

반복하중을 받는 고강도 원형강관의 T형 접합의 면내 휨모멘트 내력

In-plane Bending Moment Capacity of T-Joints in the Circular Hollow Section of New High Strength Steel Subjected to Cyclic Loadings

이 성 주¹⁾ · 김 주 우^{2)†} · 김 상 섭³⁾ · 이 명 재⁴⁾ · 양 재 근⁵⁾
Lee, Sung Ju Kim, Joo Woo Kim, Sang Seup Lee, Myung Jae Yang, Jae Geun

요약 : 본 논문은 반복하중을 받는 고강도강 원형강관의 T형 접합부의 면내 휨모멘트 내력에 대해 체계적으로 수행된 유한요소 해석으로부터 얻은 결과를 제시하고 있다. 용접된 원형강관의 T형 접합부의 회전강성 및 이에 따른 파괴모드를 분석하기 위하여 T형 접합부의 3차원 비선형 유한요소모델을 이용하였다. 주관과 지관의 세장비, 주관과 지관의 지름비와 같은 기하학적 파라미터 및 항복비 등에 따른 T형 접합부의 다양한 구조적 거동을 제시하였으며, 또한 주관의 압축응력의 크기에 따른 T형 접합부의 극한 면내 휨모멘트 내력의 변화를 분석하였다.

ABSTRACT : This paper presents the results of the systematic finite element analysis of the in-plane bending moment of T-joints subjected to cyclic loadings. T-joints were fabricated using high-strength, circular, hollow sections. Three-dimensional, nonlinear finite element models of the welded T-joints were constructed to investigate the strength, rotational-stiffness characteristics, and failure modes. A wide scope of structural behaviors explain the influence of the joint geometric parameters, such as the chord and brace wall slenderness ratios and the ratio of the brace to the chord diameter, as well as the yield strength ratios and compressive-chord-stress effects on the ultimate in-plane bending moment capacity of the T-joint.

핵심용어 : 고강도강, 원형강관, 반복 하중, T형 접합, 면내 휨모멘트 내력, 3차원 비선형 해석

KEYWORDS : high strength steel, circular hollow section, cyclic loading, T-joint, in-plane moment capacity, three-dimensional nonlinear analysis

1. 서론

HSS(Hollow Structural Section, 강관단면)는 동일하중에 대하여 구조물 전체의 자중을 경감시키고 프리패브리케이션으로서 시공성을 높일 수 있으며, 다양한 형태의 구조물을 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 원형강관은 풍하중, 진동하중에 대하여 우수한 단면형태의 요소로 각형강관에 비해

공장생산비가 저렴하고, 경관이 미려해 현대의 장대교량, 고층건물, 대공간 구조물 등에서 자주 발견된다. 이와 함께 구조물의 크기가 점점 대형화, 경량화 되면서 고강도 강재의 지속적인 개발에 따른 수요도 점차 증가하고 있는 추세이다.

본 연구는 주관과 지관이 항상 90°로 형성되는 전형적인 비렌달 트러스(Viernedeel Truss)에서 주관과 지관에 대한 다양한 기하학적인 특성을 고려한 600MPa급 고강도강 강관

1) 세명대학교 건설공학과 석사과정(dmsthgud@hanmail.net)
2) 교신저자, 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
(Tel. 043-649-1329, Fax. 043-649-1755, E-mail: jw_kim@senyung.ac.kr)
3) 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사(kimss@kut.ac.kr)
4) 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사(mjlee@cau.ac.kr)
5) 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사(jyang@inha.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

적용 T형 접합부의 분석에 관한 것이다. 이러한 비렌달 트러스에 지진하중이나 풍하중과 같은 횡력이 작용하게 되면 접합부에는 중력하중으로 인한 축력과 함께 상당한 크기의 휨모멘트가 발생하게 된다. 일반적으로, 충분한 용접성을 확보한 비렌달 트러스의 접합부는 휨모멘트에 의한 원형단면 주관에서의 면내 휨강성에 따라 저항력이 결정되기 때문에 강재의 강도와 더불어 이 부분에 대한 분석이 매우 중요하다. 지금까지 이러한 면내 휨모멘트를 받는 각형강관 T형 접합부에 관한 문헌들이 광범위하게 축적되어 왔으며(Duff, 1963; Redwood, 1965; Cute 등, 1968; Packer 등, 1997; 박금성 등 2009a; 박금성 등 2009b), 부재가 축력만을 받는 일반 트러스 구조물에서의 원형강관 T형 접합부의 경우 국내에서도 상당한 연구가 진행되고 있는 실정이다.

