

국부좌굴을 고려한 건축구조용 고성능강(HSA800) 조립각형강관 압축재의 적용성 평가

유 정 한¹⁾ · 김 주 우^{2)*} · 양 재 근³⁾ · 강 주 원⁴⁾ · 이 동 우⁵⁾

¹⁾ 조교수, 서울과학기술대학교, 건축학부, 공학박사 ²⁾ 교수, 세명대학교, 건축공학과, 공학박사
³⁾ 교수, 인하대학교, 건축공학과, 공학박사 ⁴⁾ 교수, 영남대학교, 건축학부, 공학박사 ⁵⁾ 대표이사, 아이스트, 공학박사

Evaluation on Applicability of Built-up Square Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steel Considering Local Buckling

Yoo, Jung Han¹⁾ Kim, Joo Woo^{2)*} Yang, Jae Guen³⁾
Kang, Joo Won⁴⁾ Lee, Dong Woo⁵⁾

¹⁾ Assistant Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 139-743, Korea
²⁾ Professor, Dept. of Architectural Engineering, Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea
³⁾ Professor, Dept. of Architecture, Inha University, Incheon, 402-751, Korea
⁴⁾ Professor, School of Architecture, Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749, Korea
⁵⁾ Chairman & CEO, I'ST, Seoul, 135-933, Korea

ABSTRACT : Recently, high-performance steels have been increasingly used for structural materials in buildings and bridges with the demand for high-rise and long-span of main structures. This paper offers a series of basic study for the design specification of structural members using high performance steel, that is material properties of HSA800 (High-performance rolled steel for building structures). Built-up square tube stub columns with variables of width-to-thickness ratios are planned as a parametric study in order to investigate the local buckling behaviors and check the current design limit of width-to-thickness ratio. In addition, the buckling behaviors of stub columns obtained finite element (FE) analysis were compared with those from experimental tests. The verified FE model was used for parametric study and checked applicability of high-strength steel on current design specification.

KEYWORDS : high performance steel, width-to-thickness ratio, local buckling, stub column, built-up square tube

1. 서 론

건축물의 초고층화, 대형화 및 장스팬화에 따라 구조재료의 성능 증대에 대한 요구가 증가되고 있고, 이에 따라 고성능 재료의 건축물과 교량에의 적용이 시도되고 있다. 이런 사

회적 요구에 발맞추어 고성능강재의 개발이 활발히 진행되고 있다. 고강도(고성능) 강재를 건축물에 적용함으로써 구조부재의 콤팩트화, 부재크기의 축소, 건축물의 자중감소 등의 구조적인 장점과 더불어 부재크기 감소에 의한 자재의 비용절감, 운송, 양중 및 유효 공간 확보 등의 여러 측면에서 다양한 이점이 있다고 판단된다. 하지만 강재는 특성상 강도가 높아지면 항복점이 명확하지 않고, 항복비가 상승하여 연신율과 인성이 감소되기 때문에 강도의 증가와 함께 연신율 및 인성을 높여서 항복비를 낮추어야 하는 과제를 안고 있다⁽¹⁾.

국내외의 현행 설계기준(KBC2009⁽²⁾, AISC2010⁽³⁾)은 일반 강도의 강재를 전제로 이론 및 실험 연구를 통해 정립된 것이다. 고강도 강재는 일반 강도의 강재와 기계 및 물리

Note.-Discussion open until December 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 1, 2013; revised April 12, 2013; approved on May 29, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-43-649-1329 Fax. +82-43-649-1755
E-mail: jw_kim@semyung.ac.kr

적 특성의 차이가 있으므로 고강도 강재의 현행 설계 기준에의 적용성에 대한 검토가 반드시 필요하다^{(4),(5),(6)}.

고강도강에 대한 연구는 미국에서는 1960년부터 진행되어, ASTM에 A514(항복강도 690MPa, 평판두께 150mm까지)와 A709 Grade 100W(항복강도 690MPa, 평판두께 64mm, 교량용)의 강종이 개발되어 구조물에 사용되고 있고, 일본에서도 1970년대 초부터 관심을 갖기 시작하여 HT80(인장강도 780MPa), HT100(인장강도 950MPa), H-SA700(인장강도 780MPa) 등의 강종이 개발되어 시범적으로 사용되고 있다⁽⁷⁾. 국내에서는 1990년 초반에 POSTEN80(항복강도 680MPa)의 개발을 시작으로 해서, 2009년에 HSB800(교량구조용 압연강재⁽⁸⁾), 2011년 HSA 800(건축구조용 고성능 압연강재⁽⁹⁾) 강종이 개발되어 한국산업표준(KS)에 규정되었다. 최근 김도환 등⁽¹⁰⁾에 의해 HSA800 고강도강재의 소재성능평가에 관한 연구를 통해 HSA800은 KS규격을 모두 만족하는 강재로 강구조 관련 기준에 적용될 경우 건축구조의 시공성 및 제작성 뿐만 아니라 공사비 절감에도 기여할 것으로 기대하고 있다. 현재 건축물에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 아직까지 구조설계 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.

