (4a)$$

$$\lambda = 27.3 \quad 800^{\circ}\text{C} \leq T < 1200^{\circ}\text{C} \quad (4b)$$

강재의 항복강도, 탄성계수 및 탄성한계점은 온도의 증가에 따라 점차 감소하는데, Eurocode에서는 실제 수행된 다양한 화재실험의 결과를 토대로 고온에서의 항복강도, 탄성계수, 탄성한계점의 변화를 상온에서 물성치에 대한 저감계수 (retention factor)로 표현하고 있다. 그림 1은 온도 상승에 따른 저감계수들의 변화를 나타낸 것이다.

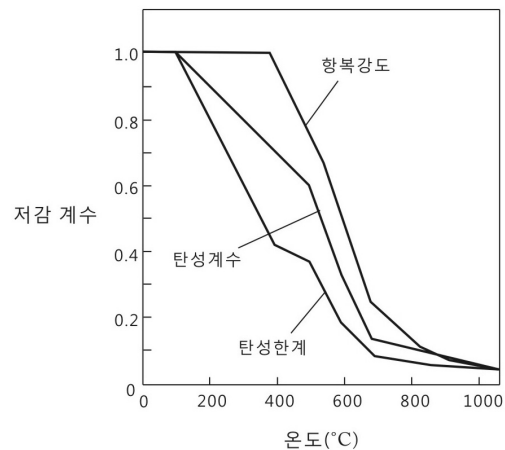


그림 1. 온도상승에 따른 항복강도, 탄성계수, 탄성한계점의 변화 (CEN, 2001)

2.2 고온에서 철골보의 거동

표준화재실험에서는 실험 여건상 보를 단독으로 단순지지한 조건에 대해 실험을 수행하는 것이 일반적이다. 이 경우 일정한 하중이 재하된 상태에서 온도 상승에 따라 보의 처짐이 초기에 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 700°C 전후에 변형이 급증한다. 이에 비해 실제 화재상태에서 보의 거동은 표준화재실험과 다소 차이가 있다. 일반적으로 보 부재는 콘크리트 슬래브 등에 의해 상부 플랜지가 구속되어 있고, 양단부는 기둥과 접합에 의해 구속되어 있다. 일반적으로 온도가 증가함에 따라 보의 구조적 성능은 저하되지만 구속된 보는 단순지지보와 달리 지지하던 모멘트를 양단의 기둥에 전달함으로써 처짐이 급격하게 증가하는 시점을 늦추게 된다.

그림 2는 영국 CORUS의 철골보 화재실험결과(Wainman 등, 1987)로서 단순지지된 보와 단부 회전이 30% 구속된 보의 변위를 시간변화에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

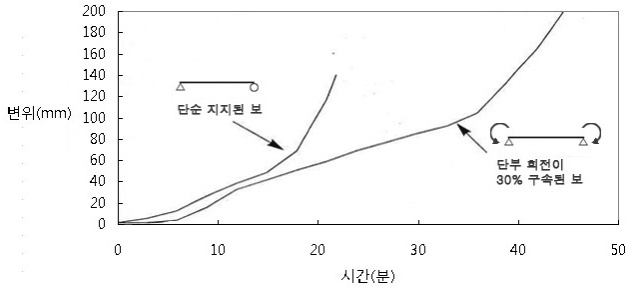


그림 2. 단부의 회전구속이 고온에서 보의 거동에 미치는 영향 (Wainman 등, 1987)

온도가 계속 증가하여 대변위가 발생하면 보의 양단은 하중을 더 이상 휨거동으로 지지하지 못하고 현수작용에 이르게 된다. 화재 시 철골보의 이 같은 거동은 보와 기둥의 강성비 및 접합부에 따라 다양하게 변화하게 되며 보의 내화성능에 큰 영향을 끼친다.

이와 같이 고온에서 철골보의 거동은 상당히 복잡하고 예측하기 힘들다. 따라서 내화시간 평가식을 제안함에 있어서 철골보의 내화성능에 영향을 미치는 다양한 요소들을 분류하고 내화시간과 이들의 상관관계를 정량적으로 도출해 내는 것은 큰 의미가 있다.

3. 철골보의 내화성능에 영향을 주는 요인

3.1 내화성능에 영향을 주는 구조적 요인

실제 화재에 대비하여 구조실무자들이 가장 염두에 두어야 하는 것이 내화구획(fire compartmentation)이다. 화재가 발생하더라도 건물의 안정성, 차염성, 차열성이 확보된다면 화재는 다른 구획으로 전이되지 않는다. 본 연구에서는 화재가 발생하지 않은 다른 구획(인접 스패)의 구조 부재들은 상온 상태를 유지하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 철골보의 내화성능에 영향을 미칠 것으로 판단되는 구조적 설계요소를 구조변수로 분류하였다.

먼저 온도상승 초기의 보처짐에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 하중비(load ratio, LR) 및 하중분포상태를 구조변수로 고려하였다. 여기서 하중비는 상온에서 작용하는 보단면의 최대모멘트와 소성모멘트의 비를 가리키는 것이다.

철골보의 단면이 700°C이상의 고온 상태가 되면 특히 보

의 현수작용을 주목해야한다. 그림 3과 같은 철골보의 화재 실험 및 해석결과(Liu 등, 2002; Yin 등, 2004)에서는 보의 단부에서 발생하는 축방향 반력이 온도 상승에 따라 압축력에서 인장력으로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 거동은 고온에서 철골보의 현수작용에 의한 것으로, 이에 영향을 미치는 보의 단면적(A), 보의 경간-춤 비(span to depth ratio, L/D)를 내화성능에 영향을 주는 구조변수로 고려하였다.

2.2절에서 언급한 바와 같이 양단부의 구속도는 철골보의 내화성능에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 양단부의 구속도를 보와 기둥의 축강성비(k_a) 및 회전강성비(k_r)로 치환하여 구조변수에 반영하였다.

