

웹 높이에 따른 엠보싱 웹를 가진 보 부재의 구조성능평가

노다훈¹ · 신경재^{2*} · 이준섭³ · 이영주³ · 채일수⁴

¹석사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, ²교수, 경북대학교, 건설환경에너지공학부,

³박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, ⁴대표이사, ㈜아이에스중공업

Evaluation of Structural Performance of Beam with Embossed Webs According to Web Length

Noh, Da Hun¹, Shin, Kyung Jae^{2*}, Lee, Jun Seop³, Lee, Young Joo³, Chae, Il Soo⁴

¹Graduate Student (Master's Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

²Professor, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

³Graduate Student (Doctor's Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

⁴President, Innovation & Smart Heavy Industry Co., Ltd., Gyeongsan, 38449, Korea

Abstract - Today's buildings are becoming long spanned due to the increase of floor area ratio and the industrial enlargement. This phenomenon leads to interest in the architectural structural system. In particular, studies on beam with corrugated web, that is, corrugated beams, which were born in Sweden in the 1960s, are being actively conducted to this day. Corrugated beams have the effect of reducing construction costs and increasing the strength that occurs in cross-sections such as texture and waveform. However, although the IEB(intaglio and embossed beam) developed in preceding study is one of the corrugated beams, it is difficult to apply in an actual construction site due to low web height. Therefore, in this study, the web height of IEB was set to 400 mm, 600 mm, 900 mm, and the loading test was conducted, and as web height increased, effect of increasing the shear strength of IEB was to be confirmed.

Keywords - Steel structure, Embossed web, Corrugated girder, Sinusoidal, Shear strength

1. 서론

1.1 연구의 배경

오늘날의 구조물은 국토의 용적률을 높이기 위함과 산업의 대형화 등을 이유로 그 규모가 거대화, 장스팬화되는 경향을 보인다. 이러한 경향은 구조시스템의 선택으로 이어지게 되는데, 재료의 경제성과 건설비의 절감 등을 만족시킬 수 있는 구조시스템의 선택에 관한 관심으로 이어지게 된다.

이러한 관심과 함께 성장한 대표적인 건설 산업의 재료는 바로 철강이다. 플랜지와 웹으로 구성된 H형강은 플랜지의

두께가 일정하게 유지되며 단면 성능이 우수하고, 이음 및 접합이 용이하여 건축구조용 강재로 널리 쓰이고 있으며, 오늘날에 이르러서는 다양한 보강 기술과 재료가 혼합되는 등의 새로운 변화를 시도하고 있다. 특히, 좌굴 능력이 우수한 평판을 가진 주름진 판은 Fig. 1과 같이 항공기, 기차, 컨테이너 등과 같은 건축 자재만이 아니라 다양한 산업에서도 많이 사용된다. 1960년대 스웨덴에서 강구조물에 적용을 시발점으로, 유럽에서의 활발한 기술 적용은 주름 웹를 가진 보(corrugated girder)의 구조설계법 및 관련 기준에 관한 다양한 연구가 수행되었다^{[1]-[4]}.



Fig. 1. Steel structure using corrugated web beam

Note.-Discussion open until December 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 26, 2021; revised on April 06, 2021; approved on April 06, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-5590

E-mail. shin@knu.ac.kr

주름 웹브 보는 주름판의 가공을 통해 웹브 단면의 절약으로 이어지는 등의 물량감소로 최적화 설계를 할 수 있는 경제적인 이점이 있다. 또한 주름 웹브 보는 스티프너를 필요로 하지 않으며, 기존의 H형강보다 웹브가 매우 얇으면서도 전단력에 대한 저항성도 갖고 있으며, 웹브가 얇아질수록 국부좌굴을 고려해야 하는 기존의 H형강과 달리 구조 설계 측면에서도 이점을 갖고 있다^{[5],[6]}.

1.2 연구의 목적

주름보의 단면 형상은 주로 제형과 파형 단면으로 나누어진다. 그러나, 제형·파형과 같은 단면 형상은 가공과정에서 생산성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 하지만, 선행연구를 통해 기계 용접이 가능한 파형 형태의 주름 웹브를 가진 엠보싱 웹브를 가지는 보(intaglio and embossed beam, 이하 IEB)를 개발하였다. IEB는 기계 용접이 가능하여 생산성을 더욱 쉽게 챙길 수 있으며, 동시에 강도가 증가하는 구조적인 장점이 있다. 하지만, 기존에 개발된 IEB의 설계식은 낮은 웹브 높이를 기준으로 하였기에, 장스팬 건축물의 보급으로 인해 기존의 웹브 높이로 설계식의 적용에 어려움이 있으며, 관련 연구 또한 미흡한 실정이라 신뢰성이 떨어지는 모습을 보인다^[7]. 따라서 본 논문은 기존의 IEB 설계식을 장스팬화 건축물이 요구하는 IEB의 웹브 높이(h_w)를 900 mm로 설정하여, 가력실험을 진행하였다. 웹브 높이(h_w)가 높아질수록 IEB의 전단강도 증대 효과를 증명하고자 선행 연구의 데이터인 웹브 높이(h_w) 400 mm, 600 mm IEB와 비교 및 분석을 실행하였으며, 아울러 엠보싱 웹브의 구조부재로서의 장점을 명확하게 판단하기 위하여 일반 평판 웹브를 가진 H형강과도 비교하였다.

