

Ultra-PEB의 구조성능 평가

Evaluation of Structural Performance of Ultra-PEB



주 영 규*
Ju, Young-Kyu



노 승 희**
Lho, Seung-Hee

1. 서론

PEB(Pre-Engineered Building)는 공장 등의 단층 장스팬 건물에 주로 사용되는 시스템이다. 그러나 최근 적설하중으로 인한 장스팬 건축물 지붕 붕괴사고가 여러 건 발생하였다. 붕괴 원인이 정확히 밝혀지지는 않았지만, 정확한 엔지니어링 작업의 부재 또는 시공능력의 부족 등이 원인이 될 수 있다. PEB가 어느 정도의 하중을 견딜 수 있는지 구조성능의 평가가 필요하다. 국외에서는 PEB를 대체할 수 있는 절곡형 웨브를 사용한 보(Plate girder with a corrugated web)가 사용되고 있고, 국내에서도 최근 Ultra-PEB가 개발되었다. 본 기사에서는 현재 국내에서 개발된 Ultra-PEB를 소개하고, Ultra-PEB의 구조성능 평가 결과를 설명하고자 한다. 구체적으로는 2장에서는 Ultra-PEB의 소개, 3장에서는 실험을 통한 전단성능 평가, 4장에서는 실험을 통한 휨성능 평가에 대해 기술한다.

* 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수

** 고려대학교 건축사회환경공학과 연구원

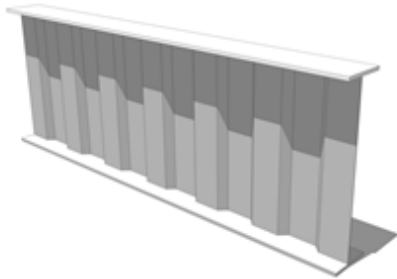
2. Ultra-PEB

2.1 Ultra-PEB 소개

Ultra-PEB는 <그림 1>과 같이 절곡형 철판을 웨브에 적용한 절곡형 웨브 철판보로서, 일반 철판보 또는 PEB 보다 웨브 두께를 감소시킬 수 있다. 이와 같이 얇은 판이 사용되는 박판구조물은 항공, 자동차산업에 주로 사용되어 왔고, 현재는 그 장점으로 인하여 교량 혹은 건축구조에도 적용 범위가 확대되고 있다. 절곡형 철판을 교량과 건축물에 적용하기 위하여 1970년대부터 절곡 기술이 개발되었으나, 절곡 기술과 용접 기술의 부족으로 인한 효율성 저하로 절곡형 웨브 철판보가 널리 사용되지는 못하였다. 그러나 지속적인 연구와 기술의 발전으로 현재는 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 최근 절곡기술과 용접기술의 발전으로 공장 자동용접으로 제작되는 Ultra-PEB가 개발되었다.

절곡형 웨브와 플랜지의 자동 용접이 가능해짐에 따라, Ultra-PEB는 공장 혹은 물류창고와 같은 장경간 건물의 지붕 골조에 사용되는 PEB를 대체할

수 있는 우수한 시스템이라고 할 수 있다. 3mm 두께의 절곡형 웨브는 약 12mm 두께의 일반 웨브와 동등한 전단성능을 발휘할 수 있다. 웨브 두께 감소로 철골 물량이 약 20% 정도 감소한다.