건축구조물에 고강도강의 적용에 대한 요구 증대로 SM 570 및 SM570TMC 강재로 용접 제작된 박스형 및 H형 단주 중심압축 실험을 실시하여 폭두께비와 세장변수가 압축 좌굴내력에 미치는 영향을 평가하였고, 현행 설계기준의 만족 여부를 조사하였다.^{(11),(12)} 최근에 이철호 등⁽¹³⁾에 의해 HSA 800 고강도강재의 단주 압축실험과 편심압축실험을 통해 얻어진 내력을 현행 강구조설계기준^{(2),(3)}의 설계강도와 비교를 하였고, 잔류응력이 항복강도에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 일부 실험체는 가력장치의 최대가력용량을 초과하여 중국상태(국부좌굴)에 도달되지 못하는 경우가 발생했지만, 모든 실험체는 현행설계기준의 요구강도를 만족하는 것으로 나타났다^{(5),(13)}. HSA800 고강도강재 부재의 성능에 대한 또 다른 연구로 유정한 등⁽¹⁴⁾과 김태수 등⁽¹⁵⁾에 의해 HSA 800 고성능강 소재의 단순인장시험을 통해 기계적 성질을 확인하고 조립H형강 과 조립각형강관 압축재의 중심압축실험을 실시하였고, 유한요소해석을 통한 결과값과 비교하였다. 예상한대로 모든 실험체는 현행설계기준의 요구강도를 만족하는 것으로 나타났으며 이러한 실험결과를 비교적 정확히 예측하는 유한요소모델을 제시하였다.

본 연구에서는 현행 강구조설계기준에서 고강도강재를 이용한 판요소에 대한 압축재로서의 적용성을 판단하는 것을 목적으로 한다. 고강도강재와 일반강재는 응력-변형률 관계가 서로 상당히 다르므로 비탄성국부좌굴 거동이 서로 상이할

수 있다^{(5),(6)}. 그러므로 일반강재의 응력-변형률 곡선에 기초를 하고 있는 현행 설계기준의 판요소의 국부좌굴 강도식을 고강도강재에 그대로 적용할 수 있는지의 여부를 평가하고자 한다.

2. 현행 강구조설계기준

조립H형부재를 구성하는 플레이트는 구속판 요소(웹브)와 비구속판 요소(플랜지)로 분류되고, 조립각형강관부재의 경우 4개의 모든 플레이트는 구속판 요소로 분류된다. 현행 강구조설계기준(KBC2009, AISC2010)에서 균일압축을 받는 조립부재에서 양쪽이 지지된 판요소의 경우 비조밀단면의 폭두께비 제한값(λ_r , 식 (1) 참조)을 기준으로 비조밀단면과 세장단면으로 구분된다. 세장요소로 구성되는 조립H형강의 경우, 구속판 요소와 비구속판 요소로 조합된 단면은 구속판 요소의 강도저감계수(Q_a , 식 (2) 참조)와 비구속판 요소의 강도저감계수(Q_s)를 모두 고려해서 산정한다($Q = Q_a \cdot Q_s$). 한편 세장한 구속판으로 구성된 각형강관의 경우, 구속판 요소의 강도저감계수(Q_a , 식 (2) 참조)만을 고려해서 산정한다. 단, 비조밀 단면이상인 경우 Q_a 와 Q_s 는 1.0으로 산정한다.

구속판 요소(조립H형 단면의 웹브나 조립각형강관 단면의 플레이트), 균일압축을 받는 조립부재에서 양쪽이 지지된 판요소의 비조밀단면 한계 폭두께비는

$$\lambda_r = \frac{b}{t} = 1.49 \sqrt{E/f} \quad (1)$$

구속판 요소의 강도저감계수(Q_a)는

$$Q_a = A_e/A \quad (2)$$

여기서, A_e = 감소된 유효폭(b_e)을 고려한 유효단면적이다.

$$b_e = b \quad (\lambda_r < 1.49 \sqrt{E/f}) \quad (3)$$

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0.34}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad (\lambda_r \geq 1.49 \sqrt{E/f}) \quad (4)$$

동일한 두께(t)의 구속판 요소의 경우, 식 (1)은 폭두께비(b/t)를 강도($\sqrt{E/f}$)로 무차원화($\lambda_w = \frac{b}{t} / \sqrt{\frac{E}{f}}$)하면,

식 (2)는 식 (2-1)로 나타낼 수 있으며, 식 (3)과 (4)는 각각 식 (3-1)과 (4-1)로 단순해진다.

$$Q_a = A_e/A = b_e/b \tag{2-1}$$

$$Q_a = 1 \quad (\lambda_w < 1.49) \tag{3-1}$$

$$Q_a = \frac{1.92}{\lambda_w} \left[1 - \frac{0.34}{\lambda_w} \right] \quad (\lambda_w \geq 1.49) \tag{4-1}$$

비구속판 요소(조립H형 단면의 플랜지)의 강도저감계수 (Q_s)는

$$Q_s = 1.0 \quad \lambda_f \leq 0.64 \tag{5}$$

$$Q_s = 1.415 - 0.65\lambda_f \quad 0.64 < \lambda_f \leq 1.17 \tag{6}$$

$$Q_s = \frac{0.90}{\lambda_f^2} \quad \lambda_f > 1.17 \tag{7}$$

여기서, 세장비 $\lambda_f = \frac{b_f}{t_f} / \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ 이고,

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{b_w/t_w}} \quad (0.35 < k_c \leq 0.76) \text{이다.}$$

세장단면은 단면에 작용하는 압축응력이 항복강도(F_y)에 도달하기 전에 판요소의 국부좌굴이 발생하므로 전체좌굴뿐 아니라 국부좌굴에 대한 영향도 고려해야 한다. 이 판요소의 국부좌굴에 의한 영향은 앞에서 언급한 강도저감계수(Q)를 사용해서 설명할 수 있고 이는 국부좌굴응력(F_{cr})과 항복강도(F_y) 사이의 비로 나타낼 수 있다.