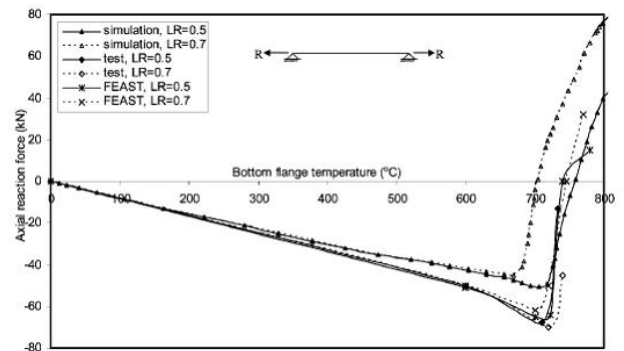


그림 3. 온도 상승에 따른 보 단부의 축방향 반력의 변화 (Liu 등, 2002; Yin 등, 2004)

3.2 내화성능에 영향을 주는 열적 요인

표 1. 단면형상계수의 산정 예시

| 화재노출과 피복형태 | 뿔침형 | 박스형 | | | |
|----------------|------------------------------|-----------------------|--------|------------------------|------------------------|
| 3면 화재노출 | $H_p/A = (2D + 3B - 2t_w)/A$ | $H_p/A = (2D + B)/A$ | | | |
| 4면 화재노출 | $H_p/A = (2D + 4B - 2t_w)/A$ | $H_p/A = (2D + 2B)/A$ | | | |
| H형강 | A (cm) | D (mm) | B (mm) | 3면 노출 $H_p/A (m^{-1})$ | 4면 노출 $H_p/A (m^{-1})$ |
| H-148×100×6×9 | 26.84 | 148 | 100 | 218 | 255 |
| H-298×201×9×14 | 83.36 | 298 | 201 | 142 | 166 |

화재가 발생하면 열원과 구조체 사이의 대류 및 복사, 구조물 내부에서의 전도와 같은 열전달을 통하여 철골보 단면의 온도는 상승한다. 이 때 단면의 형상이나 표면상태에 의해 온도구배가 나타나게 된다. 상온에서의 구조성능이 같은 보라도 화재 시에 온도구배가 다르면 구조적 물성이 변하는 크기나 면적이 달라지기 때문에 화재한계상태에 이르기까지의 내화 성능에 영향을 줄 수 있다. 이와 같이 보 단면의 온도 구배에 영향을 미치는 요소들은 열변수로서 설정하였다.

본 연구에서는 단면형상계수(section factor, H_p/A) 및 내화피복두께(c)를 열변수로 고려하였다. 여기서 형상계수란 화재노출면의 둘레길이(H_p)를 보의 단면적(A)으로 나눈 값을 의미한다. 표 1에서는 철골보의 3면 화재노출 및 4면 화재노출의 경우에 대하여 단면형상계수를 산정하는 예를 나타내었다.

4. 열-구조 연성해석 및 타당성 검증

4.1 열-구조 연성해석의 절차

본 연구에서의 철골보 화재해석은 열전달 및 화재 모델링을 위한 다음의 가정을 따랐다(Incropera 등, 2002).

- ① 부재의 구조적 거동은 열전달이나 화재 성상의 발달에 영향을 미치지 않는다.
- ② 열전달은 화재 성상에 영향을 미치지 않는다.

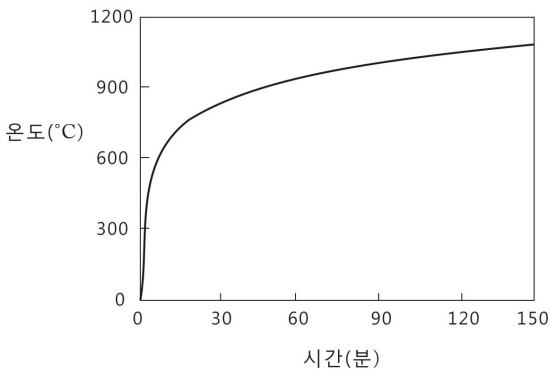


그림 4. ISO 834 표준가열온도곡선

이러한 가정을 바탕으로 열-구조 연성해석은 크게 3단계로 나누어진다. 1단계는 부재가 노출되는 화재를 정의하는 단계인데, 본 연구에서는 구조부재의 내화성능을 판단하기 위한 표준화재실험에서 쓰이는 ISO 834 표준가열온도곡선(그림 4)을 채택하였다.

2단계에서는 온도 증가에 따른 구조부재의 열전달을 정의한다. 열원에서 구조체로는 대류 및 복사에 의해 열전달이 이

루어지고 강재 내부에서는 전도에 의해 열이 전달된다. 이러한 열전달 기구는 열전달 형태가 가장 단순하고 이상화된 형태일 것, 경계조건이 시간적으로 변화되지 않을 것, 재료의 물성치가 온도에 의해 변화되지 않을 것 등 여러 이상적인 조건 하에서만 그 해를 유도할 수 있다. 조건이 복잡해지면 해석해를 유도하기 상당히 힘들어지기 때문에 화재해석의 경우 수치해석에 의존하는 경우가 대부분이다.

대류의 경우, 대류계수(h)에 의해 전달률이 결정되는데, 화재가 발생한 곳에서 공기에 의한 자유 대류가 일어나므로 그 값은 $25W/m^2K$ 로 취하였다. 복사의 경우 구조체의 표면온도변화를 열하중으로 입력할 수 있기 때문에 표준가열온도곡선의 온도변화를 직접 입력하였다. 복사와 관련하여 방사율(ϵ)은 0.5, 스테판-볼츠만 상수(σ)는 $5.67 \times 10^{-8}W/m^2K^4$ 로 각각 입력하였다.

