

박스단면 고강도 트러스 기둥재의 좌굴거동

The Buckling Behavior of High-strength Steel Truss Columns with Box Section

장 갑 철*
Jang, Gab-Chul

장 경 호**
Chang, Kyong-Ho

요 약

최근, 건설되어지는 강구조물들의 장경간화 및 고층화로 인하여 고강도강재의 적용이 점차 요구되고 있다. 고강도강재는 적용구조물들을 공간 및 두께들 감소시킴으로써 외관성 및 경제성을 증가시킬수 있는 장점이 있다. 이러한 고강도 강재의 적용을 위해서는 좌굴에 대한 기준이 필요하나 현재 국내의 경우 이러한 좌굴에 관한 연구가 미흡하다.

이에 본 연구에서는 3차원 탄소성 유한변위 프로그램을 이용하여 고강도 박스단면 트러스 부재의 좌굴거동에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 고강도강재를 적용한 박스단면 트러스부재의 허용 압축응력에 대한 기준을 제안하였으며 그 적용성을 확인하였다. 그리고 고강도 트러스 부재의 설계에도 적용할 수 있음을 명확히 하였다.

Abstract

Recently, as steel structures become higher and more long-spanned, construction of high-strength steels is increasing gradually. Application of high-strength steel can be possible to make a more light and economic steel structures by reducing thickness and space. To apply a high-strength steel to structure, criteria of high-strength steel for buckling is required. However, current specification is not sufficient for criteria of high-strength steels.

In this paper, buckling behavior of high-strength steel truss columns with box sections is investigated by using three-dimensional elastic-plastic finite deformation analysis program. The criteria equation for allowable compressive stress of high-strength steel truss columns with box sections is proposed and confirmed the applicability. It is reasonable form analytical results that formulated equations after finding the upper limit of allowable axial direction compression stresses of high-strength steel truss columns. And new equation is suitable to buckling design of high-strength steel truss columns.

키워드 : 고강도 강재, 좌굴거동, 유한변위해석, 박스단면 트러스 부재

Keywords : High-Strength Steel, Buckling Behavior, Finite Deformation Analysis, Box Sections Truss Member

1. 서 론

교량이 장경간화 될 수록 대부분 강교량 형식이 채택되고 있다. 이것은 교량의 지간이 장대화 될 수록 고정하중의 경감을 위해 담금질 및 뜨임의 열처리를 통하여 입자의 조질화 및 세립화를 실시하여 높은 인장강도와 소정의 인성이 확보된 고강도강재의 사용이 불가피하다. 이와 같은 고강도강재의 적

용은 상부구조 및 하부구조의 경량화를 가져와 일반적인 용접구조용 강재를 사용한 경우와 비교하여 경제성을 도모할 수 있다. 또한, 최근 일반교량에서도 강교량의 합리화를 목적으로 주형의 단면적을 대형화시킨 2주형교를 경제성 및 시공성을 고려하여 적극적으로 도입되고 있는 추세이다. 이 교량형식은 주형의 개수를 최소화하는 대신 교량의 단면을 대형화시키므로 주형의 자중경감을 목적으로 고강도강의 사용을 적극적으로 추진할 수 있는 교량형식이다.

국내의 경우, 이러한 고강도강의 개발에 맞추어서

* 정희원·중앙대학교, 공학박사
Tel : 02-820-5337 Fax : 02-823-5337
E-mail : gabchul.jang@gmail.com

** 정희원·중앙대학교, 부교수

고강도강에 적합한 설계예나 설계기준등이 아직 마련되어지고 있지 않은 상황이다^{1,2)}. 국내에서 교량용 강재로서 규정되어 있는 고장력강은 인장강도 60kgf/mm²급의 용접구조용 압연강재(SM570) 및 용접구조용 내후성 열간 압연강재(SMA58) 까지이고 SM570강재보다 더 높은 인장강도를 갖는 POSTEN60, POSTEN80강재에 대해서는 아직 규정되어 있지 않은 상태이다^{3,4)}.