최근에 Qian 등(2007)이 정적 면내 및 면외 지관 모멘트 하중을 받는 두께가 두꺼운 원형강관으로 구성된 X형 접합부에 대한 유한요소해석을 통하여 주관과 지관의 기하하적인 상관관계에 대한 중요성을 파악하고 새로운 응력함수를 제시하였다. 그러나 600MPa급 이상의 고강도강재를 적용하고, 특히 반복하중을 받는 원형강관 T형 접합부의 면내 모멘트 거동에 관련하여 발표된 문헌을 발견하는 것은 쉽지 않다. 이러한 모멘트 접합부의 내력을 확인하고 설계에 반영하기 위해서는 국내에서 생산되는 고강도 강 원형강관의 특성이 포함되지 않은 유럽의 ES3(1993)나 캐나다의 CISC(Packer, 1997) 및 미국의 AISC-LRFD(1997) 기준을 참조하여 적용할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 이러한 비렌달 트러스의 원형강관 접합부에 대한 휨강도를 평가하기 위해서는 국내에서 생산 및 조립되는 원형강관의 특성을 규명하고, 구조적 안정성을 확보하기 위하여 접합부의 휨강도와 변형형태에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 반복하중을 받는 600MPa급 고강도 원형강관의 T형 접합부를 대상으로 하여 면내 휨모멘트에 대해 3차원 비선형 유한요소 해석을 수행함으로써, 용접 접합부의 강도, 회전강성 및 파괴모드를 분석하고자 한다. 또한, 현행 기준에 고강도 강재를 적용하여 설계식의 적합성을 검증하고 주관의 지름두께비, 지관의 지름두께비, 항복비 및 주관압축응력을 변수로 한 해석 값을 비교·분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 설계기준식

비렌달 트러스 파괴는 주로 주관과 지관이 만나는 접합부의 내력에 따라 발생하게 되며 접합부의 내력에 영향을 미치는 요소는 상당히 다양하다. 주관과 지관이 항상 90°로 형성되는 전형적인 비렌달 트러스의 접합부의 형태는 그림 1과 같

으며, 본 연구에서는 주관과 지관의 길이를 각각 2,000mm와 1,775mm로 고정시킨 상태에서 다양한 강관의 두께 및 지름을 고려하였다.

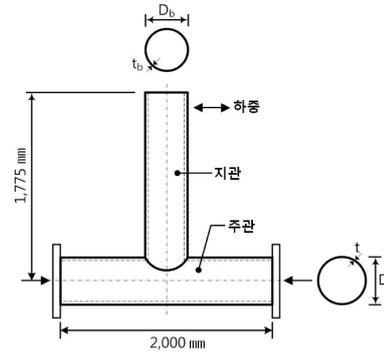


그림 1. 면내 휨모멘트를 받는 비렌달 트러스의 접합부

2.1 국내 기준식 (KBC Code)

현재 연구되고 있는 국내의 기준식(KBC 2009)은 미국의 AISC 기준을 따르고 있다. 지관 부재가 면내 휨모멘트를 받는 T, Y, X형 원형 강관 접합부의 설계강도 ϕM_n 에 대한 설계기준은 주관의 소성화를 고려한 아래의 식 (1)에 따른다.

$$M_n \sin\theta = 5.39 F_y t^2 \gamma^{0.5} \beta D_b Q_f \quad (1)$$

식 (1)에서 Q_f 는 주관 응력상관변수이며 주관이 인장인 경우는 $Q_f = 1.0$ 이고 압축인 경우는 $Q_f = 1.0 - 0.3U(1 + U)$ 이다.

여기서, $U = \left| \frac{P_u}{A_g F_y} + \frac{M_u}{S F_y} \right| =$ 유용성비

P_u = 주관의 소요축강도

M_u = 주관의 소요휨강도

A_g = 주관의 총단면적

F_y = 항복강도

S = 주관의 탄성단면계수

뚫림전단에 대한 검토는 다음 식 (2)에 의해 이루어진다.

$$M_n = 0.6 F_y t D_b^2 \left(\frac{1 + 3 \sin\theta}{4 \sin^2\theta} \right) \quad (2)$$

여기서, $\phi = 0.95$

$\beta > (1 - 1/\gamma)$ 이면 이 한계상태는 검토할 필요가 없다.

만약 비렌달 트러스와 포탈프레임에서와 같이 강접합이 필요할 경우에는 β 값을 약 1.0으로 하거나, t/t_b 값을 크게 함과 동시에 작은 D/t 값을 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 기준에 맞지 않는 접합은 반강접으로 간주되며, 접합부의 회전강성이 구조시스템의 모멘트 분포에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있다.

2.2 국외 기준식 (CISC Code)

북미와 유럽의 경우 CIDECT(2001)의 공동연구를 통하여 강관구조 기준을 정립하였다. 국내와 미국 설계기준의 기초가 되지만 미국이 실정에 맞게 수정하면서 약간의 차이가 있다. 유럽이나 캐나다 기준은 미국 기준보다 9%정도 보수적이라는 차이점이 있다. 원형강관 T형 접합부의 주관 소성화 한계 하중 설계식은 아래의 식 (3)으로 나타낸다.

$$M_{r1}^* = 4.85F_{y0}t_0^2\gamma^{0.5}\beta d_1 \frac{f(n')}{\sin\theta_1} \quad (3)$$

여기서,

$$n' = \frac{N_{0p}}{A_0F_{y0}} + \frac{M_{f0}}{S_0F_{y0}}$$

여기서 $n' \geq 0$ 이면 $f(n') = 1.0$ 이며 주관이 인장을 받는 경우이며, 반면 $n' \leq 0$ 경우 $f(n') = 1.0 + 0.3n' - 0.3n'^2$ 이며 주관이 압축을 받는 경우이다.

3. 유한요소 해석모델

유한요소 해석모델은 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 그림 1과 같은 비렌달 트러스의 T형 접합부에 대해서 이루어지게 되며, 이러한 접합부에 대한 3차원 유한요소 모델이 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 주관과 지관에 사용된 요소는 대변형에 의한 재료적인 비선형과 두께방향의 전단변형효과를 지원하는 ANSYS의 Shell43 요소이며, 이때 주관과 지관의 접합부에 집중될 수 있는 큰 응력을 명확히 나타낼 수 있도록 이 부분에 대한 세밀한 요소분할을 이용하여 모델링 하였다. 접합부의 용접부위의 두께는 모재 두께의 2배로 하였고, 이 부위의 항복응력은 잔류응력의 영향을 고려하여 모재의 강도보다 10% 높게 가정하였다.

