

고온시 강구조 부재의 파괴온도 산정에 관한 연구

김동익, 김화중*

경북대학교 건축학부 석사과정, 경북대학교 건축학부 교수*

The Study on Fracture Temperature Estimation of Steel Member at High Temperature

Dong-ik Kim, Wha-Jung Kim*

School of Architecture Kyoung-pook National University the master's of course
School of Architecture Kyoung-pook National University Professor*

1. 서론

건물이 고층화 대형화가 됨에 따라 건물의 자중 경감과 건설기간 단축의 장점으로 철골구조 건물이 많이 건설되어 왔다. 그러나 철골구조는 콘크리트 구조에 비해 온도상승에 따른 열전도가 높아 화재와 같은 예기치 않은 일시적 하중이 작용되었을 경우 재료의 강도 및 철골조의 강성이 급격히 저감된다. 따라서 철골조 건물에 화재가 발생한다면 예기치 못한 큰 피해가 발생할 것으로 사료된다. 역사적으로 볼 때 1960년대부터 유럽지역에서는 영국을 중심으로 강재의 내화성능에 관하여 많은 연구가 이루어져왔다. 이는 산업혁명 이후 산업발달 과정에서 발생한 화재로 인한 많은 인명, 재산 피해를 경험한 사회적 배경을 바탕으로 이루어진 것으로 판단된다. 또한 산업이 발달함에 따라 건축물의 대형화, 고층화에 따라 이를 구축하기 위한 재료측면의 고려사항으로서는 고강도, 고품질 등의 기능부분과 시공과 수급의 용이성 및 경제성 등이 요구된다. 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 재료로서 강재는 고층 건물의 주요 구조재로서 가장 많이 적용되고 있다. 하지만 강재는 콘크리트에 비하여 내화성이 현저하게 떨어지고, 화재시 고온에 빨리 도달하여 강도저하와 열응력의 발생을 야기시켜 구조기능을 상실하는 등 내화성능 상의 치명적인 결함을 지니고 있다고 할 수 있다. 이와 같은 결점을 보완하기 위한 수단으로 각종 내화피복구법 및 공법을 이용하여 내화구조로 설계·시공하고는 있으나, 아직까지 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 표준화재 온도곡선에 따른 강구조 부재에 있어서 철골재의 재료 특성을 고려하여 각 조건에 따른 철골부재의 내력을 해석적인 방법으로 평가하고자 한다.

2. 강재의 2차원 열전도 해석

부재의 열전도 해석에 사용된 부재 단면의 요소 분할은 삼각형 요소 분할을 이용하였

으며, 가열 조건은 보의 경우, 1면에서 가열되는 경우는 1, 2, 4면에서 가열되는 것으로 하였다.

화재온도곡선-ISO 834를 이용하였으며, 강재의 열전도율과 비열은 실험결과를 참고하여 다음과 같이 단순식으로 하였다..

비열의 경우 사용된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (20 \leq T \leq 600^\circ\text{C} \quad c &= 0.00013 \cdot T + 0.11) \\ (T > 600^\circ\text{C} \quad c &= 0.00046 \cdot T - 0.088) \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기에서 T: 온도 c:비열(kcal/kg^oC)

열전도율의 경우 사용된 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (20 \leq T \leq 600 \quad k &= -0.00667 \cdot T + 34) \\ (T > 600^\circ\text{C} \quad k &= 0.045 \cdot T + 3.0016) \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기에서 T: 온도 k: 열전도율(kcal/mh^oC)

강재의 밀도는 7.7740(t/m³)이고, 외부 공기의 열전달율은 20(kcal/m²h^oC)이다.

3. 부재의 열 탄소성 Creep 해석

응력-변형 곡선을 단순화시킨 완전 탄소성 모델을 그림 1에 나타내었다. 완전 탄소성 응력-변형곡선과 단순 응력-변형곡선을 해석에 있어서 사용할 경우, 그 결과에는 큰 차이가 없다. 여기에서 취급하는 강재는 모두 SS41(SS400)이다.

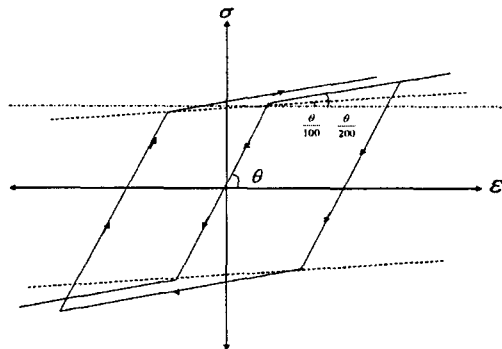


그림 1. 응력-변형 곡선의 단순화

이 단순 모델에 사용된 식은 아래와 같다.

