건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 H형단면 기둥의 압축강도에 관한 연구

김 태 수¹⁾ · 이 명 재²⁾ · 오 영 석³⁾ · 이 강 민^{4)*} · 김 도 환⁵⁾

¹⁾ 부교수, 한밭대학교, 건축공학과 ²⁾ 교수, 중앙대학교, 건축공학과 ³⁾ 교수, 대전대학교, 건축공학과

⁴⁾ 부교수, 충남대학교, 건축공학과 ⁵⁾ 책임연구원, 포항산업과학연구원(RIST)

A Study on Compressive Strength of Built-up H Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels

Kim, Tae Soo¹⁾ Lee, Myung Jae²⁾ Oh, Young Suk³⁾ Lee, Kang Min^{4)*} Kim, Do Hwan⁵⁾

¹⁾ Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

²⁾ Professor, Department of Architectural Engineering, ChungAng University, Seoul, 156-756, Korea

³⁾ Professor, Department of Architectural Engineering, DaeJeon University, Daejeon, 300-716, Korea

⁴⁾ Associate Professor, Department of Architectural Engineering, ChungNam National University, DaeJeon, 305-764, Korea

⁵⁾ Senior researcher, Steel Structure Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : Recently, high performance(strength) steels have been utilized to structural materials in buildings and bridges with the demand for high-rise and long-span of main structures. This paper is a series of basic study for the design specification of structural members using high performance steel, material properties of high performance rolled steel building structures; material properties of HSA800 steel was compared with the requirements of Korean Standards(KS) for HSA800. Welded H-shape stub columns with variables of width-to-thickness ratios are planned in order to investigate the local buckling behaviors and check the current design limit of width-to-thickness ratio and uniaxial compressive tests are carried out. In addition, the buckling behaviors of stub columns obtained finite element analysis were compared with those of test results.

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

1. 서 론

최근 건설시장에서 구조물의 초고층화 및 장스팬화의 요구로 고강도 고성능강의 건축물과 교량에의 적용이 시도되고 있다. 미국에서는 1960년부터 고강도강에 대한 연구가 진행되어, ASTM^[1]에 A514(항복강도 690MPa, 평판두께 150mm

까지)와 A709 Grade 100W(항복강도 690MPa, 평판두께 64mm, 교량용)의 강종이, 일본^[2]에서도 1970년대 초부터 관심을 갖기 시작하여 HT80(인장강도 780MPa), HT100(인장강도 950MPa), H-SA700(인장강도 780MPa) 등의 강종이 개발되어 구조물에 시범적으로 사용되고 있다. 국내에서는 1990년 초반에 POSTEN80(항복강도 680MPa)의 개발을 시작으로 해서, 2009년에 HSB800(교량구조용 압연강재, KS D 3868)^[3], 2011년 HSA800(건축구조용 고성능 압연강재, KS D 5994)^[4] 강종이 개발되어 한국산업표준(KS)에 규정되었다. 현재 건축물에 적용을 하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 구조설계 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다^[5].

HSA800(항복강도 650~770MPa)의 고강도(고성능) 강재를 건축물에 적용함으로써 구조부재의 콤팩트화 및 단면 감

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 2, 2012; revised October 18, 2012; approved on December 5, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-42-821-5625; Fax. +82-42-823-9467
E-mail: leekm@cnu.ac.kr

소로 인한 층고저감이 가능하고 건축물의 자중감소로 인한 지진하중감소, 부재단면의 축소에 의한 자재의 비용절감 및 유효공간을 확보하는데 이점이 있다고 판단된다. 임성우 등^{(6),(7)}에 의해 건축구조물에 고강도강의 적용에 대한 요구중대로 SM570 및 SM570TMC 강재로 용접 제작된 박스형 및 H형 단주 중심압축 실험을 실시하여 판폭두께비와 세장변수가 압축좌굴내력에 미치는 영향을 평가하였고, 현행 설계기준의 만족 여부를 조사하였다. 최근에 이철호 등⁽⁸⁾에 의해 HSA800 고강도강재의 단주 압축실험과 편심압축실험을 통해 현행 강구조 설계기준(KBC2009, AISC2010)의 설계강도와 실험결과를 비교하였고, 잔류응력이 항복강도에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 일부 실험체는 가력장치의 최대가력용량을 초과하여 종국상태(국부좌굴)에 도달되지 못하는 경우가 발생했지만, 모든 실험체는 현행설계기준의 요구강도를 만족하는 것으로 나타났으며, 잔류응력의 크기는 강재의 항복강도와 무관하다는 선행연구결과와 합치하는 잔류응력측정값을 얻었다.

