

엠보싱 웹를 가지는 보 부재의 실험적 연구

박한민¹ · 이희두^{2*} · 신경재³ · 이수현⁴ · 채일수⁵

¹석사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부 건축공학전공, ²전임연구원, 경북대학교, 건설안전기술연구소
³교수, 경북대학교, 건축공학과, ⁴조교수, 경북대학교, 융복합시스템공학부 플랜트시스템전공, ⁵대표이사, (주)아이에스 중공업

Experimental Study on Steel Beam with Embossment Web

Park, Han-Min¹, Lee, Hee-Du^{2*}, Shin, Kyung-Jae³, Lee, Swoo-Heon⁴, Chae, Il Soo⁵

¹Master course, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

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

³Professor, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

⁴Assistant Professor, School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea

⁵President, Innovation&Smart Heavy Industry Co. Ltd, Gyeongsan, 38449, Korea

Abstract - Steel beams with corrugated web have been widely used in the steel structures. However, it is challenging to weld the section between the corrugated web and the flange straight, which increases the cost of production. In order to solve this issue, steel beam with intaglio and embossed web (It is called an IEB) was invented. A web with embossment is produced by cold pressing and welded to flange by automatic welding machine. The loading tests were conducted to investigate the load-carrying capacity of IEB, and its test result was compared with that of H-shaped beam having a same size of flange and web. The test results of IEB series showed about 40% higher load capacities than H-shaped series. As a result of comparing the IEB specimen with Eurocodes for steel beams with corrugated web, all of specimens tested in this study did not meet the design value. Therefore, it is difficult to apply existing formula to IEB and new design formula should be presented for field application.

Keywords - Steel structure, Corrugated web, Sinusoidal, Intaglio and embossed, Embossment

1. 서 론

1.1 연구의 배경

철강은 인류의 건설 산업 발전과 함께 성장해온 대표적인 재료 가운데 하나이다. 그중 플랜지와 웹으로 구성된 H형강은 단면의 성능이 우수하고, 이음 및 접합이 용이하여 건축 구조용 강재로 널리 쓰이고 있다. H형강이 휨재로 사용되는 경우, 플랜지는 재하하중에 의해 발생한 휨모멘트의 대부분을 저항하며, 웹은 전단력에 대해 대부분을 저항함으로써

안정을 유지한다. H형 압연형강의 경우, 동일 단면적에 대해 휨에 대한 저항능력이 우수하도록 단면의 형태를 표준화하여 대량생산이 가능하다. 하지만 구조계산에서는 필요 단면 성능 이상의 큰 부재를 선정하게 되어 불필요한 자재의 낭비가 발생 할 수 있다. 또한 구조물이 고층화, 대형화 될수록 늘어나는 자중과 시공비의 증가는 큰 부담으로 작용하는데, 이에 대응하여 강재의 무게와 재료비의 절감을 위한 세장한 단면설계에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다^{[1],[2],[3],[4],[5],[6]}.

H형강에서 웹의 두께가 얇아질 경우에 웹판의 국부좌굴을 필수적으로 고려하여야하며 이러한 점을 보완하기 위해 파형 및 제형 형태의 웹를 가진 H형강 보(주름웹 보)가 개발되었다. 웹의 주름형상 가공으로 제작비용이 일부 상승함에도 불구하고 물량 감소로 어느 정도 경제성을 유지할 수 있게 되었다. 이 파형 및 제형웹를 갖는 H형강의 웹 두께는 일반 H형강의 웹 두께보다 매우 얇으며 전단력에

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 7, 2017; revised November 1, 2017; approved on November 14, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. lhdza@knu.ac.kr

대한 저항성도 갖추어 현재 교량이나 장스팬 구조물에서 사용되는 상황이다. 하지만 모든 제작과정이 상대적으로 단순한 기계로 이루어지는 H형강에 비해 주름웨브 보의 경우 고가의 용접 장비가 있어야만 기계용접이 가능하다. 따라서 경제성이 감소하고, 제작기간이 길어지는 단점이 있다. 또한 관련규정 및 세부설계지침의 미비로 인하여 일반 건축물까지 보편적이고 완전한 적용이 이루어지지 못하는 실정이다.

