

# 온도상승에 따른 Steel-beam의 국부좌굴해석

## Local Buckling Analysis of Steel Beams at Elevated Temperature

장명웅\*                      강문명\*\*                      강성덕\*\*\*  
Jang, Myung-Woong      Kang, Moon-Myung      Kang, Sung-Duk

### Abstract

This paper is represented a general equations to obtain the elastic local buckling stresses for the flange and web of H-beam under compression at elevated temperatures and is also developed the software to perform the elastic local buckling analysis at elevated temperatures. Eurocode3 Part 1.2 are used to analyse the decrease in steel yield strength and elastic modulus at elevated temperatures.

For design examples of 6 H-beams, the elastic local buckling stresses and critical temperatures for the slenderness ratio ( $b/t_f$  and  $d/t_w$ ) of the flange and web under uniform compression at elevated temperatures have been analysed by a computer program of this paper. It can be seen that the computer analytical results of this study show a good agreement with the experimental results by Wadee.

*keywords* : local buckling, elevated temperature, yield strength, critical temperature, slenderness ratio.

## 1. 서론

온도상승(elevated temperature)에 따른 강재의 항복강도(yield strength)와 탄성계수(elastic modulus)는 급격하게 감소함으로 특히 압축을 받는 얇은 강판(steel plate)은 화재(fire)로 인한 온도상승으로 국부좌굴(local buckling)을 일으킨다. 따라서 압축을 받는 H-beam과 같은 강재는 온도상승에 따른 항복 파괴(yield failure)가 일어나기 전에 H-beam의 플랜지(flange) 및 웨브(web)부분에서 국부좌굴이 일어날 수 있다. 그리고 화재 실험(fire test)은 많은 비용이 소요되므로 컴퓨터에 의한 국부좌굴 해석 및 임계온도(critical temperature) 예측은 매우 중요한 것이다.

1972년 Culver<sup>[1]</sup> 등은 온도상승에 따른 강재 기둥에 대한 좌굴해석을, 1977년 Hancock<sup>[2]</sup>은 I-beam에 대한 국부좌굴 및 비틀림 좌굴 등을 연구하였고, 1988년 Plank<sup>[3]</sup> 등은 화재로 인한 온도상승에 따른

강재 기둥에 대한 파괴해석을, 1995년 Wadee<sup>[4]</sup>는 화재로 인한 온도상승에 따른 I-beam의 국부좌굴 안전현상에 대한 실험연구를 하였고, 1996년 Bradford<sup>[5]</sup> 등은 온도상승에 따른 냉간 강재의 국부좌굴에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 온도상승에 따른 강재의 항복강도와 탄성계수 감소를 EC3(Eurocode3) Part 1.2<sup>[6]</sup> 관계식을 근거로 하여 온도상승에 따른 플랜지와 웨브에 대한 국부좌굴 해석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하여, Wadee<sup>[4]</sup>의 실험결과와 본 연구의 해석결과를 비교·고찰하고, 6개의 H-beam 모델에 대한 설계 예를 들어 부재단면, 경계조건 및 하중비를 고려하여 온도상승에 따른 플랜지와 웨브의 국부좌굴 해석 및 국부좌굴에 대한 임계온도를 컴퓨터에 의한 해석을 하고, 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 탄성 국부 좌굴 응력

### 2.1 상온에서 탄성 국부 좌굴 응력

상온(ambient temperature)에서 <그림 1>과 같은

\* 학생회원 · 경북대학교 대학원 석사과정

\*\* 정회원 · 경북대학교 건축학부 교수, 공학박사

\*\*\* Ph.D Course, University of Sheffield, UK.