그림 2에서 주관 양쪽 끝단의 경계조건은 힌지로 가정하였으며 지관의 자유 단부에 변위제어로 하중이 작용 하도록 모

델링 하였다. 변위하중은 그림 3에서 보는 바와 같이 AISC(2006)의 내진설계 매뉴얼에서 제시한 단조증가 반복 하중이력을 따라 작용하였다. 모든 해석모델에 적용되는 강재의 응력-변형을 관계는 접합부의 확실한 파괴를 유도하기 위하여 그림 4의 elastic-perfect plastic 곡선으로 가정하였으며 단, 항복비에 대한 경향을 파악하기 위하여 그림 5와 같은 2개의 추가적인 bilinear 곡선을 해석모델에 적용하였다. 그림 4와 5에서 탄성범위 내의 탄성계수는 205,000MPa이며 변형률은 $20\epsilon_y$ 를 최대 값으로 하였고 프아송비는 0.3을 적용하였다. 비탄성 범위에 대한 재료적 비선형 해석을 위한 항복 기준은 von Mises 항복조건을 사용하였다.

주관의 지름두께비, 지관의 지름두께비, 항복비, 주관압축 응력 값 및 주관과 지관의 지름비의 변화에 따른 T형 접합부의 응력 및 변형 등과 같은 구조적 거동에 대한 경향을 파악하기 위하여 표 1에서 제시한 변수 값을 적용한 해석 모델을 사용하였다. 주관에 작용하는 압축응력을 적용시킬 경우 강재 항복강도의 30%, 50%, 70% 및 90%를 적용하였다.

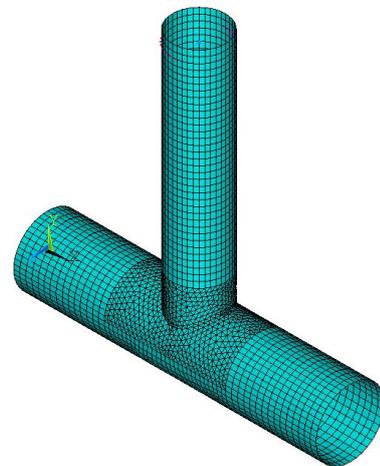


그림 2. T형 접합부의 3차원 유한요소 모델

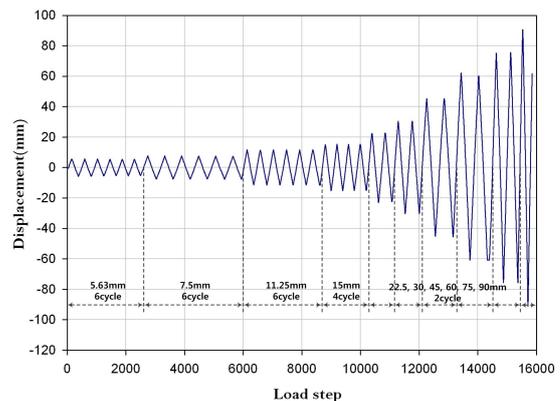


그림 3. 반복 변위하중 이력

표 1. 해석모델 개요

해석 모델명	변수	주관			지관			지름비 ($\beta = D_b/D$)	주관 세장비 ($\gamma = D/2t$)	항복강도 (항복비) (F_y, MPa)	주관 압축응력 (MPa)	
		외경 (D)	두께 (t)	지름두께비 (D/t)	외경 (D_b)	두께 (t_b)	지름두께비 (D_b/t_b)					
TTC-1	주관 지름두께비	450	20	22.50	350	12	29.17	0.78	11.25	480	0	
TTC-2			16	28.13					14.06			
TTC-3			12	37.50					18.75			
TTC-4			6	75.00					37.50			
TDB-1	지관 지름두께비	450	12	37.50	200	12	16.67	0.44	18.75	480	0	
TDB-2									240			
TDB-3					250				20.83	0.56		480
TDB-4									240			
TDB-5					300				25.00	0.67		480
TDB-6									240			
TDB-7					400				33.33	0.89		480
TDB-8									240			
TYR-1	항복비	450	12	37.50	400	15	26.67	0.89	18.75	600(1.0)	0	
TYR-2										480(0.8)		
TYR-3										360(0.6)		
TCL-1	주관 압축응력	450	12	37.50	350	12	26.67	0.89	18.75	480	0.9Fy	
TCL-2											0.7Fy	
TCL-3											0.5Fy	
TCL-4											0.3Fy	