본 연구에서는 먼저, 3차원 유한요소 해석을 통해 고강도강을 적용한 박스단면 기둥부재의 좌굴거동에 대해 명확히 하였다. 그리고 현 도로교시방서 규정에 고강도강을 적용하여 적합성을 판단할 수 있는 규정식을 제안하였다

<표 2> 모델들의 경계조건

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
Upper	0	1	1	0	0	0
Lower	1	1	1	0	0	0

(1 : Fix , 0 : Free)

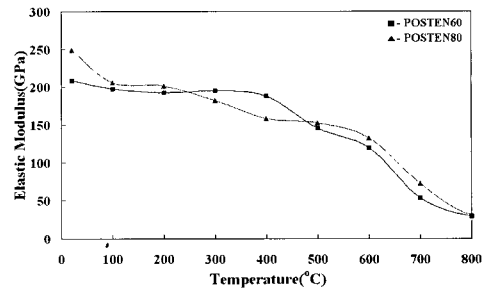
2. 해석조건 및 재료 특성

2.1 고강도강재의 역학적 특성

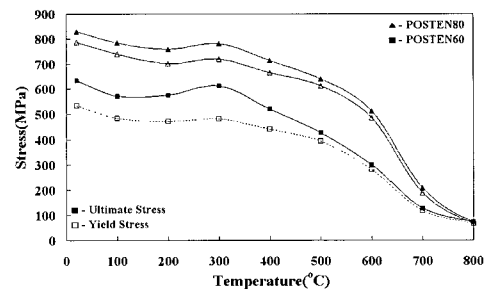
고강도강재의 고온에서의 강도저하 및 연신율은 <그림 1>에 나타내었다.

POSTEN60강재의 경우 인장강도는 구조용 강재와 같이 100℃까지는 완만하게 저하되다가 온도가 올라가면 청열취성으로 인해 인장강도가 증가하기 시작하여 300℃ 부근에서 최대치가 된 후 급격하게 작아지는 것을 알 수 있다. 반면에 POSTEN80 강재의 경우는 200℃ 까지 완만하게 인장강도가 저하되다가 온도가 올라가면 열취성으로 인해 인장강도가 증가하기 시작하여 300℃ 부근에서 최대치가 된 후 600℃ 까지 완만하게 감소함을 알 수 있다. 또한 POSTEN60과 POSTEN80의 항복강도는 감소의 저하경향이 인장강도와 비슷함을 알 수 있다.

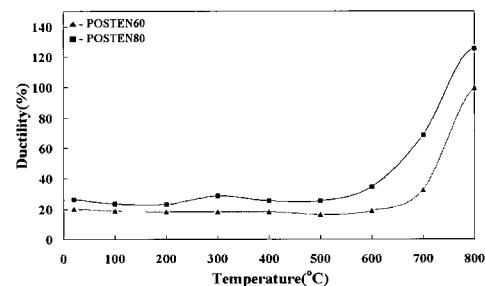
고강도강재의 고온인장에 따른 연신율은 POSTEN60, POSTEN80강재 모두 600℃ 이후에 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. <그림 1>은 고강도강재의 고온시의 탄성계수의 결과이다. POSTEN60 강재의 경우 400℃ 까지 완만하게 저하되다가 이후 급격히 감소함을 알



(a) 온도에 따른 탄성계수의 변화

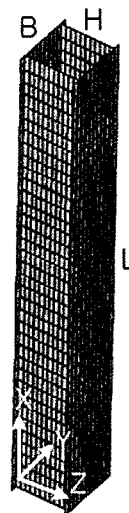


(b) 온도에 따른 항복 및 인장강도의 변화



(c) 온도에 따른 연신률의 변화

<그림 1> 온도에 따른 고강도강재의 역학적 특성



<그림 2> 해석모델

<표 1> 해석모델의 제원

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
H길이	440	440	440	440	440	440
B길이	500	500	500	500	500	500
H두께	20	20	20	20	8	10
B두께	20	20	20	20	8	10
L	5,000	7,160	9,000	11,000	9,000	9,000

	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10	Model 11	Model 12
H길이	440	440	440	440	440	440
B길이	500	500	500	500	500	500
H두께	12	16	25	40	65	100
B두께	12	16	25	40	65	100
L	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000

L : 부재전체 길이, 단위 : mm

수 있다. 반면에 POSTEN80강재의 경우 400°C 까지 급격히 감소하다가 온도가 다시 올라가면 600°C 까지 완만하게 저하된 후 다시 급격히 감소함을 알 수 있다.

