

장경간 변단면 보의 성능 실험

The Performance Experiment of Long-Span Tapered Beam



오 명 호*
Oh, Myoung-Ho

1. 개요

PEBS(Pre-Engineering Building System)는 미국이나 영국 등에서 군사용으로 단시간내에 견고한 구조물을 설치할 목적으로 개발된 공법으로 구조물 제작에 소요되는 철골과 부속자재를 현장 투입 전 공장에서 가공제작하여 설치하는 공법으로 단지 철골부재를 이용한 건물(Metal Building System) 또는 표준설계(Modular Building System) 개념을 의미하였다. 그러나 점차 민간사업으로 전환되어 광범위하게 활용되면서 현재는 고강도 강재의 사용과 함께 휨모멘트의 크기에 따라 부재형상을 최적화 한 변단면 부재(tapered member)를 설계·사용하는 경제적인 시스템을 의미한다.

이 실험에서 적용된 변단면 부재는 웨브의 두께가 얇은 보이다. 즉 웨브의 판-폭 두께비가 Non-Compact Section이다. 이러한 변단면 보의 성능 검증을 위해 실물 시험을 실시하였다. 이를 통해 휨성

능에 대한 역학적 거동 파악 및 주요변수에 관한 좌굴 및 극한 내력에 대하여 비교·분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험체 개요

스팬 20m의 실물 실험체는 모두 2개로 계획하였으며 실험체의 일람은 <표 1>에 나타내었다. 또한 각 실험체의 상세 및 제원은 <그림 1>에 나타내었다.

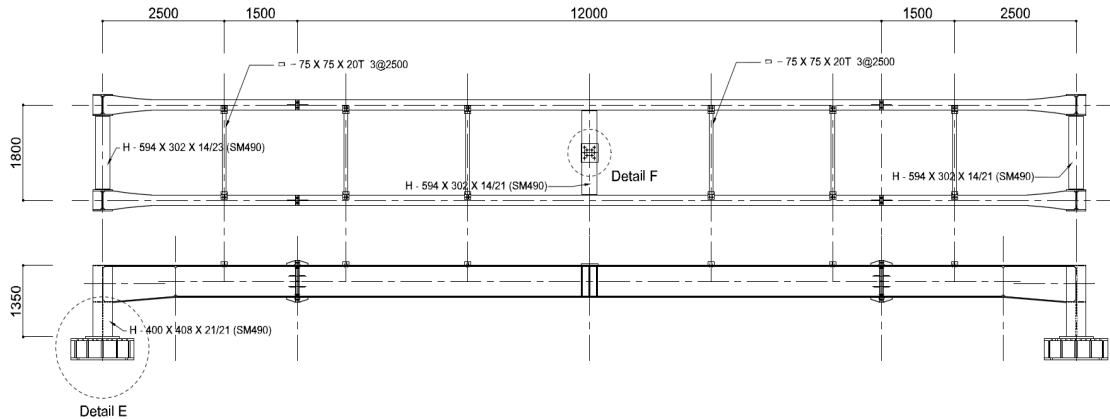
변단면 실험체(RT1)의 경우, 단면의 크기는 양단부에서는 $bH-700 \times 200 \times 5 \times 12$ (SM490)이고 단부에서 1,500mm 떨어진 단면에서부터 중앙부까지는 $bH-600 \times 200 \times 4.5 \times 12$ (SM490)으로 양단부에 헌치(Haunch)형태의 변단면(Tapered Section) 실험체이다.

이때 RT1 실험체에서 플랜지의 판-폭두께비(b/t_f) 및 웨브의 판-폭두께비(h/t_w)를 각각 계산하면, 플랜지는 콤팩트 단면(Compact Section)이고, 웨브는 비콤팩트 단면(Non-compact Section)이다.

* 목포대학교 건축공학과 교수

〈표 1〉 실험체 일람

단 부				중 앙 부				비 고
H (mm)	B (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	H (mm)	B (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	
700	200	5	12	600	200	4.5	12	Tapered Beam



〈그림 1〉 변단면 실험체(RT1)

또한 실험체는 실제 조건을 구현하기 위해 똑같은 2개의 보-기둥 실험체를 제작하여 2,500mm 간격으로 횡좌굴 지지(lateral support) 역할을 하는 Purlin (□-75×75×2.0mm)을 사용하여 서로 연결하였다 (Detail B 참조).

