

환보강 T형 관이음부의 강도산정식 Strength Evaluation Formulae for Ring-stiffened Tubular T-joints

조 현 만* 류 연 선**
Cho, Hyun-Man Ryu, Yeon-Sun

ABSTRACT

Tubular joints having a large diameter are reinforced using internal ring stiffener in order to increase the load carrying capacity. In this study, the static strengths of internally ring-stiffened tubular T-joints subjected to compressive brace loading are assessed. Nonlinear finite element analyses are used to compute the behavior of unstiffened and ring-stiffened T-joints. From the numerical results, internal ring stiffener is found to be efficient in improving the ultimate capacity, and reinforcement effects are calculated. The influence of geometric parameters for members and ring is evaluated. Based on the FE results, regression analysis is performed considering practical sizes of ring stiffener, finally strength estimation formulae for ring-stiffened T-joints are proposed.

1. 서 론

관형재(tubular member)로 연결된 관이음부(tubular joint)의 구조강도를 증가시키기 위해 거셋판 설치, 지부재 중첩, 주부재의 국부적 벽두께 증가, 이음부의 내·외부에 환보강재(ring stiffener) 설치 등과 같은 다양한 보강법이 적용되고 있다. 거셋판을 설치하는 것과 지부재의 중첩법은 국부적 최대응력을 증가시켜 피로 수명이 단축되고, 이음부 외부에 환보강재를 설치하는 방법은 주부재의 변형과 좌굴에 대한 저항성을 증가시킬 수 없다는 단점이 있다. 최근에 대규모 강관구조물로 구성된 관이음부가 다수 제작되면서 주부재의 내부에 환보강재를 설치하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이와같이 보강재를 설치하여 보강한 이음부를 보강이음부(stiffened joint)라고 하며, 보강시스템이 적용되지 않은 이음부를 비보강이음부(unstiffened joint), 혹은 단순이음부(simple joint)라고 한다.

이음부의 구조강도에 관한 연구는 이음부의 피로와 응력집중현상을 규명하기 위한 국부적 최대응력의 산정과 극한 과도하중상태에서 정적하중에 대한 정적강도의 해석으로 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.

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 시간강사

** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

단순이음부의 거동을 평가하는 연구는 실험적 방법과 수치적 방법에 의해 다양하게 수행되었고,⁽¹⁾ 이러한 해석결과를 바탕으로 산정한 경험적 강도식 및 설계 규준이 구체적으로 제시되어있다.⁽²⁾ 내부 환보강 이음부의 구조강도를 평가하는 실험적 연구로는, Sawada 등이 내부 환보강 T형 관이음부의 정적강도와 피로강도를 평가하였고,⁽³⁾ Ramachandra 등은 보강재의 설치에 따른 응력집중계수의 변화를 고찰하였으며,⁽⁴⁾ Tandavamoorthy 등은 내부 환보강 T형 및 Y형 관이음부의 구조강도를 평가하였다.⁽⁵⁾ 환보강 이음부에 대한 수치적 연구로는 Rhee가 내부 환보강재와 보강벽을 가진 다평면 T형 관이음부에 대해 응력해석을 수행하였고,⁽⁶⁾ 조와 류는 내부 환보강 X형 관이음부의 정적강도를 평가하였다.⁽⁷⁾ 이와같이, 환보강 이음부에 대한 연구는 극히 제한된 이음부 모델에 대하여 주로 실험적 방법에 의해 이루어졌고 대부분이 피로강도에 관한 것이어서 보강이음부의 정적강도를 파악하고 설계의 기초자료로 활용하기에는 해석자료가 매우 부족하다.

본 연구에서는 축방향력을 받는 내부 환보강 T형 관이음부의 거동을 수치적으로 평가하여 이음부와 환보강재의 기하학적 특성과 보강효과 사이의 상관관계를 규명하고자 한다. 또한 수치해석결과를 이용하여 회귀 분석을 통해 환보강 이음부의 기초설계를 위한 강도산정식을 제안하고자 한다. 이음부의 강도 계산에는 비선형 유한요소해석을 사용한다.

2. 내부 환보강 T형 관이음부와 정적강도

관이음부의 기하학적 성질은 교차부재의 형상, 크기, 위치, 방향의 요소들로 표현할 수 있으며, 주부재(main member)와 지부재(branch member)의 연결형태에 따라 이음부의 종류를 분류한다.⁽⁸⁾ T형 관이음부는 주부재에 한 개의 지부재를 부착시킨 단일이음부의 대표적인 형상으로, 해양 및 육상구조물에서 널리 사용된다. Fig. 1은 본 연구의 대상구조물인 환보강 T형 관이음부의 형상이다.