2.2 수치해석 조건

본 연구에서는 <그림 2>에 나타난 것과 같은 박스단면 부재를 강종별로 유한요소 해석하였다. 모델 제원은 <표 1>에 나타내었다^{5,6)}.

축방향 등분포 압축변위를 재하하였으며 경계조건은 <표 2>와 같다. 초기변형은 최대 L/1000의 정형과 형태로 적용하였다.

각각의 모델은 2종류의 고강도강(POSTEN60, POSTEN80) 부재를 갖고 일반구조용 강부재해석과 동일한 조건에서 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 SM520 강재의 항복하중을 기준으로 같은 항복하중일때 POSTEN60, POSTEN80부재의 두께를 평가하였다. 즉, 각각 모델들의 SM520부재 유한요소해석후 얻어진 항복하중값을 이용하여 이 SM520의 항복하중값을 갖을때 부재두께를 구해 변화된 두께를 갖는 POSTEN60, POSTEN80을 유한요소해석을 수행하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 부재 길이 및 두께에 따른 좌굴특성

모델 1번부터 4번까지의 변수는 부재의 전체길이(L)이다. 그래프를 보면 최대내력에 도달한 후 그래프의 기울기가 4번 모델로 갈수록, 즉 부재의 길이가 길수록 급격해지는 것을 알 수 있다. 모델 5번부터 12번까지의 변수는 부재의 두께(t)이다.

얇은 부재두께를 갖는 모델5, 6, 7번의 그래프를 보면, 최대내력 도달후 급격한 내력저하를 보인다. POSTEN80은 부재두께 16mm 이상부터POSTEN60은 25mm이상부터 최대내력 도달 후 내력감소가 급격히 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

부재의 두께가 얇을수록 부재 전체가 좌굴하기 전에 국부적인 좌굴이 발생할 가능성이 있으며, 이는 부재 내력의 급격한 감소를 초래한다. 부재두께에 따른(모델 5~모델12) 하중-변위관계를 보면 부재의 두께가 두꺼워질수록 하중은 증가하지만 모델들의 변위는 거의 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

3.2 세장비에 따른 좌굴거동

3.2.1 길이변화에 따른 세장비

부재길이 변화에 따른 최대내력-세장비 관계를 나타내기 위해 모델 1번부터 4번까지를 비교하였다.

부재의 길이는 세장비에는 많은 영향을 미치는 반면 부재의 최대내력에는 큰 영향을 미치지 않는다. 위 그래프를 보면, 그래프의 기울기가 수평에 가까워 최대내력 값의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 두 강재 모두 모델 1이 모델 4보다 최대내력이 3% 증가하였다.

3.2.2 두께변화에 따른 세장비

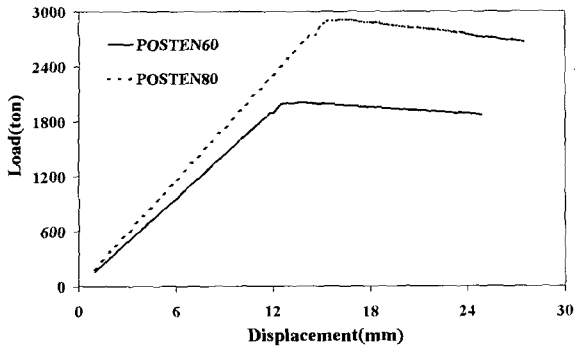
부재두께 변화에 따른 최대내력-세장비 관계를 나타내기 위해 모델 5번부터 12번까지를 비교하였다.

위의 부재의 길이변화에 따른 세장비와 비교한 결과 두께가 변해도 각 모델의 세장비의 차이는 미소함을 알 수 있다. 그러나 최대내력은 두께변화에 따른 영향은 미소하였다.

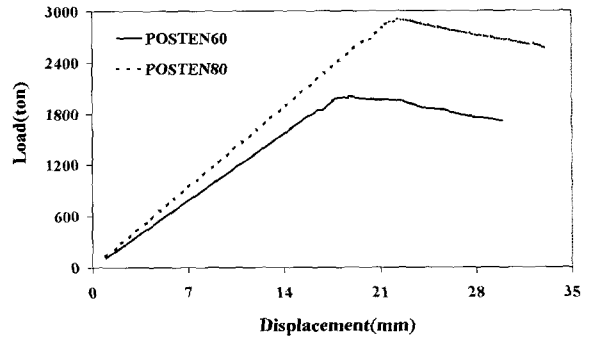
즉, 강도가 커질수록 부재두께가 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 두께가 두꺼워질수록 세장비는 작아지고, 최대내력의 크기는 커진다.

