

# 온도상승에 의한 H-형강 압축재의 내력과 파괴온도에 관한 실험적 연구

최 현 식<sup>1)</sup> · 강 성 덕<sup>2)</sup> · 김 재 역<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup> 교수, 계명대학교 건축공학과 <sup>2)</sup> 선임연구원, (주)현대종합설계건축사사무소 <sup>3)</sup> 부장, (주)포스코에이앤씨(박사과정, 계명대학교)

## The Experimental Study on the Resistance Forces and the Failure Temperatures of H-Shaped Steel Compressive Members by Elevated Temperatures

Choi, Hyun Sik<sup>1)</sup> Kang, Seong Deok<sup>2)</sup> Kim, Jae Eok<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup> Professor, Dept. of Architecture, Keimyung University, Deagu, 704-701, Korea

<sup>2)</sup> Senior Researcher, Hynudai Architects&Engineers Assoc., Seoul, 110-920, Korea

<sup>3)</sup> General Manager, POSCO A&C., Pohang, 790-380, Korea(Graduate Student, Keimyung University)

ABSTRACT : The object of this paper is to perform the experiments to investigate the relationship of the resistance forces and the failure temperatures on the failure behaviors of H-shaped steel compressive members. H-shaped members(SS400) were used for the test models and the tests for the elevated temperatures were performed by ISO 834 in FILK(Fire Insurers Laboratories of Korea). The local, overall buckling stresses and a yielding stresses for the failure temperatures were compared with the compressive stresses for the loading forces of test models, the yielding strength and elastic modulus reduction factor of the steel at a high temperature were based on the criteria of the EC3(Eurocode 3) Part1.2(1993). The slenderness ratio was fixed by 45.4 and the compressive forces corresponded with 50%, 70% and 80% of the yielding forces at the normal temperatures were chosen for the loading forces of the test models. The failure temperatures of the test models were investigated under three kinds of loading conditions. It was known that the resistance forces have come close to the yielding forces, not the elastic buckling loads evaluated by EC3 at the failure temperatures obtained from the tests which are related to the failure temperatures and the loading stresses.

KEYWORDS : overall buckling, local buckling, yielding strength, ISO 834 standard fire, fire resistance test, failure temperature

### 1. 서 론

건축 구조 재료로서 강재는 콘크리트 대비 강도(Strength)와 강성(Stiffness)이 우수한 재료로서 공기 단축이라는 시공상의 중요한 장점뿐만 아니라 요즘 빈번하게 발생하는 지진에 대해 저항능력이 우수한 구조적 성능을 지니고 있다.

그러나 강재는 열전도가 높으며 온도가 상승함에 따라 재료의 강도 및 구조물로서의 강성이 저하된다.

강재의 항복강도는 상온 대비 350℃에서 67%정도, 600℃에서 50%이하로 저하되기 때문에 강구조물의 내화력이 중요한 문제로 대두되고 있다<sup>[1]</sup>.

현행 우리나라 건축법 내화 시방서에는 주요 구조 부재를 1~3시간까지 내화 등급으로 구분, 표기되어 있으며, 건축물의 주요 부재중 기둥과 보에 대한 온도상승에 따른 강재의 특성과 거동을 예측하기 위하여, 백태순 등은 압축을 받는 H-형강 기둥의 탄성 전체좌굴응력 해석을 위해 EC3 Part1, 2 관계식을 근거로 해석을 수행한 결과를 제시하였고<sup>[2]</sup>, 강성덕 등은 H-beam의 온도상승에 따른 응력과 처짐과 파괴 온도를 VULCAN 프로그램으로 해석하여 설계 예를 제시하

Note.-Discussion open until October 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 26, 2012; revised March 7, 2013; approved on March 26, 2013.  
© KSSC 2013

\* Corresponding author

Tel. +82-54-271-2320 Fax. +82-54-271-2323  
E-mail: iwishmeluck@naver.com

였으며<sup>[3]</sup>, 구분율 등은 온도상승에 따른 H-형강 보의 국부좌굴과 국부 모멘트 내력에 대한 해석적인 연구와 임계온도 및 파괴온도를 컴퓨터에 의한 해석으로 제시하였다<sup>[4]</sup>.

또한 1977년 Hancock는 상온에서 냉간 성형강재에 대한 국부, 뒤틀림 및 휨-도선 좌굴해석을 위한 스트립법으로 연구하였고<sup>[5]</sup>, 1995년 Wade는 화재시 온도상승에 따른 복합 I-형강의 국부좌굴 현상을 해석하였다<sup>[6]</sup>.

그리고 허용 변형량과 허용 변형속도에 의한 내화성능 평가와 관련된 연구로써 이승재 등의 SC합성기둥의 내화성능 실험, 권인규 등의 철골기둥 및 보의 허용온도에 관한 실험이 수행된 바 있다<sup>[7],[8]</sup>.

이론적 배경에 의한 해석 및 내화성능과 연관된 기초적 연구가 수행되어 왔으나, 본 논문은 온도상승시 H-형강 압축재의 내력과 파괴온도의 관계를 평가하기 위한 기초적 연구로써 실험을 수행하고 및 이론적 접근을 위한 EC3<sup>[9]</sup> 기준의 적용 결과를 분석하였다.

