

잔류응력의 영향을 고려한 조립 H-형강 부재의 좌굴하중 및 설계압축강도 평가

이수권¹ · 양재근^{2*} · 강지석³

¹교수, 동양미래대학교, 건축학과, ²교수, 인하대학교, 건축공학과, ³석사과정, 인하대학교, 건축공학과

Evaluation of Buckling Load and Specified Compression Strength of Welded Built-up H-section Compression Members with Residual Stresses

Lee, Soo-Keun¹, Yang, Jae-Guen^{2*}, Kang, Ji-Seok³

¹Professor, Department of Architectural Engineering, College of Engineering, DongYang Mirae University, Seoul, 08221, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22201, Korea

³Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 22201, Korea

Abstract - Residual stress is defined as stress that already exists on a structural member from the effects of welding and plastic deformation before the application of loading. Due to such residual stress, welded H-section compression members under centroidal compression load can undergo buckling and failure for strength values smaller than the predicted buckling load and specified compressive strength. Therefore, this study was carried out to evaluate the effect of residual stress from welding on the determination of the buckling load and specified compressive strength of the H-section compression member according to the column length variation. A three-dimensional nonlinear finite element analysis was performed for the H-section compression member where the welded joint was fillet welded by applying heat inputs of 3.1kJ/mm and 3.6kJ/mm using the SAW welding method.

Keywords - Residual stress, Design axial compressive strength, Buckling load, Built-up H-section, Finite-element analysis

1. 서론

용접된 부재는 용접 시에 입열에 의하여 팽창하였다가 냉각 시에 수축하는 과정을 통하여 잔류응력이 발생한다. 잔류응력의 분포는 일반적으로 용접순서, 용접패스의 수 등에 의해서는 큰 영향을 받으나 용접전압, 용접속도, 예열온도, 예열부위 등에 의해서는 상대적으로 작은 영향을 받는 것으로 알려져 있다^[1]. 용접부가 모재의 항복강도 값보다 크게 오버매칭 된 경우, 용접된 조립부재에 발생하는 잔류응력은 용접

재료의 항복응력 값과 같은 크기로 발생할 수도 있다. 이러한 잔류응력은 기계적인 방법 혹은 X-ray 측정법 등을 적용하여 변형률을 구하여 간접적으로 산정할 수 있다. 용접부에 발생하는 잔류응력은 용접부와 평행한 길이방향 및 용접부에 수직인 폭 방향에 따라서 정량적인 크기 차이가 발생한다. 일반적으로 용접부에 수직인 폭 방향에 발생한 잔류응력은 용접부에 평행한 길이방향에 발생하는 잔류응력의 30% 값에 해당한다. 또한, 용접부 두께 방향으로 발생하는 잔류응력은 포물선 형태로 중앙부가 최대가 된다^[2].

용접된 조립 H-형강 압축부재는 일반절단판재(General mill plate) 혹은 가스절단판재(Flame-cut plate)로 절단 가공 됨에 따라서 압축력 저항능력에 있어서 차이를 나타낸다. 이는 제작과정 중 발생하는 판재 내에 존재하는 잔류응력의 분포의 영향에 따른 것이다. 상대적으로 플랜지 단부에 인장 잔류응력의 분포를 나타내는 flame-cut plate로 구성

Note.-Discussion open until August 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 15, 2016; revised December 30, 2016; approved on December 30, 2016.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-10-4327-3627 Fax. +82-32-866-4624

E-mail. jyang@inha.ac.kr

된 조립 H-형강 압축부재가 플랜지 단부에 압축 잔류응력 분포를 나타내는 general mill plate로 구성된 조립 H-형강 압축부재보다 더 큰 압축강도 지지능력을 발현한다. 작은 규격의 단면으로 구성된 조립 H-형강 압축부재가 상대적으로 큰 규격의 단면으로 구성된 조립 H-형강 압축부재보다 더 큰 잔류응력의 전반적인 분포에 의한 영향을 받는다. 또한, 동일한 단면 규격의 조립 H-형강 압축부재인 경우에 단위중량이 작은 압축부재가 단위중량이 큰 압축부재보다 더 압축강도 지지능력이 떨어진다. 이러한 현상은 general mill plate로 구성된 조립 H-형강 압축부재인 경우일수록 더 심화된다^[3].