3.3 폭-두께비에 따른 좌굴거동

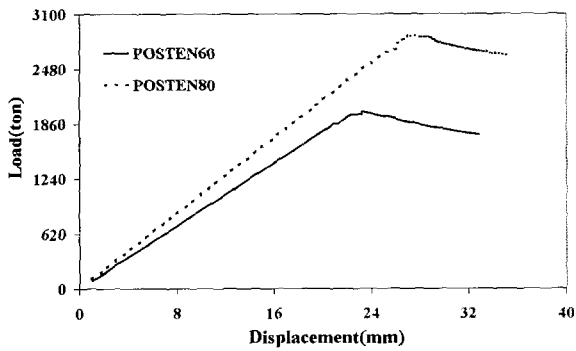
폭-두께비가 너무 크면 부재 전체가 좌굴하기 전에 국부적인 좌굴이 발생할 가능성이 있으며, 이는 기둥



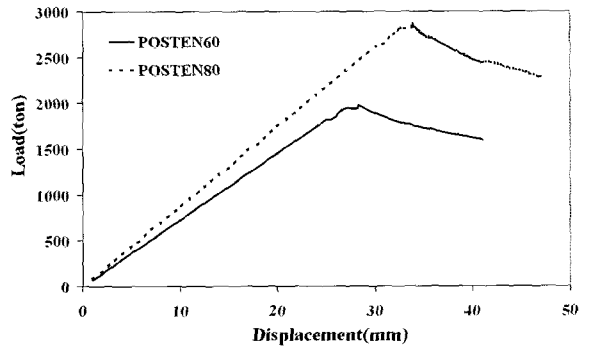
(a) Model 1 하중-변위곡선



(b) Model 2 하중-변위 곡선

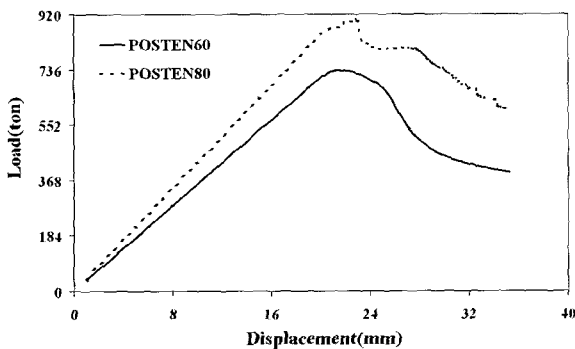


(c) Model 3 하중-변위 곡선

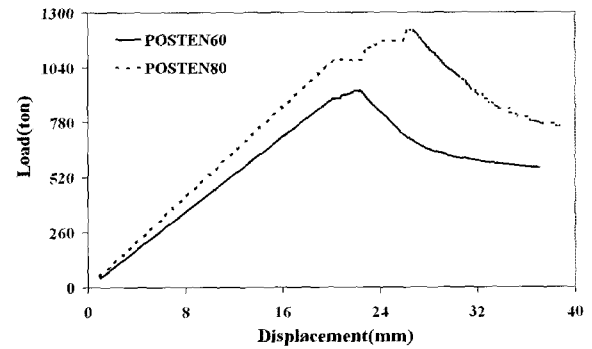


(d) Model 4 하중-변위 곡선

