

환보강재를 가진 T형 관이음부의 축방향 강도 평가

Axial Strength Evaluation for Tubular T-Joints with Internal Ring Stiffener

조현만* 류연선** 김정태***
Cho, Hyun-Man Ryu, Yeon-Sun Kim, Jeong-Tae

ABSTRACT

Tubular structures are widely used for offshore platforms and truss type structures. In this paper, nonlinear finite element analysis is used to assess the static strength of stiffened tubular T-joints subjected to compressive brace loading. This joints was modelled with and without internal ring stiffener. According to variation of ring geometries, the effect of ring stiffener for T-joints are investigated. Internal ring stiffener is found to be efficient improving ultimate strength of tubular joints. Relations of ring thickness and axial strength are observed considering geometric parameters of ring stiffeners.

1. 서 론

관형재(tubular member)는 다양한 구조적 장점을 가지고 있어서 해양구조물 및 육상구조물의 트러스 형식 등에 널리 사용되고 있다. 관이음부(tubular joint)는 관형재인 주부재(main member; chord)와 지부재(branch; brace)로 구성되어 있으며 주부재와 지부재의 연결형태로써 T형, X형, K형 등으로 나눌 수 있다. 교번하중 및 부가적인 하중조건에 대비하는 이음부의 강도강화 방법으로는 환보강재(ring stiffener)나 다이아프래임, 거셋 판을 사용하기도 하는데, 일반적으로 내부에 환보강재를 설치하는 방법이 널리 쓰여지고 있다. 이와 같이 보강하지 않은 이음부를 단순이음부(simple joint), 보강재 등으로 보강한 이음부를 보강이음부(stiffened joint)라고 한다. 단순이음부의 강도 평가는 여러 연구자들에 의하여 다양한 관이음부의 형상 및 하중조건에 대해 연구가 이루어졌지만,⁽¹⁾⁽²⁾ 보강이음부의 거동 및 강도평가에 대해서는 연구^{(3),(4),(5)}는 아직도 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 보강이음부 중에서 내부에 환보강재를 가진 T형 관이음부의 축방향 강도를 비선형 유한요소해석법은 사용하여 계산하고자 한다. 이음부 중앙에 설치한 환보강재의 폭과 두께를 변화시키면서 보강재가 구조물의 강도에 미치는 영향을 조사하고, 단순이음부의 강도와와의 관계를 도출하여 환보강 T형 관이음부 설계의 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 박사수료
** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수
***정회원 · 부경대학교 해양공학과 조교수

2. T형 관이음부의 형상과 파괴양식

2.1 T형 관이음부의 형상

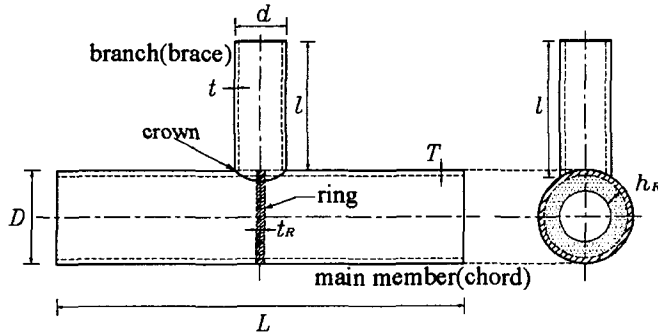


Fig. 1. Dimensions of internal ring stiffened tubular T-joints.

관이음부의 설계 및 해석에 있어서 부재의 외경 및 두께와 길이에 대한 무차원 계수들이 사용되어지는데, 길이계수인 $\alpha (=2L/D)$ 와 직경비 $\beta (=d/D)$, 주부재의 두께계수 $\gamma (=D/2T)$ 와 두께비인 $\tau (=t/T)$ 등이 있다. Fig. 1은 연결부 중앙에 한 개의 내부 환보강재를 가지는 T형 관이음부이다. 여기서, h_R 은 환보강재의 폭이며 t_R 은 두께이다.

2.2 T형 관이음부의 강도와 파괴양식

관이음부의 정적강도(static strength)는 비선형 하중-변위 관계에 있어서, 극한 내하능력(ultimate bearing capacity)과, 변형기준(deformation criteria) 그리고, 균열의 발단(visually observed crack initiation)등으로 나타내는데⁽⁶⁾, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 극한내하능력, 즉 극한강도로 정의한다.