2. 실험계획

Fig. 2는 실험체 IEB의 엠보싱 웹브 상세 형상을 보여준다. $h_{w,ieb}$ 는 IEB 웹브 주름 부분의 높이를 나타내며, $h_{w,f}$ 는 웹브 양 끝단의 평면주의 높이를 나타낸다. 실험체의 제작 방식은 강판을 절단, 용접하여 생산하는 built-up H-beam 방식을 채택하여 제작했다. 엠보싱 형상으로 프레스 가공 후 웹브와 플랜지를 용접 접합하여 제작하였으며, 모든 실험체는 엠보싱 가공 및 용접 후 도장까지 완료하였다. 실험체에 사용된 강재는 플랜지의 경우 SM355이며, 웹브의 경우 SS275이다.

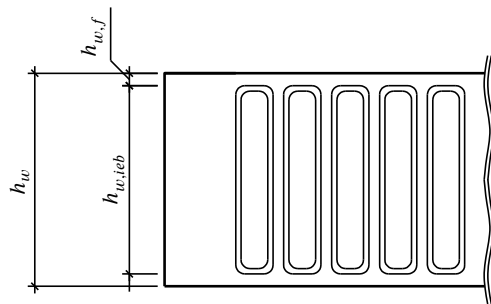


Fig. 2. Detailed shape of IEB web

Table 1은 실험체의 일람표를 나타낸다. 실험체의 변수 설정으로는 웹브 단면의 형상을 엠보싱 웹브를 가지는 보 부재와 평판 웹브를 가지는 보 부재로 나뉘었으며, 웹브 높이(h_w)는 400 mm, 600 mm, 900 mm로 실험체 간에 변수를 설정하였다. 선행연구의 경우 프레스 기계 용량에 따라 웹브 두께를 설정하였으나, 웹브 높이(h_w) 900 mm인 IEB의 경우 플랜지 폭과 두께는 콤팩트 단면이 되도록 245 mm, 14 mm로 제작하였다. 웹브 두께(t_w)는 웹브 높이를 감안하여 4.5 mm

Table 1. Classification of specimens

No.	Specimen	Section type	Standard (mm)	h_w (mm)	h_w/t_w (mm)	$h_{w,ieb}$ (mm)	$h_{w,f}$ (mm)	Length (mm)
1	IEB-400-2.3	Embossed web	H-424×195×2.3×12	400.0	173.9	302.5	97.5	4,320
2	IEB-600-3.2		H-624×195×3.2×12	600.0	187.5	506.0	94.0	4,320
3	IEB-600-4.0		H-624×195×4.0×12	600.0	150.0	506.0	94.0	4,320
4	IEB-900-4.5		H-928×245×4.5×14	900.0	200.0	189.0	711.0	4,000
5	FWB-400-2.3	Flat web	H-424×195×2.3×12	400.0	173.9	-	400.0	4,320
6	FWB-600-3.2		H-624×195×3.2×12	600.0	187.5	-	600.0	4,320
7	FWB-600-4.0		H-624×195×4.0×12	600.0	150.0	-	600.0	4,320
8	FWB-900-4.5		H-928×245×4.5×14	200.0	200.0	-	900.0	4,000

IEB: intaglio and emboss beam; FWB: flat web beam; h_w/t_w : slenderness ratio; $h_{w,ieb}$: IEB web corrugation height; $h_{w,f}$: height of flat section at both ends

로 제작하였으며, 순수 휨 구간을 확보하기 위해 가력지그 (1,200 mm)를 설치하여 2점 가력을 실시하였다. 횡좌굴에 의한 파괴를 피하기 위하여 횡지지대를 하였으며, 이론 계산을 통해 전단파괴를 확인할 수 있는 지간 길이로는 4,000 mm 와 4,320 mm로 설정하였다.

3. 실험

3.1 재료시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 특성과 성질을 파악하기 위하여 재료시험을 진행하였다. 재료시험은 한국공업규격의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)에 의거하여 판모형 정형 시험편 5호를 따라 제작하였으며, 금속재료 인장시험방법(KS B 0802)에서 제시하는 시험방법에 따라 진행하였다^{[8],[9]}. 실험체에 사용된 강재는 SS275(웹)와 SM355(플랜지)이다. 실험에 사용된 강재의 기계적 성질은 Table 2에 정리하였다. 시험편의 변형률 측정을 위해 연신율계(extensometer)를 사용하였으며, Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 재료시험의 결과를 보여준다.

