

편심하중을 받는 고성능강(HSA800) 조립 단주의 구조거동에 관한 해석적 연구

유정한¹ · 김주우^{2*} · 양재근³ · 강주원⁴ · 이동우⁵

¹교수, 서울과학기술대학교, 건축학부, ²교수, 세명대학교, 건축공학과,

³교수, 인하대학교, 건축공학과, ⁴교수, 영남대학교, 건축학부, ⁵대표이사, 아이스트

Analytical Study on the Structural Behaviors of Stub Columns Fabricated with HSA800 of High Performance Steel Subjected to Eccentric Loads

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

¹Professor, School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 139-743, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

⁴Professor, School of Architecture, Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749, Korea

⁵Chairman & CEO, IST, Seoul, 135-933, Korea

Abstract - In this study, the stub columns of built-up H-section and square hollow section subjected to eccentric loads are tested to evaluate the applicability of the structural members with 800MPa high-strength steel (HSA800) on current design specification. Analytical studies of FE model are conducted to validate the test results and then the verified FE models are used for extensive parametric studies for checking up the applicability of current design code. The parameters are width-to-thickness ratios and axial load ratios. From P-M correlations on parameter models, all stub columns with non-compact sections exceed the current design requirements about axial force and flexural strength ratios are sufficiently secured as the axial load ratios are decreased. The built-up hollow sections with slender section model do not satisfy the current design specification about axial force.

Keywords - High performance steel, Built-up stub column, Eccentric loads, Width-to-thickness ratio, Axial load ratio, 3D nonlinear FEA

1. 서론

최근 건축물의 초고층화, 대형화 및 장스팬화에 따라 건축구조재의 강재에 대해서 고강도화와 안정성을 요구하고 있다. 이런 수요에 맞추어 건축물과 교량의 고성능강재 적용성에 대한 연구가 진행되고 있다. 고성능 강재 도입으로 건

축물의 자중감소, 부재 크기의 축소로 인한 경제성 및 시공성 향상 효과를 기대할 수 있다.

강재의 특성상 강도가 증가하면 연신율 및 인성은 저하되지만 항복비는 증가한다. 일반구조용 강재는 뚜렷한 항복점이 나타나는 편이지만 고강도 강재의 경우 항복점이 나타나지 않고 continuous yielding이 발생한다(Choi 등^[1]). 현행 설계기준(KBC 2013^[2], AISC 2010^[3])의 고강도 강재 강도식은 일반강재의 기계 및 물리적 특성에 기초를 두고 있다. 따라서 고강도 강재를 건축구조재로 사용하기 위해서는 일반구조용 강재와 다른 거동을 보이는 고강도 강재에 대한 현행 기준의 적용가능성 여부를 평가할 필요가 있다. 또한 증가하는 수요를 만족시키기 위하여 인장강도 기준 800MPa급의

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 5, 2014; revised August 18, 2014; approved on August 21, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-649-1329 Fax. +82-43-649-1755

E-mail. jw_kim@semyung.ac.kr

건축용 고강도 강재가 개발되어 이를 건축부재로 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으나 압축부재로서의 연구는 대부분 중심축하중만을 고려한 연구가 대부분이다. 하지만 현실적으로 하중이 오차 없이 단면도심에 작용하기란 쉽지 않고 고층구조물의 축하중을 받는 부재는 편심에 의한 힘을 상당히 크게 받고 있으며 이러한 요인들은 부재의 좌굴 내력을 저감시킨다.

고성능 HSA800($F_y = 690$ MPa) 강재를 건축물에 적용함으로써 구조부재의 단면 감소로 인한 층고저감이 가능하고, 자재의 비용절감 및 유효 공간 확보 등의 이점이 있다. 이러한 이점으로 인해 건축구조물에 고강도강의 적용성 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이와 관련된 연구의 일환으로 임성우 등^{[4],[5]}은 SM570 및 SM570TMC 강재로 용접 제작된 박스형 및 H형 단주 중심압축 실험을 실시하여 폭두께비와 세장변수가 압축좌굴내력에 미치는 영향을 평가하였고, 현행 설계기준의 만족여부를 조사하였다.

이철호 등^[6]은 HSA800 고강도강재의 단주 압축실험과 편심압축실험을 통해 얻어진 내력을 현행 강구조설계기준(KBC 2013, AISC 2010)의 설계강도와 비교를 하였고, 잔류응력이 항복강도에 미치는 영향을 검토하였다. 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.

유정한 등^[7]과 김태수 등^[8]은 현행 강구조설계기준을 근거로 고성능강(HSA800)의 압축부재 적합성을 판단하는 것을 목적으로 각각 조립각형강관과 용접H형단면 기둥의 중심압축실험 및 해석연구를 진행하였다. 실험연구와 해석모델 모두 현행설계기준의 요구강도를 상회하는 결과를 확인하였고, 초기강성 및 좌굴하중의 실험결과와 해석결과가 비교적 정확히 일치하였다. 이와 같은 해석연구의 검증은 바탕으로 유정한 등^[7]은 변수연구를 수행하였다. 변수연구 결과 조립각형강관의 폭두께비가 증가함에 최대내력이 증가하였고, 모든 변수 모델이 현행설계기준의 요구강도에 여유를 갖는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 한국산업표준(KS)에 새로 규정된 건축구조용 고성능 압연강재 HSA800의 건축구조부재로의 적용을 위한 연구로써, 이강민 등^[9]의 용접 제작된 각형강관 및 H형강에 대한 단주편심압축 실험연구를 바탕으로 해석모델의

검증을 이루었다. 특히, 본 연구는 편심하중을 받는 고성능강 단주의 거동에 대한 변수연구로써 고성능강 단주의 P-M 상관관계를 알아보고 적용여부를 평가하기 위해 폭두께비와 축력비를 주요 변수로 두었다. 이를 통해 건축용 구조부재로서의 요구 성능의 만족여부를 확인하고자 한다.