1.2 연구의 목적

주름웨브 보의 용접제작에서 오는 경제성과 현장 사용성의 보편성에 대한 단점을 보완하기 위하여, 엠보싱웨브를 가지는 보 부재(Intaglio and Embossed Beam, IEB)를 개발하였다. 엠보싱웨브를 가지는 보 부재의 경우 웨브를 프레스 가공하여 웨브의 상, 하부는 원래 강판의 직선을 유지하도록 한 것이 가장 큰 특징이다. 이를 통해 플랜지와 웨브의 자동화 용접이 가능하도록 하여 제작의 편의성과 경제성을 높이는 결과를 얻을 수 있었다. 이 논문에서는 IEB의 실제 구조설계 적용을 위하여, 웨브의 두께(t_w)를 변수로 하여 일반 H형강과의 비교실험을 수행하여 구조성능을 확인하고, 주된 거동 특성을 파악하여 구조부재로서의 사용가능성을 확인하는데 목적이 있다.

2. 실험체계획

Fig. 1은 IEB의 웨브의 형상과 크기를 나타낸다. 웨브의 높이는 600mm, 엠보싱의 형상은 폭 105mm, 깊이 13.5mm로 엠보싱 사이에는 30mm의 간격을 두어 제작하였다. 웨브의 두께는 3.2mm와 4.0mm로 나누어지고, 웨브와 용접되는 상하부 플랜지의 두께는 12mm이다. Fig. 2는 실험체의 형상

및 계측센서의 위치 정보를 나타낸다. 보의 지간길이는 4,320mm이고, 보양단의 연단 길이 260mm를 포함한 실험체의 총 길이는 4,840mm이다. 보의 가력지점 및 반력지점에는 집중하중으로 인한 플랜지의 국부좌굴에 대비하여 12mm 두께의 스티프너를 보강하였다. IEB의 비교대상인 H형강 실험체의 경우, 엠보싱을 제외하고 모든 크기 및 형상은 동일하게 제작되었다.

Table 1은 실험체 일람을 나타낸다. 실험체는 엠보싱웨브

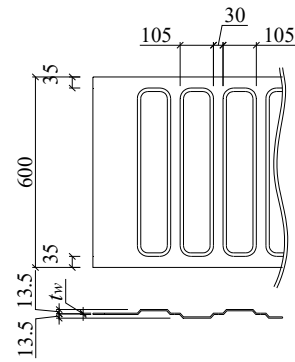


Fig. 1. Web details

Table 1. Classification of specimens

Specimen	Section type	L (mm)	t_w (mm)	h_w / t_w	Slenderness
H-3.2	H-shape	4,320	3.2	187.5	Slender
IEB-3.2	IEB			187.5	Slender
H-4.0	H-shape		4.0	150.0	Slender
IEB-4.0	IEB			150.0	Slender

Notes: Section size is H-624×195× t_w ×12; λ_{pw} is 95.9; λ_{rw} is 145.4; λ_{pw} and λ_{rw} are limiting slenderness parameters for compact and non-compact web, respectively; L is span length; h_w is web height; t_w is web thickness; and h_w / t_w is slenderness ratio of web.

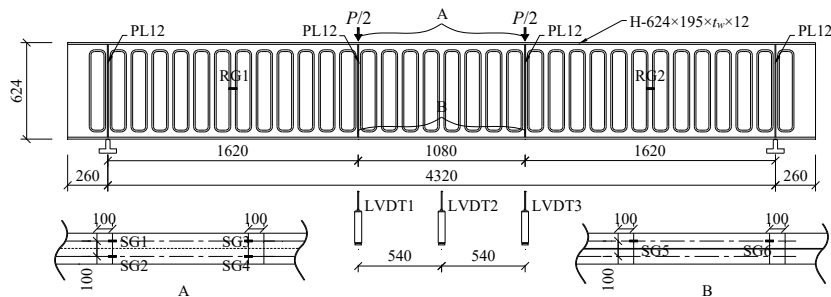


Fig. 2. Specimen details

를 가진 보(IEB 실험체)와 H형강 실험체로 웨브의 두께(t_w)에 따라 각각 2개씩 총 4개의 실험체가 제작되었다. 실험체는 현장에서 일반적으로 사용되는 실물 크기로서 웨브의 높이(h_w)는 600mm로 선정되었고, 플랜지의 폭(b_f)과 두께(t_f)는 각각 195mm, 12mm로 제작하였다. 웨브의 두께(t_w)는 세장판 요소로 만들기 위하여 3.2mm와 4.0mm로 결정하였다.