온도가 증가함에 따라 강재의 물성치가 변화한다는 것은 이미 언급하였다. 본 연구에서는 고온에서 국내 강재의 물성치 변화에 적합하다고 알려져 화재관련 연구에서 널리 통용되고 있는 Eurocode의 재료모델을 따르기로 하였다(Chung 등, 2008). 온도 변화에 따라 변화하는 강재의 열전도율, 비열 및 열팽창률 등의 열특성은 2.1절에서 소개된 식 (1)~(4)에 따라 입력하였다. 온도 증가로 인해 감소하는 강재의 탄성계수, 탄성한계 및 항복강도 등 구조적 특성의 변화는 Eurocode에 제시된 저감계수에 근거하여 Thermo multi-linear model을 이용하여 온도별 비선형 모델로 입력하였다.

열-구조 연성해석의 마지막 단계는 증가하는 온도에 의한 철골보의 열적, 구조적 성능 변화를 반영하여 거동을 규명하는 것이다. 본 연구에서는 열-구조 연성해석을 수행하기 위하여 수치해석 프로그램인 ADINA v8.5(ADINA, 2008)를 활용하였다. ADINA는 재료의 온도 증가에 의한 물성 변화와 부재에 가해지는 하중에 의한 구조적 거동에 대하여 시간 증분에 따른 연성해석을 수행하므로 화재해석결과에 대한 신뢰도가 높다(Wang, 2002).

4.2 열-구조 연성해석모델의 검증

열-구조 연성해석모델의 타당성을 검증하기 위하여 실제로 화재실험을 수행한 철골보를 모델링하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 비교검증 대상은 Liu 등(2002)의 화재실험으로 양단이 기둥에 구속된 보를 화재에 노출시켜 온도 상승에 따른 거동을 분석한 것이다. 보의 경간은 2m이고 양단부에서 0.6m 떨어진 지점에 각각 집중하중이 작용한다. 철골보는 UB178×102×19가 사용되었으며 강재는 S275($F_y=275MPa$)이다. 상온에서 보 단면의 최대휨모멘트가 소성모멘트의 50%에 해당하

도록 하중을 가한 후, ISO 834의 표준가열온도곡선을 따라 화재에 노출시켰다. Liu 등의 실험결과와 이 후 Wang 등의 수치해석결과 및 본 연구의 열-구조 연성해석결과를 통해 나타난 경간 중앙부의 처짐을 그림 5에 나타내었다.

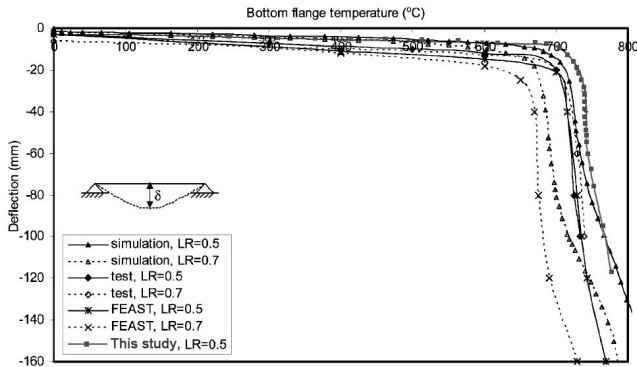


그림 5. 실제 실험 및 수치해석에 의한 온도-처짐 곡선 (Liu 등, 2002; Yin 등, 2004)

그림에서 보는 것처럼 Liu 등의 화재실험에서 철골보는 하부플랜지의 온도가 700°C에 이르러서 처짐이 급격히 증가하기 시작하여 보의 한계변위 이상인 대변형으로 이어진다. 이러한 철골보의 거동과 본 연구에서의 열-구조 연성해석결과를 비교해보면 해석모델이 실제 실험에서 철골보의 구조적 성능이 크게 감소하면서 붕괴처짐(run-away deflection)이 발생하는 온도 지점을 비교적 정확히 찾았고 이후 처짐 양상도 실험과 유사한 결과를 나타내므로, 본 해석모델이 실제 거동에 부합하는 타당성을 지닌다고 판단할 수 있다. 따라서 이 열-구조 연성해석모델을 토대로 화재해석을 수행한 후 부재가 붕괴처짐이 발생하는 지점까지 걸리는 시간을 분석하여 부재의 내화성능 예측에 활용할 수 있는 연구를 수행하였다.

5. 내화성능에 대한 변수해석 및 결과 분석

5.1 변수해석모델 선정

변수해석에 적용할 철골보의 단면으로 H-600×200×11×17을 선택하였고 항복강도가 235MPa인 SS400 강재를 적용하였다. 내화성능에 영향을 주는 구조변수, 열변수 별로 아래와 같이 변수해석모델을 선정하였다.

구조변수 중에서는 가장 먼저 하중분포형태를 보경간의 중앙부에 1점 집중하중이 작용하는 경우, 보경간의 3등분점에 2점 집중하중이 작용하는 경우, 보 전체에 등분포하중이 작용하는 경우의 3가지를 고려하였다. 하중비는 작용하는 하중으로 인하여 상온에서 보의 단면에 발생하는 최대모멘트가

소성모멘트의 30%, 50%, 70%일 경우로 구별하였다. 단면적의 경우에는 H-600×200×11×17($A=134.4\text{cm}^2$) 외에도 같은 H-600×200 계열인 H-596×199×10×15($A=120.5\text{cm}^2$)와 H-606×201×12×20($A=152.5\text{cm}^2$)의 해석을 통하여 내화성능에 대한 단면적의 영향을 검토하였다. 보의 경간-축비는 경간이 보축의 10배, 15배, 20배인 경우로 나누어 해석을 수행하였다.