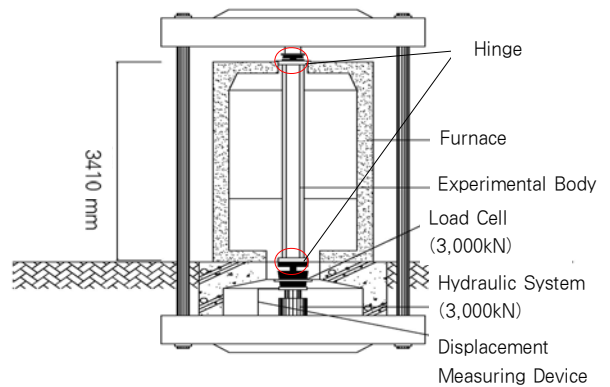
국내의 철골조 건축물에 일반적으로 적용되는 일반 구조용 강재로 제작된 SS400 H-형강 압축재의 재하 압축력을 3종류로 채택하고 이에 대한 파괴온도를 평가하기 위한 실험을 한국방재시험연구원(FILK)에서 수행하였다.

실험 결과의 파괴온도를 EC3 기준에 적용한 단성계수, 단성의 국부 및 전체좌굴응력도, 항복응력도와 재하 압축응력도를 비교하였다. 재하 압축응력도의 변화에 따른 시험체의 파괴온도를 실험적으로 평가함과 동시에 강재로 된 압축재의 파괴온도 예측에 활용될 수 있는 EC3 기준의 적용 가능성을 위한 기초자료로 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

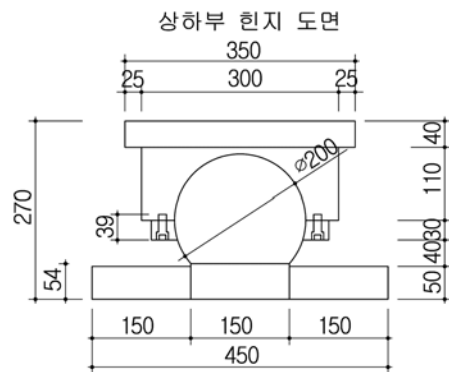
## 2. H-형강 압축재의 온도상승에 의한 파괴 실험

### 2.1 시험체 제작 및 실험계획

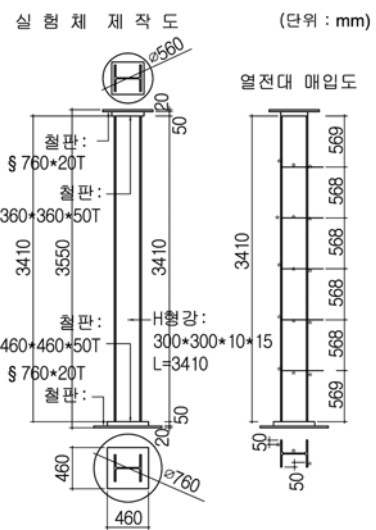
시험체는 SS400의 H-300x300x10x15형강을 채택하고 시험체의 길이는 3,410mm로 하였으며, 총 3개의 시험체를 설계, 제작하였다. 또한 각 시험체별로 재하되는 압축력은 일반적인 구조설계의 범위를 고려하여 허용응력도설계법에서의



(a) The experimental apparatus



(b) End hinge detail drawing



(c) Manufacture drawing of test model

Fig. 1 Overview of the experimental apparatus

Table 1. The plan of test models

| Test Models | Planned Comp. Force P(kN) | Member Length (mm) | Yielding Strength (MPa) | End Sporting Condition | Thermo-couple Mounting | Predicted Temp. of Yielding Failure | Predicted Time |
|-------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------|
| A(S-2)      | 0.5FyA                    | 3,410              | 235                     | Hinge                  | 15 Points              | 590℃                                | 24Min.         |
| B(S-1)      | 0.7FyA                    |                    |                         |                        |                        | 520℃                                | 8Min.          |
| C(S-3)      | 0.8FyA                    |                    |                         |                        |                        | 480℃                                | 12Min.         |

최대 내력인 항복강도의 약 70%를 기준으로 상온 항복강도의 50%와 80%에 해당하는 3종류의 압축력을 설정하여 파괴온도 및 구조거동을 파악하기로 계획하였다. 그리고 시험체의 위치별 온도를 측정하기 위한 열전대 게이지는 Fig. 1(c)와 같이 설치한 시험체의 6등분한 내측 5개의 위치에서 양쪽 플랜지, 웨브플레이트에 각각 3개를 설치하여 총 15개의 게이지를 부착하였다. 시험체 계획은 Table 1과 같다. 항복파괴 예측온도는 계획 압축응력도와 EC3기준의 항복응력도가 동일할 때의 온도를 의미한다. 그리고 시험체의 표현 순서는 계획된 압축력의 크기 순으로 S-2의 시험체를 A(S-2), S-1은 B(S-1), S-3은 C(S-3)로 명명하기로 한다.

### 2.2 가열 및 가력계획

시험체의 가열은 ISO 834 표준화재에 근거하여 가열로의 온도를 설정하여 실험을 수행하였다. KS 코드인 F 2257-1의 가열곡선은 식 (1)로써, ISO 표준화재 곡선의 가열식과 동일하다<sup>[10],[11]</sup>.