실험체 가공 방법은 철판을 절단, 용접하여 생산하는 용접H형강(Built-up H beam)방식으로 하였으며, 실험체 제작에 사용된 강판은 플랜지는 SM490, 웨브는 SS400의 강재를 사용하였다. 엠보싱웨브를 가진 보(IEB)의 웨브는 엠보싱 형상으로 냉간 프레스 가공 후 웨브와 플랜지를 자동용접 접합하여 제작하였다. 모든 실험체는 용접가공 후에 도장까지 완료하여 실험에 사용하였다. Table 1의 실험체 명에서 문자(H와 IEB)는 단면의 형상을, 숫자(3.2와 4.0)는 웨브의 제작에 이용된 강판의 두께를 뜻한다.

3. 실험

3.1 실험방법

실험을 수행하기 위해 반력프레임(받침대)을 용량 3,000 kN의 만능재료시험기(UTM) 위에 설치하였다. Fig. 3과 같이 실험체가 탄성 횡좌굴을 피해 충분한 내력을 발휘할 수 있는 보의 비지지길이를 건축구조기준(KBC2016)을 기반

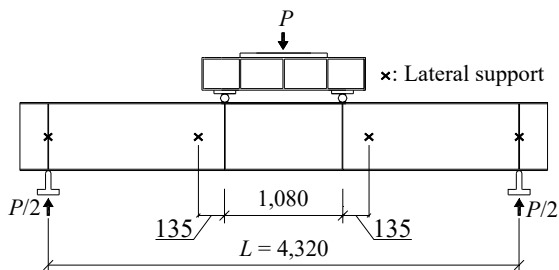


Fig. 3. Gigs and lateral support location

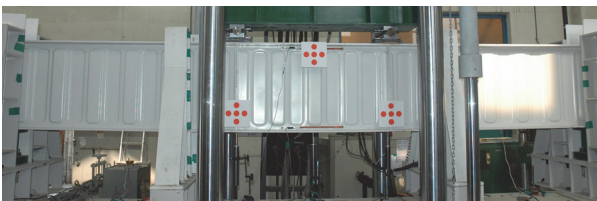


Fig. 4. Set up of specimen

으로 산정하여 횡지지대를 설치하였다. 순수 휨 구간을 확보하기 위해서 가력지그(1,080mm)를 설치하여 4점 가력을 하였고, Fig. 4는 실험체 IEB-3.2의 설치 모습을 나타낸다. 상하부 플랜지의 변형률을 측정하기 위하여 보 스패ンの 중앙에서 양쪽으로 440mm 떨어진 위치에서 상부 플랜지에 4개, 하부 플랜지에 2개의 강재용 스트레인게이지(SGs 1~6)를 부착하였다. 웨브에 주응력 방향 측정을 위해 가력점과 단부의 지점 중간에 3축 로젯게이지(RGs 1~2)를 부착하였다. 만능재료시험기(UTM)에 설치된 로드셀과 보 중앙부 하단에 3개의 변위계(LVDTs 1~3)를 이용하여 하중과 처짐을 각각 측정하였다. 실험의 진행은 실험체가 최대내력에 도달한 이후 파괴가 발생할 때까지 0.1mm/sec의 변위제어로 진행하였다.

3.2 재료시험

실험체에 사용된 강재는 SM490(플랜지)과 SS400(웨브)이다. 재료시험은 한국공업규격의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)에서 판모양 정형 시험편 5호를 따라 제작하였으며, 금속재료 인장시험방법(KS B 0802)에서 제시한 실험방법에 준하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 강재의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 시험편의 변형률 측정을 위해 연신률계(Extensometer)를 사용하였다. Fig. 5는 SS400과 SM490 시험편의 재료시험 종료 후의 모습이다.

Table 2. Classification of specimens

Coupon	t (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	Elongation (%)
SS400	3.2	316.6	448.2	39.0
SS400	4.0	395.6	459.2	35.8
SM490	12.0	455.3	535.6	39.1

Notes: t is thickness of coupon; and F_y and F_u are yield and ultimate strengths, respectively.



(a) SS400



(b) SM490

Fig. 5. Material test

4. 실험결과 및 설계식 검증

4.1 실험결과

Fig. 6은 각 실험체별 하중-처짐 곡선이다. H-3.2, IEB-3.2, H-4.0, IEB-4.0의 최대하중은 각각 347.6kN, 490.1kN, 487.8 kN, 677.3kN으로 IEB 실험체가 동일 두께의 H형강 실험체 보다 약 40% 높은 최대하중을 나타냈다. 최대하중에서의 처짐은 각각 11.6mm, 39.5mm, 12.8mm, 40.7mm로 나타났다.

