



중심압축을 받는 고강도강 중간주의 좌굴강도 평가

김대경¹ · 이철호^{2*} · 한규홍³ · 김진호⁴ · 이승은⁵ · 김진원⁶

¹박사과정, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 서울대학교, 건축학과, ³박사, 서울대학교, 건축학과,
⁴상무, POSCO 강건재열연마케팅실 강건재열연솔루션 그룹, ⁵수석연구원, POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC,
⁶책임연구원, POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC

Buckling Strength of Concentrically Loaded High-Strength Steel Columns with Intermediate Slenderness

Kim, Dae Kyung¹, Lee, Cheol Ho^{2*}, Han, Kyu Hong³, Kim, Jin Ho⁴, Lee, Seung Eun⁵, Kim, Jin Won⁶

¹Ph.D., Candidate, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²Professor, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

³Ph.D., Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

⁴Director, Steel Business Division Hot Rolled and Construction Steel Material Marketing Dept., POSCO, Seoul, 135-777, Korea

⁵Sr. Researcher, POSCO Steel Solution Marketing Department, Incheon, 406-840, Korea

⁶Sr. Researcher, POSCO Steel Solution Marketing Department, Incheon, 406-840, Korea

Abstract - In this study, inelastic buckling strength of HSA800 steel columns were tested to investigate the applicability of current column curve (KBC2009, 2010 AISC-LRFD) to HSA800 steel. Key test variables included width-thickness ratio, plate-edge restraints, and column slenderness ratio. Specimens made of ordinary steel (SM490) were also tested for comparison purposes. All the concentrically loaded HSA800 specimens exhibited sufficient buckling strength compared to the current column curve, but some of SM490 specimens showed understrength. This difference can be explained by the lower residual stress present in HSA800 specimens.

Keywords - High-strength steel, Column test, Buckling strength, Effective buckling length, Residual stress

1. 서론

최근 국내의 건축물은 초고층화 및 장스팬화 경향으로 부재에 높은 축력과 휨모멘트가 요구되고 있다. 이러한 수요를 만족시키기 위하여 인장강도 800MPa급의 건축용 고강도강재가 개발되어 이를 현장에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 고강도강재의 건축구조적용과 관련하여 연구되어

야할 부분은 소재레벨에서 부재, 접합에 이르기까지 다양하다. 그 중 고강도강재의 성능을 충분히 발휘한 경제적 설계의 방안으로 압축력을 받는 부재(가령 기초말뚝, 기둥, 트러스, 아웃리거 등)를 중심으로 고강도강재 적용의 필요성이 증대되고 있다.

일반강재의 응력-변형률 곡선에 기초를 하고 있는 현행 설계기준(KBC2009^[1], 2010 AISC-LRFD^[2])의 단면분류 및 좌굴강도식을 고강도강재에 대해 적용가능한지 여부를 평가할 필요가 있다. 이와 관련한 선행연구로서 국내에서는 인장강도 800MPa급 고강도강재(HSA800)의 조립단주에 대한 성능평가가 주로 진행되었다.

Lee *et al.*^[3] 및 Kim *et al.*^[4]은 고강도강재 조립단주의 국부좌굴 특성을 규명하기 위해 중심 및 편심압축을 받는 고강도단주 실험연구를 진행하였으며, 비탄성좌굴에 영향을 미

Note.-Discussion open until February 28, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 16, 2015; revised May 15, 2015; approved on July 1, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

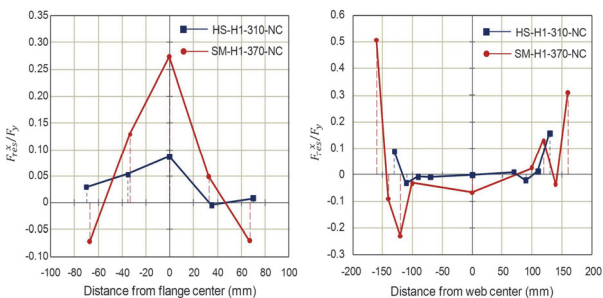
Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-878-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

치는 잔류응력 특성이 항복강도와 관련하는지에 대한 연구를 수행한 바 있다. 고강도강재(HSA800)로 제작된 단주시험체의 중심압축시험 결과 현행 구조설계기준의 국부좌굴강도보다 월등히 높은 강도를 나타냈으며, 오히려 일반강재(SM490)로 제작된 단주시험체의 일부는 설계기준의 강도에 못 미치는 결과를 보였다. 휨-압축 조합내력을 평가하기 위해 실시된 H형 단면 편심압축시험의 경우 압축 및 휨 모두에 대해 비콤팩트 단면이었음에도 콤팩트 단면의 $P-M$ 상관관계까지도 만족시키는 결과를 나타내었다. 한편 KBC2009 및 AISC2010 등 대부분의 기준에서 강재 항복강도(F_y)의 30%($0.3F_y$)로 적용하고 있는 잔류응력의 크기에 대해 항복강도와 관계는 명확하지 않다는 것이 Rasmussen and Hancock^[5]이 밝힌 바 있으며, 이를 비파괴 잔류응력 측정을 통해 항복강도와 잔류응력이 무관하다는 것을 재확인하였다 (Fig. 1).

또한 Yoo *et al.*^{[6],[7]}은 박스형단면을 갖는 용접 단주를, Kim *et al.*^[8]과 Lee *et al.*^[9]은 용접H형 단면 단주의 국부좌굴강도를 실험 및 유한요소해석을 통해 평가하였다. 각 연구에서 실험결과와 해석결과의 차이가 크지 않았으며, 초기결함의 크기에 따라 강도차이가 나타났지만 현행설계기준의 요구강도를 모두 상회하였다.

