

## 고리형 내부 보강재를 가진 X형 관이음부의 축방향 강도 평가

### Axial Strength Evaluation for Tubular X-Joints with Internal Ring Stiffener

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

#### ABSTRACT

Tubular joints are usually reinforced using thicker can section or ring stiffeners to increase the load carrying capacity. In this paper, a numerical study has been performed for evaluation of axial strength for X-joints with internal ring stiffener. The finite element analysis software was used for nonlinear strength analysis. According to variation of ring geometries, the effect of ring stiffener for X-joints are investigated. Internal ring stiffener is found to be efficient improving ultimate strength of tubular joints. Relations of thickness of ring 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 있는데, 일반적으로 주부재의 일부분의 두께를 증가시키는 방법으로 이음부의 구조강도를 강화한다. 이것은 과도한 국부변형과 국부최대응력을 감소시킴으로써 연결부의 정적강도와 피로수명을 향상시키는 역할을 한다. 또한, 교번하중 및 부가적인 하중조건에 대비하는 이음부의 강도강화 방법으로는 고리형 보강재(ring stiffener)나 다이아프래임, 거셋 판을 사용하기도 하는데, 일반적으로 내부에 고리형 보강재를 설치하는 방법이 널리 쓰여지고 있다. 이와 같이 보강하지 않은 이음부를 단순이음부(simple joint), 보강재 등으로 보강한 이음부를 보강이음부(stiffened joint)라고 한다.

관이음부의 강도평가 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 모형제작실험을 통한 방법과<sup>(1),(2)</sup> 유한요소법과 같은 수치실험을 통한 방법<sup>(3)</sup>, 그리고, 위의 두 가지 방법을 통해 구한 계수들을 사용한 단순화된 이론적 모형을 이용한 방법<sup>(4)</sup>이 있다. 모형실험을 통한 방법은 실제 구조물의 현상을 잘 표현하는 장점이 있지만, 최근에는 수치실험을 통한 경제적인 방법이 널리 사용되어진다. 특히, 단순이음부의 강도 평가는 여러 연구자들에 의하여, 다양한 관이음부의 형상 및 하중조건에 대해 연구가 이루어졌지만<sup>(3)</sup>, 보강이음부의 거동 및 강도평가에 대해서는 연구가 아직도 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 보강이음부 중에서 널리 사용되는 고리형 내부 보강재를 가진 X형 관이음부의 축

\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 연구교수  
\*\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수  
\*\*\*정회원 · 부경대학교 해양공학과 조교수

방향 강도를 유한요소법은 사용하여 계산하고자 한다. 이음부 중앙에 설치한 고리형 보강재의 폭과 두께를 변화시키면서 보강재가 구조물의 강도에 미치는 영향을 조사하고, 단순이음부의 강도와와의 관계를 도출하여 보강이음부 설계의 기초자료를 제시하고자 한다

## 2. 관이음부의 형상과 강도

### 2.1 관이음부의 형상

관이음부의 형상에 따른 분류는 매우 다양하며, 이는 주부재와 지부재의 연결형태로써 X형, T형, K형 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 대상 모델이 되는 X형 관이음부는 Fig. 1과 같다. 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. 2는 연결부 중앙에 한 개의 고리형 내부 보강재를 가지는 관이음부의 형상이다. 여기서,  $h_r$ 은 고리형 보강재의 폭이며,  $t_r$ 은 두께이다.

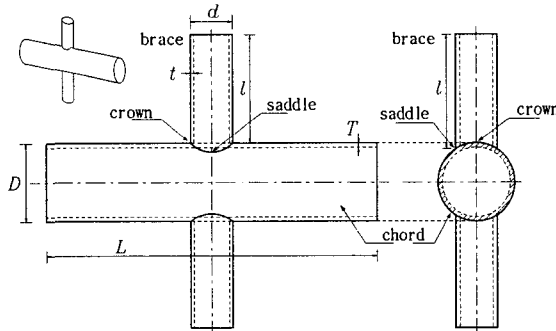


Fig. 1 Dimensions of tubular X-joints.