2. 현행 강구조 기준

각형강관 부재를 구성하는 네 개의 모든 플레이트는 구속판 요소로 분류되며, H형 부재를 구성하는 세개의 플레이트는 구속판 요소와 비구속판 요소로 분류된다. 현행 기준(KBC 2013, AISC 2010)에서 균일압축을 받는 압축재의 경우, 비조밀 단면의 폭두께비 제한값(λ_c)을 기준으로 비세장 요소와 세장판 요소로 구분된다. 세장판 요소로 구성되는 용접 H형단면의 경우에 구속판 요소와 비구속판 요소로 조합된 단면은 저감계수($Q = Q_s \cdot Q_a$)를 고려한다. 여기서, Q_a 는 구속판 요소의 저감계수이고, Q_s 는 비구속판 요소의 저감계수이다. 조밀 단면이상인 경우 Q_a 와 Q_s 는 1.0으로 산정한다. 그외의 세장판 단면의 비구속판 요소와 구속판 요소의 저감계수는 식 (6)~(9)에 의해 산정된다.

비구속판 요소, 균일압축을 받는 용접 H형단면 플랜지 비세장 요소 한계 폭두께비 :

$$\lambda_r = 0.64 \sqrt{k_c E / F_y} \quad (1)$$

$$0.35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}} \leq 0.76$$

구속판 요소, 균일압축을 받는 용접 H형단면 웹 비세장 요소 한계 폭두께비 :

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

압축좌굴응력 F_{cr} 은 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q F_y}} \quad \text{또는} \quad \frac{Q F_y}{F_c} \leq 2.25 \quad \text{인 경우}$$

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

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}} \text{ 또는 } \frac{QF_y}{F_e} > 2.25 \text{ 인 경우}$$

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

여기서, 단면저감계수는 다음과 같다.

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

세장한 비구속판요소에서 조립기둥재 또는 다른 압축재로부터 돌출된 플랜지의 경우,

$$1) \ b/t \leq 0.64 \sqrt{Ek_c/F_y}$$

$$Q_s = 1.0 \quad (6)$$

$$2) \ 0.64 \sqrt{Ek_c/F_y} < b/t \leq 1.17 \sqrt{Ek_c/F_y},$$

$$Q_s = 1.415 - 0.65 \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{Ek_c}} \quad (7)$$

$$3) \ b/t > 1.17 \sqrt{Ek_c/F_y},$$

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

세장한 구속판 요소의 경우,

$$Q_a = \frac{A_e}{A} \quad (9)$$

여기서, A_e = 감소된 유효폭(b_e)을 고려한 유효단면적이며,

$$\frac{b}{t} \geq 1.40 \sqrt{\frac{E}{f}} \text{ 인 경우}$$

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

여기서, $f = P_n/A_e$ 이며, 반복계산을 요하는 f 를 구하는 대신 F_y 와 같다고 할 수 있다. 이 경우에는 기둥유효강도를 약간 보수적으로 추정한다.

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

A_g : 부재의 총단면적(mm²)

F_y : 강재의 항복강도(N/mm², MPa)

E : 강재의 탄성계수(N/mm², MPa)

K : 유효좌굴길이계수

L : 부재의 길이(mm)

r : 좌굴축에 대한 단면 2차 반경(mm)

3. 해석모델의 검증

3.1 단주의 편심압축 실험결과

고성능강 단주의 국부좌굴 강도를 평가하고, 압축하중과 휨모멘트의 상호작용관계를 알아보며, 현행설계기준식의 적용여부를 평가하기 위해 고성능강 HSA800 강종으로 용접제작된 각형강관과 H형강 단주의 편심압축실험을 실시하였다.

