

# 잔류응력이 고려된 HSB460강 조립박스 부재의 극한 휨강도

김경식  
청주대학교 토목공학과

## Ultimate Flexural Strength of HSB460 Steel Built-up Box Member Considering Residual Stresses

Kyungsik Kim  
Department of Civil Engineering, Cheongju University

**요약** 용접으로 조립되는 강박스 단면 부재는 교량의 거더로 많이 적용되어 왔고, 최근 HSB460강이 교량 건설용 고성능강으로 개발되었다. HSB460강은 460MPa 이상의 항복강도와 0.77 수준의 항복비를 가지고, 항복 이후 완전소성 거동을 보이는 일반 탄소강과는 달리 변형률 경화 능력이 잘 구현되는 재료적 특성을 가진다. 본 연구에서는 비선형 유한요소해석 기법을 활용한 수치해석적 방법론에 기반하여 HSB460강으로 제작된 박스 단면 부재의 극한 휨강도 성능을 평가하였다. 실무 규모 박스 단면 예제를 선정하여 용접 공정으로 인한 잔류응력과 기하학적 초기결함을 고려하여 극한 강도 해석을 수행하였다. 해석으로 얻은 극한 휨강도의 회귀분석을 통해 휨강도 식을 제안하였고 설계기준에서 제시된 휨강도와 검토되었다. 항복모멘트 이하의 강도가 구현되는 세장비 구간에서 설계기준으로부터 산정된 휨강도는 세장비 크기에 비례하며 3~10% 수준으로 해석강도 대비 낮은 것으로 확인되었다. HSB460강이 가지는 항복 직후부터 구현되는 변형률 경화 효과는 조립박스 부재의 극한 휨강도의 증가에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 본 연구에서의 제안된 HSB460강으로 조립된 박스 부재의 전용 설계식이 활용된다면 강도 한계 상태 설계에서 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

**Abstract** Built-up steel box-section members by welding are used widely as bridge girders, and HSB460 steel has recently been developed as a high-performance steel for bridge construction. HSB460 steel has a yield strength of more than 460 MPa and has a yield ratio of 0.77. Unlike conventional carbon steel, which shows fully plastic behavior after yielding, HSB460 steel has material characteristics demonstrating clear strain hardening ability. This study examined the ultimate flexural strength performance of box-section members made of HSB460 steel based on a numerical methodology using nonlinear finite element analysis techniques. Practical working-scale box cross-section hypothetical models were selected, and ultimate strength analysis was performed considering residual stresses and geometric initial imperfections because of the welding and manufacturing processes. A flexural strength predictor equation was proposed through regression analysis of the ultimate strengths obtained from the analyses and was compared with those from the design standards. In the slenderness ratio region where the strengths are governed below the yield moment, the bending strength calculated from the design standard was 3 to 10% lower than those from the analyses. This is because the strain-hardening effect of HSB460 steel, which is realized immediately after yielding, directly affects the increase in the ultimate bending strength of the built-up box member. If the exclusive design formula for box members assembled with HSB460 steel developed in this study is used, more economical design will be feasible in strength limit state design.

**Keywords** : Steel, Built-up Box, Residual Stress, Flexural Strength, Numerical Investigation

이 논문은 2016-2017년도 청주대학교가 지원하는 해외파견으로 연구되었음.

\*Corresponding Author : Kyungsik Kim(Cheongju Univ.)

email: kkim@cju.ac.kr

Received April 19, 2024

Accepted August 2, 2024

Revised July 5, 2024

Published August 31, 2024

### 1. 서론

박스단면 부재는 폐단면 부재로서 가지는 높은 비틀림 저항 능력으로 직선 교량뿐만 아니라 곡선 교량에도 많이 활용되고 있다. 건설구조용 강재는 한국산업표준 KS에 부합하는 재료 중에서 기능과 용도에 따라 선택된다. 한국표준규격 KS D 3868에서 교량구조용으로 개발 제시된 HSB460강은 저온 충격성에 대한 안정성을 확보하고 하중 범위가 높은 용도에서 높은 인성을 확보하고, 용접성을 향상한 교량 맞춤형 강재이다[1].

