

축방향 하중을 받는 강재 상자단면 보-기둥 접합부의 강도평가

Strength Evaluation of Steel Box Beam-to-Column Connections with Axial Load

황 원 섭¹⁾ · 박 문 수²⁾ · 김 영 필^{3),†}
Hwang, Won Sup · Park, Moon Su · Kim, Young Pil

요약 : 이 연구에서는 기둥에 축방향 하중을 받고 있는 강재 상자단면 접합부의 강도를 이론적·해석적 검토를 통하여 평가하였다. 2층 교각구조에서는 기둥에 작용하고 있는 축방향 하중의 영향으로 T형 접합부 강도가 저하되게 된다. 이러한 현상을 검토하기 위해 비선형 유한요소 해석을 수행하였고, 실험결과와의 비교를 통하여 유한요소 해석프로그램 및 해석방법의 타당성을 검증하였다. 강재라멘교각 접합부의 설계변수 중 패널존의 폭-두께비 파라메타와 플랜지와 복부판의 단면적비 및 기둥에 작용하는 축방향 하중의 영향을 비선형 유한요소해석을 통하여 검토하였다. 또한 이 연구에서는 축방향 하중의 증가에 따른 T형 상자단면 접합부의 응력분포를 이용하여 이론적인 강도평가식을 유도하였다. 또한 1층 교각 구조의 상자단면 접합부 강도특성과 비교하였다. 결국, 패널존의 폭-두께비 파라메타와 단면적비의 영향을 고려하여 T형 접합부의 강도평가식을 제안하였다.

ABSTRACT : In this study, we evaluate the strength of steel box beam-to-column connections subjected to axial loads in steel frame piers. The T-connection strength was reduced due to the column axial force in the two-story pier structure. To examine this phenomenon, non-linear FEM analysis was carried out and the analytical procedure was verified by comparing it with experimental results. To clarify the effect of the axial force and major design parameters in connection with strength, influence of panel zone width-thickness ratio, sectional area, and axial force was investigated using FEM analysis. Also, the theoretical strength equations were suggested by stress distribution of panel zone. The strength of the T-connection was compared with one of the one-story pier structure connections. As a result, the strength evaluation equations are proposed in consideration of the panel zone width-thickness ratio and sectional area ratio for the T-connections.

핵심용어 : 상자단면 접합부, 축방향 하중, 패널존, 폭-두께비, 단면적비

KEYWORD : box beam-to-column connection, axial load, panel zone, width-thickness ratio, sectional area ratio

1. 서론

교량하부 공간의 활용과 공사기간 단축을 위하여 도시 고가 도로의 교각구조에는 강재라멘 교각의 적용이 매우 합리적이라 할 수 있다. 특히 도심에서는 경량전철과 같은 고가 구조물의 교각구조로써 1층 구조물뿐만 아니라 2층 이상의 입체골조의 도입이 활발히 검토되고 있다. 이와 같은 2층 이상의 강재라멘 교각의 기둥부재에는 상당한 크기의 축방향 하중이 가해진다. 따라서 축방향 하중의 영향을 정량화 할 필요가 있으며, 또한 접합부의 주요 설계변수에 관한 검토가 요구되고 있다. 그러나

접합부에 대한 기존의 연구에서는 1층 교각 구조의 접합부를 L형 접합부로 모델화한 연구들이 주로 이루어져 왔다.

Okumura 등(1968)은 상자형 접합부의 역학적 모델을 이용한 응력분포와 전단지연 응력식을 제안하였다. Nakai 등(1992)은 상자단면 접합부의 붕괴형식에 대한 실험을 통하여 패널부 주면의 보 또는 기둥부재가 먼저 항복에 도달하여 붕괴하는 경우, 접합부의 강도와 변형성능의 측면에서 가장 불리한 붕괴형식이 됨을 제시하였다. 김영필(2002) 등은 원형기둥-상자형보 접합부의 실험을 통하여 강도 특성과 합리적 유효환산 길이 산정방법을 제시하였다.

1) 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수, 공학박사(hws@inha.ac.kr)
2) 학생회원, 인하대학교 대학원 토목공학과, 석사과정(suckbongf@hotmail.com)
3) 교신저자, 정회원, (주)유신코퍼레이션 구조부, 공학박사·토목구조기술사
(Tel. 02-6202-0570, Fax. 02-6202-0599, E-mail: feel75@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

빌딩구조의 T형 접합부에 대해서는 I형 단면 접합부의 기초 이론을 확립한 Beedle 등(1954)의 연구와 축방향 하중을 받는 H형 단면으로 이루어진 T형 접합부의 강도에 관한 실험과 이론적 검토를 수행한 Fielding과 Huang(1971)의 연구가 대표적이다. 2층 이상의 교각 구조에 적용되는 T형 상자단면 접합에 대해서는 Morita 등(森田, 1989)이 실험 및 해석을 통한 용접부 강도를 평가하고자 하였고, 보에 수직하중을 재하하여 접합부의 용접부 항복 및 변형에 관해 검토하였다. 그러나 이 연구에서는 용접부의 강도에 초점을 두었으므로 접합부의 역학적 모델과 축방향력의 영향을 명확히 제시되지 못한 문제점이 있다.

즉, 2층 이상의 교각 구조의 상자단면 T형 보-기둥 접합부의 이론적인 연구와 실험 및 해석 데이터가 거의 없으며, 축방향 하중의 영향 및 설계변수에 대한 연구 또한 거의 이루어지지 않았다. 따라서 2층 이상의 강재라멘교각의 도입을 위해서는 T형 상자단면 접합부의 거동특성과 합리적인 설계법의 정립이 시급하다 할 수 있다.

따라서, 이 연구에서는 T형 상자단면 보-기둥 접합부의 역학적 모델을 제시하고, 비선형 유한요소 해석을 통하여 축방향 하중이 접합부 강도에 미치는 영향을 검토 한다. 또한 설계변수 중 패널존의 등가 폭 두께비 파라메타 R_p 와 단면적비 S 의 강도에 대한 영향을 검토하며, 축방향 하중의 크기에 따른 접합부의 붕괴형식을 분류하고, 1층 교각구조의 접합부 강도와 비교함으로써 기둥에 작용하는 축방향 하중과 접합부 패널존 강도와의 관계를 규명하고자 한다. 이를 토대로 상자단면 접합부의 역학적 모델로 부터 유도된 이론적 항복강도식과 해석결과를 비교·검토함으로써 T형 접합부의 강도평가식을 제안하고자 한다.

2. 보-기둥 접합부

2.1 L형 보-기둥 접합부

황원섭(1997)은 1층 라멘교각의 접합부를 그림 1과 같은 L형 강재 상자단면 보-기둥 접합부로 모델화하여 강도를 평가하였다. L형 상자단면 접합부 부근의 보와 기둥부재에 작용하는 부재력인 휨모멘트와 수직하중은 각각 상하 플랜지를 통하여 접합부로 전달된다. 따라서, 보와 기둥의 상하 플랜지에 작용하는 휨과 축방향 하중을 조합하여 접합부의 작용력을 구하는 것으로 하고 있다. 이를 이용하여 보 및 기둥의 내·외측 플랜지에 작용하는 플랜지 집중력을 구할 수 있으며, 플랜지 집중력을 통해 상자단면 보-기둥 접합부에 발생하는 평균전단응력

