한국해양공학회지 제18권 제6호, pp 70~78, 2004 (ISSN 1225-0767)

내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도

조현만* · 류연선**
*삼성물산 건설부문 토목사업본부 부산신항 북컨테이너 2-1
**부경대학교 해양공학과

Static Strength of Internally Ring-Stiffened Tubular T-Joints

HYUN-MAN CHO*, YEON-SUN RYU**
*Civil Department, Busan Newport North Container 2-1, Samsung Engineering and Construction, jinhae, Korea
**Department of Ocean Engineering, Pukyong National Univ., Busan, Korea

KEY WORDS: Tubular Joint 관이음부, Ring Stiffener 환보강재, Static Strength 정적강도, Strength Estimation Formula 강도산정식, Finite Element Analysis 유한요소해석

ABSTRACT: *In order to increase the load carrying capacity of tubular structures, the joints of tubular members are usually reinforced with various reinforcement system. A stiffening method with internal ring stiffeners is effectively used for the steel tubular joint with a large diameter. In this study, the behavior of internally ring-stiffened tubular T-joints subjected to axial loading is assessed. For the parametric study, nonlinear finite element analyses are used to compute the static strength on non-stiffened and ring-stiffened T-joints. Based on the numerical results, an internal ring stiffener is found to be efficient in improving the static strength. The influence of geometric parameters has been determined, and the reinforcement effect are evaluated. Based on the FE results, regression analises are performed considering the practical size of ring stiffener. Finally strength estimation formulas for ring-stiffened tubular T-joints are proposed.*

1. 서 론

관형재(tubular member)는 다양한 구조적 장점을 가지고 있으며, 해양구조물에서는 뼈대구조요소로도 널리 사용되고 있다. 관형재로 연결된 관이음부(tubular joint)의 구조강도를 증가시키기 위해서 거셋판(gusset plate)의 설치, 지부재(branch member)의 중첩, 주부재(main member)의 국부적 벽두께 증가, 이음부 내·외부에 환보강재(ring stiffener) 설치와 같은 다양한 보강법이 개발되어 적용되었다. 거셋판을 설치하는 것과 지부재의 중첩법은 국부적 최대응력을 증가시켜 피로수명이 단축되고, 이음부 외부에 환보강재를 설치하는 방법은 주부재의 변형과 좌굴에 대한 저항성을 증가시킬 수 없다는 단점이 있다. 최근에는 대규모 강관 구조물로 설계된 관형재가 많이 제작되면서 주부재의 내부에 환보강재를 설치하는 방법이 사용되고 있다. 이와 같이, 보강시스템이 적용되지 않은 이음부를 비보강 이음부(unstiffened joint), 혹은 단순이음부(simple joint)라고 하고, 보강시스템을 적용한 이음부를 보강 이음부(stiffened joint)라고 한다(조현만 등, 2000).

관이음부의 구조강도 평가는 피로수명과 응력집중현상을 규명하기 위한 국부적 최대응력의 산정과(류연선 등, 1997; 엄동석 등, 1993) 극한 과도하중상태에 대한 정적강도의 산정(백점기와 신병천, 1989)으로 나눌 수 있다. 특히 폭풍, 지진 등의 극한상태의 해상기후에 노출되어 있는 해양구조물의 관이음부는 항복강도 이후에도 상당한 잉여강도를 유지하기 때문에, 국부적 반복응력에 따른 피로강도와는 별도로 정적하중에 대한 극한강도를 고려한 설계가 필수적이다.

단순 이음부의 거동을 평가하는 연구는 모형실험적 방법과 수치해석적 방법에 의해 다양하게 수행되었고(Kang et al., 1998; Dexter and Lee, 1999), 이러한 연구결과들을 바탕으로 산정한 경험적 강도식 및 설계규준 등이 제시되어있다(API, 1993). 환보강 이음부에 대한 모형실험적 연구로는 Sawada et al.(1979)이 내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도와 피로강도를 평가하였고, Ramachandra et al.(1992)은 보강재의 설치에 따른 응력집중계수의 변화를 고찰하였으며, Thandavamoorthy et al.(1999)은 내부 환보강 T형 및 Y형 관이음부의 구조강도를 평가하였다. 환보강 이음부에 대한 수치적 연구로는 Rhee(1992)가 내부환보강재와 보강벽을 가진 T형 관이음부에 대한 응력해석을 수행하였고, Cho and Ryu(2002)는 환보강 X형 관이음부의 강도에 대해 연구하였다. 이와 같이, 환보강 이음부에 대한 연구는 극히 제한된 이음부 모델에 대해 주로 실험적 방법에 의해 이루어졌고, 상당수가 피로강도에 관한 것이어서 보강이음부의 정적강도를 파악하고 설계의 기초자료로 활용하기에는 자료가 매우 부족하다(조현만과 류연선, 2002).

따라서 본 연구에서는 이음부 내부에 환보강재를 설치한 T형 관이음부의 정적강도를 수치적으로 산정하여, 환보강재의 보강효과를 평가하고, 관형재와 보강재의 기하학적 조건이 보강이음부 강도에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 또한 수치결

제1저자 조현만 연락처: 경상남도 진해시 안골동 산131번지
055-552-0321 oldsea@nate.com

과로부터 강도산정식을 개발하여, 환보강재의 최적크기 산정 및 관이음부 설계에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 관이음부의 강도

2.1 관이음부의 정적강도

관이음부란 구조부재의 연결시스템으로, 하나 이상의 관형 부재를 포함한 부재가 교차되는 구조물의 일부분이다. 관이음부의 기하학적 성질은 교차부재의 형상, 크기, 위치, 방향의 요소들로 표현할 수 있으며, 주부재와 지부재의 연결형태에 따라 이음부의 종류를 분류한다. T형 관이음부는 주부재에 한 개의 지부재를 부착시킨 단일이음부의 대표적인 형상으로 Fig. 1과 같으며, 해양 및 육상구조물에서 널리 사용된다(Cho et al., 2003).