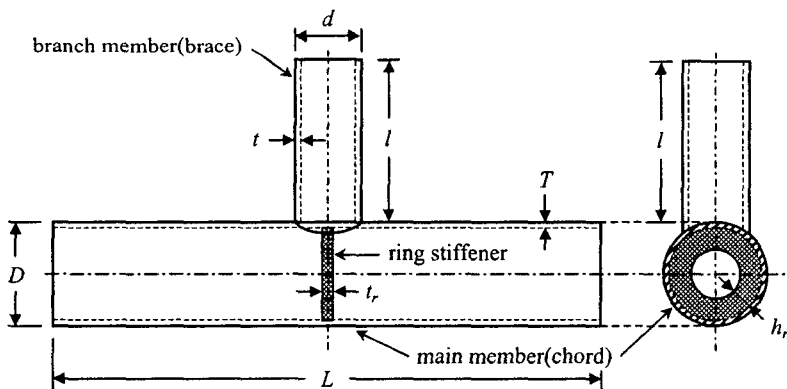


Fig. 1 Dimensions of ring-stiffened tubular T-joint.

관이음부의 파손기준이 되는 정적강도는 일반적으로 극한내하력이나, 변형기준, 혹은 균열의 발생점 중 하나로 정의된다. 본 연구에서는 구조물의 하중-변위 관계에서 하중의 최고점인 극한내하력 즉 극한강도(ultimate strength)를 정적강도로 정의한다. 그리고, 변형률경화 등의 원인으로 인해 이음부에 인장하중이 작용하는 경우가 압축하중이 작용하는 경우에 비해 강도가 증가하므로 이음부 설계에 있어서 일반적으로 압축하중이 축방향 강도의 기준하중으로 사용된다.

관이음부의 정적강도와 같은 구조적 거동은 기하학적 치수들을 무차원화한 계수들과 이음부 종류에 따라

표현되며, 기하학적 무차원계수에는 주부재의 길이계수 ($\alpha=2L/D$), 직경비 ($\beta=d/D$), 반경-두께비 ($\gamma=D/2T$), 두께비 ($\tau=t/T$) 등이 있다.

환보강재의 치수가 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 보강재의 치수와 관련된 무차원 계수로 보강재의 두께비(ξ)와 보강재의 폭비(η)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\xi = t_r / T \quad (1)$$

$$\eta = h_r / D \quad (2)$$

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

$$SR = F_{u, ring} / F_{u, sm} \quad (3)$$

여기서, $F_{u, ring}$ 은 환보강 이음부의 강도이고, $F_{u, sm}$ 은 단순이음부의 강도이다. 또한 이음부에 환보강재를 설치하여 발생가능한 강도의 최대값을 최대보강강도($F_{max, r}$)라고 정의하고, 이에 따른 강도비로서 최대강도비(SR_{max})를 식(4)와 같이 정의하였다.

$$SR_{max} = F_{max, r} / F_{u, sm} \quad (4)$$

3. 단순 T형 관이음부의 강도해석

3.1 단순이음부 모델

보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순 T형 관이음부에 대한 수치모델을 Table 1과 같이 구성하였다. 수치모델의 주부재 직경(D)은 800mm, 주부재 길이(L)는 6400mm로 고정하고, 주부재와 지부재의 두께와 지부재의 직경을 변화하며 구성하였다. 주부재의 직경에 따라 T1, T2, T3, T4 모델로 구성하고, 각 모델에 대해 주부재와 지부재의 두께에 따라 세부모델을 설정하여 총 28개의 단순이음부 모델을 구성하였다.

T형 관이음부의 전체적인 거동을 고려한다면 주부재의 길이가 파손시에 가장 지배적인 요소라고 할 수 있지만, 본 연구에서는 이음부의 강도평가로서 국부적인 거동만을 관찰하므로 굽힘에 의한 구조물 전체의 거동을 고려하지 않는다. Table 1의 무차원 계수의 범위는 해양구조물에서 널리 사용되는 관이음부의 기하학적 특성을 고려하여 구성한 것이다.