현행 기준(KBC 2013, AISC 2010)과 HSA800의 공칭항복강도 690 MPa, 탄성계수 205 GPa을 근거로 모든 실험체는 압축력에 대해 비세장단면이고, 휨모멘트에 대하여 비조밀 단면(웨브는 조밀, 플랜지는 비조밀)을 갖는다. 이를 바탕으로 조합력에 대한 성능을 평가하기 위해 축력비가 0.3, 0.5, 0.8이 되도록 편심거리 e 를 조정하였다. 비탄성좌굴을 유도하기 위해 실험체 길이(L)는 실험체 단면 최대폭(B) 또는 높이(H)의 3.01~3.19배로 계획하였다. 용접 각형강관 단주실험체는 판재의 폭두께비(b/t)를 8, 18, 용접 H형강 단주실험체는 단면플랜지의 폭두께비(b/t_f)를 4, 6, 8과 웨브의 폭두께비(h/t_w)를 15, 20, 25로 설정하여 실험체를 제작하였다. 전체적인 단주 편심압축실험체 종류는 Table 1에 설치 상황은 Fig. 1에 나타났다. Table 1의 실험체명에서, SCB는 용접 각형강관 단면, SCH는 용접 H형 단면을 나타내며, HSA800은 고성능강을 나타낸다. 각형 강관 단면 실험체에서 8, 18은 플랜지의 폭두께비(b/t)를 의미하며, H형 단면 실험체에서 4, 6, 8은 플랜지의 폭두께비(b/t_f), 15, 20, 25는 웨브의 폭두께비(h/t_w)를 의미한다. E0.3, E0.5, E0.8은 각각 축력비 0.3, 0.5, 0.8을 의미한다. HSA800의 단주 편심압축 실험은 RIST 강구조 연구소의 실험실에 설치되어 있는 10,000kN UTM을 사용하여 실험을 진행하였다.

실험결과 얻어진 실험 소요압축강도(P_u)와 2차 효과를 고려하여 산정된 소요휨강도(M_u) 및 소성모멘트로 무차원화하여 얻어진 값을 Table 2에 정리하였다. 웨브높이(H)를 고정하고 플랜지폭(B)이 증가하는 경우(즉, 플랜지의 판폭두께비(b/t_f)가 증가)와 플랜지폭을 고정하고 웨브높이가 증가하는 경우(즉, 웨브의 판폭두께비(h/t_w)가 증가)에 있어서 최대압축하중(P_u)이 증가하는 경향을 보였다.

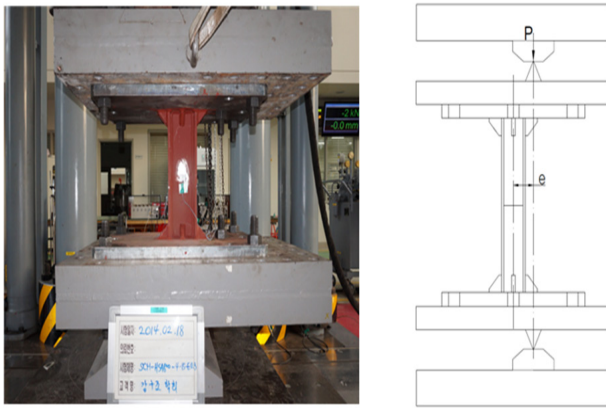


Fig. 1. Test set-up^[9]

Table 1. Built-up square hollow section and H-section stub columns for experiments^[9]

Specimen	Section geometry (H*B*tf*fw mm)	Length (mm)	Axial Force ratio
SCB-HSA800-8-E0.3	□-90x90x9	500	0.3
SCB-HSA800-8-E0.5	□-90x90x9	500	0.5
SCB-HSA800-8-E0.8	□-90x90x9	500	0.8
SCB-HSA800-18-E0.3	□-180x180x9	600	0.3
SCB-HSA800-18-E0.5	□-180x180x9	600	0.5
SCB-HSA800-18-E0.8	□-180x180x9	600	0.8
SCH-HSA800-4-15-E0.3	H-159x96x9x12	500	0.3
SCH-HSA800-4-15-E0.5	H-159x96x9x12	500	0.5
SCH-HSA800-4-15-E0.8	H-159x96x9x12	500	0.8
SCH-HSA800-6-20-E0.3	H-204x144x9x12	650	0.3
SCH-HSA800-6-20-E0.5	H-204x144x9x12	650	0.5
SCH-HSA800-6-20-E0.8	H-204x144x9x12	650	0.8
SCH-HSA800-8-25-E0.3	H-249x192x9x12	750	0.3
SCH-HSA800-8-25-E0.5	H-249x192x9x12	750	0.5
SCH-HSA800-8-25-E0.8	H-249x192x9x12	750	0.8

Table 2. Test results of Built-up square hollow section and H-section stub columns^[9]

Specimen	e (mm)	Pu (kN)	Mu (kN·mm)	Pu/Py	Mu/Mp
SCB-HSA800-8-E0.3	70	752	72787	0.37	1.37
SCB-HSA800-8-E0.5	30	1192	42345	0.59	0.79
SCB-HSA800-8-E0.8	5	1900	26720	0.94	0.50
SCB-HSA800-18-E0.3	150	1615	275279	0.38	1.19
SCB-HSA800-18-E0.5	65	2614	201125	0.62	0.87
SCB-HSA800-18-E0.8	15	3947	98146	0.93	0.42
SCH-HSA800-4-15-E0.3	140	853	138882	0.35	0.99
SCH-HSA800-4-15-E0.5	60	1388	93545	0.57	0.77
SCH-HSA800-4-15-E0.8	15	2124	46331	0.88	0.43
SCH-HSA800-6-20-E0.3	190	1328	289219	0.38	1.05
SCH-HSA800-6-20-E0.5	80	2119	200837	0.61	0.74
SCH-HSA800-6-20-E0.8	20	3318	96315	0.95	0.41
SCH-HSA800-8-25-E0.3	235	1627	419654	0.36	0.92
SCH-HSA800-8-25-E0.5	100	2803	314247	0.61	0.69
SCH-HSA800-8-25-E0.8	25	4369	151401	0.96	0.38