현행 구조설계기준(KBC2009^[1], 2010 AISC-LRFD^[2])의 기둥의 좌굴강도식 또한 국부좌굴강도식과 마찬가지로 일반강재의 응력-변형률 곡선 및 잔류응력 크기 가정(항복강도의 30%, $0.3F_y$)에 기초를 하고 있다. 아래의 논의에서 보듯이 현행 설계기준에 의할 때 비탄성좌굴영역에서 항복강도가 높아질수록 기둥곡선에서 무차원세장비(λ_c)가 증가하여 저평가되므로 고강도강재의 사용이 불리해지는 문제가 있다. 따라서 기둥으로서 고강도강재의 사용에 대해 현행기준의 적용가능성 여부를 평가할 필요가 있다.



(a) Residual stress in flange (b) Residual stress in web
Fig. 1. Distribution of normalized residual stress (normalized by the yield stress of steel)^[3]

2. 실험 계획

2.1 실험 목적

본 실험은 중심압축을 받는 고강도강재(HSA800) 기둥의 세장비에 따른 좌굴 내력을 평가하고, KBC2009^[1](2010 AISC-LRFD^[2]) 기준에 따라 압축재로 설계가능한지 여부를 판단하는 것이 주 목표이다.

고강도강재의 응력-변형률 곡선의 형태는 일반강재의 형태와 다르게 나타난다. 기존의 압축재 좌굴식은 일반강재의 응력-변형률과 잔류응력 특성에 기반을 두고 있으므로 고강도강재에 기존의 압축재 좌굴식을 적용하기는 어렵다. 이와 관련해 2010 AISC-LRFD^[2]에서는 좌굴 식을 항복강도 450MPa 이하의 일반강재에 적용할 것으로 제한하고 있다.

현행 설계기준에서 압축을 받는 기둥은 강도로 무차원한 세장비(Slenderness ratio, λ_c) 1.5를 기준으로 비탄성좌굴 영역(식 (1), 단주 또는 중간주)과 탄성좌굴(식 (2), 장주)로 구분한다(Fig. 2). 비탄성좌굴식(식 (1))을 보면 항복강도(F_y)가 커질수록 무차원세장비(λ_c)가 커지고, 좌굴강도(F_{cr})는 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 중간주 설계 시 항복강도가 높은 고강도강재의 사용이 일반강재 사용보다 불리하게 작용함을 알 수 있다.

$\lambda_c \leq 1.5$ 또는 $F_e \geq 0.44F_y$ 일 때

$$\frac{F_{cr}}{F_y} = 0.658 \frac{F_y}{F_c} = 0.658 \lambda_c^2 \tag{1}$$

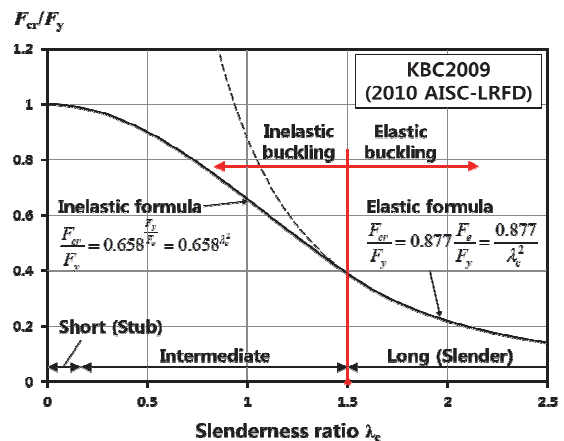


Fig. 2. Column curve of KBC2009 (2010 AISC-LRFD) specification

$\lambda_c > 1.5$ 또는 $F_c < 0.44F_y$ 일 때

$$F_{cr} = 0.877F_c \text{ or } \frac{F_{cr}}{F_y} = \frac{0.877}{\lambda_c^2} \quad (2)$$

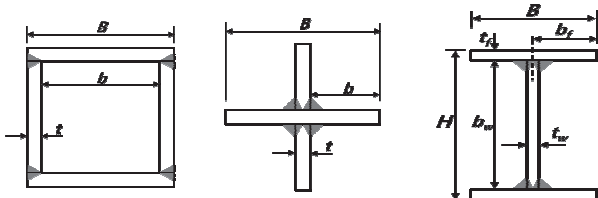
여기서, 오일러 좌굴하중 $F_c = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$

$$\text{무차원세장비 } \lambda_c = \frac{1}{\pi} \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{F_y}{F_c}}$$

건물 설계 시 기둥의 단면 강도를 충분히 활용하고, 기둥의 하중 재하능력을 확보하기 위해 기둥을 비탄성좌굴영역(중간주)으로 설계하는 것이 일반적이며, 탄성좌굴영역(장주)으로 설계하는 경우는 극히 드물다. 고강도강재의 효율적 사용을 위해, 중간주 좌굴을 제어할 수 있도록 고강도강재가 갖는 재료적 특성을 반영한 기둥좌굴곡선을 설계용도에 부합되도록 정립해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 우선 현행 기준 적용가능성 여부를 평가하고자 한다.