T형 관이음부의 축방향력에 대한 정적강도를 결정함에 있어서, 동일한 T형 관이음부에 대해서 일반적으로 압축강도가 인장강도보다 낮기 때문에 설계시에는 압축하중이 기준치가 된다. 압축하중을 받는 이음부의 파손은 대부분 주부재의 벽의 좌굴과 소성대변형과 관련이 있다. T형 관이음부는 X형 관이음부와는 달리, 몇몇 파손 양식들은 주부재의 길이에 따라 결정된다. 연결부의 파손은 연결부의 국부적 파손, 즉 주부재 면의 소성화와 주부재의 굽힘작용과 전단에 의한 파손등에 의해 발생한다.

3. T형 단순 관이음부의 축방향 강도해석

3.1 T형 단순 관이음부의 수치모델

보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순이음부의 모델은 주부재의 직경(D)을 800mm로 하여 Table 1과 같이 16개의 이음부로 구성하였다. 본 연구에서는 축하중에 대하여 발생하는 주부재의 굽힘작용은 고려하지 않기 때문에 주부재의 길이를 6400mm로 고정하고, 부재들의 직경과 두께만을 변화하여 강도를 계산하였다. 이음부 재료의 항복응력은 $350N/mm^2$ 을 사용하였고, 하중은 지부재의 단부에 축방향 압축력을 재하한다.

Table 1. Research program of axially loaded simple T-joints

		$\tau = 1.0$				$\tau = 0.5$			
β	γ	12.5	16.67	20.0	25.0	12.5	16.67	20.0	25.0
		0.3	TA11	TA12	TA13	TA14	TA15	TA16	TA17
0.5		TA21	TA22	TA23	TA24	TA25	TA26	TA27	TA28

3.2 유한요소 모델과 경계조건

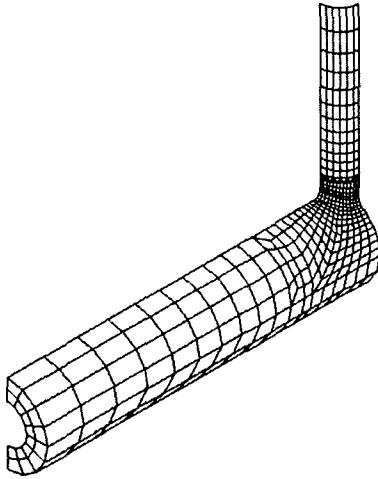


Fig. 2. Finite element mesh for tubular T-joint.

관이음부의 강도해석을 위해서 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 요소는 한 질점에 여섯 개의 자유도를 갖는 8절점 쉘요소(SHELL93)를 사용하였다. 전체 구조물의 대칭성을 이용하여 Fig. 2 과 같이 1/4만을 모델링하여 대칭 경계조건을 설정하였다. 주부재와 지부재의 용접접합부는 AWS D 1.1-96의 규정⁽⁷⁾에 따라서 모델링 하였다. 주부재의 끝에 단순 지지 형식으로 구속조건을 주었으며, 또한 주부재의 끝단면에는 두께가 100mm인 판을 주부재축에 수직으로 부착하여 모델링하여 하중재하 후에 주부재의 단부의 형상이 변형하는 것을 구속 하였다. 지부재에 받는 압축하중은 변위제어방법을 사용하여 부재에 작용하는 축방향력을 계산하였다. 비선형성해석을 위하여, 재료의 비선형성과 기하학적인 비선형성을 고려하였는데, 항복후의 재료의 특성에 대해서는 선형탄성-완전소성(simple linear-elastic, perfectly plastic) 응력-변형률관계로 규정하였다.

3.3 T형 단순 관이음부의 유한요소해석 결과

단순이음부 TA1과 TA2 모델의 총 16개의 이음부에 대하여 해석결과로 하중-변위관계를 얻을 수 있었다. Fig. 3~6에서 작용 하중과 변형량을 무차원화 하여 표시하였는데, 여기서, δ 는 접합부 crown부분에서의 절점의 지부재 축방향 변형량, F 는 지부재에 작용하는 압축하중, f_y 는 항복응력이다. 하중-변위관계에서 계산된 축방향강도는 Table 2와 3과 같다. 여기서 F_u 는 축방향 극한강도이다. 해석결과를 보면, 동일한 D에서 γ 의 값이 클수록 즉, T가 얇을 수록 무차원화한 강도가 증가하며, 동일한 γ 에서는 t 가 커질수록 극한강도가 감소한다.

