

# 지관이 회전되고 주관 웹 보강한 각형강관 T형 접합부의 거동에 관한 연구

The behavior of branch-rotated and chord web-stiffened  
T-joints in Cold-formed Square Hollow Sections

박 금 성<sup>1)</sup> · 배 규 웅<sup>2)</sup> · 정 상 민<sup>3)</sup> · 강 석 규<sup>4)</sup> · 문 태 섭<sup>5)</sup>  
*Park, Keum Sung · Bae, Kyu Woong · Jeong, Sang Min · Kang, SeokGyu · Moon, Tae Sup*

**요 약 :** 본 논문은 냉간성형 각형강관 T형 접합부의 최대내력에 관한 실험 연구이다. 새로운 접합부로 지관을 트러스 평면에 대해 45°회전시켜서 주관에 용접하고 주관 웹 측면에는 플레이트로 보강한 형상을 연구 대상으로 설정하였다.  $16.7 \leq 2v(B/T) \leq 33.3$ 이고  $0.63 \leq \beta(b_1/B) \leq 0.7$  범위의 지관 45°회전시킨 T형 접합부에 대하여, 기존 최대내력식과의 비교·검토를 통하여 웹 측면 보강에 따른 내력증대 및 파괴모드의 변화 등에 대하여 실험을 통해 조사하고자 한다. 실험결과, 보강판 두께 증가에 따라 보강 실험체의 접합부 내력이 상승하는 것으로 나타났다.  $2v=33.3$ 이고 플레이트로 웹 보강한 실험체는 접합부 파괴모드가 플랜지 파괴(M2)에서 복합파괴(M3) 형태로 전환되었으며,  $2v=16.7$ 이고 플레이트로 웹 보강한 실험체에서는 웹파괴(M1)에서 플랜지파괴(M2)로 지배 파괴모드가 변화하는 것으로 나타났다.

**ABSTRACT :** This paper describes the experiment that determines the ultimate strength of new uniplanar T-joints made of cold-formed square hollow sections. The new T-joint focused on the configuration of a branch member that is oriented 45 degrees to the plane of the truss and welded to the chord member whose web is stiffened with plate. The strength and failure mode are examined using the existing strength formula for the branch-rotated T-joint ( $16.7 \leq 2v(B/T) \leq 33.3$  and  $0.63 \leq \beta(b_1/B) \leq 0.7$ ). The test result shows that the capacity of the stiffened joint increases with thicker stiffening plate. The failure mode of the specimen ( $2v=33.3$ ) is stiffened with plate changes from M2 (flange failure) to M3 (combined failure). On the other hand, the failure mode of the specimen ( $2v=16.7$ ) is stiffened with plate changes from M1 (web failure) to M2 (flange failure)

**핵 심 용 어 :** 주관 웹 보강, 보강판 폭, 보강판 두께, 지관회전형, T형 접합부, 최대내력

**KEYWORDS :** chord web-stiffened, stiffening plate width, stiffening plate thickness, the branch-rotated, T-joint, ultimate strength

## 1. 서 론

본 논문은 지난번 보고(배규웅, 2002~2003)에 이은 추가 실험연구로서, 전회의 보고에서는 냉간성형 각형강관으로 제작된 단일평면상에서 지관만을 45°회전시킨 T형 접합부에서 접합부의 파괴모드가 각각 주관 플랜지면 파괴와 웹 파괴가 지배하는 대상을 설정하여 실험결과 분석과 이론해석 연구를

수행하였다. 그 결과 주관과 지관의 폭비( $\beta$ )에 따른 파괴모드 별로 접합부의 최대내력 정의를 위한 변형제한치를 제안하였다. 또한, 항복선이론과 기둥좌굴이론(Timoshenko, 1961)에 기초하여 기존의 제안 내력식과의 비교·검토를 통하여 지관 45°회전형(배규웅, 2002~2003) 접합부의 최대내력 예측식을 제안한 바 있다.

그러나 본 연구진이 제안한 내력식은 실험결과가 부족하여

- 1) 정희원, 한국건설기술연구원, 연구원, 공학석사  
(Tel:031-910-0370, Fax:031-910-0361, email:kspark1@kict.re.kr)
- 2) 정희원, 한국건설기술연구원, 수석연구원, 공학박사(email:kwbae@kict.re.kr)
- 3) 정희원, 한진중공업, 과장, 공학석사(email:smjeong@hanjinsc.com)
- 4) 정희원, (주)상원구조, 소장, 건축구조기술사(email:swsec@chollian.net)
- 5) 정희원, 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사(email:bluemoon@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

실험결과에 의한 회기분석보다는 지관이 회전하지 않은 기본형에 대한 CIDECT(CIDECT,1986) 모델을 수정하여 지관 45°회전형의 내력식에 제안되었기 때문에 추가적인 실험연구를 통해 보다 정확한 회기분석을 위한 자료를 제공하고자 한다.

일반 트러스에서 인장력이나 압축력이 지관에 작용할 경우, 접합부의 내력은 주관면의 플랜지 파괴와 좌굴에 의한 측벽 파괴에 의해 지배된다. 주관면의 플랜지파괴( $\beta \leq 0.85$ )일 때 접합부의 내력 증대는 상부 플랜지면에 플레이트를 보강하여 증가시킬 수 있다. 또한, 주관 웹파괴( $\beta = 1.0$ )인 경우 접합부 내력은 주관 웹면에 한쌍의 플레이트를 보강하여 증대시킬 수 있다. 이와 같이 트러스 접합부의 내력이 부족할 때 덧판으로 보강(Packer,1992)한 경우에 전체 트러스 변형과 접합부의 응력집중을 방지하는 효과가 있을 뿐만 아니라 웹재의 응력분포가 일정하게 되도록 하는 역할도 한다. 그러나, 이와 같이 접합부의 내력증대를 위해 주관 측벽면에 덧판을 이용하여 보강하고 단지 지관만을 45°회전시키는 접합부에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 냉간성형 각형강관으로 제작된 T형 접합부에서 지관만을 45°회전시킨 접합부로 주관 웹 파괴모드가 지배하는 접합부에 주관 웹 측면을 덧판으로 보강한 형상을 연구의 대상으로 설정하였다. 본 연구에서는 이미 보고되어 제안된 지관 45°회전형 접합부(배규용,2003)의 최대 내력 예측식 및 기존 내력식과 비교·검토하여 접합부의 웹 측면 보강에 따른 내력증대 및 파괴모드 변화 등에 대해 실험을 통하여 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체 형상 및 치수