보의 축변형에 대한 단부의 구속도를 반영하는 축강성비(k_a)는 그림 6과 같은 모형에 의해 기둥이 제공하는 축방향 구속도를 식 (5)와 같이 산정하여 적용한다. 즉, 화재의 영향을 받는 보의 축변형에 대한 외측기둥 전체의 강성을 단부 구속도에 반영하는 것이다. 변수해석모델에서는 축강성비가 1, 10, 50인 경우로 나누어 단부에 스프링요소로 모델링하였다. 그리고 단부의 회전구속도를 반영하는 회전강성비(k_r)는 그림 7과 같은 모형에 의해 인접한 기둥과 보의 회전강성을 감안하여 식 (6)와 같이 산정하였다. 변수해석모델에서는 회전강성비가 1, 5, 10, 50인 경우로 나누어 단부에 스프링요소로 모델링하였다. 여기서 강성비의 숫자가 클수록 단부의 축방향 혹은 회전구속도가 큰 것을 나타낸다.

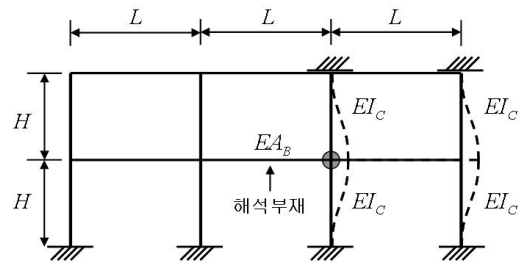


그림 6. 보의 축변형구속도를 산정하기 위한 모형

$$k_a = \frac{\sum k_{\text{horizontal}, C}}{k_{\text{axial}, B}} = \frac{\sum \left(\frac{12EI_C}{H^3} \right)}{\frac{EA_B}{L}} \quad (5)$$

여기서, I_C 는 기둥의 단면2차모멘트, A_B 는 보의 단면적, H 는 층고, L 은 보경간길이이다.

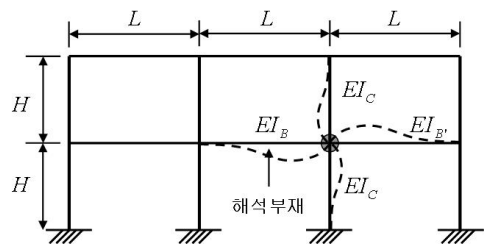


그림 7. 보의 회전구속도를 산정하기 위한 모형

$$k_r = \frac{k_{rotation.B} + \sum(k_{rotation.C})}{k_{rotation,B}} = \frac{\frac{4EI_{B'}}{L} + \sum(\frac{4EI_C}{H})}{\frac{4EI_B}{L}} \quad (6)$$

여기서, I_B 와 $I_{B'}$ 는 보의 단면2차모멘트, I_C 는 기둥의 단면2차모멘트, H 는 층고, L 은 보경간길이이다.

본 연구에서 열변수로 고려한 단면형상계수는 단면적과 화재노출길이에 의해 표현되므로 구조변수와 겹치는 부분이 있다. 이러한 변수의 중복을 피하기 위하여 단면형상계수의 변수해석에서는 단면적을 일정하게 하고 화재노출상태를 고려한 화재노출길이만을 변화시켜 해석을 수행하였다. 화재노출상태는 보의 하부플랜지만 열원의 직접적인 영향을 받는 1면 노출, 웨브까지 추가적으로 영향을 받는 3면 노출, 모든 면이 영향을 받는 4면 노출로 변수를 나누었다(표 1 참조). 다른 열변수인 내화피복두께는 관습적으로 행해지는 30mm 이상의 내화피복보다 얇은 범위(0, 5, 10, 15, 20, 30mm)를 변수해석에서 다루었다. 이는 관습적인 내화피복두께의 보수성을 검증하고, 합리적인 내화피복두께를 알아보기 위함이다. 내화피복재료의 경우 열전도율이 0.12W/mK이고 비열이 1200J/KgK인 일반적인 내화뿔철재의 열특성을 해석에 반영하였다.

5.2 변수해석 결과

5.2.1 구조변수에 따른 내화시간의 변화

변수연구를 용이하게 하기 위해 먼저 하중분포형태에 대한 해석결과를 비교하였다. 기타 구조변수와 열변수를 동일하게 하여 작용하는 하중분포형태를 변화시켜 열-구조 연성해석을 수행한 결과, 분포형8과 같이 해석결과와의 차이가 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 내화피복을 하지 않은 보뿐만 아니라 내화피복을 처리한 보에서도 마찬가지였다. 따라서 하중분포형태는 내화시간에 영향을 미치지 않는 변수로 판단하여, 이후의 모든 변수해석에서는 2점 집중하중으로 제한한 모델을 적용하였다.

그림 9에서 보듯이 하중비가 높을수록 초기처짐이 상당히 증가함을 알 수 있고 이로 인하여 내화시간도 어느 정도 단축된다는 것을 파악할 수 있다. 그림 10에서 나타나듯이 단면적 또한 내화시간에 상당한 영향을 끼치고 있음을 알 수 있는데, 같은 H-600×200계열 단면이라도 20분 가량 내화시간의 차이가 있었다. 이와 달리 그림 11에서는 보 경간-층비의 변화가 온도증가에 따른 철골보의 거동에 영향을 미치지 않고 내화시간이 거의 일정함을 확인할 수 있다.

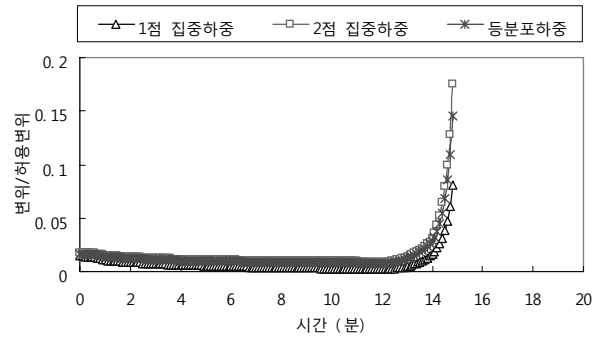


그림 8. 하중분포에 따른 화재시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 무내화피복, 3면노출)