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

여기서, T : 가열로 내부의 평균온도 (°C)  
 t : 시간  
 T<sub>0</sub> : 초기 온도 (°C)

내화실험<sup>[11],[12],[13]</sup>은 표준 화재 시간-온도곡선 (Standard Time-Temperature Curve)에 의해 건축물의 구조부재는 가열로에서 표준화재 곡선으로 알려진 시간, 온도곡선의 화재 가혹도 (Fire Severity)에 맞추어 수행된다. 본 연구는 내화 시간과는 무관한 피복이 없는 철골부재의 파괴강도 및 온도를 평가하는 목적이므로 최종 화재시간 및 온도 특성과는 연계될 필요성이 없는 것으로 판단한다. 따라서 가열속도는 ISO 표준화재 시간곡선과 임의로 설정한 가열 속도의 두가지 경우로 실험하였다. 본 실험에서의 재하는 Fig. 1(a)와 같이 가열로 하단의 유압 장치(최대 압축력 3,000kN)를 이용하여 가력하였고, 경계조건은 Fig. 1(b)와 같이 360° 모든 방향에서 수직축에 대하여 15° 회전이 가능한 힌지로 되어 있다.

### 2.3 실험결과

실험계획에 따라 준비된 시험체를 가열로와 유압장치를 이용하여 파괴실험을 수행하였으며, 일정한 압축력이 재하된 상

태에서 가열하여 온도상승에 따른 거동 및 파괴온도를 측정하였다. Fig. 2~Fig. 4는 각 시험체의 최종 파괴모드를 나타내고 있다.



Fig. 2 The failure mode of test model A(S-2)



Fig. 3 The failure mode of test model B(S-1)



Fig. 4 The failure mode of test model C(S-3)

### 2.3.1 시험체 A(S-2)

Fig. 5는 시험체 A(S-2)를 6등분한 각 위치에 부착한 게이지 3개를 묶어 Group으로 표현하고 가열시간과 각 Group의 열전대 게이지의 평균온도와의 관계를 나타내고 있다. 상부로부터 Group 1, 하부가 Group 5로 표기되어 3개의 평균온도를 의미하고, Average는 전체 게이지의 평균온도를 나타낸다. 그리고 ISO-curve는 표준 화재 시간-온도곡선을 나타내고 있다.

시험체 B(S-1)은 표준 화재 시간-온도곡선에 따라 가열하였으나 시험체 A(S-2)는 시험체 온도의 균등화를 위하여 표준 화재 시간-온도곡선보다 가열 속도를 늦게 하였다. 본 실험은 내화시간과는 직접적 연관이 없이 파괴온도 측정이 주목적이며 가열로 내부온도 및 시험체의 온도 분포에 대한 균등화를 목적으로 시험시간을 연장하기 위한 노력을 하였다. Fig. 5는 열전대 게이지 별 평균온도를 나타내며, 상부의

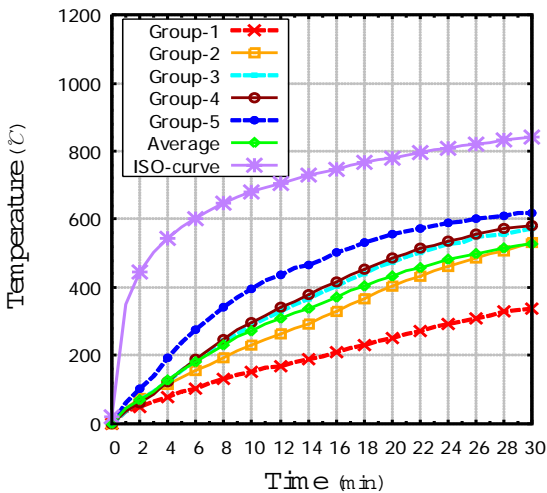


Fig. 5 Thermocouple gauge's average temp. of test model A(S-2)

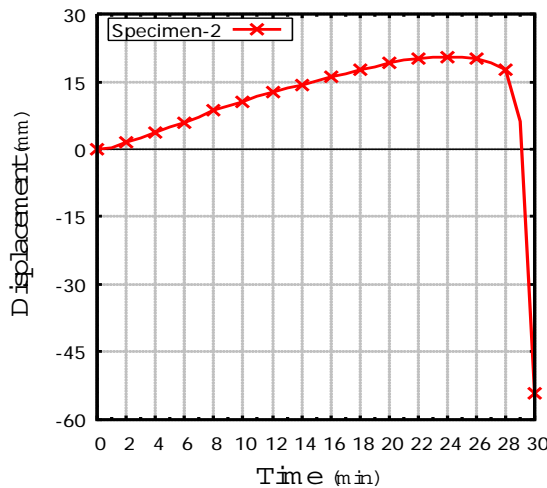


Fig. 6 Time-displacement curve of test model A(S-2)

Group 1에서 338°C, 하부의 Group 5에서 619°C의 최종 온도가 측정되었다. 위치 별 온도의 편차가 있음을 알 수 있으며, 이에 대한 논의는 다음 장의 분석, 고찰에서 논의하기로 한다.

Fig. 6은 시험체 A(S-2)의 가열시간대 축방향 변위를 나타내며, 가열 후 26분 정도 경과된 시점(변위 20.4mm)에서 변위의 반전 현상이 나타나 급격한 변위의 증가현상이 발생하여 부재의 재하능력이 상실되었다고 판단되며, 이 시점에서의 온도를 파괴온도로 설정하였다.