초기결합의 영향과 더불어 용접에 의한 잔류응력의 영향으로 조립 H-형강 압축부재는 국부항복, 좌굴하중, 비틀림 응력 등에 대한 지지능력의 저하를 나타낼 수 있다. 따라서 이 연구는 압축부재의 길이 변화에 따른 조립 H-형강 압축부재의 좌굴하중 및 설계압축강도를 산정하는데 있어서 용접에 의한 잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 진행하였다. 이를 위하여 용접된 조립 H-형강 압축부재에 대한 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

2. 용접 조립된 H-형강 압축부재에 대한 3차원 비선형 유한요소해석

2.1 해석모델 선정

용접된 조립 H-형강 압축부재는 항복강도, $F_y = 380MPa$, 인장 강도, $F_u = 500MPa$ 인 강재(SM520)를 사용하며 매칭 용접봉은 모재와 같은 강도를 적용하여 구성하는 것으로 이상화 하였다. 용접된 조립 H-형강 압축부재는 ABAQUS 부재요소 중 솔리드 요소에 해당 하는 C3D8T(three-dimensional 8 node element type with thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature)를 적용하여 모델링하였다. 열 해석에 있어서 Franssen 등은 보 단면을 1/2 대칭단면으로 구성하였고^[4], beam 요소로 선택하여 모델링 하였다. 이에 따라서 해석시에 국부변형이 반영되지 못하였다. Takagi 등은 보 단면의 모델링에 있어서 shell 요소를 선택하였기 때문에 필릿부의 영향을 반영하지 못하였다. 따라서 이 연구에서는 보 단면에 발생할 수 있는 국부변형의 영향을 반영하기 위하여 solid 요소를 적용하였다^[5]. 용접된 조립 H-형강 압축부재의 좌굴하중 및 설계압축강도를 평가하기

Table 1. Geometric properties of analysis models

Model	Length (m)	Section	Weld size (mm)	λ	Slenderness ratio (KL/r)
BH-1	4	400×200×8×13	16	1.2	87.95
BH-2	4.5	400×200×8×13	16	1.35	98.94
BH-3	5	400×200×8×13	16	1.5	109.94
BH-4	5.5	400×200×8×13	16	1.65	120.93
BH-5	6	400×200×8×13	16	1.8	131.93

위하여 압축부재는 H-400x200x8x13 단면으로 선정하였다. 부재의 길이는 아래의 식 (1) 에 의해 기준점이 되는 세장 변수, λ 를 이용하여 선정하였다. 유한요소 해석모델은 Table 1에 정리한 것과 같이 장주와 단주의 판별 기준점이 되는 $\lambda_c = 1.5$ 가 되는 기둥 부재의 길이 5m를 기점으로 4m부터 6m까지 0.5m 간격으로 선정하였다.

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r_y} \times \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (1)$$

2.2 용접 입열량 선정 및 잔류응력 검토 해석

용접 입열량은 용접방법에 구애받지 않고, 입열량에 의한 잔류응력을 측정하기 위하여 주로 사용되는 용접방법인 FCAW와 SAW용접방법에서 사용되는 입열량의 중간값으로 1-pass는 3.1kJ/mm, 2-pass는 3.6kJ/mm로 선정하여 진행하였으며, 각 용접치수는 주어지는 입열량에 의하여 변화하여야 하지만 압연형강 기둥부재와의 비교를 위하여 본 해석모델의 용접치수는 같은단면을 가지는 압연형강의 필릿반경, r값에 상응하는 값을 선택하여 총 16mm로 선정하였으며, 1-pass, 2-pass는 용접치수의 1/2값인 8mm로 선정하였다^[6].

$$H_u = \eta \cdot \left(\frac{60 \cdot E_v I_A}{v} \right) \quad (2)$$

용접에 따른 용접부의 입열량은 위의 식 (2)를 적용하여 산정할 수 있다. 식의 적용에 있어서 열전달효율은 용접법에 따라서 상이하다. 일반적으로 SAW(submerged arc welding)인 경우에 열전달효율 η 값은 $\eta = 0.85 \sim 0.99$, FCAW(flux-cored arc welding)인 경우에 열전달효율 η 값은 $\eta = 0.65 \sim 0.85$, ESW(electro-slag welding)인 경우에 열전달효율 η 값은 $\eta = 0.55 \sim 0.85$ 정도의 값을 적용한다^[6]. 유한요소해석

에 있어서 용접에 의하여 발생하는 잔류응력은 아래의 식 (3), 식 (4)를 적용하여 검증하였다^[7].

$$\sigma(z) = -\frac{2}{3}\alpha E(T_s - T_f)\left(\frac{3z^2}{2L^2} - \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