그리고 보-기둥 접합부(Beam-Column Connection)는 20m 장스팬의 변단면 보가 기둥의 약축(Weak Axis)에 모멘트 접합(Moment Connection)되는 것으로 구성되어 있다. 따라서 이러한 보-기둥 접합부의 실제 상황을 구현하기 위해 길이 1,000mm의 기둥을 압연형강 H-400×408×21×21(SM490)으로 하여, 이를 보와 공장 용접하여(Detail D 참조) 접합부의 안정성을 평가하고자 하였다.

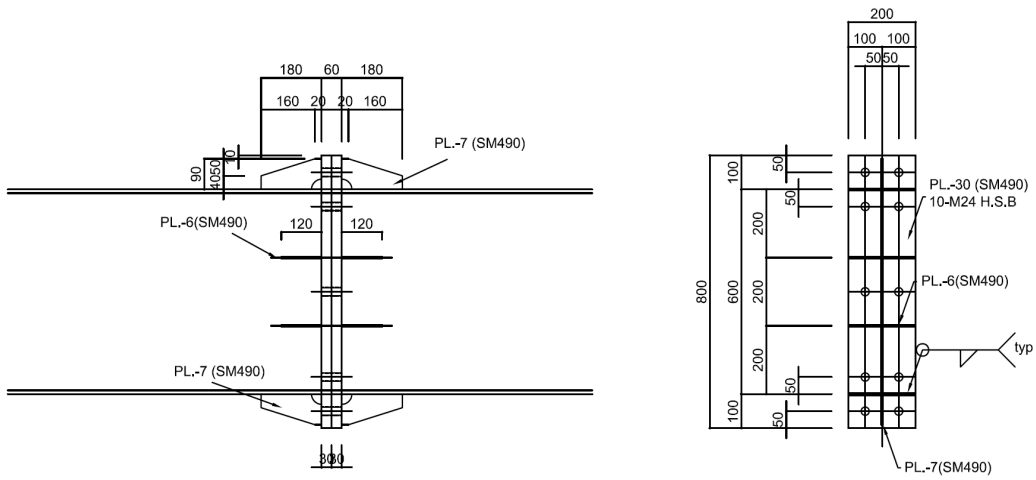
2.2 실험체 제작 및 설치

실험체 제작은 실제 P.E.B 시스템의 제작형식을 그대로 수행하여 그 차이를 최소화하고자 하였다. 변단면 실험체(RT1)의 경우 두께별 강판(Plate)를

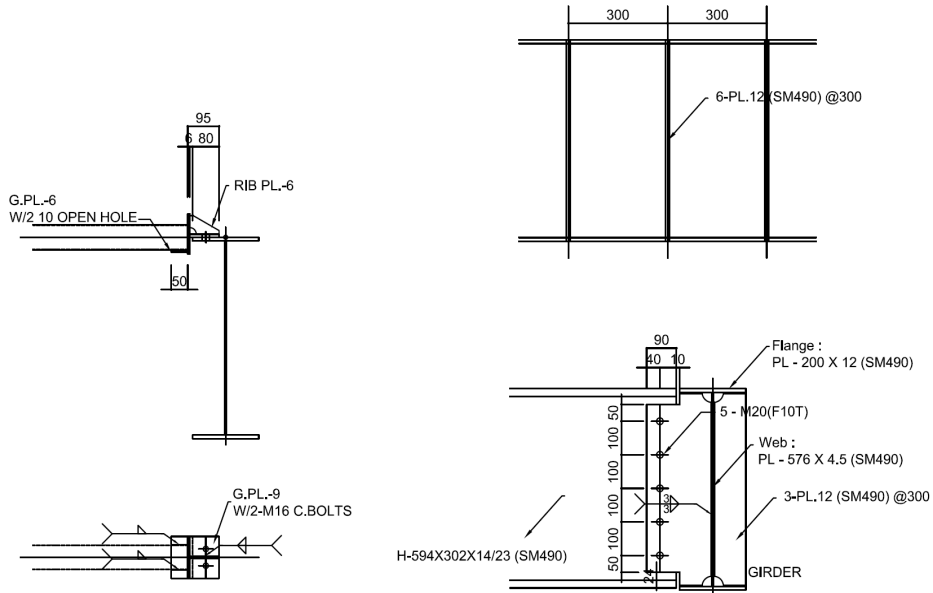
레이저로 절단하여 용접하였다. 이때 용접법은 실제와 동일하게 서브머지드 아크용접법(Submerged Arc Welding ; SAW)을 사용하여야 하나 실험체의 강판이 매우 박판(薄板)인 관계로 용접에 특별한 주의(전류, 용접속도, 용접공의 숙련도 등)를 기울일 필요가 있어 피복아크용접(Shielded Metal Arch Welding ; SMAW)로 하였다.