3. 해석모델의 검증

3.1 단주 중심압축실험결과

압축재를 구성하는 판재의 폭두께비에 따른 국부좌굴 내력을 평가하고, 현행설계기준식의 적용여부를 평가하기 위해 고성능강 HSA800 강종으로 용접제작된 조립각형강관 단주에 대해 중심압축실험을 실시했다. 조립각형강관 단주실험체는 플레이트의 폭두께비(b/t)를 8, 13, 18, 23, 28로 설정하여 실험체를 결정하였다(Table 1 참조).

Table 1. Details of test specimens

Specimen	Size of section (mm)	Length (mm)	b/t	λ_r	P_y (kN)
SCB-HSA800-8	□-90x90x9	300	7.91 (NC*)	22.48	2236.44
SCB-HSA800-13	□-135x135x9	450	12.87 (NC)		3480.14
SCB-HSA800-18	□-180x180x9	600	17.82 (NC)		4723.84
SCB-HSA800-23	□-225x225x9	750	22.78 (S**)		5967.53
SCB-HSA800-28	□-270x270x9	800	27.74 (S**)		7211.23

* Noncompact; **Slender

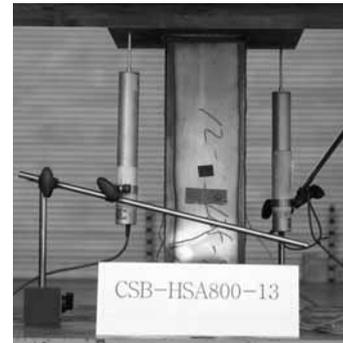
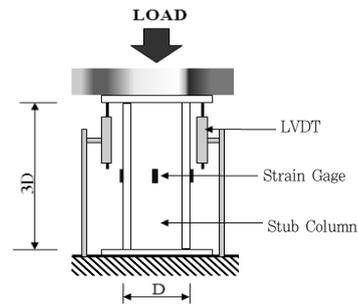


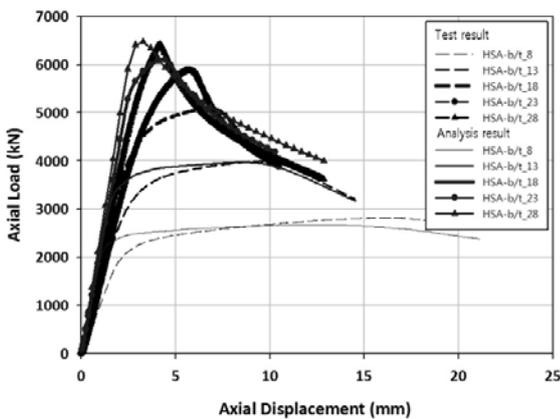
Fig. 1 Test Set-up

실험체의 재료시험결과에서 얻어진 HSA800의 항복강도 760.95MPa와 탄성계수 196.21GPa를 근거로 하여, 조립각형강관 실험체의 폭두께비가 7.91~17.82의 범위에 대해서는 비조밀단면이며, 폭두께비가 22.78과 27.74인 실험체가 세장단면으로 분류되었다. 실험체의 길이(L)는 비탄성좌굴을 유도하기 위한 단주실험체 제작을 위해 단면 최대폭(B) 또는 높이(H)의 2.96-3.33배로 계획하였다. 용접은 고성능강에 적합한 용접방법인 불활성가스 금속아크용접인 GMAW를 적용하며 불활성가스로서 Ar(알곤)가스를 사용하였고 용접봉은 스웨덴산 OK AristoRod 13.3로 하였다. 전형적인 단주 실험체의 설치상황을 Fig. 1에 나타냈다.

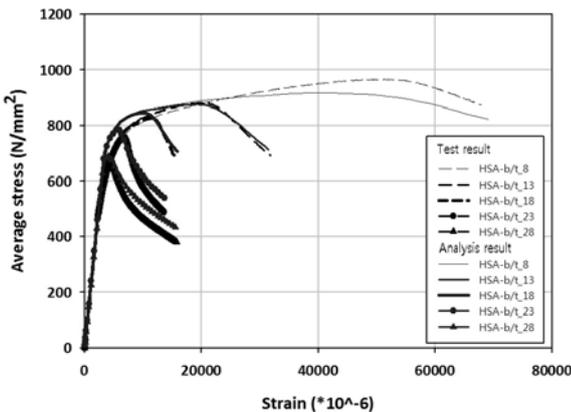
HSA800의 조립각형강관 단주 중심압축 실험은 RIST 강구조 연구소의 실험실에 설치되어 있는 10,000kN(약 1,000tf)

Table 2. Test results for built-up box section column

Specimen	Length (L, mm)	Area(Ag, mm ²)	Max. Compressive loads(PeMax, kN)	Max. Compressive stress(σ _e max, MPa)	Failure mode
SCB-HSA800-8	300	2939	2822	968	Weld fracture after upper local buckling
SCB-HSA800-13	450	4573	4000	882	Lower local buckling
SCB-HSA800-18	600	6208	5098	828	Weld fracture after mid-upper local buckling
SCB-HSA800-23	750	7842	5810	757	Weld fracture after mid-upper local buckling
SCB-HSA800-28	800	9477	6403	681	Weld fracture after center local buckling