Table 2. Geometry of the plate used in the verification analysis

l (mm)	w (mm)	b (mm)	a (mm)	t (mm)
400	70	8	4	10

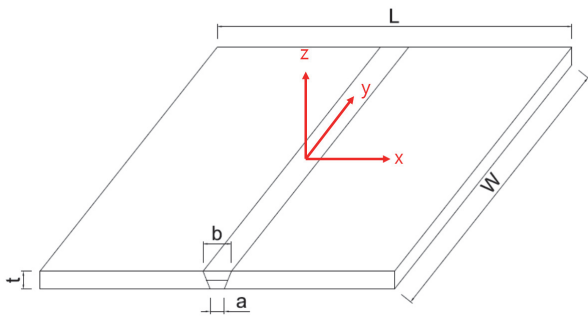
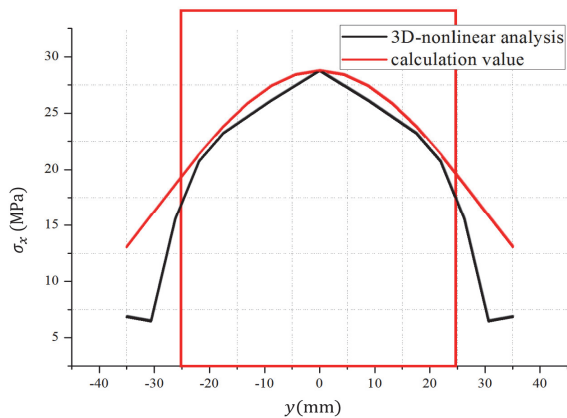
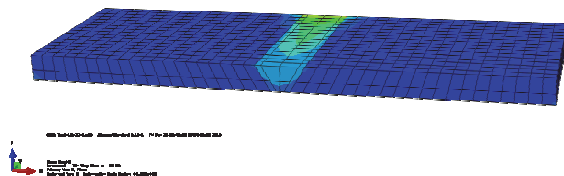


Fig. 1. Geometry of the plate used in the verification analysis



(a) Comparison of residual stress distribution in welding length direction



(b) The stress distribution of sheet metal welding by finite element analysis

Fig. 2. Comparison of finite element analysis values and calculated values

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (4)$$

위의 식 (3)과 식 (4)는 2개의 판재 용접을 하였을 경우에 잔류응력 추정식이므로, 유한요소 해석을 통하여 검증을 실시하기 위하여 단순 판재의 용접해석을 실시하도록 한다. 잔류응력 검증에 적용하는 판재는 아래의 Fig. 1 및 Table 2와 같이 설정한다.

3차원유한요소해석한 결과와 위의 식 (4)에 의해 계산된 결과는 아래의 Fig. 2(a)와 같다. 위의 식 (4)의 b 값은 인장영역의 폭으로 Table 2의 w 값으로 대입하였으며, σ_m 값은 해석값의 최대 응력값을 대입하였다. 해석결과와 계산값의 차이는 열영향부(HAZ)에서는 3%로 나타났다. HAZ부 이외의 단부 구간에서는 해석 도중 발생하는 모델의 이동을 방지하기 위하여 지정된 경계조건에 의해 응력이 발생하여 차이가 발생하게 된다. HAZ(Heat Affected Zone)부는 Fig. 2(a)의 붉은색으로 표시된 영역을 말하며, 용접선 주위 25mm 영역이다^[8].

3. 용접 조립된 H-형강 좌굴하중 유한요소해석 결과

3.1 용접 조립된 H-형강의 좌굴하중 계산

중심 압축력을 받는 대칭단면을 갖는 부재의 좌굴하중 및 설계압축강도는 Salmon&Johnson의 Steel Structures의 책에서 발췌한 아래의 식 (5)와 건축구조기준(KBC2016)의 식 (8)을 적용하여 산정하여 Table 3, Table 4, Fig. 3에 정리하였다. 해석에서 도출된 좌굴하중과의 비교값은 식 (5)에

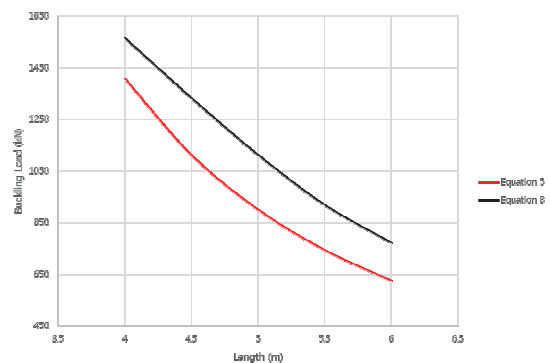


Fig. 3. The buckling load of welded H-section by equation (5) and equation (8)

Table 3. The buckling load of model according to equation (5)