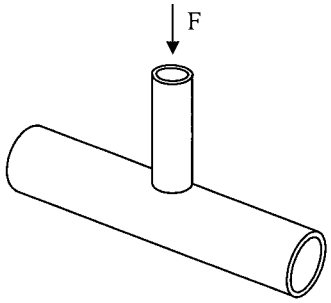


Fig. 1 Tubular T-joint loaded by axial force

관이음부의 파괴기준이 되는 정적강도는 일반적으로 극한내하력이나, 변형한도 혹은 균열의 발생점 중 하나로 정의된다. 본 연구에서는 구조물의 하중-변위 관계에서 변형한도 내의 하중의 최고점인 극한내하력, 즉 극한강도(ultimate strength)를 정적강도로 정의한다. 변형한도의 기준으로 가장 널리 사용되는 것은 연결형상과 하중 종류에 따라 정의된 Yora의 변형한도 공식이다. 주부재의 직경에 비해 주부재의 두께가 얇은 경우나 지부재가 굽힘을 받는 경우에, 수치적 방법에 의해 강도해석을 수행하면 하중곡선은 최고점을 형성하지 못하고 변형이 계속 증가하는 현상이 발생하기도 한다. 이러한 경우에 변형한도 기준을 설정하여 변형한도에 해당하는 하중을 정적강도로 결정하는 방법이 사용된다(Vegte, 1995).

또한, 이음부에 인장하중이 작용하는 경우가 압축하중이 작용하는 경우보다 변형률경화 등의 원인으로 인해 강도가 증가하므로 이음부 설계에 있어서 압축하중이 축방향 강도의 기준하중으로 사용된다.

이음부의 정적강도 및 응력집중계수와 같은 구조적 거동은 기하학적 치수들을 무차원화한 계수들과 이음부의 종류에 따라 표현된다. 이음부의 기하학적 무차원 계수에는 주부재의 길이계수 ($\alpha = 2L/D$)와 직경비 ($\beta = d/D$), 반경두께비 ($\gamma = D/2T$), 두께비 ($\tau = t/T$) 등이 있다(Marshall, 1992).

2.2 환보강 관이음부의 강도비

Fig. 2는 본 연구의 대상구조물인 환보강 T형 관이음부의 형상으로, 주부재와 지부재의 교차부 내부에 한 개의 환보강재가 설치되어 있다.

본 연구에서는 환보강재의 치수가 보강이음부의 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해, 보강재의 치수와 관련된 무차원 계수로 보강재의 폭비(η)와 보강재의 두께비(ξ)를 식 (1), (2)와 같이 정의하였다.

$$\eta = h_r / D \tag{1}$$

$$\xi = t_r / T \tag{2}$$

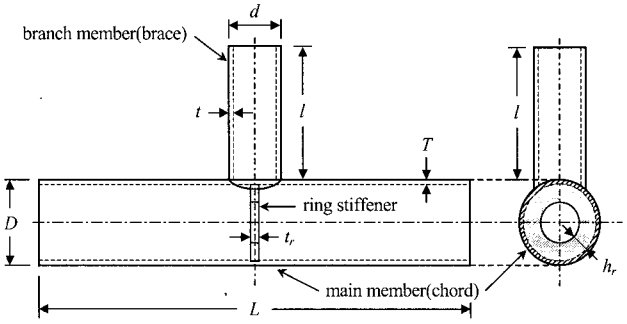


Fig. 2 Dimensions of ring-stiffened tubular T-joint

환보강 관이음부의 보강효과를 평가하기 위해 단순이음부에 대한 상대적 강도증가량으로 강도비(strength ratio; SR)를 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$SR = \frac{F_{u,\,ring}}{F_{u,\,smp}} \tag{3}$$

여기서, $F_{u,\,ring}$은 환보강 이음부의 강도이고, $F_{u,\,smp}$는 단순이음부의 강도이다.

동일한 단순이음부에 다양한 크기의 환보강재를 설치할 경우에 발생 가능한 강도의 최대값을 최대보강강도($F_{\max,\,r}$)라고 정의하고, 이에 따른 강도비로서 최대강도비($SR_{\max}$)를 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$SR_{\max} = \frac{F_{\max,\,r}}{F_{u,\,smp}} \tag{4}$$

3. 유한요소모델

3.1 유한요소 모델링

이음부의 강도평가를 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 유한요소 모델링 과정에서 한 절점당 6개의 자유도를 가지는 8절점 쉘요소를 사용하였고, 계산의 효율성을 고려하여 이음부의 위치에 따라 요소망의 밀도를 다르게 형성하였다. 응력집중이 발생하고 구조거동이 복잡하며 강

도계산을 위한 변위의 측정점이 있는 부재의 교차부는 요소망을 상대적으로 조밀하게 형성하였고, 단부로 갈수로 비교적 큰 요소를 사용하였다.

구조물의 기하하적 조건과 하중조건의 대칭성을 이용해 전체 이음부의 1/4만을 모델링 하였고, 대칭면에 위치한 절점에 대칭경계조건을 적용하였다. 주부재의 국부적 단부 변형을 구속하기 위해 단부에 일정 두께의 격막을 설치하였고, 지점에 변위 경계조건을 적용하여 주부재의 단부를 단순지지로 설정하였다. 지부재에 작용하는 축방향력에 대한 하중조건은 변위제어방법을 사용하여 지부재의 단부에 변위를 증가시키면서 하중을 계산하였다.