(a) Axial load-axial displacement relationships



(b) Average stress-strain relationships

Fig. 2 Comparison of test and analysis results

UTM을 사용하여 실시하였다. 조립각형강관 단주 중심압축 실험결과 얻어진 실험최대압축하중(최대내력, P_{eMax}), 실험 최대평균응력(σ_{eMax}) 및 파단양상은 Table 2에 정리하였고, 폭두께비에 따른 축하중(P)-축변위(δ) 관계곡선과 평균응력(σ_e)-변형도(ϵ_e) 관계곡선은 Fig. 2(실험결과: 파선, 해석 결과: 실선)에 나타냈다.

3.2 해석결과 및 검증

유한요소 해석 프로그램인 ANSYS^[16]를 사용하여 3차원 모델링을 수행하였고, 비선형 좌굴해석을 통해 세장비와 폭두께비가 조립각형강관 기둥의 국부좌굴거동에 미치는 영향을 분석하고 실험치값과 비교 분석하였다. HSA800 강재의 응력-변형을 관계는 재료 인장시험 결과를 바탕으로 비선형 모델인 multi-linear kinematic hardening 모델을 사용했고, 국부좌굴을 시뮬레이션하기 위해 대변위 해석 (large deflection analysis)을 수행했다. 여기서 프와송비(ν)는 0.3, 항복조건은 von-Mises 이론을 적용하였다. 유한요소모델은 3-D solid 구조에 적절한 solid 185 요소를 모델 전체에 사용했다. Solid 185 요소는 각 노드에 3개의 자유도를 가지는 8 노드로 구성되어 있고, 재료적 비선형과 기하학적 비선형 해석이 가능하여 소성(plasticity), 고탄성(hyperelasticity), 강성보강(stress stiffening), 크리프(creep), 대변위(large deflection), 대변형률(large strain)의 특성을 반영한다. ANSYS에서의 solid 185 요소를 사용한 기둥의 해석모델은 Fig. 3(a)와 같으며, 여기서 기둥의 상단과 하단의 경계조건은 상부의 수직방향의 변위를 제외하고 모두 구속시켰다. 메쉬 사이즈는 해석의 정확도와 수렴을 위해 비교적 조밀한 크기(10mm x 10mm)로 결정했다. 선형 고유치 해석을 통해 얻은 첫 번째 변형된 좌굴 형상을 업데이트시켜 초기 결함 (Initial Imperfection, I.I.)을 지닌 모델로 만들어 비선형 좌굴 해석을 수행하였다.

실험결과와 해석결과와의 전체적인 비교(global level comparisons)로써 폭두께비에 따른 축하중-축변위 관계곡선과 평균응력-변형도 관계곡선을 Fig. 2에 나타냈고, 각각의 좌굴 하중의 실험결과와 해석결과를 Table 3에서 비교하였다.

결과에서 나타난 바와 같이 초기강성은 실험결과와 해석결과가 정확히 일치하였다. 최대하중은 해석값이 실험값보다 먼저 도달하였으나, 국부좌굴에 의해 하중이 급격하게 감소하는

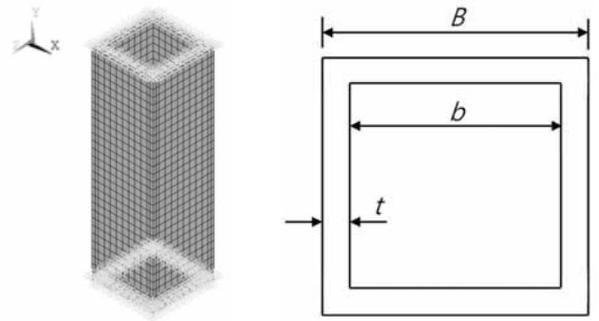
Table 3. Comparison of test and analysis results

Specimen	Buckling Loads:Pcr			λ [=L/r]
	Analysis (kN)	Test (kN)	Difference (%)	
SCB-HSA800-8	2,674	2,819	5.4	9.01
SCB-HSA800-13	3,972	3,997	0.6	8.71
SCB-HSA800-18	5,172	5,098	1.4	8.58
SCB-HSA800-23	6,095	5,889	3.4	8.50
SCB-HSA800-28	6,466	6,403	0.9	7.50

양상은 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 최대하중에 도달하는 시점이 다른 이유는 실험의 경우 잔류응력에 의해 강성이 감소해서 발생한 것으로 잔류응력은 해석모델에선 고려되지 않은 사항이었다. 일반적으로 실험체는 최대내력까지 탄성영역에서의 일정한 거동을 한 후, 항복강도 이후 최대좌굴강도까지 지속적인 강도의 증가가 나타났으며, 최대 내력점을 지나 국부좌굴이 발생하면서 급격하게 내력이 저하되는 현상이 나타났다. Table 3에서 보듯이 조립각형강관 단주의 좌굴하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평균오차는 약 2.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다.