교량용으로 적용된 HSB강에 대한 연구는 I-형 거더(girder)를 중심으로 수행되었고[2-4], 박스단면에 대한 보강판(stiffened plate) 적용 유무에 따른 강도 특성에 대한 연구는 Kim *et al.*에 의해 수행되었다[5,6].

판구조물(plate structure)로서 박스단면 부재는 전체 거동에 대한 강도 산정에 앞서 단면의 폭-두께비로 정의 되는 세장비에 따른 국부좌굴에 대한 검토도 필수적이다. 플랜지 또는 웨브의 국부좌굴 강도가 전체 박스단면 부재의 강도 산정에 지배적 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 조립박스 단면 부재의 극한 압축강도 또는 극한 휨강도는 박스를 구성하는 판의 세장비와 재료 특성인 항복강도, 인장강도는 물론 제작 때 용접에 의한 잔류응력 효과와 제작 오차 등에 의한 기하학적 초기결함 등의 영향도 받게 된다.

본 연구에서는 교량용 강판(steel plate)으로 개발된 HSB강 중에서 항복강도 460MPa 이상, 인장강도 600MPa 이상을 가지는 HSB460강으로 용접 조립된 박스단면에 대한 극한 휨강도를 수치해석적 방법으로 평가한다. HSB460강은 항복비가 0.77 수준으로 항복 이후 완전소성 거동을 보이는 일반 탄소강과는 달리 변형을 경화 능력이 잘 구현되는 재료적 특성을 가진다. 일반적으로 구조물의 강도 평가가 재료의 선형영역에서 검토되는 경향이 있지만 판구조물의 극한강도(ultimate strength)를 평가하기 위해서는 항복 이후 거동 또는 후좌굴 거동(post-buckling behavior)까지 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 비탄성 거동을 고려하여 박스단면 부재의 극한강도 해석을 수행하고 그 결과를 기존 설계기준에서 제시하는 강도와 비교 분석을 수행한다.

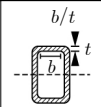
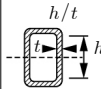
거더로 활용되는 강구조물에 적용성이 높은 규모의 박스단면 예제를 선정하여 용접 과정에서 발생하는 잔류응력(residual stresses)과 제작과 시공 과정에서 발생할 수 있는 기하학적 초기결함(geometric initial imperfection)이 고려된 비선형 유한요소해석을 수행하여 극한강도를

정량적으로 평가하고 설계를 위한 강도식을 제안한다. 선정된 박스단면에 대한 압축 및 휨에 대한 강도를 설계 기준에서 제시한 단면의 분류체제와 비교하여 고강도 고성능 강재로서 HSB460 강의 효율적 설계의 가능성을 보인다.

### 2. 설계기준 휨강도

강판(steel plate)으로 구성된 구조물은 단면의 폭-두께비에 따라 조밀 단면(compact section), 비조밀 단면(noncompact section), 세장 단면(slender section)으로 분류하여 휨에 대한 강도를 설계한다[7,8]. 유럽의 경우 비조밀 단면에 대해 회전 능력(rotation capacity) 만족 여부를 추가로 분리하여 Class 1부터 Class 4까지 분류한다[9]. 압축강도를 평가할 때는 국부좌굴 여부를 판단하는 폭-두께비가 설계 기준별로 제시되어 있다.

Table 1. Uniform thickness box section limits

Box section	Width-thickness ratio	Width-thickness ratio limits	
		$\lambda_p$ (Compact/ Noncompact)	$\lambda_r$ (Noncompact/ Slender)
Flanges		$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Webs		$2.42\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$

미국 AISI[8]와 한국의 강구조 부재 설계기준 KDS 14 31 10[7]의 규정에 의하면, 휨을 받는 직사각형 또는 정사각형 박스단면의 공칭 휨강도  $M_n$ 은 항복강도, 플랜지 국부좌굴 강도, 웨브 국부좌굴 강도의 한계상태 중 최솟값으로 규정하고 있다. 박스단면에 대한 단면 분류에서 세장비 한계치를 Table 1에 제시하였다. 항복강도에 의한 공칭 휨강도는 소성모멘트(plastic moment)  $M_p$ 로서 다음과 같이 정의된다.

$$M_n = M_p = F_y Z \tag{1}$$

여기서,  $F_y$ 는 항복강도,  $Z$ 는 소성단면계수이다.