본 연구의 대상 실험체는 지난 보고(배규용, 2002~2003)의 실험체와 같은 형상과 주관 웹 측면 보강한 형태의 지관 45°회전형 접합부 실험체이다. 그림 1과 표 1에서 보는바와 같이 주관과 지관의 길이는 폭의 3배로 설정하여 주관의 휨에 의한 영향 및 지관의 세장효과를 배제하였다. 또한, 주관의 폭 두께비( $2v$ )에 따라 3종류, 주관 웹 측면에 보강한 보강판 두께( $t_{pl}$ )에 따라 3종류, 보강판의 폭( $b_{pl}$ )을 지관의 크기에 따라 4가지로 구분하여 총 12개의 실험체를 계획하였다. 그리고 보강판의 높이( $h_{pl}$ )는 각형강관 제작시 발생하는 강관 코너부의 곡률을 배제한 강관의 평판부만을 고려하였다. 이는 기존 주관 웹의 내력식에서 이러한 곡률부분을 고려한 폭과 높이를 갖는 압축재로 치환하여 내력식이 제안되었기 때문에 이를 반영하였다. 표 1에서  $\beta = 0.63$ 인 지관 45°회전형 접합부에서의 주관 플랜지 파괴모드 한계치인  $\beta = 0.6$ 은 기본형의 접합부에서  $\beta$ 가  $0.85 (= 0.6 \times \sqrt{2})$ 인 경우에 해당한다.

실험체 형상은 그림 1과 같고, 웹 보강 유무에 따른 지관 45°회전시킨 T형 접합부에 대한 실험체 일람은 표 1에 나타내었다.

표 1. 지관회전형 T형 접합부 실험체 일람

실험체명	주 관		지 관		$\beta$ ( $b_1/B$ )	$\sqrt{2}\beta$	보강판 폭 $b_{pl}$ (mm)	보강판 두께 $t_{pl}$ (mm)	보강판 높이 $h_{pl}$ (mm)
	단면크기 ( $B \times H \times T$ )	$2v$ ( $B/T$ )	단면크기 ( $b_1 \times h_1 \times t_1$ )	$b_1/t_1$					
TPA <sup>1</sup> 6	200×200 ×6	33.3	125×125×6	20.8	0.63	0.88	-	-	-
TPA <sup>1</sup> 6-W0606							0.6 $b_1$	6mm	176
TPA <sup>1</sup> 6-W0806							0.8 $b_1$	6mm	176
TPA <sup>1</sup> 6-W0809							0.8 $b_1$	9mm	176
TPA <sup>1</sup> 6-W1006							1.0 $b_1$	6mm	176
TPA <sup>1</sup> 6-W1206							1.2 $b_1$	6mm	176
TPA <sup>4</sup>	200×200 ×9	22.2	134×134×6	22.3	0.67	0.95	-	-	-
TPA <sup>5</sup>			140×140×6	23.3	0.70	1.00	-	-	-
TPD1			134×134×12	11.2	0.67	0.95	-	-	-
TPD2	200×200 ×12	16.7	140×140×12	11.7	0.70	1.00	-	-	-
TPC <sup>1</sup> 6			125×125×12	10.4	0.63	0.88	-	-	-
TPC <sup>1</sup> 6-W0812			125×125×12	10.4	0.63	0.88	0.8 $b_1$	12mm	152

T : T형, P : 지관회전

A : ( $2v = 33.3 - 150 \times 6$ ), A<sup>1</sup> : ( $2v = 33.3 - 200 \times 6$ ), C : ( $2v = 16.7 - 150 \times 9$ ), C<sup>1</sup> : ( $2v = 16.7 - 200 \times 12$ ), D : ( $2v = 22.2 - 200 \times 9$ )

4' : 지관크기(134×6), 4 : 지관크기(100×6), 5' : 지관크기(140×6), 5 : 지관크기(105×6),

W(00/00) : web(00-보강판 폭 / 00-보강판 두께)

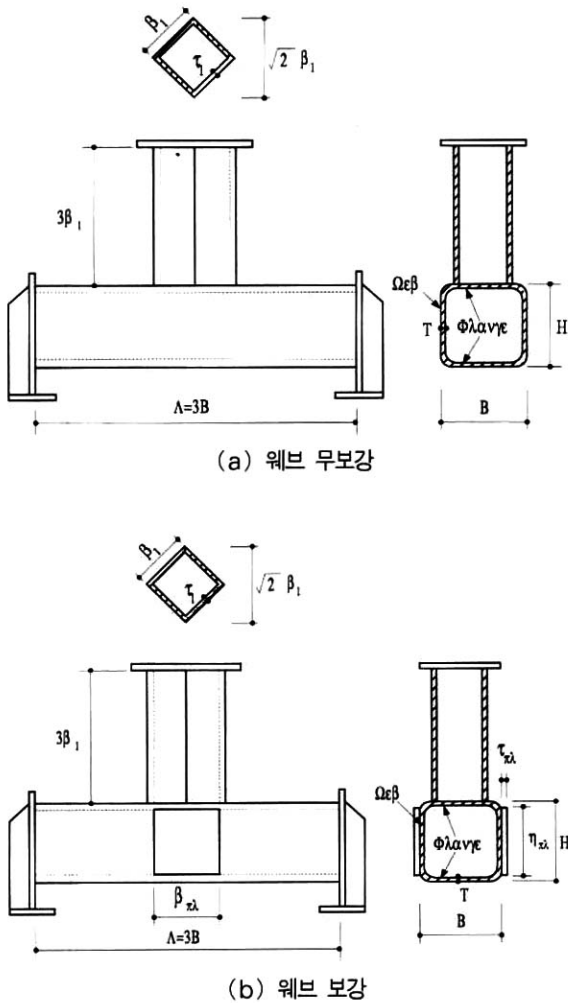


그림 1. 45°회전형 접합부 실험체 형상

표 2. 강재 인장강도 시험 결과

제 원	$\sigma_y$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y/\sigma_u$	$\epsilon_y$ ( $\times 10^{-6}$ )	E (tf/cm <sup>2</sup> )	Elo. (%)
200×6	3.71	4.39	0.85	1946	1906	28
200×9	3.99	4.76	0.84	2192	1820	31
200×12	4.00	4.77	0.84	2101	1904	33