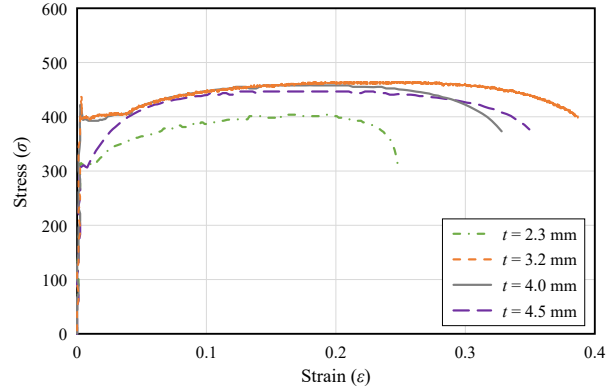
Table 2. Mechanical properties of steel

Coupon	<i>t</i> (mm)	<i>E</i> (MPa)	<i>F_y</i> (MPa)	<i>F_u</i> (MPa)	Elongation (%)
SS275 (web)	2.3	210×10 ³	319.32	403.25	34.7
	3.2		310.84	448.88	39.0
	4.0		395.58	459.18	35.8
	4.5		400.53	465.05	42.3
SM355 (flange)	12.0		455.32	535.66	39.1
	14.0		389.53	459.14	39.3

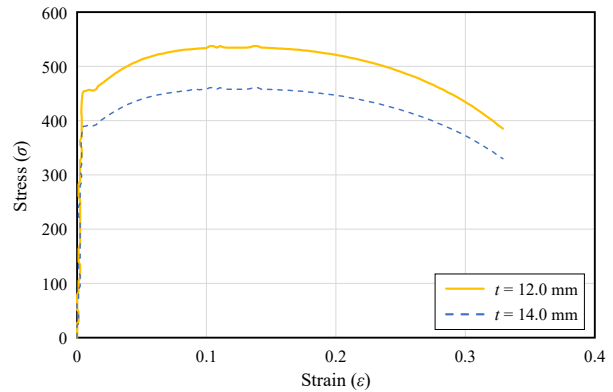
t: thickness of coupons; *F_y*: yield strength of steel; *F_u*: tensile strength of steel

3.2 실험방법

Fig. 4는 실험체의 가력 형상과 횡지지대의 형상을 보여준다. 지간길이가 긴 실험체에 대한 실험을 수행하기 위해 반력프레임(이하 받침대)을 용량 3,000 kN의 만능재료시험기(UTM) 위에 설치하였다. 받침대 위에는 실험체가 탄성 횡좌굴을 피해 충분한 내력을 발휘할 수 있도록 강구조설계기준(KDS)을 기반으로 보의 비지지 길이를 산정하여 횡지지대를 설치하였다^[10]. 실험 중 실험체가 지지에 닿았을 경우 발생

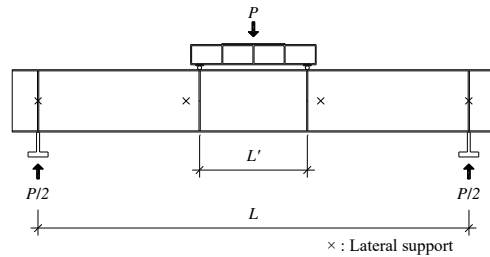


(a) Stress-strain relationship of SS275

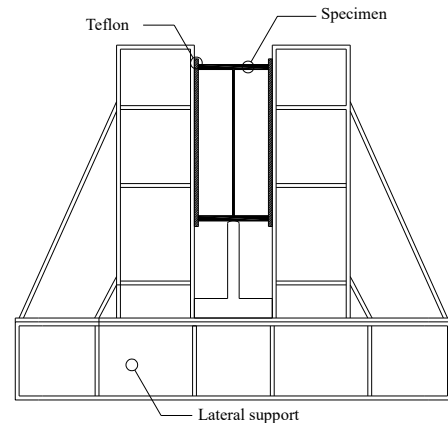


(b) Stress-strain relationship of SM355

Fig. 3. Material test result



(a) Loading test set up



(b) Lateral support set up

Fig. 4. Set-up of specimen and lateral support

하는 마찰력의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 실험체와 횡지시대 사이 마찰면에 테프론(Teflon)을 부착하였으며, Fig. 4(a)와 같이 힌지를 이용하여 2점 가력을 실시하였고, 가력지점간의 거리는 1,200 mm로 설정하였다. 실험의 진행은 실험체가 최대내력에 도달한 이후 압괴, 파괴 및 변형이 발생할 때까지 변위제어로 진행하였으며, 실험속도는 0.1 mm/sec로 수행하였다.

