

파형 웨브주름 보의 휨성능에 관한 실험적 연구

김종성^{1*} · 채일수²

¹교수, 경일대학교 건축학부, ²대표이사, (주)아이에스 중공업

Experimental Study on Flexural Structural Performance of Sinusoidal Corrugated Girder

Kim, Jong Sung^{1*}, Chae, Il Soo²

¹Professor, School of Architecture, Kyungil University, Gyeongsan, 38428, Korea

²President, Innovation&Smart Heavy Industry Co. Ltd, Gyeongsan, 38449, Korea

Abstract - In long span steel structure, the plate girder reinforced with stiffeners are commonly used. When choosing the cross section with deep depth of girder as well as narrow width, however, out of plane buckling can be a problem due to web slenderness. In an effort to solve this issue, current study determined the applicability of using corrugated web girder with deep depth as bending member, which is generally being utilized in both factory and warehouse nationwide. To accomplish this, we performed the loading test of H-shaped beam with sinusoidal corrugated web. Corrugated web CP-2.3 specimen exhibited 12% less maximal bending strength but CP-3.2 specimen exerted 24% increase in strength compared to plate web P-4.5. this result indicates that corrugated web provides enough strength even with unfavorable width-thickness ratio of plate. And bending as well as shear strength estimated by the Eurocode (EN 1993-1-5) were compared with both bending strength by loading test and shear strength estimated by KBC2009. In case of eurocode, increase in plate thickness did not help in bending performance improvement. moreover, shear performance was sensitive to the thickness of the web folds and the shape of the web plate.

Keywords - Corrugated web girder, Plate web girder, Flexural performance, Shear performance, Loading test, Euro code

1. 서론

최근 구조물은 그 규모가 거대화, 장스팬화되는 경향을 보이고 있으며, 산업의 대형화, 시설물의 실내화 등에 따른 보다 넓은 무주의 실내공간을 필요로 하는 공장 및 창고 등의 건축물이 많이 증가하고 있다. 이러한 경향은 부재의 경량화와 건설비의 절감을 위한 구조시스템에 대한 관심을 갖게 하고 있다.

장스팬화 될수록 보 부재에서 발생하는 휨응력이나 전단

응력은 단부 및 중앙부에서 크기가 커지게 되며, 변단면으로 설계 시, 보 웨브의 판폭두께비가 현행 설계기준을 초과하여 횡좌굴에 노출된다. 따라서 현장에서는 웨브의 단면손실을 방지하고 플랜지 스테이(flange stay)를 설치하고 있다

일반적으로 트러스, H형강을 사용한 시스템이 주로 사용되고 있으나, 최근 동향은 경제성, 시공성 등의 사용자의 요구로 인해 주름웨브를 사용한 built-up 보로 설계하고 있다. 이 과정에서 부재단면은 세장하게 되고 면외좌굴에 대한 문제가 발생하게 된다. 이러한 단점을 보강하기 위하여 판(web plate)자체에 주름을 주어 형태강성을 높힘으로서 스티프너를 사용하지 않고도, 웨브의 전단좌굴강도의 증가와 강재사용량을 줄이는 장점 때문에, 주름웨브 강판에 대한 연구와 실험적 현장 적용이 꾸준히 늘고 있다. 그러나 주름웨브 강판을 건축부재로 널리 사용하기 위해서는 아직 관련 연구자료의 부족 및 국내 설계기준이 미흡하다. 다행히 현재 한국강구조학회를 중심으로 공업화 박판 강구조(PEB)관련

Note.-Discussion open until June 30, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 15, 2015; revised November 9, 2015; approved on November 10, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-53-600-5442 Fax. +82-53-600-5459

E-mail. jsk@kiu.kr

설계지침 연구가 진행되어, 웨브 평판보는 발표가 되었고, 웨브 주름보에 대한 것은 유로코드 기본으로 하여 현재 준비 중에 있다.

이 연구에서는 춤이 큰 보의 면외좌굴을 방지하기 위한 방법으로, 주름웨브 강판을 휨재로 사용했을 때, 그 적용가능성을 판단하기 위하여, 선행작업으로 주름웨브 강판의 재하 실험을 통하여, 주름웨브 강판의 휨 및 전단내력, 면외 좌굴 강도 등의 구조성능을 분석하고, 이를 토대로 관련분야의 설계기준 마련을 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

건축구조기준(KBC2009)에서는, 힘을 받는 H형강의 플랜지와 웨브에 대하여, 비구속 또는 구속판 요소웨브의 공칭 전단강도 V_n 은 전단항복과 전단좌굴의 한계상태에 따라, 전단상수 C_v 값을 구하는 식으로 제한하고 있고 있을 뿐, 아직 휨(bending)에 대한 적절한 규정이 없는 실정이다.

