온도상승에 따른 압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥의 국부 및 전체 좌굴

Local & Overall Buckling of Cold-Formed Channel Column under Compression at Elevated Temperatures

백 태 순* 강 문 명**
Baik, Tai Soon Kang, Moon Myung

Abstract

This paper is developed a computer program to analysis the elastic local and overall buckling stress based on Eurocode 3 Part 1.3 for the flange and web, and Euler equations for columns of cold-formed channel under compression at elevated temperatures. The high temperature stress-strain relationships of steel used this paper are determined according to Eurocode 3 Part 1.2. Critical temperatures and the elastic local buckling stresses of the cold-formed channel columns under compression at elevated temperatures are analysed by the computer program developed in this study. Analysis examples are given to show the applicability of the computer program developed in this study.

keywords : *Local & Overall Buckling Stress, Elevated Temperature, High Temperature, Critical Temperature*

1. 서 론

냉간성형 C-형강(cold-formed channel)은 고강도이고 경량일 뿐만 아니라 다양한 형상을 가지는 특성과 경제적인 장점 때문에 최근 건설현장에서 하중이 크지 않는 산업용 공장 건물에 널리 사용되고 있다. 그러나 냉간성형 C-형강 기둥은 화재(fire)로 인한 고온에서 강도(strength)와 강성(stiffness)이 급격하게 저하하는 취약점이 있고, 항복파괴(yield failure)가 일어나기 전에 플랜지(flange)나 웨브(web)에서 국부좌굴(local buckling)이나 기둥전체 좌굴이 일어날 수 있다.

화재로 인한 고온에 있어서 강재의 고차 비선형 응력-변형률(non-linear stress-strain) 관계에 의하여 국부좌굴 특성이 매우 복잡하고, 온도 상승(elevated temperature)에 따른 압축을 받는 냉간성형 C-형강에 대한 실험 및 해석 연구도 별로 없는 실정이라 할 수 있다. 그리고 화재 실험은 비용이 대단히 많이 소요되므로 화재로 인한 온도 증가에 따른 냉간성형 경C-형강 및 립C-형강의 국부좌굴에 대한 컴퓨터에 의한 해석은 매우 중요하다.

1947년 Winter[1]는 유효폭(effective width) 관계식을 제안하였고, 1974[2]년 Winter는 유효폭에 의한 냉간성형 부재의 국부 및 전체좌굴에 대한 연구를

* 정회원· 경북대학교 대학원 건축공학과 박사수료
** 정회원· 경북대학교 건축학부 교수

하였다. 1978년 Hancock[3]은 유한스트립법(finite strip method)으로 상온시 I-형강 보의 주축에 대한 국부, 뒤틀림(distortional)과 휨-비틀림(flexural-torsional) 좌굴에 대한 연구를 하였고, 1988년 Plank[4] 등은 유한스트립법으로 화재 시 철골기둥의 파괴 해석에 대한 연구를 하였고, 1979년 Kalyanaraman[5]은 냉간성형 부재의 국부좌굴에 대한 연구를 하였고, 1995년 Bradford[6] 등은 유한스트립법으로 온도 상승에 따른 복합 냉간성형 C-형강의 국부좌굴 거동을 연구하였다.

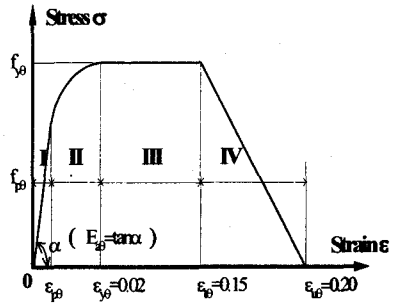
그리고 2003년 Feng [7,8]등은 화재로 인한 온도 상승에 따른 냉간성형 C-형강 단주(short column)의 구조적 거동에 대한 실험과 해석 연구를 하였다. 그리고 2003년 강성덕[14] 등은 화재시 온도상승에 따른 압축을 받는 I-형강 및 H-형강의 플랜지와 웨브의 국부좌굴응력 해석과 임계온도를 EC3 (Eurocode 3) Part 1.2(2000b)[9]를 근거로 한 컴퓨터 해석 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 화재로 인한 온도 상승에 따른 압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥의 국부좌굴응력을 해석 할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 EC3 Part1.2(2000b)와 EC3 Part1.3 (CEN 1996)[10]의 관계식을 근거로 하여 개발하고, 해석 예를 들어 냉간성형 경C-형강과 립C-형강의 플랜지와 웨브에 대하여 단부 지지조건에 따른 탄성국부좌굴응력(elastic local buckling stress) 및 탄성전체좌굴(elastic overall buckling stress)을 해석하고, 그 결과를 2003년 Feng 등의 실험 및 해석 결과와 비교, 분석하였다. 그리고, 해석 예를 들어 냉간성형 경C-형강과 립C-형강 기둥의 플랜지와 웨브의 탄성국부좌굴 및 탄성전체좌굴에 대한 임계온도(critical temperature) 및 강재의 항복에 의한 파괴온도(failure temperature)를 예측하였다.

2. 온도 상승에 따른 강재의 성질

2..1 응력-변형률(stress-strain) 관계식

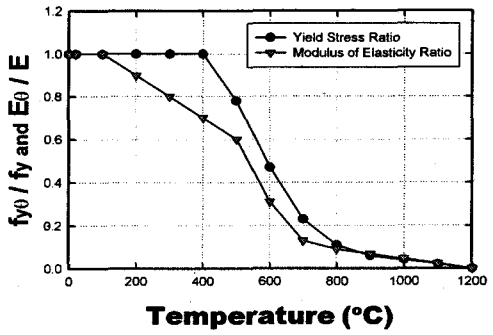
화재로 인한 온도상승에 따른 강재에 대한 EC3 Part1.2(2000b)의 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)은 그림 1과 같고, 표 1의 관계식과 같이 네 부분으로 나누어진다.