4. 실험결과 및 설계식 분석

4.1 실험결과

Table 3는 각 실험체의 실험결과를 나타낸다. P_{max} 는 최대하중을 의미하며, M_{max} 는 실험체의 중심부에서 발생한 최대모멘트를 의미한다. 전체적인 실험결과를 요약하였을 때, IEB 실험체는 FWB 실험체보다 초기강성이 낮은 모습을 보이며, 최대하중은 높은 모습을 보인다. 이는 IEB의 엠보싱을 제작하기 위해 프레스기를 이용하는데, 이 때 엠보싱 부위에 소성 변형이 발생하게 되어 엠보싱 단면에서 휨응력을 충분히 발휘하지 못하게 되었다고 판단된다. IEB 실험체의 엠보싱 단면 형상 때문에 휨강도는 FWB 실험체에 비해 충분히 발휘를 못하였고, 전단강도는 상승하게 되는 모습을 보였다.

Table 3. Experiment result

No.	Specimen	P_{max} (kN)	M_{max} (kN·m)	Buckling mode
1	IEB-400-2.3	263.1	213.1	Web
2	IEB-600-3.2	490.1	397.0	Web
3	IEB-600-4.0	677.3	548.6	Web
4	IEB-900-4.5	1,243.3	870.3	Web
5	FWB-400-2.3	188.8	152.9	Web
6	FWB-600-3.2	347.6	281.5	Web
7	FWB-600-4.0	487.7	395.1	Web
8	FWB-900-4.5	1,072.5	750.8	Web

P_{max} : maximum load measured from experiment; M_{max} : maximum moment acting on mid-span of beam.

Fig. 5는 IEB·FWB 실험체의 웹브 높이(h_w)가 400 mm일 때 하중-변위 곡선을 나타내며, Fig. 6는 IEB·FWB 실험체의 최종 파괴 형상을 보여준다. 웹브 높이(h_w) 400 mm일 때, IEB 실험체는 FWB 실험체보다 초기 강성이 낮은 모습을 확

인할 수 있다. 이후 최대하중(P_{max}) 도달 이후 내력이 급속히 감소하는 모습을 보아 Fig. 6(c)와 같이 가력지점과 인접한 웹브에서 좌굴이 발생하는 모습을 보였다. FWB 실험체의 경우 최대하중(P_{max})이 188.8 kN으로 나타났으며, 이 때 처짐은 12.6 mm로 나타났다. 마지막으로 두 실험체 모두 최대하중(P_{max})에 도달하였을 때 IEB 실험체가 FWB 실험체보다 약 139.35%의 전단강도 증가 효과를 보였다.

Fig. 7은 IEB·FWB 실험체의 웹브 높이(h_w)가 600 mm, 웹브 두께(t_w)가 3.2 mm, 4.0 mm일 때 하중-변위 곡선을 나타내며, Fig. 8은 실험체의 최종 파괴 형상을 보여준다. IEB 실험체의 경우 웹브 두께(t_w)에 상관없이 FWB 실험체보다 초기 강성이 낮은 모습을 보였으며, Fig. 8(c) 및 Fig. 8(f)와 같이 가력지점 인근 부분에서 플랜지와 웹브의 국부좌굴 현상이 보이는 모습을 확인할 수 있다. FWB 실험체는 최대하

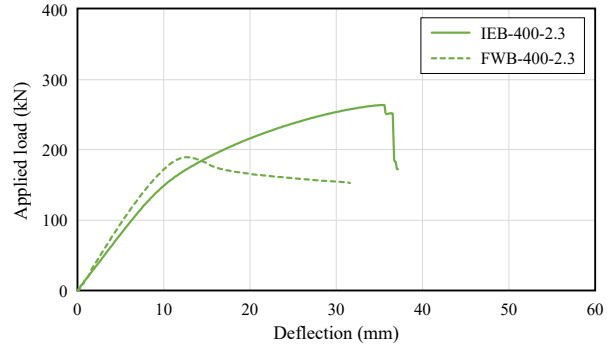


Fig. 5. Load-deflection curve of IEB and FWB (web height: 400 mm)



(a) Failure mode of IEB-400-2.3



(b) Before experiment



(c) After experiment



(d) Failure mode of FWB-400-2.3



(e) Before experiment



(f) After experiment

Fig. 6. Failure mode of IEB and FWB (web height: 400 mm)

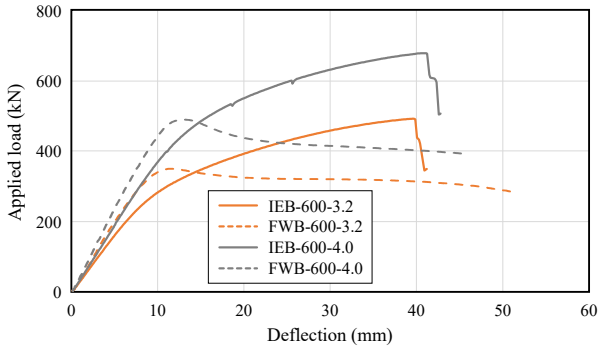


Fig. 7. Load-deflection curve of IEB and FWB (web height: 600 mm)