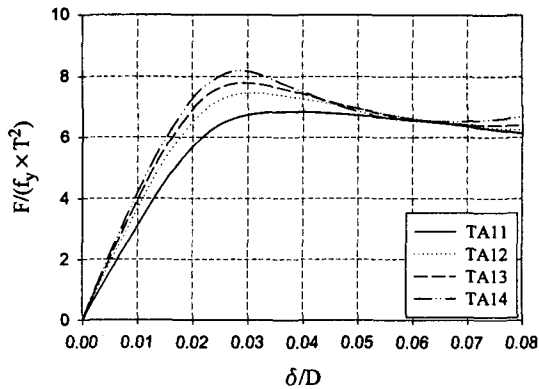


Fig. 3. Numerical load-displacement curves of TA11~14 models.

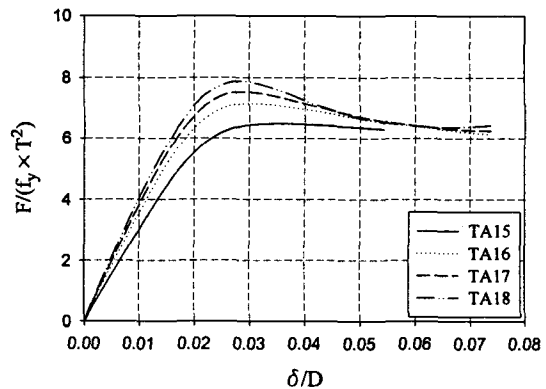


Fig. 4. Numerical load-displacement curves of TA15~18 models.

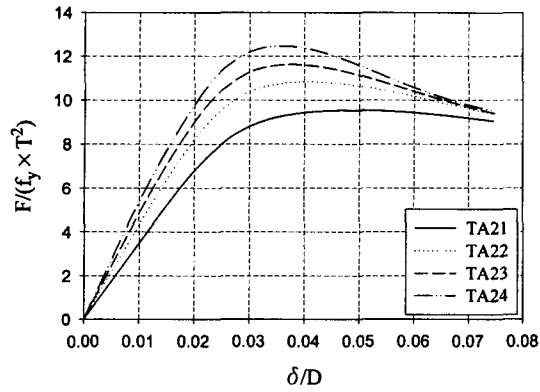


Fig. 5. Numerical load-displacement curves of TA21~24 models.

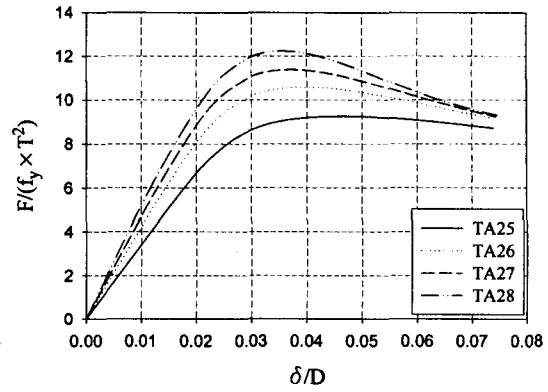


Fig. 6. Numerical load-displacement curves of TA25~28 models.

Table 2. Nominal dimensions and numerical results of TA1 models

Joints	Chord (mm)			Brace (mm)		Numerical results	
	D	T	L	d	t	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$
TA11	800	32	6400	240	32	2446	6.82
TA12	800	24	6400	240	24	1498	7.43
TA13	800	20	6400	240	20	1091	7.79
TA14	800	16	6400	240	16	734	8.19
TA15	800	32	6400	240	16	2320	6.47
TA16	800	24	6400	240	12	1436	7.12
TA17	800	20	6400	240	10	1051	7.51
TA18	800	16	6400	240	8	707	7.89