H형강 실험체의 경우 최대내력에 도달한 이후에, 웨브 전체에 좌굴이 발생하면서 내력은 서서히 감소하고 변형은 계속되었다. IEB 실험체의 초기강성은 H형강 실험체에 비해 약 25 % 낮게 나타났으며, 최대하중 도달 후 가력점 인근의 웨브에서 발생한 좌굴에 인해 70~89%의 급격한 내력감소가 발생하였다. 하지만, 급격한 내력감소 이후에 엠보싱웨브 좌굴이 가력점에서 지점으로 점차적으로 발생하면서 변형증가 구간이 발생하였고 이 구간에서의 하중은 H형강 실험체의 하중대비 86~107%로 분포되었다.

Fig. 7은 증가하는 하중에 따른 플랜지축과 주변형 축사이

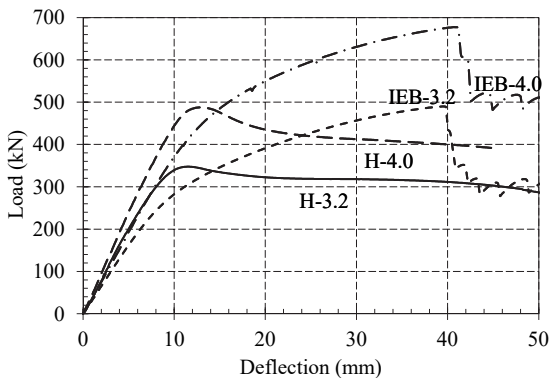


Fig. 6. Applied load and deflection curves

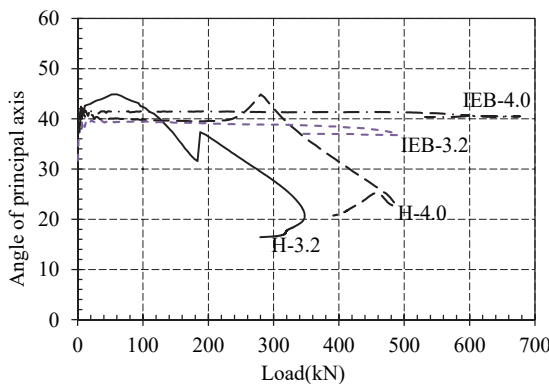


Fig. 7. Angle of principal axis according to increased load

의 각도변화를 나타낸다. 웨브의 중앙부에 설치된 로젯게이지로부터 얻은 데이터를 식 (1)에 적용하여 계산하였다.

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C} \quad (1)$$

여기서, $\varepsilon_A = 0^\circ$ 에서의 변형률

$\varepsilon_B = 45^\circ$ 에서의 변형률

$\varepsilon_C = 90^\circ$ 에서의 변형률

H형강 실험체의 경우는 지점과 가력점의 사이에 하나의 주름이 지면서 웨브의 좌굴이 발생하였다. 따라서 웨브에 발생한 주름은 로젯게이지를 통과하게 되었고 IEB와 다르게 주변형을 이루는 각도가 변화하게 되었다. 반면, IEB의 경우는 웨브의 엠보싱들이 하중이 가해짐에 따라 가력 지점을 시작으로 여러 개의 주름을 만들며 H형강 실험체 보다 높은 변형능력을 보였다. 따라서 로젯게이지가 부착된 지점의 주변형을 이루는 각도에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 순수 휨영역 안에 부착된 스트레인 게이지로 측정한 플랜지의 변형률의 변화를 나타낸다. 상하부 플랜지의 변형률은 거의 대칭으로 측정되었고 모든 실험체의 플랜지가 실험이 종료될 때까지 항복변형률($2,225\mu\epsilon$)과 소성모멘트 ($M_p=597\text{kN}\cdot\text{m}$)에는 도달하지 못하였다. 이 논문의 실험체는 모두 세장한 웨브를 가지고 있어서 휨에 대한 저항은 플랜지가 부담한다고 가정하여 소성모멘트의 계산과정에서 웨브 단면은 고려하지 않았다.

Table 3에서는 각 실험체들의 실험결과를 요약한다. $P_{\max}$ 는 실험 시에 측정한 최대하중 값을 나타내고 있으며, $M_{\max}$ 는 보 실험체의 중앙부에 발생하는 최대모멘트를 나타낸다.