해석과정에서는 기하학적 · 재료적 비선형성을 고려하였고, 항복후 재료의 특성은 선형탄성-완전소성을 관계로 설정하였다. 이음부의 용접부도 쉘요소를 사용하여 모델링하였으며, 용접부의 기하학적 모델링이 곤란한 일부 모델에 서는 용접형상을 고려하지 않았다. 용접이음부에서 잔류응력이 발생하나 이음부 강도에는 거의 영향을 주지 못하므로 무시하였다. 유한요소망의 대표적 형상은 Fig. 3과 같다.

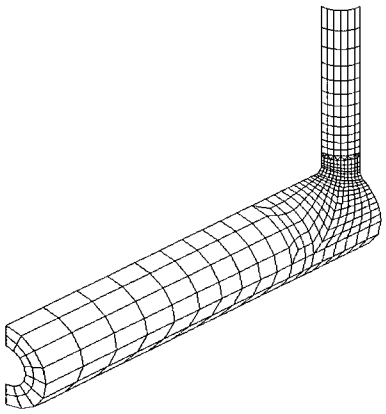


Fig. 3 Finite element mesh for axially loaded T-joint

3.2 수치모델의 검증

본 연구에서 사용하는 수치모델이 실제 구조물의 거동을 잘 재현하는가를 확인하기 위해 강재(steel)모형에 대한 실험결과를 알고 있는 이음부에 대해 유한요소 해석을 수행하였다.

실험모델은 단순 T형 관이음부 3개와 내부 환보강 이음부 6개로 구성되어 있으며 단순이음부는 김재동(1996)이, 보강이음부는 Sawada(1967)가 실험한 모델이다. 실험모델의 기하학적 치수와 재료의 성질 및 해석결과는 Table 1과 같다. 여기서, T-모델은 단순이음부이고, TR-모델은 환보강이음부, f_y는 재료의 항복응력, $F_{u,test}$는 모형실험결과로 구한 강도, F_u는 본 연구에서 유한요소해석 결과로 구한 강도이다. 수치해석 결과들은 모형실험 결과와 거의 일치하여 단순이음부와 보강이음부의 유한요소모델이 실제 구조물에 대한 구조적 거동을 잘 재현하는 것이 확인되었다.

4. 수치모델 및 해석결과

4.1 단순 T형 관이음부

(1) 수치모델

보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순 T형 관이음부에 대한 수치모델을 Table 2와 같이 구성하였다.

Table 2 Numerical cases 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	T1-1	T1-2	T1-3	T1-4	T1-5	T1-6	T1-7	T1-8
0.5	T2-1	T2-2	T2-3	T2-4	T2-5	T2-6	T2-7	T2-8
0.7	T3-1	T3-2	T3-3	T3-4	T3-5	T3-6	T3-7	T3-8
1.0	T4-1	T4-2	T4-3	T4-4	-	-	-	-

수치모델의 주부재 직경(D)은 800mm, 주부재 길이(L)는 6400mm로 고정하고, 주부재와 지부재의 두께와 지부재의 직경을 변화하며 구성하였다. 지부재의 직경에 따라 T1, T2, T3, T4 모델로 구성하고, 각 모델에 대해 주부재와 지부재의 두께에 따라 세부모델을 설정하여 총 28개의 단순이음부 모델을 구성하였다. Table 2의 무차원 계수의 범위는 해양구조물에서

Table 1 Test and numerical results of tubular T-joint

Model	Main member				Branch member			Ring-stiffener			Result		
	D (mm)	T (mm)	L (mm)	f_y (MPa)	d (mm)	t (mm)	f_y (MPa)	h_r (mm)	t_r (mm)	f_y (MPa)	$F_{u,test}$ (kN)	F_u (kN)	$F_u/F_{u,test}$
T-EXP1	165.2	4.85	800	419	114.3	4.5	419	-	-	-	156	166	1.06
T-EXP2	165.2	4.85	800	419	139.8	4.85	419	-	-	-	215	220	1.02
T-EXP3	165.2	4.85	800	419	165.2	4.85	419	-	-	-	256	284	1.11
TR-EXP1	711.2	9.44	3600	393	318.5	6.89	357	100	8.3	338	806	794	0.99
TR-EXP2	711.2	9.93	3600	388	318.5	7.06	411	80	8.21	439	888	824	0.93
TR-EXP3	711.2	10.38	3600	362	318.5	7.06	411	100	8.21	439	875	936	1.07
TR-EXP4	711.2	10.27	3600	368	318.5	7.06	411	100	10.16	273	901	838	0.93
TR-EXP5	711.2	10.06	3600	386	318.5	7.06	411	100	5.9	257	667	682	1.02
TR-EXP6	711.2	10.06	3600	386	318.5	7.06	411	120	8.21	439	962	1026	1.07

많이 사용되는 관이음부의 기하학적 특성을 고려하여 구성한 것이다(김재동, 1996).

지부재와 주부재는 동일 재료로 구성하였으며, 항복강도(f_y)는 350*MPa*, 탄성계수는 200*GPa*, 프와송비는 0.3이다. T형 관이음부의 전체적인 거동을 고려한다면 주부재의 길이가 파손시에 지배적인 요소라고 할 수 있지만, 본 연구에서는 이음부의 강도평가로서 국부적인 거동만을 관찰하므로 굽힘에 의한 구조물 전체의 거동을 고려하지 않았다.

(2) 해석결과

단순 T형 관이음부 모델의 유한요소해석 결과로 하중-변위 곡선을 구하였다. Fig. 4는 $\tau=1.0$, $\beta=0.5$인 T2모델 중, 4개의 수치모델에 대한 해석결과이며 다른 모델에 대해서도 이와 유사한 하중-변위곡선을 구할 수 있었다. 여기서 하중과 변위는 각각 무차원화 하였으며, F는 지부재에 작용하는 압축력, δ는 부재의 교차부 중에서 크라운(crown) 부분에서의 지부재 축방향 변위이다.