일반적으로 P.E.B 시스템 제작에 있어서 8mm 이상의 두께를 갖는 강판의 경우 양면 용접을 하며, 8mm 이하로는 한면 용접을 하지만 본 실험체에서는 두께와 상관없이 양면 용접을 실시하였다.

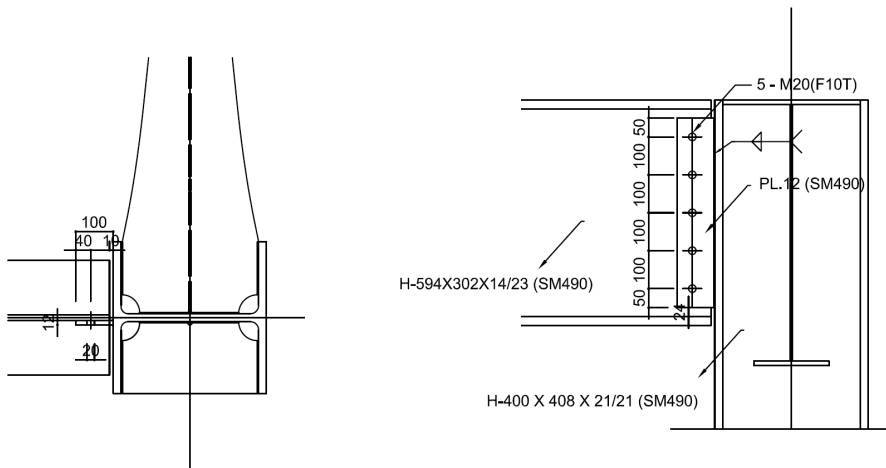
운반 및 설치의 편의성을 위해 스패ن 20m의 실험체는 4m, 12m 및 4m의 세 부분으로 나누어 제작하여 실험실에서 볼트 접합하는 것으로 계획하였다. 이 세 부분의 접합을 위하여 F10T 10-M24 볼트를 사용하였으며(Detail A 참조) 임팩트 렌치를 사용하여 체결하였다.