2.2 실험 설계

압축을 받는 강부재 단면의 경우 단면을 이루는 플레이트의 구속조건에 따라 구속판요소와 비구속판요소로 구분하며, 플레이트의 판폭두께비에 따라 비콤팩트단면, 세장단면으로 구분한다. 구속판요소는 플레이트 양 끝이 다른 부재에 의해 일체화된 경우이며, 비구속판요소는 플레이트의 한쪽 끝만 일체화된 경우이다. 상이한 좌굴거동을 보이는 두 구속조건을 반영하기 위해 실험체 단면을 박스형, 십자형, H형 세 가지로 구성하였다. Fig. 3에서 보듯이 박스형 단면은 구속판요소로만 이루어졌으며, 십자형은 비구속판요소로만 이루어진 단면이다. H형 단면의 경우 웨브는 구속판요소, 플랜지는 비구속판요소로서 이루어진 조합단면이다. 플레이트의 판폭두께비 구분에 따른 세장단면의 경우에는 전 단



(a) Box-section (b) Cruciform-section (c) H-section

Fig. 3. Specimen cross sections for concentric load tests

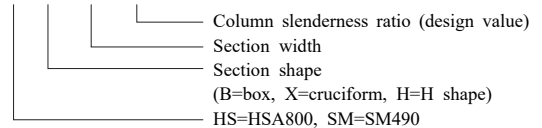
면이 항복하기 전에 국부좌굴이 발생하므로 설계기준에서는 강도저감계수를 도입하여 세장한 단면을 갖는 기둥부재 강도에 이를 반영하고 있다.

Table 1은 중심압축실험체 일람이다. 본 연구에서는 국부좌굴이 발생하지 않는 정방형 비콤팩트 단면형상(박스형, 십자형, H형) 기둥의 좌굴강도에 대해 평가한다. 기둥 세장비와 단면형상에 따라 고강도강재와 일반강재의 좌굴거동이 상이한지 알아보기 위해 현행 구조설계기준^{[1],[2]}에 따라 고강도강재(HSA800) 실험체를 설계하였다. 비교실험체로 일반강재(SM490) 실험체를 고강도강재 실험체의 단면사이즈(판폭두께비) 및 세장비와 동일하도록 설계하였다. 설계 시 고강도강재(HSA800)과 일반강재(SM490)의 공칭항복강도($F_{y,n}$)를 각각 690MPa, 325MPa로 하여 비탄성 좌굴영역인 세장비 0.6, 0.95, 1.3이 될 수 있도록 하였다. 용접재는 충분히 오버매칭되도록 선택하였고, 모든 실험체는 두께 15mm의 플레이트를 FCAW 방식으로 CJP 용접하여 제작하였다.

Table 1. Test matrix for concentric load tests

Specimen shape	Specimen designation	Length L (mm)	λ_c	Nominal buckling strength $P_{cr,m}$ (kN)
Box	HS-B1-240-0.60	3,000	0.609	7,975
	HS-B2-160-0.95		0.942	4,139
	HS-B3-120-1.30		1.295	2,154
	SM-B1-240-0.60	4,400	0.613	3,748
	SM-B2-160-0.95		0.949	1,940
Cruciform	HS-X1-220-0.60	1,500	0.612	3,760
	HS-X2-140-0.95		0.950	1,880
	HS-X3-100-1.30		1.309	935
	SM-X1-220-0.60	2,200	0.616	1,767
	SM-X2-140-0.95		0.956	881
H	HS-H1-220-0.60	3,000	0.617	5,559
	HS-H2-150-0.95		0.933	3,019
	HS-H3-110-1.30		1.318	1,500
	SM-H1-220-0.65	4,400	0.621	2,613
	SM-H2-150-0.95		0.940	1,415

Note: HS-B1-220-0.60



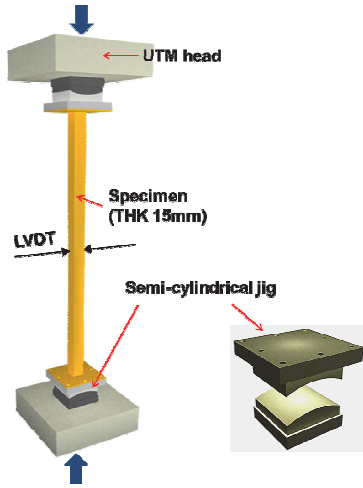


Fig. 4. Test setup for concentric load tests and geometry of semi-cylindrical jig

실험체 셋팅은 Fig. 4와 같이 하였다. 양단힌지조건인 구형 및 강축으로 좌굴을 유도하기 위해 나이프엣지 지그를 사용하고자 하였으나 실험 당시 지그에 문제가 발생하여 사용이 불가하였다. 이를 우회하는 방안으로서 Fig. 4와 같은 일방향 반원통형 지그를 사용하였다. 실험체 중앙에 변위계를 설치하여 좌굴 시점을 계측하였다.

3. 실험 결과

3.1 소재인장실험 결과

본 실험에 앞서 고강도강재(HSA800)와 일반강재(SM490)의 재료물성치를 파악하여 기둥실험 결과를 평가하기 위해 소재인장실험을 수행하였다. 실험체 제작에 사용한 강재와 동일한 모재에서 시편을 레이저로 절취하였으며, 금속재료인장시험편 규정 KS B 0802:2003^[10]에 따라 1A호로 제작하였다. 시편의 변형률은 신율계로 측정하였다. 실험결과 값의 신뢰도를 확보하기 위해 각 강종에 대해 3개 시편을 테스트하였다. 다음 Fig. 5와 Table 2는 각 3개 시편 결과에 대한 평균값이다.

소재인장실험 결과 SM490은 뚜렷한 항복구간을 갖는 것에 반해 HSA800은 항복점과 항복참이 명확하지 않은 고강도강재의 전형적인 특성을 보였다. 실측된 항복강도($F_{y,m}$)는 공칭항복강도($F_{y,n}$)에 대해 HSA800의 경우 약 25%, SM490의 경우 약 49% 상회하는 것으로 나타났으며, 인장강도는 두 강종 모두 12% 상회하였다.