각 모델의 하중-변위 관계로부터 무차원 강도를 구해 Table 3에 정리하였다.

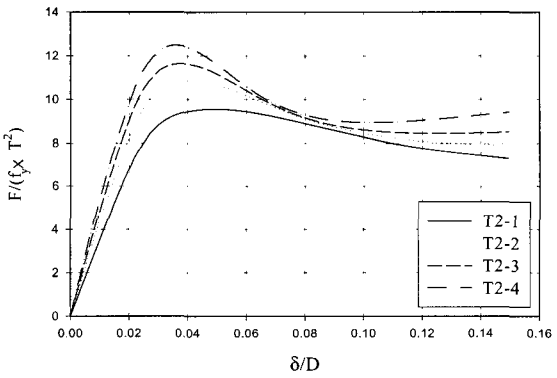


Fig. 4 Load-displacement curves of simple T-joint.

Table 3 Numerical results of axially loaded simple T-joints

Models	T1-1	T1-2	T1-3	T1-4	T1-5	T1-6	T1-7	T1-8
$F_u/(f_y\times T^2)$	6.82	7.43	7.79	8.19	6.48	7.13	7.51	7.89
Models	T2-1	T2-2	T2-3	T2-4	T2-5	T2-6	T2-7	T2-8
$F_u/(f_y\times T^2)$	9.55	10.85	11.63	12.47	9.27	10.60	11.39	12.24
Models	T3-1	T3-2	T3-3	T3-4	T3-5	T3-6	T3-7	T3-8
$F_u/(f_y\times T^2)$	11.76	14.25	15.55	16.90	11.58	14.02	15.33	16.75
Models	T4-1	T4-2	T4-3	T4-4				
$F_u/(f_y\times T^2)$	12.74	17.03	20.38	25.25				

4.2 환보강 T형 관이음부

(1) 수치모델

Table 2에 제시한 단순이음부 모델에 대해, 교차부 중앙 내부에 환보강재를 설치한 환보강 이음부 모델을 구성하였다. 내부 환보강재의 기하학적 조건은 식(5)와 같다.

$$0.05\le\eta\le0.35\ ,\ 0.25\le\xi\le2.0 \tag{5}$$

각각의 단순이음부 대해서, 식 (5)의 범위내에서 η에 대해 8가지 경우, ξ에 대해 6가지 경우를 고려하여 환보강재 형상을 Table 4와 같이 구성하였다. 즉, 한개의 단순이음부 모델에 대해 48개의 보강이음부 모델을 구성하였으며, 총 1344개의 수치모델을 설정하였다.

Table 4 Internal ring stiffeners of tubular T-joints

η	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
ξ	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	-	-

주부재의 직경이 모든 모델에 대해 동일하므로 Table 4에서 $\eta(=h_r/D)$에 대한 조건은 상수로 결정되나, $\xi(=t_r/T)$에 대한 조건은 주부재의 두께에 따라 다르게 구성된다.

환보강 이음부의 모델명은 Table 2의 단순이음부 모델에 대해 각각 T1R, T2R, T3R, T4R이라고 정하였다. 환보강재는 이음부와 동일한 재료의 특성을 가지며, 유한요소 모델링시에 8절점 쉘요소를 사용하여 모델링하였다.

(2) 해석결과

내부 환보강 T형 관이음부 모델에 대해 유한요소해석을 통해 구한 하중-변위 관계로부터 보강 이음부 강도를 계산하였다. 보강효과를 평가하기 위해 강도비(SR)를 계산하였고, 환보강재의 크기가 강도에 미치는 영향을 조사하고자 환보강재의 무차원계수(η, ξ)에 대한 강도비의 변화를 고찰하였다.

Fig. 5는 수치해석 결과 중, $\beta=0.5$, $\gamma=25$, $\tau=1.0$, $\eta=0.2$, $\xi=1.0$인 모델의 변형형상과 응력분포를 나타낸 것으로 다른 모델에 대해서도 이와 유사한 분포양상이 나타났다.

Fig. 6~9는 수치해석 결과 중 τ=1.0일 때 보강재의 폭비(η)에 대한 강도비의 변화를 나타낸 것으로 τ=0.5인 경우에도 이와 유사한 경향의 결과가 나타났다. 여기서, 강도비의 변화양상을 살펴보면, 환보강재의 폭과 두께가 커질수록 강도비가 증가하였지만 일정수준의 강도비를 초과하지는 않았다. $\beta=0.3$인 T1R 모델의 경우, η가 0.2 이상이고, ξ가 1.5보다 클 경우에 추가적인 보강효과는 나타나지 않았고, 그 외의 모델에서는 η가 0.2 이상이고, ξ가 1.0보다 클 경우에 강도증가가 크게 발생하지 않았다.

보강이음부의 해석결과로 최대강도비(SR_{max})를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 식 (5)는 수치해석 자료 전체를 고려하여 계산한 것이며 식 (6)은 다음식과 같이 실용적인 환보강재의 크기를 고려하여 계산한 결과이다.

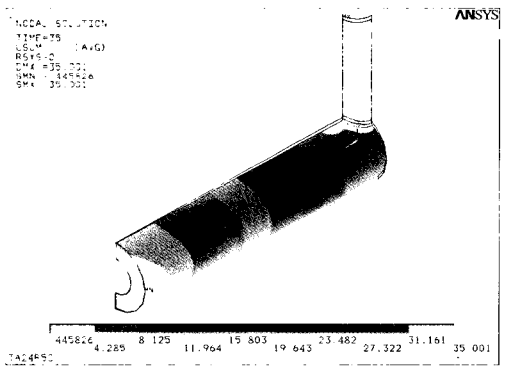
$$0.05 \le \eta \le 0.2\ ,\ 0.25 \le \xi \le 1.0 \qquad (6)$$

Table 5에서 식 (6)의 실용적 환보강재의 크기에 대한 최대강도비가 식 (5)의 경우와 거의 유사하게 계산되었고, 식 (6)의 범위보다 보강재의 크기를 증가시키더라도 강도의 증가는 거의 발생하지 않았다. 따라서 T형 관이음부에서 환보강재의 설치범위는 식 (6)의 범위내에서 크기를 결정하는 것이 더욱 효율적임이 확인되었다.