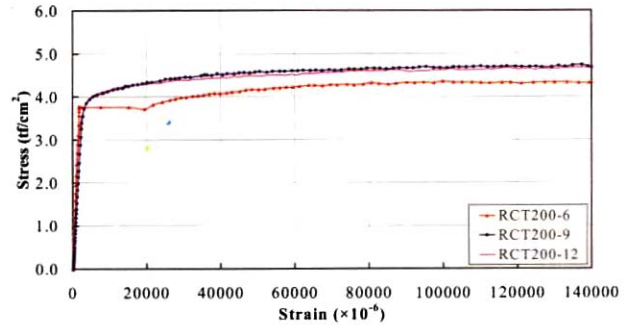


그림 2. 강재의 응력도-변형도 관계 곡선

### 2.2.2 강관 단주압축(Stub Column)시험

냉간성형 각형강관의 소성가공에 의한 잔류응력의 영향을 파악하기 위하여 각형강관으로부터 시험편을 절취하여 단주압축(Stub Column)실험을 실시한다. 시험체 길이는 휨 좌굴 영향을 받지 않고 파괴되도록 단면폭의 3배로 계획하고 각형강관 크기에 따라 각각 3개씩 제작하였다. 시험체의 중앙부 4면에 W.S.G.를 부착하여 변형도를 측정하고 실험체 전면 및 후면에 대각선 방향으로 2개의 변위계를 대칭으로 설치하여 축방향 변위를 측정한다. 표 3와 같이 계산 항복내력에 대한 실험 최대내력의 비는 폭 두께비에 따라 1.02~1.18로 나타났으며, 그림 3에 하중-변위 관계를 나타내었다.

표 3. 단주 압축시험결과

제 원	폭 두께비 (D/T)	$scP_y$ (tonf)	$scP_u$ (tonf)	$scP_u/scP_y$
200×6	30.33	213.81	217.86	1.02
200×9	19.22	266.00	287.97	1.08
200×12	13.67	346.12	409.18	1.18

주)  $scP_y = \sigma_y \cdot A_s$ ,  $\sigma_y$  : 강재의 항복강도,  $A_s$  : 강관의 공칭 단면적

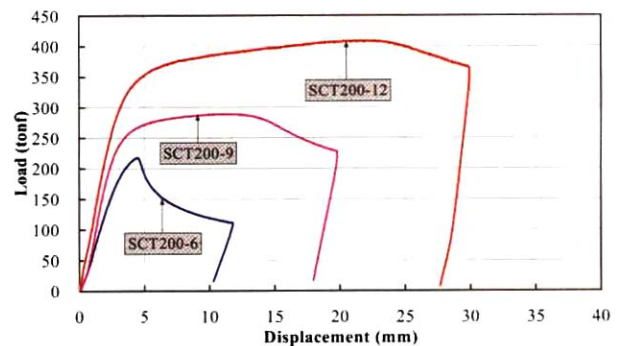


그림 3. 단주압축시험의 하중-변위 관계 곡선

## 2.2 소재시험

### 2.2.1 강재 인장강도 시험

각형강관 접합부의 실험체 제작에 사용된 강재의 역학적 성능을 파악하기 위하여 KS B 0801의 금속재료 인장시험편 규정에 따라 SPSR400급 각형강관을 사용하여 강재 인장시험편을 제작하였다.

시험은 유압식 만능시험기(U.T.M.)를 사용하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험편 시험방법에 의해 실시하며, 각 시험편 양면에 Wire Strain Gage를 부착하여 강재의 응력도-변형도 관계를 파악하였다.

인장강도 시험결과, 항복응력도 값은 3.71~4.0의 분포를 나타내었고, 항복비는 0.84~0.85로 나타났으며, 응력도-변형도 관계를 그림 2에 나타내었다.

### 2.3 가력 및 측정방법

가력방법은 그림 4와 같이 주관 양단을 U.T.M. 베드 위에 올려놓고 지관에 축방향 압축력을 가하는 단조 재하 방법을 사용한다. 변형 측정은 그림 3과 같이 각형강관 주관 웹측에 4~8개의 W.S.G.와 주관 플랜지에 3개의 1방향 W.S.G.을 부착하여 주관 둘레 방향, 축방향의 변형도를 측정하였다. 접합부의 변위 측정은 변위계(LVDT)를 부착하여 주관 웹면의 수평변위와 주관 중심과 지관과의 상대수직변위를 측정하였다. 하중 가력은 접합부에 항복현상이 나타나 항복내력이 결정되고 실험체가 심한 국부변형으로 더 이상 가력하기에 불안정한 상태가 되었을 때 종료하였다.

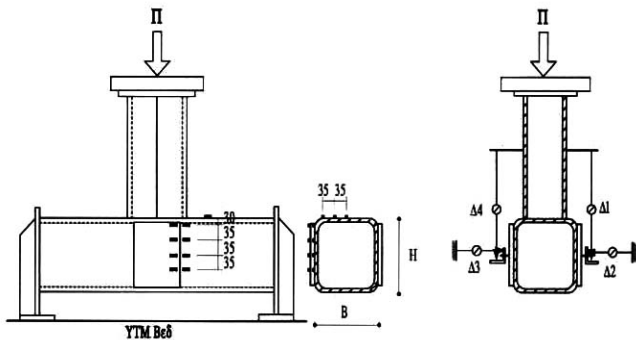


그림 4. 지관 45°회전형 실험체 셋팅도

접합부의 최대내력을 주관폭의 3% 변형시의 하중으로 정의하였다.

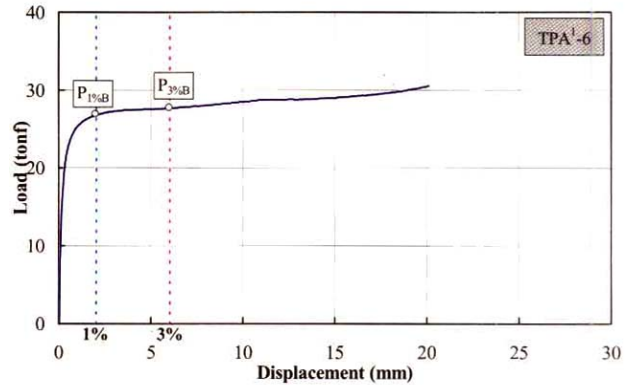


그림 5. 지관 45°회전형 최대내력의 정의

본 연구에서는 표 3과 같이 이미 전 보고에서 제안된 실험치 최대하중 도달시의 변형량과 주관폭의 3% 변형시의 하중을 비교하여 변형제한치를 최대내력으로 정의하였으며, 본 연구의 웹 보강형 실험체의 경우에도 이미 정의된 최대내력을 적용한다. 그림 5에 TPA<sup>1</sup>-6 실험체의 주관폭 1%변형시의 하중 P<sub>1%B</sub>와 주관폭 3%변형시의 하중 P<sub>3%B</sub>를 이용한 최대내력의 정의방법을 나타내었다.