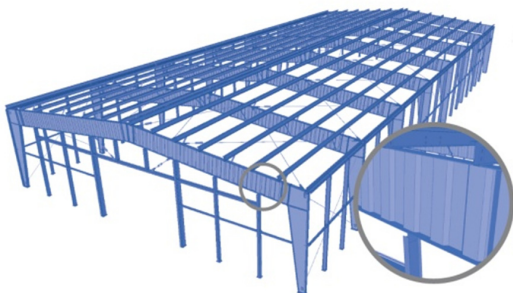


〈그림 1〉 Ultra-PEB

2.2 국·내외 개발현황

일반적으로 사용되는 절곡형 웨브의 절곡형상은 사다리꼴 형상과 사인 형상이 있다. 스웨덴 회사인 Tanabalken, 네덜란드 회사인 GLP Corrugated Plate Industry와 오스트리아의 Zeman & Co. 가 가장 대표적인 제작회사이다. GLP와 Tanabalken은 사다리꼴 형상의 corrugation profile을, Zeman & Co.에서는 사인 형상의 절곡판을 제작한다. 일본과 유럽에서는 절곡형 웨브가 교량과 건축물이 많이 적용되었고, 이에 대한 설계기준도 가지고 있다. 스웨덴과 독일에서도 절곡형 웨브 철골보 설계 가이드라인이 있다.

국내에서는 동부제철에서 Ultra-PEB를 개발하여 〈그림 2〉와 같이 건축물에 적용하고 있다. 그러나 국내에서는 아직 절곡형 웨브 철골보를 건축물에 적용한 사례가 많지 않고, 설계기준도 없는 실정이다.

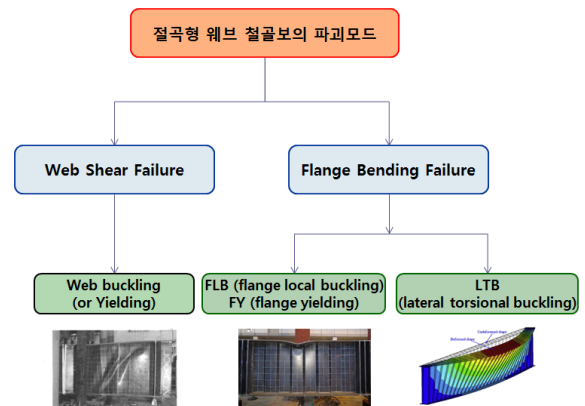


〈그림 2〉 지붕골조에 적용된 Ultra-PEB 개념도

3. Ultra-PEB 구조성능 평가

3.1 절곡형 웨브 철골보의 구조적 특징

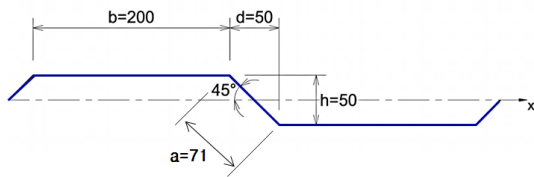
일반적으로 건축물에 사용되는 절곡형 웨브 철골보의 웨브 판 두께는 2mm ~ 4mm로 기존 PEB 부재에 사용되는 웨브 두께보다 상당히 얇은 판이 사용된다. 따라서 전단내력(전단좌굴내력)이 가장 중요한 내력평가요소가 된다. 또한 절곡 형상으로 인한 아코디언 효과 때문에 웨브는 전단만을 저항하고 휨에는 저항하지 못하므로 기존 PEB와는 다른 휨거동을 가진다. 〈그림 3〉은 절곡형 웨브 철골보의 파괴모드를 보여준다. 본 연구에서는 Ultra-PEB의 웨브의 좌굴내력 평가에 의한 전단내력을 평가하였고, 플랜지 항복에 의한 휨내력을 평가하였다.



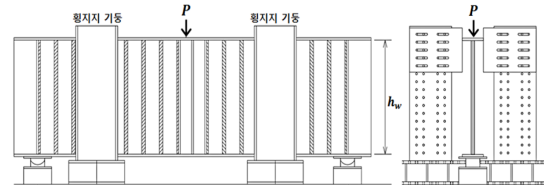
〈그림 3〉 절곡형 웨브 철골보의 파괴모드

3.2 전단성능 평가

본 연구에서 적용한 절곡형 웨브 형상은 〈그림 4〉와 같이 경사각 45도, 수평패널 폭(b) 200mm, 경사패널 폭(a) 71mm이다. 교량과 비교할 때 건물에서의 하중은 크지 않기 때문에 웨브 두께가 4mm 이하이고, 이 정도의 두께는 45도 절곡이 가능하다. 실제 사용되는 플랜지 폭은 약 150mm ~ 350mm인 것을 고려하여 파고(h)을 50mm로 하였다.