Table 3. Nominal dimensions and numerical results of TA2 models

Joints	Chord (mm)			Brace (mm)		Numerical results	
	D	T	L	d	t	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$
TA21	800	32	6400	400	32	3422	9.55
TA22	800	24	6400	400	24	2187	10.85
TA23	800	20	6400	400	20	1628	11.63
TA24	800	16	6400	400	16	1117	12.47
TA25	800	32	6400	400	16	3319	9.26
TA26	800	24	6400	400	12	2135	10.59
TA27	800	20	6400	400	10	1595	11.39
TA28	800	16	6400	400	8	1096	12.24

4. 환보강재를 가진 T형 관이음부의 축방향 강도해석

4.1 환보강재를 가진 T형 관이음부의 유한요소모델

보강된 T형 관이음부의 수치모델은 16개의 단순이음부 모델(Table 2~3)에 대하여 주부재와 지부재의 교차부분에 한 개의 환보강재를 설치하였다(Fig. 2). 재료의 특성과 하중조건은 단순이음부의 경우와 동일하게 설정하였다. 각각의 단순이음부에 대하여 환보강재의 폭(h_R)을 주부재의 직경에 대하여 0.05D(=40mm)부터 0.35D(=280mm)까지 8가지 모델로 구성하였다. 또한 각 환보강재에 대해 보강재의 두께(t_R)의 영향을 고찰하기 위해서 t_R 을 주부재의 두께에 대해서 0.25T부터 2.0T까지 6개의 경우(Case 1~6)로 Table 4와 같이 형성하였다. 유한요소해석시에 수행한 비선형 해석과정과 경계조건은 단순이음부의 해석과정과 동일하게 설정하였다.

Table 4. Geometric properties of internal ring stiffeners

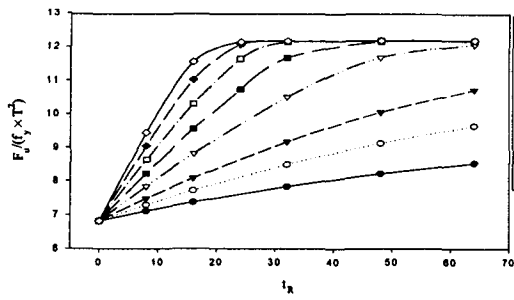
h_R	0.05D	0.075D	0.1D	0.15D	0.2D	0.25D	0.3D	0.35D
	40mm	60mm	80mm	120mm	160mm	200mm	240mm	280mm
t_R	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6		
	0.25T	0.5T	0.75T	1.0T	1.5T	2.0T		

4.2 유한요소해석 결과 및 고찰

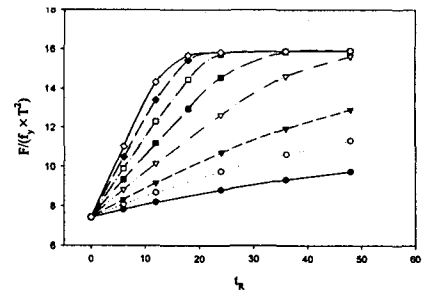
내부에 환보강재를 가진 T형 관이음부의 유한요소 해석결과로 보강재의 폭(h_R)과 두께(t_R)에 대한 축방향 강도의 변화를 Fig. 7~8과 같이 구하였다. Fig. 7은 단순 TA1 모델에 내부 환보강재를 설치한 보강 TA1 모델의 해석결과이고, Fig. 8은 단순 TA2 모델에 내부 환보강재를 설치한 보강 TA2 모델의 해석결과이다.

해석결과로 환보강재를 설치함으로써 단순 이음부에 비해 축방향 강도가 증가하였고, 환보강재의 폭과 두께가 증가함에 따라서 비례적으로 강도가 증가하였다. TA1 모델의 경우($d=0.3D$)에 환보강 이음부의 강도가 단순이음부에 비하여 70%에서 160%정도 증가하였고, TA2 모델($d=0.5D$)에서는 30%에서 95%의 강도가 증가하였다. 또한 β 의 값이 작을수록 -주부재의 직경에 대하여 지부재의 직경이 작을수록- 보강전의 강도에 대한 보강후의 강도의 상대적 증가량이 커진다. 동일 β 값에 대하여는 $\gamma(=D/2T)$ 가 커질수록 -주부재의 두께가 얇아질수록- 강도의 상대적 증가량이 커진다.