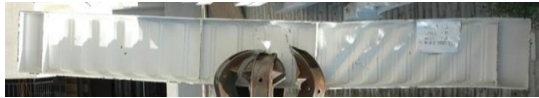
(a) Failure mode of IEB-600-3.2



(b) Before experiment



(c) After experiment



(d) Failure mode of IEB-600-4.0



(e) Before experiment



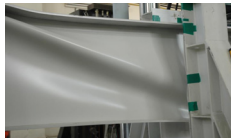
(f) After experiment



(g) Failure mode of FWB-600-3.2



(h) Before experiment



(i) After experiment



(j) Failure mode of FWB-600-4.0



(k) Before experiment



(l) After experiment

Fig. 8. Failure mode of IEB and FWB (web height: 600 mm)

중(P_{max})이 웨브 두께(t_w)에 따라 각각 347.6 kN, 487.7 kN으로 나타났으며, 이 때 처짐은 11.6 mm, 13 mm로 나타났다. 마지막으로 최대하중(P_{max})에 도달하였을 때 IEB 실험체는 FWB 실험체보다 웨브 두께(t_w) 3.2 mm, 4.0 mm 순으로 각각 140.90 %, 138.88 %의 강도증가 효과를 보였다.

Fig. 9은 웨브 높이(h_w) 900 mm일 때, IEB 실험체와 FWB 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내며, Fig. 10은 두 실험체의 최종 파괴 형상을 보여준다. 900 mm를 포함하여 모든 실험체는 IEB가 FWB에 비해 초기강성이 낮은 모습을 확인할 수 있으며, Fig. 10(c) 및 Fig. 10(f)와 같이 두 실험체 모두 보 부재가 힘에 대한 성능을 발휘하기 전에 웨브에서 좌굴하는 모습을 보였다. 하지만, 웨브 높이(h_w)가 900 mm일 때 엠보싱의 강도증가 효과는 IEB 실험체가 FWB 실험체에 비해 115.93 %로 웨브 높이(h_w)가 낮은 IEB-400, IEB-600 실험체에 비해 다소 낮은 효과를 보였다.

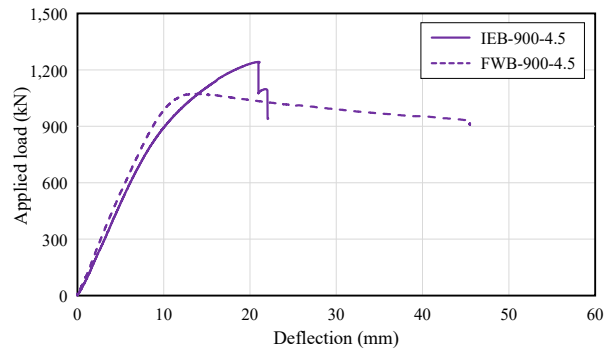


Fig. 9. Load-deflection curve of IEB and FWB (web height: 900 mm)



(a) Failure mode of IEB-900-4.5



(b) Before experiment



(c) After experiment



(d) Failure mode of FWB-900-4.5



(e) Before experiment



(f) After experiment

Fig. 10. Failure mode of IEB and FWB (web height: 900 mm)

Fig. 11은 IEB 실험체에 부착된 스트레인 게이지로 측정 한 플랜지의 변형률 변화를 보여준다. 상하부 플랜지의 변형률이 거의 대칭으로 측정되었으며, 모든 실험체의 플랜지는 실험이 종료될 때까지 항복 변형률과 소성모멘트에 도달 하지 못하였다. 이는 가력에 의해 보 부재가 휨에 대한 성능을 발휘하기 전에 웹브에서 전단파괴를 보였기 때문이다.

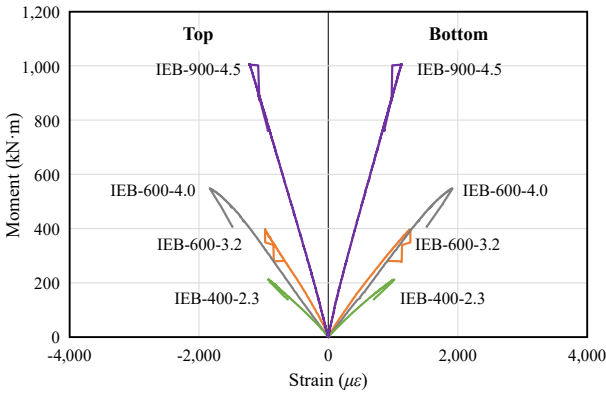


Fig. 11. Moment and flange strain curves (IEB)

Fig. 12는 FWB 실험체에 부착된 스트레인 게이지로 측정 한 플랜지의 변형률 변화를 보여준다. IEB 실험체와 유사한 모습을 보이며, 모든 실험체는 항복 변형률에 도달하지 못 하였다. 실험에 사용된 모든 실험체는 웹브가 세장하여 플랜지의 변형을 잡아주지 못하고, 플랜지의 압축 좌굴의 형상을 보였다.