판의 탄성 국부 좌굴 응력(elastic local buckling stress) 식은 다음과 같다.<sup>[7,8]</sup>

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} E \quad (1)$$

여기서,

$E$  : 강재의 탄성계수

$k$  : 판의 좌굴 계수

$\mu$  : 프와송 비

$b$  : 판 폭

$t$  : 판 두께

위 식(1)에서  $k$ 값은 <표 1>과 같이 판의 단부 지지조건과 작용하는 압축력의 형태에 따라 달라진다. 그리고 온도상승에 따른 압축을 받는 <그림 2>와 같은 H-beam의 플랜지와 웨브에 대한 탄성 국부 좌굴 응력식은 다음과 같다.<sup>[4,5]</sup>

$$\text{플랜지} : \sigma_{cr\theta} = \frac{k_f \pi^2 E_\theta}{12(1-\mu^2)(b/t_f)^2} \quad (4)$$

$$\text{웨 브} : \sigma_{cr\theta} = \frac{k_w \pi^2 E_\theta}{12(1-\mu^2)(d/t_w)^2} \quad (5)$$

여기서,

$E_\theta$  : 온도  $\theta$ 에서 강재의 탄성계수

$k_f$  : 플랜지의 좌굴계수

$b$  : 플랜지 폭(=  $(B-t_w)/2$ )

$t_f$  : 플랜지의 두께

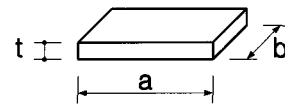
$k_w$  : 웨브의 좌굴계수

$d$  : 웨브의 춤

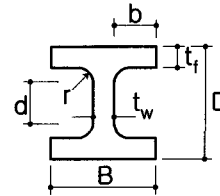
$t_w$  : 웨브의 두께

$\sigma_{cr\theta}$  : 온도  $\theta$ 에서 탄성 국부좌굴 응력

$\sigma_{y\theta}$  : 온도  $\theta$ 에서 강재의 항복응력



<그림 1> 판의 치수



<그림 2> H-beam 치수

## 2.2 온도상승에 따른 플랜지의 탄성 국부 좌굴

온도상승에 따른 <표 1>의 case1과 같은 압축력과 경계조건을 가지는 플랜지가 탄성 국부 좌굴이 일어나기 위해서는 다음 식을 만족하여야 한다.<sup>[4,5]</sup>

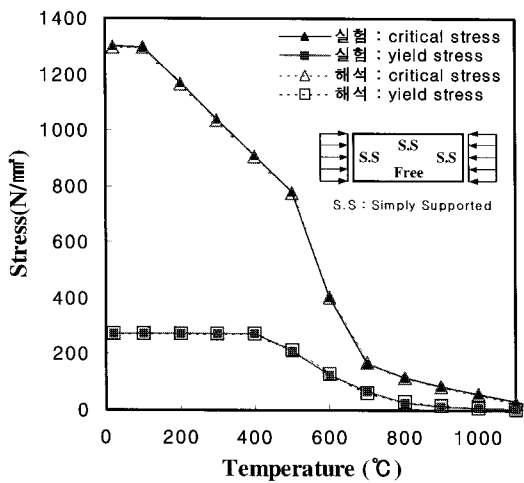
<표 1> 판의 좌굴 계수

Case	경계 조건	하중	좌굴계수 (k)
1		압축	0.425
2		압축	4.000
3		휨 + 압축	5.000
4		휨 + 압축	7.810

여기서, S.S : 단순지지

$$\sigma_{cr\theta} = \frac{k_f \pi^2 E_\theta}{12(1-\mu^2)(b/t_f)^2} \leq \sigma_{y\theta} \quad (6)$$

<그림 2>는 온도상승에 따른 플랜지의 항복응력 (yield stress)과 국부좌굴응력에 대한 Wade의 실험<sup>[4]</sup> 및 본 연구의 해석 결과이다. 여기서  $b=79.5\text{mm}$ ,  $t_f=10.2\text{mm}$ 로 하였고, 강재의 탄성계수와 항복응력은 각각 상온시의  $E=205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 와  $\sigma_y=275 \text{ N/mm}^2$  값을 채용하였다. 그리고 온도상승에 따른 탄성계수의 변화는 EC3 Part 1.2모델<sup>[6]</sup>을 사용하였다.