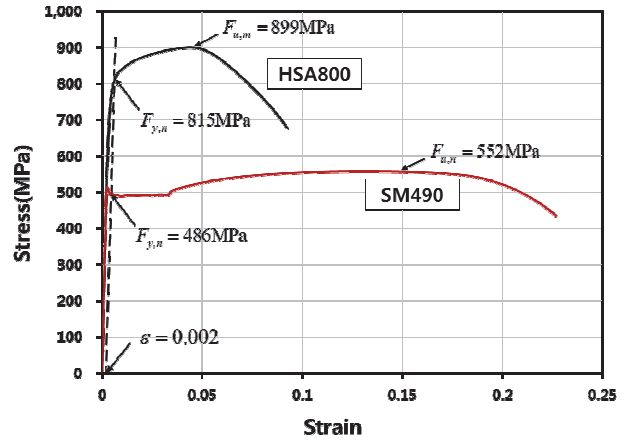


Fig. 5. Measured average stress-strain relationships

Table 2. Tensile coupon test results

Steel	Elastic modulus E (MPa)	Yield stress $F_{y,m}$ (MPa)	Tensile stress $F_{u,m}$ (MPa)	Yield ratio YR
HSA800	207,355	815	899	0.906
SM490	216,895	486	552	0.880

3.2 중심압축실험 결과

소재인장실험 결과 각 강종의 항복강도 값이 공칭항복 값을 크게 상회하였다. 이를 반영하여 설계기준 좌굴강도 및 세장비를 재산정하여 실험결과와 비교하였다. 실험체 가력은 최대하중 도달 후 최대하중의 80%에서 중지하였다.

3.2.1 박스형 단면 실험체

Fig. 6은 각 박스형 실험체의 최대하중에서의 모습으로 HS-B1-240-0.60 실험체를 제외한 모든 실험체는 좌굴이 뚜렷하게 나타났다. HS-B1-240-0.60는 좌굴이 발생하기 전 UTM 최대가력크기 9,983kN(1,000ton)에 도달하여 실험이 종료되었다.

좌굴 개시점 및 좌굴하중은 다음 Fig. 4와 같이 실험체 중앙에 설치한 횡변위계를 통해 계측하였다. Fig. 7은 HS-B3-120-1.30 실험체의 하중-횡변위 곡선으로, 강도가 상승하다가 좌굴이 일어난 시점부터 힘-압축에 의해 비선형적으로 변위가 증대됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 실험체의 하중-변위 그래프로 Fig. 7의 과정과 동일하게 횡변위 계측을 통해 구한 좌굴하중 및 좌굴 개시점을 표시하였다. Table 3의 세장비(λ_c), 좌굴강도와 항복

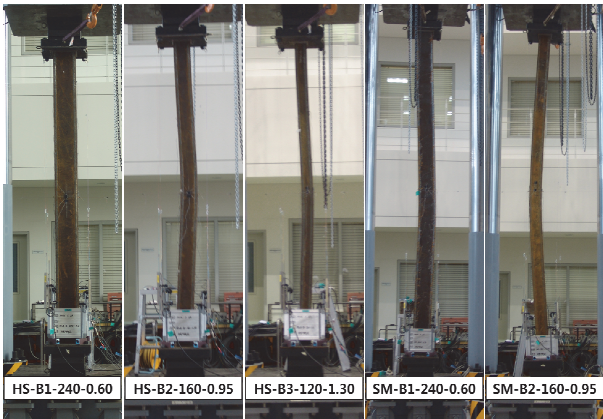


Fig. 6. Buckling modes of box shape specimens at the ultimate load

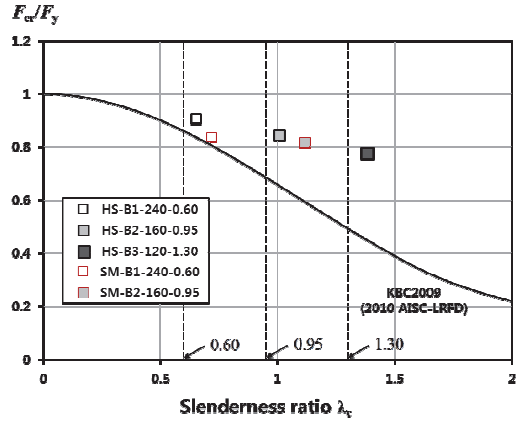


Fig. 9. Comparison with test strengths for box-shape specimens and column curve of KBC2009 (2010 AISC) design standards

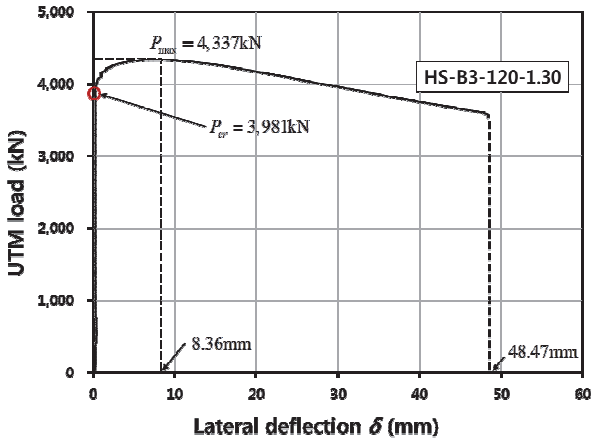


Fig. 7. Measured UTM load and column lateral deflection relationship of HS-B3-120-1.30 specimen for estimating buckling initiation

강도의 비($F_{cr,m}/F_{y,m}$)는 각 실험체의 실제 항복강도를 반영한 값이다.

모든 박스형 실험체는 설계기준 좌굴강도를 충분히 만족시켰다(Fig. 9). HS-B1-240-0.60 실험체의 경우에는 기기의 최대가력하중에 도달하여 실험이 중단되었음에도 불구하고 설계강도를 8% 상회하는 결과를 보여주었다. 박스형 HSA800 실험체와 SM490 실험체의 좌굴강도가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으며, 세장비가 클수록 설계좌굴강도와의 차이가 크게 나타났다.