주름강판의 강성을 극대화시키는 연구는 20세기초 이후에 적극적으로 시작했으며, 구조해석에 의한 논문, Gruber (1931)이후, 응력분포절차(Winter&Pei, 1947), Whitney 법(Gaafar, 1954) 등이 주름판의 해석방법을 연구하였으며, 또한 사용상의 제약조건을 고려한 주름판(corrugated plate)에 대한 연구(Fung, Porter)도 많이 수행되었다^[1]. 전단좌굴강도에 대한 연구는 비교적 최근 수행되었으나(Mohamed Elgaaly, 외, 1996), 평판을 조합한 제형(trapezoidal)의 파형판에 관한 연구만 주로 수행되었고, 사인형 파형판의 전단강도에 대한 해석적 연구는 한택희 외(2008)가 있으나 실험적인 연구배경은 드문 가운데^{[2],[3],[4]}, 실무에서는 Euro code에 의해 설계되고 있다.

2. 웨브주름(sinusodial) 보의 구조설계를 위한 설계코드

2.1 배경

웨브 주름판(plate)은 1829년 영국 Palmer사의 특허를 시작으로 항공기, 기차, 컨테이너와 같은 구조물에서도 그 사례를 쉽게 볼 수 있다. 일반 강구조물에 대한 주름 웨브판의 적용은 스웨덴에서 1960년초 부터 적용하였다.

유럽에서는 미국이나 일본보다 먼저 상용화하여 주름웨브를 플랜지에 용접한 보를 설계할 경우는, EN 1993-1-5 (1993)과 DIN 18800 T1-3, DAST-R015 규준에 의해 설계하도록 되어 있다. 또한 부재설계에서 주름웨브가 어코디언 효과를 가진 점을 이용해서, 중심축에 따라 발생하는 휨모멘



Fig. 1. Cases of corrugated web steel plate



Fig. 2. Building structures of corrugated web girder

트가 잘 전달되지 않아서 웨브는 다만 전단력만 부담하는 설계방안이 일반적으로 제시되었다^[5].

주름의 형태는 주로 제형(trapezoidal)과 주름 웨브형(sinusoidal)이 가장 많이 설계되었고, 웨브의 얇은 두께로 주름의 깊이를 확보하는데 어려움 때문에 비교적 큰 전단력이 작용하는 경우는 제형주름이 더 많이 제작되고 있는 실정이다^[6].

2.2 사인형 웨브 주름보의 설계규준

사인형 웨브주름 보는, 유럽은 물론, 국내에서도 공장, 창고건축에 많이 보급되어 있다. 그 기본적인 설계는 국내규준이 미비된 관계로, EN 1993-5(1993), DIN 18800T1-3, DAST-R015 등에 정의된 코드대로 생산되고 있다^[7].

사인형 웨브 주름보에 대한 설계를 위한 형상을 정의하면

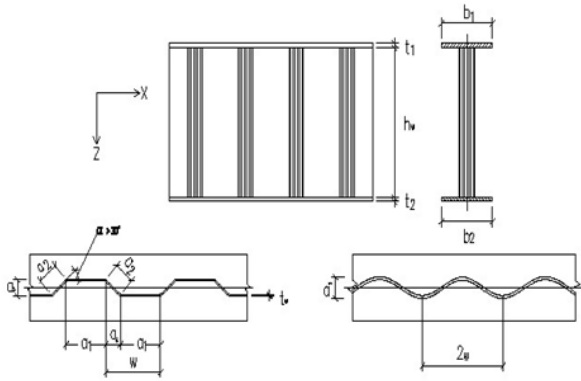


Fig. 3. Section shape of corrugated web girder

Fig. 3과 같으며, 여기서 파고($a_3/2$), 파장(w, s), 웹 두께(t_w)를 나타낸다. 사인형상의 주름함수(y), 한 파장의 길이(s), 주름 웹의 단면 2차모멘트(I_x)는 다음 식으로 정의되며, 여기서 플랜지 두께(t_f)와 폭(b_f)이 같다고 가정한다.

$$y = \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w} x\right) \quad (1)$$

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

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

웹 주름보의 전단좌굴은 주름에 의한 높은 면외강성과 경사패널이 수직보강재(stiffener)의 역할을 하므로, 스티프너가 필요 없어 상부구조의 자중을 줄일 수 있으므로, 얇은 두께에도 비교적 큰 두께의 평판웹과 동일한 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 주름웹은 국부좌굴과 전체좌굴의 연성좌굴에 대한 안정성이 확보되어야 한다. 사인형 주름의 경우, 제형보다 형상이 매끈하여 안정성이 더 높고, $a_3 \leq 40mm$ 와 $77.5mm \leq w \leq 155mm$ 에 대한 전체좌굴 실험을 소개하고 있다^[7]. 또한 웹가 전단항복응력에 도달하기 전에 국부좌굴은 일어나지 않는다고 지적했다^[8].