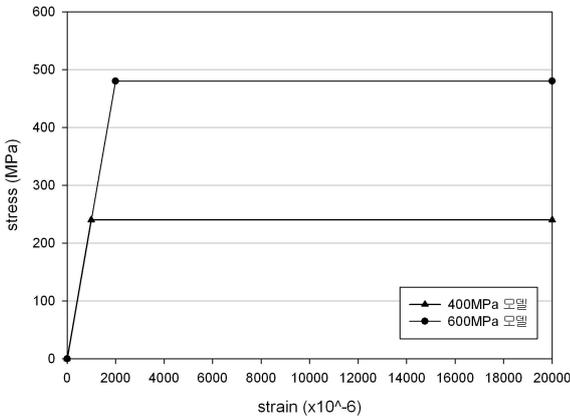


그림 4. 강재의 응력-변형도 관계

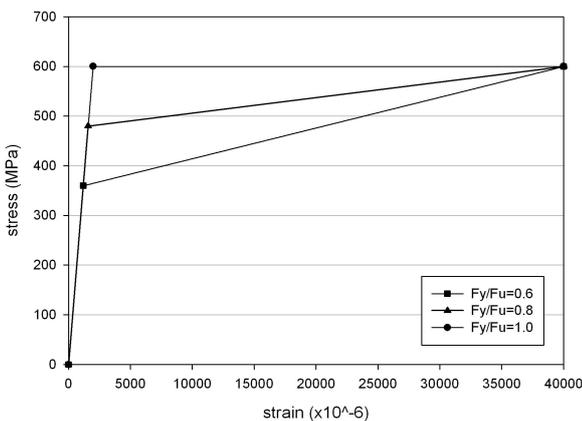


그림 5. 항복비에 따른 응력-변형도 관계

4. 파괴모드

면내 휨모멘트를 받는 원형강관 T형 접합부의 파괴모드는 인장 또는 압축과 같이 축력만이 작용하는 경우와 다소 차이가 있다. 면내 휨모멘트를 받는 T형 접합부의 경우, 주관 또는 지관의 지름두께비, 주관과 지관의 지름비 등에 따라 접합부에 발생하는 집중응력의 형태가 달라지며, 이에 따른 접합부의 전형적인 파괴모드가 그림 6에 나타나 있으며 각각의 주요 파괴모드별 구조적 거동특성은 다음과 같다.

- ① 그림 6(a)와 같이 원형강관 T형 접합부 근처에서 모멘트 회전방향에 따라 주관의 좌측 상부 곡면이 함몰되는 형태의 국부좌굴이 발생하고, 동시에 주관의 우측상부 면은 인장에 의한 균열이 발생하게 된다. 주관 전체가 침하하는 거동을 보일 수 있으며, 접합부의 항복 이후에는 내하기구가 주관 상부 면의 면내 휨강도로 이동하여 강도가 계속 상승해 가는 경향을 나타내는 파괴모드이다.
- ② 그림 6(b)와 같이 모멘트 가력방향과 반대인 주관과 지관의 접합부 우측 면 또는 용접부에 인장으로 인한 균열이 발생되면서 접합부의 내력이 저하되는 파괴모드이다.
- ③ 그림 6(c)와 같이 주관의 측벽면이 면외로 변형되는 형식으로 주관벽에 크리플링이 생길 수 있으며, 지관 접합부에 국부좌굴이 발생하면서 접합부의 강도가 저하되는 파괴모드이다.

④ 그림 6(d)와 같이 지관 면내 휨모멘트에 의한 주관의 전단 파괴모드이다.

이상과 같이 면내 휨모멘트를 받는 일반구조용 원형강관 T형 접합부의 예상 파괴모드는 대략 4가지 형태로 분류될 수 있으며, 크게 나누면 접합부의 용접강도에 따른 균열 파괴모드와 주관 및 지관에서의 국부좌굴로 인한 내력저하로 분류될 수 있다. 이러한 파괴모드는 강관의 기하학적 특성에 따라서 복합적으로 발생할 수 있다.

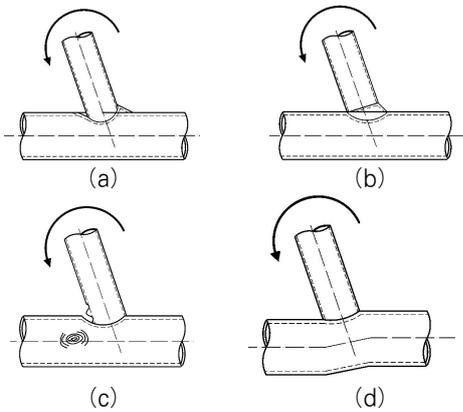
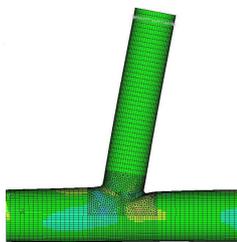
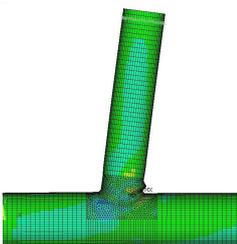


그림 6. 면내 휨모멘트를 받는 강관 접합부의 파괴모드

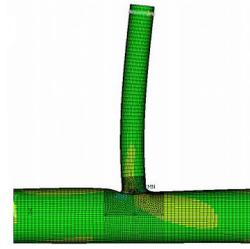
본 연구에서 수행된 해석체의 지름 두께비, 주관과 지관의 지름비 등과 같은 기하학적 특성에 따른 전형적인 파괴모드가 그림 7에 나타나 있다. 여기서, 그림 7(a)와 7(b)에서 주관의 상부 곡면이 함몰되는 형태의 국부좌굴을 볼 수 있으며, 7(b)에서는 주관세장비의 감소로 인한 지관에 국부좌굴이 나타났다. 주관과 지관의 지름비가 0.5이하인 경우, 그림 7(c)와 같이 주관 상부면의 국부좌굴과 지관의 휨 변형이 동시에 나타났다.