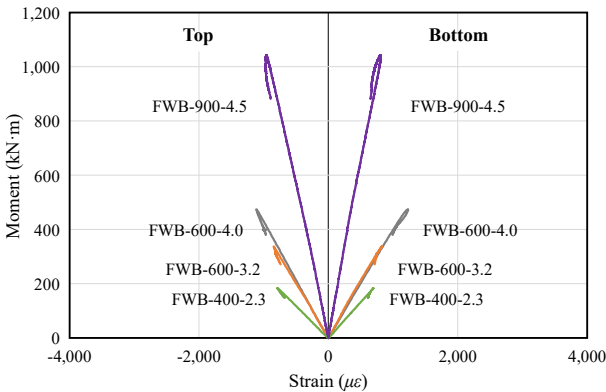


Fig. 12. Moment and flange strain curves (FWB)

4.2 설계식 분석

4.2.1 KDS 설계식

KDS에서는 엠보싱 웹브 및 주름보에 대한 기준식이 제시 되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 실험체에 사용된 실험체의

내력을 일반적인 H형강에 사용하는 설계식과 비교하기 위하여 KDS 14 31 10의 공칭전단강도 설계식을 사용하였다. 4.3.2.1.2절에 의하면 “웹브에 전단력을 받는 1축 또는 2축대칭단면, 단일 H형강과 강관, 그리고 약축 방향에 전단력을 받는 1축 또는 2축대칭단면에 적용한다”고 명시되어 있다^[10].

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v \quad (1)$$

여기서, F_y = 강재의 항복강도, C_v = 전단상수, A_w = 웹브 높이 h_w 와 웹브 두께 t_w 의 곱.

식 (1)에 사용된 전단상수 C_v 는 아래와 같은 식으로 산정한다.

$$C_v = 1.0 \text{ for } h_w/t_w \leq 1.10 \sqrt{k_v E/F_y} \quad (2)$$

$$C_v = \frac{1.10 \sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} \text{ for } 1.10 \sqrt{k_v E/f_{yw}} < h_w/t_w \leq 1.37 \sqrt{k_v E/f_{yw}} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{1.51 E k_v}{(h/t_w)^2 F_y} \text{ for } h_w/t_w > 1.37 \sqrt{k_v E/f_{yw}} \quad (4)$$

여기서, k_v = 웹브판좌굴계수, E = 탄성계수, F_{yw} = 웹브 항복강도.

식 (2), 식 (3), 식 (4)에 사용된 웹브판좌굴계수 k_v 의 경우 본 연구에서는 구속판웹브요소를 사용했기에 아래와 같이 산정한다.

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h_w)^2} \quad (5)$$

$$k_v = 5 \text{ for } a/h_w > 3.0 \text{ or } a/h_w > \left[\frac{260}{(h_w/t_w)} \right]^2 \quad (6)$$

여기서, a = 수직스티프너의 순간격.

4.2.2 IEB 설계식

IEB의 설계식은 식 (7)과 같이 EN 1993-1-5에서 제시하는 주름 웹브 설계식을 기반으로 삼는다. 주름 웹브 전단강도 산정 시에는 주름에서 발생하는 국부좌굴과 여러 주름에 동시에 발생하는 전체 좌굴을 고려하여 계산해야 한다. EN 1993-1-5에서는 전단좌굴에 대한 전단좌굴응력을 국부좌굴과 전체좌굴을 나누어 정의하고 있다. 주름 웹브 보의 대

표적인 종류는 제형과 파형으로 나뉘지는데, IEB의 경우 Fig. 13과 같이 파형 단면에 가깝기 때문에 파형으로 가정하고 내력을 계산한다^{[11]-[13]}.

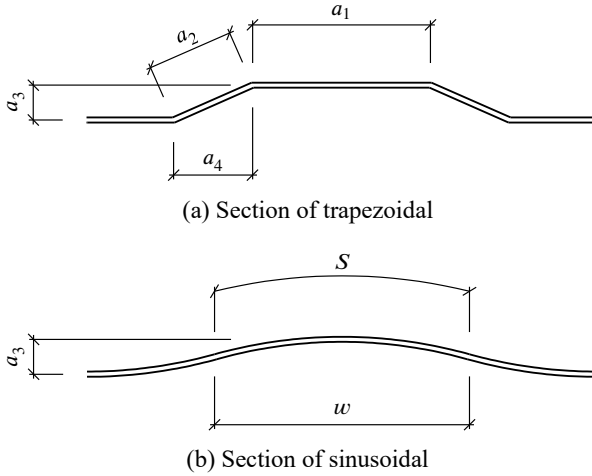


Fig. 13. Transformed web section of IEB

$$V_{bw} = \chi_{c,g} \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} h_w t_w \quad (7)$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (8)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad (9)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_z^3} \quad (10)$$

$$D_x = \frac{E t_w^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{w}{s} \quad (11)$$

$$D_z = \frac{E I_{z,c}}{w} \quad (12)$$

여기서, $\chi_{c,g}$ = 전체좌굴 전담감소계수

$\tau_{cr,g}$ = 전체 평판좌굴의 응력

D_x = x축의 면외좌굴강성

D_z = z축의 면외좌굴강성

w = IEB 웨브 단면의 반주기

s = IEB 웨브 단면의 반주기의 거리

사인형 주름 웨브 단면형상은 파고($a_3/2$), 파장(s, w)과 웨브 두께(t_3)로 정의할 수 있다. 식 (13) - 식 (15)는 사인 형상주