(a) Detail-A

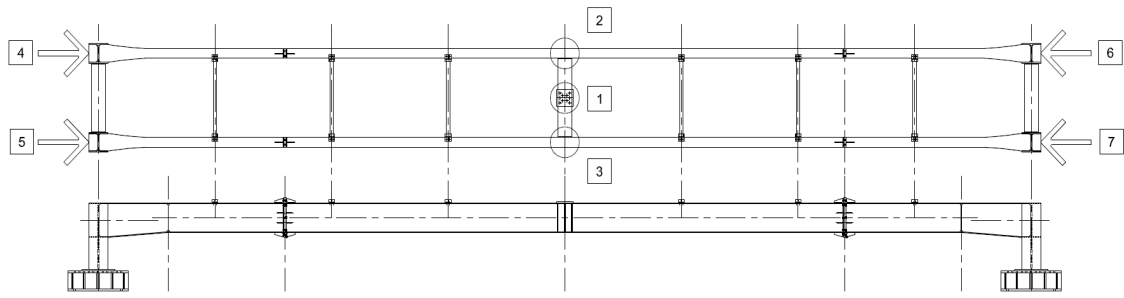


(b) Detail - B, Detail - C

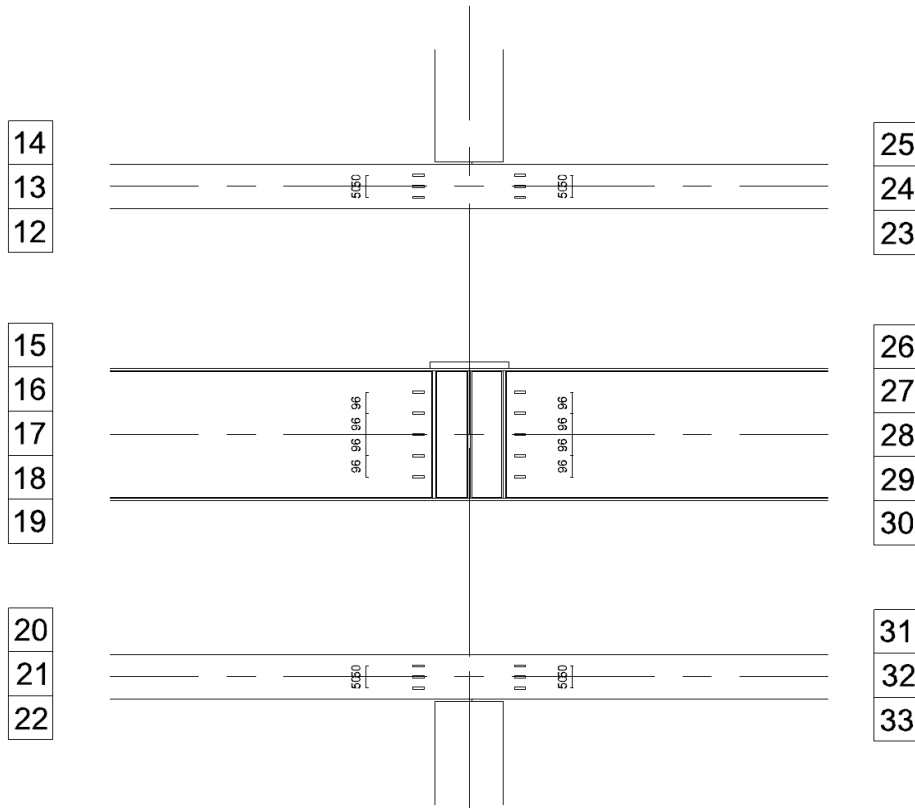


(c) Detail - D

〈그림 2〉 실험체 상세도



(a) LVDT 설치 위치



(b) 스트레인 게이지 부착 계획(중앙부 ; 14~33)

〈그림 3〉 계측 계획

2.3 가력방법 및 측정계획

본 실험은 포항산업과학연구원(RIST)의 강구조연 구소의 구조실험동에서 진행되었다. 최대용량이 2000 kN인 Actuator를 프레임에 설치하여 진행하였고 실험체의 중앙부에 가력 보 H-594×302×14×21를 설치하여 가력보의 중앙부 상단에 30mm 두께의 평판 과 Actuator 단부는 고력볼트로 충분히 고정하였다.

실험이 진행되는 동안 보의 처짐은 실험체의 중앙 하부에 설치된 LVDT를 사용해 측정하였고 기둥의

수평 변위를 측정하기 위해 기둥의 바깥쪽 면에 각 각 LVDT를 설치하였다. 실험체의 플랜지와 웨브의 변형률은 양단부, 변단면부, 중앙부의 각각 상하 플 랜지와 웨브에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하 였다. LVDT와 스트레인 게이지의 위치는 〈그림 3〉 과 같다. 가력은 변위제어방법으로 0.05mm/ sec의 속도로 하였고, 최대하중 상태에서 안전을 고려하여 실험을 종료하였다. 〈그림 4〉에 실험체 셋팅 현황을 나타내는 전체 사진이다.