<그림 1> EC3 모델의 온도상승에 따른 구조용 강재의 응력-변형률 관계

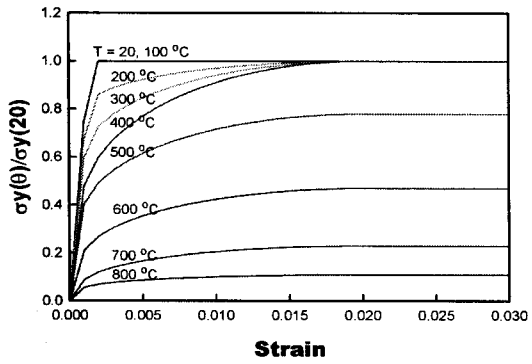
<표 1> EC3 모델의 온도상승에 따른 강재의 응력과 접선탄성계수의 관계식

변형률 구간	응력 σ_θ	접선탄성계수 E_t
I. elastic $\varepsilon_\theta \le \varepsilon_{p\theta}$	$E_\theta \cdot \varepsilon_\theta$	E_θ
II. transit elliptical $\varepsilon_{p\theta} \le \varepsilon_\theta \le \varepsilon_{y\theta}$	$\frac{b}{a}\sqrt{a^2-(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_\theta)^2}+\sigma_{p\theta}-c$ with $a^2=(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_{p\theta})(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_{p\theta}+c/E_\theta)$ $b^2=E_\theta(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_{p\theta})c+c^2$ $c=\frac{(\sigma_{y\theta}-\sigma_{p\theta})^2}{E_\theta(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_{p\theta})-2(\sigma_{y\theta}-\sigma_{p\theta})}$	$\frac{b(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_\theta)}{a\sqrt{a^2-(\varepsilon_{y\theta}-\varepsilon_\theta)^2}}$
III. plastic $\varepsilon_{y\theta} \le \varepsilon_\theta \le \varepsilon_{t\theta}$	$\sigma_{y\theta}$	0
IV. decreasing $\varepsilon_{t\theta} \le \varepsilon_\theta \le \varepsilon_{u\theta}$	$\sigma_{y\theta}[1-(\varepsilon_\theta-\varepsilon_{t\theta})/(\varepsilon_{u\theta}-\varepsilon_{t\theta})]$	--



<그림 2> 온도상승에 따른 항복응력과 탄성계수의 변화

EC3 Part1.2(2000b)의 표 1의 관계식을 근거한 온도상승에 따른 강재의 항복응력과 탄성계수의 변화는 그림 2와 같고, 응력-변형률 관계 곡선은 그림 3과 같다.



<그림 3> EC3 모델의 응력-변형률-온도 관계

3. 탄성좌굴응력식

3.1 탄성국부좌굴 응력식

EC3 Part 1.3(CEN 1996)[10], AISI[13] 및 대한건축학회[15]에서는 냉간성형 경C-형강과 립C-형강의 플랜지와 웨브에 대한 국부좌굴 해석에 Winter(1947)[1]의 식을 채용하였다.
상온에 있어서 압축을 받는 냉간성형 경C-형강과 립C-형강의 플랜지와 웨브의 유효폭(effective width)에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{b_e}{w} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{\max}}}\left(1 - 0.22\sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{\max}}}\right) \quad (1)$$

$$b_e = \rho w \quad (2)$$

$$\lambda_p \le 0.673 \text{ 일 때 } \rho = 1.0 \quad (3)$$

$$\lambda_p > 0.673 \text{ 일 때 } \rho = \frac{1.0 - 0.22\sqrt{\lambda}}{\lambda} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{w}{t}\sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f}{\pi^2 EK}} \quad (5)$$

여기서, w 는 평판의 폭, σ_{cr} 은 탄성국부좌굴 응력, $\sigma_{\max}$ 는 평판의 최대 단부 응력, b_e는 유효폭, K, ρ 와 λ 는 국부좌굴, 감소 및 세장비 계수, f 는 유효폭 산정을 위한 압축판요소의 응력도, ν 는 강재의 포아송비(Poission's ratio), t 는 평판의 두께이다.
온도 상승에 따른 압축을 받는 냉간성형 C-형강의 유효폭에 대한 플랜지, 립 및 웨브의 탄성국부좌굴 응력식은 Yu(2000)[11]와 Ghersi (2002)[12] 등에 의하여 다음 식과 같다.

(1) 플랜지 :

$$\sigma_{cr\theta,f} = \frac{K_f \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{b_e}{t}\right)^2} \quad (6)$$

(2) 립 :

$$\sigma_{cr\theta,l} = \frac{K_l \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{d_e}{t}\right)^2} \quad (7)$$

(3) 웨 브 :

$$\sigma_{cr\theta,w} = \frac{K_w \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{h_e}{t}\right)^2} \quad (8)$$

여기서, $\sigma_{cr\theta,f}$, $\sigma_{cr\theta,l}$, $\sigma_{cr\theta,w}$는 온도 θ에서 플랜지, 립 및 웨브의 탄성국부좌굴응력이며, b_e , d_e , h_e 는 플랜지, 립 및 웨브의 유효폭과 춤이며, K_f , K_l , K_w 는 플랜지, 립 및 웨브의 국부좌굴 계수이며, t 는 냉간성형 C-형강의 판두께, E_θ 는 온도 θ에서 강재의 탄성계수를 나타낸다.

그리고 플랜지, 립 및 웨브가 탄성국부좌굴이 일어날 조건은 다음 식과 같다.