2.2.1 플랜지의 모멘트 저항성능

EN 1993-1-5 :2006(Annex D) 설계기준에서는 웹은 파형이므로 길이방향 휨모멘트에는 저항하지 못한다고 보며, 플랜지의 항복이 지배적인 경우, 휨저항은 다음 식에서

인장 측, 압축 측 플랜지의 값 중, 작은 값으로 한다. 플랜지의 최대 횡방향 휨모멘트는 다음 식으로 산정한다^[8].

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{b_2 t_2 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right), \frac{b_1 t_1 \chi f_{yf}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서, $f_{yf,r} = f_{fr} f_\gamma$

$f_{yf,r}$: 플랜지의 항복응력

$f_\gamma = 1, 4 \sqrt{\frac{6M_{z,max} \gamma_{M0}}{f_{yf} b_f^2 t_f}}$: 휨저항 감소율

(단, 사인형 주름은 $f_\gamma=1.0$)

$M_{z,max} = \frac{V a_3}{4h_w} (2a_1 + a_4)$: 플랜지의 최대휨모멘트

V : 공칭전단력

χ : 면외좌굴에 의한 감소계수

단면분류(5.5 Classification of cross sections)

Eurocode에서는 단면의 저항 및 회전력에 따라 국부좌굴 저항에 의해서 단면을 4가지 종류로 나누고 있고, 소성해석에 요구되는 회전력을 갖는 소성힌지를 형성하는 단면(class 1)을 주름웹 보에 사용하는 것을 권장하고 있다(EN 1993-1-1 :2005(E), Table 5.2).

감소계수(6.3 Buckling resistance of members)

감소계수는 다음 식과 같다.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1, 0 \quad (5)$$

여기서, $\phi = 0, 5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$,

α : 초기부정 계수, $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_t^2}$: 탄성 좌굴

무차원 세장비 $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$ (class 1~3)

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}}$ (class 4)

2.2.2 주름 웹의 전단저항성능

전단력에 대한 웹 설계도 플랜지와 유사하게 다음 식을

만족해야 한다^[7].

$$V_{Sl} \leq V_{Rd} (= V_{Rk} / \gamma_M) \quad (6a)$$

$$V_{Rk} = C \cdot k \cdot f_{y,w} \cdot h_w \cdot t_w \quad (6b)$$

여기서 계수 C 와 k 값은, EN 1993-1-5와 DAST-R015에서 제안한 값이 서로 다르지만, 설계기본개념은 같다. 좌굴에 대한 제한 세장비에 따라 감소계수 k 가 결정된다.

EN 1993-1-5, Pasternak 등(2004)은 C 값을 $1/\sqrt{3}$ 으로 정의하고, DAST-R015에서는 0.35로 정의하였다^{[7],[8]}. DAST-R015의 경우는, 세장비(λ_c)는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 세장비중, 작은 값을 감소계수의 값으로 결정된다.

$$k = \frac{0.84}{\lambda_c} \leq 1.0 \quad (7a)$$

$$\lambda_c = \min(\lambda_{c,l} : \lambda_{c,g}) \quad (7b)$$

$$\lambda_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{3 \cdot \tau_{cr,l}}} \quad (7c)$$

$$\lambda_{c,g} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2f_{y,w}}{\sqrt{3}\tau_{cr,g}}} \cdot 0.5 \leq \frac{\tau_{cr,g}}{\tau_{cr,l}} \leq 2.0 \\ \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}\tau_{cr,g}}} \end{cases} \quad (7d)$$

EN 1993-1-5경우도 위와 유사하지만, 감소계수의 식이 국부좌굴과 전체좌굴에 대해 다른 값을 제안하고 있지만, 세장비는 동일한 식을 이용한다.

$$k_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leq 1.0 \quad (8a)$$

$$k_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (8b)$$

여기서 $\lambda_c = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{cr,l(g)}}}$

한편 EN 1993-1-5에 의한 주름웨브의 전단 저항성능은

다음 식으로 평가하고 있다.

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} h_w t_w \quad (9)$$

여기서, $\chi_c = \min[\chi_{c,l} \chi_{c,g}]$: 감소계수

$\chi_{c,l}$: 국부좌굴에 대한 감소계수

$\chi_{c,g}$: 전체좌굴에 대한 감소계수

$$\chi_{c,l} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1.0 \quad (10a)$$

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} \sqrt{3}}}$$

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (10b)$$

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

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

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

$$D_z = \frac{E I_z}{w}$$

2.2.3 힘에 대한 국내설계기준

건축구조기준(KBC2009)에서는, 힘을 받는 H형강의 플랜지와 웨브에 대하여, 비구속 또는 구속판 요소웨브의 공칭 전단강도 V_n 은 전단항복과 전단좌굴의 한계상태에 따라. 다음 식 (11)에서, 전단상수 C_v 값을 구하는 식으로 제한하고 있고 있을 뿐, 아직 힘에 대한 적절한 규정이 없는 실정이다.