(a) $D/t = 22.5$, $D_o/t_b = 29.17$, $\beta = 0.78$, $\gamma = 14.06$



(b) $D/t = 22.5$, $D_o/t_b = 29.17$, $\beta = 0.78$, $\gamma = 11.25$



(c) $D/t = 37.5$, $D_o/t_b = 16.67$, $\beta = 0.44$, $\gamma = 18.75$

그림 7. 수직응력 분포 및 해석에 의한 파괴모드 양상

5. 면내 휨모멘트 내력 및 결과 분석

5.1 면내 휨모멘트 내력

본 연구에서 얻어진 유한요소해석 결과값은 접합부가 항복하는 순간의 휨모멘트 내력을 제시하며, 표 2에 국내 및 국외 기준을 이용한 이론값과의 비교를 보여주고 있다. 표 2로부터 주관압축응력이 고려되지 않은 상태에서 주관의 세장비(γ)가 증가하는 경우(TTC-1에서 TTC-4까지) 해석값이 이론값보다 커지는 경향을 보여주고 있으며, 세장비가 14.06과 18.75일 때 해석값이 이론값과 가장 근접함을 볼 수 있다. 지관지름 두께비에 따른 해석값과 이론값의 차이는 평균 7% 정도로 상당히 근접해 있음을 알 수 있으며, 항복비에 따른 해석값은 항복비가 0.6일 때 가장 큰 차이가 나타났음을 알 수 있다. 표 2는 주관압축응력이 작용하는 경우 압축응력의 크기가 증가함에 따라 해석값과 이론값의 차이의 증가를 보였다.

표 2. 원형강관 T형 접합부의 면내 휨모멘트 내력

해석체명	변수	이론값 (kN·m)			해석값 (kN·m)	해석값 / KBC 값
		KBC	CISC	CISC / KBC		
TTC-1	주관 지름 두께비	948	853	0.90	749	0.79
TTC-2		678	610	0.90	652	0.96
TTC-3		440	396	0.90	464	1.05
TTC-4		158	140	0.90	206	1.32
TDB-1	지관 지름 두께비	142	128	0.90	145	1.02
TDB-2		71	64	0.90	74	1.04
TDB-3		226	203	0.90	222	0.98
TDB-4		113	102	0.90	117	1.04
TDB-5		324	292	0.90	319	0.98
TDB-6		162	146	0.90	171	1.06
TDB-7		574	517	0.90	652	1.14
TDB-8		287	258	0.90	356	1.24
TYR-1	항복비	718	646	0.90	825	1.15
TYR-2		574	517	0.90	764	1.33
TYR-3		431	388	0.90	667	1.55
TCL-1	주관 압축응력	214	193	0.90		2.28
TCL-2		283	255	0.90		1.90
TCL-3		341	307	0.90		1.51
TCL-4		389	350	0.90		1.33

표 3은 원형강관 T형 접합부가 지지하는 최대 및 최소하중을 보여주며, 모든 경우에서 접합부의 회전각이 0.06 radian(그림 3에서의 변위하중 90mm와 일치)에서 파괴 양상이 나타남을 알 수 있다. 표 3은 주관압축응력이 작용하지 않는 경우, 해석모델 TDB-2에서 가장 작은 최대하중(즉, 49.22 kN)을 나타내는 반면 TYR-1에서 가장 큰 최대하중(즉, 550.06 kN)을 나타냈다. 또한, 표 3으로부터 주관압축응력이 작용하는 경우 응력의 크기가 커짐에 따라 최대하중이 증가함을 알 수 있다.

표 3. T형 접합부 파괴 시의 회전각 및 가력하중

해석 체명	최대 하중		최소 하중		파괴
	주기	하중 (kN)	주기	하중 (kN)	
TTC-1	4% (1Cycle)	499.33	4% (1Cycle)	-499.76	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TTC-2	6% (1Cycle)	434.72	5% (1Cycle)	-423.98	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TTC-3	6% (1Cycle)	309.33	5% (1Cycle)	-305.34	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TTC-4	6% (1Cycle)	137.23	5% (1Cycle)	-134.21	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TDB-1	6% (1Cycle)	96.66	5% (1Cycle)	-94.98	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TDB-2	5% (1Cycle)	49.22	5% (1Cycle)	-48.44	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TDB-3	5% (1Cycle)	147.72	5% (1Cycle)	-145.57	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TDB-4	5% (1Cycle)	78.25	5% (1Cycle)	-76.58	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TDB-5	6% (1Cycle)	212.67	5% (1Cycle)	-208.33	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TDB-6	5% (1Cycle)	114.08	5% (1Cycle)	-111.28	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TDB-7	5% (1Cycle)	434.63	5% (1Cycle)	-428.13	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TDB-8	5% (1Cycle)	230.55	5% (1Cycle)	-222.71	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TYR-1	5% (1Cycle)	550.06	5% (1Cycle)	-539.63	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TYR-2	6% (1Cycle)	509.43	6% (1Cycle)	-495.78	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TYR-3	6% (1Cycle)	444.97	6% (1Cycle)	-433.33	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TCL-1	5% (1Cycle)	278.63	4% (1Cycle)	-251.95	6%, 1번째 Cycle에서 파괴
TCL-2	5% (1Cycle)	294.26	4% (1Cycle)	-268.14	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TCL-3	5% (1Cycle)	303.45	4% (1Cycle)	-281.63	6%, 2번째 Cycle에서 파괴
TCL-4	4% (1Cycle)	320.26	3% (1Cycle)	-303.82	6%, 1번째 Cycle에서 파괴