본 연구에서는 한국산업표준(KS)에 새롭게 규정된 건축구조용 고성능 압연강재 HSA800의 건축구조부재로의 적용을 위한 기초연구로서 고강도강으로 단면 효율성이 좋은 압축재의 거동을 파악하고자 한다. 재료단순인장시험을 통해 낮은 변형도 경화와 연성 및 높은 항복비를 갖는 HSA800 고성능강의 기계적 성질을 확인하고, 국내 최대 가력장치의 용량(10,000kN)을 고려하여 용접 제작된 H형단면의 단주에 대해 중심압축실험을 실시했다. 플랜지와 웨브의 판폭두께비를 변수로 한 단주 실험체의 국부좌굴거동을 조사하여 건축용 구조용부재로서의 요구 성능의 만족여부를 확인하고, 유한요소해석을 통한 결과값과 비교하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 실험계획

압축재를 구성하는 판재의 판폭두께비에 따른 국부좌굴 내력을 평가하고, 현행설계기준식의 적용여부를 평가하기 위해 고성능강 HSA800 강종으로 용접 제작된 H형 단주에 대해 중심압축실험을 실시했다. H형부재를 구성하는 세개(두개의 플랜지와 한개의 웨브)의 플레이트는 구속판 요소(플레이트 양 끝이 다른 플레이트에 의해 일체화되어 지지되는 경우, 즉 H형단면의 웨브)와 비구속판 요소(1단은 자유, 타단은 일체화 지지되는 경우, 즉, H형단면의 플랜지)로 분류된다. 현행 기준(KSSC2009⁽⁹⁾, AISC2010⁽¹⁰⁾)에서 균일압축을 받는 압축재의 경우, 비콤팩트(비조밀) 요소의 판폭두께비 제한값(λ_r , 식 (1) 참조)을 기준으로 비콤팩트(비조밀)요소와 세장판 요소로 구분된다. 세장판 요소로 구성되는 용접 H형단면의 경우에 구속판 요소와 비구속판 요소로 조합된 단면은 저감계수($Q=Q_a \cdot Q_s$)를 고려한다. 여기서, Q_a 는 구속판 요소의 저감계

수이고, Q_s 는 비구속판 요소의 저감계수이며, 비조밀 단면이 상인 경우 Q_a 와 Q_s 는 1.0으로 산정한다. 그외의 세장판 단면의 비구속판 요소와 구속판 요소의 저감계수는 식 (6)~식(9)에 의해 산정된다. 용접 H형단면 플랜지의 판폭두께비(b/t_f = 4, 6, 8, 10)와 웨브의 판폭두께비(h/t_w = 15, 20, 25)의 조합으로 실험체를 Table 1과 같이 계획했다. 용접 H형단면 단주의 단면형상과 실험체 설치상황은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다.

실험체명에서, 예를 들어, SCH-HSA800-4-15에서 SCH는 용접된 실험체 형상(H형단면), HSA800은 고성능강을, 4는 플랜지 판폭두께비(b/t_f), 15는 웨브 판폭두께비(h/t_w)를 의미한다. 현행 기준의 식 (1), (2)와 HSA800의 공칭항복강도 690MPa, 탄성계수 205GPa를 근거로 하여, 플랜지의 경우는 판폭두께비가 10인 실험체를 제외한 모든 실험체는 비콤팩트(비조밀) 단면이고, 웨브의 경우에는 모든 단면이 비콤팩트 단면으로 분류되었다. 실험체의 길이(L)은 비탄성좌굴을 유도하기 위한 단주실험체 제작을 위해 단면 최대폭 (B) 또는 높이(H)의 3.01~3.19배로 계획하였다. 플랜지와 웨브의 용접은 별도의 개선을 가공하지 않는 모살용접을 적용했다. 고성능강에 적합한 용접방법인 불활성가스 금속아크용접인 GMAW를 적용하며 불활성가스로서 Ar(알곤)가스를 사용한다. 용접봉은 스웨덴산 OK AristoRod 13.3로 하였다. Table 1에 P_y 는 각 형강관의 전단면이 공칭항복응력(690 MPa)에 도달되었을 때의 항복강도를 나타낸다.