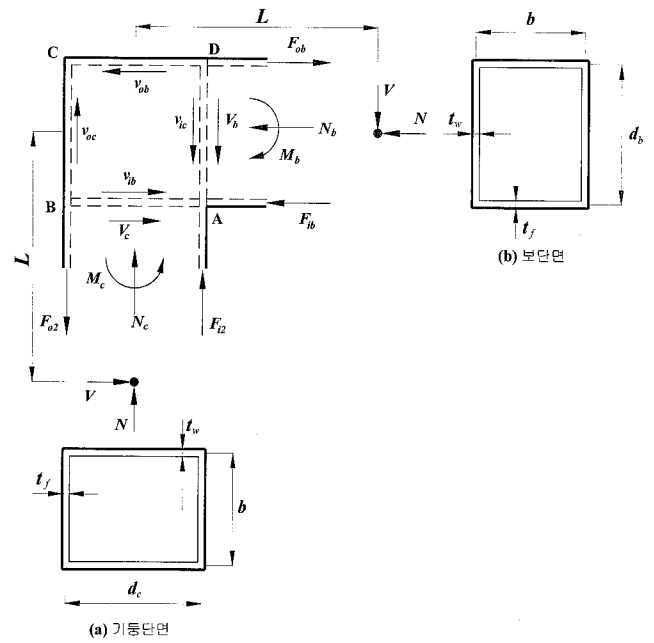


그림 1. L형 접합부의 작용단면력

v_{av} 는 다음식으로 주어진다.

$$v_{av} = \frac{V}{2d_b d_c t_w} \left(L - \frac{(d_b + d_c)}{2} \right) \quad (1)$$

그림 1에서 ABCD로 표시된 접합부 복부판을 패널존(panel zone)이라고 정의한다. 패널존은 평균전단응력 v_{av} 가 항복전단응력 $v_y (= f_y / \sqrt{3})$ 에 도달하게 되면 항복하게 되므로, 이 때의 항복전단력 $V_{y(v), P=0}$ 는 다음 식과 같다.

$$V_{y(v), P=0} = \frac{2f_y d_b d_c t_w}{\sqrt{3} (L - (d_b + d_c)/2)} \quad (2)$$

Nakai(中井, 1992)는 패널존에 작용하는 전단력과 플랜지에 작용하는 축방향 하중이 그림 1의 점 A에서 서로 평행을 이루게 되며, 패널존 항복 시 다음과 같은 평형조건식이 성립하게 됨을 제안하였다.

$$\frac{f_{av}}{f_y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{d t_w}{b t_f} \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} S \quad (3)$$

여기서, S : 단면적비(= $A_w/A_f = d \cdot t_w/b \cdot t_f$)

항복단면적비 S_y 는 $f_{av} = f_y$ 일 때의 단면적비를 말하며 S_y 는 식 (3)으로부터 다음 식으로 정의 된다.

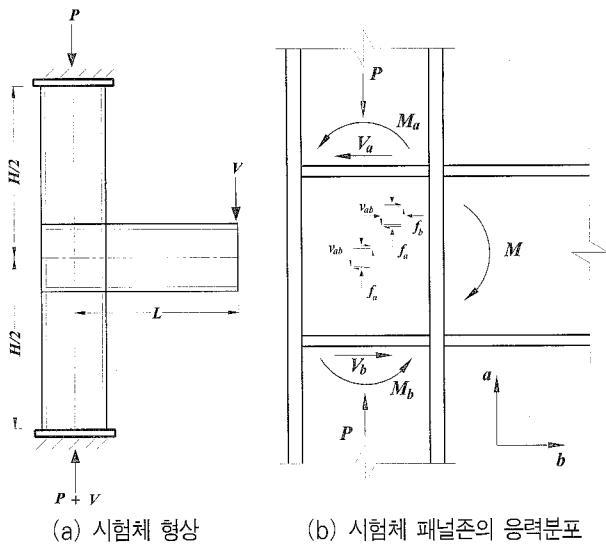


그림 2. T형 접합부

$$S_y = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

여기서, $S \leq S_y$ 의 범위에 있는 접합부는 극한상태에서 부재 일반부의 항복보다 패널존의 전단항복이 선행하게 된다는 것을 의미한다.

2.2 T형 보-기둥 접합부

T형 보-기둥 접합부 이론은 Huang 등(1971)의 연구가 대표적이라 할 수 있다. Huang 등은 그림 2(a)와 같은 I형 단면 T형 보-기둥 접합부에 대한 실험과 이론적인 접근을 통하여 강도평가식을 제시하였다. 축방향 하중 P 를 기둥의 항복하중 P_y 의 0.5배를 도입한 후, 보에 수직하중 V 을 재하하여 접합부의 항복과 변형에 관한 축방향하중의 영향을 검토하였다.

그림 2(b)에 나타낸 것과 같이 보의 수직하중에 의한 패널존의 평균전단응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{av} = \frac{1}{A_w} \left(\frac{M}{d_b} - V \right) \quad (5)$$

Von Mises의 항복기준으로부터 기둥에 작용하는 축방향하중의 영향을 고려할 수 있다. 최대 비틀림 에너지기준 이라고도 하는 이 기준은 주어진 재료의 비틀림 에너지 즉, 재료의 모양을 변화시키는 에너지에 기초를 두고 있다. 이 기준에 의하면 주어진 구조용 부재는 이 재료의 단위체적당 비틀림 에너지의 최대값이 같은 재료로 된 인장시험 시편에 항복을 일으키는데 필요한 단위체적당 비틀림 에너지 보다 작게 유지되는 한 안전하다. 그림 2(b)와 같이 패널존 $a-b$ 좌표계에서 임의의 점의 이

축응력상태에 대한 최대 비틀림에너지 기준은 다음과 같다.

$$f_a^2 - f_a f_b + f_b^2 + 3v_{ab}^2 = f_y^2 \quad (6)$$

패널존 중앙에서 $f_b = 0$ 이 되고, $f_a = P/A_c = (P/P_y)f_y$ 임을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{P}{P_y} \right)^2 + 3 \frac{v_{ab}^2}{f_y^2} = 1 \quad (7)$$

3. 해석모델

3.1 해석 모델의 제원

본 연구에서의 접합부 해석모델에 대한 단면제원을 표 1에 나타내었다. 그림 3은 T형 상자단면 보-기둥 접합부의 형상 및 하중 재하상태를 나타낸 것이다. 해석모델은 황원섭(1997)의 L형 상자단면 보-기둥 접합부 모델의 기둥부재를 연장하여 T형 상자단면 보-기둥 접합부 모델로 확장한 것이다. 모든 해석 모델은 패널존이 먼저 항복되는 모델이며, 기둥의 상·하부는 동일한 단면특성을 가진다. 해석에 있어서는 모델형상의 대칭성을 고려하여 단면의 1/2(half model)만을 해석대상으로 하였다. SS모델은 단면적비 S 에 관한 해석 모델이다. SS시리즈는 단면적비가 증가함에 따라 기둥의 단면적이 증가하면서 각 해석모델에 적용되는 축방향 하중의 크기가 증가한다. RP모델은 패널존의 폭-두께비 파라메타 R_p 에 관한 해석모델이다.