## 3. 실험결과

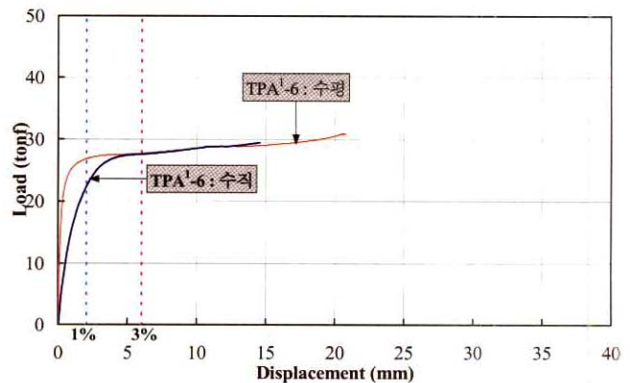
### 3.1 최대내력의 정의

각형강관 T형 접합부는 일반적으로 폭비( $\beta$ )가 0.85이하인 경우, 특히 0.8이하에서는 주관 플랜지면의 면외저항력으로 내력이 결정되고, 계속적인 면외 소성변형을 나타내어 최대내력이 명확히 정의되지 않는 특징을 나타내고 있다. 이러한 경향을 고려하여, 최근까지도 많은 연구자들이 보다 합리적으로 최대내력을 결정하기 위하여 변형제한치를 설정하고, 이에 대응하는 내력을 최대내력으로 정의하고 있다.

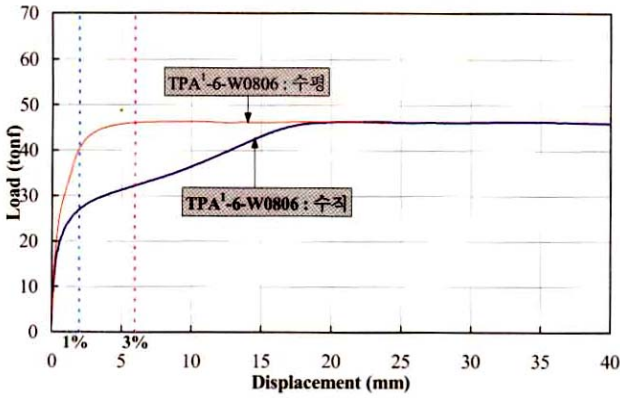
IIW(IIW,1989)에서는, 폭비가 0.85이하인 T형 접합부에 대한 사용성 변형 한계치를 주관폭의 1%의 변형으로 정의하고 있다. 그리고 Lu(Lu,1994)는 폭비가 0.85이상에서 뚜렷한 최대내력을 갖는 접합부에 대한 열간성형 각형강관의 실험결과와 수치해석 결과로부터, 접합부의 최대내력이 정의되는 변형량이 주관폭의 2.5~4%의 변형사이에 분포함을 발견하고, 접합부의 최대내력을 주관폭(B)의 3% 변형시의 하중으로 정의하였다. 또한, 본 연구진들도 실험결과에 기초하여 주관 웹 파괴모드의 기본형인 정방형과 지관 45°회전한 T형

### 3.2 하중-변위 관계

그림 6은 TPA<sup>1</sup>-6과 TPA<sup>1</sup>-6-W0806 실험체의 하중에 대한 주관과 지관의 상대수직변위( $\delta_v$ ) 및 주관의 수평변위( $\delta_H$ ) 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 종축은 하중을 나타내고 횡축은 변위를 나타낸다. 그림 6(a), (b)에서 보듯이 폭비( $\beta$ )가 0.85이상의 웹 보강 유무에 관계없이 주관 웹 파괴인 경우에는 같은 하중에서 수직변위가 수평변위보다 선행하는 것으로 나타났다.



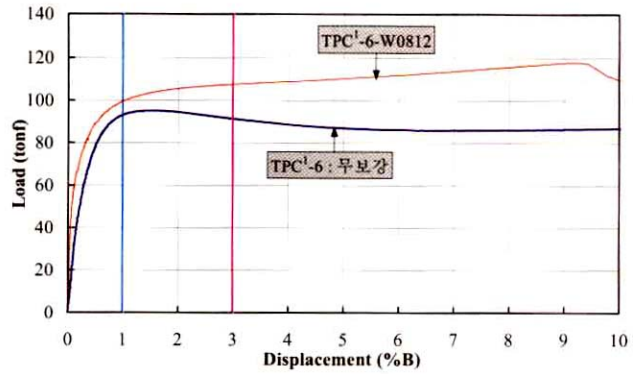
(a) TPA<sup>1</sup>-6(무보강형)



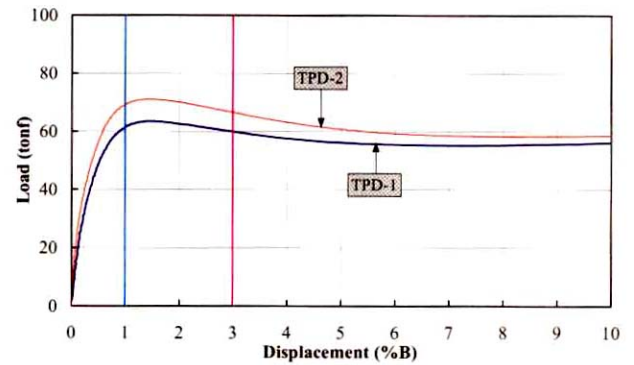
(b) TPA<sup>1</sup>-6-W0806 (보강형)

그림 6. 하중-수직, 수평 변위 관계 곡선

따라서, 주관 측벽 보강에 관계없이 지관 회전한 각형강관 T형 접합부의 내력은 주관 플랜지 파괴로 선행되어 상대수직 변위로 결정됨을 알 수 있다. 그림 7은 각 실험체별로 하중-변위(%B) 관계곡선을 나타낸 것이다. 표 3과 그림 5에서 보는바와 같이 최대내력의 정의방법을 이용하여 지관 회전형 실험체의 주관쪽 1%변형시의 하중  $P_{1\%B}$ 와 주관쪽 3%변형시의 하중 등을 정리하여 나타내었다.