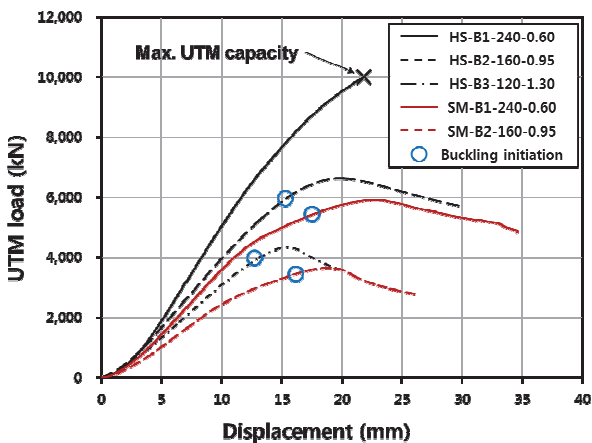


Fig. 8. Load vs. displacement relationship of box shape specimens with buckling initiation point

3.2.2 십자형 단면 실험체

Fig. 10은 십자형 단면 실험체의 최대하중에서의 좌굴형상이며, 박스형 단면 실험체와 마찬가지로 횡변위 분석을 통

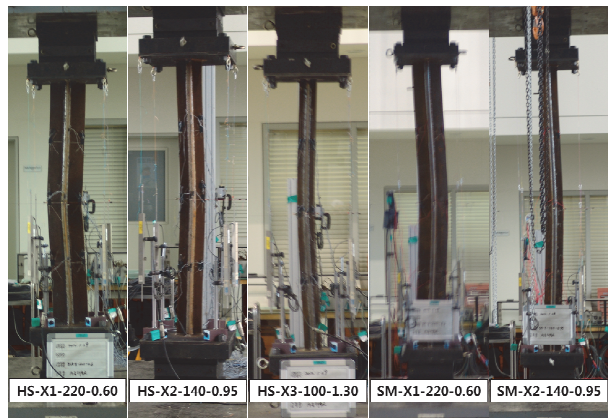


Fig. 10. Buckling modes of cruciform shape specimens at the ultimate load

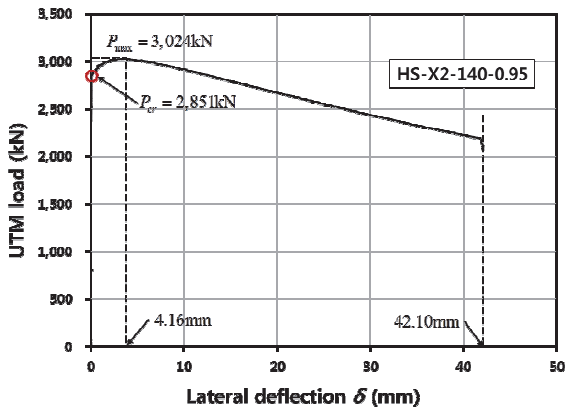


Fig. 11. Measured UTM load and column lateral deflection relationship of HS-X2-140-0.95 specimen for estimating buckling initiation

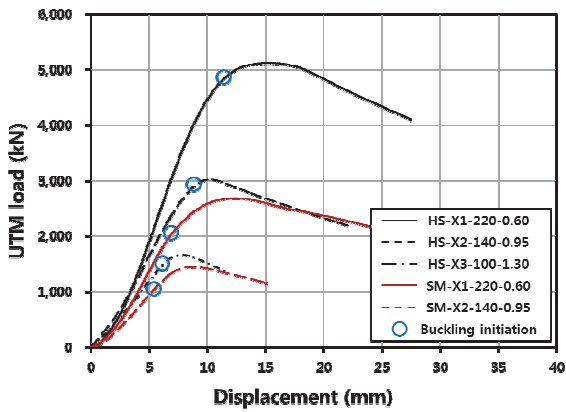


Fig. 12. Load vs. displacement relationship of cruciform shape specimens with buckling initiation point

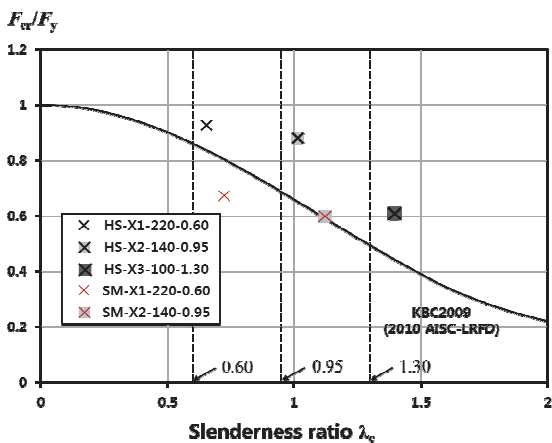


Fig. 13. Comparison with test strengths for cruciform-shape specimens and column curve of KBC2009 (2010AISC) design standards

해 좌굴시점과 좌굴강도를 계측하였다(Fig. 11, Fig. 12). HSA800으로 제작된 십자형 실험체는 모두 설계기준강도를 충분히 상회하였으나, SM-X1-220-0.60 실험체의 좌굴강도는 기준좌굴강도보다 16% 하회하는 결과를 보였다(Table 4). 박스형 단면의 결과와는 달리 십자형 실험체의 경우 HSA800 실험체가 SM490 실험체보다 좌굴강도가 월등히 높게 나타났다(Fig. 13).