Model	Length (m)	λ	KL/r	F_{cr} (MPa)	Buckling load (kN)
BH-1	4	1.2	87.95	185.88	1,407.24
BH-2	4.5	1.35	98.94	146.87	1,111.89
BH-3	5	1.5	109.94	118.96	900.63
BH-4	5.5	1.65	120.93	98.32	744.32
BH-5	6	1.8	131.93	82.61	625.44

Table 4. The specified compression strength of model according to equation (8)

Model	Length (m)	KL/r	F_e (MPa)	F_{cr} (MPa)	Specified compression strength (kN)
BH-1	4	87.95	261.57	206.87	1,566.20
BH-2	4.5	98.94	206.67	176.02	1,332.61
BH-3	5	109.94	167.40	146.95	1,112.51
BH-4	5.5	120.93	138.35	121.33	918.59
BH-5	6	131.93	116.25	101.95	771.87

의해 도출된 좌굴하중과 식 (8)에 의해 도출된 설계압축강도 중 작은 값을 사용하기로 한다. 식의 적용에 있어서 좌굴응력, F_{cr} 은 압축부재가 비탄성좌굴 혹은 탄성좌굴 등의 거동 양상을 나타내는가에 따라서 구분된다. 또한, 탄성좌굴응력 F_e 는 압축부재의 응력이 좌굴응력, F_{cr} 에 도달하였을 때의 강도이다. 조립부재 단면의 폭두께비, λ 가 λ_r 보다 큰 경우는 국부좌굴도 고려해야한다^[9].

좌굴하중 산정(S&J, Steel Structures)^[10]:

$$P_{cr} = F_{cr} A_g \quad (5)$$

강축에 대한 좌굴인 경우,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \left[\frac{E_t A / E - 2 A_w / 3}{2 A_f + A_w / 3} \right] \quad (6)$$

약축에 대한 좌굴인 경우,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \left[\frac{A E_t}{2 A_f E} - \frac{A_w}{2 A_f} \right]^3 \quad (7)$$

설계압축강도 산정(건축구조기준(KBC2016)):

$$\phi P_n = \phi \cdot (A_g F_{cr}), \quad \phi = 0.9 \quad (8)$$

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

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{Q F_y}{F_e} \right) Q F_y \quad (9)$$

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

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (10)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (11)$$

3.2 용접 조립된 H-형강의 유한요소 해석

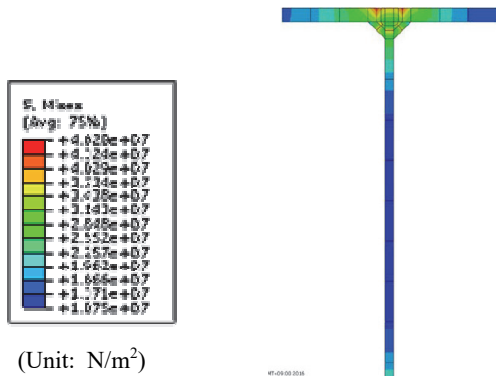
3차원 비선형 유한요소해석을 통하여 얻은 중심 압축력을 받는 용접된 조립 H-형강 압축부재의 응력분포는 Fig. 4에 정리하였다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 용접 시에 입열량의 영향으로 용접부에는 잔류응력이 발생한 상태이다. 예측한 것과 같이 플랜지와 웨브가 만나는 부분은 인장응력이 발생하고 플랜지 단부는 압축응력이 발생하였다. 압축하중이 증가됨에 따라서 하중 작용면에 응력집중 현상이 발생하였다. 최종적으로 단주는 응력집중에 따른 소성변형에 의하여 파괴되었고 장주는 좌굴에 의하여 파괴되었다. 형성된 좌굴응력은 해석에 사용된 기둥 모델의 길이에 따라 상이하며 Fig. 5 및 Table 5에 나타내었다.

Table 6은 용접된 조립 H-형강 부재에 대한 유한요소해석을 통하여 얻은 좌굴하중을 나타내고 있다. Table 6에 나타난 것과 같이 식 (5)를 적용하여 얻은 좌굴하중과 비교하면 최소 6%, 최대 25% 값 차이를 나타내고 있다. 또한, 압축부재의 길이가 증가할수록 값 차이도 증가함을 알 수 있다.