Fig. 9는 각 실험체의 최종 파괴형상을 나타낸다. 모든 실험

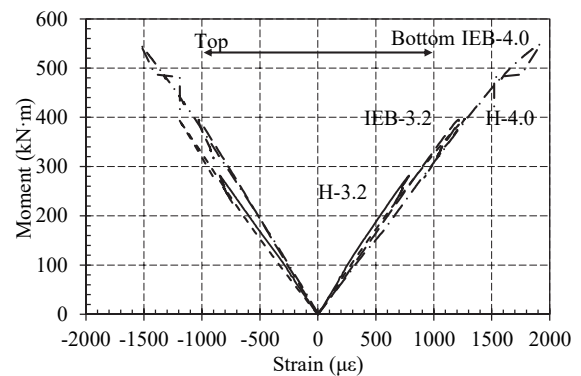
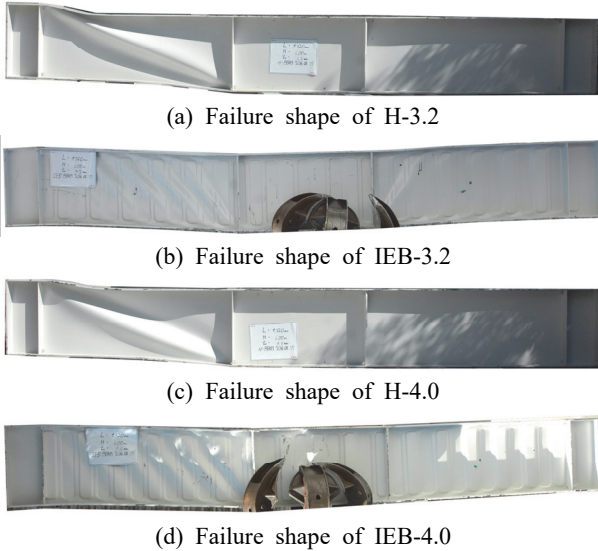


Fig. 8. Moment and flange strain curves

Table 3. Experimental results

Specimen	P_{max} (kN)	M_{max} (kN·m)	Failure mode
H-3.2	347.6	281.5	Global buckling of web
IEB-3.2	490.1	397.0	Global buckling of web
H-4.0	487.8	395.1	Global buckling of web
IEB-4.0	677.3	548.6	Global buckling of web

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

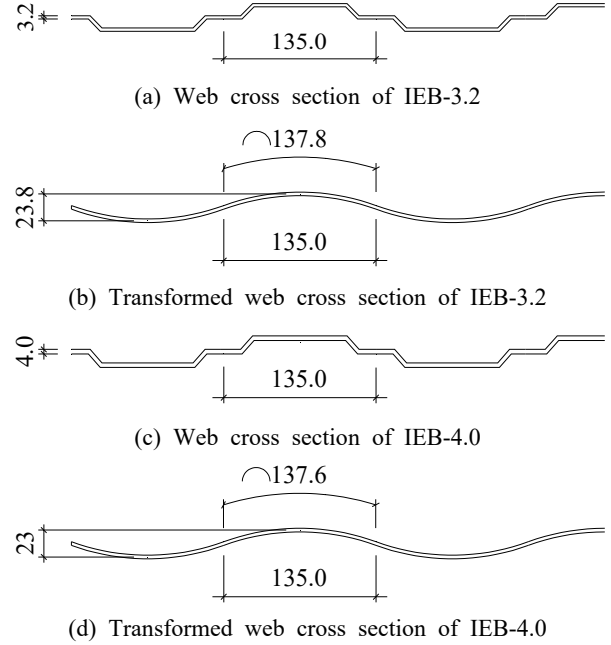
**Fig. 9.** Failure shape of specimens

험체에서 웨브의 변형이 나타나지 않다가 최대하중 이후에 급격하게 내력이 감소하는 것으로 나타나 웨브에 탄성좌굴이 발생하였음을 알 수 있다. H형강은 최대하중에 도달 후 1개의 주름과 함께 꾸준한 내력저하를 보였고, IEB 실험체는 최대하중에 도달 후 웨브가 가력지점에서 반력지점 방향으로 2개의 엠보싱마다 약 45°의 각도로 웨브면외좌굴이 점차적으로 발생하였다.