3.2.3 H형 단면 실험체

모든 H형 단면 기둥실험체는 강축으로 설계하여 강축좌굴을 유도하였음에도 불구하고 약축으로 좌굴이 발생하였다(Fig. 14). 그 일례로 Fig. 15는 HS-H3-110-1.30 실험체의 강축 휨 횡변위, Fig. 16은 약축 휨 횡변위 그래프로 두 그림을 보면 약축 좌굴이 지배하였음을 알 수 있다. 이 현상은

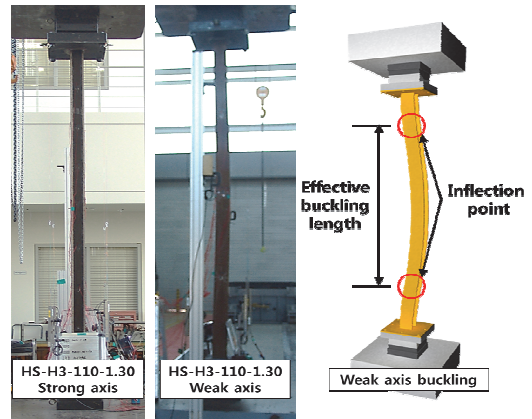


Fig. 14. Buckling shapes of H-shape specimen (HS-H3-110-1.30) governed by the weak axis buckling at the ultimate load

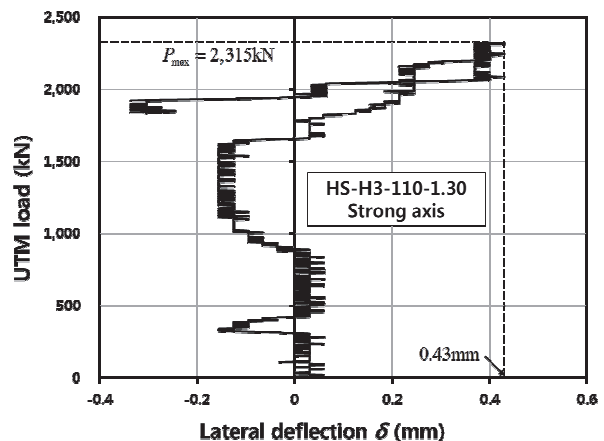


Fig. 15. Measured UTM load and column lateral deflection (strong axis) relationship of HS-H3-110-1.30 specimen

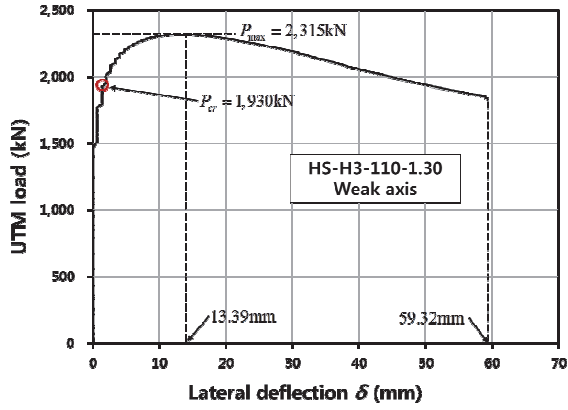


Fig. 16. Measured UTM load and column lateral deflection (weak axis) relationship of HS-H3-110-1.30 specimen for estimating buckling initiation

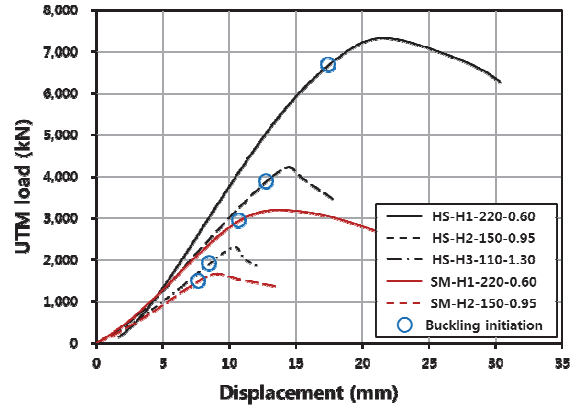


Fig. 18. Load vs. displacement relationship of cruciform shape specimens with weak axis buckling initiation point

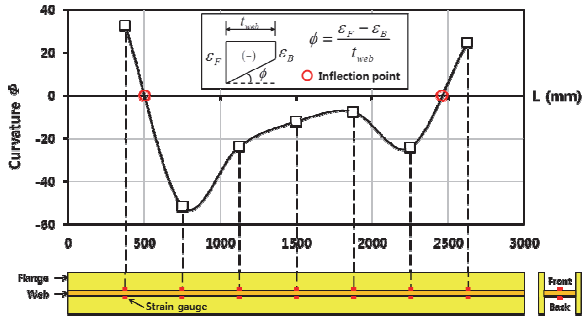


Fig. 17. Curvature measured by web strain gauges for calculating effective buckling length

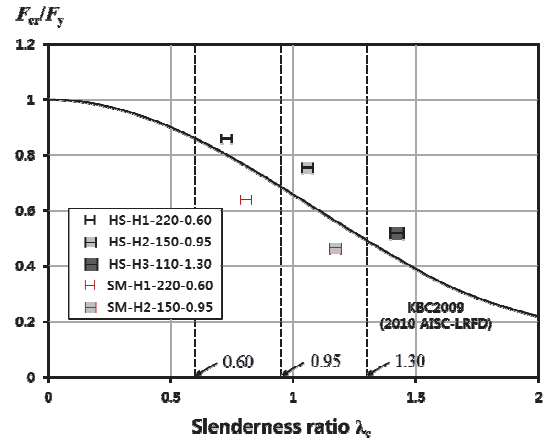


Fig. 19. Comparison with test strengths for H-shape specimens and column curve of KBC2009(2010AISC) design standards

모든 실험체에서 나타났으며, 높은 축력에 의해 발생한 반원통형 지그 간 마찰이 강축 힘을 발생하지 못하게 한 것으로 판단된다.