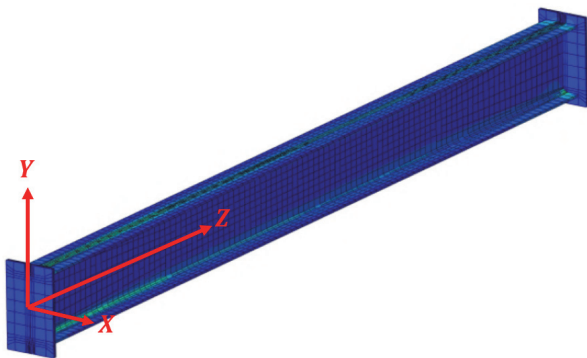
Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 용접 조립된 H-형강 기둥 부재는 Fig. 6(a)와 같이 가력 이전에 잔류응력이 웨브 부분 즉, 용접 진행 영역에 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이 후 가력이 진행되면서 Fig. 6(b)와 같이 좌굴 이전에 좌굴이 발생하게 되는 면을 기점으로 압축과 인장응력이 점차 증가하게 되며, Fig. 6(c)의 좌굴 지점 이후로 점차 지지하는 하중이 감소하

게 되어 Fig. 6(d)와 같이 부재의 중앙부분의 웨브 및 플랜지 부분의 항복으로 좌굴이 발생하게 되어 지지능력을 잃게 된다.

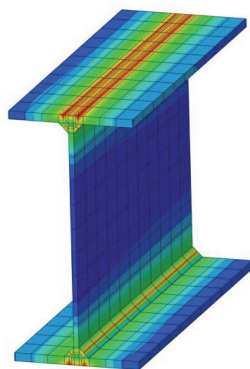
Fig. 8 및 Table 6을 보면 부재의 길이가 증가함에 따라 식 (5)에 의한 좌굴하중과 유한요소해석을 통해 얻은 좌굴하중



(a) Cross-sectional stress distribution of welded H-section compression members



(b) Residual stress distribution of welded H-section compression members



(c) Residual stress distribution of welded H-section compression member's central part

Fig. 4. Residual stress distribution of welded H-section compression members

의 차이가 점차 증가되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8 및 Table 6에서와 같이 부재의 길이가 증가함에 따라 부재에 형성되는 잔류응력의 크기는 증가한다. 잔류응력 크기의 증가에 의하여 Fig. 8과 같이 부재의 길이가 증가함에 따라 잔류응력이 고려된 모델의 좌굴하중의 감소율이 증가하게 된다. 그러나 Fig. 9를 보면 해석과정에서 부재에 형성되는 잔류응력의 크기가 강재 강도의 6%로 기존의 30%보다 작은 값을 가지게 되며, 길이의 증가에 따라 발생하는 잔류응력 크기의 변화 역시 크지 않다. 즉, 해석에서 파악되는 길이의 증가에 따라 증가하는 잔류응력의 영향이 식 (5)와 같은 식에서 고려되는

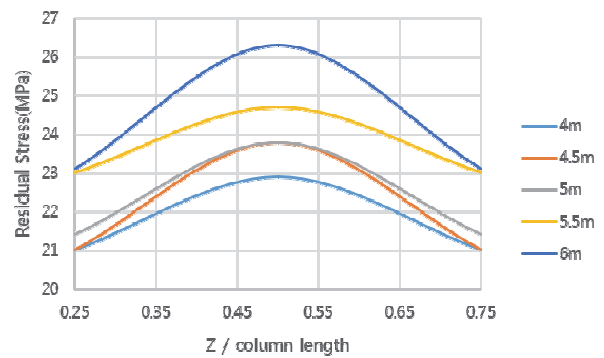


Fig. 5. Residual stress distribution along length

Table 5. The residual stress distribution by finite element analysis (Unit: MPa)

Z/column length	0.25	0.5	0.75
Model			
BH-1	21	22.9	21
BH-2	21	23.8	21
BH-3	21.4	23.8	21.4
BH-4	23	24.7	23
BH-5	23.1	26.3	23.1

Table 6. Buckling load by FEA and equation (5) (Unit: MPa)

Model	Length (m)	λ	Buckling load by FEA (kN)	Buckling load by Eq'n 5 (kN)	Difference (%)
BH-1	4	1.2	1493.23	1370.24	6.2
BH-2	4.5	1.35	1286.03	1082.66	13.8
BH-3	5	1.5	1108.00	876.95	18.8
BH-4	5.5	1.65	955.28	724.75	22.5
BH-5	6	1.8	831.52	609.00	25.0