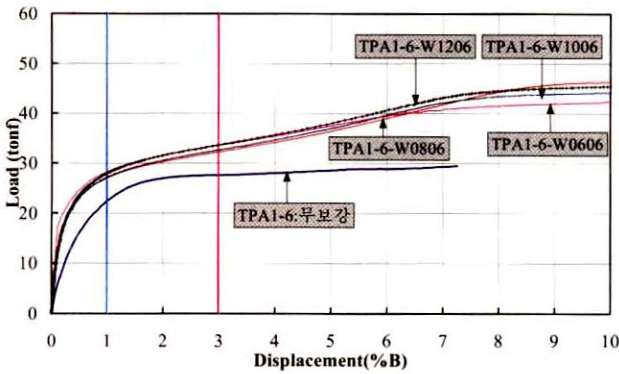


(c) TPC<sup>1</sup>-6 계열 실험체(무보강-보강형)

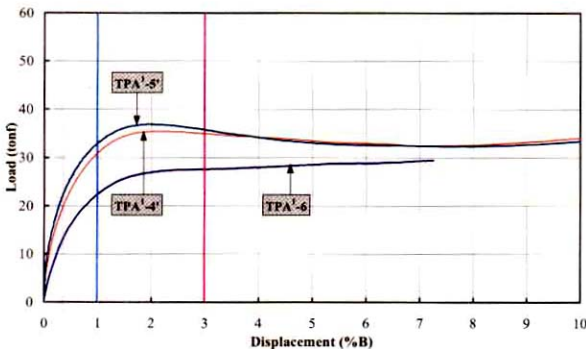


(d) TPD<sup>1</sup>-6 계열 실험체(무보강형)

그림 7. 하중 - 변위(%B) 관계 곡선



(a) TPA<sup>1</sup>-6 계열 실험체(무보강-보강형)



(b) TPA<sup>1</sup>-6 계열 실험체(무보강형)

그림 7. 하중 - 변위(%B) 관계 곡선(계속)

표 4. 지관 45°회전형 접합부의 최대내력

실험체명	$2\gamma$ (B/T)	$\beta$ ( $b_1/B$ )	$\sqrt{2}\beta$	$P_{1\%B}$ (tf)	$P_{3\%B}$ (tf)	$P_{max}$ (tf)	$P_{3\%B}/P_{max}$	파괴모드
TPA <sup>1</sup> 6	33.3	0.63	0.88	22.45	27.60	-	1.23	M2
TPA <sup>1</sup> 6-W0606				28.15	33.60	-	1.19	M3
TPA <sup>1</sup> 6-W0806				27.00	32.25	-	1.19	M3
TPA <sup>1</sup> 6-W0809				26.55	32.10	-	1.21	M3
TPA <sup>1</sup> 6-W1006				27.05	32.70	-	1.21	M3
TPA <sup>1</sup> 6-W1206				27.95	33.60	-	1.20	M3
TPA <sup>1</sup> 4	22.2	0.67	0.95	-	34.95	40.00	0.87	M1
TPA <sup>1</sup> 5'		0.70	1.00	-	35.75	39.60	0.90	M1
TPD1	22.2	0.67	0.95	-	59.90	63.50	0.94	M1
TPD2		0.70	1.00	-	66.55	71.05	0.94	M1
TPC <sup>1</sup> 6	16.7	0.63	0.88	-	91.40	95.10	0.96	M1
TPC <sup>1</sup> 6-W0812		0.63	0.88	99.35	107.45	-	1.08	M2
MEAN1 <sup>2)</sup>							1.19	
MEAN2 <sup>3)</sup>							0.92	

- 1)  $P_{3\%B}/P_{max}$ 의 비에서 웹 보강한 실험체는  $P_{3\%B}/P_{1\%B}$ 의 비를 나타냄.
- 2) MEAN1 : 플랜지 파괴와 웹 파괴가 동시 발생한 실험체
- 3) MEAN2 : 웹 파괴만 발생한 실험체

표 4에서 웹 측면을 보강한 실험체는 주관 웹 파괴와 플랜지 파괴가 함께 발생한 실험체로서, 1%B 변형시의 하중에 대한 3%B 변형시의 하중의 비  $P_{3\%B}/P_{1\%B}$ 는 평균치

(MEAN1)가 1.19로 나타났다. 실제 파괴모드의 관찰에서, 웹 보강한 실험체는 플랜지면이 먼저 항복한 이후에 웹면 파괴가 발생하였고,  $P_{1\%B}$ 의 하중이후에서는 내력이 완만히 계속적으로 증가하는 일정한 양상을 나타내고 있다. 웹 보강한 실험체와 TPA16 실험체를 제외한 나머지 실험체들의 실험치 최대하중에 대한 3%B 변형시의 하중의 비  $P_{3\%B}/P_{max}$ 는 평균치(MEAN2)가 0.92로 나타났다. 따라서, 주관 웹 파괴모드와 복합 파괴모드의 지관 45°회전형 접합부 거동은 강도가 지배하고, 주관 플랜지면에서의 국부변형이 주관폭의 3%일 때 최대내력이 결정됨을 알 수 있다.

### 3.3 하중-폭비 관계

그림 8은 주관의 폭두께비  $2v$ 에 따른 하중과 폭비( $\beta$ ) 관계를 나타낸 것이다. 웹 보강하지 않은 지관 회전한 실험체의 실험결과,  $2v$ 가 작을수록  $\beta$ 값이 클수록 접합부 최대내력은 증가한다. 그림 8를 살펴보면, 접합부의 최대내력은  $0.63 \leq \beta \leq 0.7$  범위에서 별 증가없이 완만하게 상승하고 있음을 알 수 있다. 특히,  $2v$ 값이 클수록  $\beta$ 영역에 관계없이 직선적으로 완만하게 내력이 증가함을 알 수 있다.

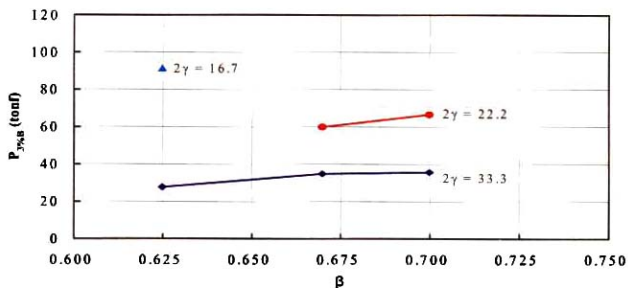


그림 8. 하중 - 폭비( $\beta$ ) 관계 곡선

## 4. 결과 분석 및 고찰

### 4.1 파괴모드

각형강관 T형 접합부의 파괴형태는 일반적으로 폭비( $\beta$ )가 0.85이하인 경우, 특히 0.8이하에서는 주관 플랜지면의 면외 저항력으로 내력이 결정되는 플랜지 파괴형태이다. 또한,  $\beta$ 가 0.8이상 특히, 1.0인 경우에 비교적 최대하중값이 명확히 나타나는 주관의 웹 파괴로 구분하여 적용하고 있다. 그리고 접합부의 형상과 보강 유무에 따라서는 파괴모드가 변화하거나 복합적인 형태의 파괴 양상으로 나타날 수 있다.