### 2.3.2 시험체 B(S-1)

Fig. 7은 시험체 B(S-1)에 대한 가열시간과 열전대 게이지의 온도와의 관계를 나타내고 있다. 이 시험체는 표준 화재 시간-온도곡선에 준하여 가열하였으며, 실제 계측된 시험체의

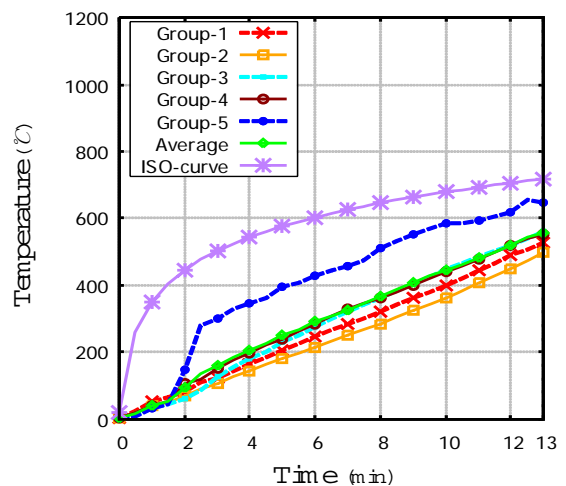


Fig. 7 Thermocouple gauge's average temp. of test model B(S-1)

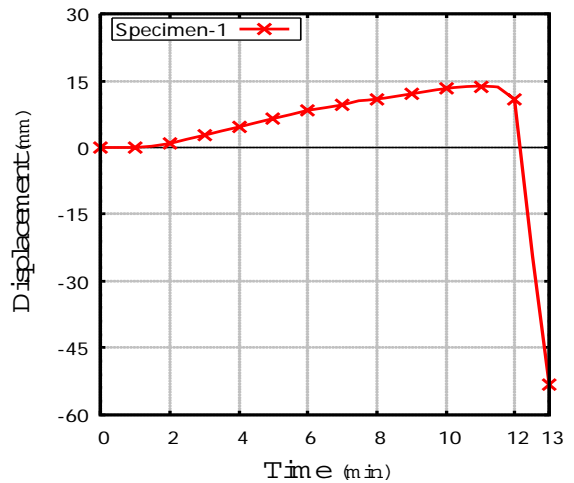


Fig. 8 Time-displacement curve of test model B(S-1)



표면온도는 표준화재 시간온도 곡선과는 다소 상이한 현상을 나타내고 있다. 또한 가열시간이 길어질수록 표준 곡선에 근접하는 현상을 보여준다. 최종 온도에 대한 예측결과는 Group 1에서 529°C, Group 5에서 647°C로 시험체 하부에 위치하는 Group 5의 온도가 상당한 편차를 갖는 고온으로 예측되고 있다.

Fig. 8은 가열시간대 축방향 변위를 나타내며, 축방향 변위는 일정 압축상태에서 가열에 따른 변위를 의미한다. 가열 후 11.5분 정도의 경과된 시점(변위 13.7mm)에서 변위의 반전 현상과 함께 부재의 재하능력이 상실되었다고 판단하며 이 시점에서의 온도를 파괴온도로 설정하였다.

### 2.3.3 시험체 C(S-3)

Fig. 9는 시험체 C(S-3)에 대한 가열시간과 열전대 게이지

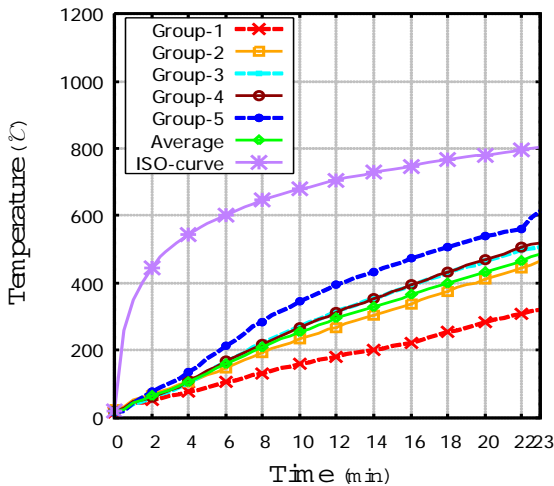


Fig. 9 Thermocouple gauge's average temp. of test model C(S-3)

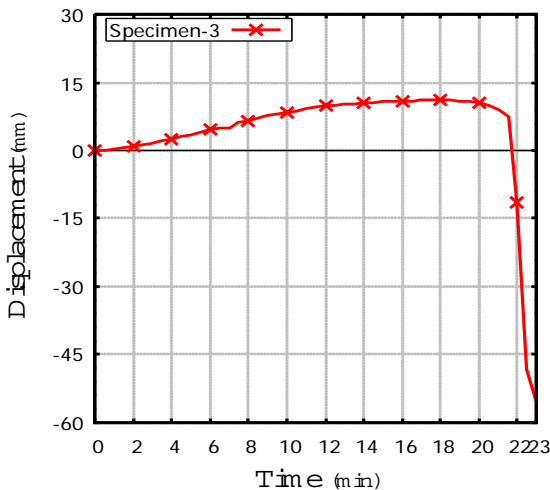


Fig. 10 Time-displacement curve of test model C(S-3)

지의 온도와의 관계를 나타내고 있다. 이 경우도 표준 화재 시간-온도곡선보다 가열 속도를 늦게 하였다. 최종 온도에 대한 예측결과는 Group 1에서 322°C, Group 5에서 615°C로 시험체 하부에 위치하는 Group 5의 온도가 고온으로 예측되고 있다.