<그림 3> 온도상승에 따른 압축을 받는 플랜지의 항복응력과 탄성 국부좌굴응력의 관계( $k_f=0.425$ )

### 2.3 온도상승에 따른 웨브의 탄성 국부 좌굴

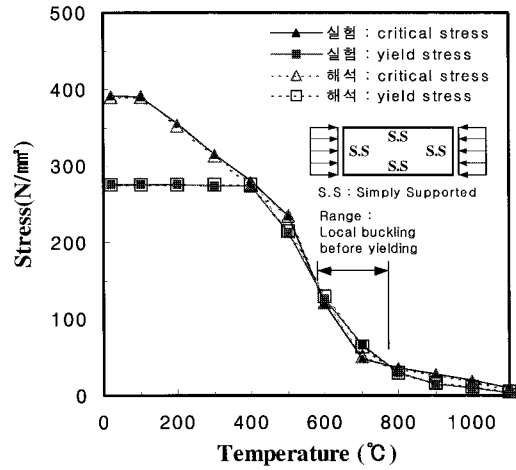
온도상승에 따른 압축을 받는 4변 단순지지 웨브에 탄성 국부 좌굴이 일어나기 위해서는 다음 식을 만족하여야 한다.<sup>[4,5]</sup>

$$\sigma_{cr\theta} = \frac{k_w \pi^2 E_\theta}{12(1-\mu^2)(d/t_w)^2} \leq \sigma_{y\theta} \quad (7)$$

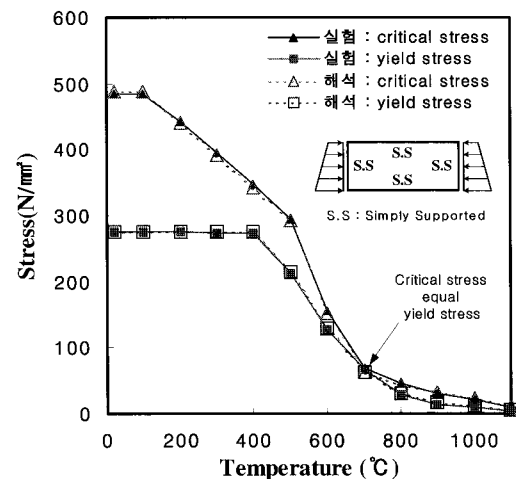
<그림 4>는 <표 1>의 case2~case4와 같은 하중과 경계조건을 가지는 웨브의 항복응력과 국부좌굴응력에 대한 Wade의 실험<sup>[4]</sup> 및 본 연구의 해석 결과이다. 여기서,  $d=265.6\text{mm}$ ,  $t_w=6.1\text{mm}$ 로 하였고 강재의 항복응력과 탄성계수는 플랜지와 동일하다.

<그림 3>과 <그림 4>에서 Wade의 실험<sup>[4]</sup>결과와 본 연구의 해석결과가 잘 일치함을 고찰 할 수 있었

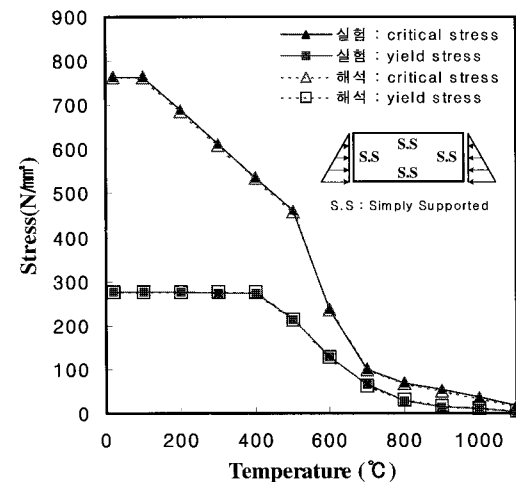
고, <그림 3>과 <그림 4>의 (c)에서는 플랜지와 웨브의 국부좌굴응력이 항상 항복응력보다 크므로 탄



(a)  $k_w=4.00$



(b)  $k_w=5.00$



(c)  $k_w=7.81$

<그림 4> 온도상승에 따른 압축을 받는 4변 단순지지 웨브의 항복 응력 및 탄성 국부좌굴응력의 관계

성 국부 좌굴이 일어나지 않고, <그림 4>의 (a)에서는 약  $575^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 875^{\circ}\text{C}$ , (b)에서는 약  $\theta = 700^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 웨브의 항복응력이 국부좌굴응력보다 크므로 탄성 국부 좌굴이 일어남을 고찰 할 수 있었다.