(1) 플랜지 :

$$\sigma_{cr\theta,f} = \frac{K_f \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{b_e}{t}\right)^2} \le f_{y\theta} \quad (9)$$

(2) 립 :

$$\sigma_{cr\theta,l} = \frac{K_l \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{d_e}{t}\right)^2} \le f_{y\theta} \quad (10)$$

(3) 웨 브 :

$$\sigma_{cr\theta,w} = \frac{K_w \pi^2 E_\theta}{12(1-\nu^2)\left(\frac{h_e}{t}\right)^2} \le f_{y\theta} \quad (11)$$

여기서, $f_{y\theta}$ 는 온도 θ에서의 강재의 항복강도이다.

이상의 EC3 Part1.3(CEN 1996)[10]에 의한 식(1)~식(11)와 EC3 Part1.2(2000b)[9]에 의한 응력-변형률 관계식을 근거하여 본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램에 의한 온도 증가에 따른 등분포 압축을 받는 냉간성형 경C-형강과 립C-형강 기둥의 플랜지와 웨브에 대한 파괴하중(failure load) 해석 결과는 Feng(2003)[8] 등에 의한 실험 및 해석결과와 잘 일치함을 표 2에서 고찰할 수 있다.

<표 2> 온도 상승에 따른 등분포 하중을 받는 냉간성형 C-형강의 파괴 하중에 대한 실험 및 해석과 본 연구의 결과

온도 (℃)	단면치수 (mm)	실험 (kN)	ABAQUS		본 연구
			EC3 (kN)	Qtimem (kN)	
20	C-100×54×15×1.2	50.97	61.22	61.22	48.49
250		40.04	53.00	52.32	43.37
400		45.75	40.08	43.40	44.28
20	C-104×63×1.5	54.50	70.64	70.64	71.00
250		49.58	62.74	62.09	60.48
400		45.70	47.88	51.50	53.41

표 2에서 Feng(2003) 등이 사용한 냉간성형 립C-형강 C- 100×54×15×1.2 기둥의 평균항복강도는 $F_y = 410.58\ N/㎟$, 평균 탄성계수는 $E = 186.95 \times 10^3 N/㎟$이고, 경C-형강 C-104×63×1.5 기둥의 평균항복강도는 $F_y = 494.00\ N/㎟$, 평균 탄성계수는 $E = 188.38 \times 10^3 N/㎟$, 국부좌굴계수는 냉간성형 경C-형강의 플랜지는 $K_f = 0.43$, 웨브는 $K_w = 4.0$을 사용하여고, 립C-형강의 플랜지와 웨브는 $K_f = K_w = 4.0$, 립은 $K_l = 0.43$을 각각 사용하였다.

3.2 탄성전체좌굴 응력식

상온에서 압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥의 탄성전체좌굴응력식은 식(12)과 같으며, 고온에서 압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥의 탄성전체좌굴응력식은 식(13)와 같이 정의된다.

$$\sigma_o = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{o\theta} = \frac{\pi^2 E_\theta}{\lambda^2} \quad (13)$$

여기서,

σ_o : 냉간성형 C-형강 기둥의 상온에서의 탄성 전체좌굴응력

E : 상온에서의 강재의 탄성계수

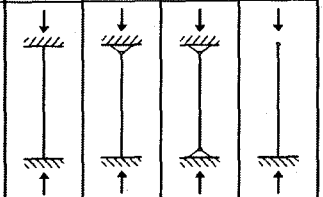
$\sigma_{o\theta}$: 냉간성형 C-형강 기둥의 온도 θ에서의 탄성 전체좌굴응력

E_θ : 온도 θ에서의 강재의 탄성계수

λ : 압축재의 세장비 ($= KL/i$)

KL은 유효좌굴길이를 말하며, 여기에서 K는 지지조건에 따른 압축재의 유효좌굴길이계수이며, 표 3과 같고, i는 단면회전이차반경이다.

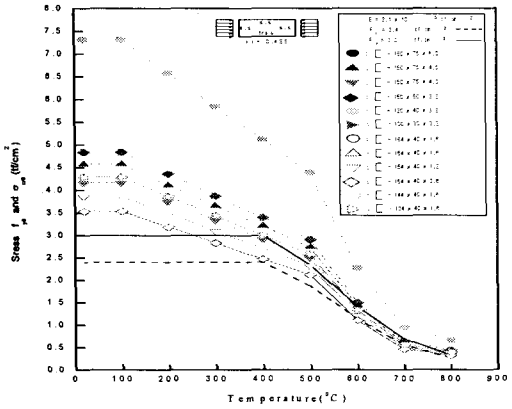
<표 3> 지지조건에 따른 압축재의 유효좌굴길이계수

Boundary Condition	양단지지	1단회전 1단고정	양단회전	1단자유 1단고정
좌굴모드				
K 값	0.5	0.7	1.0	2.0

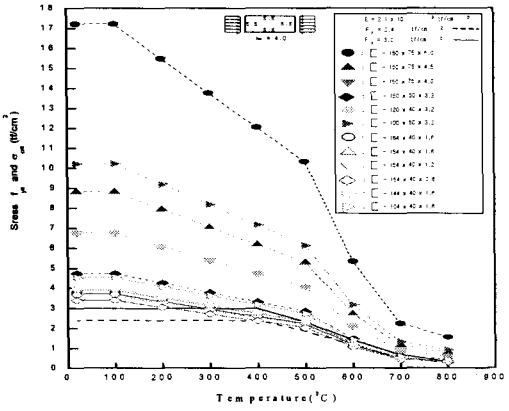
4. 해석 예 및 고찰

본 장의 해석 예에서 사용한 단경C-형강의 종류는 표 4와 표 5과 같고, 사용한 강재의 항복강도 값은 $F_y = 2.4tf/cm^2$와 $F_y = 3.0tf/cm^2$, 탄성계수 값은 $E = 2.1 \times 10^3 tf/cm^2$이고, 온도분포는 등분포되었다고 가정하였고, 단부지지조건

이 단순지지일 일 때에 대한 본 연구의 국부좌굴 해석 프로그램에 의한 해석결과는 그림 4와 그림5 및 표 4와 표 5와 같다.