4. 변수연구

해석모델로부터 얻어진 결과는 실험결과와의 비교, 해석모델의 검증, 그리고 검증된 모델을 이용하여 변수연구 수행에 사용된다. 3장의 실험결과는 조립각형강관의 폭두께비(b/t)가 28 경우를 제외한 모든 실험체가 비조밀단면에 해당하므로 세장단면의 경우에 대해 변수연구가 필요하다. 본 연구의 목적에 따라 변수는 조립각형강관의 폭두께비로 정했고 조립



(a) Typical FE model (b) Cross-section

Fig. 3 Typical FE Model and cross-Section

각형강관의 단면형상은 Fig. 3(b)에 나타났다. 플레이트의 폭두께비(b/t)를 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43(Table 4 참조)으로 설정하였고, 모델의 길이(L)는 비탄성좌굴을 유도하기 위한 단주실험체 제작을 위해 단면 최대폭(B) 또는 높이(H)의 3.5배로 계획하여 변수연구를 수행하였다. 또한 초기결함(Initial Imperfection, I.I.)에 따른 좌굴거동의 민감도를 조사하기 위한 연구도 수행하였다. 실험체명과 동일한 방법으로, 변수연구의 모델 명칭을 정하였다. 예를 들어, P-HSA800-8에서 P는 변수(Parameter)를, HSA800은 고성능강을, 8은 판폭두께비(b/t)를 의미한다.

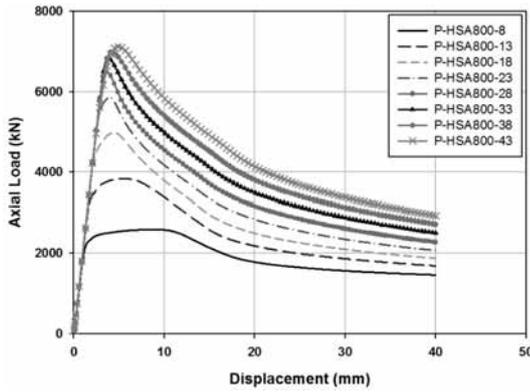
해석결과로 얻어진 평균응력(F_{cr})을 인장시편 실험에서 얻어진 항복강도(F_y)로 무차원화(F_{cr}/F_y)하여 현행설계기준^{(2),(3)}의 요구강도(Fig. 7에서 실선)와 비교하였다.

4.1 변수연구 결과

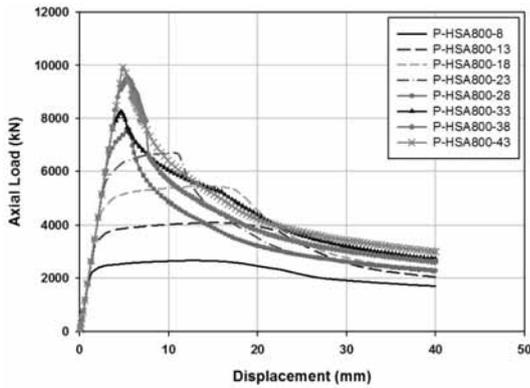
변수연구 결과 얻어진 최대압축하중($P_{e,Max}$)은 Table 4

Table 4. Test results for various parameters

Specimen	Length (L, mm)	Area (Ag, mm ²)	Amplification factor of initial imperfection(I.I)				Q_a	$\frac{F_{cr}}{F_y}$		$\frac{F_{cr}}{F_y}/Q_a$	
			Large I.I. (I.I.=1.0)		Small I.I. (I.I.=0.001)			Large I.I.	Small I.I.	Large I.I.	Small I.I.
			Max. Compressive loads (PeMax, kN)	Max. Compressive stress (oemax,MPa)	Max. Compressive loads (PeMax, kN)	Max. Compressive stress (oemax,MPa)					
P-HSA800-8	315	2916	2591	889	2675	917	1.00	1.17	1.21	1.17	1.21
P-HSA800-13	473	4536	3838	846	4097	903	1.00	1.11	1.19	1.11	1.19
P-HSA800-18	630	6156	4980	809	5454	886	1.00	1.06	1.16	1.06	1.16
P-HSA800-23	788	7776	5873	755	6706	862	1.00	0.99	1.13	0.99	1.13
P-HSA800-28	945	9396	6485	690	7582	807	0.89	0.91	1.06	1.02	1.19
P-HSA800-33	1103	11016	6833	620	8246	749	0.79	0.82	0.98	1.03	1.25
P-HSA800-38	1260	12636	6984	553	9520	753	0.70	0.73	0.99	1.04	1.41
P-HSA800-43	1418	14256	7118	499	9934	697	0.63	0.66	0.92	1.04	1.45

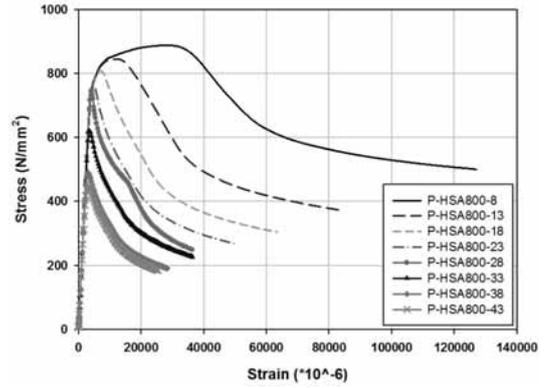


(a) Using large I.I.(I.I.=1.0) amplification factor

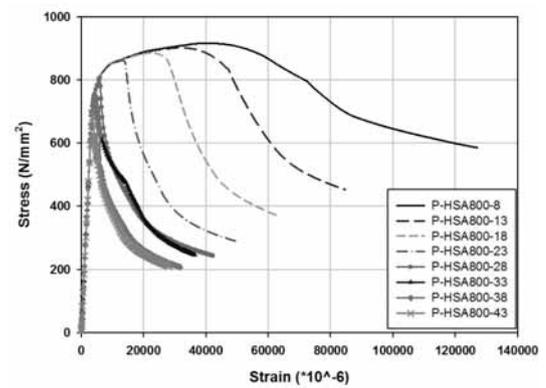


(b) Using small I.I.(I.I.=0.001) amplification factor

Fig. 4 Analysis results of parametric studies (Axial load-axial displacement relationships)