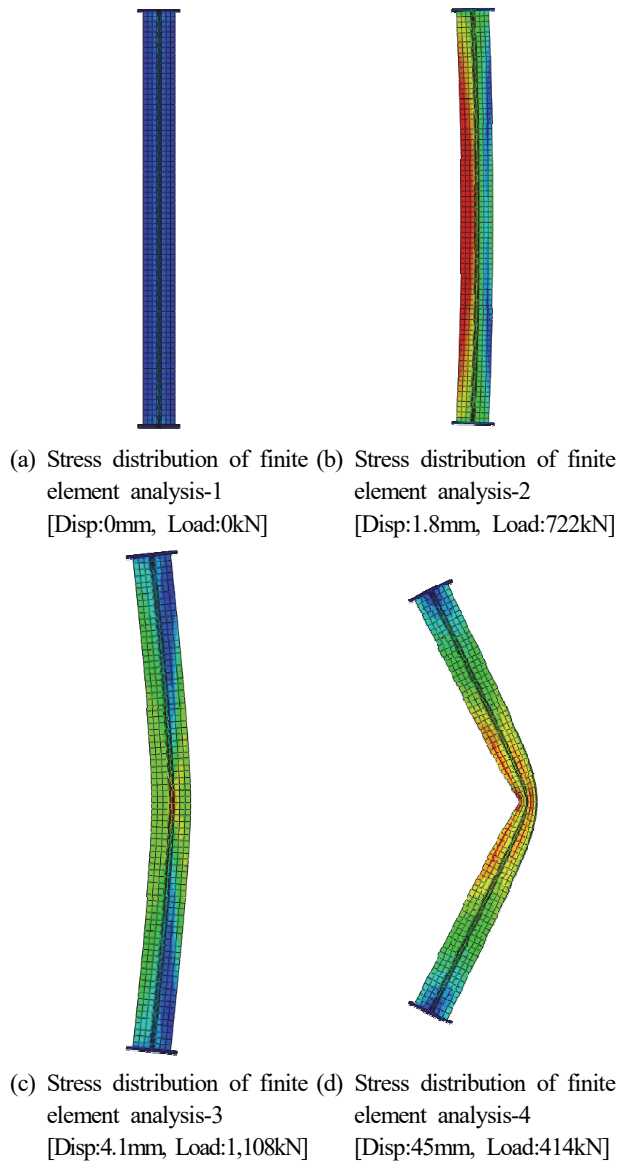


Fig. 6. The buckling stress distribution of BH-3 model

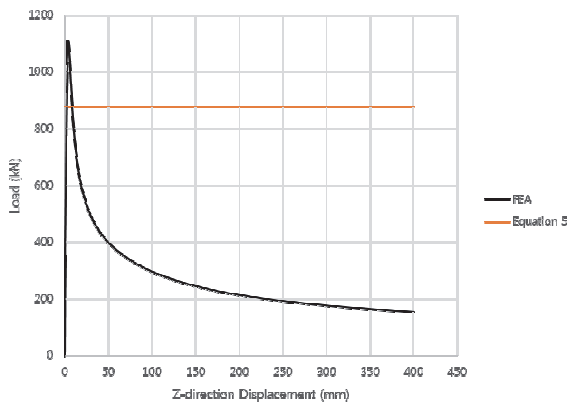


Fig. 7. The result of finite element analysis BH-3 model

영향의 증가보다 작기 때문에 부재의 길이가 증가할수록 계산식에 의한 좌굴하중과 해석에 의한 좌굴하중의 차이가 증가하게 된다고 판단된다. 용접방법, 입열량 등의 차이에 따라 다르게 형성되는 잔류응력의 크기에 대한 부재의 길이에 따른 좌굴하중의 감소율이 다르게 나타난다고 판단된다. 부재의 길이변화에 따른 잔류응력의 크기의 차이를 크지 않음을 검증하기 위하여 동일한 모델에서 입열량을 2배로 가한 입열해석을 진행하였다.