실험체의 결과는 2차 효과를 고려하여 휨모멘트를 산정한 후 식 (11a)와 식 (11b)를 이용, 소성모멘트 강도로 무차원화한 P-M 상관곡선을 나타내어 현행강구조기준과 비교하였다. Fig. 2는 실험체 중에서 SCH-8-25의 P-M 상관곡선을 나타내며, 이를 포함한 모든 실험체들이 현행강구조기준(실선)에서 상회하는 결과를 낳으며 축력비가 감소할수록 휨강도에 대해 충분한 여유를 갖고 있는 것을 확인하였다.

$$\frac{P_u}{P_n} \geq 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_u}{M_n} \right) \leq 1.0 \quad (11a)$$

$$\frac{P_u}{P_n} < 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$\frac{P_u}{2P_n} + \frac{M_u}{M_n} \leq 1.0 \quad (11b)$$

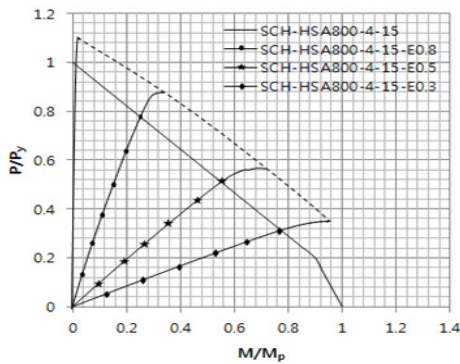
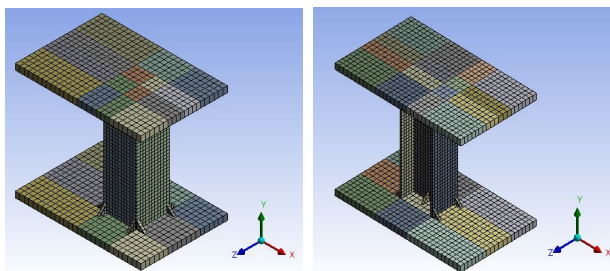


Fig. 2. P-M correlation diagram of SCH-8-25 series

3.2 단주의 편심압축 해석결과 및 검증

유한요소 해석 프로그램인 ANSYS(Ver. 14.5)를 사용하여 3차원 모델링을 수행하였고, 비선형 좌굴해석을 통해 조합력을 받는 용접 각형강관과 용접 H형강의 P-M 상관관계를 평가하기 위해 실험결과와 비교·분석하였다. 해석검증단계에서 비교한 모델은 총 6개로, 주요 변수요소인 축력비에 따라 조립 각형강관 SCB-HSA800-8과 조립 H형강 SCH-HSA800-8-25의 시리즈를 사용하였다. HSA800 강재의 응력-변형률 관계는 재료 인장시험 결과를 바탕으로 비선형 모델인 Multi-Linear Kinematic Hardening 모델을 사용하였고, 국부좌굴을 시뮬레이션하기 위해 대변위 해석(Large Deflection Analysis)을 수행하였다. 여기서 프와송비는 0.3, 항복조건은 von-Mises 이론을 적용하였다. 유한요소 모델은 실험체와 리브는 shell요소, base plate는 solid요소를 사용하였다. 메쉬 크기는 해석시간과 정확도를 위해 비교적 조밀한 크기(12mm x 12mm)로 결정하였다. shell요소를 적용한 단주의 해석모델은 Fig. 3과 같으며, 경계조건은 Bottom base plate의 U_z , U_y 를 구속시키고, Top base



(a) Model of Square-Shaped column (b) Model of H-Shaped column

Fig. 3. Typical FE model

Table 3. Comparison of test and analysis results

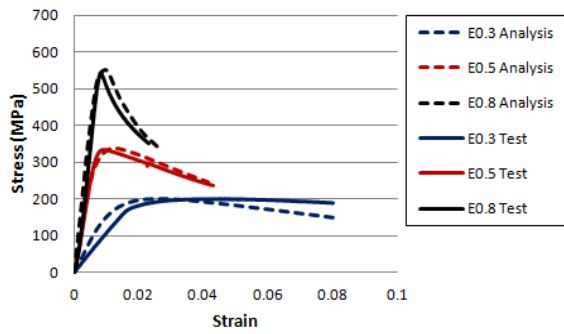
Specimen	Maximum Load : P_u		
	Analysis (kN)	Test (kN)	Error (%)
SCB-HSA800-8-E0.3	580.18	581.93	0.30
SCB-HSA800-8-E0.5	868.67	972.15	0.77
SCB-HSA800-8-E0.8	1413.50	1680.46	4.41
SCH-HSA800-8-25-E0.3	1606.60	1626.82	1.24
SCH-HSA800-8-25-E0.5	2792.90	2803.02	0.36
SCH-HSA800-8-25-E0.8	4247.20	4369.43	2.80

plate는 U_z 만을 구속시켰다. 편심하중은 실제실험의 가력 위치에서 변위하중으로 재하하여 비선형좌굴해석을 수행하였다.