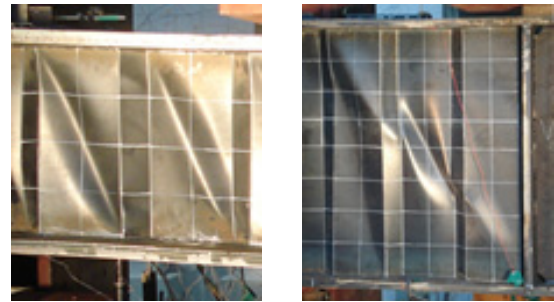
〈그림 4〉 실험체 웨브의 형상



〈그림 5〉 전단 실험체 세팅도

전단성능 평가를 위한 실험체는 <표 1>에 정리하였다. 웨브 두께(t_w)는 실제 제작범위를 반영한 2.2, 3.0, 4.0mm로, 모두 전단좌굴이 발생하는 두께이다. 단, H04T6B3 실험체는 웨브의 항복조건을 확인하기 위하여 6.0mm의 웨브를 사용하였다. 웨브 높이(h_w)는 440, 940, 1440mm를 사용하였다. 플랜지 폭(b_f)는 200, 300mm를 사용하였다. 전단파괴를 유도하기 위하여 콤팩트플랜지로 계획하였고, 플랜지 두께는 30mm를 사용하였다. SM490 강재가 사용되었다. 힘의 영향 없이 절곡형 웨브의 전단파괴를 유도하기 위하여 <그림 5>와 같이 1점 가력하였다.

<그림 6>은 실험 후 웨브에서 전단좌굴이 발생된 사진이다. H04T6B3 실험체는 웨브의 항복까지 내력을 발휘하였고, 나머지 다른 실험체들은 모두 웨브의 전단좌굴이 파괴모드였다. 전단좌굴이 발생한 실험체는 웨브의 세장비에 따라서 탄성좌굴, 비탄성좌굴, 항복이 발생한 것을 확인할 수 있다.



(a) H04T2B3

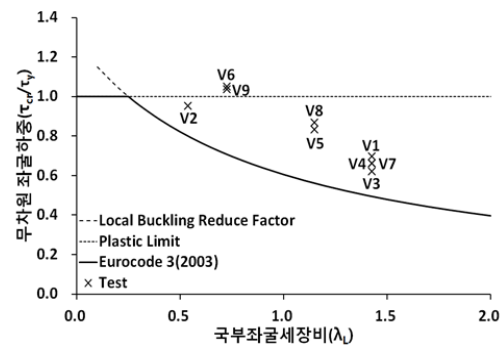
(b) H09T2B2

〈그림 6〉 전단 실험 후 실험체 좌굴 형상

〈표 1〉 전단실험체 일람

실험체명	h_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)
H04T2B3 (V1)	440	2.2	300
H04T6B3 (V2)	440	6.0	300
H09T2B2 (V3)	940	2.2	200
H09T2B3 (V4)	940	2.2	300
H09T3B3 (V5)	940	3.0	300
H09T4B3 (V6)	940	4.0	300
H14T2B3 (V7)	1,440	2.2	300
H14T3B3 (V8)	1,440	3.0	300
H14T4B3 (V9)	1,440	4.0	300

실험체의 웨브의 세장비에 따른 좌굴내력을 <그림 7>에 나타냈고, Eurocode 3과 비교하였다. 모든 실험체는 Eurocode 3 이상의 내력을 보유하고 있고, 특히 웨브의 세장비가 0.5 ~ 1.0 사이 구간의 실험체들은 Eurocode 3에 비해 충분히 큰 내력을 보유하고 있었다. Eurocode 3이 절곡형 웨브를 가진 철골보에 대해서 상당히 보수적인 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 7〉 Eurocode 3 전단내력과 비교