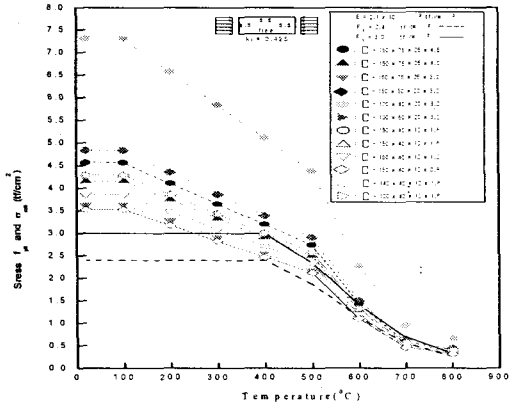


(a) 플랜지

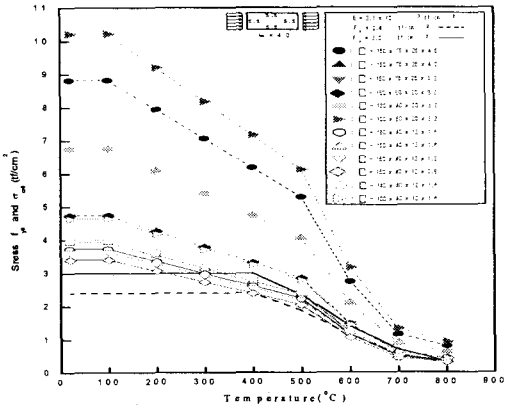


(b) 웨브

<그림 4> 온도증가에 따른 등분포 압축 하중을 받는 단경C-형강 기둥의 탄성국부좌굴 및 항복응력 관계



(a) 플랜지



(b) 웨브

<그림 5> 온도증가에 따른 등분포 압축 하중을 받는 단립C-형강 기둥의 탄성국부좌굴 및 항복응력 관계

<표 4> 온도상승에 따른 등분포 압축을 받는 냉간 성형 단경C-형강의 임계온도의 결과

F_y (tf/cm^2)	단면치수 DxBxt (mm)	유효폭 b_{eff} (mm)		$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)		$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2)		Critical Temperature (℃)	
		플랜지 (b_e)	웨브 (h_e)	플랜지	웨브	플랜지	웨브	플랜지	웨브
2.4	[- 150x75x6.0	63.00	126.0	1.50	1.50	3.33	7.83	-	-
	[- 150x75x4.5	59.81	132.0	1.50	1.50	2.08	4.01	-	-
	[- 150x75x4.0	55.67	134.0	0.58	1.50	0.57	3.08	-	-
	[- 150x50x3.2	41.30	128.1	1.50	1.50	2.20	2.16	-	-
	[- 120x40x3.2	33.60	107.2	1.50	1.50	3.33	3.08	-	-
	[- 100x50x3.2	41.30	87.20	1.50	1.50	2.20	4.65	-	-
3.0	[- 184x40x1.6	21.93	72.32	1.64	3.00	1.64	2.99	575	293
	[- 154x40x1.6	21.93	70.62	1.64	3.00	1.64	2.99	575	331
	[- 154x40x1.2	17.34	54.91	3.00	3.00	2.99	2.99	324	273
	[- 154x40x0.8	12.09	37.83	3.00	3.00	2.99	2.99	251	217
	[- 144x40x1.6	21.93	69.88	1.64	3.00	1.64	2.99	575	347
	[- 104x40x1.6	21.93	65.39	1.64	1.41	1.64	1.40	575	600

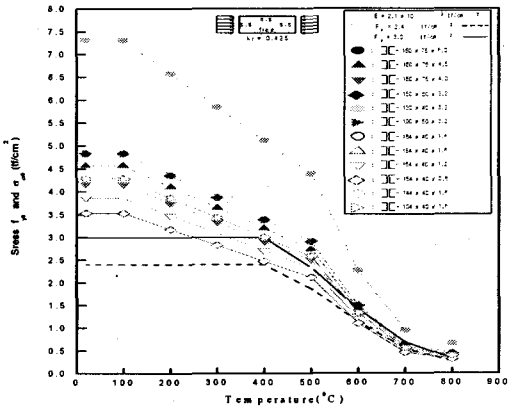
그림 4와 그림 5 및 표 4와 표 5에서 고온에서 등분포 열과 압축을 받는 항복강도가 $F_y = 2.4tf/cm^2$인 단경C-형강과 단립C-형강

기둥은 두께 t≥3.2으로써 항복파괴가 일어나고, 항복강도가 $F_y = 3.0tf/cm^2$인 기둥은 두께 t ≤1.6으로써 항복파괴 전에 국부좌굴이 일어남을 고찰할 수 있으며, 단경C-형강과 단립C-형강 모두 웨브 부분에서 주로 국부좌굴이 발생함을 고찰할 수 있고, 탄성국부좌굴에 대한 임계온도는 단경C-형강은 약 217℃~600℃, 단립C-형강은 약 220℃~625℃에서 일어남을 고찰할 수 있었다.