5.2 주관의 지름두께비의 효과

이 절에서는 주관의 지름두께비의 변화에 따른 모멘트 내력의 변화를 분석해 보았다. 그림 8에서와 같이 지관의 지름두께비를 고정시키고 주관의 지름두께비를 증가시킬 때 모멘트 내력이 감소하는 경향을 보여주며, 특히 TTC-3와 TTC-4의 해석체는 주관이 지관보다 상대적으로 얇아져 더 빠르게 파괴에 도달하게 됨을 알 수 있다. 해석체 TTC-1과 같이 주관의 지름두께비가 지관의 지름두께비 보다 상대적으로 상당히 작은 경우를 제외하고는 해석값과 KBC 기준값의 차이가 비교적 작게 나타났다.

그림 9는 주관의 지름두께비에 따른 모멘트-회전각에 대한 이력곡선 그래프를 나타내며, 여기서 해석체 TTC-1만 회전각이 4% radian일 때 최대 면내 휨모멘트 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 주관의 지름두께비가 지관의 지름두께비 보다 상대적으로 상당히 작은 경우 모멘트 내력은 증가하지만 상대적으로 연성은 감소한다는 것을 알 수 있다.

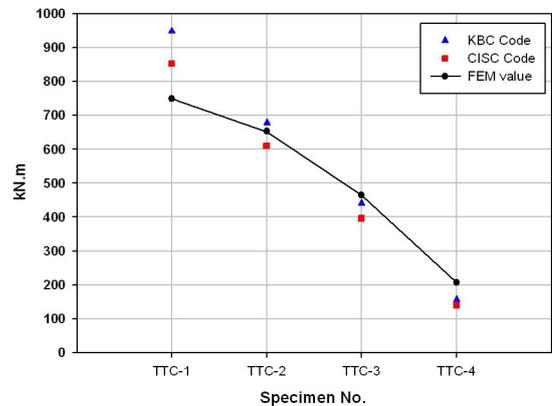


그림 8. 주관 지름두께비에 따른 모멘트 내력 (TTC 계열)

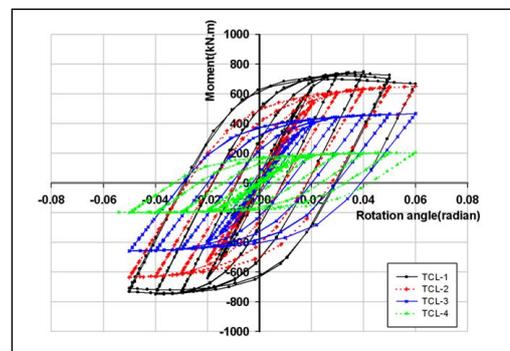


그림 9. 주관 지름두께비에 따른 이력곡선

그림 10은 주관의 지름두께비에 따른 최대 von Mises 등가소성응력분포를 보여주고 있으며, 주관의 지름두께비가 증가함에 따라 소성응력의 크기가 커짐을 알 수 있다. 주관의 세장비에 따라 주관과 지관의 접합부에서 다른 형태의 응력

집중 현상이 일어나며 파괴모드 또한 달라짐을 알 수 있다. 차후에 상대적인 지름두께비에 대한 깊은 연구와 실험이 필요하다고 사료된다.

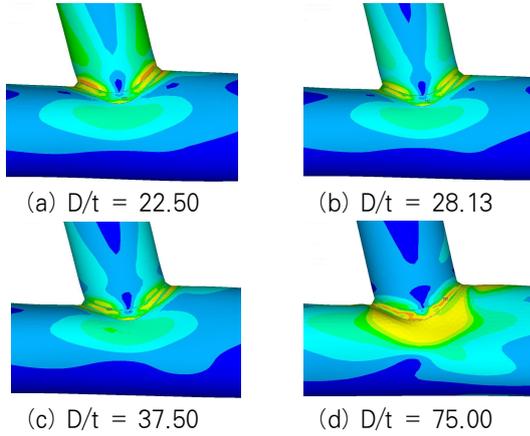


그림 10. 주관의 지름두께비에 따른 최대 von Mises 등가소성응력 분포 및 변형도

5.3 지관의 지름두께비 및 지름비에 의한 효과

이 절에서는 600MPa급 강재와 400MPa급 강재를 이용한 원형강관 T형 접합부에서 중요한 변수중의 하나인 주관 및 지관의 지름두께비 및 지름비의 변화에 따른 접합부의 거동을 알아보았다(표 1의 TDB 계열). 그림 11에 나타난바와 같이 지름비가 비교적 큰 TDB-7과 TDB-8를 제외하고는 해석값과 KBC 기준값이 거의 일치하는 경향을 보였다. 주관과 지관의 지름비의 증가와 함께 원형강관 T형 접합부의 모멘트 내력 또한 증가함을 보여주고 있다. 이미 예상한바와 같이, 600MPa급 강재를 적용한 T형 접합부의 최대 모멘트 내력은 400MPa급 강재보다 크며, 주관과 지관의 지름비가 증가할 때 강재의 항복강도에 따른 모멘트 내력의 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