3.3 휨성능 평가

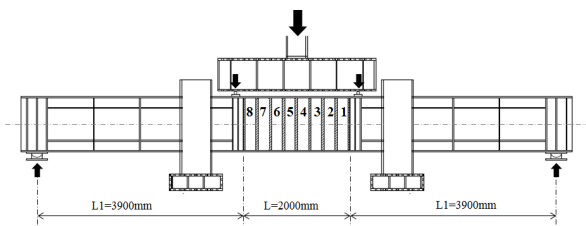
휨성능 평가를 위한 실험체는 <표 2>에 정리하였

다. 콤팩트 플랜지를 가지는 4개의 실험체가 계획되었다. 웨브의 세장비에 따른 휨내력을 평가하기 위하여 웨브 두께와 웨브 높이를 변수로 하였다. 웨브 두께(t_w)는 2.2, 3.0mm를 사용하였고, 웨브 높이(h_w)는 960, 1460 mm를 사용하였다. Eurocode 3에서는 웨브의 세장비(λ_p)가 최대세장비($\lambda_{p,max}$) 이하의 값을 가지도록 제안하고 있다. 본 실험에서는 최대세장비를 초과하지 않는 실험체 M10T22, M10T30 과 초과하는 실험체 M15T22, M15T30를 계획하여 휨성능평가 실험을 수행하였다.

〈표 2〉 휨 실험체 일람

실험체	h_w (mm)	b_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	λ_p	$\lambda_{p,max}$
M10T22	960	300	2.2	20	6.9	6.9
M10T30	960	300	3.0	20	5.6	6.3
M15T22	1460	300	2.2	20	10.6	6.9
M15T30	1460	300	3.0	20	8.5	6.3

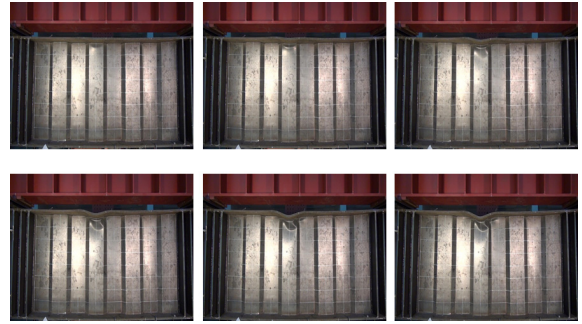
순수휨 상태에서의 실험을 위해 〈그림 8〉과 같이 2점 가력하였다. 순수휨을 받는 보의 중앙에서의 휨 파괴를 유도하기 위해, 보 중앙의 웨브에만 절곡형 웨브를 사용하였다.



〈그림 8〉 휨 실험체 세팅도

실험체의 파괴모드는 ‘하부플랜지 항복 → 상부 플랜지 항복 → 웨브의 좌굴로 인한 상부플랜지 대 변형’ 순서로 진행되었다. 〈그림 9〉는 실험 후 상부 플랜지에서의 변형을 보여준다. M10T22와 M10T30 은 상부플랜지의 대변형까지 가력하였으나, M15T22 와 M15T30은 액츄에이터의 내력 부족으로 상부플랜

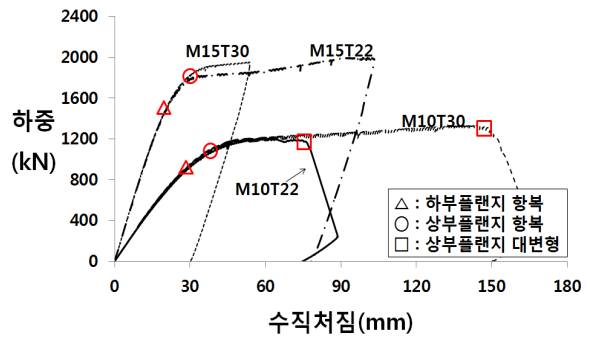
지가 항복되는 상태까지만 가력하였다.