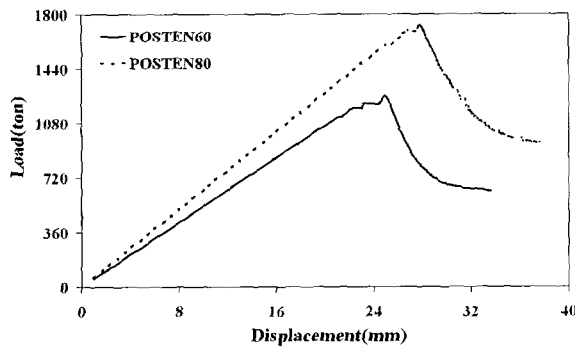
<그림 3> 길이에 따른 하중-변위



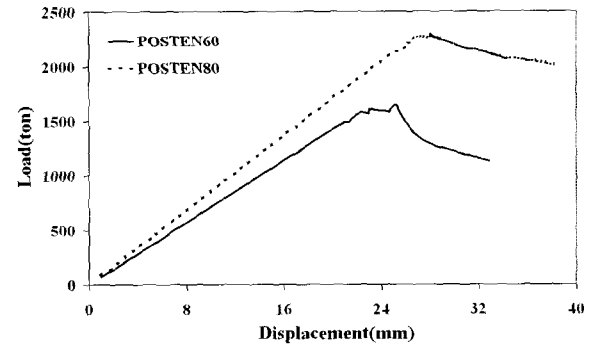
(a) Model 5 하중-변위 곡선



(b) Model 6 하중-변위 곡선

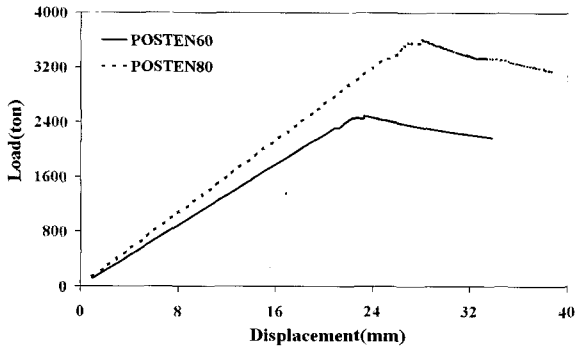


(c) Model 7 하중-변위 곡선

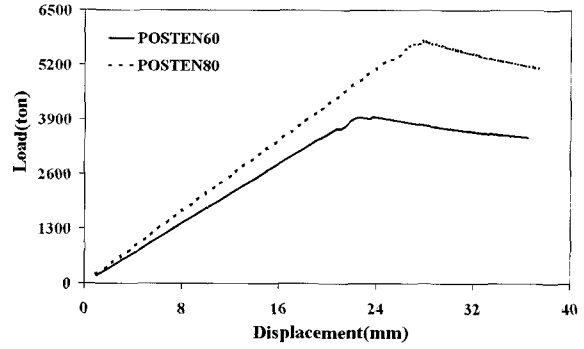


(d) Model 8 하중-변위 곡선

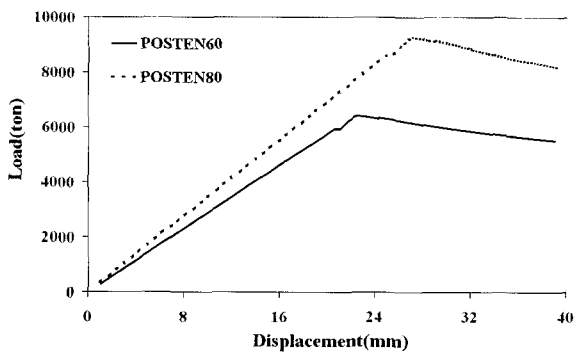
<그림 4> 두께에 따른 하중-변위 곡선(계속)