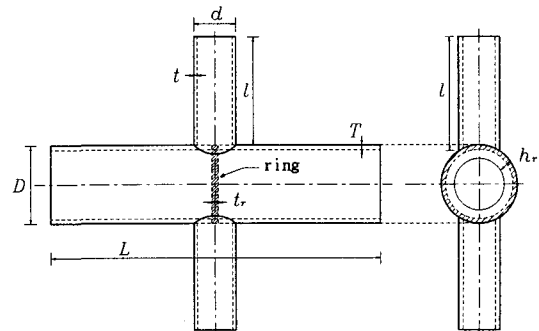


Fig. 2 Dimensions of internally ring stiffened tubular X-joint.

### 2.2 X형 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, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 극한내하능력, 즉 극한강도로 정의한다. 이음부의 지부재에 인장하중을 받는 경우에 있어서, 이음부의 강도가 압축의 경우보다 증가하는데, 이는 변형을 경화의 영향에 의한 것이다. 따라서 축하중을 받는 이음부 설계 시에는 압축하중이 기준치가 된다. 관이음부의 강도를 계산하기 위해서는 모형실험적 방법과 수치실험, 그리고 단순화된 이론적 모형을 사용하는 방법이 있다. 이론적 모형의 해석모델에는 펀칭전단 모형을 사용하는 방법과 링 모델을 이용하는 방법이 있다<sup>(4)</sup>.

X형 관이음부는 파괴양식은 일반적으로 지부재가 압축 및 인장력을 받을 때 주부재의 소성 변형이 발생한다. 이러한 파괴유형은 특히 인장하중 재하 시에 지부재나 주부재의 벽, 혹은 용접접합부에 국부적인 균열을 동반한다. 지부재와 주부재의 직경비( $\beta$ )가 작은 경우에는 지부재와 주부재의 접합부에 주부재의 벽을 따라 펀칭 전단에 의한 파괴가 발생하기도 한다. 이러한 종류의 파괴유형은 지부재가 인장력을 받을 때 일반적으로 발생한다. 지부재가 압축력을 받으며, 주부재의 직경에 대한 두께의 비( $\gamma$ )가 클 때는 이음부 내에서 국부적인 좌굴현상이 발생할 수 있다. 지부재와 주부재에 동시에 압축력이 작용할 때에 이러한 파괴양식은 더욱 민감하게 발생한다.

### 3. X형 단순 관이음부의 축방향 강도해석

#### 3.1 X형 단순 관이음부의 수치모델

보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순이음부의 모델은 주부재의 직경(D)을 800mm로 하여 Table 1과 같이 12개의 이음부로 구성하였다. Table 1에서 두 가지 경우의  $\beta$ 에 대하여 네 가지 경우의  $\gamma$ 로 모델을 구성하였다.  $\beta$  값이 0.5인 경우에는  $\tau$ 가 0.5인 경우도 추가로 구성하였다. 주부재의 길이(L)는 구조물의 극한강도에 영향을 주지 않도록 하기 위하여, 주부재의 직경의 8배인 6400mm로 설정하였다<sup>(6)</sup>. 이음부 재료의 항복응력은  $290N/mm^2$ 을 사용하였고, 하중은 지부재의 단부에 축방향 압축력을 재하한다.

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

$\beta \backslash \gamma$	$\tau = 1.0$				$\tau = 0.5$			
	12.5	16.67	20.0	25.0	12.5	16.67	20.0	25.0
0.5	XA11	XA12	XA13	XA14	XA15	XA16	XA17	XA18
1.0	XA21	XA22	XA23	XA24				

#### 3.2 유한요소 모델링

유한요소해석을 위해서 상용프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 요소는 한 절점에 여섯 개의 자유도를 갖는 8절점 쉘 요소(SHELL93)를 사용하였다. 하중 모델링 시에 지부재에 가해지는 축방향력은 변위제어방법을 사용하였으며, 지부재의 단부에 변위를 증가시켜 부재에 작용하는 축방향력을 계산하였다. 전체 구조물의 대칭성을 이용하여 1/4만을 모델링하여 경계조건을 설정하였다. 비선형성해석을 위하여, 재료의 비선형성과 기하학적인 비선형성을 고려하였는데, 항복후의 재료의 특성에 대해서는 선형탄성-완전소성((simple linear-elastic, perfectly plastic) 응력-변형률관계로 규정하였다.