Table 1. List of Specimen at the Planning Stage

Specimen	Section geometry $H^*B^*t_f^*t_w$, mm	L mm	b/t_f	h/t_w	A_r flange	A_r web	P_y kN
SCH-HSA800-4-15	H-159*96*12*9	500	4	15	9.62	25.68	2428
SCH-HSA800-6-15	H-159*144*12*9	500	6	15	9.62	25.68	3223
SCH-HSA800-8-15	H-159*192*12*9	600	8	15	9.62	25.68	4018
SCH-HSA800-4-20	H-204*96*12*9	650	4	20	9.62	25.68	2708
SCH-HSA800-6-20	H-204*144*12*9	650	6	20	9.62	25.68	3502
SCH-HSA800-8-20	H-204*192*12*9	650	8	20	9.62	25.68	4297
SCH-HSA800-10-20	H-204*240*12*9	750	10 (세장판)	20	9.62	25.68	5092
SCH-HSA800-6-25	H-249*144*12*9	750	6	25	9.62	25.68	3782
SCH-HSA800-8-25	H-249*192*12*9	750	8	25	9.62	25.68	4577
SCH-HSA800-10-25	H-249*240*12*9	750	10 (세장판)	25	9.62	25.68	5372

Fig. 1 Section Shape

Fig. 2 Set-Up of Specimen

비구속판 요소, 균일압축을 받는 용접 H형단면 플랜지 비콤팩트(비조밀) 요소 한계 판폭두께비 :

$$\lambda_r = 0.64 \sqrt{k_c E / F_y}, \quad k_c = 4 / \sqrt{b / t_w} \leq 0.76 \quad (1)$$

구속판 요소, 균일압축을 받는 용접 H형단면 웨브 비콤팩트(비조밀) 요소 한계 판폭두께비 :

$$\lambda_r = 1.49 \sqrt{E / F_y}, \quad (2)$$

압축좌굴응력 F_{cr} 은 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \quad \text{또는} \quad F_e \geq 0.44 QF_y \quad \text{인 경우}$$

$$F_{cr} = Q \left[0.658 \frac{QF_y}{F_e} \right] F_y \quad (3)$$

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \quad \text{또는} \quad F_e < 0.44 QF_y \quad \text{인 경우}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (4)$$

여기서, 단면저감계수는 다음과 같다.

$$Q = Q_a \cdot Q_s \quad (5)$$

-세장한 비구속판요소에서 조립기둥재 또는 다른 압축재로부터 돌출된 플랜지의 경우,

$$1) \quad b/t(\lambda_r) \leq 0.64 \sqrt{k_c E / F_y}, \quad Q_s = 1.0 \quad (6)$$

$$2) \quad 0.64 \sqrt{k_c E / F_y} < b/t(\lambda_r) \leq 1.17 \sqrt{k_c E / F_y},$$

$$Q_s = 1.415 - 0.65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y}{k_c E}} \quad (7)$$

$$3) \quad b/t(\lambda_r) > 1.17 \sqrt{k_c E / F_y}$$

$$Q_s = \frac{0.90 k_c E}{F_y \left(\frac{b}{t} \right)^2} \quad (8)$$

- 세장한 구속판 요소의 경우,

$$Q_a = A_e / A_g \quad (9)$$

A_e = 감소된 유효폭(b_e)을 고려한 유효단면적,

$$b_e = 1.92t \sqrt{\frac{E}{f} \left[1 - \frac{0.38}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f}} \right]} < b \quad \text{for } \lambda_r = 1.49 \sqrt{E/f} \quad (10)$$

$$f = P_n / A_e, \quad (11)$$

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (12)$$

여기서, F_e 탄성압축좌굴강도(N/mm^2) $\left(= \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \right)$

A_g : 부재의 총단면적(mm^2)

F_y : 강재의 항복강도($\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$)

E : 강재의 탄성계수($\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$)

K : 유효좌굴길이계수

L : 부재의 길이(mm)

r : 좌굴축에 대한 단면 2차 반경(mm)

3. 재료시험 및 실험결과

3.1 재료인장시험 결과

2011년 11월 한국산업표준(KS D 5994)^[4]에 건축구조용 고성능 압연강재 HSA800이 규정되었다. HSA800강의 적용 범위는 주로 두께 100mm이하의 건축구조물에 사용하는 열가 공제어압연(TMCP) 강판 및 강대이며, 세립킬드강을 사용한다. 화학성분 및 대표적인 기계적 성질을 각각 Table 2, Table 3에 나타냈다.