Table 1 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
	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	-	-	-	-

3.2 유한요소 모델링

이음부의 강도평가를 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고, 유한요소 모델링 과정에서 한 절점당 6개의 자유도를 가지는 8절점 쉘요소를 사용하였다. 구조물의 기하학적 조건과 하중조건에 대한 대칭성을 이용해 전체이음부의 1/4만을 모델링하였고, 대칭면에 위치한 절점에 대칭경계조건을 적용하였다. 주부재의 단부 변형을 구속하기 위해 단부에 100mm 두께의 격막을 설치하였고, 강체운동을 방지하기 위해 지점에 변위 경계조건을 적용하여 주부재의 단부를 단순지지로 설정하였다. 지부재 축방향력에 대한 하중조건은 변위제어방법을 사용하여 지부재의 단부에 변위를 증가시켜 해석과정에서 축방향력을 계산하였다.

기하학적·재료적 비선형성을 고려하였고, 항복후 재료의 특성은 선형탄성-완전소성을 관계로 설정하였다. 지부재와 주부재는 동일 재료로 구성하였으며, 항복강도(f_y)는 350MPa, 탄성계수는 200GPa, 프와송비는 0.3이다. 이음부의 용접부는 동일한 쉘요소를 사용하여 형성하였으며, 용접부의 기하학적 모델링이 곤란한 T3-5~T3-8 모델과 T4 모델은 용접형상을 고려하지 않았다.

3.3 단순이음부 모델의 수치해석결과

단순 T형 관이음부 모델의 유한요소해석 결과로부터 무차원 정적강도를 구해 Table 2에 정리하였다. 여기서 F_u 는 극한하중이다.

Table 2 Numerical results of 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. 환보강 T형 관이음부의 정적강도

4.1 환보강 T형 관이음부 모델

단순 T형 관이음부의 교차부 중앙에 내부 환보강재를 설치한 환보강이음부를 구성하였다. 내부 환보강재의 기하학적 조건은 식(5)와 같다.

$$\eta \leq 0.35, \xi \leq 2.0 \quad (5)$$

식(5)의 범위내에서 η 에 대해 8가지 경우, ξ 에 대해 6가지 경우를 고려하여 Table 3과 같은 환보강재 모델을 구성하였다.

Table 3 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 3에서 η 에 대한 조건은 상수로 결정되나, ξ 에 대한 조건은 주부재의 두께에 따라 다르게 나타난다. 한 개의 단순이음부 모델에 대해 보강재 형상변화에 대한 48개의 보강이음부 모델을 구성하였으며, 총 1344개의 수치모델을 설정하였다. 환보강이음부의 모델명은 Table 1의 단순이음부 모델에 대해 각각 T1R, T2R, T3R, T4R이라고 정하였다. 환보강재는 이음부와 동일한 재료로 되어있으며, 이음부 모델과 동일한 요소인 8절점 쉘요소를 사용하여 모델링하였다.

4.2 환보강 이음부 모델의 수치해석결과

내부 환보강 T형 관이음부 모델을 유한요소법에 의해 해석하고 하중-변위관계로부터 이음부 강도를 계산하였다. 보강이음부의 보강효과를 평가하기 위해 강도비를 계산하여 이음부별로 평가하였고, 환보강재의 크기가 이음부 강도에 미치는 영향을 조사하고자 환보강재의 무차원계수(η , ξ)에 대한 강도비의 변화를 고찰하였다.

Fig. 2는 수치해석 결과 중 $\beta=0.3$, $\gamma=16.67$, $\tau=1.0$ 일 때 보강재의 폭비(η)에 대한 강도비의 변화를 나타낸 것으로 다른 모델에 대해서도 이와 유사한 경향의 결과가 나타났다. Fig. 2에서 보면, 환보강재의 폭과 두께가 커질수록 강도비가 증가하였지만 최대강도비를 초과하지는 않았다. T1R 모델의 경우, η 가 0.2 이상이고, ξ 가 1.5보다 클 경우에 추가적인 보강효과는 나타나지 않았고, 그 외의 모델에서는 η 가 0.2 이상이고, ξ 가 1.0보다 클 경우 강도의 증가는 발생하지 않았다.

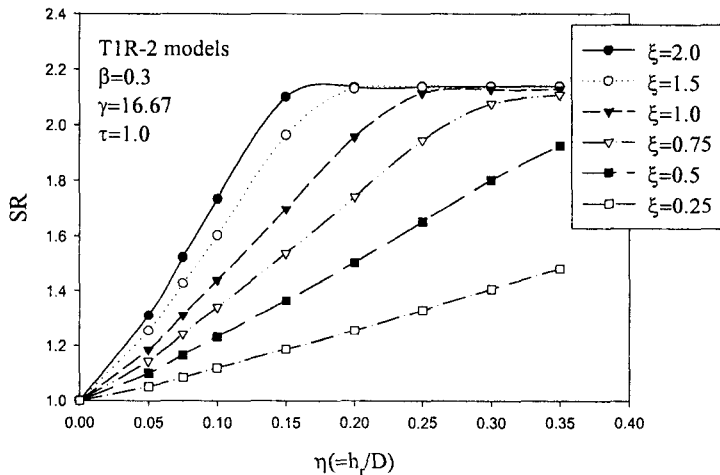


Fig. 2 Strength ratio of ring-stiffened T-joint(T1R-2 models).