온도에 따른 탄성계수식 (3-1)과 항복강도식 (3-2), 고온 크리프 변형식(3-3), 열팽창 변

형식(3-4)은 다음 식으로 산정한다. 또한 크리프 변형 계산식의 재료 정수는 표 1에 나타내었다.

$$E_T/E_{RT} = 1.0 - 0.905 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (3-1)$$

$$\sigma_{YT}/\sigma_{RT} = 1.0 - 6.94 \cdot 10^{-7} T^2 - 5.23 \cdot 10^{-4} T \quad (3-2)$$

$$\varepsilon_c = 10^{a/T+b} \cdot \sigma^{c/T+d} \cdot t^{eT+f} \quad (3-3)$$

$$\varepsilon_T = 5.04 \cdot T^{-9} T^2 + 1.13 \cdot 10^{-5} T \quad (3-4)$$

- E_T : 온도에 따른 탄성계수(MPa) E_{RT} : 상온에서의 탄성계수(MPa)
 σ_{YT} : 온도에 따른 항복강도(MPa) σ_{RT} : 상온에서의 항복강도(MPa)
 ε_c : 크리프 변형 σ : 작용응력(MPa) t : 시간(min)
 $a \sim f$: 재료정수 ε_T : 열팽창변형 T : 온도(°C)

표 1. Creep 변형 계산식의 계수

강재 종류	재료정수					
	a	b	c	d	e	f
SS400	-7.22×10^3	3.261	1.552×10^3	2.249	-8.894×10^{-4}	-3.300×10^{-1}

다음으로 단순화시킨 모델에 강재의 물리적인 특성인 열팽창을 고려하여 고체의 열탄소성 크리프 거동에 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_T \quad (3-5)$$

여기에서 ε 은 전체 변형, ε_e 는 탄성변형, ε_p 는 소성변형, ε_c 는 크리프변형, ε_T 는 열팽창변형이다. 단순모델에 열탄소성 해석이론을 적용할 경우 부재가 화재에 의해 가열된 경우 임의의 온도에서 크리프 및 열팽창에 의한 부재의 변형을 고려할 수가 있다. 이러한 해석방법을 바탕으로 위에서 설명한 것을 바탕으로 프로그램화한다.

4. 파괴온도의 산정

해석을 통한 모멘트, 축력, 전단력 등의 부재내력값과 한계내력값의 비교를 통하여 해석을 통한 내력값이 한계내력값을 초과할 경우 이 부재는 파괴되었다고 결정한다. 이 때 한계내력값은 다음과 같다.

만약 부재내력 > 한계내력을 하나라도 만족하는 경우 이 부재는 파괴되었다고 결정하고 이 때의 온도를 파괴온도로 산정한다.