Table 2. Chemical Composition of HSA 800 in KS (Unit : %)

Steel material	C	Si	Mn	P	S
HSA800	0.20이하	0.55이하	3.00이하	0.015이하	0.006이하

Table 3. Mechanical Properties of HSA 800 in KS

Yield stress MPa	Tensile stress MPa	Yield ratio %	Elongation		
			Applied plate thickness mm	No. of test specimen	Elongation %
650~770	800~950	85이하	16이하	5호	15이상
			16초과 20이하	5호	22이상
			20초과	4호	16이상

용접H형단면의 실험체 제작에 사용된 평판두께는 플랜지의 경우 12mm, 웨브의 경우 9mm이다. 수급된 강재의 평판두께가 25mm인 관계로 상단부로부터 각각, 13mm, 16mm를 절삭가공하여 실험체 제작용 12mm, 9mm 평판을 제작하였다. 인장시험편 규정(KS B 0801)에 따라 압연방향(길이방향)으로 5호 시험편 4개를 제작하여 인장시험을 실시하였고, 그 결과를 Table 4에 정리하였다. 시험편에 부착한 스트레인게이지로부터 얻은 변형도 값과 하중을 시험편의 단면적으로 나눈 응력도 값의 관계를 Fig. 3에 정리하였다.

재료 인장시험결과, HSA800 고성능강은 일반탄소강과 달리 항복점(Yield plateau)이 명확하지 않은 비선형성을 나타냈다. 모든 평판두께 9mm 웨브용의 시험체의 인장강도(σ_u) 및 연신률은 KS의 인장강도 기준을 만족하였으나, CHSA-T9-2의 시험편을 제외한 다른 시험편의 항복강도 및 항복비가 KS의 항복강도 및 항복비 제한범위를 초과하는 것으로 나타났다. 플랜지용의 12mm 인장시험편에 있어서는 대부분의 시험체의 항복강도(σ_y), 인장강도(σ_u) 및 연신률은 KS의 허용한계기준을 만족하였으나, CHSA-T12-3 시험편의 항복비(0.86)가 제한범위(0.85)를 약간 초과하는 것으로 나타났다. 이는 절삭가공에 의해 절삭표면에 압축잔류응력이 잔존하여 항복강도의 상승^[11]을 초래한 것으로 판단된다. 절삭가공하지 않은 25mm 평판에 대한 기존의 재료시험결과^[12]에서는 항복강도는 평균 675MPa, 인장강도는 854MPa, 항복비 0.79, 연신율은 21%로 사용된 재료의 기계적 성질은 KS D 5994의 제한치를 만족하는 것으로 나타났다. 항복강도(σ_y)는 0.2% 오프셋방법에 의해 결정하였으며, 재료시험결과 측정된 항복강도와 탄성계수를 기준(Table 4)으로 실험체의 단면분류를 재검토하여 Table 5에 정리하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 공칭항복강도 (=690MPa)와 탄성계수(=205GPa)로 계산된 단면은 SCH-HSA800-10-25의 플랜지만이 세장판 요소로 분류되었다. 그러나, 재료시험결과 얻어진 항복강도(9mm : 760.95MPa, 12mm : 731.73MPa)와 탄성계수 (9mm : 196.21GPa, 12mm : 199.48MPa)를 대입하여 산정된 경우, Table 5에서 실험체 SCH-HSA800-10-20과 SCH-HSA800-10-25의 플랜지는 계획단계와 동일하게 세장판 요소로 재확인되었고, 실험체 SCH-HSA800-6-25, SCH-HSA800-8-25, SCH-HSA800-10-25의 웨브가 세장판 요소로 변경되었다. 이는 KS의 공칭항복강도와 탄성계수에 비해 재료인장시험으로 얻어진 항복강도가 증가하고, 탄성계수가 감소하여 비콤팩트 요소의 판 폭두께비 제한값(λ_r)이 모두 낮아졌기 때문이다.

Table 4. Test Results of Tensile Coupon

Specimen	Actual thickness t (mm)	Elastic modulus E (GPa)	Yield stress σ_y (MPa)	Tensile stress σ_u (MPa)	Yield ratio σ_y/σ_u YR(%)	Elongation EL (%)
CHSA-T9-1	9.12	195.44	802.39	889.07	0.90	18.87
CHSA-T9-2	9.08	199.84	685.39	845.37	0.81	18.87
CHSA-T9-3	9.03	195.75	795.07	887.97	0.90	18.84
CHSA-T9-4	9.05	193.82	816.61	894.48	0.91	18.74
Average	9.08	196.21	760.95	874.14	0.87	18.86
COV	-	0.011	0.070	0.023	0.048	0.001
CHSA-T12-1	12.00	202.22	738.36	865.91	0.85	21.64
CHSA-T12-2	12.00	196.45	706.20	842.97	0.84	22.92
CHSA-T12-3	12.03	206.96	750.62	872.88	0.86	21.02
CHSA-T12-4	11.86	192.28	712.78	841.30	0.85	22.94
Average	12.01	199.48	731.73	860.59	0.85	21.86
COV	-	0.028	0.026	0.015	0.011	0.036