#### 2.1 플랜지 국부좌굴

플랜지가 조밀 단면일 경우 국부좌굴이 발생하지 않

에 국부좌굴 강도를 따로 산정하지 않는다. 비조밀 단면 플랜지를 갖는 경우 다음 식으로 공칭 휨강도를 결정한다.

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S) \left( 3.57 \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4.0 \right) \leq M_p \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 탄성단면계수,  $b$ 는 플랜지의 폭,  $t_f$ 는 플랜지의 두께,  $E$ 는 탄성계수이다. 한편, 플랜지가 세장 단면을 갖는 경우 플랜지 국부좌굴 강도는 다음식으로 산정된다.

$$M_n = F_y S_{eff} \quad (3)$$

여기서,  $S_{eff}$ 는 압축플랜지  $b$ 의 유효폭  $b_e$ 을 고려하여 계산된 유효단면계수이고, 유효폭  $b_e$ 는 다음 식으로 결정한다.

$$b_e = 1.92 t_f \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left[ 1 - \frac{0.38}{b/t_f} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right] \leq b \quad (4)$$

### 2.2 웨브 국부좌굴

KDS 14 31 10[7]와 AISC[8]에 따르면, 웨브로서 최소한의 기능성을 유지하기 위해 웨브는 세장 단면으로 구성되는 것을 허용하지 않고 조밀 또는 비조밀 단면으로 구성되는 것을 전제로 한다. 웨브의 국부좌굴 검토에서 비조밀 단면의 경우 다음 식으로 공칭 휨강도를 산정한다.

$$M_n = M_p - (M_p - F_y S_x) \left( 0.305 \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{F_y}{E}} - 0.738 \right) \leq M_p \quad (5)$$

여기서,  $h$ 는 웨브의 폭,  $t_w$ 는 웨브의 두께,  $S_x$ 는 강축에 대한 탄성단면계수이다.

요약하면 직사각형, 정사각형 및 2축 대칭 각형 강관의 공칭 휨강도  $M_n$ 은 비조밀 단면의 경우 Eqs. (1), (2), (5) 중에서 작은 값으로 결정된다. 만약 플랜지가 세장 단면이라면 Eq. (2) 대신에 Eq. (3)이 적용된다.

### 3. 조립박스 단면 압축강도

본 절에서는 휨강도 평가에 앞서 용접 조립된 박스단면 부재의 압축강도를 범용 유한요소해석 프로그램 Abaqus[10]를 사용하여 평가한다. 판재가 서로 용접으로 연결된 코너부에는 인장의 잔류응력이 발생한다. 면내에서 압축응

력과 인장응력의 자체 평형(self-equilibrium)을 만족하기 위해 각 코너부 사이 판의 중간 영역에는 압축응력이 잔류하게 된다. I-형 단면과 박스단면에 대한 잔류응력 측정은 Kang *et al.*[11]과 Wang *et al.*[12]에 의해 각각 수행된 바 있다. 박스단면에 대한 잔류응력의 정확한 패턴과 그 크기는 강재의 종류 및 용접 방식에 따라 다르지만 Fig. 1에 보인 실험치를 근거로 하여 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 바와 같은 압축 측 잔류응력의 크기를 항복응력의 0.125배로, 인장 측 잔류응력의 크기는 최대 항복응력에 도달한다고 가정하였다.