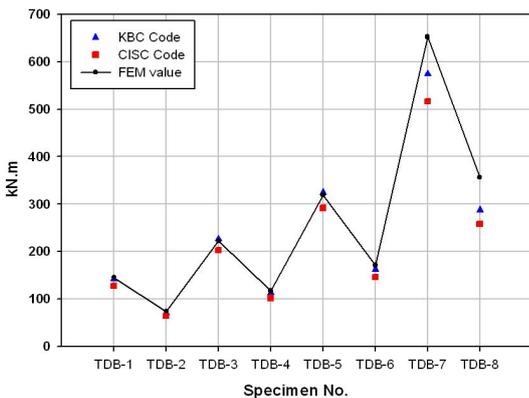


그림 11. 600MPa와 400MPa의 지름비 영향(TDB 계열)

그림 12의 원형강관 T형 접합부의 모멘트-회전각 이력곡선 그래프를 보면 앞에서 언급한바와 같이 주관과 지관의 지름비가 클수록 면내 휨모멘트 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 12로부터 모든 경우에서 회전각이 6% radian 일 때 최대 모멘트 값에 도달하며 이것은 주관과 지관의 지름비의 변화가 T형 접합부의 연성에는 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다.

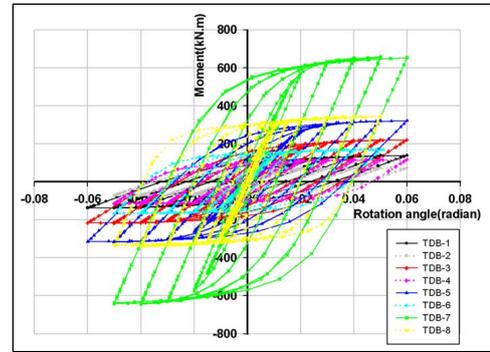


그림 12. 주관과 지관의 지름비에 따른 이력곡선(TDB 계열)

5.4 강재의 항복비에 의한 효과

그림 13은 강재의 재료특성에 의한 접합부의 거동을 알아보기 위해 600MPa급 고강도강의 항복비를 다르게 모델링하여(그림 5 참조) 해석한 결과를 나타내고 있다. 항복비가 1.0인 TYR-1 해석체에서 면내 휨모멘트 값이 가장 크게 나타났고, 항복비가 작아질수록 면내 휨모멘트 값이 작아지는 경향을 나타냈다. 그림 13에서 KBC 이론값과 해석값의 차이가 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 국내의 기준식에 고강도강을 적용할 경우 더욱 엄밀한 검증이 필요하다는 것을 예시하고 있다.

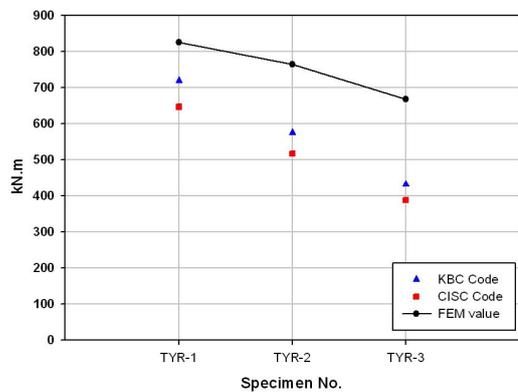


그림 13. 강재의 항복비에 따른 모멘트 내력(TYR 계열)

그림 14는 항복비에 따른 이력곡선 그래프를 나타내고 있으며, 항복비가 0.6과 0.8인 경우에는 회전각이 6% radian 일

때 최대 면내 휨모멘트 값이 나타나는 반면, 항복비가 1.0인 TYR-1 해석체에서는 회전각이 5% radian 일 때 최대 면내 휨모멘트 값이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 항복비가 커지게 되면 연성능력이 감소하게 됨을 알 수 있다.

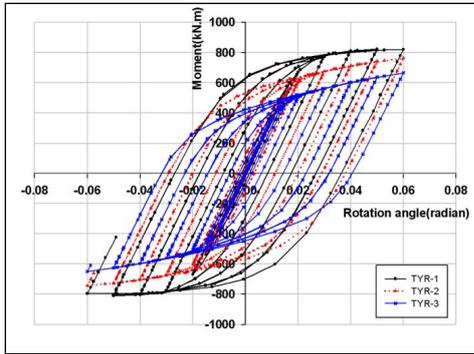


그림 14. 항복비에 따른 이력곡선(TYR 계열)

5.5 주관 압축응력에 의한 효과

이 절에서는 주관 압축응력이 원형강관 T형 접합부의 면내 휨 모멘트 내력에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 압축응력의 크기에 따른 해석을 수행하였다(표1의 TCL 계열). 이 때 지관에 작용 모멘트의 크기가 증가하는 동안 주관에 작용하는 압축응력은 일정한 상태를 유지하도록 하였다. 그림 15와 16의 유한요소해석 결과값과 이론값으로부터 주관에 작용하는 압축응력이 증가함에 따라 T형 접합부의 면내 휨 모멘트 내력이 감소함을 볼 수 있다. 또한 압축응력이 증가할 때 유한요소해석 결과값과 이론값의 차이가 커지는 것을 볼 수 있으며, 이는 KBC 기준식 (1)에서 적용되고 있는 주관 응력상관변수에 대한 면밀한 검토가 필요하다는 것을 예시하고 있다. 그림 16에서 압축응력이 가장 큰 TCL-1 해석체 (즉, 압축응력 = $0.9F_y$)인 경우 접합부의 회전각이 0.06 radian(그림 3에서의 변위하중 90mm과 일치)에 도달한 이후 급격한 모멘트의 감소 양상을 보이고 있다.