### 3. 온도상승에 따른 H-beam의 탄성 국부좌굴

본 장에서는 H-beam 스팬 중앙에 집중하중을 받고 축방향으로 등분포 압축을 받는 H-beam이 온도상승에 따른 탄성국부좌굴 응력을 해석하고, 탄성 국부 좌굴에 대한 임계온도를 예측하고자 한다. 본 연구에서는 H-beam의 스팬을 8m, 하중비(load ratio) ( $r$ : 하중비는 단순보일 때 최대 모멘트를 기준하였음)를 0.5, 0.6으로 하고, 유한 요소 해석을 위하여 H-beam을 길이 방향으로 6등분하였고, H-beam 단면은 상, 하 플랜지 및 웨브를 각각 4등분하여 12 요소로 분할하였다. 그리고 온도는 H-beam의 전 길이에 등분포하는 경우로써  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ 와  $500^{\circ}\text{C}$  이상에서는  $20^{\circ}\text{C}$ 씩 증가하면서 해석하였다.

본 연구에서는 강재의 탄성계수와 항복응력은 상온시의  $E = 205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 와  $\sigma_y = 275 \text{ N/mm}^2$  값을 채용하였고, 단부 경계조건은 단순지지와 양단 고정인 두 경우에 대하여 <표 2>과 같은 H-beam 6개 모델에 대하여 각각 VULCAN 프로그램<sup>[9,10]</sup>으로 온도상승에 따른 최대 휨 응력을 해석하고, 탄성 국부 좌굴 응력은 본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램으로 해석하고, 국부좌굴에 대한 H-beam의 임계

<표 2> H-beam 단면과 스팬 중앙 집중하중( $r$ :하중비)

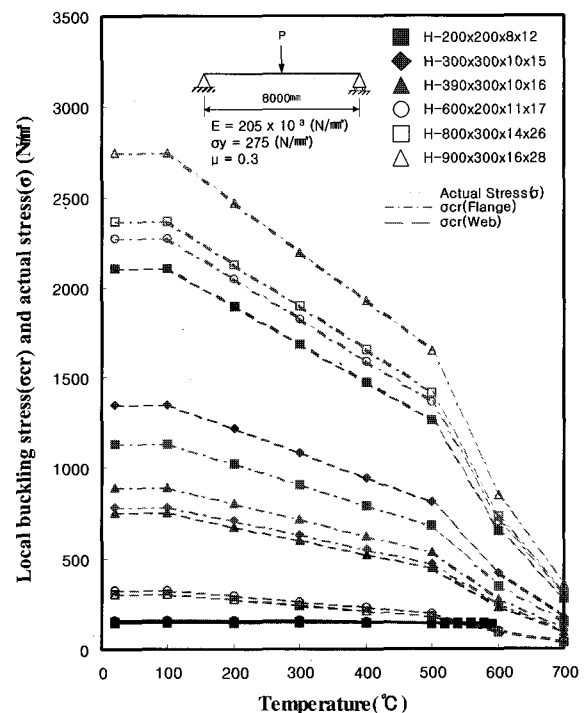
단면 치수	b/tf	d/tw	L (m)	중앙 집중 하중(KN)	
				r	
				0.5	0.6
H-200x200x8x12	8.00	18.75	8	36.09	43.31
H-300x300x10x15	9.67	23.40	8	103.13	123.75
H-390x300x10x16	9.06	31.40	8	150.56	180.68
H-600x200x11x17	5.56	47.45	8	204.88	245.85
H-800x300x14x26	5.50	49.43	8	566.50	679.80
H-900x300x16x28	5.07	49.25	8	721.88	866.25

온도를 예측하였다.