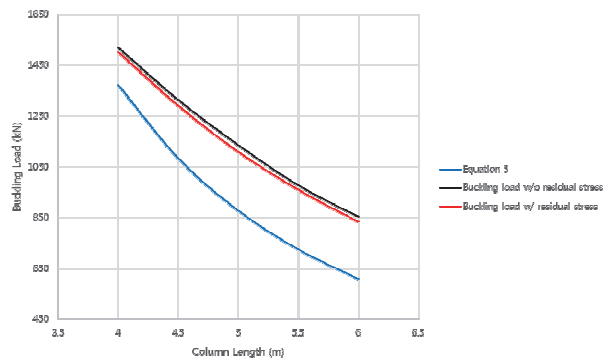


Fig. 8. The result of FEA according to column length

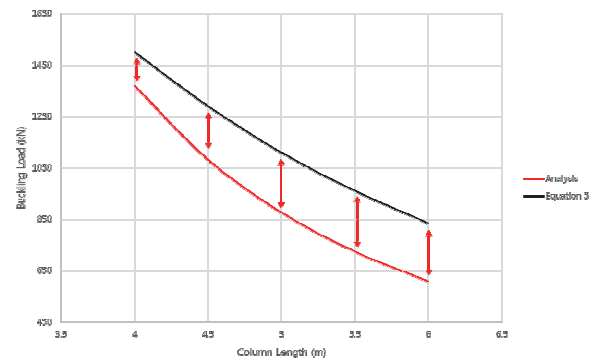


Fig. 9. Difference between calculated value and FEA value

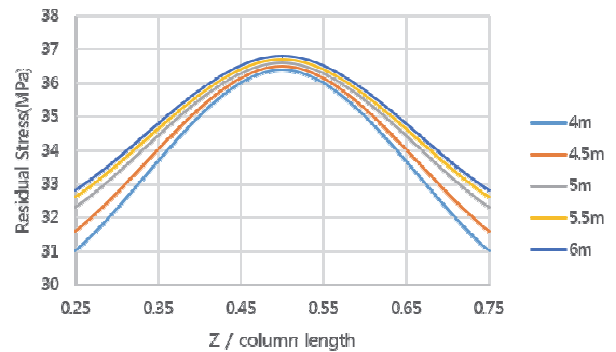


Fig. 10. Residual stress distribution along length

해석결과 Fig. 10과 같이 앞서 진행한 추론과 같이 부재의 길이가 변화함에 따라 발생하는 잔류응력의 차이가 크게 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 그러므로 기하학적 형상 이외의 변수에 의해 변화하는 잔류응력에 따라 다르게 적용되는 좌굴하중의 F 감소율의 적용에 대한 추론은 타당하다고 판단한다.

4. 결 론

이 연구는 기둥 부재 길이 변화에 따른 용접 조립 H-형강 압축부재의 좌굴하중 및 설계압축강도를 산정하는데 있어서 용접에 의한 잔류응력의 영향을 평가하기 위하여 진행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접 입열량에 의한 잔류응력을 평가하는 식 (3), 식 (4)를 적용하여 얻은 잔류응력 값과 유한요소해석을 통하여 얻은 잔류응력 값과 비교하였을 때 용접선 주위(HAZ부)에 약 3%정도의 차이만 발생하였기 때문에 이 연구에서 적용한 용접 잔류응력 평가를 위한 해석 프로세스는 적용 가능하다고 판단한다.
- (2) 용접 조립된 H-형강 압축부재의 압축부재 길이 변화에 따른 잔류응력은 해석에 적용된 강재의 항복강도 값의 약 5%정도로 작게 발생하는 것을 알 수 있었다. 이것은 판재의 절단 제작과정에서 발생하는 잔류응력의 영향을 포함하지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 판재의 일반절단판재(general mill plate) 및 가스절단판재(flame-cut plate)에 발생하는 잔류응력을 포함한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단한다.
- (3) 용접 조립된 H-형강 압축부재에 대한 좌굴강도식을 적용하여 얻은 좌굴하중 값과 유한요소해석을 통하여 얻은 좌굴하중 값은 압축부재의 길이가 증가할수록 최대 25%로 증가하였다.
- (4) 용접 조립된 H-형강의 기둥 부재의 길이에 따른 잔류응력의 크기 차이는 크지 않고, 이에 따라 부재의 길이가 증가함에 따라 계산식에 의한 좌굴하중과 해석에 의한 좌굴하중의 차이가 점차 증가한다. 즉, 부재의 길이 이외의 변수에 따라 다르게 발생하는 잔류응력의 크기에 따라 기둥부재의 길이의 변화에 따른 감소율이 다르게 적용되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2016학년도 동양미래대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌(References)