(a) 9mm Coupon

(b) 12mm Coupon

Fig. 3 Stress-Strain Curves Obtained from Tensile Coupon Test

Table 5. Specimen List, Section Classification Base on Tensile Coupon Test Result

Specimen	L mm	b/tf	h/tw	Ar Flange	Ar Web	PeY Yield strength kN	Common
SCH-HSA 800-4-15	500	4.00	14.87	9.21	23.93	2620	플랜지두 께 tf=12.01 웹두께 tw=9.08 kc=0.76
SCH-HSA 800-6-15	500	6.00	14.87	9.21	23.93	3464	
SCH-HSA 800-8-15	600	7.99	14.87	9.21	23.93	4307	
SCH-HSA 800-4-20	650	4.00	19.82	9.21	23.93	2931	
SCH-HSA 800-6-20	650	6.00	19.82	9.21	23.93	3775	
SCH-HSA 800-8-20	650	7.99	19.82	9.21	23.93	4618	
SCH-HSA 800-10-20	750	9.99 (세장판)	19.82	9.21	23.93	5462	
SCH-HSA 800-6-25	750	6.00	24.78 (세장판)	9.21	23.93	4085	
SCH-HSA 800-8-25	750	7.99	24.78 (세장판)	9.21	23.93	4929	
SCH-HSA 800-10-25	750	9.99 (세장판)	24.78 (세장판)	9.21	23.93	5773	

3.2 단주 중심압축실험결과

HSA800의 용접H형 단면 단주 중심압축 실험은 RIST 강구조 연구소의 실험실에 설치되어 있는 10,000kN(약 1,000tf) UTM을 사용하여 실시하였다. 실험결과 얻어진 실험 최대압축하중(P_{eMax}), 실험 최대평균응력(σ_{eMax}) 및 파단 양상을 Table6에 정리하였고, 축하중-축변위 관계곡선과 평균응력(σ_e)-변형도(ϵ_e) 관계곡선은 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6에는 실험체의 종국상태에서 좌굴형상을 표시했다. 웹높이(H)를 고정하고 플랜지폭(B)이 증가하는 경우(즉, 플랜지의 판폭두께비(b/tf)가 증가)와 플랜지폭을 고정하고 웹높이가 증가하는 경우(즉, 웹의 판폭두께비(h/tw)가 증가)에 있어서 Table 6과 Fig. 4로부터 실험 최대압축하중($PeMax$)이 증가하는 경향을 보였다. 최대압축하중($PeMax$)을 단면적(Ag)으로 나눈 실험최대 평균응력(σ_{emax})은 판의 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 Table 6과 Fig. 5로부터 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 반면에 부재의 전체좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 SCH-HSA800-4-15($\sigma_{emax}=849.44$ MPa)와 SCH-HSA800-4-20($\sigma_{emax}=846.82$ MPa)는 플랜지 판폭두께비가 작은 실험체 SCH-HSA 800-6-15($\sigma_{emax}=904.29$ MPa)와 SCH-HSA 800-6-20($\sigma_{emax}=872.10$ MPa)보다 낮은 최대응력을 보였다. 이는 플랜지 폭이 상대적으로 작아(즉, 압축 방향으로의 단면2

차 모멘트가 작음) 단면전체가 충분하게 외력에 저항하지 못하고 압축 방향의 전체좌굴에 의해 종국상태에 도달되었기 때문으로 판단된다.

Table 6. Test Results

Specimen	Length L mm	Section area Ag mm2	Ultimate strength PeMax kN	Ultimate stress oemax MPa	Fracture shape
SCH-HSA 800-4-15	500	3532	2989.19	849.44	부재 전체좌굴선행
SCH-HSA 800-6-15	500	4684	4223.95	904.29	하부국부좌굴
SCH-HSA 800-8-15	600	5837	4963.08	852.32	중상부국부좌굴
SCH-HSA 800-4-20	650	3940	3323.31	846.92	부재 전체좌굴선행
SCH-HSA 800-6-20	650	5093	4426.76	872.10	중상부국부좌굴
SCH-HSA 800-8-20	650	6246	5192.40	833.72	중상부국부좌굴
SCH-HSA 800-10-20	750	7399	5552.41	752.36	중상부국부좌굴
SCH-HSA 800-6-25	750	5502	4601.84	839.60	중하부국부좌굴
SCH-HSA 800-8-25	750	6655	5197.95	783.65	상부국부좌굴
SCH-HSA 800-10-25	750	7808	5856.32	752.26	중상부국부좌굴