$$\phi_v V_n = \phi_v 0.6 F_y A_w C_v \quad (11)$$

① $h/t_w \leq 2.24 \sqrt{E/F_y}$ 인 압연 H형강 의 웨브는,

$$\phi_v = 1.0, C_v = 1.0 \quad (12a)$$

② 원형강관을 제외한 2축 또는 1축 대칭단면의 휨재 웨브는, $\phi_v = 0.9$ 를 적용하며,

$$h/t_w \leq 1.10 \sqrt{k_v E/F_y} \text{ 일 때,}$$

$$C_v = 1.0 \tag{12b}$$

$$1.0 \sqrt{E/F_y} \leq b/t_f \leq 1.37 \sqrt{k_v E/F_y} \text{ 일 때,}$$

$$C_v = \frac{1.10 \sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} \tag{12c}$$

그리고 구속판 요소의 경우, 세장판요소 단면의 휨을 받는 2축 대칭 단면의 웨브는, $h/t_w \leq 1.37 \sqrt{k_v E/F_y}$ 일 때,

$$C_v = \frac{1.51 E k_v}{(h/t_w)^2 F_y} \tag{12d}$$

3. 주름웨브 H형보의 재하실험

3.1 휨 실험

3.1.1 실험계획 및 방법

대상으로 하는 실험체의 형상은, 현재 국내 기업에서 대량생산 가능한 형태의 평판웨브와 주름웨브 강판이다.

실험체는 총 7개를 제작했으며, 실험변수는 웨브의 형상과 웨브 두께로 설정하였다. 실험체는 웨브 판폭두께비를 조절하여 콤팩트 단면, 비콤팩트단면, 세장판 요소 단면에 해당하도록 설계·제작하였으며, 실험체인 주름(sinusoidal corrugated plate)웨브 강판과 일반 평판(plate)웨브의 강종은, 모두 SS400($F_y = 270\text{Mpa}$)를 사용하였고 플랜지는 SM490 강재를 사용하였다.

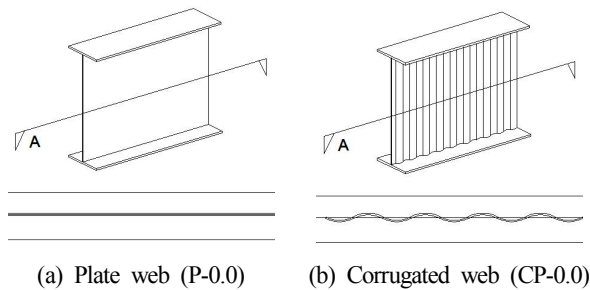


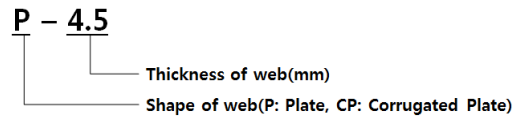
Fig. 4. Shape of flexural test specimens

Table 1. Classification of specimens

Girder section	Shape of web	Thickness of web (t_w)(mm)	λ/λ_r
H-600*200* (tw)*17	Plate	4.5	2.0
		6	1.5
		8	1.1
		9	1.0
		12	0.7
	Corrugated Plate	2.3	3.9
		3.2	2.8

Number of specimen : total 7

Notation of specimens



단순보의 플랜지 폭은 공통적으로 폭은 200mm으로 하였으며, 주름웨브와 일반 평판웨브 모두 플랜지와의 접합은 KBC2009코드에 따른 모살용접으로 제작하였다. 판폭두께비의 경우, 전단에 대한 임계치($C_w = 2.24 \sqrt{E/F_y}$)를 기준으로 제작가능한 주름웨브 보의 두께 범위에 따라 판폭두께비 비율(λ/λ_r)을 조절하여 설계하였다

3.1.2 재료시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 특성 및 성질을 파악하기 위하여 시편을 제작하여 인장시험을 실시했다. 제품규격은 KS D3503이며 시험방법은 KS B0802이고, 두께가 17 mm, 12mm, 9mm, 6 mm, 재질은 SS400인 강판의 재료이다. 인장시험 결과, 항복강도는 웨브는 평균 306N/mm², 플랜지는 329N/mm²이며, 인장강도는, 웨브는 평균 432, 플랜지는 496N/mm²이다. 연신율은 평균 44.2%이며, 항복비는 약 0.70정도이다.

3.1.3 실험방법

실험방법은 1,000kN 용량의 actuator하부에 가력 보 및 지그를 설치하여 2점 가력(보 길이 8,700mm, 가력지간 4,000mm, 반력지간 8,100mm)으로 하고, 실험체의 횡방향 변위방지 지지대를 설치하였다. 가력모델은 Fig. 5와 같다.