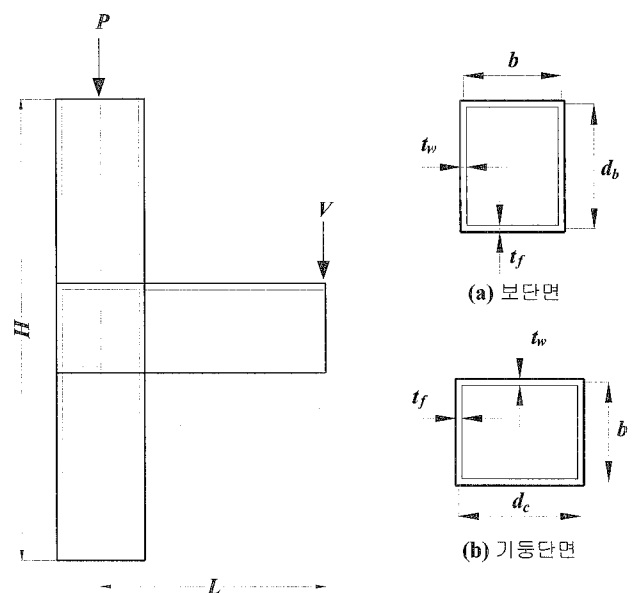


그림 3. T형 상자단면 보-기둥 접합부

표 1. 해석모델의 제원

Model	b (mm)	t _r (mm)	d _b (mm)	d _c (mm)	t _w (mm)	L (mm)	H (mm)	S/S _y	R _p	R _f
SS02	325.0		176	176	5.0			0.22	0.36	0.48
SS03	325.5		196	196	5.5			0.27	0.37	0.48
SS04	327.0		246	246	7.0			0.43	0.36	0.48
SS05	327.5	14	276	276	7.5	1200	2400	0.52	0.38	0.48
SS06	328.0		306	306	8.0			0.62	0.39	0.48
SS07	328.5		326	326	8.5			0.70	0.39	0.49
SS08	329.0		346	346	9.0			0.78	0.40	0.49
RP25	329.0		226	226	9.0			0.51	0.26	0.49
RP35	327.5		256	256	7.5			0.48	0.35	0.49
RP45	326.5	14	286	286	6.5	1200	2400	0.47	0.45	0.49
RP55	326.0		306	306	6.0			0.47	0.52	0.48
RP60	325.5		326	326	5.5			0.45	0.61	0.48

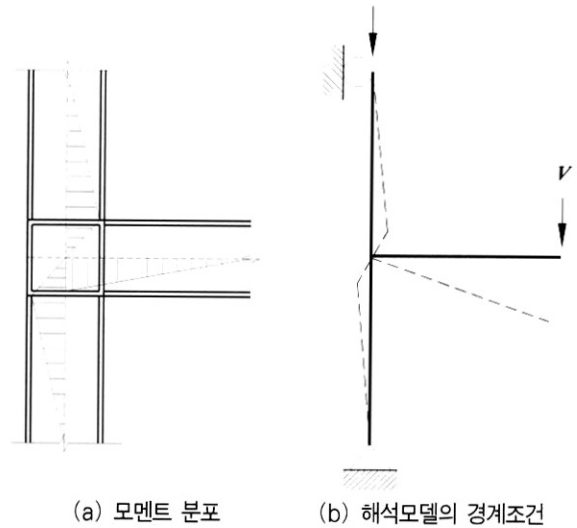
표기 예: SS 02 - 00
 — 축방향하중의 크기 : 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
 — S/S_y값 : 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
 — 모델명 : SS(단면적비 모델), RP(폭 두께비 파라메타 모델)

두 모델 모두 기둥부재에 작용하는 축방향 하중의 영향을 알아보기 위해 0.0P_y, 0.2P_y, 0.4P_y, 0.6P_y, 0.8P_y 크기의 축방향 하중을 작용시켰다. 한편, 플랜지의 폭 두께비 파라메타 R_f는 국부좌굴이 일어나지 않도록 0.7이하로 설정하였다.

3.2 해석 방법

해석에는 초기처짐과 잔류응력 등의 초기조건과 재료 및 기하학적 비선형을 고려할 수 있는 쉘 구조물 대상 구조해석프로그램인 CYNAS(Osaka Univ., 1997)를 사용하여 해석하였다. CYNAS는 Nishimura(西村 등, 1997)의 강재구식성이 적용되어 있고 변위증분과 하중증분의 방법으로 해석이 가능하다.

2층 이상의 라멘교각의 접합부에서 나타나는 모멘트는 그림 4(a)와 같다. 여기서 기둥의 모멘트가 0이 되는 지점을 기준으로 해서 모델을 작성하면 해석에 사용되는 경계조건은 그림 4(b)와 같다. 기둥 상단은 롤러 기둥 하단은 힌지이며 보의 재하부는 자유단으로 가정할 수 있다. 이는 구조물의 전체거동이 아닌 접합부의 국부적인 거동특성을 파악하기 위해 가정한 경계조건이다. 하중재하는 먼저 기둥 부재에 축력 P를 하중제어로 재하하였고, 보에 작용하는 수직하중 V를 변위제어로 도입하였다. 그림 5는 T형 상자단면 보-기둥 접합부의 8절점 아이소 파라메트릭 요소를 적용한 요소분할을 나타낸 것이다. 초기 처짐은 해석모델 전체에 sine파형으로 표현할 수 있으며, 부재 일반부 및 패널존의 임의 점에 대한 초기 처짐 ω는 다음과 같이 가정할 수 있다.



(a) 모멘트 분포 (b) 해석모델의 경계조건

그림 4. 라멘교각의 모멘트와 경계조건

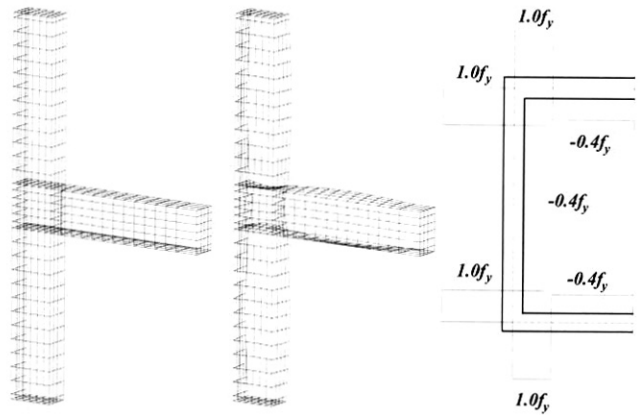


그림 5. 요소분할

그림 6. 초기처짐
형상

그림 7. 잔류응력 분포

$$\omega = \omega_o \times \sin \frac{\pi x}{a} \times \sin \frac{\pi y}{b} \tag{8-a}$$

$$\omega = \omega_o \times \sin \frac{\pi x}{a} \times \cos \frac{\pi y}{2b} \tag{8-b}$$

여기서, a : 각 부재의 길이
 b : 각 부재의 폭

최대 종방향 초기처짐 ω_o는 부재 일반부 및 패널존의 중앙부분에 대한 최대치를 b/1,000으로 가정하였다. 그림 6은 초기 처짐 형상을 나타낸 것이다. 또한 보와 기둥 모두에 적용되는 용접 잔류응력은 대해서는 그림 7과 같이 분포하는 것으로 가정하였고, 작용하는 인장축 잔류응력 f_{rt} = 1.0f_y, 압축축 잔류응력 f_{rc} = -0.4f_y로 가정하였다.

3.3 해석방법의 검증

해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 참고문헌(윤정방 등, 1996)의 시험체와 동일한 제원인 해석모델의 해석결과를 비교하였다. 표 2는 시험체의 단면제원을 나타낸 것이다. 시험체의 사용강종은 SM490이고, 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^5 MPa$ 항복응력 $f_y = 324 MPa$ 이다. 시험체의 $S = 0.56 (S/S_y = 0.65)$ 으로 황원섭(1997)이 패널존 항복이 선행하는 $S/S_y \leq 1.0$ 범위의 이내에 있다. 상·하 기둥대칭이며 보와 기둥의 상하 플랜지간 거리는 같다. 그림 8에서는 실험결과와 유한요소 해석결과를 비교하여 나타내었다. 축방향하중이 $0.2P_y$ 와 $0.4P_y$ 일 때의 해석결과를 보면 실험결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 해석결과 축방향 하중의 영향성이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 연구에 적용된 해석방법과 유한요소 모델은 타당성이 높은 것으로 판단된다.