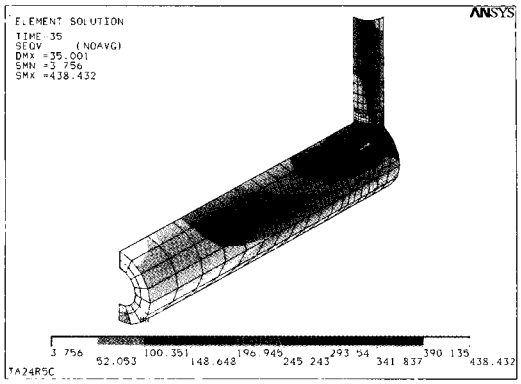
Table 5 Maximum strength ratio of ring-stiffened T-joints

τ	γ	β=0.3 (T1R)		β=0.5 (T2R)		β=0.7 (T3R)		β=1.0 (T4R)	
		Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(5)	Eq.(6)	Eq.(5)	Eq.(6)
1.0	12.5	1.784	1.777	1.299	1.298	1.072	1.071	1.014	1.014
	16.67	2.140	2.115	1.529	1.527	1.184	1.183	1.014	1.014
	20.0	2.359	2.320	1.705	1.701	1.300	1.299	1.015	1.014
	25.0	2.601	2.549	1.955	1.944	1.482	1.480	1.017	1.017
0.5	12.5	1.695	1.695	1.325	1.324	1.081	1.081	-	-
	16.67	1.964	1.953	1.533	1.531	1.191	1.190	-	-
	20.0	2.094	2.081	1.665	1.661	1.299	1.299	-	-
	25.0	2.252	2.238	1.843	1.835	1.463	1.462	-	-

Fig. 10은 동일한 직경비(β)에 대해 반경-두께비(γ), 두께비(τ)와 최대강도비의 관계를 나타낸 것이다. γ가 커질수록 보강효과가 증가하였으며, $\beta = 0.3$인 경우에는 지부재의 두께가 보강 강도에 영향을 주는 것으로 나타났으나, 그 외의 경우에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 또한, 환보강재 설치후에 이음부 강도가 최대 2.6배 증가하였고, 반면에, 지부재와 주부재의 동일한 단면을 가지는 경우($\beta = 1.0$)에는 보강효과가 거의 발생하지 않았다.



(a) Deformation contour



(b) Stress contour(Von Mises Stress)

Fig. 5 Deformation and stress contour of numerical model

5. 강도산정식

축방향력을 받는 환보강 T형 관이음부의 강도산정식을 개발하기 위해 유한요소해석 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 분석자료는 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 식 (7)의 범위내에서의 해석결과만을 이용하였고, $\beta = 1$인 경우는 보강효과가 거의 발생하지 않으므로 회귀분석에서 제외하였다.

$$0 \le \xi \le 1.0,\quad 0 \le \eta \le 0.2 \qquad (7)$$

ξ, η, γ를 독립변수로 하고, β와 τ의 조건에 대한 강도비(SR)를 종속변수로 설정하여 비선형 회귀모형을 식(8)과 같이 구성하였다.

$$SR = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta\gamma \qquad (8)$$

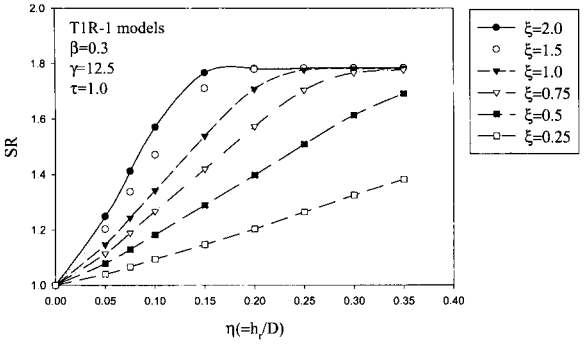
여기서, a_0, a_1, a_2, a_3는 회귀계수이며, 회귀분석에는 SPSS 프로그램을 사용하였고, 회귀계수의 추정과정에는 Levenberg - Marquardt 알고리즘을 적용하였다.

회귀모형에 대한 분석결과는 Table 6에 나타내었다. 개개의 회귀모형에 대해 101개의 수치결과 자료를 이용하였고, R^2은 회귀모형의 적합도 검토를 위해 정의 되는 결정계수(coefficient of determination)이다.

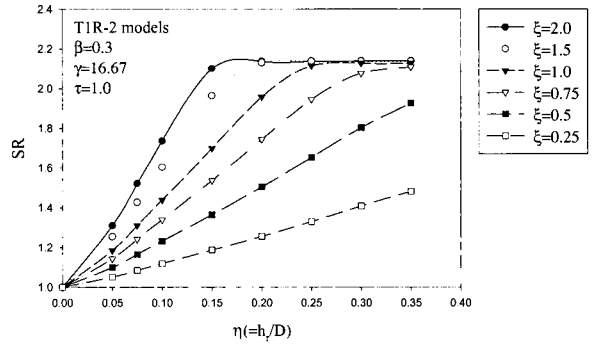
회귀분석의 과정에서 환보강재의 폭이 환보강재의 두께보다 이음부 강도에 지배적인 요소임이 확인되었고, R^2이 전반적으로 크게 계산되어 식 (8)의 회귀모형이 적합하다고 판명되었다.