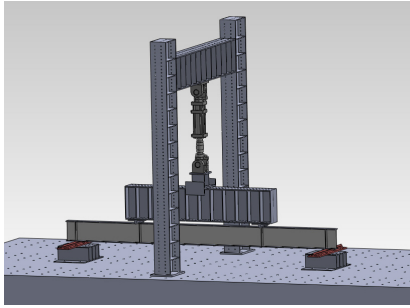


Fig. 5. Loading Model of specimen

3.1.4 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 실험체의 하중-변위(δ) 관계곡선이고, Table 2는 구조성능을 나타낸 것이다. 실험체의 거동은, 초기강성은 주름 웨브 보가 일반 평판 보에 비해 작게 나타났으며, 내력은 주름웨브 보 CP-3.2는 일반 평판 보 P-4.5보다 약 1.2배 크게 나타났다. 항복 후, 내력 상승율은 모든 실험체에서 약 1.01배로 거의 없고, 변형능력은 평판 보는 약 1.09~1.45배, 주름웨브 보는 약 1.26~1.45배로 평판 보보다 주름웨브 보가 다소 높은 능력을 보인다. 여기서 웨브두께가 커질수록 초기강성이나 변형능력은 커지는 경향을 보이나, 내력은 웨브두께에 민감하다. 즉, 일반 평판보는 웨브두께증가에 따라 내력증가는 거의 없으나, 웨브 주름보는 웨브두께 증가에

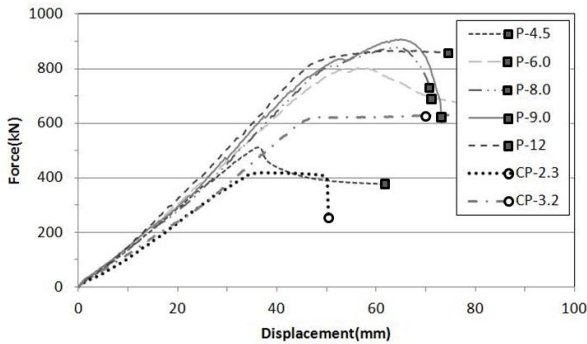


Fig. 6. Load-displacement relationship

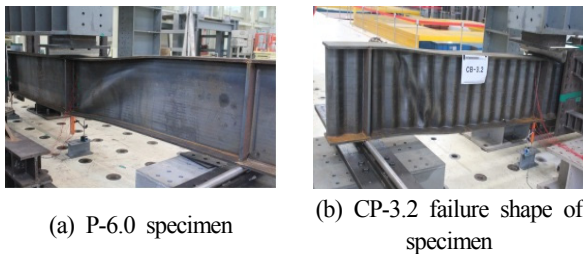


Fig. 7. Failure shape of flexural test specimen

Table 2. Test results of flexural specimens

Specimen name	Initial rigidity	Maximum load	Strength increase ratio	Ductility	Strength ratio
	k_e (kN/mm)	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_y}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$	$\frac{M_e}{M_p}$
P-4.5	14.35	512.92	1.001	1.02	0.82
P-6.0	15.47	801.64	1.006	1.11	1.22
P-8.0	16.19	877.56	1.007	1.20	1.25
P-9.0	16.70	907.12	1.007	1.21	1.25
P-12.0	17.54	867.48	1.010	1.25	1.10
CP-2.3	12.00	418.04	1.004	1.12	0.72
CP-3.2	13.18	633.92	1.018	1.76	1.06

* M_e : Test Bending Moment, M_p : Full Plastic Moment

따른 내력증가에 효과가 있으므로, 춤이 큰 장스팬 H형 주름 웨브 보는 횡좌굴 방지를 하면서 적당한 웨브두께(판폭두께비)에 대한 추가연구가 필요하다.

이 그림에서 비콤팩트 단면의 P-4.5는 웨브의 전단좌굴로 강도가 급격히 떨어진 반면, 콤팩트단면의 실험체는 소성 거동 후 내력이 천천히 감소하는 거동을 보인다.

Fig. 7은 휨재에 대한 실험체의 종국상황이다. 웨브두께와 형상에 따라 차이를 보이며, 상대적으로 웨브두께가 얇은 P-4.5와 P-6.0는 플랜지 변형이전에 웨브에서 전체적으로 전단좌굴이 발생하였고, 웨브가 두꺼운 P-8.0, P-9.0, P-12.0은 웨브의 면외좌굴 없이 길이방향의 플랜지 횡좌굴이 발생하였다. 웨브 주름보, CP-2.3는 가력지점 웨브에서 국부좌굴이 발생하였으며, CP-3.2는 플랜지 횡변위 유도 후 가력지점의 국부좌굴없이 단부에서 전단좌굴과 어코디언 효과가 발생하였다.