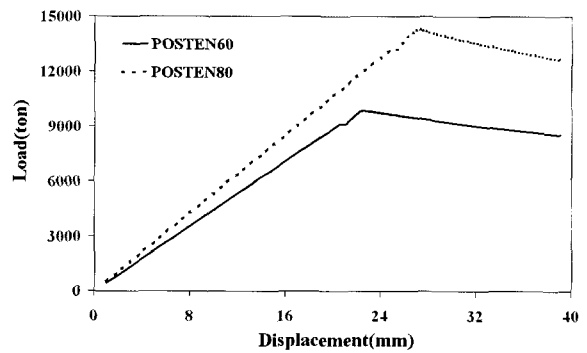
(e) Model 9 하중-변위 곡선



(f) Model 10 하중-변위 곡선

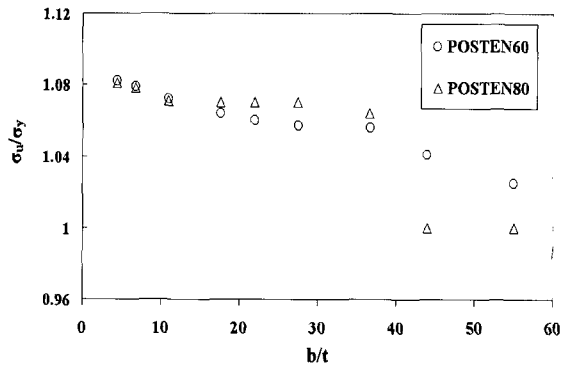


(g) Model 11 하중-변위 곡선

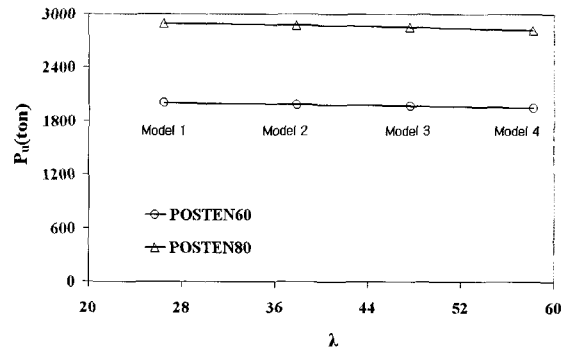


(h) Model 12 하중-변위 곡선

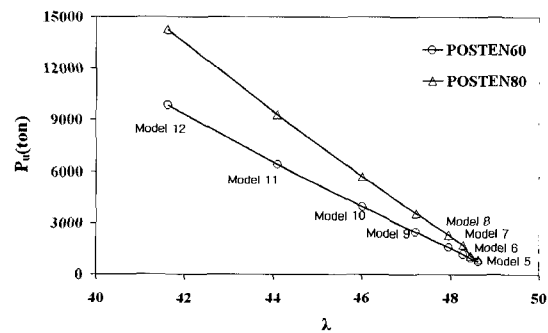
〈그림 4〉 두께에 따른 하중-변위 곡선



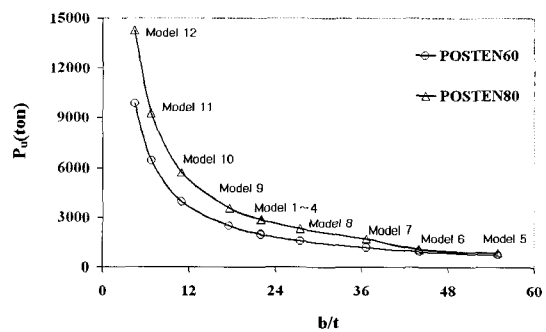
〈그림 5〉 내력비-b/t(폭-두께비) 그래프



〈그림 6〉 길이변화에 따른 최대내력-세장비



〈그림 7〉 두께변화에 따른 최대내력-세장비



〈그림 8〉 최대내력-b/t(폭-두께비) 그래프

의 내력 감소를 초래한다. 따라서 각 설계기준에서는 국부좌굴을 방지하기 위하여 폭-두께비를 제한하고 있다. 도로교설계기준에서는 POSTEN60, POSTEN80에 대한 폭-두께비 제한이 없으므로 AASHTO LRFD의 폭두께비 규정을 적용하였다.

다음은 LRFD의 축방향 압축부재의 폭-두께비 제한 규정이다.

장관단면의 두께는 다음을 만족시켜야 한다.

$$\textcircled{1} \text{ 원형강관} : \frac{D}{t} \leq 2.8 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

$$\textcircled{2} \text{ 사각형 강관} : \frac{b}{t} \leq 1.7 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

여기서,

D : 강관의 직경(mm)

b : 강관의 폭(mm)

t : 강관의 두께(mm)

3.3.1 폭-두께비에 따른 최대내력 비교

위의 LRFD규정(사각형 강관 두께 규정)에 따른 폭-두께비를 갖는 모델들의 최대내력을 나타내었다. 여기서 b 값은 해석모델의 H값이다.

모델의 폭-두께비가 작을수록 최대내력은 크게 나타난다. 또한 폭-두께비가 클수록 부재간의 최대내력 차이는 작아진다. 즉, 부재의 두께가 얇을수록 부재의 강도가 최대내력에 미치는 영향은 작아진다.

3.3.2 폭-두께비에 따른 최대내력 비교

최대응력을 항복응력으로 나누워 무차원화한 내력비와 폭-두께비의 관계를 나타내었다

폭-두께비가 증가할수록 내력비는 감소를 보이고 있다. 또한 폭-두께비가 감소할수록 부재간의 내력비차이는 감소한다. 부재의 두께가 가장 두꺼운 Model 12번은 POSTEN60, POSTEN80이 같은 내력비를 갖게 되는 것을 알 수 있다. 폭-두께비가 작아질수록 국부좌굴이 일어나 내력이 감소할 가능성이 적어진다.