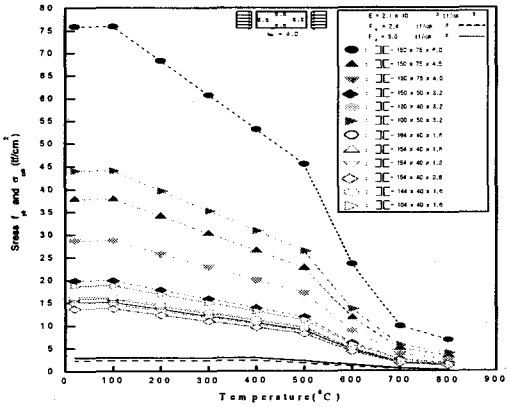
<표 5> 온도상승에 따른 등분포 압축을 받는 냉간 성형 단립C-형강의 임계온도의 결과

F_y (tf/cm^2)	단면치수 DxBxt (mm)	유효폭 b_{eff}(mm)		$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)		$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2)		Critical Temperature (℃)	
		플랜지 (b_e)	웨브 (h_e)	플랜지	웨브	플랜지	웨브	플랜지	웨브
2.4	[-150x75x25x4.5	57.00	132.0	1.50	1.50	2.69	4.02	-	-
	[-150x75x25x4.0	55.95	134.0	1.50	1.50	2.21	3.08	-	-
	[-150x75x25x3.2	49.31	128.1	0.68	1.50	0.67	2.16	-	-
	[-150x50x20x3.2	37.20	128.1	1.50	1.50	8.49	2.15	-	-
	[-120x40x20x3.2	27.20	107.2	1.50	1.50	15.9	3.08	-	
	[-100x50x20x3.2	37.20	87.2	1.50	1.50	8.49	4.65	-	-
3.0	[-180x40x12x1.6	22.60	72.12	1.06	3.00	1.06	2.99	648	298
	[-150x40x12x1.6	22.60	70.34	1.06	3.00	1.06	2.99	648	337
	[-150x40x12x1.2	18.29	54.75	3.00	3.00	2.99	2.99	366	278
	[-150x40x12x0.8	12.90	37.76	3.00	3.00	2.99	2.99	278	220
	[-140x40x12x1.6	22.60	69.56	1.06	3.00	1.06	2.99	648	354
	[-100x40x12x1.6	22.60	64.72	1.06	1.23	1.06	1.22	648	625

그리고 복경C-형강 기둥의 종류는 표 7과 표 8과 같고 탄성계수 값은 $E = 2.1\times10^3\ tf/cm^2$이고, 항복강도는 $F_y = 2.4tf/cm^2$와 $F_y = 3.0tf/cm^2$이고, 단부지지조건은 단순지지일 일 때에 대한 본 연구의 국부좌굴 해석 프로그램에 의한 해석결과는 그림 7와 ~ 그림8 및 표 7~ 표 8과 같다.

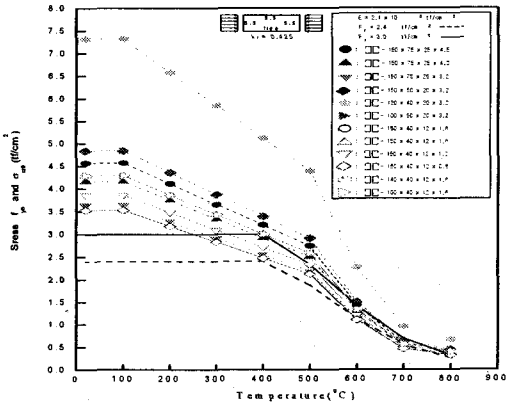


(a) 플랜지

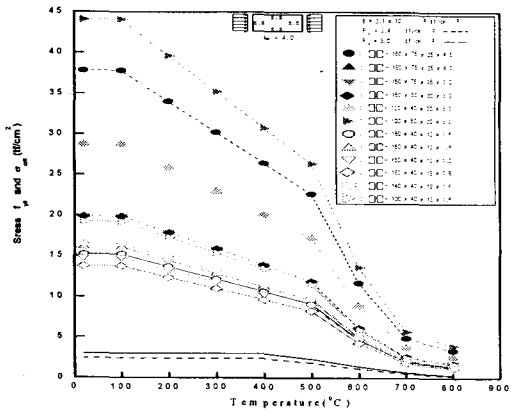


(b) 웨브

<그림 6> 온도증가에 따른 등분포 압축 하중을 받는 복경C-형강 기둥의 탄성국부좌굴 및 항복응력 관계



(a) 플랜지



(b) 웨브

<그림 7> 온도증가에 따른 등분포 압축 하중을 받는 복립C-형강 기둥의 탄성국부좌굴 및 항복응력 관계

<표 6> 온도상승에 따른 등분포 압축을 받는 냉간 성형 복경C-형강 기둥의 임계온도의 결과

F_y (tf/cm^2)	단면치수 DxBxt (mm)	유효폭 b_{eff}(mm)		$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)		$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2)		Critical Temperature (℃)	
		플랜지 (b_e)	웨브 (h_e)	플랜지	웨브	플랜지	웨브	플랜지	웨브
2.4	][- 150x75x6.0	63.00	120.0	1.50	1.50	3.33	34.55	-	-
	][- 150x75x4.5	59.81	127.5	1.50	1.50	2.08	17.21	-	-
	][- 150x75x4.0	55.67	130.0	0.58	1.50	0.57	13.08	-	-
	][- 150x50x3.2	41.30	125.1	1.50	1.50	2.20	9.05	-	-
	][- 120x40x3.2	33.60	104.0	1.50	1.50	3.33	13.08	-	-
	][- 100x50x3.2	41.30	84.0	1.50	1.50	2.20	20.05	-	-
3.0	][- 184x40x1.6	21.93	71.65	1.64	1.88	1.64	6.80	575	-
	][- 154x40x1.6	21.93	69.84	1.64	1.88	1.64	7.25	575	-
	][- 154x40x1.2	17.34	54.46	3.00	1.88	2.99	6.71	324	-
	][- 154x40x0.8	12.09	37.63	3.00	1.88	2.99	6.25	251	-
	][- 144x40x1.6	21.93	69.05	1.64	1.88	1.64	7.42	575	-
	][- 104x40x1.6	21.93	64.28	1.64	1.88	1.64	8.561	575	-

그림 6과 그림 7 및 표 6와 표 7에서 복경C-형강 기둥의 항복강도는 $F_y = 2.4tf/cm^2$일 때 모두 항복파괴가 일어남을 알 수 있고, $F_y = 3.0tf/cm^2$일 때는 모두 플랜지에서 t=1.6mm일 경우는 575℃에서,t=1.2mm인 경우는 324℃에서, t=0.8mm 일 때는 251℃에서 각각 탄성국부좌굴이 일어남을 알 수 있었다.