4.2 IEB와 설계식 비교

4.2.1 Eurocode 설계식

EN-1993-1-5 (2006)의 주름웨브 보 설계식을 활용하기 위해 이 연구의 IEB 실험체는 웨브 형상을 Fig. 10과 같이 파형단면으로 가정하였다^[7]. 웨브의 두께가 4.0mm일 경우 프레스기계에 의해 변형되는 깊이가 약해지기 때문에 웨브두께 3.2mm일 경우보다 진폭이 미소하게 작아진다.

**Fig. 10.** Transformation of IEB structure

EN-1993-1-5 (2006)에서는 전단좌굴에 대한 전단좌굴응력을 국부좌굴과 전체좌굴을 나누어 정의하고 있다. 국부전단좌굴의 경우는 유로코드 부록과 단면형상이 같지 않은 경우 식에 거의 맞지 않다고 기록되어있다^[8]. 따라서 본 논문의 계산과정에서는 전체좌굴 설계만 고려하였다.

$$V_{bw} = \chi_{c,g} \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} h_w t_w \quad (2)$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad (4)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt{D_x D_z^3} \quad (5)$$

$$D_x = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{s} \quad (6)$$

$$D_z = \frac{EI_z}{w} \quad (7)$$

여기서, E =탄성계수, $\tau_{cr,g}$ =전체 평판좌굴 응력
 ν = 푸아송비, $D_x = x$ 축에 대한 면외좌굴강성
 $D_z = z$ 축에 대한 휨좌굴강성
 $I_z = z$ 축에 대한 유효단면2차모멘트
 f_{yw} = 웨브의 항복강도
 $\chi_{c,g}$ = 전체좌굴 전담감소계수

Table 4는 내력계산에 사용한 실험체별 변수와 계산된 전단내력과 휨내력을 보여준다. 계산과정에서 나타나는 항복강도는 재료시험결과를 활용하였다. 사인형 주름 웨브의 단면형상은 파고($a_3/2$), 파장(w, s) 그리고 웨브의 두께(t_w)로 정의할 수 있으며, 사인 형상 주름함수(y), 한 파장에 대한 실제길이(s) 및 주름진 웨브의 단면2차모멘트(I_z)는 다음 식으로 정의한다. 여기서, 상하부 플랜지는 두께와 폭은 같은 것으로 가정한다^[9].

$$y = \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w}x\right) \quad (8)$$

$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \left\{ \frac{a_3\pi}{2w} \cos\left(\frac{\pi}{w}x\right) \right\}^2} dx \quad (9)$$

$$I_{z,c} = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w \left\{ \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w}x\right) \right\}^2 \right] dx \quad (10)$$

휨 강도는 인장플랜지, 압축플랜지, 압축플랜지의 면외좌굴 감소를 고려한 휨강도 중 제일 작은 값으로 결정된다. 식 (11)에 사용된 γ_{M0} 와 γ_{M1} 는 EN-1993-2(2006)의 부분계수에 따라 그 값을 정하였다^[10]. $f_{yf,r}$ 는 플랜지의 직교모멘트로 인해 감소된 항복응력이다. f_{γ} 은 EN-1993-1-5(2006)의 D.2.1의 NOTE 2를 따라 본 실험체의 경우 1.0을 적용하면 된다.

$$M_{y,Rd} = \min \left[\frac{b_1 t_1 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right), \frac{b_1 t_1 \chi f_{yf}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right] \quad (11)$$

여기서, $\gamma_{M0} = 1.0$, $\gamma_{M1} = 1.1$, $f_{yf,r} = f_{yf} f_{\gamma}$
 면외좌굴 감소계수(χ)는 식 (12)을 통해 구할 수 있다. EN-1993-1-1 (2005)의 5.5.2절에서 본 논문의 모든 실험체는 모두 Class 4에 해당됨을 알 수 있다^[11].