(a) Using large I.I.(I.I.=1.0) amplification factor



(b) Using small I.I.(I.I.=0.001) amplification factor

Fig. 5 Analysis results of parametric studies (Average stress-strain relationships)

에 정리하였고, 축하중(P)-축변위(δ) 관계곡선과 최대압축하중(P_{eMax})을 단면적(A_g)으로 나눈 평균응력(σ)-변형도(ϵ) 관계곡선은 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4의 축하중-축변위 관계 곡선으로부터 조립각형강관 모델의 폭두께비가 증가하는 경우 최대내력에 도달한 후 국부좌굴에 의해 내력이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Table 4에서 보듯이 동일 두께($t=9\text{mm}$)하에서 모델의 폭두께비가 증가함에 따라(동시에 단면크기도 증가), 최대압축하중은 증가하는 경향을 보였다. 반면에 최대압축하중을 단면적으로 나눈 최대 평균응력은 폭두께비가 증가함에 따라 감소하였다(Fig. 5과 Table 4 참조). 이는 폭두께비가 작을수록 판의 국부좌굴 발생 전에 외부하중에 대해 전단면이 충분히 저항하여 단면의 대부분이 재료의 항복강도 이상까지 저항한다는 것을 나타낸다. 현행설계기준의 요구강도와 비교한 결과, 모든 모델에서 요구강도를 상회하는 결과($\frac{F_{cr}}{F_y}/Q_a$, 초기결함이 큰 경우와 작은 경우 각각 평균 6%, 25%)를 보여주었다.(Table 4 참조)

해석이 종료된 시점(축변위=40mm)에서의 좌굴형상과 응

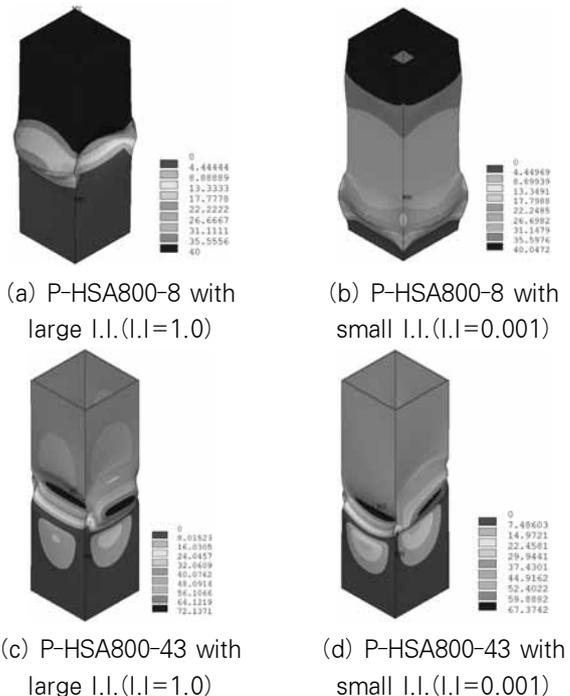


Fig. 6 Comparison of typical local buckling modes & stress distribution

력분포는 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 나타남과 같이, 폭두께비가 작은모델(P-HSA800-8) 중 초기결합이 작은 (I.I.=0.001) 경우를 제외하곤 박스형 단주의 전형적인 형태로 국부좌굴이 발생했다. 즉, 대부분의 모델이 모델 길이의 반(L/2)인 위치에서 강관의 안쪽방향 좌굴과 바깥방향 좌굴이 동시에 발생하는 국부좌굴이 발생했고, 폭두께비가 작은 모델 중 초기결합이 작은 경우에만 콘크리트 충전강관처럼 중앙부가 아닌 단부로부터 가까운 곳에서 국부좌굴이 발생했다.

4.2 초기결합의 민감도

기하학적으로 대칭인 해석 모델을 ANSYS⁽¹⁶⁾로 모델링하려면 비선형해석에 사용하기 위한 초기결합(I.I.)을 생성해야 하고 이는 선형좌굴해석으로부터 얻은 좌굴형상을 이용한다. 그런데 초기결합에 따른 좌굴거동의 민감성에 대한 기존 연구 결과,^{(17),(18)} 좌굴하중은 초기결합의 정도에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었고 특히 증폭계수를 감소시켰을 때 최대하중은 증가함을 알 수 있었다. 본 연구의 경우, 초기결합의 민감도를 조사하기 위해 판의 세장비가 한계세장비 이상($\lambda > \lambda_r$)의 변수에 대해서 초기결합(I.I.)의 크기를 달리 하여 그 차이를 조사하였다.