그리고, 설계 예에 대한 해석 결과를 <그림 5>~<그림 8>에 나타내었고, <표 3>~<표 6>에 요약하였다.

이상의 <그림 5>~<그림 8>과 <표 3>~<표 6>에서 온도상승에 따른 스팬 중앙에 집중하중을 받고 축방향으로 등분포 압축을 받는 단순지지 및 양단고정 H-beam의 탄성국부좌굴은 웨브의 폭-두께비가 약  $d/t_w \geq 47.45$ 인 웨브 상부에서 주로 일어나고, 약  $d/t_w \leq 31.40$ 인 웨브와 플랜지 전 부분은 국부좌굴이 일어나지 않고 항복과괴가 발생됨을 알 수 있었다. 단순지지 H-beam의 웨브의 탄성국부좌굴에 대한 임계온도는 하중비  $r=0.5$ 와  $0.6$ 에서 각각  $544^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 554^{\circ}\text{C}$ 와  $511^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 523^{\circ}\text{C}$ 이고, 양단고정 H-beam의 웨브의 탄성국부좌굴에 대한 임계온도는 하중비  $r=0.5$ 와  $0.6$ 에서  $194^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 265^{\circ}\text{C}$ 임을 알 수 있었다. 그리고 양단고정 H-beam이 단순지지 H-beam보다 항상 보다 낮은 온도에서 탄성국부좌굴이 일어나고, 단순지지 및 양단고정 H-beam 모두가 작용하중이 큰 경우가 작은 경우보다 더 낮은 온도에서 탄성국부좌굴이 일어남을 또한 고찰할 수 있었다.

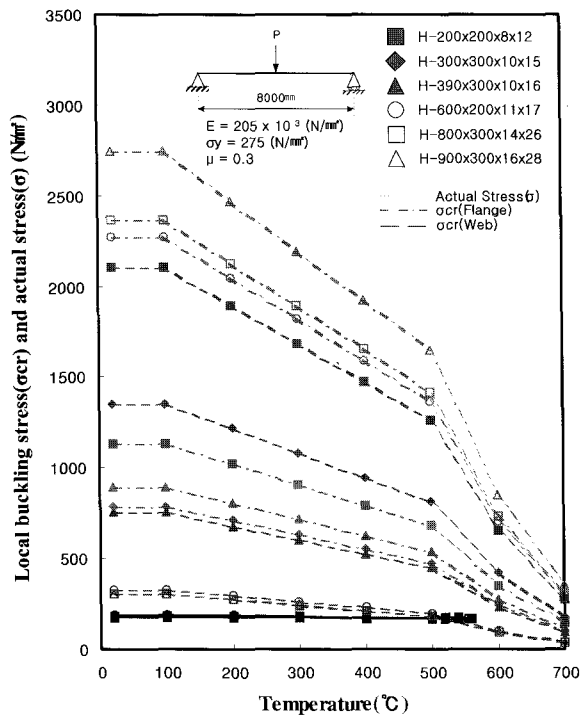
#### 3.1 단순지지 H-beam



<그림 5> 온도상승에 따른 단순지지 H-beam의 탄성 국부 좌굴 응력과 최대 휨 응력 ( $r=0.5$ )

〈표 3〉 온도상승에 따른 단순지지 H-beam의 해석 결과 (r=0.5)

단면 치수	항복과괴 온도(°C)	국부좌굴에 대한 임계 온도(°C)	
		플랜지	웨브
H-200x200x8x12	591.72	NO	NO
H-300x300x10x15	590.16	NO	NO
H-390x300x10x16	587.81	NO	NO
H-600x200x11x17	585.63	NO	554.00
H-800x300x14x26	587.66	NO	544.00
H-900x300x16x28	587.19	NO	544.00