Fig. 10은 시험체 C(S-3)의 가열시간대 축방향 변위를 나타내며, 가열 후 20분 정도 경과된 시점(변위 11.2mm)에서 변위의 반전과 함께 부재의 재하능력이 상실되었다고 판단되어 이 시점에서의 온도를 파괴온도로 설정하였다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 그리고 Fig. 9는 앞서 설명한 바와 같이 열전대 게이지 위치별 측정온도는 편차를 나타내고 있다. 이러한 현상은 가스 가열로의 특성에서 발생되며 시험체 전체가 일정한 온도분포가 되면 파괴온도 평가에 어려움이 없을 것이며 가열로의 개선이 필요하다고 판단된다.

## 3. 실험결과의 분석 및 고찰

### 3.1 온도상승에 따른 재료적 특성

실험결과를 비교, 분석하기 위하여 온도상승에 따른 재료적 특성이 정의되어야 한다.

여기서는 Fig. 11과 같이 EC3<sup>(9),(14)</sup> Part1,2에서 규정하고 있는 온도상승에 따른 응력-변형률 관계를 활용하여 실험결과와 비교하고자 한다.

탄성범위에서 온도 변화에 따른 전체 좌굴응력도식, 플랜지 및 웨브 국부좌굴응력도식은 각각 식 (2), 식 (3), 식 (4)와 같다<sup>(15),(16)</sup>.

$$\sigma_{0\theta} = \frac{\pi^2 E_{\theta}}{\lambda_e^2} \quad (2)$$

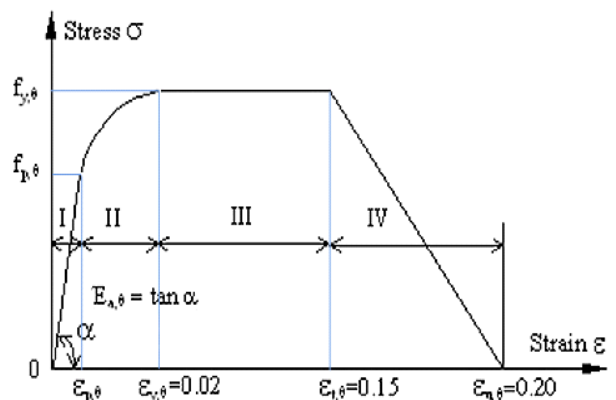


Fig. 11 Stress-strain relationship by elevated temp. of a structural steel following EC3

여기서,  $\sigma_{o\theta}$  : H-형강 압축재의 온도  $\theta$ 에서의 전체좌굴응력도

$E_\theta$  : 온도  $\theta$ 에서의 강재의 탄성계수 혹은 접선계수

$\lambda_e$  : 압축재의 유효세장비 (=  $KL/r$ )

$$\sigma_{ef\theta} = k_f \frac{\pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)} \frac{t_f^2}{b^2} \quad (3)$$

여기서, H-형강 플랜지플레이트의 폭 :  $b$ , 판두께 :  $t_f$

$$\sigma_{ew\theta} = k_w \frac{\pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^2}{d^2} \quad (4)$$

여기서, H-형강 웹플레이트의 폭 :  $d$ , 판두께 :  $t_w$

### 3.2 실험결과의 분석

Table 2와 Table 3은 앞에서 언급한 실험결과를 근거로 각 시험체의 재하 압축력( $P$ ), 재하 압축응력도( $\sigma_c$ ), 상온의 항복응력도( $\sigma_{y0}$ ), 대 변형이 발생하는 위치에 근접한 열전대 게이지 Group 5의 평균온도와 열전대 게이지 전체의 평균온도, 각각의 평균온도에 대한 EC3기준의 항복응력도( $\sigma_{yo\theta}$ )와 비례한도점 응력도( $\sigma_{p\theta}$ )를 정리하여 비교하고 있다.

Table 2와 Table 3에서 나타나는 바와 같이 Group 5의 측측된 파괴 평균온도 556.8°C~619.5°C가 게이지 전체의 파괴 평균온도 479.0°C~556.6°C에 비하여 61°C~100°C 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 실험에서의 파괴온도에 대한 EC3 기준의 항복응력도( $\sigma_{yo\theta}$ )와 재하 압축응력도( $\sigma_c$ )를 비교하면 전체의 열전대 게이지의 평균온도를 적용할 경우 실험과 상응하는 현상을 볼 수 있다.