Table 6 Regression analysis for ring-stiffened tubular T-joints loaded by axial force

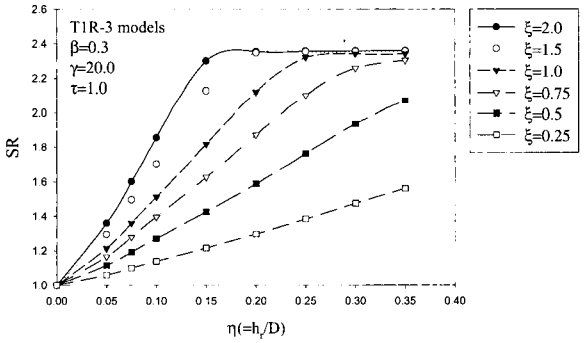
β	τ	No. of data points	Regression coefficients				R^2(%)
			a_0	a_1	a_2	a_3	
0.3	1.0	101	0.9719	-0.0278	0.4773	0.2644	99.52
0.3	0.5	101	0.9668	0.0092	0.6698	0.2372	99.21
0.5	1.0	101	1.0166	-0.0587	0.0713	0.1861	98.42
0.5	0.5	101	1.0086	-0.0239	0.2260	0.1659	98.44
0.7	1.0	101	1.0629	-0.0951	-0.3536	0.1293	81.68
0.7	0.5	101	1.0589	-0.0796	-0.0289	0.1213	82.19



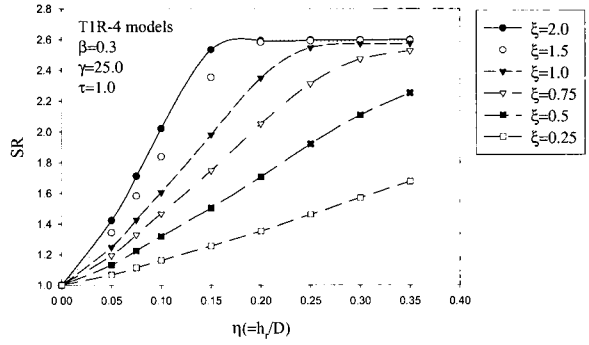
(a) T1R-1 models



(b) T1R-2 models

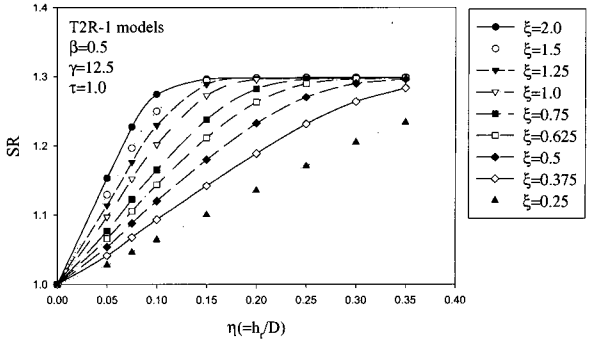


(c) T1R-3 models

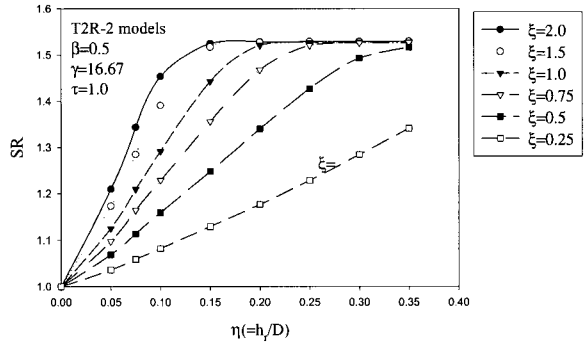


(d) T1R-4 models

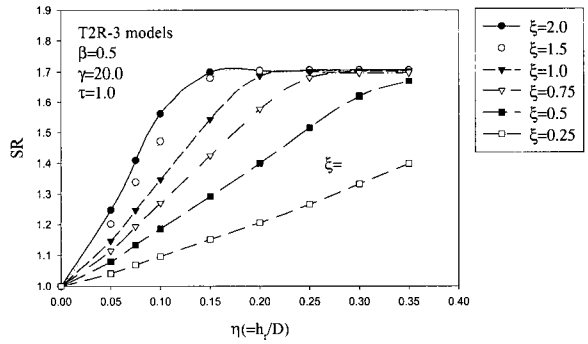
Fig. 6 Strength ratio of ring-stiffened T-joint(β=0.3,τ=1.0)