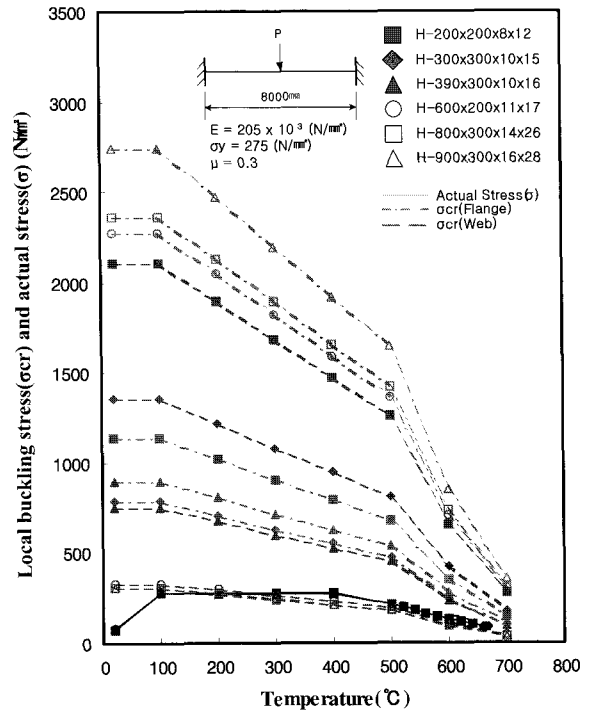


〈그림 6〉 온도상승에 따른 단순지지 H-beam의 탄성 국부 좌굴 응력과 최대 휨 응력 (r=0.6)

〈표 4〉 온도상승에 따른 단순지지 H-beam의 해석 결과 (r=0.6)

단면 치수	항복과괴 온도(°C)	국부좌굴에 대한 임계 온도(°C)	
		플랜지	웨브
H-200x200x8x12	559.53	NO	NO
H-300x300x10x15	557.73	NO	NO
H-390x300x10x16	554.92	NO	NO
H-600x200x11x17	552.50	NO	523.00
H-800x300x14x26	554.77	NO	511.00
H-900x300x16x28	554.38	NO	511.00

### 3.2 양단고정 H-beam



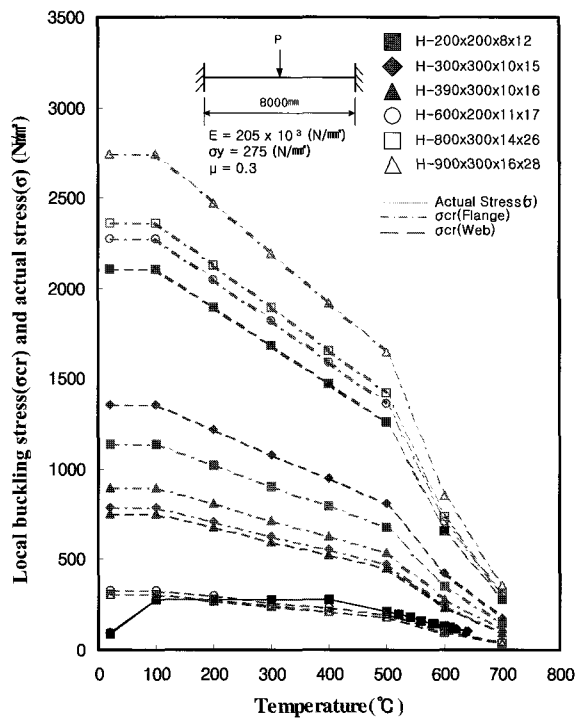
〈그림 7〉 온도상승에 따른 양단고정 H-beam의 탄성 국부 좌굴 응력과 최대 휨 응력 (r=0.5)

〈표 5〉 온도상승에 따른 양단고정 H-beam의 해석 결과 (하중비=0.5)

단면 치수	항복과괴 온도(°C)	국부좌굴에 대한 임계 온도(°C)	
		플랜지	웨브
H-200x200x8x12	640.08	NO	NO
H-300x300x10x15	667.58	NO	NO
H-390x300x10x16	662.97	NO	NO
H-600x200x11x17	629.06	NO	265.00
H-800x300x14x26	608.05	NO	194.00
H-900x300x16x28	602.58	NO	210.00

### 4. 결 론

스판 중앙에 집중하중을 받는 단순지지 및 양단 고정인 H-beam의 6개 모델에 대하여 온도상승에 따른 축방향으로 등분포 압축을 받는 H-beam의 플랜지와 웨브의 국부좌굴 및 국부좌굴에 대한 임계온도를 본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램으로 해석한 결과는 다음과 같다.