Table. 4는 하부의 대 변형이 발생하는 위치와 근접한 열전대 게이지 Group 5의 평균온도를 파괴온도로 설정하였을 경우, 이 파괴온도에 상응하는 EC3 기준의 항복응력도( $\sigma_{yo\theta}$ ), 탄성 전체좌굴응력도( $\sigma_{o\theta}$ ), 웹의 탄성 국부좌굴응력도( $\sigma_{ew\theta}$ ), 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도( $\sigma_{ef\theta}$ )와 재하 압축응력도( $\sigma_c$ )를 비교하고 있다. 3개 시험체의 평균값으로 재하압축응력도에 대하여 탄성 전체좌굴응력도는 208%, 웹의 탄성 국부좌굴응력도는 288%, 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도는 180%, 항복응력도는 73%의 비를 나타내고 있다. 이 경우 파괴온도에 대한 EC3 기준의 항복응력도가 재하 압축응력도에 근접하나, 3개의 시험체 별로 85%, 60%, 75%

Table 2. Loading comp. force & yielding stress in the experiments

| Test Models | Planned Comp. Force<br>$P_0$<br>(kN) | Measured Comp. Force<br>$P$<br>(kN) | Loading Comp. Stress<br>$\sigma_c$<br>(MPa) | $\frac{P}{P_0}$ | Planned<br>$\frac{\sigma_c}{F_y}$ |
|-------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------|-----------------------------------|
| A(S-2)      | 1,400                                | 1,407.7                             | 117.5                                       | 1.01            | 0.5                               |
| B(S-1)      | 2,000                                | 1,970.7                             | 164.5                                       | 0.99            | 0.7                               |
| C(S-3)      | 2,300                                | 2,252.2                             | 188.0                                       | 0.98            | 0.8                               |

Table 3. The failure temp. & stress of test models

| Test Models | Thermocouple Gauge Group5 Failure Average Temp. & Stress |                           |                          | Thermocouple Gauge Total Ave. Failure Average Temp. & Stress |                           |                          |
|-------------|--|---------------------------|--------------------------|--|---------------------------|--------------------------|
|             | Failure Ave. Temp. (°C)                                  | $\sigma_{yo\theta}$ (MPa) | $\sigma_{p\theta}$ (MPa) | Failure Ave. Temp. (°C)                                      | $\sigma_{yo\theta}$ (MPa) | $\sigma_{p\theta}$ (MPa) |
| A(S-2)      | 617.6  | 100.8                     | 38.1                     | 556.6  | 142.5                     | 60.9                     |
| B(S-1)      | 619.5  | 99.7                      | 37.6                     | 519.6  | 169.4                     | 76.5                     |
| C(S-3)      | 556.8  | 142.5                     | 60.9                     | 479.0  | 186.0                     | 87.5                     |

$\sigma_{yo\theta}$  : Yielding Stress from Failure Average Temp.

$\sigma_{p\theta}$  : Propotional Limit Point from Failure Average Temp.

가 되어 항복응력도가 재하 압축응력도보다 낮은 값을 나타내고 있다.

Table. 5는 열전대 게이지 전체의 평균온도를 파괴온도로 설정하였을 경우, 이 파괴온도에 상응하는 EC3 기준의 항복응력도( $\sigma_{yo\theta}$ ), 탄성 전체좌굴응력도( $\sigma_{o\theta}$ ), 웹의 탄성 국부좌굴응력도( $\sigma_{ew\theta}$ ), 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도( $\sigma_{ef\theta}$ )와 재하 압축응력도( $\sigma_c$ )를 비교하고 있다. 3개의 시험체에 대하여 평균적으로 탄성 전체좌굴응력도는 재하압축응력도의 337%, 웹의 탄성 국부좌굴응력도는 재하압축응력도의 467%, 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도는 재하압축응력도의 292%, 항복응력도는 재하압축응력도의 107%의 비를 나타내고 있다.

이 경우 파괴온도에 대한 EC3 기준의 항복응력도가 재하 압축응력도에 근접하는 결과이며, 3개의 시험체에 대하여 각각 121%, 103%, 99%를 나타내고 있다.

### 3.3 고찰

시험체의 파괴온도 결정에 있어 전체 열전대 게이지의 평균온도와 대 변형이 발생한 부근인 Group 5의 국소적 평균온도에 대해 적용 가능성이 있다. 적용하는 파괴온도에 의하

Table 4. The comparison of buckling & yielding stress from failure ave. temp. of guage group 5 (Uint : MPa)

| Test Models | Loading Comp. Stress $\sigma_c$ | Failure Ave. Temp. (°C) | $\sigma_{o\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{o\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{ew\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{ew\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{ef\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{ef\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{yo\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{yo\theta}}{\sigma_c}$ ) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|---|---|
| A (S-2)     | 117.5                           | 617.6                   | 274.2 (2.34)  | 378.1 (3.23)  | 237.3 (2.02)  | 100.8 (0.85)  |
| B (S-1)     | 164.5                           | 619.5                   | 270.7 (1.64)  | 373.2 (2.27)  | 234.0 (1.42)  | 99.7 (0.60)   |
| C (S-3)     | 188.0                           | 556.8                   | 429. (2.28)   | 592.2 (3.14)  | 371.2 (1.97)  | 142.5 (0.75)  |
| Ave.        |                                 | 598.0                   | (2.08)  | (2.88)  | (1.80)  | (0.73)  |

$\sigma_c$  : Compressive Stress,  
 $\sigma_{o\theta}$  : Elastic Total Buckling Stress from Failure Ave. Temp.,  
 $\sigma_{ew\theta}$  : Elastic Total Buckling Stress of Web from Failure Ave. Temp.,  
 $\sigma_{ef\theta}$  : Elastic Total Buckling Stress of Flange from Failure Ave. Temp.,  
 $\sigma_{yo\theta}$  : Yielding Stress from Failure Ave. Temp.