그림 9는 웹 보강 유무에 따른 지관 45°회전형에서 나타나는 일반적인 파괴형태를 하중-변위 관계 곡선으로 표현하여

나타낸 것이다. 그림 9(a)는 주관 웹 측면면이 면외방향의 변형에 의해 파괴되는 전형적인 웹 파괴형태이며, 이때 면외 변형량은 주관 웹면 중심보다 지관에 가까운 곳에서 생긴다. 또한, 하중-변위의 관계에서 최대하중 이후에 주관 웹면 좌굴로 내력이 완만히 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 9(b)는 주관 플랜지면이 가력방향으로 함몰하면서 판의 면외 휨변형이 발생하고 동시에 주관 웹면이 침하하는 변형모드에 해당한다. 플랜지 파괴가 지배하는 경우에 하중-변위 관계는 명확한 항복현상이 나타나지 않으며 항복이후 주관면의 면외 소성 변형과 판의 막작용으로 내력이 계속 상승해 가는 경향을 나타낸다. 그리고 그림 9(c)는 주관 플랜지면 파괴와 웹면 좌굴파괴가 동시에 발생하는 복합파괴 형태이다.

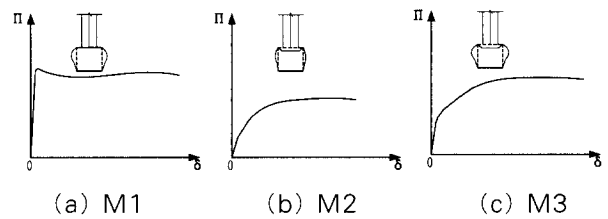


그림 9. 파괴모드 형태

이는 폭비( $\beta$ )가 크고 폭두께비( $2v$ )가 작아 주관 웹면의 하중 분배능력이 높은 경우에 발생하는 파괴모드이다. 이러한 복합모드의 하중-변위 관계에서 미세하기는 하나 플랜지면 항복현상 이후 또다시 웹면 항복현상이 나타나는 경향을 보인다. 웹면 항복이후에는 내력이 완만하게 상승하여 정확한 최대하중을 나타내지 않는다.

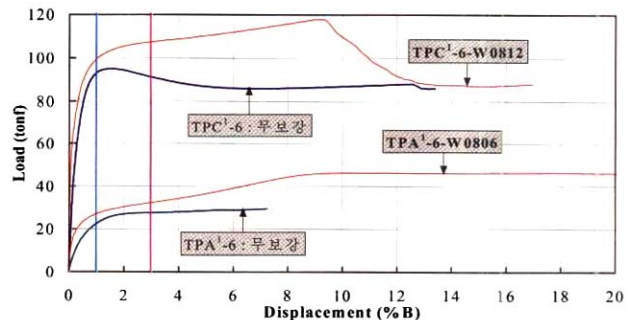


그림 10. 보강 유무에 따른 파괴모드의 변화 곡선

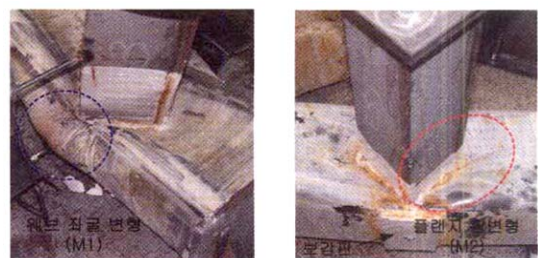


사진 1. 보강 유무에 따른 파괴 형상

이상과 같이 웹면 보강 유무에 따라 지관을 회전시킨 T형 접합부의 파괴모드는 대략 3가지로 분류하고 구분할 수 있다. M1, M2, M3는 모두 주관면에서 접합부 내력이 결정되고 있다.

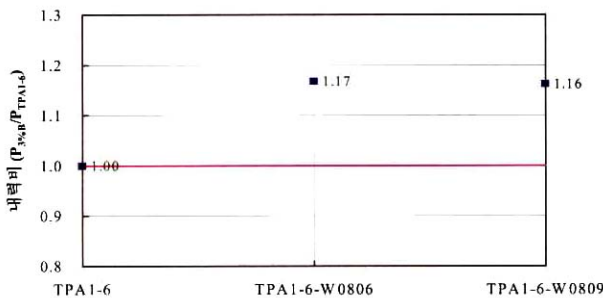
표 3과 그림 10, 사진1에서 보는 바와 같이 2v값에 관계없이 β값에 따라 파괴형태가 나타나고 있음을 알 수 있다. 2v값이 비교적 큰 TPA<sup>1</sup>-6 실험체와 본 실험 연구중 2v값이 가장 작으며 웹면에 보강한 TPC<sup>1</sup>-6-W0812 실험체는 플랜지면 파괴가 지배하는 것으로 나타났으며, 2v=33.3이고 β=0.63이며 웹면을 보강한 모든 실험체에서는 주관면에서 복합적인 파괴형태가 지배하는 거동을 보인다. 그러나, 나머지 실험체에서는 β값이 1.0에 근접할 때 전형적인 파괴 형태인 주관 웹면 좌굴파괴로 접합부의 내력이 결정됨을 알 수 있다.

그림 10에 나타낸 것과 같이 주관 웹면 보강 유무에 따라 파괴모드가 변화하고 있음을 알 수 있다. 특히, 보강한 보강판의 폭은 같고 주관 두께만큼을 보강한 경우, TPA<sup>1</sup>-6계열 실험체는 파괴모드가 플랜지 파괴형태(M2)에서 복합파괴(M3) 형태로 전환되었으며, TPC<sup>1</sup>-6계열 실험체는 웹파괴(M1)에서 플랜지파괴(M2) 형태로 지배 파괴모드가 변화함을 알 수 있다.

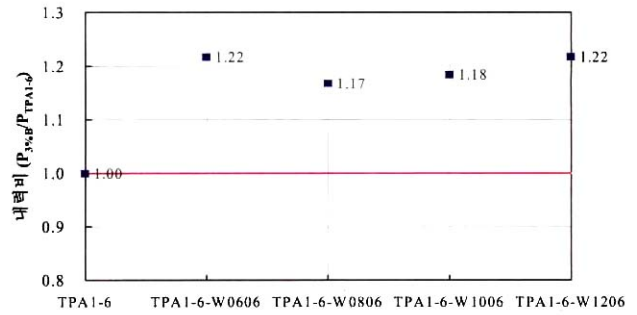
#### 4.2 웹 보강효과

일반적으로 접합부의 내력은 주관면의 플랜지 파괴와 좌굴에 의한 측벽파괴에 의해 지배된다. 본 연구대상인 주관 웹 파괴(β=1.0)인 경우 접합부 내력은 주관 웹면에 한쌍의 플레이트를 보강하여 증대시킬 수 있다.