3. 실험 결과 분석 및 고찰

3.1 소재 인장 시험

실물대 실험체에 사용된 강판(Plate)의 두께는 4.5mm, 5mm이다. 사용된 강판의 역학적 성질은 KSB 0802의 금속재료 인장시험 규정편에 따라 제작하였고, KS B 0801의 각 두께별로 3개의 시험편을 제작하여 소재인장시험을 실시하였다. 이러한 인장시험 결과를 <표 2> 및 <그림 5>에 나타내었다. 특별히 강판의 두께가 4.5mm인 경우에는 항복점이 뚜렷하지 않아 0.2% Offset 법으로 산정하였다. 항복비의 경우 두께 16mm 미만인 경우 85% 이하인 규격치를 모두 만족하고 있다. 그러나 연신율은 22% 이상이어야 하나, 두께 5.0mm에서는 규격치를 만족하지 못하는 결과를 얻었다.

3.2 실험 결과 고찰

<그림 6>에 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 여기서의 하중은 두 개의 골조를 연결한 가력 보에서의 작용하중이며 변위는 두 개의 골조, 즉 왼쪽 골조와 오른쪽 골조의 중앙부에서 측정된 수직 변위이다. 즉, 각각의 골조 중앙부에 작용하는 하중은 작용 하중의 1/2으로 가정할 수 있다.

변단면 실험체(RT1)의 경우 작용 하중이 약 150



<그림 4> 실험체 전체 Setting 사진

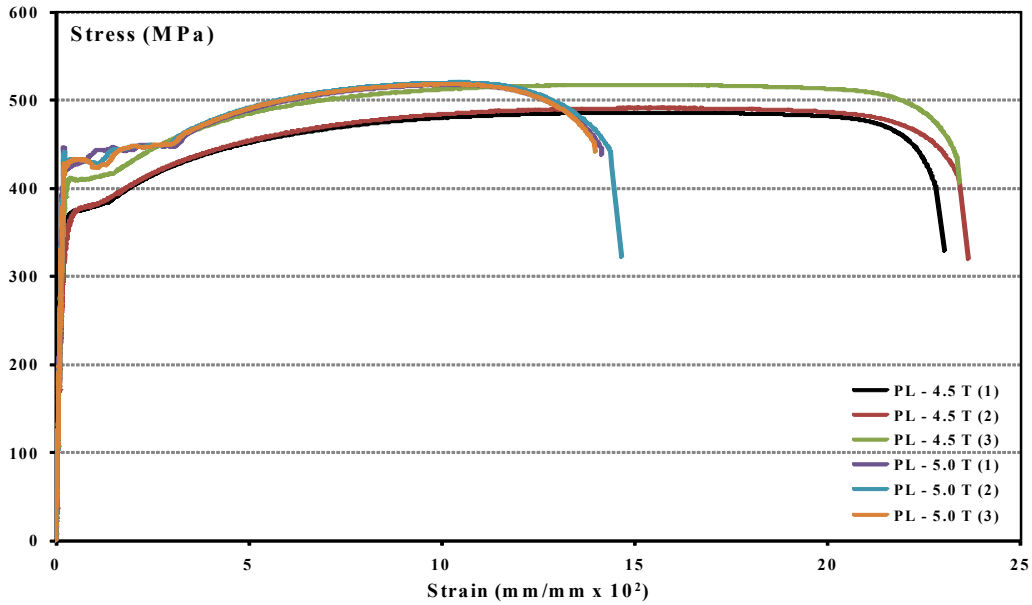
kN에 도달했을 때까지는 왼쪽 골조(Left Frame)와 오른쪽 골조(Right Frame)가 동일하게 거동하고 그 이후 두 개의 골조의 하중-변위 곡선에서 차이가 날 수 있다. 이는 작용 하중 150kN에서 보 부재에 변형이 일어나서 두 개의 골조에 같은 하중이 분배되지 않은 것으로 판단할 수 있다. 최종 변형 형상은 횡-비틀림 좌굴의 형태로 나타나며 최대 하중 335kN에 도달한 후 하중이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다(그림 7 참조).