표 2. 시험체의 단면제원

b (mm)	t_f (mm)	d_b (mm)	d_c (mm)	t_w (mm)	L (mm)	H (mm)	S	R_p	R_f
214	8	152	152	6	650	934	0.53	0.27	0.58

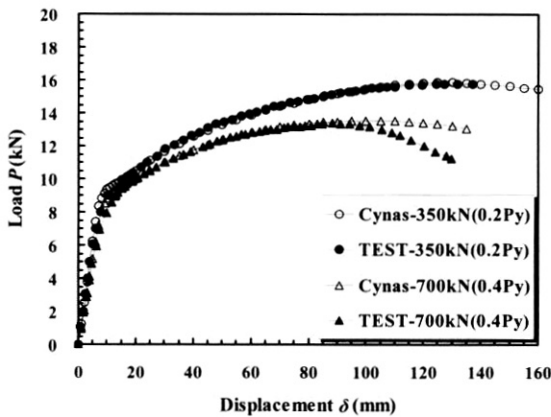


그림 8. 유한요소 해석결과와 실험결과와의 비교

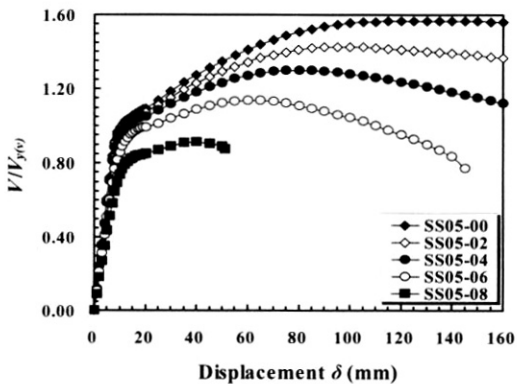


그림 9. 축방향하중에 따른 하중-변위 곡선(SS05)

4. 해석결과

4.1 축방향하중의 영향

그림 9와 그림 10은 SS05모델과 RP45모델의 축방향하중에 따른 하중-변위 곡선이다. 하중부분은 축방향하중을 고려하지 않은 식 (2)에 의한 이론 항복강도 $V_{y(v), P=0}$ 로 무차원화 해서 나타내었다. 그림 9와 그림 10은 일축압축하중이 기둥상단에 도입되었을 때 축방향하중 크기의 변화에 따른 영향을 나타내었다. 축방향하중이 $0.0P_y$ 에서 $0.4P_y$ 까지 변화하는 동안은 탄성기울기가 일정하게 유지되면서 항복강도와 극한강도의 감소를 나타내었다. 특히 $0.2P_y$ 의 축하중까지는 극한강도에 도달한 이후에도 안정적인 거동을 하였다.

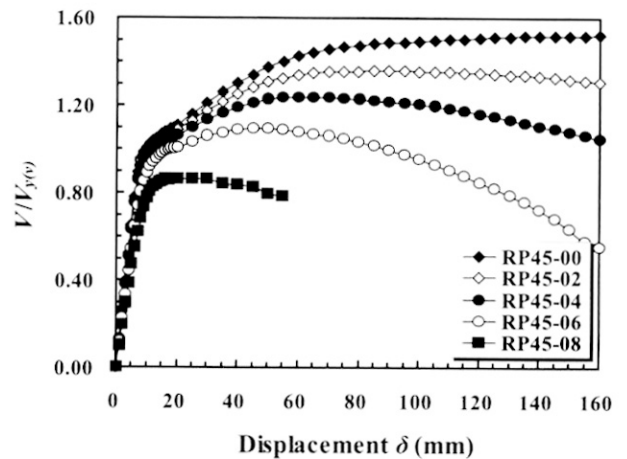


그림 10. 축방향하중에 따른 하중-변위 곡선(RP45)

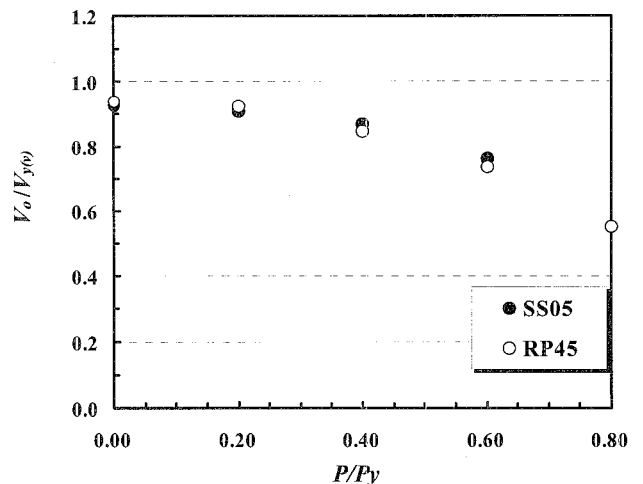


그림 11. 패널존 항복강도에 대한 축방향하중의 영향

그러나 축하중이 $0.4P_y$ 이상인 경우에는 극한강도 도달 이후 강도감소현상이 나타났다. 또한 $0.6P_y$ 와 $0.8P_y$ 에서는 탄성기울기가 변화하면서 항복강도 및 극한강도의 감소가 현저히 나타났다. 이는 SS05모델과 RP45모델뿐만 아니라 모든 모델에 걸쳐 축방향하중이 증가하면 항복강도와 극한강도는 감소하는 경향을 보인다.

그림 11은 SS05모델과 RP45모델로부터 해석을 통해 구한 항복강도를 패널존의 이론 항복강도 $V_{y(v)}$ 로 무차원화 하여 축방향하중의 크기에 따라 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 각각 단면적비 S 와 패널부의 등가 폭-두께비 파라메타 R_p 가 일정한 경우 기둥에 작용하는 축방향하중이 증가 할수록 패널부의 항복강도는 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 P/P_y 의 비가 0.4 이상이 되는 경우 항복강도의 감소폭이 현저히 증가하였다.

4.2 단면적비 S의 영향

단면적비에 관한 SS모델은 표 1에서 알 수 있듯이 R_p 와 R_f 를 고정시키고 단면적비를 변화시킨 모델이다. 다른 설계변수를 고정시키기 위해 t_w 와 d 를 이용하여 단면적비를 변화시켰다. 단면적비가 증가하면 보 및 기둥부재의 단면적이 증가하므로 강도와 직접적인 관계를 가진다. 그림 12는 단면적비에 따른 하중-변위 곡선을 나타냈다. 하중부분은 축방향하중을 고려하지 않은 이론 항복강도 $V_{y(v)}$ 로 무차원화해서 나타내었다. 단면적비의 증가함으로써 항복강도와 극한강도가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 축방향하중을 고려하지 않은 이론 항복강도 $V_{y(v)}$ 를 통해 무차원화 하여 축방향하중에 따른 단면적비의 영향을 그림 13에 나타내었다. 모든 모델에서 축방향하중의 영향에 의해 항복강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 함께 같은 축방향하중에서 단면적비의 증가함으로써 항복강도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 축방향하중은 물론 단면적비의 영향도 고려해 주어야함을 알 수 있다.