름함수(y), 반 파장에 대한 실제 길이(s), 웨브 단면2차모멘트($I_{z,c}$)를 정의한다.

$$y = \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w} x\right) \quad (13)$$

$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \frac{a_3 \pi}{2w} \cos\left(\frac{\pi}{w} x\right)^2} dx \quad (14)$$

$$I_{z,c} = \int_0^w \frac{t_w^3}{12} + t_w \left[\frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w} x\right) \right]^2 dx \quad (15)$$

여기서, a_3 = 주름의 진폭.

Fig. 14은 IEB 실험체 및 FWB 실험체에서 웨브 높이(h_w)의 증가에 따른 최대하중(P_{max})의 결과를 나타내고 있다. 웨브 높이(h_w)가 400 mm, 600 mm일 경우 유사한 전단강도가 약 139 %로 증가하는 것으로 나타났으며, 900 mm일 경우 116 %로 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 웨브 높이(h_w)가 증가할수록 엠보싱 웨브를 통한 전단강도의 증가 효과가 미비할 것이라 사료된다. 또한 웨브 두께(t_w)에 대해선 웨브 높이(h_w)가 600 mm인 실험체를 통해 비교할 수 있는데, 웨브 두께(t_w) 3.2 mm와 4.0 mm 간에 차이는 크게 나타나지 않았다.

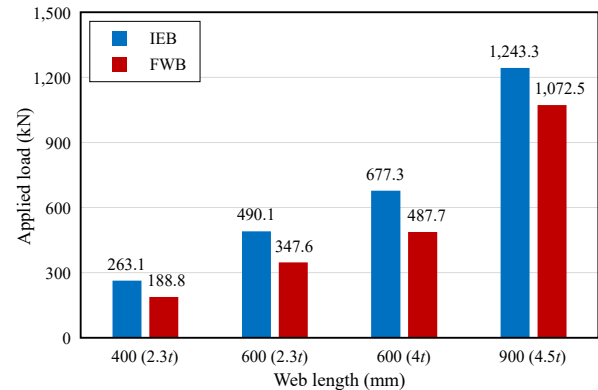


Fig. 14. Comparison of IEB and FWB (P_{max})

Table 4는 IEB 실험체의 실험결과와 이를 바탕으로 진행한 이론 해석에 대한 결과를 나타내고 있다. FWB의 경우 현재 국내에서 사용되고 있는 KDS를 참고하여 이론 해석을 진행하였으며, IEB의 경우 앞서 제시한 유로코드를 바탕으로 이론 계산을 진행하였다. 이론 계산 결과 IEB의 경우 0.81 - 1.14로 신뢰성 있는 것으로 나타났으며, FWB의 경우 2.33 - 5.46으로 편차가 매우 크며, 보수적인 설계가 이뤄지는 것을 확인하였다.

Table 4. Design formula in KDS & IEB

No.	Specimen	Design code	Theoretical value		Experimental value		Result ratio
			V_n (kN)	Failure mode	V_{max} (kN)	Failure mode	V_{max}/V_n
1	IEB-400-2.3	Eurocode	115.3	Shear	131.6	Shear	1.14
2	IEB-600-3.2		259.3	Shear	245.0	Shear	0.95
3	IEB-600-4.0		417.7	Flexure	338.6	Shear	0.81
4	IEB-900-4.5		543.4	Shear	621.6	Shear	1.14
5	FWB-400-2.3	KDS	30.5	Shear	94.4	Shear	3.09
6	FWB-600-3.2		53.7	Shear	173.8	Shear	3.24
7	FWB-600-4.0		104.8	Shear	243.85	Shear	2.33
8	FWB-900-4.5		98.2	Shear	536.25	Shear	5.46

5. 결론

본 연구는 기존에 개발된 엠보싱 웹브를 가지는 보(IEB)의 설계식 검증과 가력실험을 통해 웹브 높이(h_w)의 증대에 따른 내력평가와 거동을 확인하고, 동일한 조건의 평판 웹브를 가지는 보(FWB) 비교를 통해 내력증가를 확인하였으며 아래와 같은 결론을 낼 수 있다.