4. 고강도강 좌굴에 대한 시방규정

국내 시방서에는 아직 고강도강(POSTEN60, POSTEN80)에 대한 규정은 없고, SM570까지만 규정되어져 있다. 하지만, 일본은 혼슈-시코쿠 연락교 공단 상부구조 설계기준(1989)에 공단 자체규격인 HT70, HT80에 대한 규정이 규정되어져 있다.

POSTEN80은 HT80과 기계적 성질이 일치한다. 하지만, POSTEN60은 HT70보다 인장강도가 더 낮아 HT70의 규정식에 적용할 수가 없다. 또한 국내 도로교 설계기준에 규정된 SM570보다는 POSTEN60의 인장강도가 더 높아 SM570의 규정식에 적용하면 허용치보다 높은 값을 나타낸다. 따라서, POSTEN60의 허용축방향 압축응력식이 필요하다.

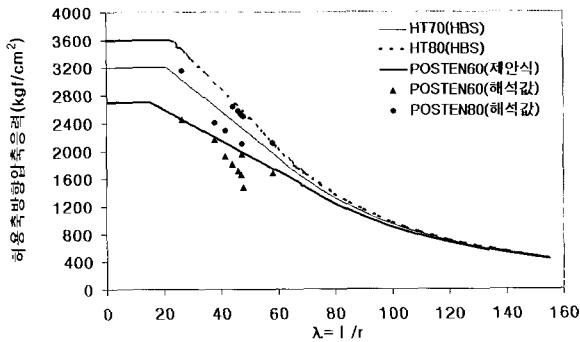
POSTEN60의 제안식을 도출하기 위하여 안전율은 1.8을 사용하였다. f_y 는 항복응력이다.

$$\begin{aligned} f_{\alpha} &= \frac{\bar{f} \cdot f_y}{1.8} = \frac{4913}{1.8} (1.109 - 0.545\lambda) \\ &= 3026.95 - 22.31 \frac{l}{r} \approx 2700 - 22 \left(\frac{l}{r} - 15 \right) (\text{kgf/cm}^2) \\ \lambda &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{482}{208426.4}} \cdot \frac{l}{r} = 0.015 \frac{l}{r} \end{aligned}$$

시방서에 규정된 허용축방향압축응력의 상한값은 항복응력을 안전율로 나눈값이다. 제안식의 상한값(2,700(kgf/cm²))도 이 원리를 따른다.

$$\begin{aligned} f_{\alpha} &= \frac{\bar{f} \cdot f_y}{1.8} = \frac{4913}{1.8} \cdot \frac{1.0}{0.773 + \frac{1}{\pi^2} \frac{f_y}{E} \left(\frac{l}{r} \right)^2} \\ &\approx \frac{12000000}{3300 + \left(\frac{l}{r} \right)^2} \\ &= \frac{2729}{0.773 + 0.000234 \left(\frac{l}{r} \right)^2} \approx \frac{12000000}{3300 + \left(\frac{l}{r} \right)^2} \\ 1 &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{482}{208426.4}} \cdot \frac{l}{r} \\ \frac{l}{r} &= \frac{1}{0.015} = 66.67 = 67 \end{aligned}$$

따라서, POSTEN60의 제안식은



<그림 9> 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향 압축응력

$$2,700 : \frac{l}{r} \leq 15$$

$$2,700 - 22\left(\frac{l}{r} - 15\right) : 15 < \frac{l}{r} \leq 67$$

$$\frac{12,000,000}{3,300 + \left(\frac{l}{r}\right)^2} : \frac{l}{r} > 67$$

여기서, $\frac{l}{r}$ 는 세장비이다.

이 제안식에 의한 그래프를 HT70, HT80, 그래프와 비교하고, 제안식의 적합성을 <그림 9>에 나타내었다.