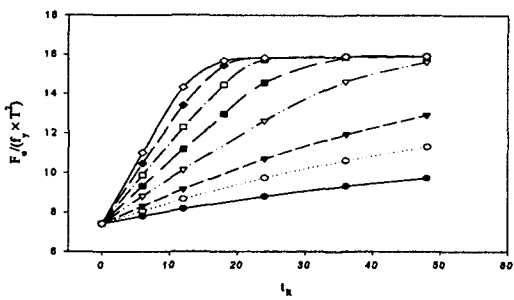
보강재의 기하학적 변수(두께, 폭)의 변화에 따른 강도의 증가량을 살펴보면, 보강재의 폭이 작을 때는 보강재의 두께에 대하여 축방향 강도가 전반적으로 선형적으로 증가하였으나, 보강재의 폭이 커질수록 보강재 두께가 증가하더라도 강도의 증가에는 영향을 끼치지 못함을 보인다. 특히 보강재의 폭이 주부재 폭이 20%이하이고, 보강재의 두께가 주부재 두께보다 작을 때에는 보강재의 두께와 강도와와의 관계가 거의 선형적임을 알수 있다. 환보강재의 폭이 주부재의 직경의 25%이상인 경우($h_R \geq 200mm$)에 보강재의 두께가 일정 수치 이상이 되면 강도가 더 이상 증가하지 않는다. h_R 이 200mm 이상인 경우에, 보강 TA1 모델에서는 환보강재의 두께가 주부재의 두께 이상일 때 보강효과가 증가하지 않았고, 또한, 보강 TA2 모델에서도 환보강재의 두께가 주부재 두께의 75%(case 4) 이상일 때 경우에도 보강효과가 증가하지 않는다. 환보강재의 두께가 지부재의 두께의 1.5배 이상인 경우에 보강재의 폭이 지부재의 직경의 15%이하에서는 폭이 증가함에 따라 강도가 증가하였으나, 그 이상인 경우에는 강도의 증가가 없었다.