<그림 8>에 변단면 실험체(RT1)의 중앙부에 부착

<표 2> 소재인장시험결과

시험편명	순번	두께 (mm)	폭 (mm)	항복 하중 (kN)	최대 하중 (kN)	파단 하중 (kN)	항복 응력 (MPa)	최대 응력 (MPa)	연신율 (%)	항복비 (%)
PL-4.5t	1	4.48	40.15	65.56*	87.48	59.08	364.50*	486.37	23.01	74.9
	2	4.45	39.97	63.68*	87.41	56.88	358.00*	491.42	23.64	72.9
	3	4.33	39.98	70.16*	89.64	70.36	405.26*	517.82	23.42	78.3
PL-5.0t	1	4.99	40.33	84.52	104.17	88.06	419.96	517.63	14.15	81.1
	2	4.97	40.47	85.92	104.69	64.81	427.18	520.48	14.66	82.1
	3	4.97	40.27	84.72	103.80	88.34	423.29	518.62	13.98	81.6

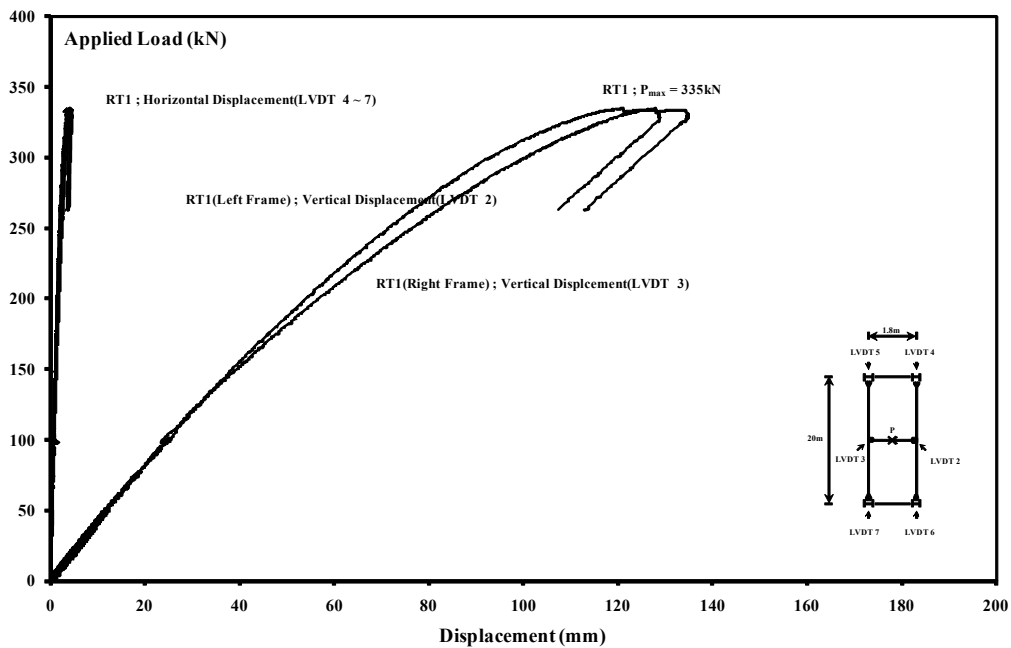
*) Note ; 항복점이 뚜렷하지 않아 0.2% Offset 으로 산정된 값임.