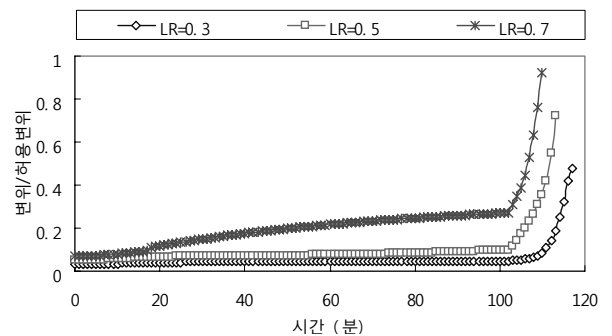


그림 9. 하중비에 따른 화재시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 피복 10mm, 3면노출)

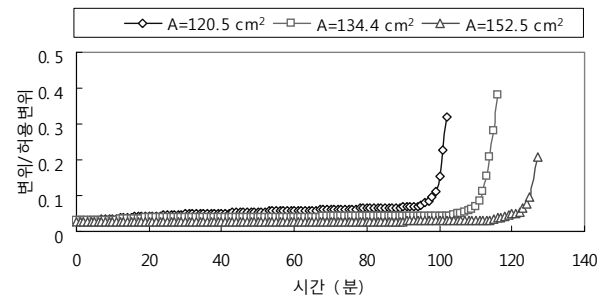


그림 10. 단면적에 따른 화재시간-처짐 곡선
(LR=0.3, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 피복 10mm, 3면노출)

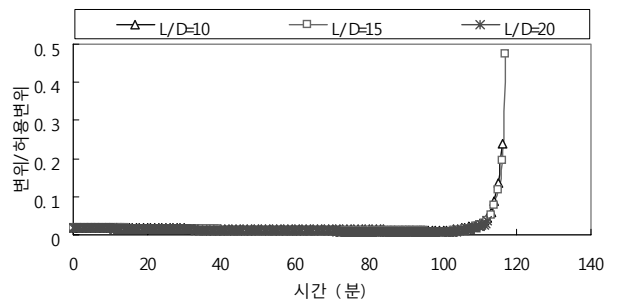


그림 11. 보 경간-층비에 따른 화재시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=k_r=1$, 피복 10mm, 3면노출)

보 단부의 구속도가 내화시간에 영향을 미치는 정도는 그림 12와 그림 13에서 알 수 있다. 축변형 구속도가 철골보의 내화성능에 미치는 영향이 적는데 비해 회전구속도는 상당한 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었다. 철골보의 경우 온도상승 초기에는 열팽창에 의해 압축력을 받다가 이후 휨처짐이 발생하면서 축변형 구속도의 영향력이 줄어드는 것으로 판단된다. 그리고 단부의 회전구속도가 커질수록 내화시간은 상당히 증가하게 되는데, 이를 통해 단순지지보만을 고려한 현행의 표준내화시간 산정법이 보수적임을 확인할 수 있다.

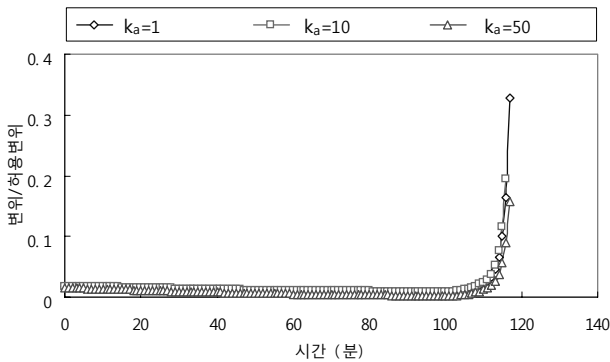


그림 12. 축강성비에 따른 화재시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_r=1$, L/D=15, 피복 10mm, 3면노출)

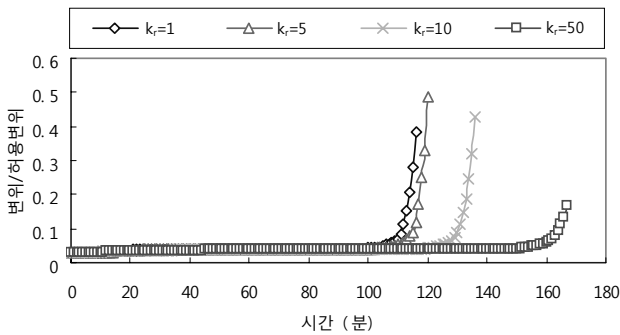


그림 13. 회전강성비에 따른 화재시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=1$, L/D=15, 피복 10mm, 3면노출)

5.2.2 열변수에 따른 내화시간의 변화

본 연구에서는 내화성능에 영향을 미치는 열변수로서 화재노출상태와 내화피복두께를 고려하였다. 표 2는 화재노출면이 1면, 3면, 4면일 때의 시간 경과에 따른 철골보 단면의 온도변화를 나타낸 것이다. 하부플랜지의 바닥부분만 화재에 노출되는 1면 노출의 경우에는 2시간이 지나 열원의 온도가 1000℃를 넘어서도 보의 상부는 상대적으로 저온을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 14의 화재노출상태에 따른 시간

-처짐곡선에서도 나타나듯이 1면 노출된 경우의 내화성능은 180분을 초과하였다. 3면 노출과 4면 노출의 경우는 상부플랜지의 온도가 700℃를 초과하면서 120분 이내의 내화성능을 나타내었다. 그림 14에서 보듯이 3면 노출의 내화성능이 약 10분 정도 우수함을 알 수 있다.