#### 3.3 X형 단순 관이음부의 유한요소해석 결과

Fig. 3~5와 Table 2와 3은 단순이음부 모델인 XA1과 XA2 모델의 유한요소해석 결과이다. Fig. 3~5는 하중-변형 관계를 나타내는 그림이며,  $\delta$ 는 집합부 crown부분에서의 절점의 축방향 변형량( $\delta$ )이다. 작용 하중과 변형량은 무차원화 하여 표시하였다. 여기서,  $F$ 는 지부재에 작용하는 압축하중,  $F_u$ 는 극한강도,  $f_y$ 는 항복응력,  $T$ 는 주부재의 두께,  $D$ 는 주부재의 직경이다. 해석결과를 보면, 동일한  $D$ 에서  $\gamma$ 의 값이 클수록 즉,  $T$ 가 얇을 수록 강도가 증가하며, 동일한  $\gamma$ 에서는  $\tau$ 가 커질수록 극한강도가 감소한다.

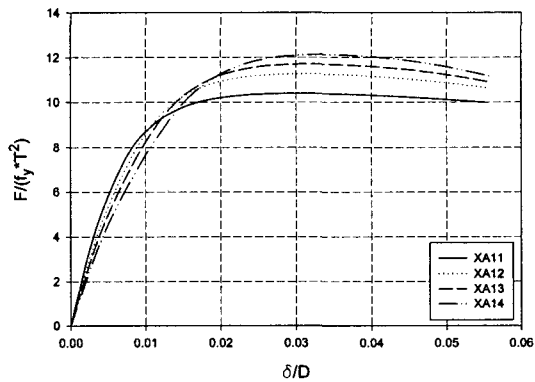


Fig. 3. Numerical load-displacement curves of XA11~4 models.

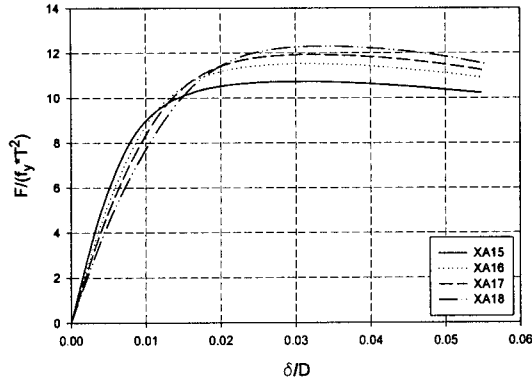


Fig. 4. Numerical load-displacement curves of XA15~8 models.

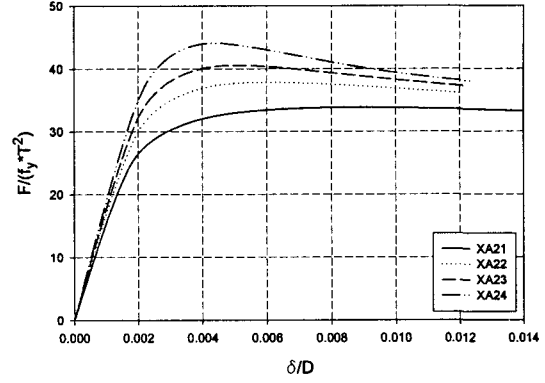


Fig. 5. Numerical load-displacement curves of XA21~4 models.