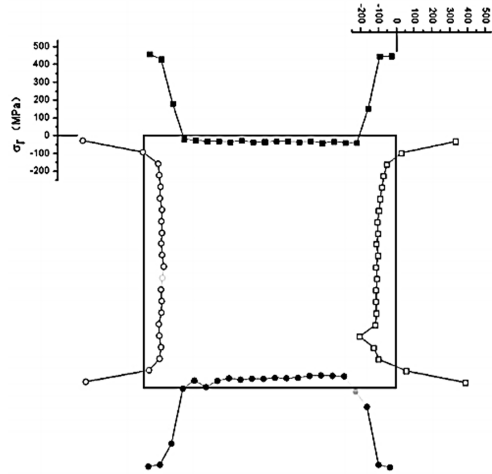


Fig. 1. Residual stress distribution of built-up box section measured by Wang et al.[11]

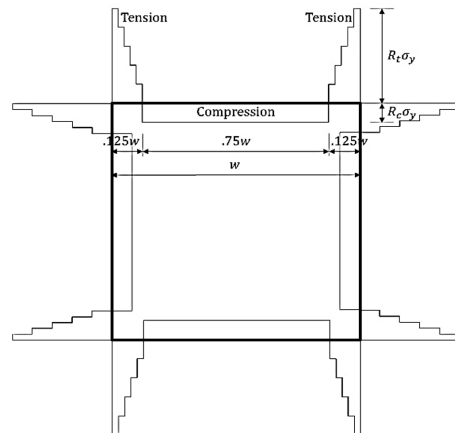


Fig. 2. Simplified model for residual stress for analysis

강판(steel plate) 구조물은 제작 및 시공 중 형상 오차가 발생할 수 있는데 이러한 초기 오차는 기하학적 초기결함으로 정의된다. 초기결함의 형상은 다양하게 나타

날 수 있지만, 탄성좌굴 해석으로 얻은 모드형상이 많은 연구에서 활용되었다[5,6]. 본 연구에서는 초기결함의 형상으로 고유치 해석(eigenvalue analysis)으로 얻은 탄성좌굴 첫 번째 모드형상(1st mode shape)을 적용하였고 최대 크기는 AASHTO/AWS[13]의 판구조물 제작 오차 규정을 적용하여 판 폭의 1/1000 수준으로 가정하였다. HSB460강의 항복강도는 460MPa로 부재의 항복 후 거동을 포함하는 극한강도 해석을 수행하였다.

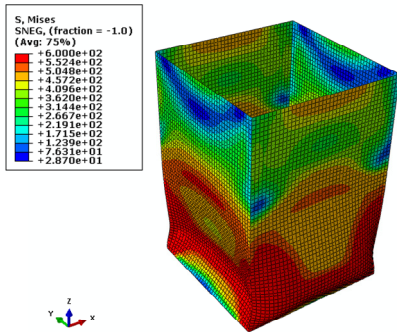


Fig. 3. Failure modeshape subjected to axial compression

강도 평가에 수행될 유한요소해석의 타당성을 보이기 위해 우선 폭  $b=1\text{m}$ 의 정사각형 단면과 높이 1.5m를 가지는 박스 부재를 대상으로 판두께  $t$ 를 변화시키면서 세장비( $b/t$ )를 조절하여 극한 압축강도를 분석하였다. 요소망(element mesh)의 민감도 해석을 수행하여 강도의 변화가 0.2% 이하가 될 때까지 요소망 크기를 조정하였다. 부재가 저항하는 최대 하중으로 정의되는 극한강도에 도달했을 때 축방향 압축을 받는 박스부재 파괴 형상의 특징은 Fig. 3에 보인 바와 같이 하단부에 나타난 국부좌굴 현상으로 파악되었다.

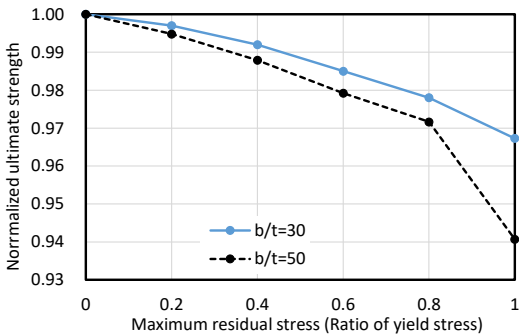


Fig. 4. Effect of residual stresses on ultimate compressive strength

잔류응력의 최댓값이 극한 압축강도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 박스단면 코너 부위에 발생한 잔류응력의 크기를 항복응력 대비 비율 0.0에서 1.0까지 적용하여 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 4에 보였는데 판-폭 두께비에 따라 최대 6% 수준으로 강도가 감소하는 효과를 확인할 수 있다.