Fig. 4의 축하중-축변위 관계 곡선으로 부터 용접 H형단면 단주 실험체의 판폭두께비가 감소함에 따라 최대내력이후 충분한 축변형이 발생하는 경향을 보였다. 즉, 판폭두께비가 증가함에 따라 좌굴에 의해 급격하게 내력이 저하되고 충분한 소성변형이 발생하지 않는 것으로 판단된다. Fig. 5의 평균응력-변형도 관계곡선으로 부터 실험체 SCH-HSA800-10-20과 SCH-HSA800-10-25의 최대평균응력(σ_{emax})은 752.36MPa, 752.26MPa임을 알 수 있고 이는 플랜지의 재료항복강도(731.73MPa)를 상회하나 웹의 재료항복강도(760.95MPa)보다 낮게 나타났다.

(a) 웹 판폭두께비 15 시리즈

(b) 웨브 판폭두께비 20 시리즈

(c) 웨브 판폭두께비 25 시리즈

Fig. 4 Axial Load-Displacement Relationship Curves

(a) 웨브 판폭두께비 15 시리즈

(b) 웨브 판폭두께비 20 시리즈

(c) 웨브 판폭두께비 25 시리즈

Fig. 5 Mean Stress-Strain Relationship Curves

플랜지국부좌굴

전체좌굴

(a) SCH-HSA800-4-15

(b) SCH-HSA800-4-20

(c) SCH-HSA800-6-15

(d) SCH-HSA800-6-20

(e) SCH-HSA800-6-25

(f) SCH-HSA800-8-15

Fig. 6 Final Failure State of Specimen

Fig. 6에서 플랜지의 판폭두께비가 10으로 계획된 실험체 SCH-HSA800-10-20과 SCH-HSA800-10-25에서 플랜지 부분에 현저한 국부좌굴이 발생이 발생했다는 것을 확인할 수 있다.

4. 해 석

4.1 해석 개요

유한요소 해석 프로그램인 ANSYS⁽¹³⁾를 사용하여 3차원 모델링을 수행하였고 비선형 좌굴해석을 통해 세장비와 폭두께비가 H형 단면 기둥의 좌굴거동에 미치는 영향을 분석하고, 실험치와 비교·분석하였다. 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용, 국부좌굴이 발생하는 용접 H-형 단면에 대한 해석을 수행하였다. HSA800 강재의 응력도-변형도 관계는 Fig. 3과 Table 4의 실험결과를 바탕으로 비선형 모델인 multi-linear kinematic hardening 모델을 사용했고, 좌굴을 시뮬레이션하기 위해 대변위 해석(large deflection analysis)을 수행했다. 여기서, 프와송비는 0.3, 항복조건은 von-Mises 이론을 적용하였다. 유한요소모델은 3차원 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(hyper-elasticity), 강성보강(stress stiffening), 크리프(creep), 대변위(large deflection), 대변형률(large strain)

특성을 반영할 수 있다. solid 185 요소를 사용한 기둥의 해석 모델은 Fig. 7과 같으며, 여기서 기둥의 상단과 하단의 경계조건은 상부의 수직방향의 변위를 제외하고 모두 구속시켰다. 메쉬 사이즈는 해석의 정확도와 수렴을 위해 비교적 조밀한 크기(10mm × 10mm)로 결정했다. 선형 고유치 해석을 통해 얻은 첫 번째 변형된 좌굴형상을 업데이트시켜 초기 결함(initial imperfection)을 지닌 모델로 만들어 비선형 좌굴 해석을 수행하였다.

(a) Setting of Specimen

(b) Finite Element Analysis Model of H-Shaped Column

Fig. 7 Setting of Specimen and Numerical Model

4.2 해석 결과

실험결과와 해석결과의 비교를 위해 전체적인 비교(global level comparisons)와 국부적인 비교(local level comparisons)를 수행했다. 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교로써 판폭두께비에 따른 축하중-축변위 관계곡선과 응력-변형도 곡선을 Fig. 8와 Fig. 9에서 나타냈고 각각의 좌굴 하중의 실험결과와 해석결과를 Table 7에서 비교하였다. Fig. 8에서 보듯이 초기강성은 축하중-축변위 곡선의 경우, 재료성질의 불확실성(uncertainty), 단면의 불균질성, 초기 실험체 설치의 오차 등으로 실험치와 해석치가 차이가 발생했지만, 응력도-변형도 곡선의 경우(Fig. 9 참조) 실험치의 보정 후 실험치와 해석치가 양호한 대응을 보였다. 모든 실험체에서 최대하중은 해석치가 실험치에 비해 약간 낮게 나타났으며, 국부좌굴에 의해 하중이 급격하게 감소하는 양상은 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 실험에서와 같이 플랜지와 웨브의 판폭두께비가 클수록 좌굴하중이 커졌다. 항복강도 이후 최대좌굴강도까지 계속적인 강도증가가 나타났다. Table 7에서 보듯이 최대좌굴하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평