표 2. 화재노출상태에 따른 시간별 단면온도 분포
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 피복 10mm)

| 시간 | 30분 경과 | 60분 경과 | 90분 경과 | 120분 경과 | 온도 (°C) |
|-------|--------|--------|--------|---------|---|
| 1면 노출 | | | | | 675.0 585.0 495.0 405.0 315.0 225.0 135.0 |
| 3면 노출 | | | | | |
| 4면 노출 | | | | | |

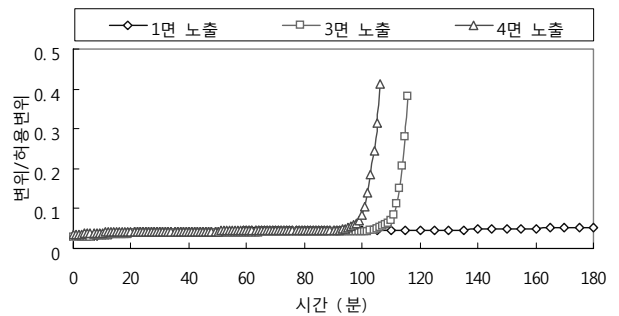


그림 14 화재노출상태에 따른 시간-처짐 곡선
(H-600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 피복 10mm)

변수해석 결과 그림 15에서 나타나듯이 다른 변수에 비하여 내화피복두께는 보의 내화성능에 큰 영향을 미치고 있어, 보의 내화성능을 평가하는 데 있어 가장 중요한 변수라고 판단된다. 특히 철골보의 화재노출면에 30mm의 내화피복을 하면 거의 3시간에 근접한 내화성능을 나타내었다. 이는 현재의 내화설계기준에 따라 구조체의 특성에 관계없이 내화성능을 확보하기 위해 30mm 이상 시공하는 관행이 지나치게 비경제적이라는 것을 보여준다. 그림 15에서 보듯이 30mm 이하의 내화피복을 통해서도 피복을 하지 않은 경우와 비교하여 상당한 내화성능의 향상을 꾀할 수 있음이 잘 나타난다.

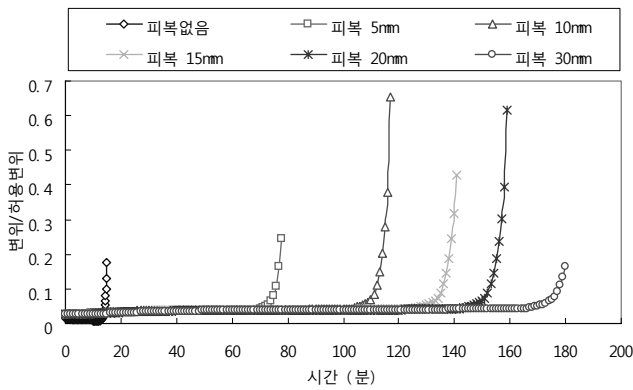


그림 15. 내화피복두께에 따른 시간-치짐 곡선

(H=600×200×11×17, LR=0.3, $k_a=k_r=1$, L/D=15, 3면노출)

6. 내화시간 평가식의 제안 및 활용

6.1 내화시간 평가식의 제안과 통계적 분석

변수해석결과를 토대로 철골보의 내화시간을 산정할 수 있는 평가식을 제안하기 위해 식 (7)와 같은 모델을 가정하였다.

$$R = C \cdot \frac{A^{\alpha_1} (LD)^{\alpha_2} k_a^{\alpha_4} k_r^{\alpha_5} c^{\alpha_6}}{(LR)^{\alpha_3} (H_p)^{\alpha_7}} \quad (7)$$

여기서, R은 내화시간(분), C는 비례상수, A는 단면적(cm^2), LD는 보 경간-춤비, c는 플랜지두께에 대한 내화피복두께비, k_a 는 축강성비, k_r 는 회전강성비, LR은 하중비, H_p 는 화재노출길이(mm)이다.

각 설계변수의 지수와 비례상수를 구하기 위하여 앞의 열-구조 연성해석을 통해 구한 내화성능 변수해석결과를 표 3과 같이 정리하였다. 각 변수값을 식 (7)에 대입하여 로그로 변환한 다음 다중선형회귀분석을 실시한 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 P값이 작을수록 회귀분석을 통한 설계변수의 계수가 유의한 것으로 판단할 수 있다. 보 경간-춤비의 경우 다른 변수들과 달리 P값이 1에 가까운 큰 값을 가져 회귀분석에 의한 계수가 유의한 것으로 단정할 수 없다. 축강성비의 경우도 다른 변수에 비해 P값이 다소 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 회귀분석의 결과는 열-구조 연성해석결과에도 나타나듯이 보 경간-춤비나 축강성비가 철골보의 내화시간에 큰 영향을 끼치지 않았기 때문이다. 이것은 회귀분석결과에서 이들 변수의 계수 크기가 0에 가까운 이유이기도 하다. 나머지 설계변수들은 충분히 작은 P값을 가지므로 내화 시간에 영향을 주는 주요 변수들로 판단된다.

회귀분석의 결과를 식 (7)의 지수에 반영한 형태가 식

(8a)이다. 식 (8b)는 내화성능에 대한 영향이 미미한 축강성비와 보 경간-춤비에 대한 변수를 제외한 간단한 형태로 식 (8a)에 비해 활용도가 더 높을 것이다. 이러한 내화시간 평가식을 통하여 구조변수 및 열변수의 내화성능에 대한 정량적인 영향력을 파악하고 간단하게 경제적인 내화설계를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

표 3. 구조 및 열변수에 따른 내화시간의 변화

| 변수 | A(cm^2) | LD | LR | k_a | k_r | c | H_p | R(분) |
|--------|-------------|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 단면적 | 120.5 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 102.8 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 152.5 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 121.3 |
| 보경간-춤비 | 134.4 | 10 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 111.8 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 20 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.7 |
| 하중비 | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 15 | 0.5 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 108.7 |
| | 134.4 | 15 | 0.7 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 101.9 |
| 축강성비 | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 10 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.8 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 50 | 1 | 0.588 | 1778 | 114.1 |
| 회전강성비 | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 5 | 0.588 | 1778 | 112.8 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 10 | 0.588 | 1778 | 130.8 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 50 | 0.588 | 1778 | 162.7 |
| 피복두께 | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.294 | 1778 | 73.4 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.882 | 1778 | 134.6 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 1.176 | 1778 | 154.1 |
| 화재노출길이 | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 1.764 | 1778 | 177.3 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 200 | 180 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1778 | 112.2 |
| | 134.4 | 15 | 0.3 | 1 | 1 | 0.588 | 1978 | 101.5 |