- (1) 실험결과 웹브 높이(h_w)가 400 mm일 때, IEB 실험체가 FWB 실험체보다 139%의 강도증가 효과를 나타냈으며, 웹브 높이(h_w)가 600 mm일 때, IEB 실험체가 FWB 실험체보다 웹브가 3.2 mm일 경우 140.90%, 4.0 mm일 경우 139.35%의 강도증가 효과가 나타났다. 마지막으로 웹브 높이(h_w)가 900 mm일 때, IEB 실험체가 FWB 실험체보다 115.93%의 강도증가 효과를 보였다.
- (2) 실험결과 웹브 높이(h_w)에 상관없이 IEB 실험체를 사용함으로써 전단강도의 증가를 확인하였다. 하지만 본 실험에서는 한정적인 높이의 실험체만을 진행하였다. 이에, 추가적인 실험이나 프로그램을 활용한 변수 해석을 통해 다양한 보 춤에 대한 연구가 필요하다.
- (3) 장스판 부재가 많은 공장 구조물에서는 라프트나 합성보는 사용성에 지배되어 설계되는 경우가 대다수이다. 평판 웹브의 경우 KDS 설계식 기준을 따라야만 하고 매우 낮은 전단상수(C_v)로 인하여 세장한 웹브의 사용이 힘들어 설계 물량이 증가하게 된다. 이에 대한 문제점을 IEB를 사용함으로써 해결할 수 있다고 사료된다.

- (4) 평판 웹브 실험체의 경우 국내에서 제시하는 강구조 부재설계기준(KDS 14 30 10)을 참고하여, 실험체의 전단강도에 대해 평가를 진행하였다. 이론 해석 결과 실험체의 설계강도가 실험강도보다 매우 약하게 나타났다. 이를 통해 설계식이 매우 보수적인 것을 확인할 수 있었고, 이에 대한 수정이 필요하다고 사료된다.
- (5) IEB의 설계식은 유로코드 EN 1993-1-5를 기반으로 제시하였다. 설계식에는 재료의 공칭강도를 사용하였으며, 이론해석 결과 IEB의 웹브 높이(h_w)에 따라 0.81 - 1.14의 설계강도가 나타났다. 4개의 실험체 중 50%는 실험값이 설계값보다 낮게 평가되어 있으므로, IEB의 설계식에 대입하기보다는 후속 연구를 통해 신뢰도를 높인 후 적용하는 것이 좋다고 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] Park, H.-M., Lee, H.-D., Shin, K.-J., Lee, S.-H., and Chae, I.S. (2017) Experimental Study on Steel Beam with Embossment Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.6, pp.479-486 (in Korean).
- [2] Yoo, C.-H., Shin, K.-J., and Lee, J.-S. (2020) Strength Evaluation of Composite Beams with Embossing Webs by Concrete Freezing Damage, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.6, pp.341-349 (in Korean).
- [3] Lee, J.S., Shin, K.J., Lee, H.D., and Kim, S.Y. (2019) Flexural Strength of Filled Composite Beams with Embossing Webs, *Journal of Korean Society of Steel*

- Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.187-197 (in Korean).
- [4] Shon, S.-D., and Lee, S.-J. (2011) Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-Valued Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.5, pp. 581-593 (in Korean).
- [5] Ji, H.S. (2011) Buckling Behaviour of Plate Girder with Corrugated Steel Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.2, pp.221-228 (in Korean).
- [6] Siokola, W., and Poeter, H. (1999) Fabrication Tools for Corrugated Web I-beams, *Modern Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, Vol.39, No.7, pp.42-45.
- [7] KSSC (2016) *Performance Evaluation of a Beam Member (IEB) Structure with Embossing Web: The Final Report*, Research Report, KSSC, Korea (in Korean).
- [8] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [9] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [10] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standards of Steel Structural Members (Load and Resistance Factor Design)* (KDS 14 31 10: 2017), Korea (in Korean).
- [11] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Plated Structural Elements* (EN 1993-1-5: 2006), Belgium.
- [12] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structure, Part 2: Steel Bridges* (EN 1993-2: 2006), Belgium.
- [13] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings* (EN 1993-1-1: 2005), Belgium.

요 약: 오늘날의 건축물은 국토의 용적률과 산업의 대형화 등을 이유로 장스팬화 되고 있다. 이러한 현상은 구조시스템에 대한 관심으로 이어지게 된다. 특히, 1960년대 스웨덴에서 탄생한 주름 웨브를 가진 보, 일명 주름보의 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 주름보의 특징으로는 시공비 절감과 제형, 파형과 같은 단면에서 발생하는 강도 증가 효과가 있다. 그러나, 선행연구에서 개발한 IEB (intaglio and embossed beam)는 주름보의 일환이지만, 낮은 웨브 높이로 인해 실제 시공 현장에서 적용하기 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 실험체의 웨브 높이를 400 mm, 600 mm, 900 mm로 변수로 설정하여 가력 실험을 진행하였으며, 웨브 높이가 높아질수록 IEB의 전단강도 증대 효과를 확인하고자 한다.

핵심용어: 강구조, 엠보싱 웨브, 주름보, 파형, 전단강도