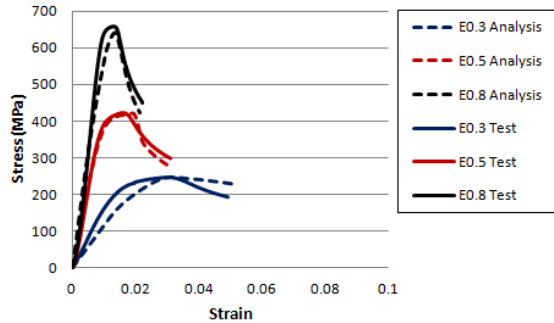
실험결과와 해석결과와 전체적인 비교로써 폭두께비와 축력비에 따른 응력(σ)-변형률(ϵ) 관계곡선은 각각 Fig. 4에 나타내었다(파선 : 해석결과, 실선 : 실험결과). 각각 최대압축하중(P_u)의 실험결과와 해석결과를 Table 3에서 비교하였다.

실험결과와 해석결과에서 항복 후 국부좌굴에 의해 응력이 감소되는 현상이 발생하였으며 전체적인 거동 및 초기강성, 최대응력이 비교적 정확히 일치하였다. 또한, 축력비가 커질수록 최대응력은 증가하나, 국부좌굴의 영향으로 좌굴 후의 응력이 급격하게 감소되는 현상이 발생하였다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 최대압축하중에 대한 실험결과와 해석결과와의 평균 오차는 약 1.65%로 해석모델의 검증 타당성을 확인하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 SCB-HSA800-8과 SCB-HSA800-8-25의 축력비 0.3에서 실험체들의 좌굴형상과 응력분포 실험결과와 해석결과와의 국부적인 비교를 위해 사용되었다. 응력이 집중된 위치와 좌굴형상이 실험결과와 해석결과가 유사한 것을 확인할 수 있었다. SCB-HSA800-8-E0.8의 경우, 단주 실험체 하단부에 최대응력이 발생하였고, SCH-HSA800-8-25-E0.8의 경우, 비대칭적으로 응력이 집중되며 단주 실험체 중간지점에서 플랜지 부분의 두드러지는 국부좌굴이 발생하였다. 해석모델이 실험결과를 정확하게 예측하고 있음을 전체적 비교결과와 국부적 비교결과를 통해 확인하였다. 유한요소 해석모델의 이러한 검증을 바탕으로, 다양한 폭두께비와 축력비를 조합하여 변수연구를 시행하였다.



(a) SCB-8 series S-S Curve

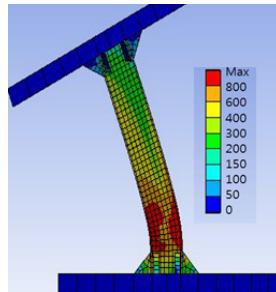


(b) SCH-8-25 series S-S Curve

Fig. 4. Comparison of Test and analysis in Stress-strain curves



(a) Test

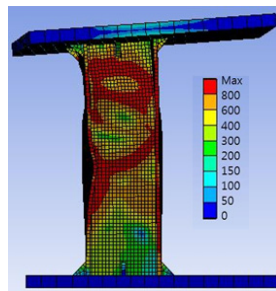


(b) FE analysis

Fig. 5. Shape of the local buckling (SCB-HSA800-8-E0.8)



(a) Test



(b) FE analysis

Fig. 6. Shape of the local buckling (SCH-HSA800-8-25-E0.8)

4. 변수연구

실험결과를 바탕으로 검증된 해석모델을 이용하여 변수 연구를 수행하였다. 실험결과와 모든 실험체가 압축력에 대해 비세장단면에 해당하였다. 변수연구에서는 압축력에 대해 비세장단면 뿐만 아니라 실험연구에서 다루지 못한 세장단면에 대한 변수연구를 추가하였다. 본 연구의 목적에 따라 폭두께비와 축력비를 변수로 지정하였다. 용접 각형강관 단주실험체는 판재의 폭두께비(b/t)를 23, 28, 용접 H형강 단주실험체는 단면플랜지의 폭두께비(b/t_f)를 4, 6, 8와 웨브의 폭두께비(h/t_w)를 15, 20, 25로 변수해석단면을 설정하였다(Table 4 참조). 용접 각형강관 단주실험체에서 판재의 폭두께비가 28일 때를 제외한 나머지 실험체들은 현행 강구조기준과 공칭항복강도 690MPa, 탄성계수 205GPa을 바탕으로 모두 압축력에 대해 비세장단면에 해당되었으며, 휨모멘트에 대하여 비조밀 단면을 갖는 것을 확인하였다. 변수해석 모델의 길이(L)는 비탄성좌굴을 유도하기 위한 단주실험체 제작을 위해 단면 최대폭(B) 또는 높이(H)의 3배로 계획하였고 조합력에 대한 성능 평가를 위해 축력비가 0.3, 0.5, 0.8이 되도록 편심거리 e 를 조정하였다.

4.1 변수연구 결과

최대압축하중(P_u)의 결과와 2차 효과를 고려하여 산정된 휨모멘트 (M_u) 및 소성모멘트로 무차원화하여 얻어진 값을 Table 5에서 정리하였다. 변수해석결과 폭두께비와 축력비에 따른 응력(σ)-변형률(ϵ) 관계곡선을 Fig. 7에 나타내었고 변수 중 SCB-HSA800-23 모델과 SCH-HSA800-6-15 모델만을 나타내었다.