4.3 패널존의 등가 폭-두께비 파라메타 R_p 의 영향

패널존의 등가 폭-두께비 파라메타에 관한 RP모델은 S 와 R_f 를 고정시키고 등가 폭-두께비를 변화시킨 모델이다. 그림 14는 등가 폭-두께비 파라메타에 따른 하중-변위 곡선을 나타냈다. 하중부분은 축방향하중을 고려하지 않은 이론 항복강도 $V_{y(v)}$ 로 무차원화해서 나타내었다. R_p 가 증가함에 따라 $V/V_{y(v)}$ 는 항복강도에는 거의 영향이 없었으며, 극한강도에만 감소를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 앞절에 다룬 단면적

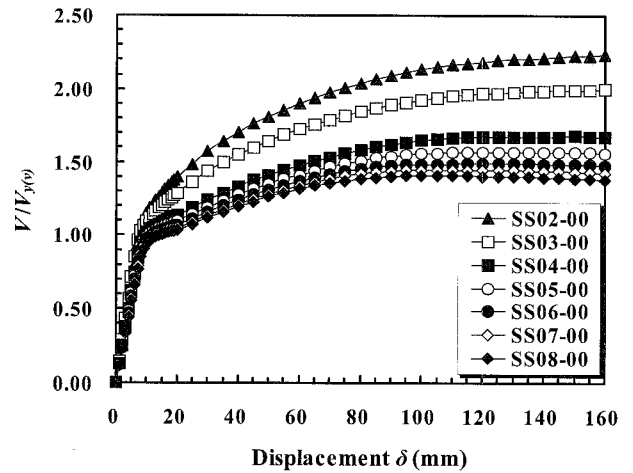


그림 12. 단면적비 S 에 따른 하중-변위 곡선

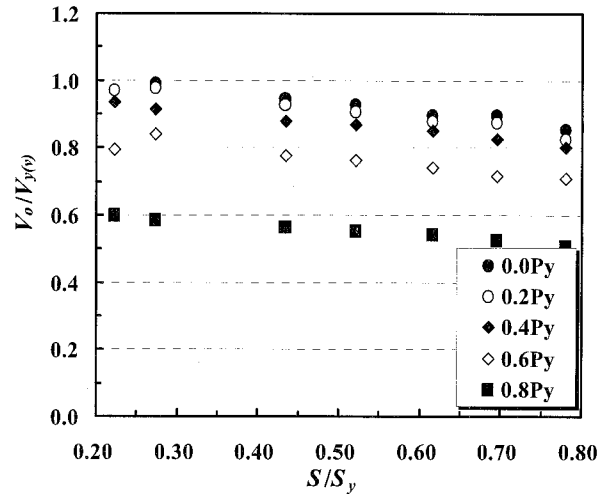


그림 13. 패널존 항복강도에 대한 단면적비의 영향

비와 같이 축방향하중을 고려하지 않은 $V_{y(v)}$ 에 대해 해석을 통해 구한 항복강도 V_o 를 무차원화하여 R_p 에 따라 나타내면 그림 15와 같다. 모든 RP모델에서 축방향하중의 영향에 의해 항복강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 단면적비 S 와는 달리 등가 폭-두께비 파라메타에 대한 영향은 나타나지 않음을 알 수 있었다.

5. 항복강도 평가

5.1 축방향 하중을 고려한 항복강도 평가

그림 16은 본 연구에서 적용한 해석조건들을 고려하여 가정한 T형 상자단면 접합부의 응력분포를 나타낸 것이다. Beedle 등의 연구에 의하면 라멘 접합부 부근의 보와 기둥부재의 휨모멘트와 수직하중은 각각 상하 플랜지를 통하여 접합부로 전달된다. 따라서 보와 기둥의 플랜지 집중력은 다음과 같이 정의 된다.

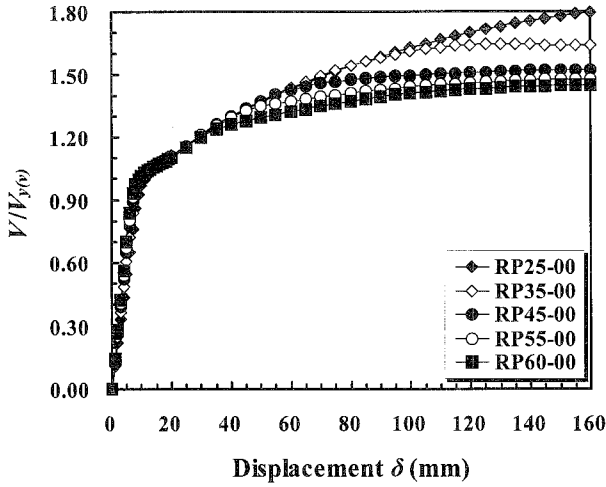


그림 14. R_p 에 따른 하중 변위 관계

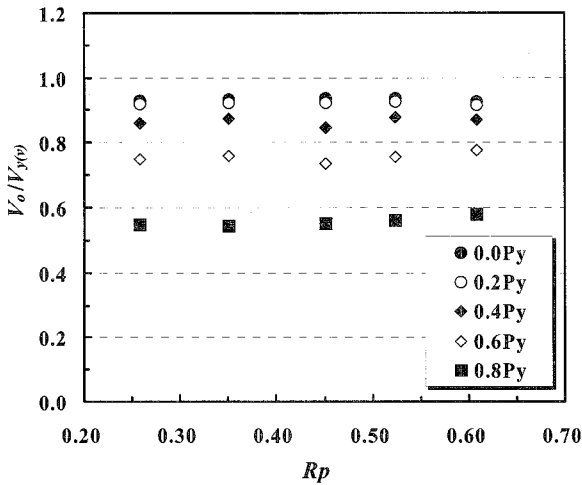


그림 15. 무차원 항복강도에 대한 R_p 영향

$$\begin{aligned}
 F_{o1} &= \frac{M_1}{d_b} = \frac{V_1}{d_b} \left(L - \frac{d_c}{2} \right) \\
 F_{i1} &= \frac{M_1}{d_b} = \frac{V_1}{d_b} \left(L - \frac{d_c}{2} \right) \\
 F_{o2} &= \frac{M_2}{d_c} - \frac{P + V_1}{2} = \frac{V_1}{2d_c} \left(L - \frac{d_b}{2} - d_c \right) - \frac{P}{2} \\
 F_{i2} &= \frac{M_2}{d_c} + \frac{P + V_1}{2} = \frac{V_1}{2d_c} \left(L - \frac{d_c}{2} + d_c \right) + \frac{P}{2} \\
 F_{o3} &= \frac{M_3}{d_c} + \frac{P}{2} = \frac{V_1}{2d_c} \left(L - \frac{d_c}{2} \right) + \frac{P}{2} \\
 F_{i3} &= \frac{M_3}{d_c} - \frac{P}{2} = \frac{V_1}{2d_c} \left(L - \frac{d_c}{2} \right) - \frac{P}{2}
 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $M_1 = V_1 \left(L - \frac{d_c}{2} \right)$, $M_2 = M_3 = \frac{V_1}{2} \left(L - \frac{d_b}{2} \right)$