표 4. 다중선형회귀분석 결과

| | 계수 | 표준오차 | t통계량 | P값 | 하위95% | 상위95% |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Y절편 | 1.344295 | 0.583235 | 2.304897 | 0.034908 | 0.010789 | 2.580698 |
| log A | 0.709619 | 0.267465 | 2.65313 | 0.017358 | 0.142619 | 1.276620 |
| log LD | 0.000490 | 0.089962 | 0.005449 | 0.995719 | -0.19022 | 0.191202 |
| log LR | 0.069189 | 0.047762 | 1.448612 | 0.166760 | -0.03206 | 0.170440 |
| log k_a | 0.010457 | 0.010407 | 1.004818 | 0.329940 | -0.01160 | 0.032519 |
| log k_r | 0.085734 | 0.01002 | 8.556021 | 2.29E-07 | 0.064492 | 0.106976 |
| log c | 0.481875 | 0.030126 | 15.99558 | 2.90E-11 | 0.418012 | 0.545739 |
| log H_p | 0.227663 | 0.020989 | 10.84683 | 8.76E-09 | 0.183168 | 0.272157 |

$$R = 22.1 \cdot \frac{A^{7.10E-1} LD^{4.90E-4} k_a^{1.05E-2} k_r^{8.57E-2} c^{4.82E-1}}{LR^{6.92E-2} H_p^{2.28E-1}} \quad (8a)$$

$$R = 22.1 \cdot \frac{A^{0.710} k_r^{0.086} c^{0.482}}{LR^{0.069} H_p^{0.228}} \quad (8b)$$

표 5는 각 변수의 상관관계 행렬이다. 이 행렬값이 작을수록 각 변수들의 독립성이 크다. 변수 자신과의 상관관계를 나

타내는 대각선 값을 제외한 나머지 값이 0에 가깝다. 따라서 본 연구에서 제안한 내화시간 평가식은 각각의 구조 및 열변수가 충분히 상호독립적인 것으로 판단할 수 있다.

표 5. 구조 및 열변수의 상관관계 행렬

| | log A | log LD | log LR | log k _a | log k _r | log c | log H _P |
|--------------------|---------|---------|---------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|
| log A | 1 | 0.00101 | 0.00612 | -0.0061 | -0.0738 | -0.0043 | -0.0042 |
| log LD | 0.00101 | 1 | -0.0141 | 0.01409 | 0.01701 | 0.00993 | 0.00957 |
| log LR | 0.00612 | -0.0141 | 1 | 0.08495 | 0.10259 | 0.05990 | 0.05770 |
| log k _a | -0.0061 | 0.01409 | 0.08495 | 1 | -0.1023 | -0.0597 | -0.0575 |
| log k _r | -0.0074 | 0.01701 | 0.10259 | -0.1023 | 1 | -0.0721 | -0.0694 |
| log c | -0.0043 | 0.00993 | 0.05990 | -0.0597 | -0.0721 | 1 | -0.0405 |
| log H _P | -0.0042 | 0.00957 | 0.05770 | -0.0575 | -0.0694 | -0.0405 | 1 |

6.2 제안한 내화시간 평가식의 활용

본 연구에서 제안한 철골보의 내화시간 평가식을 활용하기 위하여 철골보의 내화설계에 있어서 소요내화시간을 만족시키기 위한 내화피복두께를 구하는 사례로 들어 방안의 타당성을 입증하고자 한다. 설계의 편의를 위하여 평가식은 식 (8b)의 간략화된 형태를 사용한다.

그림 16과 같이 10층으로 이루어진 사무실 건물에서 7층 상부에 위치한 철골보를 내화설계한다고 가정하자. 화재는 7층 중앙부에서 발생하였고, 내화구획에 의하여 다른 구획으로의 전이는 없다고 가정한다. 건설교통부고시 내화구조 성능기준에 따르면 이 건물은 업무용으로서 높이가 40m이므로 해당 부재가 만족시켜야 하는 내화시간은 2시간이다. 설계할 보의 단면은 H-350×175×7×11으로 단면적은 63.14cm²이다. 인접한 기둥 및 보의 회전강성을 고려한 회전강성비는 15.7이다. 철골보에 작용하고 있는 하중비는 0.4라고 가정한다. 보의 상부가 슬래브에 의해 단열된 3면 화재노출조건으로 화재노출길이는 1211mm가 된다. 이상의 조건을 식 (8b)에 적용하면 내화시간 120분에 적절한 내화피복두께는 플랜지두께의 1.15배에 해당하는 12.65mm이다.

이러한 결과를 바탕으로 실제 현장에서 시공 상의 편의를 위하여 15mm 두께로 내화피복을 한다고 가정하고 다시 평가식을 통해 철골보의 설계내화시간을 산정해보면 130.3분이다. 설계결과와 타당성을 검증하기 위하여 15mm 내화피복 철골보의 열-구조 연성해석을 수행한 결과 그림 17과 같이 130분 내화시간을 얻었다. 이는 본 연구에서 제시한 평가식이 열-구조 연성해석결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 재확인시켜 준다. 즉, 본 연구의 제안식이 구조 및 열변수 등의 설계요소를 정량적으로 반영하여 합리적이고 경제적인 내화설계에 충분히 활용될 수 있음을 시사한다.