Fig. 7을 통해, 각형강관 단면, H형강 단면을 갖는 해석모델 모두 축력비가 클수록 좌굴 후의 응력감소가 두드러지는 것을 확인할 수 있다.

Table 5에서 보듯이, 각형강관의 경우 판재의 폭두께비가 증가할수록, H형관의 경우 플랜지의 폭두께비와 웨브의 폭두께비가 증가 할수록 최대 압축하중(P_u)이 증가하는 결과를 얻었다.

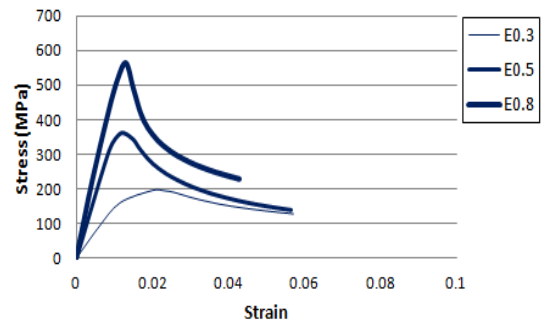
변수모델의 해석결과는 2차 효과를 고려하여 휨모멘트를 산정한 후 식 (11a)와 식 (11b)를 이용하여 소성모멘트 강도로 무차원화한 P-M 상관곡선을 나타내었으며, 식 (11)에서 세장판 단면 H형강 단주의 무차원화 한 압축강도 비(P_u/P_n)와 무차원화 한 휨강도 비(M_u/M_n) 사이의 상호작용에 대한

곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 공칭휨강도 M_n 은 항복, 횡비틀림좌굴, 플랜지국부좌굴, 웹국부좌굴 등 4가지 한계상태강도 가운데 최소값으로 규정되는데, 모든 변수모델은 압축플랜지의 국부좌굴이 지배한다고 가정하였다. 공칭 압축강도 P_n 은 세장기둥의 여부, 좌굴방향, 비틀림좌굴과 횡비틀림좌굴 한계상태 등을 고려하여 산정되며, 비틀림이 구속된 강축 힘을 받는 비조밀단면의 단주일 경우, P_n 은 P_y 와 동일하다. 그러나, 용접 각형강관 모델 SCB-HSA800-28는 항복강도 690GPa, 탄성계수 205GPa을 기준으로 현행강구조기준에서 세장관 요소이기 때문에, 강도저감(Q_a)을 고려한 유효폭(b_e)을 산정하여 압축강도(P_n)을 확인하였다.

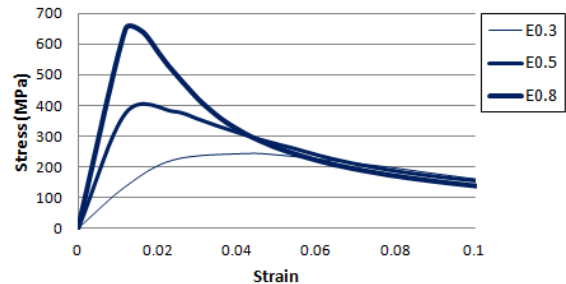
변수 실험체의 편심압축해석 결과의 최대값을 이어 Fig. 8의 점선으로 나타내었다. 변수모델의 P-M 상관도 결과, 용접 H형강 단주의 경우, 압축력에 대해 비세장단면은 모두 현행기준의 요구에서 상회하는 결과를 얻었고 축력비가 낮을수록 휨강도비에 충분한 여유를 갖는 것을 확인하였다. 하지만, 용접 각형강관 단주의 경우, 모델 SCB-HSA800-23은 현행기준을 만족하는 결과를 얻었지만, 유일한 세장관 단면

Table 4. Analytical models for parametric study

Specimen	Section geometry (H*B*tf*fw mm)	L (mm)	Axial Force ratio	e (mm)
SCB-HSA800-23-E0.3	□-225x225x9	700	0.3	185
SCB-HSA800-23-E0.5	□-225x225x9	700	0.5	75
SCB-HSA800-23-E0.8	□-225x225x9	700	0.8	20
SCB-HSA800-28-E0.3	□-270x270x9	850	0.3	215
SCB-HSA800-28-E0.5	□-270x270x9	850	0.5	95
SCB-HSA800-28-E0.8	□-270x270x9	850	0.8	25
SCH-HSA800-4-20-E0.3	H-204x96x9x12	650	0.3	195
SCH-HSA800-4-20-E0.5	H-204x96x9x12	650	0.5	85
SCH-HSA800-4-20-E0.8	H-204x96x9x12	650	0.8	20
SCH-HSA800-4-25-E0.3	H-249x96x9x12	750	0.3	235
SCH-HSA800-4-25-E0.5	H-249x96x9x12	750	0.5	100
SCH-HSA800-4-25-E0.8	H-249x96x9x12	750	0.8	25
SCH-HSA800-6-15-E0.3	H-159x144x9x12	500	0.3	165
SCH-HSA800-6-15-E0.5	H-159x144x9x12	500	0.5	70
SCH-HSA800-6-15-E0.8	H-159x144x9x12	500	0.8	20
SCH-HSA800-6-25-E0.3	H-249x144x9x12	750	0.3	250
SCH-HSA800-6-25-E0.5	H-249x144x9x12	750	0.5	105
SCH-HSA800-6-25-E0.8	H-249x144x9x12	750	0.8	25
SCH-HSA800-8-15-E0.3	H-159x192x9x12	600	0.3	170
SCH-HSA800-8-15-E0.5	H-159x192x9x12	600	0.5	75
SCH-HSA800-8-15-E0.8	H-159x192x9x12	600	0.8	20
SCH-HSA800-8-20-E0.3	H-204x192x9x12	650	0.3	215
SCH-HSA800-8-20-E0.5	H-204x192x9x12	650	0.5	95
SCH-HSA800-8-20-E0.8	H-204x192x9x12	650	0.8	25