Table 2. Nominal dimensions and numerical results of XA1 models

Joints	Chord (mm)			Brace (mm)		Numerical results	
	D	T	L	d	t	$F_u$ (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$
XA11	800	32	6400	400	32	3084	10.384
XA12	800	24	6400	400	24	1880	11.257
XA13	800	20	6400	400	20	1357	11.698
XA14	800	16	6400	400	16	900	12.129
XA15	800	32	6400	400	16	3183	10.720
XA16	800	24	6400	400	12	1925	11.523
XA17	800	20	6400	400	10	1383	11.924
XA18	800	16	6400	400	8	914	12.312

Table 3. Nominal dimensions and numerical results of XA2 models

Joints	Chord (mm)			Brace (mm)		Numerical results	
	D	T	L	d	t	$F_u$ (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$
XA21	800	32	6400	800	32	10035	33.795
XA22	800	24	6400	800	24	6314	37.800
XA23	800	20	6400	800	20	4702	40.538
XA24	800	16	6400	800	16	3274	44.093

#### 4. 고리형 보강재를 가진 X형 관이음부의 축방향 강도해석

##### 4.1 보강된 X형 관이음부의 수치모델

보강된 X형 관이음부의 수치모델은 3장에서 설정한 12개의 단순이음부 모델(XA1, XA2)에 대하여 주부재와 지부재의 교차부분에 한 개의 고리형 내부 보강재를 설치하였다(Fig. 2). 재료의 특성과 하중조건은 단순이음부의 경우와 동일하게 설정하였다. 각각의 단순이음부에 대하여 보강재의 고리의 폭( $h_r$ )을 주부재의 직경에 대하여 0.05D(=40mm)부터 0.375D(300mm)까지 8가지 모델로 구성하였다. 또한, 각 보강재에 대해 고리의 두께( $t_r$ )의 영향을 고찰하기 위해서,  $t_r$ 을 주부재의 두께에 대해서 0.25T부터 2.0T까지 9개의 경우(Case 1~9)로 Table 4와 같이 형성하였다.

Table 4. Geometric properties of internal ring stiffeners

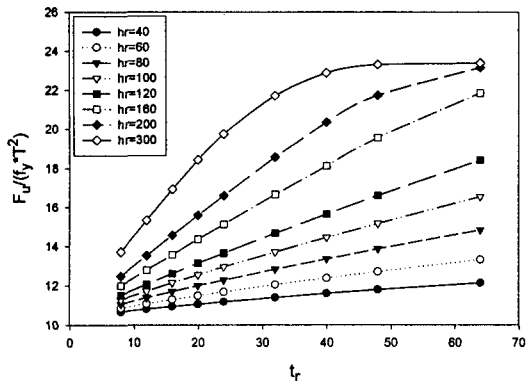
$h_r$	0.05D	0.075D	0.1D	0.125D	0.15D	0.2D	0.25D	0.375D	
	40mm	60mm	80mm	100mm	120mm	160mm	200mm	300mm	
$t_r$	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
	0.25T	0.375T	0.5T	0.625T	0.75T	1.0T	1.25T	1.5T	2.0T

##### 4.2 유한요소해석 결과 및 고찰

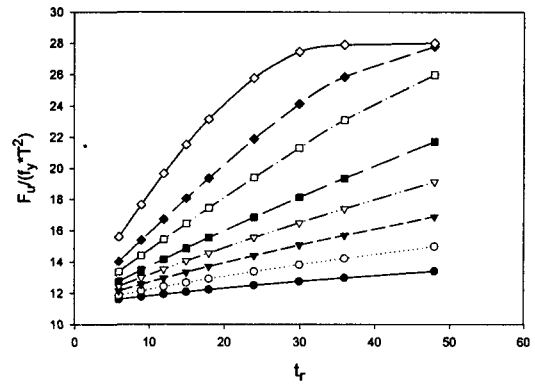
유한요소해석시에 수행한 비선형 강도 해석은 단순이음부의 해석과 동일하게 하였다. Fig. 6과 7은 단순이음부에 고리형 내부보강재를 설치한 관이음부의 극한강도를 유한요소법을 사용하여 구한 결과이다. 보강이음부들의 고리형 보강재의 폭( $h_r$ )과 두께( $t_r$ )에 대한 축방향강도의 변화를 나타낸 것으로, 보강재의 폭과 두께가 증가함에 따라서 강도가 증가한다. 주부재의 직경이 지부재의 직경의 두 배인, 보강된 XA1 모델의 해석결과(Fig. 6)를 보면,  $h_r$ 이 0.05D(=40mm)에서 0.15D(=120mm)까지는  $t_r$ 이 증가함에 따라 축방향 강도가 선형적으로 증가한다.  $h_r$ 이 0.2D(160mm)일 때, 지부재와 주부재의 두께가 동일한 경우(XA11~XA14)에  $t_r$ 과 극한강도와의 관계가 선형적으로 나타나지만, 지부재와 주부재의 두께가 다른 경우(XA15~XA18)에는  $t_r$ 이 1.5T와 2.0T 사이에서 강도의 증가율이 감소한다. 보강재의 폭이 주부재의 직경에 비해 비교적 클 때( $h_r$ =0.25D, 0.375D),  $t_r$ 이 작은 경우에는 선형적으로 강도가 증가하나,  $t_r$ 이 커질수록 강도의 증가량이 둔화된다. 특히,  $h_r$ 이 0.375D(300mm)일 때, 보강재의 두께가 주부재의 두께보다 큰 경우에는 강도의 증가가 거의 나타나지 않는다.