〈그림 8〉 온도상승에 따른 양단고정 H-beam의 탄성 국부 좌굴 응력과 최대 휨 응력 (r=0.6)

〈표 6〉 온도상승에 따른 양단고정 H-beam의 해석 결과 (하중비=0.6)

단면 치수	항복과과 온도(°C)	국부좌굴에 대한 임계 온도(°C)	
		플랜지	웹
H-200x200x8x12	608.91	NO	NO
H-300x300x10x15	641.27	NO	NO
H-390x300x10x16	635.94	NO	NO
H-600x200x11x17	597.89	NO	265.00
H-800x300x14x26	581.33	NO	194.00
H-900x300x16x28	576.35	NO	201.00

- 1) 온도상승에 따른 H-beam에 대한 본 연구의 탄성국부좌굴 해석결과는 Wadee의 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.
- 2) 온도상승에 따른 단순지지 및 양단고정인 플랜지와 웹의 탄성 국부좌굴은 웹의 폭-두께비가 약  $d/t_w \geq 47.45$ 인 웹의 상부에서 주로 일어나고, 웹의 폭-두께비가 약  $d/t_w \leq 31.40$ 인 웹부분과 플랜지 전 부분은 국부좌굴이 일어나지 않고 항복과과가 발생함을 알 수 있었다.

- 3) 탄성국부좌굴에 대한 임계온도는 단순지지 H-beam은 하중비 r=0.5와 0.6에서 각각  $544^\circ\text{C} \leq \theta \leq 554^\circ\text{C}$ 와  $511^\circ\text{C} \leq \theta \leq 523^\circ\text{C}$ 이고, 양단고정 H-beam은 하중비 r=0.5와 0.6에서  $194^\circ\text{C} \leq \theta \leq 265^\circ\text{C}$  임을 알 수 있었다.
- 4) 작용하중이 큰 경우와 양단고정인 경우가 단순지지인 H-beam보다 더 낮은 온도에서 국부좌굴이 발생함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-042-E00135)

### 참고 문헌

1. Culver, C.G., "Steel column buckling under thermal gradients", Journal of the structural Division ASCE, 98 CST81, 1972, pp. 1853-1865.
2. Hancock, G.J., "Local, Distortional and Lateral buckling of I-beams", Research Report R312, University of Sydney, School of Civil Engineering, Sydney, Australia, Dec. 1977.
3. Olawale, A.O. and Plank, R.J., "The collapse analysis of steel columns in fire using a finite strip method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 26, 1988, pp. 2755-2764.
4. Wadee, M.A., "Local instability phenomena in fire", The Steel Construction Institut RT533 Version 01, 1995.
5. Uy, B. and Bradford, M.A., "Local buckling of Cold formed steel in composite structural elements at elevated temperature", J. Constrct. Steel Research 34, 1995, pp.53-73
6. Eurocode 3: "Design of Steel Structures. Part 1.2: Structural Fire Design", Commission of the European Communities, Brussels, 1993.
7. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., "Theory of elastic stability", McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y., 1961.

8. Bulson, P.S., "The stability of flat plates", Chatto and Windus, 1970.
9. El-Rimawi, J.A., I.W. Burgess & R.J.Plank, "The Influence of Connection Stiffness on the Behaviour of Steel Beams in Fire", J.Construct. Steel Res., Vol. 43, No. 1-3, 1997, pp. 1-15
10. Bailey, C.G., "The behaviour of Asymmetric Slim Floor Steel Beams in Fire", Journal of Constructional Steel Research, 50, 1999, pp. 235-257.