따라서 약축 좌굴에 대한 설계좌굴강도를 판단하기 위해 웨브에 실험체 길이방향으로 설치한 게이지의 변형률을 분석하였고, 웨브 양 면의 변형률 차이를 웨브 두께로 나누어 약축 휨 곡률(ϕ)을 산정하였다(Fig. 17). 곡률이 0이 되는

지점이 변곡점에 해당하므로 좌굴하중에서 두 변곡점 사이를 유효좌굴길이로 하였다. 식 (3)에 따른 유효좌굴길이계수 ($K=0.646$)을 바탕으로 H형 단면 실험체의 약축에 대한 세장비와 설계좌굴강도 값을 재산정하였다(Table 5).

Table 3. Test results of box-section specimens

Specimens	Design value		λ_c	Test results				$\frac{F_{cr,m}}{F_{y,m}} / \frac{F_{cr,n}}{F_{y,n}}$ (%)
	$F_{cr,n}$ (MPa)	$F_{cr,n}/F_{y,n}$		P_{max} (kN)	$P_{cr,m}$ (kN)	$F_{cr,m}$ (MPa)	$F_{cr,m}/F_{y,m}$	
HS-B1-240-0.60	683	0.84	0.65	9,983	9,983	739	0.91	108
HS-B2-160-0.95	564	0.65	1.00	6,624	5,990	689	0.84	129
HS-B3-120-1.30	366	0.45	1.38	4,337	3,981	632	0.78	173
SM-B1-240-0.60	391	0.80	0.72	5,913	5,482	406	0.84	104
SM-B2-160-0.95	289	0.59	1.11	3,649	3,447	396	0.82	137

Table 4. Test results of cruciform-section specimens

Specimens	Design value		Test results					$\frac{F_{cr,m}}{F_{cr,n}} / \frac{F_{y,m}}{F_{y,n}}$ (%)
	$F_{cr,n}$ (MPa)	$F_{cr,n}/F_{y,n}$	λ_c	P_{max} (kN)	$P_{cr,m}$ (kN)	$F_{cr,m}$ (MPa)	$F_{cr,m}/F_{y,m}$	
HS-X1-220-0.60	676	0.83	0.65	5,126	4,808	754	0.93	111
HS-X2-140-0.95	530	0.65	1.01	3,024	2,851	717	0.88	135
HS-X3-100-1.30	360	0.44	1.40	1,373	1,597	576	0.71	160
SM-X1-220-0.60	390	0.80	0.72	2,686	2,081	326	0.67	84
SM-X2-140-0.95	287	0.59	1.12	1,449	1,449	290	0.60	101

Table 5. Test results of H-section specimens

Specimens	Design value		Test results					$\frac{F_{cr,m}}{F_{cr,n}} / \frac{F_{y,m}}{F_{y,n}}$ (%)
	$F_{cr,n}$ (MPa)	$F_{cr,n}/F_{y,n}$	λ_c	P_{max} (kN)	$P_{cr,m}$ (kN)	$F_{cr,m}$ (MPa)	$F_{cr,m}/F_{y,m}$	
HS-H1-220-0.60	653	0.80	0.73	7,323	6,602	699	0.86	107
HS-H2-150-0.95	512	0.63	1.05	4,230	3,871	614	0.75	120
HS-H3-110-1.30	352	0.43	1.42	2,315	1,930	429	0.53	122
SM-H1-220-0.60	370	0.76	0.81	3,198	2,932	310	0.64	84
SM-H2-150-0.95	275	0.56	1.17	1,665	1,428	227	0.47	83

$$K = \frac{2437 - 500}{3000} = 0.646 \quad (3)$$

실험결과 모든 HSA800 H형 실험체는 설계기준 좌굴강도를 상회하였으며, SM490 실험체는 약간 하회하였다 십자형과 마찬가지로 HSA800 실험체가 SM490 실험체보다 좀 더 큰 좌굴강도를 지닌 것으로 확인되었다(Fig. 19).

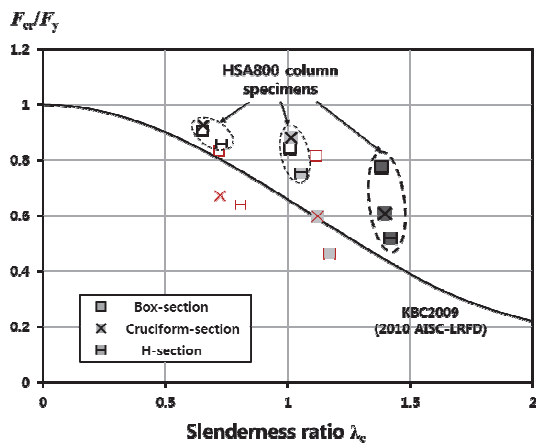


Fig. 20. Comparison with test strengths for specimens and column curve of KBC2009(2010AISC-LRFD) design standards

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 단면형상과 기둥 세장비를 변수로 하여 HSA800 강재를 현행 구조설계기준에 따라 비탄성영역 내에서 압축재로 설계할 수 있는지 여부를 판단하는 연구를 수행하였다. 모든 실험체는 국부좌굴이 발생치 않는 비콤팩트 단면으로 설계하였으며, 실험결과 국부좌굴이 기둥좌굴보다 선행하지 않았다.