주부재와 지부재의 직경이 동일한, 보강된 XA2 모델의 해석결과(Fig. 7)를 보면,  $h_r$ 이 0.05D에서 0.20D(160mm)까지는  $t_r$ 이 증가함에 따라 극한강도가 선형적으로 증가한다.  $h_r$ 이 0.25D(200mm)의 경우에는  $t_r$ 이 1.5T까지는 강도가 선형적으로 증가하나, 그 이후에는 증가율이 감소함을 보인다.  $h_r$ 이 0.375D(300mm)인 경우에는  $t_r$ 이 0.75T될 때까지는 강도가 증가하나,  $t_r$ 이 T보다 커지면 강도의 증가율은 거의 없다.

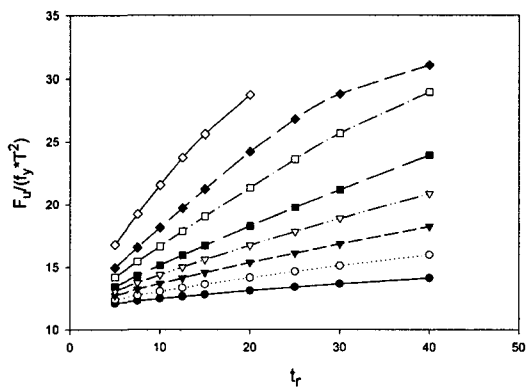
보강된 XA1 모델과 XA2 모델의 해석결과에서 고리형 보강재의 폭이 작을 때는 보강재의 두께와 강도가 전반적으로 선형적으로 증가함을 알 수 있으나, 일정 수치 이상으로  $h_r$ 이 커지면,  $t_r$ 이 증가하더라도 강도의 보강에는 영향을 끼치지 못하는 것을 알 수 있다. 그리고, 보강재의 두께가 주부재의 두 배일 때는  $h_r$ 이 0.25D(200mm) 이상 증가하더라도 강도증가에 큰 영향을 끼치지 못함을 보인다.