#### 4. 조립박스 단면 휨강도

두께가 일정한 HSB460 강판으로 용접 조립된 박스단면 부재의 극한 휨강도를 수치해석적 기법으로 평가한다. 용접에 의한 잔류응력은 3절에서 기술한 방식으로 적용하되 최대 크기를 항복강도와 같게 하였다. 우선 폭  $b=1\text{m}$  정사각형 단면을 가지는 길이 12m의 박스부재를 설정하고 판두께  $t$ 를 변화시키면서 세장비를 조절하였다. 손수 휨 상태를 구현하기 위하여 박스부재의 양단에서 자유도를 일체로 처리할 수 있는 MPC (multi-point constraint) 기능[10]을 활용하여 양쪽 단부에 휨모멘트를 재하하였다. 초기결함에 이용된 탄성좌굴 모드형상을 대칭면 기준 그 절반을 Fig. 5에 보였다.

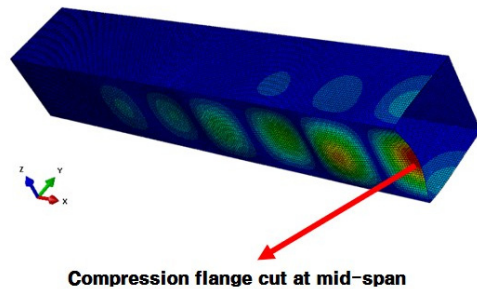


Fig. 5. Elastic buckling modeshape for geometric initial imperfection

항복강도 355MPa 이하의 강재로 구성된 판구조물의 극한강도 평가에서 재료의 응력-변형도 관계에서 항복점 이후 나타나는 변형을 경화(strain hardening)가 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보고되었다[4,6]. 이는 항복점 이후 변형을 경화가 나타나기까지 완전소성 상태(perfect plastic state)가 일정 구간 지속되기 때문이다. 그러나 항복강도 460MPa 이상을 보장하는 HSB460 급 고강도 강재는 Fig. 6에 보인 바와 같이 항복점 이후 완전소성 구간을 보이지 않고 변형을 경화가 즉시 구현된다. 이러한 즉각적인 변형을 경화 현상은 판구조물의

극한강도에 영향을 미칠 것으로 예상되므로 실험으로 얻은 비선형 응력-변형률 재료 모델을 해석에서도 채택하고 더불어 탄성-완전소성(elastic and perfect plastic) 모델도 추가로 고려하여 그 결과를 비교하였다.

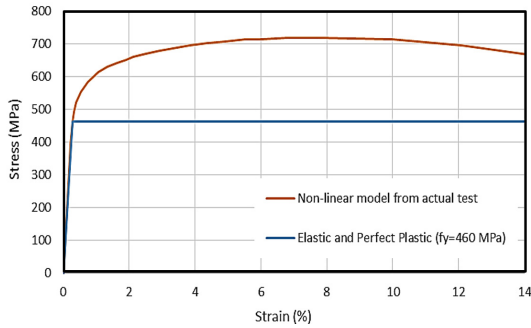


Fig. 6. Stress-strain relationship of HSB460

우선 기하학적 초기결함의 크기가 강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 탄성좌굴 모드형상의 최대 변위의 크기를 변화시켜 얻은 극한강도를 Fig. 7에 보였다. 세장비 (b/t)가 큰 단면일수록 초기결함의 크기에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 판폭의 2/1000 수준의 초기결함은 2% 내외로 극한 휨강도가 감소시키는 경향을 확인할 수 있다. AASHTO/ AWS[13]는 판구조 제작 오차는 판폭의 1/1000 이하로 관리할 것을 제시하고 있다.