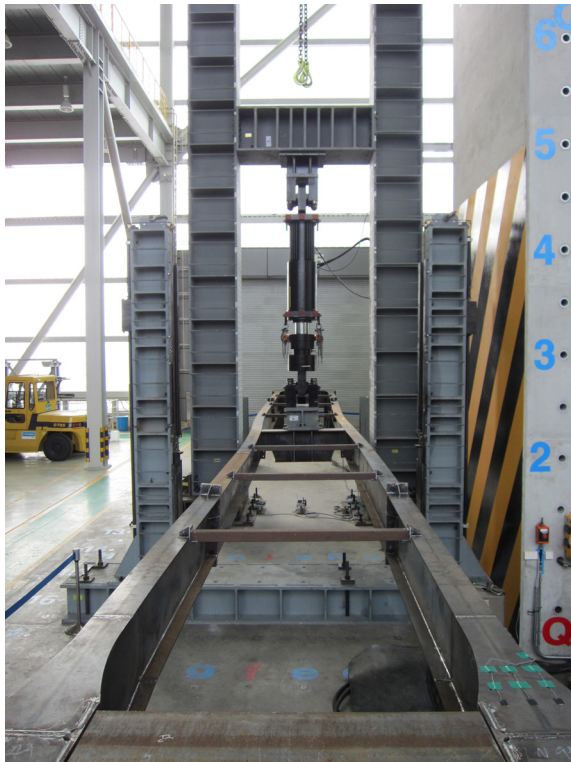
〈그림 5〉 소재인장시험결과

된 상부 플랜지 변형률, 웨브 변형률, 하부 플랜지 변형률 및 단부에 부착된 상부 플랜지 변형률을 나타내었다. 항복 변형률을 소재인장시험 결과에 따르면 플랜지에 사용된 PL-12t의 경우, $F_{ye} = 383.0\text{MPa}$ 로 $\epsilon_{ye} = F_{ye} / E = 1868 \times 10^{-6}$ 이다. 변단면 실험체 (RT1)의 경우, 작용하중이 약 230kN에서 중앙부의

상부 플랜지에서 압축에 의한 항복이 먼저 도달하고, 이후 약 323kN에서 웨브의 국부 좌굴이 발생함을 알 수 있다. 이후 최대 하중 335kN에서 하부 플랜지에서 인장에 의한 항복에 도달하는 것으로 나타났다. 단부에서는 최대 변형률이 500×10^{-6} 정도로 항복하지 않는 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 하중-변위 곡선



〈그림 7〉 파괴 양상

3.3 설계기준내력 비교

건축구조기준(KBC2009)에서 비콤팩트웨브를 갖는 강축 힘을 받는 H형강 부재의 공칭휨강도에 관한 규정은 0706.4항에 규정되어 있으며 압축플랜지항복강도, 횡좌굴강도, 플랜지국부좌굴강도, 인장플랜지항복강도 한계상태 중 최소값으로 하도록 되어있다.

0706.4.1 압축플랜지항복강도

$$M_n = R_{pc}M_{yc} = R_{pc}F_yS_{xc}$$

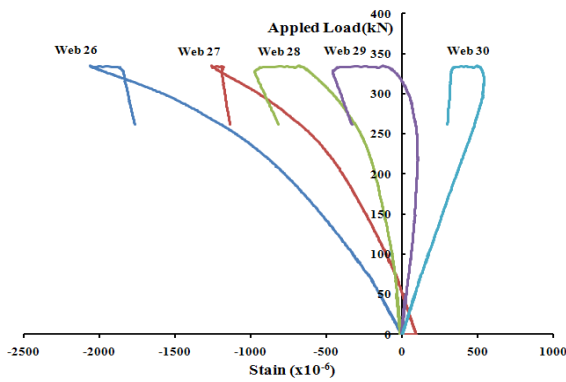
0706.4.2 횡좌굴강도, $L_p < L_b \leq L_r$ 의 경우이므로

$$M_n = C_b [R_{pc}M_{yc} - (R_{pc}M_{yc} - F_L S_{xc}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)]$$

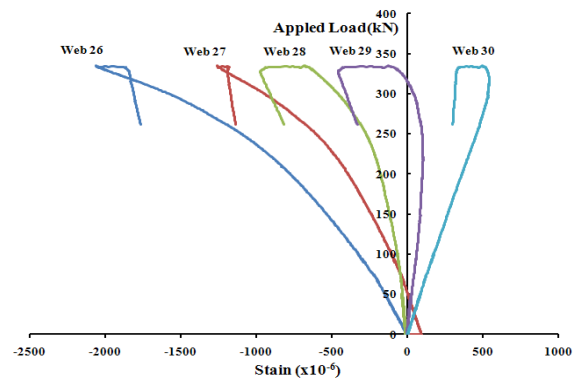
$$\leq R_{pc}M_{yc}$$

0706.4.3 압축플랜지국부좌굴강도

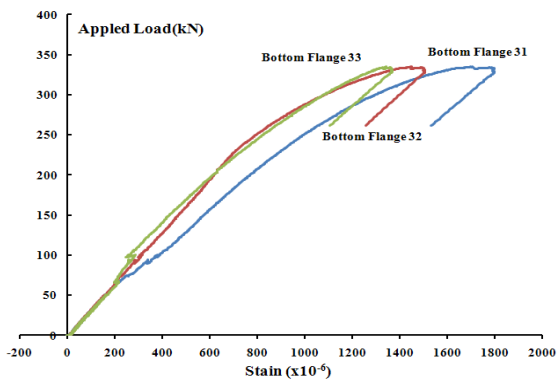
콤팩트플랜지이므로 플랜지국부좌굴강도를 고려하지 않아도 된다.