Table 5. The comparison of buckling & yielding stress from failure ave. temp. of guage total ave. (Uint : MPa)

| Test Models | Loading Comp. Stress $\sigma_c$ | Failure Ave. Temp. (°C) | $\sigma_{o\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{o\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{ew\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{ew\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{ef\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{ef\theta}}{\sigma_c}$ ) | $\sigma_{yo\theta}$<br>( $\frac{\sigma_{yo\theta}}{\sigma_c}$ ) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|---|---|
| A (S-2)     | 117.5                           | 556.6                   | 429.5 (3.65)  | 592.2 (5.05)  | 371.2 (3.17)  | 142.5 (1.21)  |
| B (S-1)     | 164.5                           | 519.6                   | 534.8 (3.25)  | 737.5 (4.49)  | 462.3 (2.81)  | 169.4 (1.03)  |
| C (S-3)     | 188.0                           | 479.0                   | 609.5 (3.23)  | 840.5 (4.47)  | 526.9 (2.79)  | 186.0 (0.99)  |
| Ave.        |                                 | 518.4                   | (3.37)  | (4.67)  | (2.92)  | (1.07)  |

여 EC3 기준의 탄성계수, 항복응력도가 변화된다. Table 4. 및 Table 5.에서 보는 바와 같이 파괴온도에 대한 EC3 기준 적용에 의한 각각의 응력도들은 웨브의 탄성 국부좌굴응력도, 탄성 전체좌굴응력도, 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도, 항복응력도의 순으로 낮은 값이 되고 있다.

먼저 Group 5에서의 평균온도를 EC3 기준에 적용한 경우, 실험에서의 재하 압축응력도에 비해 3개의 시험체 각각 85%, 60%, 75%로 평가되어 편차가 크게 나타나는 결과를 보이고 있다.

그리고 전체 열전대 게이지의 평균온도를 EC3 기준에 적용한 경우, 3개의 시험체 각각 재하 압축응력도의 121%, 103%, 99%로 평가되었다. 시험체 A(S-2)는 상대적으로 파괴온도에 대한 항복응력도가 재하 압축응력도보다 21% 높은 값이 되고 있으며, 시험체 B(S-1) 및 C(S-3)는 재하 압

축응력도와 항복응력도가 근접함을 알 수 있다. 이 경우 시험체 A(S-2)는 항복 이전에 플랜지의 비탄성 국부좌굴이 지배할 수 있는 가능성이 있을 것으로 사료된다.

실험결과와 파괴모드에서도 시험체 하부 플랜지의 국부적 대 변형, 전체 휨 등이 나타나고 있으며, 앞에서 검토한 내용을 고려할 경우 이러한 현상들은 항복 혹은 플랜지의 비탄성 국부좌굴에 의한 것이라 예측된다.

전체 열전대 게이지의 평균 값을 EC3 기준에 적용한 결과가 재하 압축응력도에 상응하고 있으나, 보다 나은 일반성을 확보하기 위해서는 시험체의 온도 편차를 줄이며, 다수의 실험과 이론적 연구가 추가적으로 수행되어야 할 필요성이 있다.

#### 4. 결 론

강재의 항복강도 및 탄성계수는 온도상승에 따라 감소하며 고온에서 성능저하현상이 심화된다. 구조체의 내화성능 및 안전성확보 등과 관련하여 고온에서의 부재가 갖는 구조적 거동과 파괴온도를 파악하기 위한 이론적 접근 및 실험결과가 필요한 것으로 판단하였다. 이러한 배경에서 본 연구는 H형강 압축재의 내력과 파괴온도와의 관계를 실험적으로 평가하고, 이에 대한 EC3 기준의 적용에 대한 결과를 비교하였다. 본 연구는 온도상승에 따른 철골부재의 내력평가에 대한 기초자료를 얻는 것을 목적으로 하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 상온에서의 H-형강 항복내력의 50%, 70%, 80%의 압축력을 재하한 3개의 시험체에 대한 열전대 게이지 전체의 평균파괴온도는 각각 556°C, 519°C, 479°C로 측정되었다. 실험결과와 파괴온도를 EC3 기준에 적용하였을 때 웨브의 탄성 국부좌굴응력도, 탄성 전체좌굴응력도, 플랜지의 탄성 국부좌굴응력도, 항복응력도의 순으로 낮은 값을 확인할 수 있었으며, 항복응력도와 재하 압축응력도를 비교하였다.
- (2) 파괴시 대 변형이 발생한 위치에 근접한 열전대 게이지 (Group 5)의 평균 파괴온도는 전체 열전대 게이지의 평균 파괴온도에 비하여 시험체 별로 각각 61°C, 10°C, 77°C 정도 높게 측정되었다. 대 변형 발생 부근의 국소적인 평균 파괴온도를 EC3 기준에 적용했을때의 항복응력도는 재하 압축응력도에 비하여 각각 85%, 60%, 75%의 값으로 평가되었다.
- (3) 열전대 게이지 전체의 평균온도를 적용한 EC3 기준의 항복응력도는 시험체 별로 각각 재하 압축응력도에 비하여 121%, 103%, 99%의 값으로 평가되었다.

- (4) 시험체의 파괴거동은 온도상승에 따른 재료의 항복과 플랜지의 비탄성 국부좌굴현상이 지배한 것으로 사료된다.
- (5) EC3 기준의 적용에 대해서는 전체 열전대 케이지의 평균온도를 적용한 경우가 수치적으로 재하 압축력에 근접하는 경향을 보였다. 그러나 가스 가열로의 특성으로 인한 시험체내의 불균등 온도 분포상태, 이와 연관되는 파괴온도 결정, EC3 기준적용의 타당성 확보 등의 문제점을 해결하기 위해서는 다수의 실험적 연구와 온도상승에 따른 비탄성 좌굴등의 이론적 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업 지원을 받아 수행된 것 임(No. 2011-0225).