(a) 웨브 판폭두께비 15 시리즈

(b) 웨브 판폭두께비 20 시리즈

(c) 웨브 판폭두께비 25 시리즈

Fig. 8 Comparison of Test and Analysis in Axial Load-Displacement Curves

(a) 웨브 판폭두께비 15 시리즈

(b) 웨브 판폭두께비 20 시리즈

(c) 웨브 판폭두께비 25 시리즈

Fig. 9 Comparison of Test and Analysis in Stress-Strain Curves

균오차가 약 5.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 특히 전체좌굴이 발생한 실험체(플랜지 판폭구께비 = 4)의 경우도 좌굴하중에 대한 실험결과와 해석결과의 평균오차가 3.6%이하로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다.

Table 7. Comparison of Test and FE Analysis

Specimen	Buckling strength; P_{cr}			λ [$=L/r$]
	Analysis (kN)	Test (kN)	Error (%)	
SCH-HSA800-4-15	2,940	2,986	1.5	7.84
SCH-HSA800-4-20	3,205	3,322	3.6	8.05
SCH-HSA800-6-15	3,873	4,223	9.1	7.53
SCH-HSA800-6-20	4,117	4,419	7.4	7.69
SCH-HSA800-6-25	4,303	4,597	6.8	7.35
SCH-HSA800-8-15	4,632	4,959	7.1	8.84
SCH-HSA800-8-20	4,907	5,192	5.8	7.49
SCH-HSA800-8-25	5,044	5,197	3.0	7.14
SCH-HSA800-10-20	5,390	5,552	3.0	8.50
SCH-HSA800-10-25	5,566	5,856	5.2	6.99

(a) Test (b) FE analysis
Fig. 10 Typical Buckling Behavior Comparison (Buckling Mode and Stress Distribution, SCH-HSA800-4-15)

(a) Test (b) FE analysis
Fig. 11 Typical Buckling Behavior Comparison (Buckling Mode and Stress Distribution, SCH-HSA800-4-15)

(a) Test (b) FE Analysis
Fig.12 Typical Buckling Behavior Comparison (Buckling Mode and Stress Distribution, SCH-HSA800-10-25)

실험결과와 해석결과의 국부적인 비교로써 좌굴모드 형상과 응력 분포를 Fig. 10-2에 나타냈다. Fig.에서 보듯이 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상이 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 특히 실험결과에서와 동일하게 해석결과에서도 플랜지의 판폭두께비가 4인 실험체의 경우, 전체좌굴 형상을 잘 예측하였고, 플랜지의 판폭두께비가 10인 시험체의 경우 플랜지 부분의 현저한 국부좌굴이 발생하는 것을 확인하였다. 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교와 국부적인 비교 결과, 해석모델이 실험결과를 비교적 정확

하게 예측하고 있음을 알 수 있었다. 이 해석모델의 검증으로 다른 강종(SS400과 SM570), 다양한 판폭두께비 및 세장비 등의 변수연구가 가능해 졌다.

5. 결 론

본 논문에서는 고성능강(HSA800) H-형 단면 기둥의 폭 두께비와 국부좌굴의 관계를 알아보기 위하여 H-형 단면의 폭과 길이를 변화시켜 해석 및 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 또한 향후 다른 강종(SS400, SM520)을 이용한 모델링을 통해 강종에 따른 좌굴거동을 연구할 계획이다.