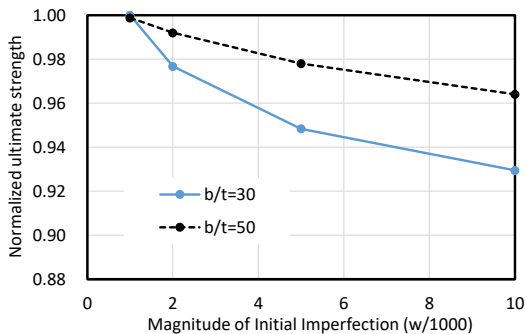


Fig. 7. Effect of magnitude of initial imperfection

폭  $b = 1\text{m}$  정사각형 단면을 가지는 길이  $12\text{m}$ 의 예제 박스부재의 두께  $t$ 의 변화에 따른 세장비( $b/t$ )를 조절하면서 수행한 극한 휨강도 해석의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 비선형 응력-변형률 곡선을 재료 모델로 적용하였을 때 판의 세장비 40 이하의 단면에서 소성모멘트보다 큰 극한 휨강도가 구현되는 것으로 나타났는데 이는

비선형 재료 모델의 변형률 경화의 영향 때문으로 이해될 수 있다. 탄성-완전소성 모델의 경우 소성모멘트 이상의 휨강도는 구현되지 않았다. 세 가지 대표적인 단면에 대해 극한하중 도달 시 변형 형상과 von Mises 응력분포를 Fig. 9에 보였다. 세장비가 큰 모델에서 압축플랜지와 웨브의 접합 부위에 국부좌굴이 확인되었다.

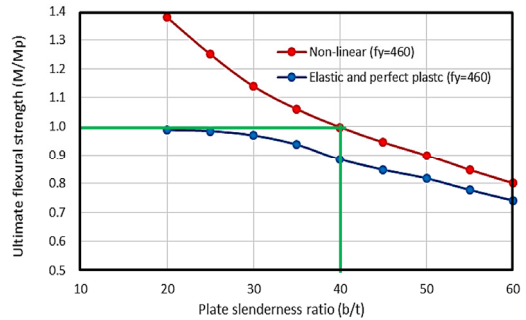


Fig. 8. Ultimate flexural strength vs. slenderness ratio

Table 2. Hypothetical square box section dimension and plastic moment,  $M_p$

Box Dimension	Thickness (mm)	Slenderness Ratio (b/t)	$M_p$ (N·m)
0.5m×0.5m (5 models)	8	62.5	1.380E+06
	10	50.0	1.725E+06
	15	33.3	2.588E+06
	20	25.0	3.450E+06
	25	20.0	4.313E+06
1.0m×1.0m (9 models)	15	66.7	1.035E+07
	20	50.0	1.380E+07
	25	40.0	1.725E+07
	27	37.0	1.863E+07
	30	33.3	2.070E+07
	35	28.6	2.415E+07
	40	25.0	2.760E+07
	45	22.2	3.105E+07
	50	20.0	3.450E+07
1.5m×1.5m (5 models)	25	60.0	3.881E+07
	35	42.9	5.434E+07
	45	33.3	6.986E+07
	55	27.3	8.539E+07
	65	23.1	1.009E+08
2.0m×2.0m (8 models)	30	66.7	8.280E+07
	40	50.0	1.104E+08
	50	40.0	1.380E+08
	60	33.3	1.656E+08
	70	28.6	1.932E+08
	80	25.0	2.208E+08
	90	22.2	2.484E+08
	100	20.0	2.760E+08