(a) SCB-23 series S-S Curve

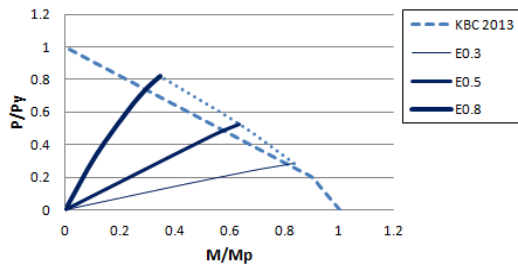


(d) SCH-6-15 series S-S Curve

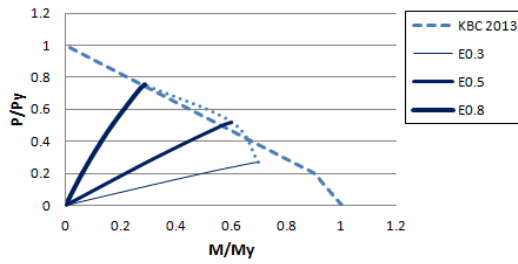
Fig. 7. Analysis results of parametric study in stress-strain curves

Table 5. Results of Analysis models for parametric study

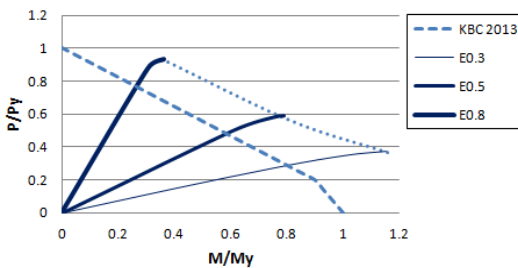
Specimen	e (mm)	Pu (kN)	Mu (kN·m)	Pu /Py	Mu /Mp
SCB-HSA800-23-E0.3	185	1534	307	0.28	0.83
SCB-HSA800-23-E0.5	75	2818	234	0.53	0.64
SCB-HSA800-23-E0.8	20	4391	128	0.82	0.35
SCB-HSA800-28-E0.3	215	1573	375	0.27	0.70
SCB-HSA800-28-E0.5	95	3067	322	0.52	0.60
SCB-HSA800-28-E0.8	25	4432	154	0.75	0.29
SCH-HSA800-4-20-E0.3	195	1019	235	0.37	1.16
SCH-HSA800-4-20-E0.5	85	1602	164	0.56	0.81
SCH-HSA800-4-20-E0.8	20	2525	80	0.93	0.36
SCH-HSA800-4-25-E0.3	235	1134	315	0.37	1.18
SCH-HSA800-4-25-E0.5	100	1781	216	0.60	0.81
SCH-HSA800-4-25-E0.8	25	2779	109	0.93	0.39
SCH-HSA800-6-15-E0.3	165	1138	212	0.35	1.04
SCH-HSA800-6-15-E0.5	70	1783	146	0.55	0.72
SCH-HSA800-6-15-E0.8	20	3034	84	0.94	0.39
SCH-HSA800-6-25-E0.3	250	1389	399	0.37	1.11
SCH-HSA800-6-25-E0.5	105	2250	270	0.59	0.75
SCH-HSA800-6-25-E0.8	25	3579	127	0.95	0.35
SCH-HSA800-8-15-E0.3	170	1315	251	0.33	0.96
SCH-HSA800-8-15-E0.5	75	2100	176	0.52	0.67
SCH-HSA800-8-15-E0.8	20	3336	87	0.83	0.33
SCH-HSA800-8-20-E0.3	215	1411	333	0.32	0.94
SCH-HSA800-8-20-E0.5	95	2366	249	0.55	0.70
SCH-HSA800-8-20-E0.8	25	3811	129	0.88	0.36



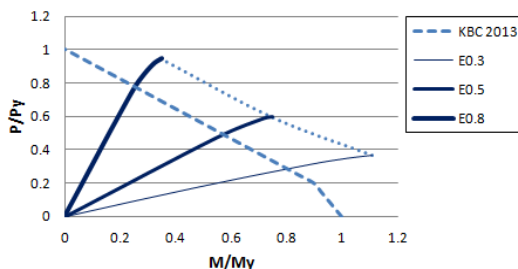
(a) SCB-23 series P-M correlation diagram



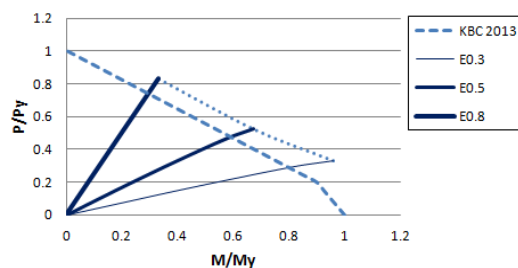
(b) SCB-28 series P-M correlation diagram