Fig. 8은 판폭두께비에 대한 내력비를 나타냈다. 이 그림은 웨브 판폭두께비에 따른 실험결과를 비교한 것으로, 수직

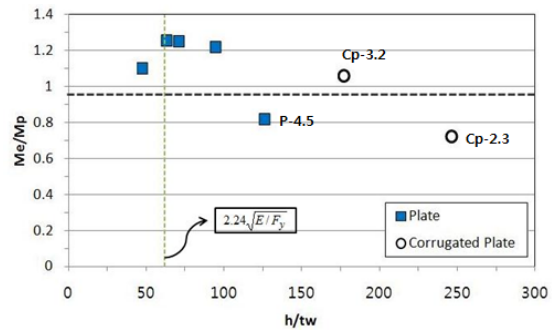


Fig. 8. Strength ratio to plate width-thickness ratio

파쇄선은 전단에 대한 임계 판폭두께비($2.24\sqrt{E/F_y}$)를 나타내며, 이 때, 전단에 대한 임계 판폭두께비는 61.87이 된다. 수평파쇄선은 실험에 의한 최대모멘트 M_e 와 전소성모멘트 M_p 가 같을 때를 나타내며, 실험모멘트가 전소성 모멘트보다 클 때 재료의 항복이후 좌굴이 발생된 것으로 판단한다.

휨재를 설계할 때 KBC 2009기준에는 부재의 좌굴이 재료 항복 전에 발생하는 것을 방지하기 위하여, 한계 판폭두께비(2축 대칭단면, $h/t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$) 이하로 설계하도록 명시되어 있다.

일반 평판 보에 비하여 주름웹 보는 판폭두께비가 커졌음에도 불구하고, 이 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 실무설계에서 주름웹 보 사용 시, 새로운 한계 판폭두께비의 적용을 통하여 부재의 절감효과를 기대할 수 있다.

또한 웹 판폭두께비 h/t_w 에 따라 공칭전단강도가 변하므로, 3개의 한계상태 공칭전단강도를 산정한다. 즉 웹에 전단력을 받는 1축 또는 2축대칭단면에서 설계공칭강도 (V_n)는 다음 식을 만족해야 한다(단, $h/t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ 는 제외. $\phi=0.9$).

$$V_u \leq \phi V_n \tag{13}$$

이때, 전단좌굴감소 계수(C_v)를 적용할 때, 본 실험에서 얻어진 한계 판폭두께비(h/t_w) 61.87는 비탄성좌굴영역으로 분류되므로, 탄성좌굴 범위 $C_v=1.0$ 이 되는 실험체 디자인이 필요하며, CP-3.2실험체의 경우, 이 점만 고려하여 주름웹 보를 설계하면 실무설계에 사용이 가능할 것으로 보인다(단, KBC2009에 의한 실험체의 C_v 값은 0.416).

3.1.5 변형을 분포

Fig. 9는 정확한 data계측을 위하여 플랜지와 웹을 3개의 zone으로 나누어 게이지를 부착하였다. 왼쪽부터 웹과 플랜지에 5개씩 총 10개를 한 개의 구역으로 설정하였다.

이 그림을 통하여 재하과정에서 웹과 플랜지의 최대응력이 나타나는 지점(부위)을 알 수가 있다. 여기서 웹에서

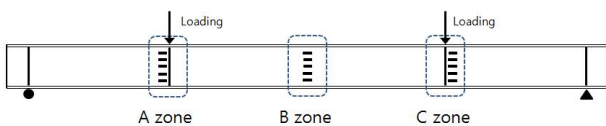
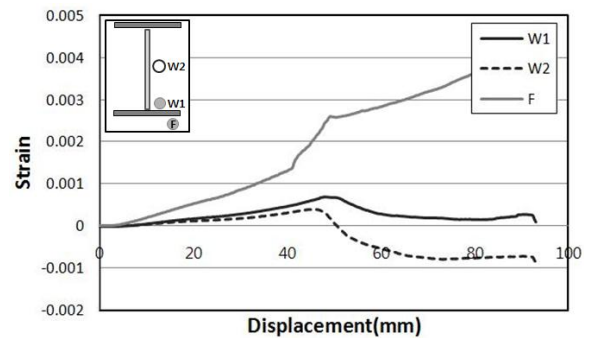


Fig. 9. Strain analysis zone of flexural test

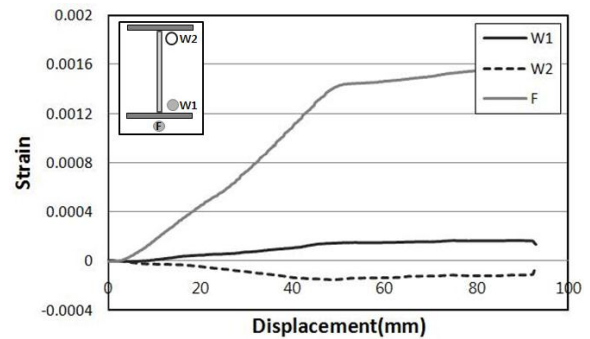
의 최대 인장력을 W1, 최대 압축력은 W2로 표기하였으며 플랜지에서 발생하는 최대 인장력은 F로 표기했다.

실험체 전반의 변형을 분포를 보면, 일반 평판보는 위쪽 웹-플랜지 접합부위에서 최대압축력이 발생하고 아래쪽 웹-플랜지 접합부위에서 최대 인장력이 발생하였다. 플랜지는 실험체별로 상이한 거동을 보였다. 주름 웹 CP-2.3 실험체는 일반 평판보와 같이 웹-플랜지 접합부위에서 최대 압축력, 최대 인장력이 발생하였다.