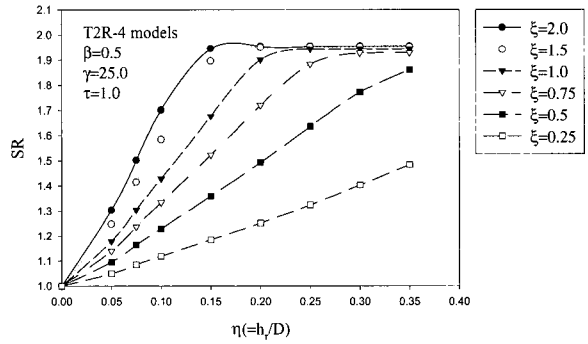
(a) T2R-1 models



(b) T2R-2 models

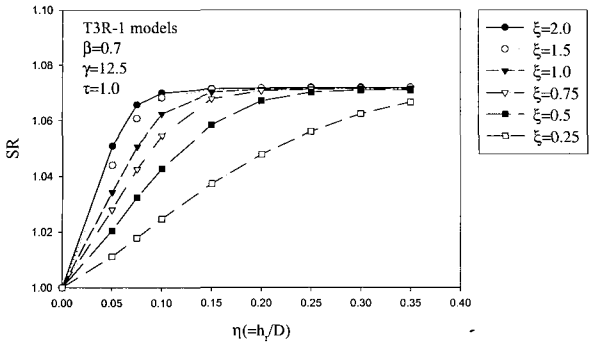


(c) T2R-3 models

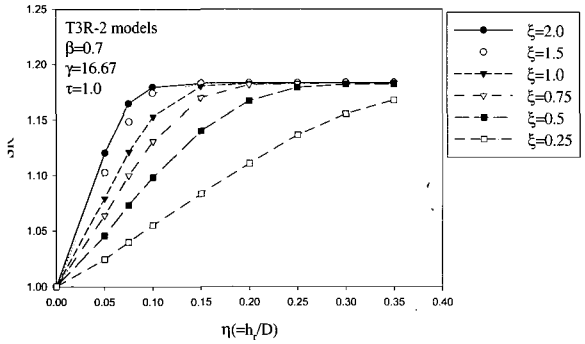


(d) T2R-4 models

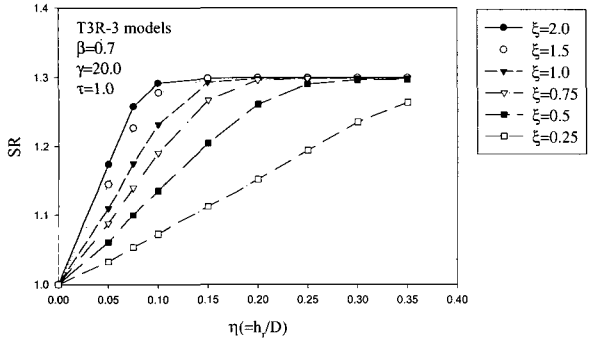
Fig. 7 Strength ratio of ring-stiffened T-joint(β=0.5,τ=1.0)



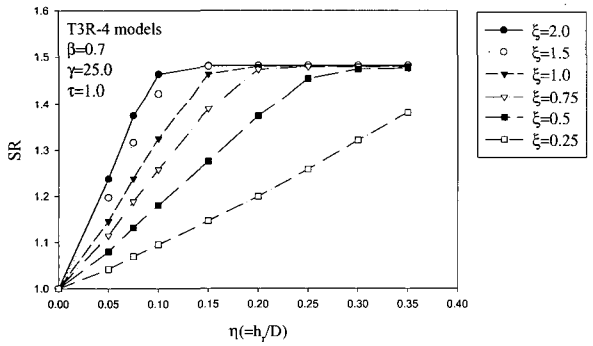
(a) T3R-1 models



(b) T3R-2 models

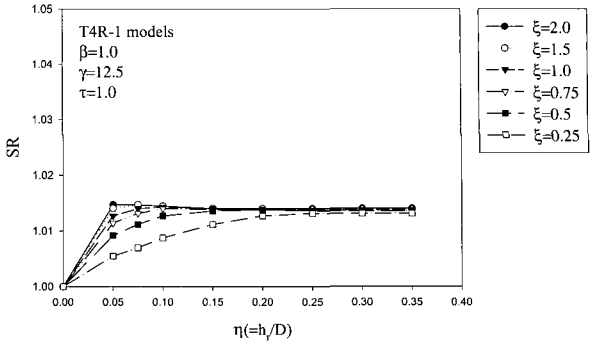


(c) T3R-3 models

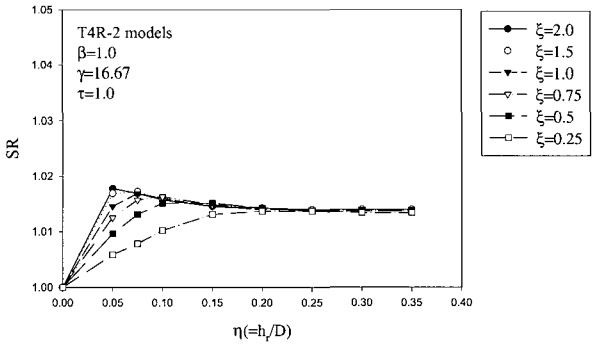


(d) T3R-4 models

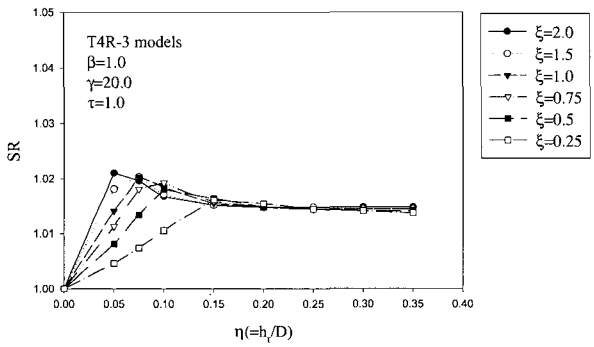
Fig. 8 Strength ratio of ring-stiffened T-joint(β=0.7,τ=1.0)



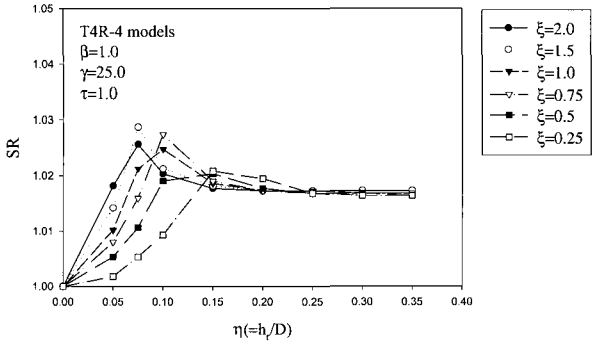
(a) T4R-1 models



(b) T4R-2 models



(c) T4R-3 models



(d) T4R-4 models

Fig. 9 Strength ratio of ring-stiffened T-joint(β=1.0,τ=1.0)