- [1] 방희선, 오종인, 노찬승, 박창수, 방한서(2007) 유한요소법을 이용한 하이브리드 용접부의 열 및 용접잔류응력 해석, 대한용접학회지, 대한용접학회, 제25권, 제6호, pp.565-570.
Bang, H.-S., Oh, C.-I., Ro, C.-S., Park, C.-S., and Bang, H.-S. (2007) Analysis of Thermal and Welding Residual Stress for Hybrid Welded Joint by Finite Element Method, *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, KWJS, Vol.25, No.6, pp.565-570 (in Korean).
- [2] 김상식, 윤성기(2014) 강구조 설계 (3판), 문운당.
Kim, S.S., and Yoon, S.K. (2016) *Design of Steel Structures* (3rd Ed.), Munundang, Korea (in Korean).
- [3] 김경식, 박현용(2013) 수평재 및 사재로 보강된 조립기둥 시스템의 압축강도 평가, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제33권, 제6호, pp.2169-2179.
Kim, K.S., and Park, H.Y. (2013) Evaluation of Compressive Strength of Assembled Column System Reinforced with Cross-Arms and Stayed Struts, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.33, No.6, pp.2169-2179 (in Korean).
- [4] Franssen, J.-M., Schleich, J.-B., Cajot, L.-G., and Azpiazu, W. (1996) A Simple Model for the Fire Resistance of Axially Loaded Members – Comparison with Experimental Results, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.37, No.3, pp.175-204.
- [5] 윤중휘, 이치형, 윤성기(2016) 중심축 하중을 받는 고온상태 강재기둥의 압축강도에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제4호, pp.253-261.
Yoon, J.H., Lee, C.H., and Yoon, S.K. (2016) A Study on Compressive Strength of Centrally-Loaded Steel Columns at Elevated Temperatures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.4, pp.253-261 (in Korean).
- [6] 용접강도연구위원회(2005) 유한요소해석을 이용한 Arc 용접부의 온도 분포 예측 표준화, 대한용접학회지, 대한용접학회, 제23권, 제6호, pp.497-503.
Commission of Design, Analyses and Structural Strength

- of Welded Structures (2005) Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld Using FEA, *Journal of Korean Welding and Joining Society*, KWJC, Vol.23, No.6, pp.497-503 (in Korean).
- [7] Messler, R.W., Jr., (2007) *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*, Wiley, USA.
- [8] 양재근, 강지식, 곽민석(2016) 중심압축 하중을 받는 용접 조립된 Built-up H-형강 압축부재의 잔류응력 평가, 한국 강구조학회 학술대회 발표집, 한국강구조학회, pp.37-38.
Yang, J.G., Kang, J.S., and Kwak, M.S. (2016) Evaluation of Residual Stress of Welded Built-up H-section Compression Members Under Concentrically Compressed Axial Loads, *Proceedings of Annual Conferences of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.37-38 (in Korean).
- [9] 박호상, 서상정, 권영봉(2010) 국부좌굴과 뒤틀림좌굴이 발생하는 종방향 보강재로 보강된 강판의 압축강도, 한국 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp. 219-228.
Park, H.S., Seo, S.J., and Kwon, Y.B. (2010) The Compressive Strength of Longitudinally Stiffened Plates Undergoing Local and Distortional Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.3, pp. 219-228 (in Korean).
- [10] Salmon, C.G., Johnson, J.E., and Malhas, F.A. (2009) *Steel Structures: Design and Behavior* (5th Ed.), Pearson Education, USA, p.248.

E_t : 접선계수
 K : 좌굴길이계수
 L : 부재 길이
 r_y : 단면2차반경
 A_w : 웨브 단면적
 A_f : 플랜지 단면적
 A_g : 부재 단면적
 H_n : 순용접입열량
 I_A : 용접전류
 η : 열전달효율
 E_V : 용접전압
 v : 용접속도
 T_s : 응고 온도
 L : 부재 두께의 1/2
 T_f : 부재 최종온도
 α : 열팽창계수
 σ_m : 최대잔류응력
 b : σ_x 의 인장영역 폭
 F_{cr} : 한계좌굴응력
 F_e : 유효좌굴응력

기 호(Notation)

λ_c : 세장변수
 F_y : 강재의 항복강도
 E : 영계수

요 약 : 확장단부판 접합부는 강구조물의 보-기둥 접합부 혹은 변단면 부재로 구성된 PEB 구조시스템에 적용되는 접합부의 한 형태이다. 확장단부판 접합부는 접합부를 구성하는 단부판의 두께, 고장력볼트의 게이지 거리, 고장력볼트 축부의 직경, 고장력볼트의 개수 등의 영향으로 상이한 거동특성을 나타낸다. 확장단부판 접합부는 미국 및 유럽 등지에서는 다양한 형태로 강구조물의 기둥-보 접합부에 적용되고 있으나 우리나라에서는 널리 적용되고 있지 않다. 이러한 이유로는 확장단부판 접합부에 대한 설계강도식 제안, 접합부상세 제안, 내진성능 평가, 제작 및 시공지침서 개발 등이 적절히 이루어지지 못하고 있기 때문이다. 따라서 이 연구는 비보강 확장단부판 접합부의 국내 적용을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 진행하였다. 이를 위하여 두께 12mm의 비보강 확장단부판에 대한 비선형 유한요소해석 및 실험을 수행하였다.

핵심용어 : 비보강확장단부판 접합부, 에너지소산면적, 보-기둥 모멘트 접합부, 유한요소해석, 모멘트 회전각 이력곡선, 소성힌지선