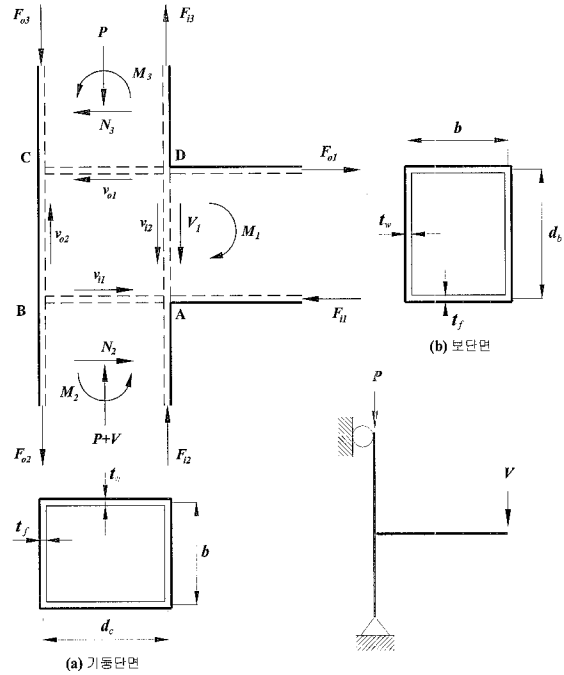


그림 16. T형 상자단면 접합부의 역학적 모델

따라서 패널존에 발생하는 전단응력들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 v_{o1} &= \frac{F_{o1} - N_3}{2d_c t_w} = \frac{V_1 (L - (d_b + d_c)/2)}{2d_b d_c t_w} \\
 v_{i1} &= \frac{F_{i1} - N_2}{2d_c t_w} = \frac{V_1 (L - (d_b + d_c)/2)}{2d_b d_c t_w} \\
 v_{o2} &= \frac{F_{o2} + F_{o3}}{2d_b t_w} = \frac{V_1 (L - (d_b + d_c)/2)}{2d_b d_c t_w} \\
 v_{i2} &= \frac{F_{i2} + F_{i3} - V_1}{2d_b t_w} = \frac{V_1 (L - (d_b + d_c)/2)}{2d_b d_c t_w}
 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (7)을 도입하고, 패널존이 전단응력에 의해 항복하는 휨 모멘트 $M_v (= V_1 (L - d_c/2))$ 를 식 (6)에 $v = v_{o1} = v_{i1} = v_{o2} = v_{i2}$ 의 관계를 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$M_v = \frac{2f_y d_b d_c t_w (L - d_c/2)}{\sqrt{3} (L - (d_b + d_c)/2)} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^2} \quad (11)$$

결과적으로 패널존의 전단항복에 대한 보의 집중하중 V_y 는 식 (8)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{y(v)} = \frac{2f_y d_b d_c t_w}{\sqrt{3} (L - (d_b + d_c)/2)} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^2} \quad (12)$$

식 (12)를 축방향 하중을 고려하지 않은 식 (2)로 무차원화 하여 나타내면 다음식이 구해진다.

$$\frac{V_{y(v), P=0}}{V_{y(v)}} = \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_y}\right)^2} \quad (13)$$

4장에서 구한 축방향하중에 따른 SS모델과 RP모델의 해석 결과를 축방향하중을 고려하지 않은 식 (2)에 의한 이론 항복강도 V_{oy} 로 무차원화 하여 그림 17과 그림 18에 나타내었다. 두 모델에서 모두 이론에 의한 항복강도는 해석에 의한 항복강도와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 축방향하중의 영향이 식 (12)에서 충분히 고려되었음을 알 수 있다. 따라서 축방향하중을 고려한 항복강도식은 매우 타당성이 높은 것으로 판단되며, 식 (12)로 축방향 하중에 관한 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

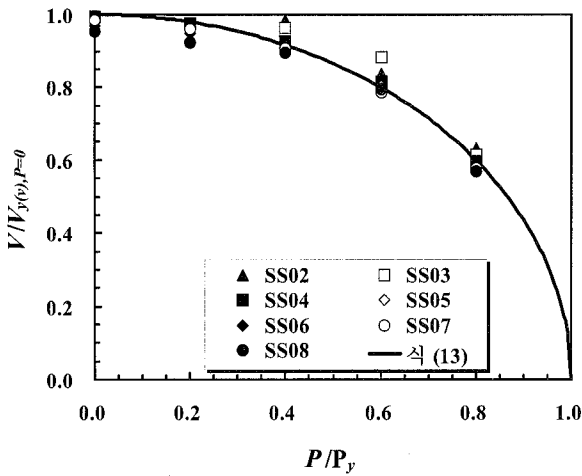


그림 17. 축방향하중과 패널존 항복강도와의 관계(SS모델)

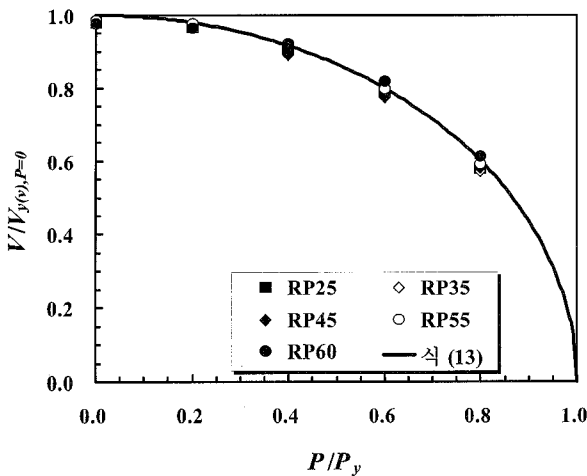


그림 18. 축방향하중과 패널존 항복강도와의 관계(RP모델)

5.2 단면적비를 고려한 항복강도 평가

4.2절에서 다룬 SS모델의 해석결과를 축방향하중을 고려한 이론항복강도 V_y (식 (12))를 이용해 무차원화 하여 항복강도를 나타내면 그림 19와 같다. 여기서 나타난 바와 같이 축방향하중을 고려한 패널존의 항복강도비 V_o/V_y 는 단면적비가 증가함에 따라 서서히 감소하고 있음을 볼 수 있다.

한편, 황원섭(1997)은 단면적비 S 의 영향을 고려한 강도감소계수를 η_s 라 하고 η_s 는 식 (14)와 같이 제안한 바 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_y} = \eta_s &= 0.95 : S/S_y \leq 0.5 \\ &= 0.95 - 0.20(S/S_y - 0.5) \\ & : 0.5 < S/S_y \leq 1.0 \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 단면적비에 의한 영향만을 고려한 패널부의 항복강도 V_{ys} 는 다음 식으로 구하는 것으로 하였다.

$$V_{ys} = \eta_s \cdot V_y \quad (15)$$

그림 20은 식 (14)의 결과와 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 축방향하중과 식 (14)에 의한 단면적비의 영향을 고려한 패널존의 V_o/V_{ys} 비가 1.0에 가까운 값을 가지므로 단면적비 S 가 적절히 평가된 것으로 판단된다.

이와 같이 T형 접합부 강도의 단면적비 S 에 대한 영향은 L형 접합부에 대해 제시된 황원섭의 강도감소계수 η_s 를 동일하게 도입하여 평가할 수 있다.

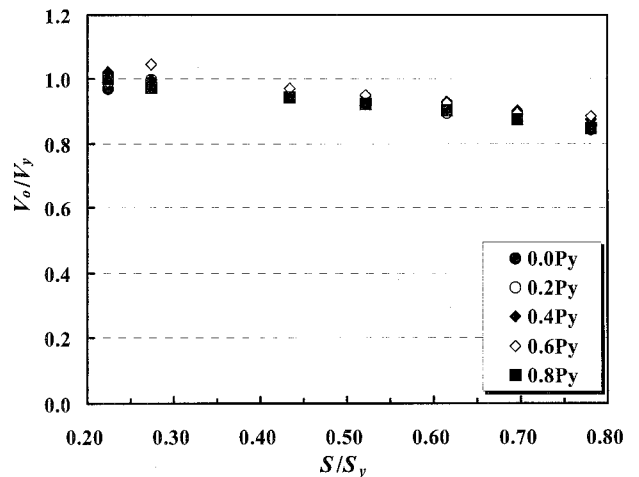


그림 19. 축방향하중의 영향을 고려한 V_y 에 의한 무차원 항복강도에 대한 단면적비의 영향

5.3 폭-두께비 파라메타 R_p 의 고려

그림 21은 RP모델을 단면적비 영향을 고려하여 V_{ys} 를 적용하여 나타내었다. 그 결과 RP모델 모두 단면적비 S 의 영향을 고려하여 V_o/V_{ys} 의 비가 일정한 값을 나타내고 있다. 그림 22는 폭-두께비 파라메타 R_p 에 대한 영향을 L형 접합부와 T형 접합부에 대해 각각 나타낸 것이다. L형 접합부의 경우는 $R_p > 0.4$ 일 때 R_p 가 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 반면 T형 접합부의 경우는 R_p 에 대한 영향이 나타나지 않았다. 이는 축방향 하중을 받는 T형 접합부 패널존의 거동은 휨과 전단 거동을 동시에 나타내기 때문에 L형 접합부의 패널존과 같이 순수 전단을 발생시키지 않는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 그림 23의 접합부 해석결과에 나타난 변형형상에서도 접합부의 보 와 기둥 부재가 휨에 의한 변형정도가 대칭적이지 않기 때문에 순수전단의 발생 가능성이 매우 낮아진다. 따라서 T형 접합부에 대해서는 R_p 의 영향을 강도 평가식에 반영하지 않는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