5. 각 조건별 부재의 고온성상 해석

5.1 경계조건에 따른 고온을 받는 부재의 성상

해석에 사용된 기둥과 보 부재 크기와 해석 조건을 그림 2에 나타내었다

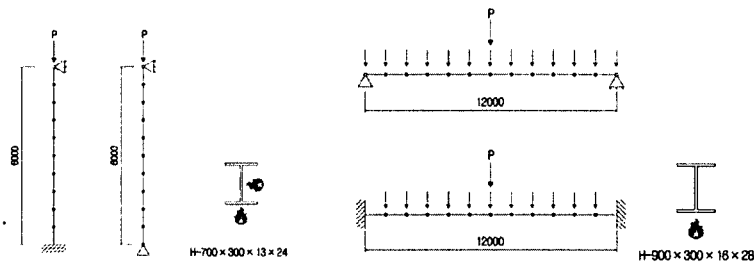


그림 2. 경계조건에 따라 고온을 받는 기둥과 보 모델

기둥의 경우, 한 쪽의 구속 조건을 고정과 힌지로 하고 하중을 3000kN, 또한 2면이 가열된 경우는 그림 3과 4에서 보는 것과 같이 파괴온도에 있어서 고정의 경우 591℃, 핀의 경우 583℃로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 보의 경우 하중은 집중하중 400kN, 분포하중을 0.03 kN/m로 하였다. 구속 조건을 고정보와 단순보로 한 경우, 그 결과는 파괴온도가 단순보의 경우 453℃, 고정의 경우 413℃로 단순보의 경우가 높은 파괴온도를 나타내고 있다. 변형에 있어서 보면 기둥의 경우 지지조건에 따라 약간의 차이가 있으며, X축 변형과 Y축 변형 모두 고정 조건의 경우가 크게 나타나고 있다. 보의 단순보의 경우가 크게 나타난다. 따라서 파괴온도에서 보면 기둥의 경우 구속조건에 따른 영향은 크지 않으며, 보의 경우는 고정 조건일 경우 불리함을 알 수 있다. 변형에 있어서는 기둥에 경우 고정 조건일 때 불리하며 보의 경우는 단순보일 때 불리함을 알 수 있다.

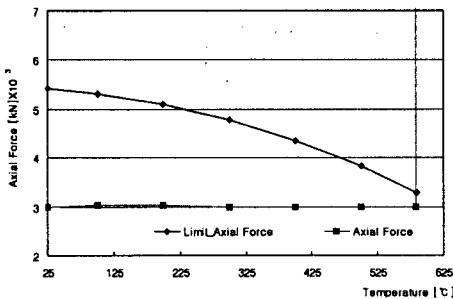


그림 3. 고정-롤러 경계조건에 따른 기온등의 파괴온도 산정

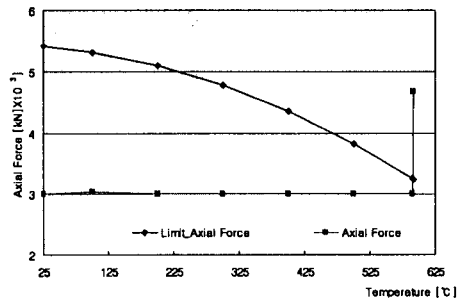


그림 4. 핀-롤러 경계조건에 따른 기온등의 파괴온도 산정

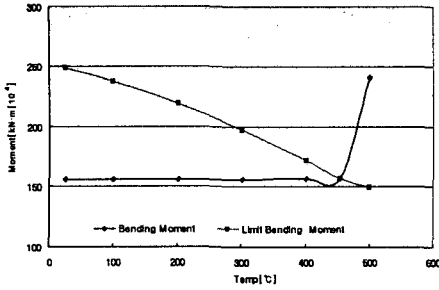


그림 5. 단순보의 파괴온도 산정

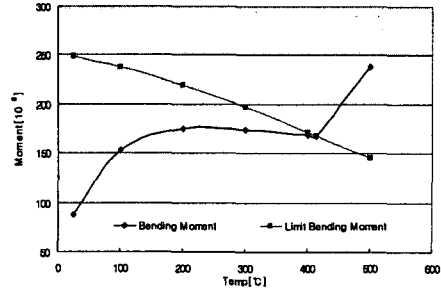


그림 6. 고정보의 파괴온도 산정

5.2 강재의 가열면에 따라 고온을 받는 부재의 성상

해석에 사용된 기둥과 보 부재 크기와 해석 조건은 다음 그림과 같다.

형강의 크기는 H-900×300×16×28이고, 하중은 5000kN을 가했다. 이 경우, 파괴되는 온도는 1면, 2면, 4면에 가열된 경우, 파괴온도가 각각 400℃, 473℃, 474℃이다. 파괴시간은 각각, 67분, 42분, 26분을 나타내었다. 파괴온도가 1면 가열이 낮은 것은 가열시간에 의한 것으로 사료된다. 가열된 면이 적을수록 파괴시간이 길게 나타나는 결과를 얻었다.