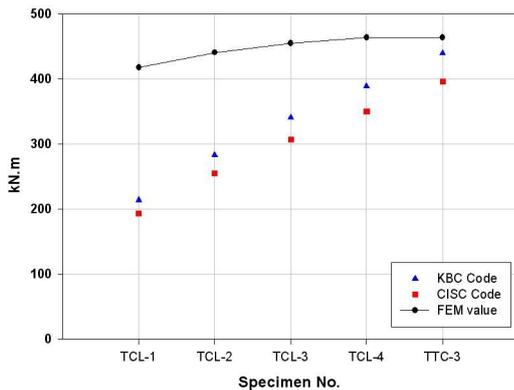


그림 15. 주관 압축응력에 따른 모멘트 내력(TCL 계열)

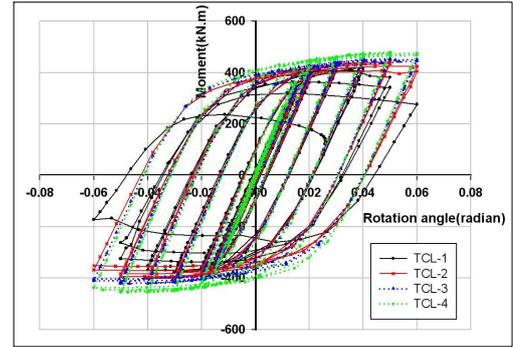


그림 16. 주관 압축응력에 따른 이력곡선(TCL 계열)

6. 결론

본 연구에서는 반복하중을 받는 600MPa급 고강도강 원형강관 T형 접합부의 주관과 지관의 다양한 기하학적 파라미터를 적용하여 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과로부터 원형강관 T형 용접 접합의 모멘트내력, 회전강성 및 파괴모드가 분석되었으며, 600MPa급 고강도 강재에 대한 사용성과 관련하여 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- (1) 주관에 비교적 큰 압축응력을 받는 경우를 제외하고는 원형강관 T형 접합부에 고강도 강재를 적용하여도 기존의 한계상태식의 결과가 안전측에 존재한다는 것을 입증하였으나, 연성능력의 저하로 인한 취성파괴에 대한 주의 요구됨을 알 수 있었다. CISC 설계기준의 강관접합부 한계상태식은 KBC2009에 비해 10%의 안전율을 가지고 있으나, 유한요소해석결과 KBC2009 설계기준에 비교해 볼 때 더욱 보수적인 설계방법으로 간주된다.
- (2) 주관과 지관의 상대적인 지름두께비에 따라 접합부에서의 응력분포가 달라지며 이에 따른 파괴모드 또한 달라짐을 알 수 있었다. 주관의 지름두께비가 지관의 지름두께비 보다 작은 경우 면내 휨 모멘트 내력은 증가하지만, 상대적으로 연성은 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 또한 주관과 지관의 지름비가 클수록 면내 휨모멘트 값이 증가하며, 주관과 지관의 지름비의 변화가 T형 접합부의 연성파괴에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.
- (3) 항복비가 0.8 보다 큰 고강도 강재를 사용할 경우 T형 접합부에서 연성인 강재보다 취성파괴의 형태가 쉽게 나타남을 알 수 있었다. 또한 주관에 작용하는 압축응력이 접합부의 면내 휨 모멘트 내력에 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다.
- (4) 모멘트 접합부의 파괴모드로부터 응력분포의 변화와 주관과 지관의 용접의 상세를 통한 최적설계에 대한 데이

터베이스 구축이 필요하며, 앞으로도 접합부의 여러 가지 구조물의 거동을 알아보고 이해하기 위해 접합부의 파라미터를 더욱 다양하게 변화시킨 해석적 연구와 이를 검증하기위한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

박금성, 이상섭, 배규웅(2009a) 면내 휨모멘트를 받는 지관 회전형의 각형강관 T형 접합부에 대한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 구조계, 대한건축학회, 제25권, 제4호, pp.135-142.

박금성, 이상섭, 최영환, 배규웅(2009b) 각형강관 T형 접합부의 면내 휨모멘트 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.451-459.

AISC (1997) *Specification for the design of steel hollow structural sections*, American Institute of Steel Construction, USA.

AISC (2006) *Seismic Design Manual*, American Institute of Steel Construction, American Institute of Steel Construction, USA.

CIDECT (2001) *Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static*

loading, Verlag TUV Rheinland.

Cute, D., Camo, S., and Rump, J.L. (1968) *Welded connections for square and rectangular structural steel tubing*, Research Report No. 292-10, Drexel Institute of Technology, Philadelphia, USA.

Duff, G. (1963) *Joint behavior of a welded beam-column connection in rectangular hollow section*, Ph.D. Thesis, The College of Aeronautics, Cranfield, England.

Packer, J.A. and Henderson, J.E. (1997) *Hollow structural section connections and trusses - a design guide*, 2nd ed., *Canadian Institute of Steel Construction*, Toronto, Canada.

Qin, F., Fung, T.C., and Soh, C.K. (2001) Hysteretic behavior of completely overlap tubular joints.

Quian, X.D., Choo, Y.S., Liew, J.Y.R., and Wardenier, J. (2007) Static strength of thick-walled CHS X-joints subjected to brace moment loadings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 9, pp.1278-1287.

(접수일자 : 2010. 12. 9 / 심사일 2010. 12. 14 / 심사완료일 2011. 3. 29)