POSTEN60 제안식의 허용압축응력 상한값은 HT70 보다 낮은 2,700kg/cm²이고, 제안식에 의한 그래프는 위와 같이 나타난다. 또한, 본 연구에 모델들의 값들은 상한 값보다 이하 값을 가져야 한다는 시방서 규정을 만족시킨다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석을 수행하여 고강도강의 좌굴거동과 국내 도로교 시방서에 규정되어있지 않은 POSTEN60의 허용 축방향 압축응력 식을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단면의 크기가 같고(폭-두께비 일정) 부재 전체 길이가 길어질때

1) 최대 내력에 도달 후 내력 감소가 급격히 일

어난다. 강도가 커질수록 내력감소량이 증가하는 일반 용접구조용강재에 비해 고강도강(POSTEN60, POSTEN80)은 강도에 관계없이 길이가 길어질수록 내력감소량을 나타내는 기울기(θ)값이 크다

2) 세장비가 커질수록 고강도강의 최대내력 값은 조금씩 감소해 그 차이는 약 3%로 부재 길이는 최대내력에 큰 영향을 미치지 않는다.

2. 부재 전체 길이가 일정하고 두께(t)가 8mm ≤ t ≤ 100mm로 증가할 때

1) 최대내력 도달후 내력변화량, 즉, 기울기의 크기는 일반 용접구조용강재가 부재두께에 따라 달라지는반면 고강도강재는 일정한 θ 값을 갖는다. 고강도강은 최대내력후 내력 감소가 두께에 영향을 받지않는다.

2) 세장비가 커질수록 고강도강의 최대내력 차이는 작다. 두께가 얇을수록 일반구조용강재와 고강도강의 최대내력차이는 작다.

3) 고강도강재는 두께 100mm의 최대내력이 16mm보다 526% 증가한다. 부재두께는 최대내력에 큰 영향을 미친다.

3. 폭-두께비가 클수록(두께가 얇을수록) 내력비는 작고, 폭-두께비가 작을수록 내력비는 크다.

4. 부재길이가 변할 때(모델1~4), 두께가 변할 때(모델8~12) 단면두께와 변위 변화는 아래와 같다.

모델 5,6,7의 변화된 고강도강의 단면두께는 폭-두께비 를 만족하지 않는다.

POSTEN60은 SM520의 두께 t가 16mm ≤ t ≤ 65mm일때 변위 감소율이 가장 좋다. 또 t가 100mm일때 변위 증가율이 가장 작다. 또 POSTEN80은 SM520의 두께 t가 40mm ≤ t ≤ 65mm일때 두께 감소율이 가장 좋고, 16mm일때 변위 증가량이 가장 작다. 고강도강은 SM520에 비해 단면두께는 줄일수 있으나 그에따른 변위 증가가 일어나 좌굴에 더 취약해 진다.

Models	POSTEN60	
	두께감소율(%)	변위증가율(%)
Model 1~4	20	23
Model 8	20	24
Model 9	20	24
Model 10	20	24
Model 11	20	24
Model 12	18	21

Models	POSTEN80	
	두께감소율(%)	변위증가율(%)
Model 1~4	44	46
Model 8	35	27
Model 9	45	49
Model 10	46	53
Model 11	46	52
Model 12	44	47

5. POSTEN60의 국부좌굴을 고려하지 않는 허용 축방향 압축응력 제안식은

$$2,700 : \frac{l}{r} \leq 15$$

$$2,700-22(\frac{l}{r}-15) : 15 < \frac{l}{r} \leq 67$$

$$\frac{12,000,000}{3,300+(\frac{l}{r})^2} : \frac{l}{r} > 67$$

POSTEN80은 HT80과 같다.

$$3,600 : \frac{l}{r} \leq 23$$

$$3,600-42(\frac{l}{r}-23) : 23 < \frac{l}{r} \leq 54$$

$$\frac{12,000,000}{2,300+(\frac{l}{r})^2} : 54 < \frac{l}{r}$$

참고문헌

1. 장경호, 이진형, 신영의 “고강도강재의 고온인장특성 및 용접시 잔류응력특징에 관한연구,” Journal of KWS. Vol.22 No.4 2004, pp.346-354
2. 대한토목학회, 도로교설계기준·해설, 2005
3. Alexander Chajes. Principles structural stability theory, 1974, pp. 1-74
4. 장승필, 박영석, 김남희, 강구조공학. 영지문화사, 2003, pp173-200
5. 이종관, “고장력강의 교량적용에 관해” 한국강구조학회지, 제 10권, 2호, 1998, pp39-48
6. 임정복, “강도강을 적용한 판형교의 보강재 설계에 관한연구,” 석사학위 논문. 중앙대학교, 2002