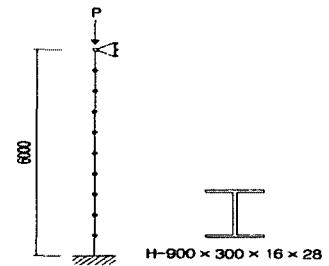


그림 7. 강재의 가열 면에 따른 고온을 받는 기둥부재의 모델

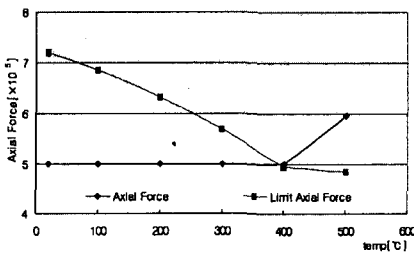


그림 8. 1면 가열에 따른 기둥의 파괴온도 산정

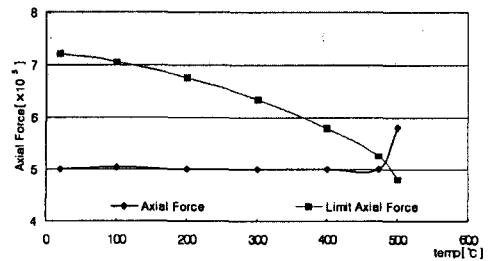


그림 9. 2면 가열에 따른 보의 파괴온도 산정

6. 결론

본 연구에서는 고온시 열전도 해석을 통한 기둥/보 부재의 고온성상 해석을 행하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 2차원 열전도 프로그램을 개발, 강부재의 열전도 해석을 통하여 강재 요소의 온도를 예측할 수가 있었다.

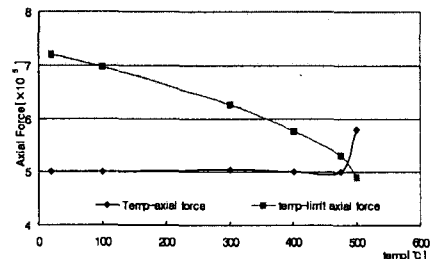


그림 10. 4면 가열에 따른 보의 파괴온도 산정

2. 열탄소성 크리프 해석을 통한 경계조건에 따른 고온을 받는 부재 정상 해석을 통해, 파괴온도에서 보편 기둥의 경우 구속조건에 따른 영향은 크지 않으며, 보의 경우는 고정 조건일 경우 불리함을 알 수 있다. 부재의 파괴시간은 기둥은 비슷한 파괴시간을 나타내었고, 보의 경우에는 파괴시간이 단순보의 경우가 파괴시간이 고정단보다 길어지는 경향을 나타내었다.
3. 강재의 가열 면에 따른 고온을 받는 부재의 정상 해석을 통해 가열된 면이 적을수록 파괴시간이 길게 나타나는 결과를 얻었다.
4. 표준화재 온도곡선을 이용하여 부재의 온도분포를 계산하고, 이 데이터를 이용 부재의 열탄소성 크리프 해석을 하여 부재의 축력, 모멘트, 전단력을 검토한다. 이 때 부재의 내력이 앞에서 언급된 중국한계상태 내력을 초과하는 시점을 부재의 파괴온도로 하고, 그것을 부재의 고온시 한계내화성능을 평가할 수 있었다.

감사의 글

본연구는 2004년 “강구조 부재의 고온시 내화성능평가 시스템 개발 및 내화설계법 규정화 방안연구(3차년)”의 일환으로 포항산업과학연구원의 연구비지원으로 수행된 연구결과의 일부로, 연구비를 지원해주신 포항산업과학연구원 관계자들에게 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

1. 安部 武雄, 建築構造用鋼材および鋼柱の高溫クリプ學に關する研究, 東京工業大學 工業材料研究所, 昭和58年3月
2. 岡部 :鋼構造物の高溫時の彈塑性クリプ變形舉動解析に關する研究, 平成2年
3. 吳昌熙 : 鐵筋콘크리트造火災建物の火害とその補修に關する研究, 東京工業大學 工業材料研究所, 昭和60年7月
4. 日本建築學會 : 鋼構造耐火設計指針, 1999.
5. 金和中, 高溫度における 콘크리트の力學的舉動に關する實驗的研究, 東京工業大學 校 博士學位論文, 1988.3
6. 日本建築學會, 鋼構造限界狀態設計指針・同解説, 1998
7. 日本建築學會, 鋼構造耐火設計指針, 1999.12
8. 矢川元基, 流れと熱傳導の有限要素法入門, 1991.6
9. 정원우, 熱應力を 받는 鋼構造 部材 및 骨組의 構造的 舉動에 관한 解析研究, 慶北大學校 工學碩士 學位論文, 1998
10. 조경래, 溫度增加에 따른 STEEL-FRAME의 破壞解析에 관한 研究, 慶北大學校 工學碩士 學位論文, 2003.12
11. 건설교통부, 한국건설기술연구원, 국내 내화구조기준 개선연구 (I), (II), 2000. 3.