냉간성형 각형강관 T형 접합부에서 지관을 45°회전시키고 웹 측벽을 강판을 이용하여 보강함으로써 기대되는 최대내력 증가의 정도와 보강효과를 파악하기 위하여, 보강 유무에 따른 지관 45°회전형의 실험치 최대내력을 비교하여 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 보강판의 유효폭 변화에 따른 내력비교를 나타내며, 그림 11(b)는 보강판의 두께 변화에 따른 내력비교를 나타낸 것이다.



(a) 보강판 두께에 따른 내력비교



(b) 보강판 유효폭 변화에 따른 내력비교

그림 11. 보강 유무에 따른 최대내력 비교

그림에서 내력비는 무보강 실험체의 3%B 변형시의 하중에 대해 웹면을 보강한 실험체의 3%B 변형시의 하중에 대한 비율을 나타낸다. 기존 내력식에서 웹면의 유효폭을 지관 폭의 0.8배로 하고 있는 유효폭에 대해 보강판 두께만을 변화시킨 실험체에 대하여 비교한 결과, 그림 11(a)에서 보는바와 같이 무보강 실험체에 비해 내력이 16%~17% 정도 상승함을 알 수 있으나, 보강판 두께는 접합부 내력에 그리 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 또한, β=0.63이고 보강판의 유효폭을 변화시킨 경우에 무보강 실험체에 비해 17%~22% 정도 내력이 상승함을 알 수 있다. 이는 기존 내력식(1)에서 채택하여 적용하고 있는 유효폭이 적정한 것으로 판단된다.

표 5. 보강판 유무에 따른 내력비교

실험체명	2v (B/T)	β (b <sub>1</sub> /B)	√2β	P <sub>3%B</sub> (tf)	내력비 (%)
TPA <sup>1</sup> 6	33.3	0.63	0.88	27.60	100
TPA <sup>1</sup> 6-W0606				33.60	122
TPA <sup>1</sup> 6-W0806				32.25	117
TPA <sup>1</sup> 6-W0809				32.10	116
TPA <sup>1</sup> 6-W1006				32.70	118
TPA <sup>1</sup> 6-W1206	33.60	122			
TPC <sup>1</sup> 6	16.7	0.63	0.88	91.40	100
TPC <sup>1</sup> 6-W0812		0.63	0.88	107.45	118

#### 4.3 기존 제안식과의 비교

주관 웹 파괴모드를 갖는 기본형에 대한 기존의 내력식들은 웹 파괴를 지압파괴 또는 좌굴파괴로 정의하고, 웹 파괴가 완전히 지배하는 β=1.0인 경우에만 적용하도록 규정되어 있다. 그리고 웹 파괴와 플랜지 파괴가 공존하는 범위에서는 일반적으로 CIDECT식과 같이 직선보간 방법을 이용하고 있다. 본 연구진들에 의한 연구에서 무보강 지관 45°회전형의 경우에는 실험결과와 회귀분석보다는 기본형에 대한 CIDECT모델을 수정하여 지관 45°회전형의 내력식(배규

용,2003)을 제안한바 있다. 무보강 주관 웨브파괴형 실험체에 대해서는 그림 12와 같이 주관의 웨브부분을 냉간성형시 발생하는 곡률부분을 고려하여 길이(H-2r<sub>ext</sub>)와 유효폭(b<sub>eff</sub>)을 갖는 압축재로 치환한 기존 제안식과 비교·검토한다. 또한, 웨브 보강한 지관 회전형에 대해서는 보강판의 폭(b<sub>pl</sub>)에 관계없이 유효폭(b<sub>eff</sub>)만을 고려하고 보강판 두께(t<sub>pl</sub>)와 주관의 두께(T)를 단순하게 더한 단면을 갖는 압축재로 변환하여 기존 제안식에 의한 해석치와 실험치를 비교·검토하고자 한다. 그림 12에서 r<sub>ext</sub>는 곡률부분의 외경으로서, 주관두께의 2.5배에 해당한다.

- 적용범위 :  $0.63 \leq \beta \leq 0.7$  이고,  
 $2.4 \leq F_y(tf/cm^2) \leq 5.0$
- 최적조건 :  $2\dot{\gamma} = -2.8933(F_y) + 35.609$
- 제안 내력식 :  $P_{buckling} = 2 \cdot T \cdot b_{eff} \cdot f_k$  (1)

여기서, T : 주관두께, b<sub>eff</sub> : 유효폭(=0.8b<sub>1</sub>), b<sub>1</sub> : 지관폭 f<sub>k</sub> : 기둥의 세장비로서  $3.46(H-2r_{ext})/T$ 를 사용하고, 대응하는 강재의 규정에 따른 EC3의 기둥 좌굴응력도