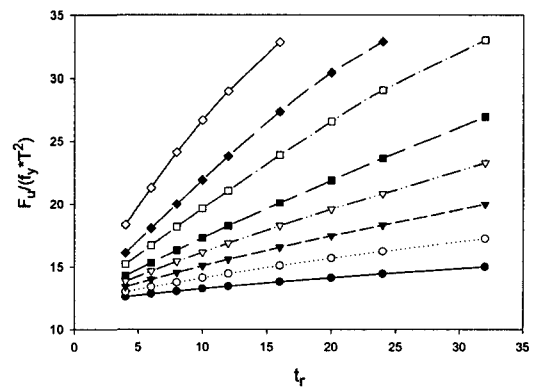
(a) Stiffened XA11 models



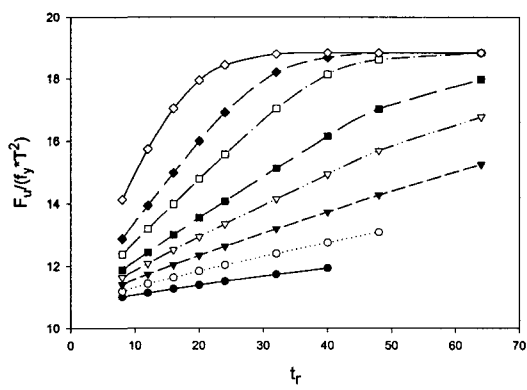
(b) Stiffened XA12 models



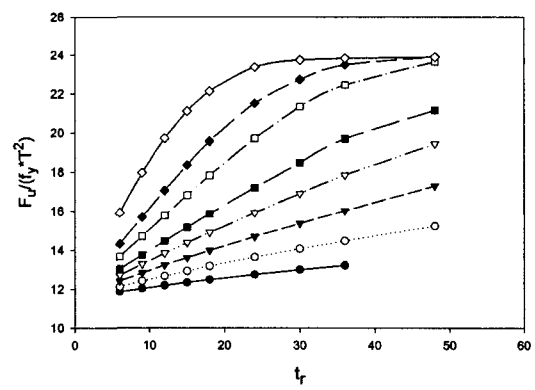
(c) Stiffened XA13 models



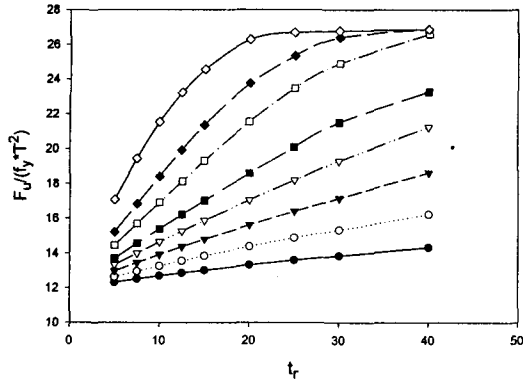
(d) Stiffened XA14 models



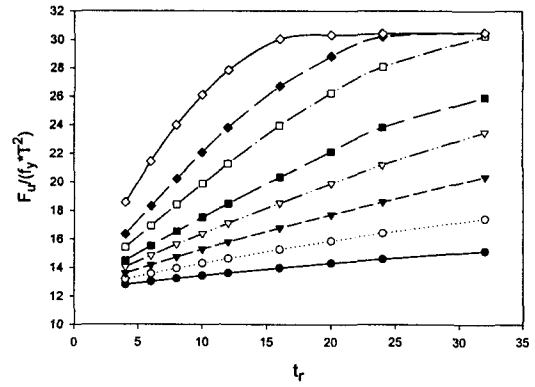
(e) Stiffened XA15 models



(f) Stiffened XA16 models

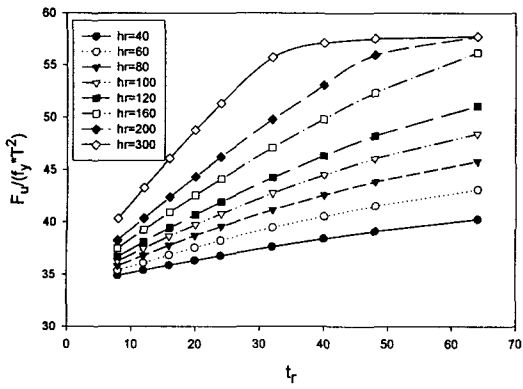


(g) Stiffened XA17 models

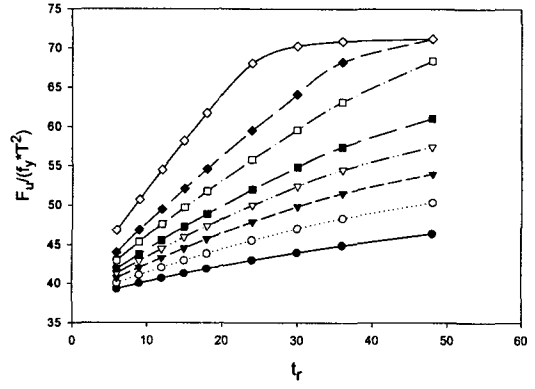


(h) Stiffened XA18 models

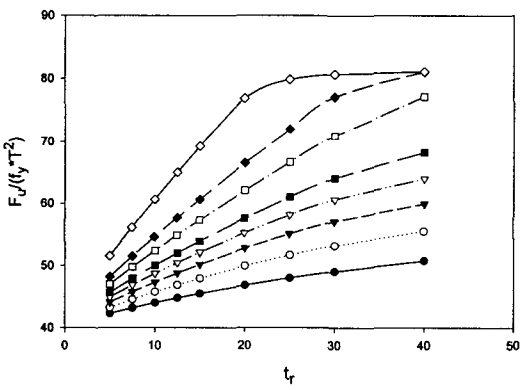
Fig. 6. Axial strength contours of XA1 models with internal ring stiffeners.



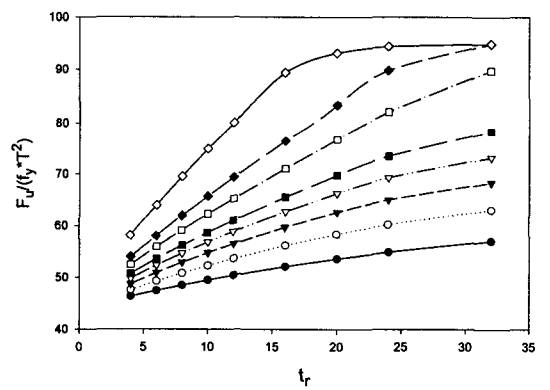
(a) Stiffened XA21 models



(b) Stiffened XA22 models



(c) Stiffened XA23 models



(d) Stiffened XA24 models

Fig. 7. Axial strength contours of XA2 models with internal ring stiffeners.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고리형 내부 보강재를 가진 X형 관이음부의 축방향 강도를 유한요소해석 프로그램을 사용하여 계산하였다. 주부재와 지부재의 직경이 동일한 경우와 주부재의 직경이 지부재의 두 배인 경우에 대해,  $\gamma$ 를 12.5부터 25사이에서 변화시켜 12개의 수치모형 단순이음부를 구성하였다. 각 이음부에 고리형 내부 보강재를 설치하고, 보강재의 폭과 두께를 변화시켜 보강이음부들을 해석하였다. 연구결과로 고리형 내부 보강재를 가진 X형 관이음부의 축방향 강도에 대한 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 고리형 내부 보강재를 설치함으로써 단순이음부에 비해 축방향 강도가 증가하였다.