Fig. 4와 Fig. 7 그리고 Table 4에서 보듯이, 초기결합의 증폭계수에 따른 최대압축하중의 비를 비교해 보면, 폭두께비가 증가함에 따른 최대내력의 차이가 점점 커지는 것 (3% → 28%)을 알 수 있다. 또한 초기결합의 증폭계수를 큰 값을 사용한 경우(I.I.=1.0), 현행설계기준의 요구강도에 근접한 결과를 얻었고, 초기결합의 증폭계수를 감소시켰을 경우(I.I.=0.001), 현행설계기준의 요구강도에 크게 상회하는 결과를 얻었다. 특히 이 현상은 폭두께비가 커질수록 더욱 두드러졌다.

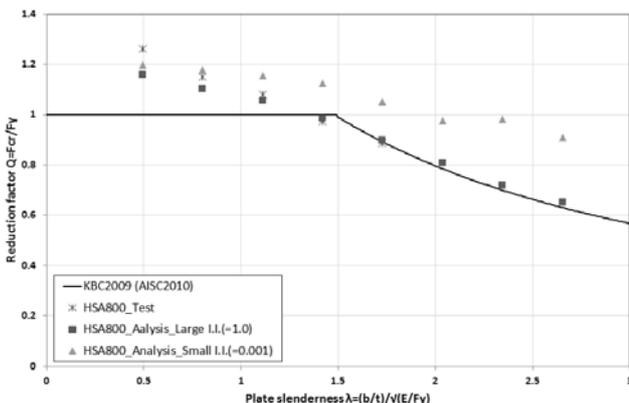


Fig. 7 Reduction factor(Q) for stiffened elements of built-up box column

Fig. 5와 Table 4에서 보듯이, 폭두께비가 증가함에 따라 평균응력-변형도 관계곡선으로 부터 모델의 최대평균응력의 일부는 재료의 항복강도(760.95MPa)를 상회하는 것을 알 수 있으며(초기결합을 크게한 경우, 폭두께비가 8, 13, 18인 모델과 초기결합을 작게한 경우, 폭두께비가 8, 13, 18, 23, 28인 모델), 일부는 재료의 항복강도(760.95MPa)보다 낮은 값에서 최대평균응력이 결정되는 것을 알 수 있다(초기결합을 크게한 경우, 폭두께비가 23, 28, 33, 38, 43인 모델과 초기결합을 작게한 경우, 폭두께비가 33, 38, 43인 모델). 또한 초기결합이 큰 경우는, 현행설계기준의 요구강도 값을 상회하는 결과($\frac{F_{cr}}{F_y}/Q_a$, 최대 17%)를 보여주었고, 초기결합이 작은 경우엔 현행설계기준의 요구강도 값을 크게 상회하는 결과($\frac{F_{cr}}{F_y}/Q_a$, 최대 45%)를 보여주었다(Table 4 참조).

5. 결 론

본 연구는 고성능강(HSA800) 조립각형강관 기둥의 폭두께비(b/t)와 국부좌굴의 관계를 알아보기 위한 연구로, 특히 세장한 단면의 경우에 대해 FE Model을 이용하여 변수연구가 수행하였다. 또한 초기결합에 따른 좌굴거동의 민감도도 조사하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 초기강성은 실험값과 해석값이 정확히 일치하였고 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 전체적인 비교 결과로써 좌굴하중의 평균오차가 약 2.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다.
- (2) 실험결과와 해석결과 비교에 의해 검증된 모델을 이용하여 변수연구 수행하였다. 변수연구 결과, 조립각형강관 모델의 폭두께비가 증가함에 최대내력에 도달한 후 국부좌굴에 의해 내력이 급격하게 저하됨을 알 수 있었다. 반면에 최대압축하중을 단면적으로 나눈 최대 평균응력은 폭두께비가 증가함에 따라 감소하였다. 또한, 모든 모델이 현행설계기준의 요구강도를 상회하는 결과를 보여주었다.
- (3) 초기결합에 따른 좌굴거동의 민감성에 대한 연구 결과, 좌굴하중은 초기결합의 정도에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었고 특히 증폭계수를 감소시켰을 때 최대하중

은 증가함을 알 수 있었다. 초기결합의 증폭계수를 달리 한 경우를 비교해 보면, 초기결합의 증폭계수를 큰 값을 사용한 경우(I.I.=1.0)에 현행설계기준의 요구강도에 더욱 근접한 결과를 얻었다.

- (4) 본 논문에서는 세장단면의 경우에 대한 초기결합의 민감도를 해석측면에서 조사하였다. 이를 뒷받침할 실험측면에서의 검증할 필요가 있다. 그리고 그 실험결과에 따라 현행설계기준의 요구강도에 상응할 수 있는 새로운 제안식의 필요 여부가 결정될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 R&D정책인프라사업(11기술표준화01-01)에 의한 고성능 강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기준 표준화의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌(References)

[1] 장호주, 유재희, 양영성(2003) 스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력 비교에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp. 561-570.
Jang, H.J., Yu, J.H., and Yang, Y.S. (2003) A Comparison Study on Strength of Stainless Steel Tube and Steel Tube Stub-columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 15, No. 5, pp.561-570. (in Korean)

[2] 대한건축학회(2009) 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2009) Architectural Institute of Korea(2009) *Korea Building Code and Commentary - Structural*.

[3] AISC (2010) *American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings*.