### 참 고 문 헌(References)

- [1] 김화중(2001) 철골구조물의 내화기술, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제13권, 제4호, pp.22-30.  
Kim, W.J. (2001) Fire - Resistance Technology in Structural Steel Buildings, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 13, No 4, pp.22-30 (in Korean).
- [2] 백태순, 강문명(2004) 압축을 받는 H-형강 기둥의 온도 상승에 따른 국부 및 전체좌굴, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제20권, 제9호, pp.63-70.  
Baek, T.S. and Kang, M.M. (2004) Local & Overall Buckling of H-shaped Steel Column under Compression at Elevated Temperature, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 20, No 9, pp.63-70 (in Korean).
- [3] 장명웅, 강문명, 강성덕(2003) 온도상승에 따른 Steel Beam의 국부좌굴해석, 한국공간구조학회논문집, 한국공간구조학회, 제3권, 제1호, pp.69-75 (in Korean).  
Jang, M.W., Kang, M.M., and Kang, S.D. (2003) Local Buckling analysis of steel Beams at Elevated Temperature, *Journal of Korean association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 3, No 1, pp.69-75 (in Korean).
- [4] 구분울, 강문명, 강성덕(2004) 온도상승에 따른 H-형강 보의 국부좌굴에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 제16권, 제1호, pp.103-111.  
Koo, B.Y., Kang, M.M., and Kang, S.D. (2004) A Study on the Local Buckling of H-Beam at

- Elevated Temperatures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 16, No 1, pp.103-111 (in Korean).
- [5] Hancock, G.J. (1977) Local, Distortional and Lateral Buckling of I-Sections, *Research Report R312, School of Civil Engineering, Sydney, University of Sydney, Australia*.
- [6] Wadee, M.A. (1995) *Local Instability Phenomena in Fire*, The Steel Construction Institute RT533, Version 01.
- [7] 권인규, 지남용, 이세현(2002) 철골 기둥 및 보부재의 허용온도에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제18권, 제10호, pp.45-52.  
Kwon, I.K., Jee, N.Y., and Lee, S.H. (2002) Experimental Study on the Critical Temperature for Structural Elements such as Column and Beam Exposed to Fire Conditions, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 18, No 10, pp.45-52 (in Korean).
- [8] 이승재, 강성덕, 오명호, 김명환, 김상대(2007) SC합성기둥의 내화성능에 대한 실험연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제4호, pp.425-434.  
Lee, S.J., Kang, S.D., Oh, M.H., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2007) Experimental Study on the Fire Resistance of SC Composite Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 19, No 4, pp.425-434 (in Korean)
- [9] Eurocode 3 (1993) Design of Steel Structures Part12 Structural Fire Design, Commission of the European Communities, Brussels.
- [10] ISO (1999) *ISO 834-1 Fire Resistance Tests - Elements of building construction and materials*
- [11] KS (1999) KS F 2257-1, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-일반요구사항.  
KS (1999) *KS F 2257-1, Methods of fire resistance test for elements of building construction-general requirements* (in Korean)
- [12] KS (2004) KS F 2257-4, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-수직 내력 구획 부재의 성능 조건.  
KS (2004) *KS F 2257-4, Methods fire resistance test for elements of building construction-specific requirements for loadbearing vertical separating elements* (in Korean)
- [13] KS (2006) KS F 2257-7, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-기둥의 성능조건.  
KS (2006) *KS F 2257-7, Methods fire resistance test for elements of building construction-specific requirements for columns* (in Korean)
- [14] Ramberg, W. and Osgood, W. (1942) Description



of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory committee for Aeronautics, Technical Note #902.

[16] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. (1961) *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill Book Co. Inc, New York.

[15] Bleich (1952) *Buckling Strength of Metal Structures*, McGraw-Hill, New-York.

---

**요 약:** 본 연구의 목적은 H-형강 압축재의 온도상승에 따른 파괴거동을 중심으로 압축력과 파괴온도의 상관관계를 파악하기 위한 실험을 수행하는 것이다. SS400 강재로 제작된 H-형강의 시험체를 선정하여, ISO 834의 재하가열 시험방법에 따라 온도 상승에 대한 실험을 한국방재시험연구원(FILK)에서 수행하였다. 고온상태의 강재에 대한 항복강도 및 탄성계수의 감소계수는 EC3 (Eurocode3) Part 1.2(1993) 관계식을 근거로 하여 파괴온도시 국부 및 전체좌굴 응력도와 항복응력도를 실험결과와 비교 검토하였다. 실험조건은 세장비 45.4이고 상온에서의 항복내력에 대한 50%, 70%, 80%를 재하압축력으로 설정하여 파괴온도를 측정하였다. 파괴온도와 재하압축력에 대한 실험결과로부터 온도상승에 따른 내력은 탄성 좌굴강도보다는 항복내력에 근접함을 파악할 수 있었다.

**핵심 용어:** 전체좌굴, 국부좌굴, 항복강도, ISO 834 화재규준, 내화실험, 파괴온도

---