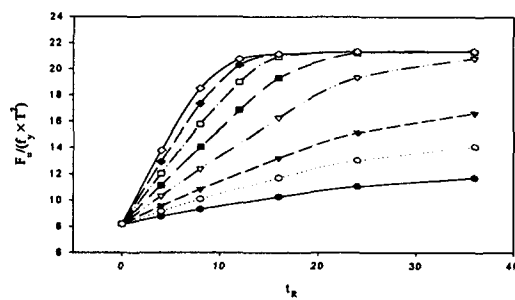
(a) Ring stiffened TA11 models



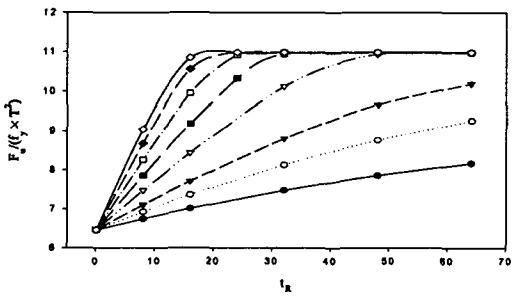
(b) Ring stiffened TA12 models



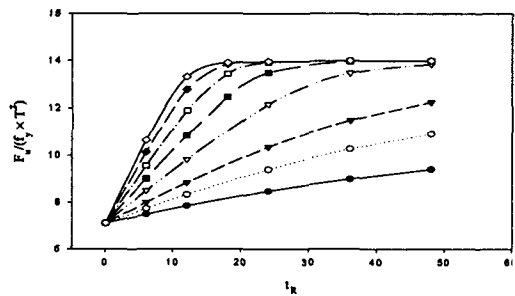
(c) Ring stiffened TA13 models



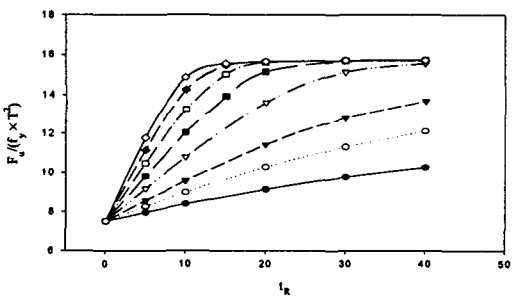
(d) Ring stiffened TA14 models



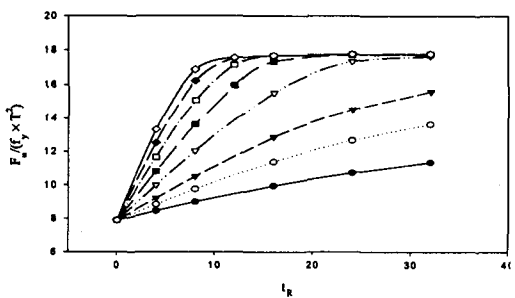
(e) Ring stiffened TA15 models



(f) Ring stiffened TA16 models

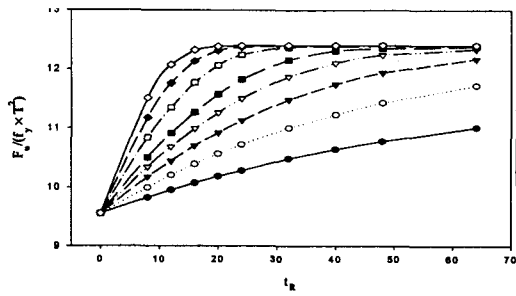


(g) Ring stiffened TA17 models

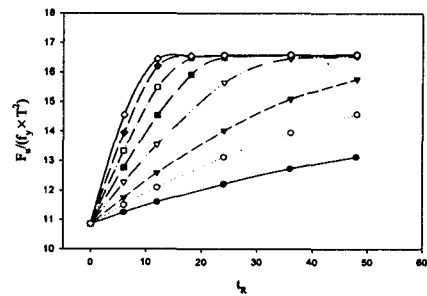


(h) Ring stiffened TA18 models

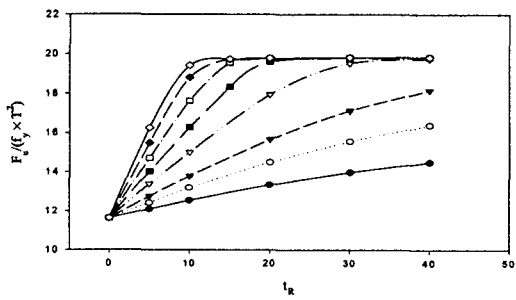
Fig. 7. Axial strength contours of TA1 models with internal ring stiffeners.