〈그림 9〉 가력에 따른 실험체 M10T22 변형 형상

〈그림 10〉은 휨실험체의 하중-변위 곡선이다. M10T22와 M10T30은 M10T22의 상부플랜지 대변형 발생 전까지는 거의 동일한 거동을 보인다. 단, M10T30이 M10T22보다 연성적인 거동을 하는데, 그 이유는 웨브가 두꺼울수록 플랜지에서의 변형을 저항할 수 있기 때문이다. M15T22와 M15T30도 상부플랜지 항복까지 거의 동일한 거동을 보인다. 이와 같이 웨브의 두께는 탄성구간에서는 거의 영향을 주지 못한다. 단, 웨브의 두께가 두꺼울수록 플랜지 항복 이후 연성거동을 할 수 있음을 확인하였다.

실험 결과 모든 실험체는 Eurocode 3에서 제시하는 휨내력 이상의 값을 보유하고 있음을 확인하였다. Eurocode 3에서 제시하는 최대세장비를 초과하는 웨브를 가진 실험체 M15T22와 M15T30 역시도 플랜지 항복까지의 내력을 충분히 발휘하였다.



〈그림 10〉 하중-변위 곡선

4. 결 언

본 기사에서는 절곡형 웨브가 사용된 철골보의 특성과 Ultra-PEB의 전단 및 휨성능에 대하여 살펴보고 있다. 구조실험을 통한 전단 및 휨성능 평가 결과 Eurocode 3에서 제시하고 있는 내력 이상을 보유하고 있음을 확인하였다.

절곡 기술과 용접 기술의 발전으로 점차 절곡형 웨브의 적용 범위가 넓어지고 있다. 그러나 유럽과는 달리 국내에서는 아직 절곡형 웨브가 많이 사용되고 있지 않고, 관련 설계기준도 마련되어 있지 않은 실정이다. 이러한 의미에서 본 프로젝트는 국내 절곡형 웨브 철골보 발전을 위해 큰 의미를 가지는 프로젝트로 사료된다.

최근 적설하중으로 인한 건물 붕괴사고로 인해 엔지니어의 역할이 그 어느 때보다 중요하다고 판단되는 시점이다. 엔지니어링 기술이 발전할수록, 최적화된 구조시스템과 구조부재가 설계된다. 그리고 이에 따라 건물의 안전율은 점차 감소하게 되기 때문에, PEB 그리고 Ultra-PEB와 같은 엔지니어링이 필요한 시스템에서는 성급히 시스템을 적용하기에 앞서 실험을 통한 명확한 구조성능 평가가 필요하다고 사료된다.

S. D., "Flexural Capacity of Corrugated Steel Beams under Pure Bending." Proceedings of the ISSS 2013, Jeju, Korea, 2013.

4. Lho, S. H., Ju, Y. K., Lee, C. H., Oh, J. T., and Kim, S. D., "Bend-Buckling of Corrugated Webs under Pure Bending." Proceedings of the ISSS 2013, Jeju, Korea, 2013.
5. Eurocode 3. Design of Steel Structures. European committee for standardization (CEN). Brussels, Belgium; 2003. Part 1-5: Plated Structural Elements.
6. Elgaaly M., Hamilton R. W., and Seshadri A. Shear strength of beams with corrugated webs. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 4, 1996, pp. 390-398.
7. Elgaaly, M., Seshadri, A., and Hamilton, R. W., "Bending strength of steel beams with corrugated webs." Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 6, 1997, pp. 772-782.
8. Pasternak, H., and Kubieniec, G., "Plate girders with corrugated webs." Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 16, No. 2, 2010, pp. 166-171.

References

1. Kim, Y. S., Lho, S. H., Park, M. W., Do, B. H., Ju, Y. K., and Kim, S. D., "Shear capacity of corrugated web beam for roof frame of industrial buildings." J. Arch. Inst. of Korea, Vol. 28 No. 9, 2012, pp. 57-65.
2. Lho, S. H., Kim, Y. S., Park, M. W., Ju, Y. K., and Kim, S. D., "Experimental Study on Shear Capacity of Corrugated Web Beam." Proceedings of the IUMRS-ICA 2012, Busan, Korea, 2012.
3. Lho, S. H., Ju, Y. K., Lee, C. H., and Kim,