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad (12)$$

$$\phi = 0.5 \{ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \} \quad (13)$$

여기서, $\bar{\lambda}$ = 세장비
 α = 좌굴곡선에 대한 시공오차계수(0.34)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_{yf}}{N_{cr,ef}}} \text{ for Class 4} \quad (14)$$

$$N_{cr,ef} = \frac{\pi^2 EI_{z,cf}}{L_{bc}^2} \quad (15)$$

$$A_{eff} = \rho A_c \quad (16)$$

여기서, $N_{cr,ef}$ = 압축플랜지 좌굴하중
 L_{bc} = 최대 모멘트 발생지점의 거리
 $I_{z,cf}$ = 압축플랜지의 단면2차모멘트
 A_c = 압축플랜지 단면적($b_1 \times t_1$)
 판좌굴 감소계수(ρ)는 아래의 식을 통하여 얻을 수 있다. 식 (19)의 $\bar{b}$ 는 EN-1993-1-1(2005)에 압축플랜지 내민 거리라 명시되어있고 본 계산에서는 플랜지 폭의 반에 해당하는

Table 4. The factors used in Eurocode design

(Unit: mm, kN, kN·m)

Specimen	a_3	w	s	h_w	t_w	b_1	t_1	V_{bw}	$M_{y,Rd}$
IEB-3.2	23.8	137.0	137.8	600	3.2	195	12	319.1	574.12
IEB-4.0	23.0	135.0	137.6	600	4.0	195	12	498.5	574.12

Notes: a_3 is amplitude of web; w is length of one half wave; s is unfolded length of one half wave; h_w is height of web; t_w is thickness of web; t_1 is thickness of flange; b_1 is width of flange; V_{bw} is shear resistance; and $M_{y,Rd}$ is moment resistance.

값을 적용하였다. k_σ 는 EN-1993-1-5(2006)의 좌굴계수를 참고하면 0.43이 된다^{[7],[11]}.

$$\rho = 1.0 \text{ for } \bar{\lambda}_p^2 \leq 0.748 \quad (17)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0 \text{ for } \bar{\lambda}_p^2 > 0.748 \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t_1}{28.4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (19)$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yf}}} \quad (20)$$

여기서, ρ = 판좌굴 감소계수, $\bar{b}$ = 플랜지 폭의 반
 k_σ = 좌굴 계수, f_{yf} = 플랜지 항복강도
 $\bar{\lambda}_p$ = 판 세장비

4.2.2 IEB 결과와 설계식 비교

Table 5는 본 연구에서의 실험 결과와 이론 해석의 비교를 나타낸다. 이론 해석은 EN-1993-1-5(2006)에서 제시한 식을 통해 수행하였다^[7].

EN-1993-1-5(2006)를 통해 산정한 부재내력(P_n)과 실험에서의 최대하중(P_{max})을 비교한 결과 이론값 대비 IEB-3.2는 77%, IEB-4.0은 96%의 성능에 그쳤다. IEB-4.0의 경우 설계식 상으로 휨파괴를 예상했으나 실제로는 전단파괴가 일어났다. IEB-4.0의 파괴하중(677.3kN)을 전단에 대한 설계값(996.9kN)과 비교를 하면 설계값 대비 68%의 성능에 그치게 된다. 이는 웹의 중간부분만 파형과 비슷한 형상을 하고 있어서 전단에 대하여 기대보다 약하기 때문이라 사료된다.

Table 5. Experiment results (unit: kN)

Specimen	EN-1993-1-5 P_n of V_{bw}	EN-1993-1-5 P_n of $M_{y,Rd}$	P_{max}	P_{max} / P_n
IEB-3.2	638.3	708.8	490.1	0.77
IEB-4.0	996.9	708.8	677.3	0.96

Notes: P_n is load capacity according to Eurocode-1993 -1-5; and P_{max} is maximum load capacity measured in test.

5. 결 론

엠보싱웨브를 가진 보 실험체와 H형강 실험체로 웹 두께(t_w)에 따라 각각 2개씩 총 4개의 실험체를 제작하여 4점 가력 실험을 수행하였다. 실험을 바탕으로 엠보싱웨브를 가지는 보(IEB)의 구조적 성능에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 엠보싱웨브 실험체와 H형강 실험체의 최대내력을 비교한 결과 웹두께에 관계없이 성능이 약 40%정도 뛰어난을 알 수 있다.
- (2) 실험체의 엠보싱이 여러 개의 주름을 만들며 강성은 H형강 실험체보다 떨어졌지만 약 4배의 처짐을 보인 뒤 하중 감소를 나타냈다. 따라서 엠보싱에 의해 부재의 변형 능력 상당히 증가하였다.
- (3) IEB 실험체와 EN-1993-1-5 (2006)를 활용한 설계식과 비교했을 때 설계식 대비 IEB-3.2의 성능은 77%에 IEB-4.0의 성능은 96%에 그쳤다. 더욱이 IEB-4.0 실험체는 실험에서 전단파괴형상을 보임에도 불구하고 설계식에서는 휨 지배를 하는 것으로 예측되었다. 따라서 전단에 대한 설계값과 비교하면 IEB-4.0의 성능은 68%에 그치게 된다.
- (4) EN-1993-1-5 (2006)의 설계식을 엠보싱웨브 보에 적용하는 것은 무리가 있다고 판단한다. 그 이유는 웹 형상의 차이, 웹과 플랜지 용접 접합부의 평판한 부분의 존재, 그리고 EN-1993-1-5 (2006) 설계식 적용을 위해 무시된 부분 등이 있기 때문이다. 따라서 추후 연구에서 엠보싱웨브 보에 적합한 설계식의 제안이 필요하다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2017R1A2B3009984)과 국민안전처 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-72)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌(References)