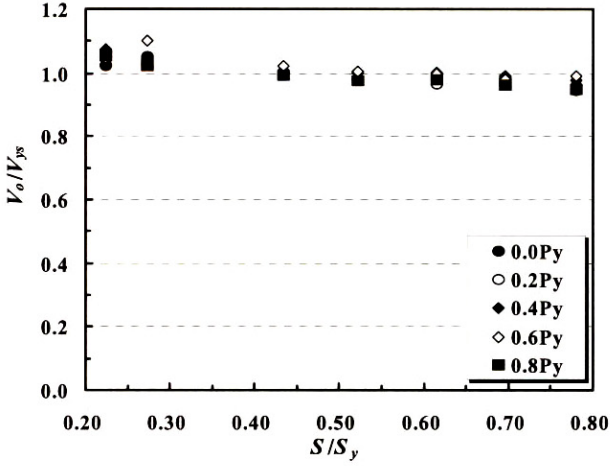


그림 20. $(V_o/V_{ys})-(S/S_y)$ 의 관계

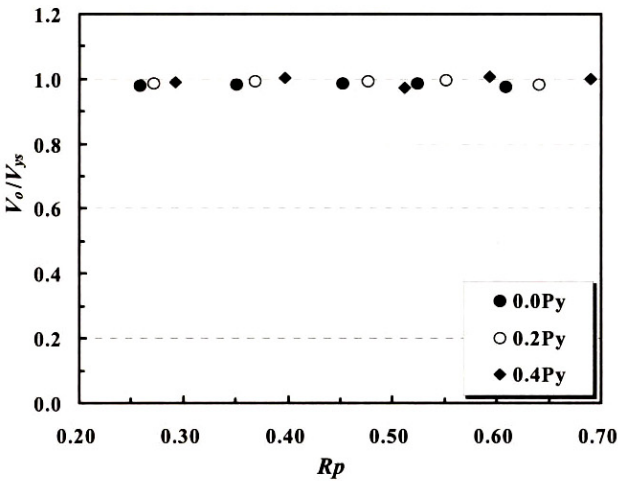


그림 21. $(V_o/V_{ys})-R_p$ 의 상관관계

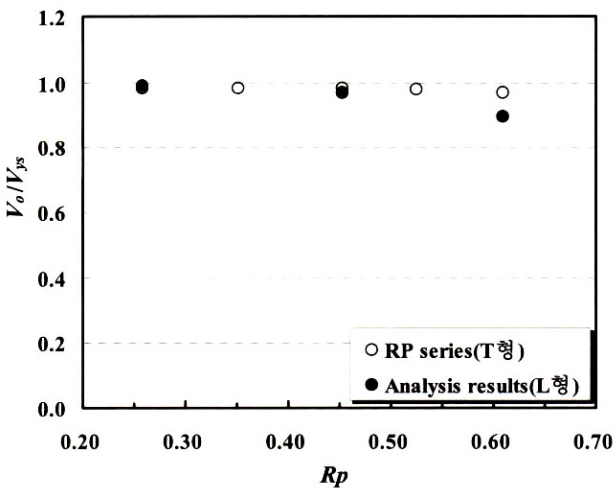


그림 22. 패널존의 폭-두께비 파라메타 R_p 의 영향 비교

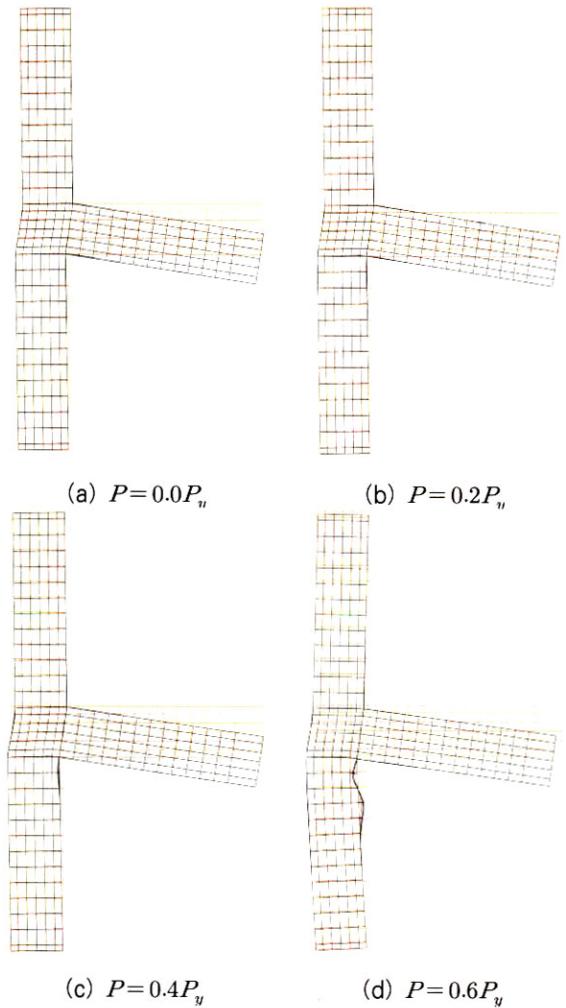


그림 23. 축력에 따른 변형형상

표 3. 축방향 하중에 따른 항복형식 분류

P/P_y	0.0~0.30	0.4~0.8	0.9~1.0
조건	$M_{y(v)} < M_{yb(f)} < M_{yc(f)}$	$M_{y(v)} < M_{yc(f)} < M_{yb(f)}$	$M_{yc(f)} < M_{y(v)} < M_{yb(f)}$
항복형식	패널존-보 플랜지 좌굴형식	패널존-기둥 플랜지 좌굴형식	기둥 플랜지 좌굴형식

5.4 항복형식의 분류

축방향하중의 증가는 패널존의 강도와 기둥플랜지의 강도에 직접적인 영향을 준다. 패널존은 보의 집중하중에 의한 순수전단과 일축압축력을 동시에 받게 되며, 기둥 플랜지는 직접적인 축방향하중을 받게 된다. 결국 축방향하중이 증가함에 따라 보의 집중하중에 의한 휨에 의한 파괴가 축방향력에 의한 기둥 플랜지의 압축파괴가 나타나게 된다. 축방향 하중이 $0.4P_y$ 를 초과하게 되면 기둥부재의 항복모멘트 $M_{yc(f)}$ 가 보의 항복모멘트 $M_{yb(f)}$ 보다 작아져 패널존 항복이후 기둥 플랜지좌굴 형태를 나타낸다. 항복형식의 분류를 정리하여 나타내면 표 3과 같이 나타낼 수 있다. 축방향하중의 크기에 따른 항복형식의 이론적-해석적 검토를 통한 분류는 접합부의 위험단면의 예측과 2차부재의 설계 시 편리하게 사용될 것으로 판단된다.