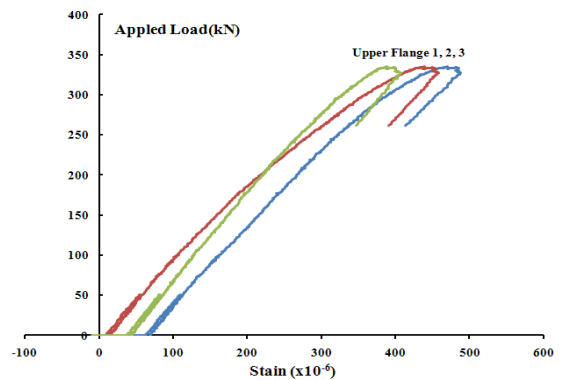
(a) 중앙부 상부 플랜지(압축)



(b) 중앙부 웨브



(c) 중앙부 하부 플랜지(인장)



(d) 단부 상부 플랜지(인장)

〈그림 8〉 하중-변형률 곡선

0706.4.4 인장플랜지항복강도

$S_{xt} \geq S_{xc}$ 의 경우이므로 인장플랜지항복강도를 고려하지 않아도 된다.

또한 휨재의 설계전단강도는 전단력에 의해 웨브가 항복하거나 좌굴하는 한계상태로 구분된다. 웨브의 판-폭두께비가 작은 경우에는 전단항복에 의한 한계상태가 되지만, 본 실험체와 같이 웨브의 판-폭두께비가 큰 경우에는 웨브는 전단에 의해 비탄성 또는 탄성좌굴을 일으킨다. 따라서 공칭전단강도는 다음과 같이 산정할 수 있다.

0707.2.1 공칭전단강도

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v$$

$h/t_w > 1.37 \sqrt{k_v E/F_y}$ 인 경우이므로,

$$C_v = \frac{1.51 E k_v}{(h/t_w)^2 F_y}, \quad k_v = 5$$

〈표 3〉에 각각의 실험체에서의 최대 휨강도, 최대 전단강도를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 변단면 실험체(RT1)의 경우 실험값이 설계기준값에서 제시하고 있는 최대 휨강도 및 최대 전단강도를 초과하고 있다.

〈표 3〉 최대 휨강도 및 최대 전단강도의 비교

실험값		설계기준값	
최대 휨내력 (kN-m)	최대 전단내력 (kN)	최대 휨강도 (kN-m)	최대 전단강도 (kN)
419	168	313	147

4. 결 론

이 연구에서 적용된 변단면 부재는 웨브의 두께가 얇은 보이다. 즉 웨브의 판-폭 두께비가 Non-Compact Section이다. 이러한 변단면 보의 성능 검증을 위해 실물 시험을 실시하였다. 실험 결과 실험값이 설계기준값에서 제시하고 있는 최대 휨강도 및

최대 전단강도를 만족하여 변단면 보의 안전성을 확인하였다.

참고문헌

1. 김호수(1996), 변단면부재와 P.E.B. 시스템에 의한 박공형 철골조의 최적설계방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제12권 5호, pp. 155-166
2. 오명호, 김용석(2009), 경량H형강을 이용한 유리온실의 구조시스템 개발, 대한건축학회연합논문집, 대한건축학회지회연합회, 제11권 2호, pp.211-218
3. 도병호(2007), PEB(Pre-Engineered Metal Building) System 설계 검토, 건축구조기술사회지, 건축구조기술사회, 제14권 1호, pp.39-45
4. ASCE/SEI 7-05(2005), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
5. 최성모(2003), 조립경량 철골구조시스템의 구조성능개선에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 제19권 12호, pp.65-71