- (1) 모든 박스형 실험체의 경우 현행 설계기준의 좌굴강도를 만족하였으며 세장비가 클수록 기준강도보다 더 큰 좌굴강도를 발현하였다.
- (2) HSA800으로 제작된 십자형 단면 실험체의 경우 설계기준의 좌굴강도를 모두 만족하는 것으로 나타났으나, SM490으로 제작된 십자형 실험체의 경우 조기에 좌굴이 발생하였다.
- (3) H형 실험체의 경우 강축으로 설계하여 강축 좌굴을 유도하였음에도 불구하고 지그 간 마찰 등으로 인해 약축으로 좌굴이 발생하였다. 웹 곡률 분석을 통해 약축에 대한 유효좌굴길이를 산정하였으며, 이를 바탕으로 세장비 및 약축 설계좌굴 강도를 구하였다. HSA800으로

제작된 모든 실험체가 설계좌굴강도보다 상회하였으나 모든 SM490 실험체는 하회하는 것으로 나타났다.

- (4) HSA800으로 제작된 모든 실험체의 경우 설계기준의 좌굴강도를 충분히 만족하는 것으로 나타났으나, SM490으로 제작된 십자형 및 H형 실험체의 경우 조기에 좌굴이 발생하였다(Fig. 20). 따라서 HSA800 실험체는 비교실험체인 SM490 실험체보다 좌굴강도가 우수한 것으로 나타났다.
- (5) 현행설계기준에서는 단면의 형상에 관계없이 단면이 비콤팩트일 경우 기둥곡선에서 강도저감을 하지 않는다. 실험체 설계 시 모든 실험체가 비콤팩트 단면을 갖도록 하였음에도 불구하고, Fig. 20을 보면 각 단면형상에 따라 좌굴강도에 차이가 나타남을 알 수 있다. 단면형상이 실험결과에 영향을 준 것으로 사료되며, 이 부분에 대해서는 추후 유한요소해석 등을 통해 검증해야 할 것으로 판단된다.
- (6) 선행연구^[3]에서 수행한 단주 잔류응력 측정실험 결과(Fig. 2)를 보면 조립 고강도강재 단면 내의 항복강도 대비 잔류응력의 크기가 최대 $0.16F_y$ 정도로서 동일 단면을 갖는 일반강 부재보다 낮은 것으로 나타났으며, 현행 설계기준에서 가정한 잔류응력 크기($0.3F_y$)보다 작게 나타났다. 본 연구에서 잔류응력을 직접적으로 측정하지는 못하였으나, 국내외 다른 여러 연구들에서도 고강도강의 잔류응력 크기가 $0.3F_y$ 에 미치지 못하는 것을 보여주고 있다. 비탄성좌굴에 영향을 미치는 잔류응력이 클수록 강성이 조기에 감소하므로 좌굴강도가 낮게 나타난다. 따라서 고강도강의 잔류응력의 크기가 일반강보다 상대적으로 낮기 때문에 HSA800 중간주 실험체의 좌굴강도가 현행 설계기준의 강도보다 높게 나타난 것으로 사료된다.

따라서 본 연구의 중간주 중심압축실험 결과 및 선행연구에서 수행한 고강도강재 단주의 국부좌굴 성능평가 결과^{[3],[4],[6],[7],[8]}를 바탕으로, 현행 구조설계식^{[1],[2]}에 따른 압축재 설계에 고강도 HSA800강재를 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단 도시개발사업(09첨단도시 A01) 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 한국강구조학회(2012) 건축강구조 표준접합상세지침, 기사. KSSC (2012) *Detailed Guidelines of Standard Connection in Steel Structures*, Kimoonsa, Korea (in Korean).
- [2] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [3] 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).
- [4] Kim, D.-K., Lee, C.-H., Han, K.-H., Kim, J.-H., Lee, S.-E., and Sim, H.-B. (2014) Strength and Residual Stress Evaluation of Stub Columns Fabricated from 800 MPa High-Strength Steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.102, pp.111-120.
- [5] Rasmussen, K.J.R., and Hancock. G.J. (1992) Plate Slenderness Limits for High Strength Steel Sections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.23, pp.73-96.
- [6] 유정한, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2012) 중심압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 각형강관 압축재의 국부좌굴, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.435-442. Yoo, J.H., Kim, J.W., Yang, J.K., Kang, J.W., and Lee, D.W. (2012) Local Buckling 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).
- [7] 유정한, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2013) 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. (2013) Evaluation on Applicability of Built-up Square Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steel Considering Local Buckling, *Journal of 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 H형단면 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 Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.627-636 (in Korean).
- [9] 이강민, 이명재, 오영석, 김태수, 김도환(2013) 중심압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접H형 단주의 국부좌굴거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.289-297.
Lee, K., Lee, M.J., Oh, Y.S., Kim, T.S., and Kim, D.H. (2013) Local Buckling Behavior of Stub H-Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels Under Concentric Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.289-297 (in Korean).
- [10] 국가기술표준원(2003) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003).
Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 공칭인장강도 800MPa급 고강도강재(HSA800)로 제작된 중간주의 중심압축실험을 통해 좌굴강도를 평가하여 현행 구조설계기준(KBC2009, 2010 AISC-LRFD) 기둥곡선의 비탄성영역 적용성 여부를 검토하였다. 강도로 무차원화한 판폭두께비와 판단부 지지조건 및 기둥 세장비를 변수로 하였으며, 고강도강재와 일반강재의 좌굴거동 차이 여부를 확인하기 위해 일반강재(SM490)로 제작된 비교실험체를 포함시켰다. 실험결과 중심압축을 받는 모든 HSA800 중간주 실험체는 현행 강구조기준의 설계좌굴강도를 충분히 발휘하였으나 일부 SM490 실험체는 설계강도를 하회하였다. 이는 고강도강재의 잔류응력에 의한 강도저하가 일반강재에 비해 작기 때문으로 판단된다.

핵심용어 : 고강도강재, 압축실험, 좌굴강도, 유효좌굴길이, 잔류응력