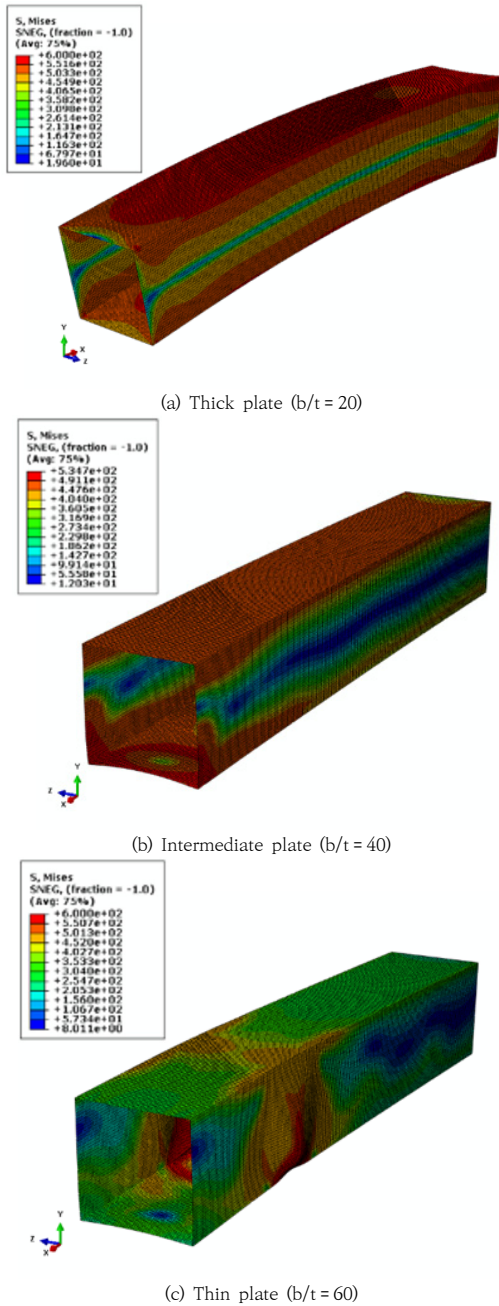


Fig. 9. Typical failure modeshapes at ultimate stage

Table 2에 보인 바와 같이 다양한 치수의 폭과 두께를 가지는 정사각형 단면 박스모델을 해석하여 얻어진 극한 휨강도를 앞서 2장에서 소개한 설계기준강도와 비교하였다. 박스단면은 폭은 0.5m에서 2.0m까지, 두께는 8mm에서 100mm까지 실 구조물로 많이 이용되는

치수를 고려하였다. 해석 결과로 얻어진 극한 휨강도는 Fig. 10에 AISC의 설계강도와 더불어 도시되었다.

AISC에서 최종 설계강도는 앞서 기술한 항복강도, 플랜지 국부좌굴 강도, 웨브 국부좌굴 강도 검토를 거쳐 이중 지배 강도가 최종 설계 휨강도로 제시된다. 이러한 설계강도의 결정 과정에서 AISC 강도식이 세장비 (b/t) 값 30 주변에서 불연속 구간이 발생되었다. 해석으로 얻어진 극한 휨강도는 AISC에서 제시되는 해당 강도 값보다 다소 높게 나타났는데 해석 결과를 안전 측으로 회귀분석하여 설계식으로 제안하면 다음과 같다.

$$\frac{M_n}{M_p} = \frac{2.88}{(b/t)^{0.318}} \leq 1.0 \quad (6)$$

Fig. 10에서 항복강도 이하의 강도가 구현되는 구간을 살펴보면 세장비 25에서 3%, 세장비 50에서 10% 수준으로 AISC는 해석 값보다 낮게 제시하고 있음이 확인된다.

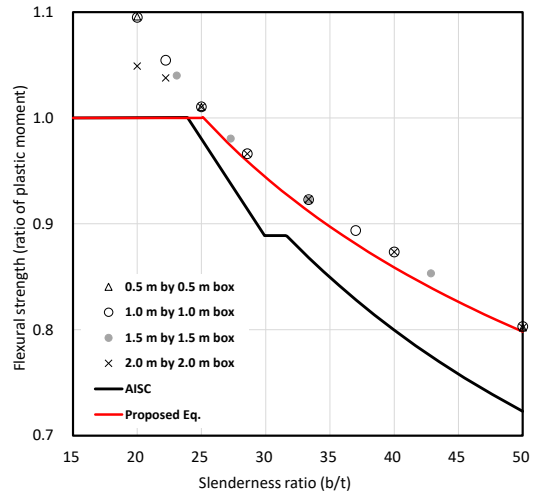


Fig. 10. Stress-strain relationship of HSB460

제안식 Eq.(6)은 설계기준 강도와 마찬가지로 항복강도를 기준으로 산정되는 소성모멘트를 상한값으로 제한하였다. Fig. 10에서 확인되듯이 해석에 의한 극한 휨강도는 AISC의 설계기준강도보다는 높게 평가되었다. 이는 HSB460강이 가지는 항복점 이후 즉각적인 변형을 경화 현상이 구현되었기 때문으로 설명될 수 있다. 제안식 Eq.(6)이 적용된다면 HSB460 강재가 가지는 변형을 경화 특성이 충분히 반영되어 박스단면 부재에 대한 보다 나은 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