[4] 김종락 등(2011) 800MPa 고강도강 설계기준제정연구, 연구보고서, 한국강구조학회.
Kim, J.R. et al. (2011) *Research on Design Criteria of High-strength Steel*, Research Report, KSSC.

[5] Ramussen, K.J.R. and Hancock, G.J. (1992) Plate Slenderness Limits for High Strength Steel Sections, *Journal of Constructional Steel Research*, KSSC, Vol. 23, Issues 1-3, pp.73-96.

[6] Ricles, J.M., Sause, R., and Green, P.S. (1998) High-Strength Steel: Implications of Material and Geometric Characteristics on Inelastic Flexural Behavior, *Engineering Structures*, Vol. 20, Issues

4-6, pp.323-335.

[7] 정미영, 김진호, 이승은, 정경수, 하태휴(2010) 일본의 건축구조용 고강도 강재의 개발 및 적용 현황, 한국강구조학회 학술대회.
Jung, M.Y., Kim, J.H., Lee, S.E., Chung, K.S., and Ha, T.H. (2010) Current Development and Application of High-Strength Steel for Building Systems in Japan, *Proceedings of Annual Academic or Technical Conferences*. (in Korean)

[8] KS (2009) KS D 3868, 교량구조용 압연강재. KS(2009) KS D 3868, Rolled Steels For Bridge Structures.

[9] KS (2011) KS D 5994, 건축구조용 고성능 압연강재. KS(2011) KS D 5994, High-performance rolled Steel for building structures.

[10] 김도환, 이승은, 김진호, 하태휴, 유승호(2012) 건축구조용 고성능 강재 HSA800 소재 성능평가, 한국강구조학회 학술대회.
Kim, D.H., Lee, S.E., Kim, J.H., Ha, T.H., and Yu, S.H. (2012) Material Tests of the HSA800 - the High Performance Steel for Building Structures, *Proceedings of Annual Academic or Technical Conferences* (in Korean).

[11] 임성우, 고상기, 장인화(2001) 고장력(SM570) 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제13권, 제3호, pp.223-232.
Im, S.W., Ko, S.K., and Chang, I.H. (2001) A Study on the Characteristics of High Tensile Strength Steel(SM570) Plates in Compression Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 13, No. 3, pp.223-232. (in Korean)

[12] 임성우, 김요숙, 장인화(2005) SM570TMC 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제3호, pp.357-363.
Im, S.W., Kim, Y.S., and Chang, I.W. (2005) A Study on the Characteristics of SM570TMC Plates in Compression Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 17, No. 3, pp.357-363 (in Korean).

[13] 이철호, 김대경, 한규홍, 김진호, 이승은, 하태휴(2012) 고강도강재 단주의 압축강도 및 잔류응력 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.23-34.
Lee, C.H., Kim, D.K., Han, K.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Ha, T.H. (2012) Compressive Strength and Residual Stress Evaluation of Stub Columns Fabricated of High Strength Steel,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 1, pp.23-34 (in Korean).
- [14] 김태수, 이명재, 오영석, 이강민, 김도환(2012) 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 H형강 기둥의 압축강도에 관한 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제24권, 6호, pp.627-636.
Kim, T.S., Lee, M.J., Oh, Y.S., Lee, K.M., and Kim, D.H. (2012) A Study on Compressive Strength of Built-up H Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 6, pp.627-636. (in Korean)
- [15] 유정환, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2012) 중심 압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 각형강관 압축재의 구조거동, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.435-442.
Yoo, J.H., Kim, J.W., Yang, J.K., Kang, J.W., and Lee, D.W. (2012) Structural Behaviors of Built-up Square Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steels under Concentric Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 4, pp.435-442 (in Korean).
- [16] ANSYS (2011) *ANSYS multiphysics*, Version 13.0 ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA.
- [17] 전승문, 홍창선(1988) 초기 결함을 고려한 복합적층 원통형 패널의 좌굴거동, *한국항공우주학회지*, 한국항공우주학회, 제16권, 제4호, pp.40-46.
Jun, S.M. and Hong, C.S. (1988) Buckling Behavior of Laminated Cylindrical Composite Panel with Initial Imperfection, *Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, KSAS, Vol. 16, No. 4, pp.40-46 (in Korean).
- [18] Ye, R.J. and Rasmussen, K.J.R. (2008) Compression Strength of Unstiffened Elements in Cold-reduced High Strength Steel, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 134, No. 2, pp.189-197.

요 약 : 최근 구조물의 고층화, 대형화 및 장스팬 활용 등의 요구로 고강도 고성능 재료의 건축물과 교량에의 적용이 증가하는 추세이다. 본 논문은 고성능강(HSA800)의 건축구조용 재료 특성과 고성능강재를 사용한 부재의 설계 기준을 위한 기본적인 연구의 일부이다. 조립각형강관 기둥의 국부좌굴 거동과 현행 폭두께비 설계 제한치를 검토하기 위하여 다양한 폭두께비 변수를 계획하고, 단축압축실험을 실시하였다. 또한, 유한요소결과로 얻어낸 단주의 국부좌굴거동을 실험결과와 비교하였으며 검증된 해석모델을 이용하여 변수연구를 수행하였고 현행 설계기준의 적용성에 대해 검토하였다.

핵심 용어 : 고성능강, 폭두께비, 국부좌굴, 단주, 용접각형강관