Fig. 3은 동일한 β 에 대해 γ , τ 와 최대강도비의 관계를 나타낸 것이다. γ 가 커질수록 보강효과가 더욱 증가하였으며, $\beta=0.3$ 인 경우에는 지부재의 두께도 보강 강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 하지만 지부재

와 주부재의 동일한 단면을 가지는 경우($\beta=1.0$)에는 보강효과가 거의 발생하지 않았다. 또한, β 에 대한 최대강도비의 변화를 보면, 직경비가 증가할수록 즉 지부재 직경이 커질수록 보강효과가 감소하여 $\beta=1.0$ 인 경우에는 보강효과가 거의 나타나지 않았다.

보강이음부의 해석결과로 최대강도비를 Table 4에 정리하였다. Table 4에서 Eq.(5)는 수치해석 자료 전체를 고려하여 계산한 것이며 식(6)은 아래식과 같은 실용적인 환보강재의 크기를 고려하여 계산한 결과이다.

$$\eta \leq 0.2, \quad \xi \leq 1.0 \quad (6)$$

Table 4에서 식(6)의 실용적 환보강재의 크기에 대한 최대강도비가 식(5)의 경우와 거의 유사하게 계산되어, 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. 그리고, 식(6)의 범위내에서의 계산결과를 보면, $\beta=0.3$ 인 경우를 제외하고는 지부재의 두께는 최대강도비에 큰 영향을 미치지 못하였다.

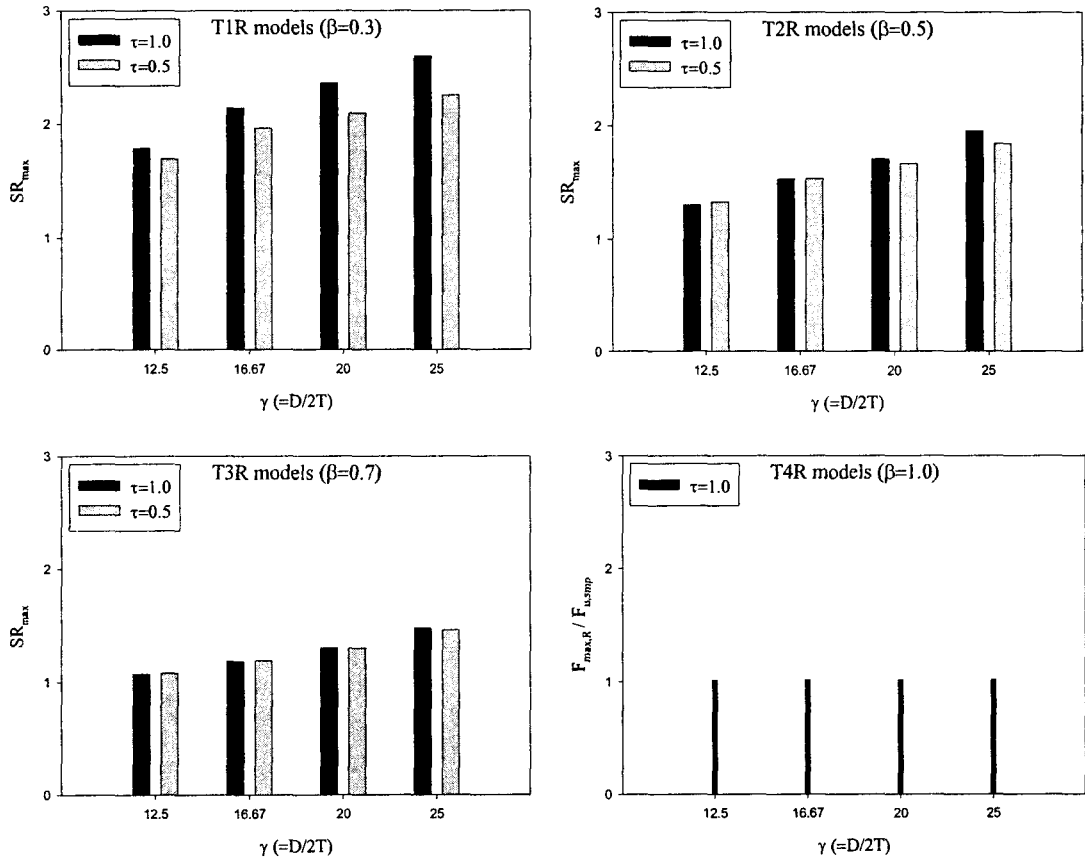


Fig. 3 Effect of γ on ring-stiffened T-joints.