<표 7> 온도상승에 따른 등분포 압축을 받는 냉간 성형 복립C-형강 기둥의 임계온도 결과

F_y (tf/cm^2)	단면치수 DxBxt (mm)	유효폭 b_{eff}(mm)		$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)		$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2)		Critical Temperature (℃)	
		플랜지 (b_e)	웨브 (h_e)	플랜지	웨브	플랜지	웨브	플랜지	웨브
2.4	][-150x75x25x4.5	57.00	127.5	1.50	1.50	2.69	17.20	-	-
	][-150x75x25x4.0	55.95	130.0	1.50	1.50	2.21	13.08	-	-
	][-150x75x25x3.2	49.31	125.1	0.67	1.50	0.67	9.05	-	-
	][-150x50x20x3.2	37.20	125.1	1.50	1.50	8.49	9.05	-	-
	][-120x40x20x3.2	27.20	104.0	1.50	1.50	15.9	13.09	-	-
	][-100x50x20x3.2	37.20	84.0	1.50	1.50	8.49	20.05	-	-
3.0	][-180x40x12x1.6	22.60	71.45	1.06	1.88	1.06	6.93	648	-
	][-150x40x12x1.6	22.60	69.54	1.06	1.88	1.06	7.32	648	-
	][-150x40x12x1.2	18.29	54.29	3.00	1.88	2.99	6.75	366	-
	][-150x40x12x0.8	12.90	37.55	3.00	1.88	2.99	6.27	278	-
	][-140x40x12x1.6	22.60	68.71	1.06	1.88	1.06	7.49	648	-
	][-100x40x12x1.6	22.60	63.58	1.06	1.88	1.06	8.75	648	-

*. 단 표4~표7에서 국부좌굴이 발생하지 않은 냉간성형 C-형강 기둥는 550℃에서의 탄성국부좌굴 및 항복응력값을 표시함.

또한 복립C-형강부재는 $F_y = 2.4tf/cm^2$일 때는 모두 항복파괴가 $F_y = 3.0tf/cm^2$일 때는 모두 플랜지에서 t=1.6mm경우는 648℃에서, t=1.2mm 경우는 366℃에서, t=0.8mm 경우는 278℃에서 각각 탄성국부좌굴이 일어남을 알 수 있었다.

그리고 전체좌굴응력과 항복응력과의 관계를 해석한 해석모델은 표 8과 표 9과 같으며, 부재의 길이는 120cm로 하여 양단 단순지지($K = 1.0$)일 때로 냉간성형C-형강기둥의 약축(i_y)에 대하여 해석하였다. 상온에서의 탄성계수와 항복강도, 온도증가에 따른 탄성계수와 항복강도의 변화는 탄성국부좌굴 해석 예와 동일하며, 해석결과는 표 8과 표 9에 요약하였다.

<표 8> 온도증가에 따른 등분포압축하중을 받는 냉간성형 경C-형강기둥의 탄성전체좌굴과 항복응력 및 임계와 항복파괴온도결과 (양단단순지지)

(a) 단경C-형강

F_y (tf/cm^2)	단면치수 (mm)	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 플랜지	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 웨브	$\sigma_{o\theta}$ (tf/cm^2)	$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)	임계온도 (℃) 플랜지	임계온도 (℃) 웨브	임계온도 (℃) 전체	항복파괴온도 (℃)	판정
2.4	[- 150x75x6.0	3.33	7.83	5.11	1.50	-	-	-	701	항복
	[- 150x75x4.5	2.08	4.01	3.64	1.50	-	-	-	702	항복
	[- 150x75x4.0	0.57	3.08	3.64	1.50	-	-	-	702	항복
	[- 150x50x3.2	2.20	2.16	2.39	2.40	-	-	339	703	전체
	[- 120x40x3.2	3.33	3.08	2.00	2.40	-	-	20	806	전체
	[- 100x50x3.2	2.20	4.65	1.19	1.19	-	-	591	701	전체
3.0	[- 184x40x1.6	1.64	2.99	1.74	3.00	575	293	20	720	전체
	[- 154x40x1.6	1.64	2.99	1.87	3.00	575	331	20	707	전체
	[- 154x40x1.2	2.99	2.99	1.90	3.00	324	273	20	708	전체
	[- 154x40x0.8	2.99	2.99	1.93	3.00	251	217	20	709	전체
	[- 144x40x1.6	1.64	2.99	1.93	3.00	575	347	20	709	전체
	[- 104x40x1.6	1.64	1.40	2.17	3.00	575	600	20	859	전체