## 5. 결론

교량구조용 압연강재로 개발된 HSB460강을 사용하여 용접으로 접합하여 제작된 박스단면 부재의 휨 거동에 대한 극한강도 특성을 평가하였다. 잔류응력과 초기 결함이 해석 모델링에 고려되었고 HSB460강의 비선형 응력-변형을 곡선 모델과 탄성-완전소성 모델을 적용하여 극한강도를 비교하여 변형을 경화의 영향을 정량적으로 평가하였다.

수치해석 기반 비선형 유한요소해석으로 얻은 극한 휨 강도의 회귀분석을 통해 휨강도식을 제안하였고 설계기준에서 제시된 휨강도와 비교하였다. HSB460강이 가지는 항복 직후 구현되는 변형을 경화 효과로 인하여 조립 박스 부재의 극한 휨강도는 AISC 설계기준에서의 휨강도보다 다소 높게 평가되었다. 항복강도 이하의 강도가 구현되는 세장비 구간에서 세장비 25에서 3%, 세장비 50에서 10% 수준으로 설계기준은 휨강도를 낮게 제시하는 것으로 확인되었다. 본 연구에서의 제안된 HSB460강으로 조립된 박스부재의 전용 설계식이 설계가이드라인에 활용된다면 강도 한계상태 설계에서 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다. 추후 보강재가 고려된 조립박스 부재의 극한 휨강도 평가에 대한 연구로 이어질 것을 기대된다.

## References

[1] Korean Agency for Technology and Standards, KS D 3868 Rolled steels for bridge structures, 2018.

[2] J. H. Kim, K. Y. Kim, J. H. Lee, K. S. Kim, Y. J. Kang. "Flange local buckling (FLB) for flexural strength of plate girders with high performance steel (HSB 800)", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 26, No. 2, pp. 91-103, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2014.26.2.091>

[3] J. H. Lim, D. H. Choi. "Nominal flexural strength considering strain-hardening effect of HSB600 Steel for composite I-girders in positive bending", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2017.29.1.001>

[4] D. K. Shin, K. S. Kim. "Flexural strength of composite HSB690 I-girders in negative moment", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 19, No. 6, pp. 1875-1894, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13296-019-00251-1>

[5] K. S. Kim. "In-plane compressive strength of hybrid

steel stiffened plate with single stiffener", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 31, No. 1, pp. 65-73, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2019.31.1.065>

[6] K. S. Kim, C. H. Yoo. "Ultimate strengths of steel rectangular box beams subjected to combined action of bending and torsion", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 30, No. 6, pp. 1677-1687, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.11.011>

[7] Korea Construction Standards Center, KDS 14 31 10 Design Code for Steel Structural Members (Load and Resistance Factor Design), 2023.

[8] American Institute of Steel Construction, Steel Construction Manual, 14th Ed., AISC, USA, 2016.

[9] CEN European Committee for Standardization. EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium. 2009.

[10] Abaqus Inc. Abaqus standard user's manual, Ver. 6.14. 2014.

[11] S. C. Kang, K. S. Kim, J. K. Lee, J. Lee. Evaluation of residual stresses in HSB690 I-shaped girder. *Proceeding of the 11th Korea-Japan Joint Symposium on Steel Bridges*, Korea Society of Steel Construction, Jeju, Korea. 2011.

[12] Yan-Bo Wang, Guo-Qiang Li, Su-Wen Chen. "The assessment of residual stresses in welded high strength steel box sections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 76, pp. 93-99, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.025>

[13] AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2015 Bridge welding code, 6th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials and American Welding Society. 2015, pp.56-58.

### 김 경 식(Kyung-Sik Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : Auburn University Dept. of Civil & Environmental Engineering (공학박사)
- 1994년 1월 ~ 1999년 8월 : 포항 산업과학연구원 선임연구원
- 2005년 10월 ~ 2009년 8월 : GS건설 기술연구소 책임연구원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 청주대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목구조공학, 강구조공학, 교량공학, 시설물 설계기준