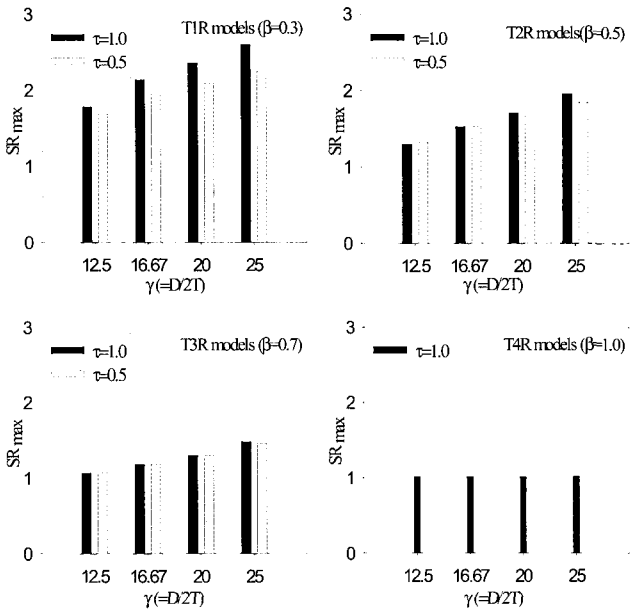


Fig. 10 Maximum strength ratios of ring stiffened T-joint

6. 결 론

본 연구에서는 지부재에 축방향력이 작용하는 내부 환보강 T형 관이음부의 강도를 비선형 유한요소해석을 통해 산정하였다. 수치해석 결과로 이음부와 환보강재의 기하학적 조건과 보강효과와의 상관관계를 규명하고 회귀분석을 통해 강도산정식을 제안하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 내부 환보강재의 치수가 커질수록 이음부강도가 증가하여 축방향력에 대한 보강효과의 우수성이 증명되었고, 강도가 최대 2.6배 증가하였다.

2) 반경-두께비가 커질수록 강도비가 증가하여 보강효과가 커지고, 직경비가 커질수록 강도비는 감소하여 보강효과가 작아진다.

3) 직경비가 1인 경우에는 환보강재 설치후의 강도 변화가 거의 발생하지 않기 때문에 지부재에 축방향력이 작용하는 T형 관이음부의 보강법으로는 적합하지 않다.

4) 환보강재의 폭이 주부재 직경의 20%이하이고, 환보강재 두께가 주부재 두께 이하인 경우에, 이음부에서 발생가능한 최대강도비가 계산되어 이 범위 내에서 보강재를 설계하는 것이 효율적이다.

5) 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 회귀분석을 수행한 결과, 강도산정식을 다음과 같이 구하였고, 계수는 Table 6에 제시하였다.

$$SR = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta\gamma$$

6) 본 연구결과는 내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도와, 환보강재의 치수에 따른 보강효과를 예측하는 보강재 설계의 기초자료로 활용이 가능하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00253-0) 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김재동 (1996). 해양구조물 원통형 연결부의 구조강도에 대한 실험적 연구, 박사학위논문, 충남대학교.

류연선, 조현만, 김정태(1997). "해양구조물 T형 관이음부의 응력해석", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 256-262.

백점기, 신병천 (1989). "해양구조물 원통부재의 최종강도에 대한 손상의 영향", 한국해양공학회지, 제3권, 제2호, pp 77-86.

엄동석, 강성원, 박재형, 하우일(1993). "유한요소법에 의한 튜블라 이음부의 응력집중계수 및 피로강도 해석", 한국해양공학회지, 제8권, 제2호, pp 141-150.

조현만, 류연선, 김정태 (2000). "X형 관이음부의 보강방법에 따른 극한강도 해석", 한국전산공학회 가을 학술발표회 논문집, pp 230-237.

조현만, 류연선 (2002). "내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 145-150.

American Petroleum Institute (1993). "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", API RP2A.

Cho, H.M. and Ryu, Y.S. (2002). "Effect of Internal Ring Stiffener on the Ultimate Strength of Tubular X-Joints", Proc. of Advanced in Structural Engineering and Mechanics, ASEM, pp 18.

Cho, H.M., Ryu, Y.S. and Kim, J.T. (2003). "Optimum Strength Estimation Formulae for Ring Stiffened Tubular T-joints" Proc. of Fifth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, pp 31.

Dexter, E.M. and Lee, M.K. (1999). "Static Strength of Axially Loaded Tubular K-Joints: I. Behavior", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 125, No 2, pp 194~201.

Kang, C.T., Moffat D.G. and Mistry, J. (1998). "Strength of DT Tubular Joints with Brace and Chord Compression", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 124, No 7, pp 775-783.

Marshall, P.W. (1992). Design of Welded Tubular Connections, Basis and Use of AWS Code Provision, Elsevier Science Publishers.

Ramachandra, D.S., Madhava Rao, A.G., Gandhi, P., Pant, P.K. (1992). "Structural Efficiency of Internally Ring- stiffened Steel Tubular Joints", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 118, No 11, pp 3016-3035.

Rhee, H.C. (1992). "Comparison of Finite-.element Stress Solutions of Multi-Plane Tubular Joint With and Without

Ring and Longitudinal Stiffeners", OTC Paper 6942, pp 621-258

Sawada, Y., Idogaki, S. and Sekita, K. (1979). "Static and Fatigue Tests on T-joints Stiffened by an Internal Ring", OTC Paper 3422, pp 563-574

Thandavamoorthy, T.S., Madhava Rao, A.G. and Santhakumar. (1999). "Behavior of Internally Ring-stiffened Joints of Offshore Platforms", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol 125, No 11, pp 1348-1352.

Vegte, G.J. (1995). The Static Strength of Uniplanar and Multiplanar Tubular T-and X-joints, Doctral Dissertation, Delft Univ. of Technology, Netherlands.

2004년 8월 4일 원고 접수
2004년 11월 15일 최종 수정본 채택