- (1) HSA800강재의 소재시험결과는 웹을 구성하는 9mm 평판은 일부시험편에서 절삭가공시 발생한 압축잔류응력에 의해 항복강도가 KS제한치를 초과하여 평균 항복비가 0.87로 나타나 기준치인 0.85를 초과한 것으로 나타났다. 인장강도 및 연신률은 KS제한치를 만족하였다. 플랜지용의 12mm 인장시험편에 있어서는 대부분의 시험체의 항복강도, 인장강도 및 연신률은 KS의 허용한계 기준을 대부분 만족하는 것으로 나타났다. 향후 절삭가공에 의한 판 두께 조절시에는 별도의 열처리(풀림 등)를 통해 잔류응력을 제거한후 실험체를 제작할 필요가 있다.
- (2) 플랜지의 판폭두께비 및 웹의 판폭두께비가 각각 증가하는 경우, 최대 압축좌굴하중이 증가하는 경향을 보였다. 실험최대 평균응력은 국부좌굴에 의한 최대내력이 결정된 실험체에 대해서는 판폭두께비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였지만, 전체좌굴에 의해 최대내력이 결정된 실험체 SCH-HSA800-4-15와 SCH-HSA800-20는 플랜지 판폭두께비가 작은 실험체 SCH-HSA800-6-15와 SCH-HSA800-6-20보다 낮은 응력을 보였다. 이는 플랜지 폭이 상대적으로 작아(즉, 압축 방향으로의 단면2차 모멘트가 작음) 단면전체가 충분히 외력에 저항하지 못하고 압축 방향의 전체좌굴에 의해 종국상태에 도달되었기 때문이다.
- (3) 실험결과와 해석결과의 전체적인 비교 결과로써 최대좌굴하중의 평균오차가 약 5.3%로 해석모델이 실험결과를 비교적 정확히 예측했다. 응력-변형도 관계곡선에서는 초기강성은 실험치와 해석치가 정확히 일치하였고, 축하중-축변위 관계 및 응력-변형도 곡선 양상 또한 실험결과와 해석결과가 상당히 유사했다. 국부적인 비교 결과로써 응력 집중과 함께 국부 좌굴 형상도 실험결과와 해석결과가 유사하게 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] ASTM (2011) American society for testing materials.
- [2] JIS (2011) Japanese Industrial Standards(in Japanese).
- [3] KS (2009) KS D 3868, 교량구조용 압연강재.
KS (2009) KS D 3868, Rolled Steels for Bridge Structures, Korean Agency for Technology and Standards (in Korean).
- [4] KS (2011) KS D 5994, 건축구조용 고성능 압연강재.
KS (2011) KS D 5994, High-performance Rolled Steel for Building Structures, Korean Agency for Technology and Standards (in Korean).
- [5] 김종락 등(2011) 800MPa 고강도강 설계기준제정연구, 연구보고서, 한국강구조학회.
Kim, J.R., etc. (2011) A Study on Design Manual Establishment of High Strength Steel (800MPa) Research Report, Korean Society of Steel Construction (in Korean).
- [6] 임성우, 고상기, 장인화(2001) 고장력(SM570) 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제13권, 제3호, pp.223-232.
Lim, 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).
- [7] 임성우, 김요숙, 장인화(2005) SM570TMC 강재의 압축재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제3호, pp.357-363.
Lim, S.W., Kim, Y.S., and Chang, I.H. (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).
- [8] 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) 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).
- [9] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설(KBC2009).
AIK (2009) Korean Building Code and Commentary, Architectural Institute of Korea (in Korean).
- [10] AISC (2010) American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings.
- [11] 김동렬 (2009) 공작기계, 기전연구사.
Kim, D.R. (2009) A Machine Tool, Kijeon Publisher (in Korean).
- [12] 김도환, 이승은, 김진호, 하태휴, 유승호(2012) 건축구조용 고성능 강재 HSA800 소재 성능평가, 한국강구조학회 학술대회발표집, 한국강구조학회, Vol. 23, No. 1, pp. 267-268.
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 Conference Korean Society of Steel Construction, KSSC, pp.267-268. (in Korean).
- [13] ANSYS (2011) *ANSYS multiphysics Version 14.0* ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA.

요약 : 최근 구조물의 고층화, 대형화 및 장스팬 활용 등의 요구로 고강도 고성능 재료의 건축물과 교량에의 적용이 증가하는 추세이다. 본 논문은 고성능강의 건축구조용 재료 특성과 고성능강재를 사용한 부재의 설계 기준을 위한 기본적인 연구의 일부이다; HSA800의 재료적 특성은 한국산업표준의 조건과 비교하였다. 용접 H-형 단주의 국부좌굴 거동과 현행 판폭두께비 설계 제한치를 검토 위하여 다양한 판폭두께비 변수를 계획하고, 단축압축실험을 실시하였다. 또한, 유한요소결과로 얻어낸 단주의 좌굴거동을 실험결과와 비교하였고 해석결과가 고성능강 H형 단면 단주의 좌굴거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

핵심어 : 고성능강, 판폭두께비, 국부좌굴, 단주, 용접H형 단면