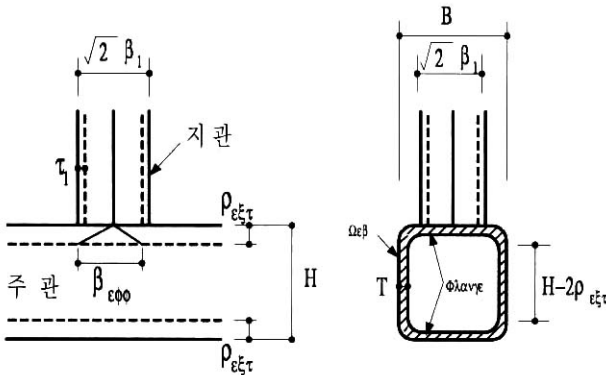


그림 12. 제안된 모델

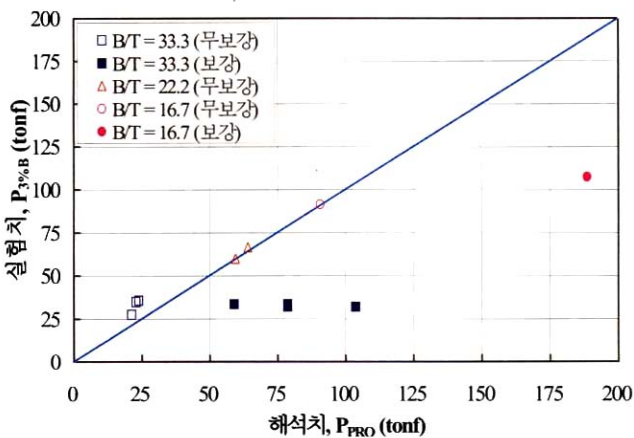


그림 13. 실험치와 해석치의 비교 곡선

표 6. 실험치와 해석치의 비교

실험체명	2v (B/T)	$\beta$ (b <sub>1</sub> /B)	$\sqrt{2}\beta$	실험치 (tf)	해석치 (tf)	실험치/해석치
TPA <sup>1</sup> 6	33.3	0.63	0.88	27.60	21.46	1.29
TPA <sup>1</sup> 6-W0606				33.60	58.34	0.58
TPA <sup>1</sup> 6-W0806				32.25	77.78	0.41
TPA <sup>1</sup> 6-W0809				32.10	103.9	0.31
TPA <sup>1</sup> 6-W1006				32.70	77.78	0.42
TPA <sup>1</sup> 6-W1206				33.60	77.78	0.43
TPA <sup>1</sup> 4'	0.67	0.95	34.95	23.02	1.52	
TPA <sup>1</sup> 5'	0.70	1.00	35.75	24.18	1.48	
TPD1	22.2	0.67	0.95	59.90	59.71	1.00
TPD2		0.70	1.00	66.55	64.25	1.04
TPC <sup>1</sup> 6	16.7	0.63	0.88	91.40	90.89	1.01
TPC <sup>1</sup> 6-W0812		0.63	0.88	107.45	188.82	0.57

기존 제안된 내력식에서 2v값의 최적조건의 범위를 제시하고 있는데 본 연구의 실험에서 이와 같이 최적조건식을 적용할 경우, 2v값이 25이하인 경우에 해당한다. 따라서, 그림 13과 표 6에서 보는바와 같이 2v=33.3인 TPA<sup>1</sup>계열 실험체와 2v=16.7이고 웨브보강한 TPC<sup>1</sup>6-W0812 실험체의 경우에 기존 제안식과의 비교 결과, 웨브 보강 유무에 관계없이 해석치에 대한 실험치의 비가 상당히 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 특히, 웨브 보강한 실험체의 경우에는 보강판의 폭은 지관폭의 0.8배만을 고려했음에도 불구하고 해석치에 대한 실험치의 비가 0.31~0.57로 모두 1.0이하로 나타났다. 그림 11에서 알 수 있듯이 단순히 보강판의 두께 증가가 접합부의 내력에 큰 영향이 없으며, 표 3과 그림 10에서와 같이 무보강인 실험체는 웨브 파괴(M1)가 지배하지만 보강한 실험체는 플랜지파괴(M2) 이후 웨브파괴가 발생하기 때문에 판단된다.

그러나, 웨브면 무보강 실험체의 경우에는 기존 제안식과 비교하여 1.00~1.04의 분포를 나타내어 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 지관이 회전되고 웨브 무보강한 실험체의 경우, 기존의 제안식(1)을 적용하는데는 별무리가 없는 것으로 판단되며, 웨브 보강한 지관 회전형 실험체에 대해서는 보강판 두께(t<sub>pl</sub>)와 주관의 두께(T)를 단순하게 더한 단면을 갖는 압축재로 변환하여 기존 제안식에 적용하기에는 무리가 있으며 추후 보강판의 폭과 두께 변화에 따른 영향을 고려한 새로운 제안식이 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

이상과 같은 지관이 45°회전되고 주관 웨브 측면 보강 유무에 따라서 주관에 용접된 T형 접합부의 실험연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



- (1) 폭비( $\beta$ )가 0.85이상의 주관 웹파괴인 경우에는 주관 측벽 보강 유무에 관계없이 지관 회전한 각형강관 T형 접합부의 내력은 주관 플랜지 파괴가 선행되어 상대 수직변위로 결정되는 것으로 나타났다.
- (2)  $2v=33.3$ 인 실험체에서 웹면 보강 유무에 따라 파괴 모드가 플랜지 파괴형태(M2)에서 복합파괴(M3) 형태로 전환되었으며,  $2v=16.7$ 인 실험체에서는 웹파괴(M1)에서 플랜지파괴(M2)로 지배 파괴모드가 변화하는 것으로 나타났다.
- (3) 실험결과, 보강판 두께( $t_{pl}$ ) 변화에 따라 무보강 실험체에 비해 내력이 16%~17% 정도 상승하는 것으로 나타났으며, 보강판의 폭( $b_{pl}$ )을 변화시킨 경우에 무보강 실험체에 비해서 17%~22% 정도 내력이 상승하는 것으로 나타났다.
- (4) 기존 제안식과의 단순비교 결과, 웹 보강한 실험체의 경우에 웹면 보강으로 파괴모드가 M1에서 M2로 전환되기 때문에 해석치에 대한 실험치의 비가 0.31~0.57의 범위로 나타났으며, 웹면 무보강 실험체의 경우에는 1.00~1.04의 분포로 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- (5) 따라서, 지관이 회전되고 웹 무보강한 실험체의 경우, 기존의 제안식(1)을 적용하는데는 별무리가 없는 것으로 판단되며, 웹 보강한 지관 회전형 실험체에 대해서는 보강판 두께( $t_{pl}$ )와 주관의 두께(T)를 단순 누가시킨 단면을 갖는 압축재로 변환하여 기존 제안식에 적용하기에는 무리가 있으므로 웹 보강한 경우에는 추후 보강판의 폭( $b_{pl}$ )과 두께( $t_{pl}$ ) 변화에 따른 영향을 고려한 새로운 제안식이 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 배규용, 박금성, 강창훈, 문태섭, 지관이 회전된 냉간성형 각형강관 T형 접합부의 최대내력(I)-주관 플랜지 파괴모드, 한국강구조학회 2002. 10
- 배규용, 박금성, 강창훈, 문태섭, 지관이 회전된 냉간성형 각형강관 T형 접합부의 최대내력(II)-주관 웹 파괴모드, 한국강구조학회 2003. 2
- CIDECT, The strength and behavior of statically loaded welded connections in structural hollow sections, CIDECT Monograph No. 6, Corby, England. 1986.
- International Institute of Welding (IIW), Design recommendation for hollow section joints-predominantly statically loaded, IIW Doc. V-701-89, 2nd edition, 1989
- Lu, L.H., de Winkel, G.D., Yu, Y., Wardenier, J., "Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints", Tubular Structure VI, Rotterdam:Balkema, 1994:341-7.
- Owen, JS., Davies, G., Kelly, RB., "The influence of member orientation of the resistance of cross joints in square RHS construction", *J Construct Steel Res.* 2001;57:253-278.
- Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading., Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1992.
- Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill book company, 1961.

(접수일자 : 2003. 9. 17 / 심사일 2003. 9. 24 /  
심사완료일 2003. 11. 26)