(b) 복립C-형강

F_y (tf/cm^2)	단면치수 (mm)	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 플랜지	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 웨브	$\sigma_{o\theta}$ (tf/cm^2)	$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)	임계온도 (℃) 플랜지	임계온도 (℃) 웨브	임계온도 (℃) 전체	항복파괴온도 (℃)	판정
2.4	][- 150x75x6.0	3.33	34.5	6.62	1.50	-	-	-	701	항복
	][- 150x75x4.5	2.08	17.2	6.49	1.50	-	-	-	701	항복
	][- 150x75x4.0	0.57	13.0	6.45	1.50	-	-	-	701	항복
	][- 150x50x3.2	2.20	9.05	2.29	1.50	-	-	-	703	항복
	][- 120x40x3.2	3.33	13.0	2.39	2.40	-	-	-	701	항복
	][- 100x50x3.2	2.20	20.0	2.88	1.50	-	-	-	701	항복
3.0	][- 184x40x1.6	1.64	6.80	2.39	3.00	575	-	20	826	전체
	][- 154x40x1.6	1.64	7.25	2.71	3.00	575	-	20	790	전체
	][- 154x40x1.2	2.99	6.71	2.70	3.00	324	-	20	790	전체
	][- 154x40x0.8	2.99	6.25	2.66	3.00	251	-	20	792	전체
	][- 144x40x1.6	1.64	7.42	2.82	3.00	575	-	20	781	전체
	][- 104x40x1.6	1.64	8.56	2.99	3.00	575	-	233	725	전체

<표 9> 온도증가에 따른 등분포압축하중을 받는 냉간성형 립C-형강기둥의 탄성전체좌굴과 항복응력과 임계와 항복파괴온도결과 (양단단순지지)

(a) 단립C-형강

F_y (tf/cm^2)	단면치수 (mm)	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 플랜지	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 웨브	$\sigma_{o\theta}$ (tf/cm^2)	$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)	임계온도 (℃) 플랜지	임계온도 (℃) 웨브	임계온도 (℃) 전체	항복파괴온도 (℃)	판정
2.4	[-150x75x25x4.5	2.69	4.02	4.95	1.50	-	-	-	701	항복
	[-150x75x25x4.0	2.21	3.08	5.02	1.50	-	-	-	702	항복
	[-150x75x25x3.2	0.67	2.16	5.20	1.50	-	-	-	701	항복
	[-150x50x20x3.2	8.49	2.15	2.14	1.50	-	-	-	702	항복
	[-120x40x20x3.2	15.8	3.08	2.39	2.40	-	-	-	701	항복
	[-100x50x20x3.2	8.49	4.65	2.29	1.50	-	-	-	703	항복
3.0	[-180x40x12x1.6	1.06	2.99	2.54	3.00	648	298	20	800	전체
	[-150x40x12x1.6	1.06	2.99	2.70	3.00	648	337	20	790	전체
	[-150x40x12x1.2	2.99	2.99	2.82	3.00	366	278	20	781	전체
	[-150x40x12x0.8	2.99	2.99	2.90	3.00	278	220	20	775	전체
	[-140x40x12x1.6	1.06	2.99	2.78	3.00	648	354	20	784	전체
	[-100x40x12x1.6	1.06	1.22	2.99	3.00	648	625	109	766	전체

(b) 복립C-형강

F_y (tf/cm^2)	단면치수 (mm)	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 플랜지	$\sigma_{cr\theta}$ (tf/cm^2) 웨브	$\sigma_{o\theta}$ (tf/cm^2)	$f_{y\theta}$ (tf/cm^2)	임계온도 (℃) 플랜지	임계온도 (℃) 웨브	임계온도 (℃) 전체	항복파괴온도 (℃)	판정
2.4	][-150x75x25x4.5	2.69	17.2	9.55	1.50	-	-	-	701	항복
	][-150x75x25x4.0	2.21	13.0	9.65	1.50	-	-	-	701	항복
	][-150x75x25x3.2	0.67	9.05	9.80	1.50	-	-	-	701	항복
	][-150x50x20x3.2	8.49	9.05	3.70	1.50	-	-	-	701	항복
	][-120x40x20x3.2	15.8	13.0	2.56	1.50	-	-	-	706	항복
	][-100x50x20x3.2	8.49	20.0	4.56	1.50	-	-	-	701	항복
3.0	][-180x40x12x1.6	1.06	6.93	2.99	3.00	648	-	286	699	전체
	][-150x40x12x1.6	1.06	7.32	2.99	3.00	648	-	379	703	전체
	][-150x40x12x1.2	2.99	6.75	2.99	3.00	366	-	388	702	국부
	][-150x40x12x0.8	2.99	6.27	2.99	3.00	278	-	396	704	국부
	][-140x40x12x1.6	1.06	7.49	1.62	1.62	648	-	577	703	전체
	][-100x40x12x1.6	1.06	8.75	0.71	0.71	648	-	697	721	전체

*. 단 표8과 표9에서 항복은 항복파괴, 전체는 탄성전체좌굴, 국부는 탄성국부좌굴은 뜻함.

표 8과 표 9에 나타난 결과를 고찰하면 경C형강 기둥은

1) $F_y = 2.4tf/cm^2$일 경우

단경C-형강기둥 C-150x50x3.2, C-120x40x3.2 및 C-100x50x3.2는 각각 339℃, 상온, 591℃에서 항복파괴가 일어나기 전에 탄성전체좌굴이 발생하였고, 단경C-형강 기둥 C-150x75x6.0, C-150x75x4.5 및 C-150x75x4.0과 모든 복경C-형강 기둥은 탄성전체좌굴은 발생하지 않고 상온에서 항복파괴가 발생함을 또한 알 수 있었다

2) $F_y = 3.0tf/cm^2$일 경우

단경C-형강 기둥은 t≤1.6mm 부재로서 모든 기둥은 상온에서 항복파괴가 일어나기 전에 탄성전체좌굴이 발생함을 알 수 있었고, 복경C-형강 기둥 2C-104x40x1.6은 각각 233℃에서, 그 외 모든 기둥은 상온에서 항복파괴가 일어나기 전에 탄성전체좌굴이 발생함을 또한 알 수 있었다.그리고 립C형강 기둥은

1) $F_y = 2.4tf/cm^2$일 경우

단립C-형강 및 복립C-형강 기둥 모두가 t≥3.2mm인 부재로써 탄성전체좌굴은 발생하지 않고, 항복파괴가 일어나고 발생함을 알 수 있었다.