Table 4 Maximum strength ratio of ring-stiffened T-joints

τ	γ	$\beta=0.3$ (T1R)		$\beta=0.5$ (T2R)		$\beta=0.7$ (T3R)		$\beta=1.0$ (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	-	-

4.3 강도산정식의 제안

유한요소해석 결과를 이용하여 내부 환보강 T형 관이음부의 강도식 산정을 위한 회귀분석을 수행하였다. 해석자료는 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 식(6)의 범위 내에서의 유한요소해석 결과만을 이용하였고, $\beta=1.0$ 인 경우는 보강효과가 거의 발행하지 않으므로 회귀분석에서 제외하였다. 회귀분석을 위해 η , ξ , γ 를 독립변수로 하고 강도비(SR)를 종속변수로 설정하여 비선형 회귀모형을 식(7)과 같이 구성하였다.

$$SR = a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \xi \eta \gamma \tag{7}$$

여기서, $a_i (i=0, 1, 2, 3)$ 는 회귀계수이며, 회귀분석에는 SPSS프로그램을 사용하였고, 회귀계수의 추정과정에는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용하였다.

회귀모형에 대한 분석 결과는 Table 5와 같다. 개개의 회귀모형에 대해 101개의 수치해석 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 여기서 R^2 은 회귀모형의 적합도 검토를 위해 정의되는 결정계수(coefficient of determination)이다. 회귀분석의 과정에서 환보강재의 폭이 환보강재의 두께보다 이음부 강도에 지배적인 요소임이 판명되었고, β 가 0.5 이하에서는 R^2 이 약 98% 이상으로 나타나 본 회귀모형이 수치해석 결과를 잘 재현하는 것으로 추정되었고, $\beta=0.7$ 에서는 비교적 작은 적합도가 발생하였다.

Table 5 Regression analyses for ring-stiffened T-joint

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	0.4779	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	0.1816	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

5. 결 론

본 연구에서는 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, 최대강도비가 최대 2.6까지 계산되었다.
- 2) 반경-두께비(γ)가 커질수록 강도비가 증가하여 보강효과가 커지고, 직경비(β)가 커질수록 강도비는 감소하여 보강효과가 작아진다.
- 3) 직경비가 1인 경우에는 환보강재 설치 후에 강도의 변화가 거의 발생하지 않기 때문에 지부재에 압축력이 작용하는 T형 관이음부의 보강법으로는 적합하지 않다.
- 4) 보강재의 폭이 주부재 직경의 20%이하이고 보강재 두께가 주부재 두께 이하인 경우에, 이음부에서 발생 가능한 최대강도비가 계산되어 이 범위 내에서 보강재를 설계하는 것이 효율적이다.
- 5) 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 회귀분석을 수행한 결과 강도산정식을 다음과 같이 구하였고, 계수는 Table 5에 제시하였다.

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

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

참 고 문 헌

1. Dexter, E. M., Lee, M. M. K., "Static Strength of Axially Loaded Tubular K-Joints: I. Behavior", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 2, 1999, pp.194~201
2. American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", 1993, API RP2A
3. Sawada, Y., Idogaki, S., Sekita, K., "Static and Fatigue Tests on T-joints Stiffened by an Internal Ring", *OTC*, 1979, Paper 3422
4. Ramachandra, D. S., Madhava Rao, A. G., Gandhi, P., Pant, P. K., "Structural Efficiency of Internally Ring-stiffened Steel Tubular Joints", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 11, 1992, pp.3016~3035
5. Thandavamoorthy, T. S., et al., "Behavior of Internally Ring-stiffened Joints of Offshore Platforms", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 11, 1999, pp.1348~1352
6. Rhee, H. C., "Comparison of Finite-element Stress Solutions of Multi-Plane Tubular Joint With and Without Ring and Longitudinal Stiffeners", *OTC*, 1992, Paper 6942
7. 조현만, 류연선 "내부 환보강 X형 관이음부의 강도산정식", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제15권 1집, 2002, pp.61~68
8. 조현만, 환보강 관이음부의 정적강도 산정에 관한 연구, 박사학위논문, 부경대학교, 2002, pp.237