SS05모델의 축방향하중이 $0.0P_y, 0.2P_y, 0.4P_y, 0.6P_y$ 일 때의 좌굴형상을 그림 23에 각각 나타내었다. 모두 패널존의 전단항복형태를 나타내었으며, 축방향하중이 $0.2P_y$ 까지는 보의 하부플랜지의 변형이 발생하다가 축방향하중이 $0.4P_y$ 를 초과하게 되면 기둥의 플랜지의 변형이 현저하게 나타난다. 이는 위에서 이론적으로 구한 항복형식과 잘 일치하고 있다.

6. 결론

이 연구는 축방향 하중을 받는 강재 라멘교각 접합부의 강도에 관한 것이다. 대상 구조물을 T형 상자단면 보-기둥 접합부로 모델화하여 접합부 패널존의 강도특성에 관한 이론식을 유도하였고 축방향 하중 및 여러 설계변수들의 영향을 유한요소 해석을 통하여 검토하였다. 접합부의 주요 설계변수에 따른 강도특성으로부터 T형 접합부의 강도를 평가한 것이다. 이 연구에서 얻은 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 축방향 하중을 고려한 해석모델의 해석결과를 실험결과와의 비교를 통해서 타당성을 검증하였다.
- (2) 축방향 하중을 받는 접합부의 항복강도 이론식을 유도하

여 식 (12)와 같이 제시하였다.

- (3) 축방향 하중이 증가하면 항복강도와 극한강도 모두 일정한 감소를 나타냄을 확인하였다. 축방향 하중을 고려한 항복강도 평가식을 식 (13)과 같이 제시하였다.
- (4) 단면적비 S 에 따른 항복강도의 감소는 L형 접합부와 동일한 경향을 나타내었다. 따라서 단면적비 S 의 변화를 고려한 항복강도는 기존의 L형 접합부에 제시된 η_s 를 T형 접합부에도 동일하게 적용할 수 있음을 확인하였다.
- (5) T형 접합부에서는 보와 기둥 부재의 휨변형이 대칭으로 발생하지 않음으로 인하여 폭-두께비 파라메타 R_p 에 따른 접합부 강도에 대한 영향은 거의 나타나지 않았다.
- (6) 상자단면 보-기둥 접합부의 항복형식은 축방향하중의 크기에 따라 패널존-보플랜지 좌굴형식, 패널존-기둥플랜지 좌굴형식, 기둥플랜지 좌굴형식의 세 가지로 분류할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 교량핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

김영필, 최원경, 황민오, 황원섭 (2001) 원형기둥-상자형보 접합부의 실험, 대한토목학회논문집, Vol.22, No.2-A, pp. 403-412.

윤정방, 황원섭, 정우정, 강재라멘교각의 우각부 특성실험 (1996), 대한토목학회 학술발표회논문집, pp. 529~532.

황원섭(1997), Box 단면 접합부의 Panel Zone 거동특성, 한국강구조학회논문집, 제9권, 4호, pp.683~695.

황원섭, 김영필(1998), 강재라멘교각 접합부의 응력 평가법”, 한국강구조학회논문집, 제10권, 3호, pp.327~338.

Bloom, F. and Coffin, D. (2001), *Handbook of Thin Plate Buckling and Post-buckling*, CHAPMAN & HALL/CRC.

Huang, J. S. and Fielding, BY. D. J (1971), "Shear in Steel Beam-to-Column Connections", *Welding Research Supplement*, July, pp.313~326.

Beedle, L.S. and Johnson, B.G. (1951), "Connection for Welded Continuous Portal Frames", *Welding J*, Vol. 30, pp.359~384.

Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1987), *Theory of Elastic Stability*, McGRAW-HILL.

奥村敏恵, 石澤成夫, 薄板構造ラーメン隅角部の應力計算について, 日本土木學會論文集, 第153號, pp.1~17.

中井 博, 河井章好, 吉川 紀, 北田俊行, 酒造敏廣, 鋼製ラーメン橋脚實績照査,(上)·(下), 橋梁と基礎, Vol.16, 17, 1982, pp.35~40, pp.43~49.
 森田耕次, 江波戸和正, 舟橋明之, 小南忠義, 里見孝之(1989), “箱形断面柱のかど溶接を部分溶込み溶接とした柱はり接合部の力學的舉動に關する研究”, 日本建築學會構造系論文報告集第397号, pp.48~59.
 黃元燮, 西村宜男, 高津秀俊(1994), 鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と變形能に關する研究, 日本構造工學論文集, Vol40A, pp.201~214.
 中井 博, 酒造敏廣(1992), せん断遅れ現象を考慮した鋼製ラーメン隅角部の限界狀態設計法について, 日本土木學會論文集, No.455, pp.951~1104.

부록. SYMBOLS

v_{av} : 평균전단응력
 v_y : 항복전단응력
 f_{av} : 플랜지의 평균 수직응력
 f_y : 항복응력
 f_a, f_b : a, b축에 관한 수직응력
 f_{rt}, f_{rc} : 인장 및 압축 잔류응력
 v_{ab} : a-b 직교좌표계에서의 전단응력
 v_{o1}, v_{i1} : T형 접합부 보 외측과 내측의 전단응력
 N : 재하된 축방향 하중(강도)
 N_b, N_c : 보 및 기둥 부재의 축력
 M_b, M_c : 보 및 기둥 부재의 휨모멘트
 M : 수직력 V 에 의해 발생하는 휨모멘트
 V_b, V_c : 보 및 기둥 부재의 전단력
 V : 보부재에 재하되는 수직방향 하중(강도)
 $V_{y(v)}$: 접합부의 강도
 $V_{y(v), P=0}$: 축방향력이 작용치 않을 때 접합부 강도

V_y : 축방향력을 고려한 접합부 강도
 V_o : 해석에서의 하중-변위관계로부터 산정한 항복강도
 V_{ys} : 패널부의 항복강도
 P : 기둥부재에 재하된 축방향 하중(강도)
 P_y : 기둥부재의 축방향 항복하중
 F_{ob}, F_{ib} : L형 접합부 보 외측 및 내측 플랜지 집중력
 F_{oc}, F_{ic} : L형 접합부 기둥 외측 및 내측 플랜지 집중력
 F_{o1}, F_{i1} : T형 접합부 보 외측 및 내측의 플랜지 집중력
 F_{o2}, F_{i2} : T형 접합부 상부 기둥 외·내측의 플랜지 집중력
 F_{o3}, F_{i3} : T형 접합부 하부 기둥 외·내측의 플랜지 집중력
 $M_{yc(f)}, M_{yb(f)}$: 기둥 및 보 부재 수직응력에 관한 항복모멘트
 M_v : 패널존 전단에 관한 항복 휨모멘트
 d : 부재의 높이
 d_b, d_c : 보 및 기둥부재의 높이
 t_w : 복부판의 두께
 b : 보 및 기둥부재의 폭
 L : V 의 작용점에서 기둥단면의 도심까지의 거리
 H : T형 접합부 기둥의 높이
 A_w : 복부판의 단면적
 A_f : 플랜지의 단면적
 S : 단면적비(= A_w/A_f)
 S_y : 항복단면적비
 R_p : 패널존의 폭-두께비 파라메타
 R_f : 플랜지의 폭-두께비 파라메타
 w : 구성판의 면외 초기처짐
 w_o : 최대 초기처짐량
 x, y : 구성판의 면내 좌표
 η_s : 단면적비 S 의 영향을 고려한 강도감소계수

(접수일자 : 2006. 9. 14 / 심사일 2006. 11. 6 /
 심사완료일 2006. 12. 28)