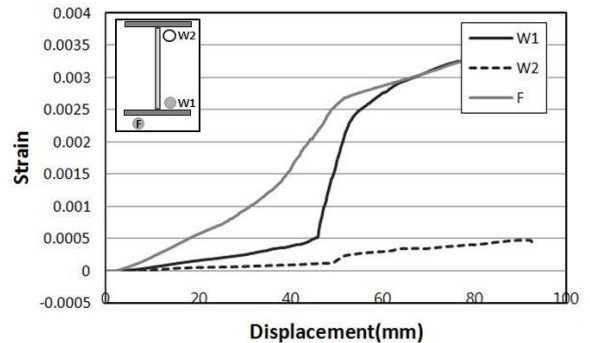
Fig. 10은 최대내력을 보이는 주름웹 CP-3.2 실험체에 대한 것으로, 웹의 중간부위(A zone)에서 위쪽(B→C



(a) "A" zone strain-displacement relationship



(b) "B" zone strain-displacement relationship



(c) "C" zone strain-displacement relationship

Fig. 10. Strain - displacement relationship (CP-3.2)

zone)으로 이동하면서 최대압축력이 발생하고 플랜지는 아래쪽 우측(A zone), 중간(B zone), 좌측(C zone)으로 이동하면서 최대인장력이 발생한다. 이것은 국부적인 좌굴발생으로 중앙부에서 응력 집중때문이라 사료된다.

4. 유로코드에 의한 내력비교

주름웹 보의 구조성능을 검토하기 위해, 현장에서 사용하는 유로코드(EN 1993-1-5)에 의해 산정된 휨모멘트 및 전단내력을, 실험에 의한 최대내력과 KBC2009에 의한 전단내력을 비교하였다. 일반평판 보 P-4.5와 주름웹 보 CP-2.3, CP-3.2을 비교대상으로 하였다.

CP-2.3실험체(600×200×2.3×17)의 경우, 유로코드(2005)의 단면 분류상, 내력감소 없이 소성해석을 통해 변형능력을 갖는 소성힌지 형성이 될 수 있는 class 1에 해당하며, 감소계수는 식 (5)에 의하면, 1.0이며, 휨 내력은 식 (4)에 의해, 455.56kN·m이다. 전단내력은 식 (9)에 의해, 162.17kN이다. CP-3.2실험체(600×200×3.2×17)의 경우도, 단면분류 class 1에 해당되며, 감소계수 1.0, 휨내력은 455.56kN·m이고, 전단내력은 242.78 kN이다.

한편, 전단성능의 경우, KBC 2009에 의한 전단내력은 (P-4.5 실험체, 600×200×4.5×17), 웹에 전단력을 받는 용접 H형강의 경우, $h/t_w \geq 1.37 \sqrt{k_v E/F_y}$ 이면, 설계전단강도는 식 (13)을 사용하면, 공칭전단강도 V_n 은 149.3kN이다. 이 때,

$$C_v = \frac{1.51 E k_v}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2 F_y} = 0.416 k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} = 5.0$$

$$h/t_w = \frac{566}{4.5} = 125.77 \geq 1.37 \sqrt{k_v E/F_y} = 90.48$$

로서, 유로코드에 의한 CP-2.3 실험체의 162.1kN, CP-3.2 실험체의 242.7kN보다 작다.

휨 내력의 경우는, KBC 규준에서는 규정이 없으므로 실험결과와 유로코드(2006/ Appendix D)에 의한 내력과 비교한다.

실험에 의한 최대 휨내력은 P-4.5 실험체는 519kN·m, CP-2.3 실험체는 423kN·m, CP-3.2 실험체는 64kN·m

이다. 반면에, 유로코드에 의한 최대내력은, CP-2.3 실험체, CP-3.2 실험체 둘 다 455.56kN·m로 같다. 여기서 유로코드 설계식에서는, 휨모멘트는 플랜지, 전단력은 주름웹이 각각 분담한다고 간주하며, 플랜지의 축력과 세장비식으로 휨모멘트 저감계수를 계산한 후, 인장 및 압축 플랜지 휨모멘트를 산정했다.

실험결과와 유로코드 설계식과 비교 시, 웹두께 2.3의 주름웹은 휨내력은 실험결과보다 1.09배 정도 크며, 3.2의 주름웹은 오히려 유로코드 값이 실험치보다 0.73배로 작았다. 이는 휨모멘트의 경우 유로코드에서는 주름웹두께는 휨 성능 향상에 도움이 되지 않은 것으로 판단하기 때문이라 사료된다.