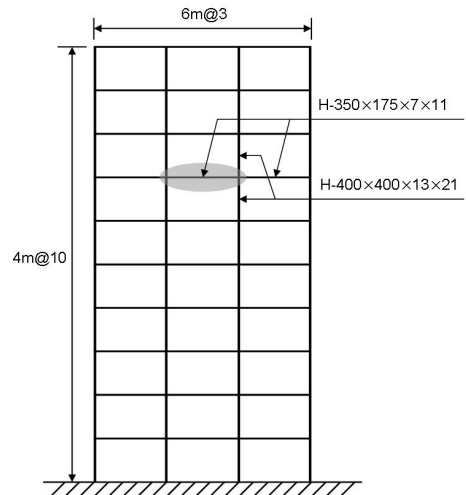


그림 16. 내화설계 예제를 위한 업무용 10층 건물

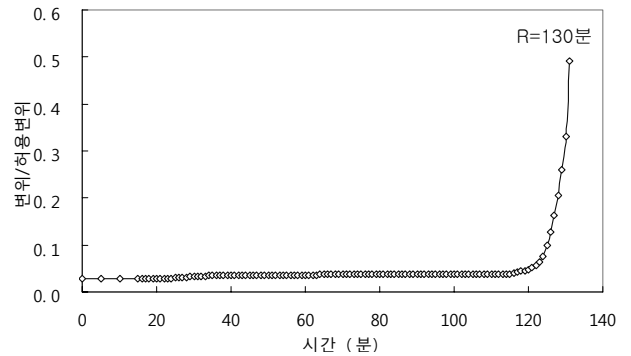


그림 17. 내화시간 평가식으로 설계한 철골보의 시간-치짐 곡선

7. 요약 및 결론

철골보의 내화성능에 영향을 미치는 요소를 구조변수와 열변수로 분리한 후, 열-구조 연성해석을 통해 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 철골보의 화재거동에 미치는 주요 인자를 구조변수 및 열변수로 구분하여 접근함으로써 각 설계변수의 내화성능에 대한 영향을 좀 더 투명하고 정량적으로 파악할 수 있음을 입증하였다.
- (2) 실제 건물 내의 보는 표준내화실험에서 가정하는 단순보가 아니므로 보와 연결된 경계조건에 대한 영향(곧 구조변수의 영향)을 크게 받음을 본 연구의 결과는 다시 한번 확인시켜주었다.
- (3) 철골보의 내화성능에 영향을 미치는 구조변수로 하중분포양상, 하중비, 단면적, 보경간-축비, 단부의 축강성비와 회전강성비 등을 추출하여 정량적으로 분석하

였다. 이 가운데 하중분포와 축강성비는 내화성능에 대한 영향이 미미한 부차적인 요소로 판명되었다. 일반적으로 단면적이 크고 단부의 회전구속도가 클수록 내화시간이 길어지게 되며, 하중비가 높을수록 초기 처짐이 커서 허용 변위에 도달하는 시간이 짧아져 내화시간이 감소하게 된다. 내화성능에 가장 지배적인 구조요소는 단면적과 회전구속도로 나타났다.

- (4) 본 연구에서 고려한 열변수는 내화피복두께와 화재노출길이이다. 이 중 내화피복두께가 내화시간에 가장 큰 영향을 미친다. 특히 내화피복이 전혀 없는 경우는 화재구획 내의 온도증가와 거의 유사한 속도로 보 내부의 온도가 증가하여 구조적 성능이 급격히 상실된다. 그러나 최소한의 내화피복을 통해서도 보의 내화시간을 대폭 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 보의 화재노출길이 역시 보 내부의 온도 변화에 크게 영향을 미치는 핵심변수로 확인되었다.
- (5) 본 연구의 최종결과로서 철골보의 주요 구조 및 열변수를 반영하여 내화시간을 합리적으로 예측할 수 있는 평가식을 제안하였다. 본 평가식은 본문의 활용례에서 보듯이 실제 조건을 반영한 철골보의 내화성능평가 또는 합리적 내화설계 모두에 활용될 수 있다. 즉, 본 연구에서 제시한 평가식은 현행 사양기반설계법과 향후 성능기반설계법의 가교적인 위치에서 내화설계를 할 수 있는 근거를 제안하고 있다.
- (6) 본 연구는 현행 보수적 설계관행에 따라 비합성 철골보의 화재거동을 전제로 수행되었다. 향후 실제 철골보에서 기대할 수 있는 합성거동까지 포함하여 연구를 확장할 경우 더욱 경제적이고 합리적인 철골보의 내화설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2009-0080187)

참고 문헌

ADINA R&D, Inc. (2008) *ADINA theory and modeling guide*, Report ARD08-7, ADINA R&D, Inc., USA.

Chung, K., Park, S. and Choi, S. (2008) Material effect for predicting the fire resistance of concrete-filled square steel tube column under constant axial load, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp.1505-1515.

European Committee for Standardization (2001) *Eurocode3 Design of Steel Structures*, Part 1.2: Structural Fire Design., British Standards Institution, UK.

Incropera, F. P. and Dewitt, D. P. (2002) *Fundamentals of Heat And Mass Transfer*, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Kodur, V. K. R. (1998) Design equations for evaluating fire resistance of SFRC-filled HSS columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, pp.671-677.

Kodur, V. K. R. (2007) Guidelines for fire resistant design of concrete filled steel HSS columns-state-of-the-art and research needs, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 7, pp.173-182.

Liu, T. C. H., Fahad, M. K. and Davies, J. M. (2002) Experimental investigation of behaviour of axially restrained steel beams in fire, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp.1211-1230.

Wainman, D. E. and Kirby, B. R. (1987) *Compendium of UK Standard Fire Test Data, Unprotected Structural Steel-1*, Ref. No. RS/RSC/S/10328/1/98 /B, British Steel Corporation, Swinden Laboratories, Rotherham.

Wang, Y. C. (2002) *Steel and Composite Structure: Behaviour and Design for Fire Safety*, New Fetter Lane, UK.

Yin, Y. Z. and Wang, Y. C. (2004) A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp.1029-1047.

(접수일자 : 2009. 8. 27 / 심사일 2009. 9. 6 / 게재확정일 2009. 10. 6)