- [1] 김영숙, 노승희, 박만우, 도병호, 주영규, 김상대(2012) 건축 지붕골조용 파형강판웹 철골보의 실험적 전단 성능 평가, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제28

- 권, 제9호, pp.57-65.
- Kim, Y.-S., Lho, S.-H., Park, M.-W., Do, B.-H., Ju, Y.-K., and Kim, S.-D. (2012) Shear Capacity of Corrugated Web Beam for Roof Frame of Industrial Buildings, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.28, No.9, pp.57-65 (in Korean).
- [2] 홍정현(2014) 파형웹 강관플랜지 형강보의 구조성능 연구, 석사학위논문, 호서대학교.
- Hong, J.H. (2014) *Structural Performance of Steel Girders Built-up with Waved Web and Tubular Flanges*, Master's Thesis, Hoseo University, Korea (in Korean).
- [3] 손수덕, 이승재(2011) 실변수 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.581-593.
- Shon, S.D., and Lee, S.J. (2011) Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.5, pp.581-593 (in Korean).
- [4] 지효선(2011) 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴 거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.221-228.
- 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).
- [5] Siokola, W., and Poster, H. (1999) Fabrication Tools for Corrugated Web I-Beams, *Modern Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, Vol.39, No.7, pp.42-45.
- [6] Dally, J.W., and Riley, W.F. (1978) *Experimental Stress Analysis* (2nd Ed.), McGraw-Hill, USA.
- [7] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Plated Structural Elements* (EN 1993-1-5: 2006), Belgium.
- [8] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Plated Structural Elements* (EN 1993-1-5: 2006), Annex D: Plate Girders with Corrugated Webs, Belgium.
- [9] 손수덕, 이승재(2012) 사인형 주름웹 보와 구조설계를 위한 설계코드, 한국공간구조학회지, 한국공간구조학회, 제12권, 제2호, pp.18-23.
- Shon, S.-D., and Lee, S.-J. (2012) Sinusoidal Corrugated Web Girder and Structural Design Code, *Magazine of Korean Association for Spatial Structures*, KASSS, Vol. 12, No.2, pp.18-23 (in Korean).
- [10] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structure, Part 2: Steel Bridges* (EN 1993-2: 2006), Belgium.
- [11] 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 : 주름웹보는 강구조물에서 세장해진 웹의 대안으로 널리 사용되고 있으나 주름진 웹과 플랜지 사이의 용접은 제작비용의 상승이라는 문제점을 안고 있다. 이러한 경제적인 문제점을 해결하기 위해, 엠보싱웨브를 가지는 보(이하, 엠보싱웨브 보)를 개발하게 되었다. 엠보싱웨브는 냉간프레스 가공에 의하여 형성되고, 웹과 플랜지는 기계화자동용접에 의하여 접합된다. 엠보싱웨브 보의 구조적 성능을 확인하기 위해, 동일한 크기의 일반 H-형강 실험체도 제작되었고 가력실험이 수행되었다. 실험에 의하여 엠보싱웨브 보 실험체는 H-형강 실험체에 비하여 강도면에서 약 40%정도의 높은 성능을 보였다. 엠보싱웨브 보와 주름웹 보의 형상은 다르지만, Eurocodes의 주름웹 보 설계식을 이용하여 엠보싱웨브 보의 내력을 예측한 결과 실험결과값과는 상이한 결과를 보였다. 따라서 기존 Eurocodes를 엠보싱웨브 보에 적용하는 것은 무리가 있으므로 엠보싱웨브 보의 현장사용을 위해서는 적절한 설계식이 제안되어야 할 것으로 판단한다.

핵심용어 : 강구조, 주름웹, 파형, 엠보싱