- 2) 보강재의 폭이 주부재 직경의 20%이하인 경우에는 보강재의 두께에 대해서 강도가 선형적으로 증가하였다.
- 3) 보강재의 폭이 주부재 직경의 25%이고 보강재의 두께가 주부재의 두께보다 작은 경우에는 보강재의 두께와 강도의 관계가 선형적이거나, 두께가 그 이상일 경우에는 강도의 증가율이 감소한다.
- 4) 보강재의 폭이 주부재 직경의 37.5%인 경우, 보강재의 두께와 강도의 관계가 선형적으로 나타나지 않으며 또한, 보강재의 두께가 주부재의 두께보다 커지더라도 강도의 증가율은 미소하다.

차후에 본 연구결과를 바탕으로, 다양한 하중 조건에 대해 추가적인 수치실험을 통해 기존의 단순이음부의 강도 산정식을 기초로 한 고리형 내부 보강이음부의 강도산정식의 개발이 필요하다.

## 참고문헌

1. Bolt, H.M, Billington, C.J., Ward, J.K, "Results from large-scale ultimate load tests on tubular jacket frame structures", *OTC 7451*, 1994, pp.303~312.
2. 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.
3. Vegte G.J. van der, "The static strength of uniplanar and multiplanar tubular T- and X-joints", Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1995, p.378.
4. Wardenire, J., *Hollow section Joints*, Delft University Press, 1982, p.10-46.
5. 조현만, 류연선, 김정태, "X형 관이음부의 보강방법에 따른 극한강도 해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제13권 제2집, 2000, pp.230~237.