5. 결론

이 연구에서는 파형 주름웹 강판 보의 휨성능 평가실험을 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 평판웹 P-4.5실험체에 비해서, 주름웹 CP-2.3 실험체는 휨내력이 12%부족하지만 CP-3.2실험체는 약 24%의 내력상승이 나타났다. 이는 웹 주름보는 평판 보보다 불리한 판폭두께비를 가진 경우에도 충분한 내력 확보가 가능하다고 판단된다.
- (2) 유로코드에 의한 웹 주름보의 휨성능은 P-4.5실험체에 비해, CP-2.3은 1.113배 내력증가, CP-3.2는 0.75배 내력감소를 보였으며, 전단성능은 유로코드 값 이 KBC2009에 의한 P-4.5실험체에 비해, 1.08~1.63배 내력이 높게 나왔다. 즉, 유로코드는, 웹 판두께 증가에 의한 휨성능 향상과는 상관이 없고, 전단성능은 웹 판두께와 주름웹의 형상에 민감하다.
- (3) 웹 주름보에 대한 현행기준(KBC2009) 적용은, 면외 횡좌굴의 우려 때문에, 보다 현실적인 새로운 판폭두께비에 대한 강도설계기준이 마련되어야 하겠다. 단, 이 연구는 제한적인 범위의 실험적 연구에 의한 것이므로, 춤이 큰 H형 파형 웹 주름보의 설계를 위해서는, 보다 폭넓은 실험과 해석 등의 추가연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌(References)

- [1] 한택희, 임남형, 박남희, 강영중(2002) 원형 파형판의 탄성 전단좌굴 특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제4호, pp.529-538.
Han, T.H., Lim, N.H., Park, N.H., and Kang, Y.J. (2002) Elastic Shear Buckling Characteristics of Circularly Corrugated Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.4, pp.529-538 (in Korean).
- [2] 오상훈, 문성환, 박해용(2013) 파형웹 보의 휨성능에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.139-140.
Oh, S.H., Moon, S.H., and Park, H.Y. (2013) Experimental Syudy on Flexural Performance of Corrugated Web Beam, Proc. of the 23rd Annual Conf., KSSC, pp.139-140 (in Korean).
- [3] 채일수, 김종성(2014) 사인주름웹 보의 휨성능에 대한 실험적 평가, 대한건축학회 지회연합회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, pp.63-64.
Chae, I.S. and Kim, J.S. (2014) Experimental Evaluation of Flexural Behaviour of Corrugated beam, Proc. of RA-AIK, pp.63-64 (in Korean).
- [4] 채일수(2015) 사인형 주름웹를 가진 H형보의 구조거동에 관한 실험적 평가, 경일대학교 석사논문.
Chae, I.S. (2015) Experimental Evaluation on Structural Behaviour of H-shaped Corrugated Web Beam, Master Thesis of Kyungil University.
- [5] 고희중, 문지호, 이학은(2007) 어코디언 효과에 의한 파형 강판 거더의 국부적 휨거동, 도시방재학회, 제12권, 제3호, pp.31-38.
Ko, H.J., Moon, J.H., and Lee, H.E. (2007) Local Flexural Behaviour of Corrugated Web Plate by Accordion Effects, Magazine of KOSHAM, Vol.12 No.3, pp.31-38 (in Korean).
- [6] 지효선(2011) 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴거동, 한국강구조학회논문집, 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).
- [7] 손수덕, 이승재(2011) 실변수 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름웹 보의 최적구조설계, 한국강구조학회논문집, 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.
- [8] EN 1993-1-5(2006) Eurocode 3-Design of steel structure-Annex D-Plate girders with corrugated Webs.

요 약 : 강구조물에서 장스팬의 경우, 일반적으로 스티프너로 보강된 플레이트거더를 많이 사용하는데, 보(girder)의 춤이 크고 웹의 폭이 좁은 단면을 선택하는 경우는, 웹가 세장해져서 면외좌굴이 문제가 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로, 이 연구에서는 국내에서도 공장, 창고건물을 중심으로 많이 사용되고 있는, 춤이 큰 주름 웹 보를 휨재로 사용했을 때, 그 적용가능성을 판단하기 위하여, 그 선행작업으로, 주름 웹(파형, Sinusoidal)를 가진 H형 단면보의 재하실험을 실시하였다. 평판웹 P-4.5실험체에 비해서 주름웹 CP-2.3실험체는 최대 휨내력은 12% 부족했지만, CP-3.2 실험체는 약 24% 내력상승이 나타났다. 이는 주름웹 보는 평판보보다 불리한 판폭두께비를 가진 경우에도 충분한 내력확보가 가능함을 의미한다. 그리고 유로코드(EN 1993-1-5)에 의하여 산정된 휨 내력 및 전단내력을, 재하실험에 의한 휨내력과 KBC2009에 의한 전단내력을 비교하였다. 유로코드에서는 주름웹의 판두께 증가는 휨성능 향상에 도움이 안 되며, 전단성능은 웹 판두께와 주름 웹의 형상에 민감함을 알았다.

핵심용어 : 웹 주름보, 웹 평판보, 휨 성능, 재하실험, 유로코드