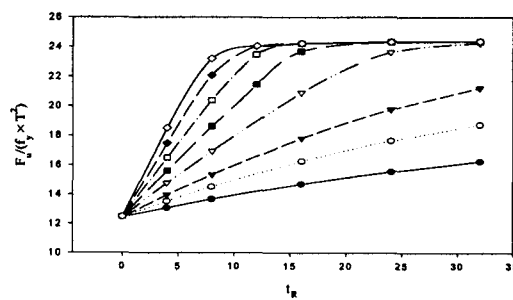
(a) Ring stiffened TA21 models



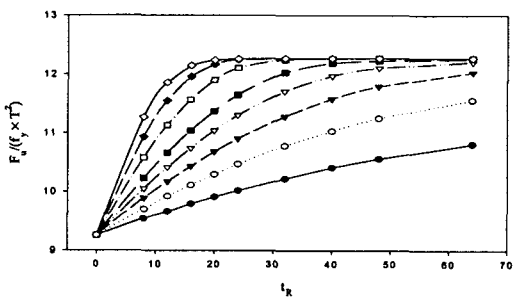
(b) Ring stiffened TA22 models



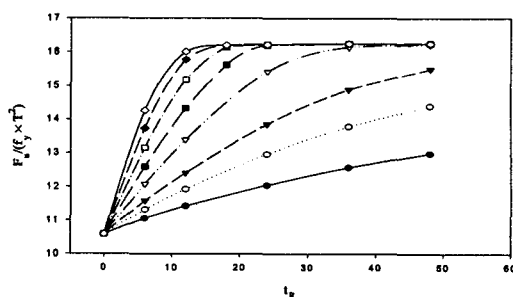
(c) Ring stiffened TA23 models



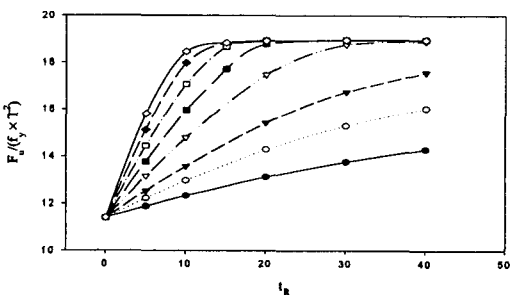
(d) Ring stiffened TA24 models



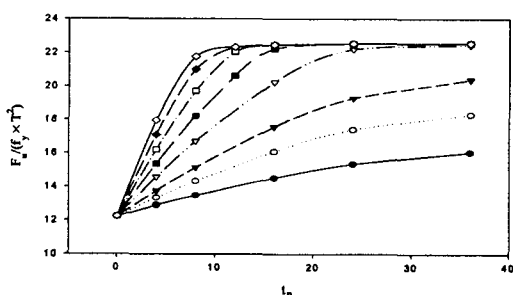
(e) Ring stiffened TA25 models



(f) Ring stiffened TA26 models



(g) Ring stiffened TA27 models



(h) Ring stiffened TA28 models

Fig. 8. Axial strength contours of TA2 models with internal ring stiffeners.

5. 결 론

본 연구에서는 내부에 한 개의 환보강재를 가진 T형 관이음부의 축방향강도를 유한요소법을 사용하여 계산하였다. 주부재와 지부재의 직경비가 0.3과 0.5인 두 가지 경우에 대하여, 주부재의 두께와 지부재의 두께를 변화시키면서 16개의 단순 이음부를 모델링 하였다. 이러한 단순이음부에 환보강재를 설치하고, 환보강재의 폭을 주부재 폭의 0.05배에서 0.35배까지, 보강재 두께를 주부재의 두께의 0.25배에 2배까지 변화시켜 보강이음부의 강도해석을 수행하였다. 연구결과로 T형 관이음부에 내부 환보강재를 설치했을 때의 보강효과에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환보강재형을 설치함으로써 단순이음부에 비해 축방향 강도가 증가하였다.
- 2) 보강을 함으로써 TA1 모델에서는 최대 95%, TA2 모델에서는 최대 160%정도 강도가 증가하였다.
- 3) 주부재에 대한 지부재의 직경이 작을수록 보강효과가 증대되며, 동일한 지부재의 크기에 대해서는 $\gamma (=D/2T)$ 값이 커질수록 즉, 주부재의 두께가 작을수록 상대적 강도증가량이 커진다.
- 4) 보강재의 폭이 주부재 폭의 20%이하이고, 보강재의 두께가 주부재의 두께보다 작을 때에는 보강재의 두께와 이음부의 축방향 강도와와의 관계가 거의 선형적으로 증가한다.
- 5) 보강재의 두께가 주부재의 직경의 25%이상인 경우, 보강 TA1 모델에서는 환보강재의 두께가 주부재의 두께 이상일 때에, 그리고, 보강 TA2 모델에서는 환보강재의 두께가 주부재의 두께의 75%이상일 때에는 보강효과의 증가는 나타나지 않는다.
- 6) 환보강재의 두께가 지부재의 두께의 1.5배 이상인 경우에 보강재 폭이 지부재의 직경의 15%이하에서는 폭이 증가함에 따라 강도가 증가하였으나, 그 이상인 경우에는 보강효과의 증가는 나타나지 않는다.

참고문헌

1. Dextor, E.M., Lee, M.M.K., "Static Strength of Axially Loaded Tubular K-Joints", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 2, 1999, pp.194~201.
2. Vegte, G.J., Wardenier, J., "The Static Behaviour of Multiplanar Tubular Steel TT-Joints Excluding the Effects of Chord Bending", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, ISOPE, Vol. 5, NO. 4, 1995, pp.308~316.
3. Thandavamoorthy, T.S., etc., "Behavior of internally ring-stiffened joints of offshore platforms", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 11, 1999, pp.1348~1352.
4. 조현만, 류연선, 김정태, "X형 관이음부의 보강방법에 따른 극한강도 해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제13권 제2집, 2000, pp.230~237.
5. 조현만, 류연선, 김정태, "고리형 내부 보강재를 가진 X형 관이음부의 축방향 강도 평가", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제14권 제1집, 2001, pp.162~169.
6. Marshall, P.W., *Design of Welded Tubular connections*, Wlservier Science Publishers, The Netherlands, 1992, p.412.
7. American Welding Society, *Structural Welding Code-Steel*, AWS D1.1-96, 1996.