2) $F_y = 3.0tf/cm^2$일 경우

단립C-형강기둥의 두께가 t≤1.6mm인 기둥 7-100x40x12x1.6은 109℃에서 그 외 모든 기둥은 상온에서 항복파괴가 일어나기 전에 탄성전체좌굴이 발생함을 알 수 있었고, 복립C-형강은 286℃~697℃에서 항복파괴가 일어나기 전에 각각 탄성전체좌굴이 발생함을 알 수 있었다.

그리고 온도증가에 따른 등분포압축을 받는 냉간성형 단 및 복C-형강 기둥의 탄성전체좌굴은 단면회전이차반경이 큰 C-형강기둥일 경우 단경C-형강 기둥의 두께가 t≤3.2인 기둥의 임계온도는 약 20℃~591℃이고, 그 외 기둥은 탄성전체좌굴이 발생하지 않고, 단면회전이차반경이 적은 C-형강 기둥의 임계온도는 복립C-형강 기둥은 약 286℃~697℃이고, 그 외 C-형강 기둥은 대부분 상온에서 탄성전체 좌굴이 일어남을 고찰 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 화재로 인한 온도상승에 따른 등분포 열과 압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥의 탄성국부 및 전체좌굴응력을 EC3 Part 1.2와 EC3 Part 1.3의 관계식을 근거로 본 연구에서 개발한 프로그램으로 해석 예에 대한 해석 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구의 온도 증가에 따른 냉간성형 C-형강 기둥의 탄성국부 및 전체좌굴에 대한 파괴온도 해석결과는 Feng(2003) 등의 실험 및 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.
2. 온도증가에 따른 냉간성형 C-형강 기둥의 탄성국부좌굴은 단C-형강일 경우는 플랜지에서도 일어나지만 주로 웨브에서 일어나고, 복C-형강의 경우는 주로 플랜지에서 일어나며, 탄성국부좌굴은 국부좌굴계수와 플랜지와 웨브의 폭-두께비 및 재료의 성질에 주로 영향됨을 알 수 있었다.
3. 온도증가에 따른 등분포압축을 받는 냉간성형 C-형강 기둥은 항복파괴전에 탄성국부 및 전체좌굴이 일어남을 알 수 있었다. 항복강도 $F_y = 2.4tf/cm^2$일 경우는 일부 탄성전체좌굴이 일어나지만, 대부분 항복파괴가 일어났고, 항복강도 $F_y = 3.0tf/cm^2$일 경우는 전반적으로 항복파괴전에 탄성국부 및 전체좌굴이 일어남을 고찰할 수 있었다.
4. 온도증가에 따른 등분포압축을 받는 냉간성형 C-형강의 탄성국부좌굴은 국부좌굴계수, 플랜지와 웨브의 폭-두께비 및 항복강도에 탄성전체좌굴은 좌굴계수, 세장비 및 항복강도에 주로 영향됨을 또한 알 수 있었다.

이상과 같이 본 연구의 컴퓨터에 의한 Fire 해석으로 탄성국부좌굴 및 전체좌굴에 대한 임계온도를 예측할 수 있는 것은 화재실험 비용이 많이 소요되는 것을 고려하면 매우 중요하다.

참고문헌

1. Winter, G. (1947), "Strength of thin steel compression flanges", Transactions, ASCE, 112, pp.527-576.
2. Dewolf, J. T., T. Pedkoz, and G. Winter (1974), "Local and Overall Buckling of Cold-formed Members", ASCE, Vol.100, No. ST10,pp.2017-2036.
3. Hancock, G. J. (1978), "Local, Distortional and Lateral Buckling of I-Beams", Struct. Div., ASCE, 104(11), pp.1787-1798.
4. Olawale, A.O. and Plank, R.J. (1988), The collapse analysis of steel columns in fire using a finite strip method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 26.
5. Kalyanaraman, V. (1979), "Local buckling of cold-formed steel members", ASCE, Vol.105, No.ST5,, pp.813-828.
6. Uy, B. and Bradford, M.A. (1995), "Local Buckling of Cold Formed Steel in Composite Structural Elements at Elevated Temperatures", Journal of Constructional Steel Research, 34.
7. Feng M., Y.C. Wang, J.M. Davies (2003), "Structural Behaviour of Cold-formed Thin-walled short Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part1 : Experiments", Thin-walled Structures 41.
8. Feng M., Y.C. Wang, J.M. Davies (2003), "Structural Behaviour of Cold-formed Thin-walled short Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part2 : Design Calculations and Numerical Analysis", Thin-walled Structures 41.
9. Eurocode 3 : Design of Steel Structures. Part 1.2: Structural Fire Design (2000b), Commission of the European Communities, Brussels.
10. Eurocode 3 : Design of Steel Structures. Part 1.3 (CEN1996) : General Rules, Supplementary Rules for Cold-formed Thin Gauge Members and Sheeting, Commission of the European Communities, Brussels.
11. Yu, W.W. (2000), "Cold-Formed Steel Design", John Wiley & Sons, Inc.
12. Ghersi, A., Landolfo, R. and Mazzolani, F.M. (2002), "Design of Metallic Cold-Formed Thin-Walled Members", London and New York.
13. AISI (1996), "Specification for the design of Cold-formed Steel Structural Members", 1996 ediion, Americal Iron and Steel Institute.
14. 장명웅, 강성덕, 강문명 (2003), "온도상승에 따른 Steel beam의 국부좌굴해석", 한국쉘·공간구조학회, Vol. 3, No. 1, pp. 69-75.
15. 대한건축학회 (1999), "냉간성형강 구조설계기준 및 해설", 대한건축학회.