(c) SCH-4-20 series P-M correlation diagram



(d) SCH-6-25 series P-M correlation diagram



(e) SCH-8-25 series P-M correlation diagram

Fig. 8. P-M correlation diagram of parametric studies

각형강관 모델 SCB-HSA800-28의 경우, 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 휨과 압축력을 받는 인장강도 HSA800급 고성능강 단주의 거동을 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 단주편심압축실험을 통해 검증된 해석연구를 바탕으로 실험 연구에서 다루지 못한 다양한 폭두께비와 축력비에 대한 변수연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 전체적인 비교로써, 응력-변형을 곡선에서 실험결과와 해석결과 모두 항복 후 국부좌굴에 의해 응력이 감소되는 현상이 발생하였으며 전체적인 거동 및 초기강성은 비교적 정확히 일치하였다. 또한, 축력비가 커질수록 최대응력은 증가하며 국부좌굴의 영향으로 좌굴 후 응력이 급격하게 감소하는 거동을 보였다. 최대압축하중에 대한 실험결과와 해석결과와의 평균 오차는 약 1.65%로 해석모델의 검증 타당성을 확인하였다. 국부적인 비교결과, 응력 집중과 좌굴형상이 실험결과와 해석결과가 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 해석모델이 실험결과를 정확하게 예측하고 있음을 전체적 비교결과와 국부적 비교결과를 통해 알 수 있었다.
- (2) 변수모델의 P-M 상관도 분석결과, 용접 H형강 단주의 경우, 압축력에 대한 비세장단면은 모두 현행기준의 요구에서 크게 상회하는 결과를 얻었고 축력비가 낮을수록 휨강도비에 충분한 여유를 갖는 것을 확인하였다. 압축력에 대한 세장판 단면을 갖는 각형강관의 경우, 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.
- (3) 변수모델의 P-M 상관도 분석결과, 용접 각형강관 단주의 경우, 모델 SCB-HSA800-23은 현행기준을 만족하는 결과를 얻었지만, 유일한 세장판 단면 각형강관 모델 SCB-HSA800-28의 경우, 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 건설교통기술촉진연구사업(11기술표준

화01-01)에 의한 고성능강재의 건설구조 적용을 위한 휨재 및 압축재의 LRFD 설계기준 표준화의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Choi, J.-K., Seo, D.-H., Lee, J.-S., Um, K.-K., and Choo, W.-Y. (2002) Development of Ultrafine-Grained Structural Steel at POSCO, *Proceedings of 4th Workshop on the High Performance Structural Steels for 21st Century*, Pohang, Korea, January 17-19, pp.99-102.
- [2] 대한건축학회(2013) 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2013). Architectural Institute of Korea (2013) Korea Building Code and Commentary - Structural (in Korean).
- [3] AISC (2010) American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings.
- [4] 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 the Korean Society of Steel Construction*, Vol.13, No.3, pp.223-232 (in Korean).
- [5] 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 the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.3, pp.357-363 (in Korean).
- [6] 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 the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.23-34 (in Korean).
- [7] 유정한, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2012) 국부좌굴을 고려한 건축구조용 고성능강(HSA800) 조립각형강관 압축재의 적용성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.223-231.
Yoo, J.H., Kim, J.W., Yang, J.K., Kang, J.W., and Lee, D.W. (2012) Evaluation on Applicability of Built-up Square Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steel Considering Local Buckling, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.223-231 (in Korean).
- [8] 김태수, 이명재, 오영석, 이강민, 김도환(2012) 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 H형강 기둥의 압축강도에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, 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 the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.627-636 (in Korean).
- [9] 이강민, 홍성빈, 이명재, 오영석, 오근영(2014) 편심하중을 받는 건축구조용 고성능 강재(HSA800) 단주의 거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제4호, pp.289-297.
Lee, K.M., Hong, S.B., Lee, M.J., Oh, Y.S., and Oh, K.Y. (2014) A Experimental Study on the Structural Behavior of Stub Columns with HSA800 High Performance Steels under Eccentric Loads, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.289-297 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 건축구조용 고성능강 HSA800의 건축구조부재로의 적용을 위한 연구로써, 용접 제작된 각형강관 및 H형강에 대해 단주편심압축 실험을 바탕으로 해석모델을 이용한 검증이 이루어졌다. 특히, 고성능강 조립단주의 유한요소해석을 이용한 변수연구와 P-M 상관관계로부터 현행 기준의 적용여부를 평가하고자 하였으며, 폭두께비와 축력비를 주요변수로 두었다. 변수모델의 P-M상관도 분석결과, 압축력에 대한 비세장단면은 모두 현행기준의 요구에서 크게 상회하는 결과를 얻었고 축력비가 낮을수록 휨강도비에 충분한 여유를 갖는 것을 확인하였다. 압축력에 대한 세장판 단면을 갖는 각형강관의 경우, 현행기준의 요구에 못 미치는 결과를 보였다.

핵심용어 : 고성능강, 단주, 편심하중, 폭두께비, 축력비, 3차원 비선형 유한요소해석