

내부 환보강 X형 관이음부의 강도산정식 Strength Evaluation Formulae for Ring-Stiffened Tubular X-Joints

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

ABSTRACT

Tubular members have been applied in a wide range of frame structures including offshore structures. For the efficient load flow in tubular-member structures, the joints of tubular members are usually reinforced using internal ring stiffener for the steel tubular joint having a large diameter. The objective of this paper is to numerically assess the behavior of X-joints with an internal ring stiffener, and to evaluate the reinforcement effect of a ring stiffener, and to establish the strength formulae. Nonlinear finite element analysis is used to compute the static strength of axially loaded tubular joints.

From the numerical results, internal ring stiffener is found to be efficient in improving static strength of tubular X-joints. Maximum strength ratios are calculated as 1.5~3.5, and the effective dimensions of ring stiffener are found. Regression analyses are performed considering practical size of ring stiffener and strength estimation formulae are proposed.

1. 서 론

해양구조물의 자켓과 같은 구조물의 연결시스템인 관이음부(tubular joint)의 구조강도를 증가시키기 위해 다양한 보강법이 개발되었으며, 특히 관형재(tubular member) 내부에 환보강재(ring stiffener)를 설치하는 방법이 대형 관이음부에서 사용되고 있다. 보강되지 않은 단순이음부의 정적강도 및 최대응력의 산정에 대한 연구는 수치적 방법과 실험적 방법에 의해 다양하게 수행되었지만^{(1),(2)}, 보강이음부의 구조강도를 산정하는 연구는 소수의 제한된 이음부 모델에 대해 실험적 방법으로 거동특성으로 파악한 것이거나, 응력평가에 대한 것이다. 특히, 내부 환보강재를 설치함으로써 이음부의 정적강도와 피로강도가 증가되는 것은 Sawada 등⁽³⁾, Rhee⁽⁴⁾, Thandavamoorthy 등⁽⁵⁾에 의해서 모형실험 및 수치실험을 통해 확인되었지만, 이음부와 보강재의 기하학적 특성이 강도에 미치는 영향을 구체적으로 파악한 연구는 거의 수행되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 지부재에 축방향력이 작용하는 X형 관이음부의 내부에 설치한 환보강재의 보강효과를 파악하고, 보강재 및 이음부 치수와 정적강도의 상관관계를 규명하여 환보강 X형 이음부의 강도식을 제안하고자 한다.

연구목적을 달성하기 위해 우선 보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순이음부 모델을 주부재와 지부재의 치수를 서로 달리하여 구성하고, 비선형 유한요소해석을 통해 정적강도를 계산한다. 단순 이음부의 교차부 내부에 환보강재를 설치하고 보강재의 크기를 달리하여 보강 X형 관이음부의 수치모델을 구성한다.

* 정회원, 부경대학교 해양공학과 박사후과정

** 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수

환보강 X형 관이음부의 수치해석 결과로부터 환보강재와 이음부의 기하학적 치수 변화에 따른 강도비와 최대강도비를 계산하여 보강이음부의 거동특성과 보강효과를 평가하고, 회귀분석을 수행하여 환보강 X형 관이음부의 강도산정식을 제안한다.

2. X형 관이음부의 구조적 특성과 보강강도

관이음부란 하나 이상의 관형부재를 포함한 부재가 교차되는 구조물의 일부분으로서 구조부재의 연결시스템이다. 관이음부의 기하학적 성질은 교차부재의 형상, 크기, 위치, 방향의 요소들로 표현할 수 있으며, 주부재와 지부재의 연결형태에 따라 이음부의 종류를 분류한다. 관이음부의 정적강도와 같은 구조적 거동은 기하학적 치수들을 무차원화한 계수들과 이음부 종류에 따라 표현되며, 기하학적 무차원계수에는 주부재의 길이계수(α), 직경비(β), 반경-두께비(γ), 두께비(τ) 등이 있다⁽⁶⁾. 또한 환보강재의 치수가 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 보강재의 치수와 관련된 무차원 계수로 보강재의 두께비($\xi = t_r/T$)와 보강재의 폭비($\eta = h_r/D$)를 정의하였다⁽⁷⁾. Fig. 1은 본 연구의 대상구조물인 환보강 X형 관이음부의 형상이다.

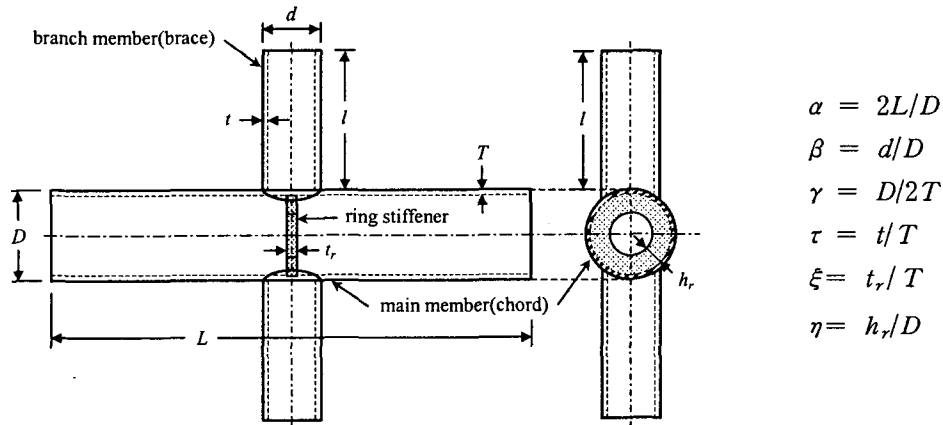


Fig. 1 Dimensions of ring-stiffened tubular X-joint.

환보강 관이음부의 보강효과를 평가하기 위해 강도비(strength ratio; SR)를 식(1)과 같이 정의하였다.

$$SR = F_{u, ring} / F_{u, smb} \quad (1)$$

여기서, $F_{u, ring}$ 은 환보강 이음부의 강도이고, $F_{u, smb}$ 는 단순이음부의 강도이다. 또한 이음부에 환보강재를 설치하여 발생가능한 강도의 최대값을 최대보강강도($F_{max, r}$)라고 정의하고, 이에 따른 강도비로서 최대강도비를 식(2)와 같이 정의하였다.

$$SR_{max} = F_{max, r} / F_{u, smb} \quad (2)$$

환보강 X형 관이음부의 강도비는 이음부와 환보강재의 무차원 계수에 대한 함수로 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$SR = f(\alpha, \beta, \gamma, \tau, \eta, \xi) \quad (3)$$

3. 단순 X형 관이음부의 정적강도

3.1 단순 X형 관이음부 모델

주부재 직경(D)이 800mm인 단순 X형 관이음부를 주부재와 지부재의 두께와 지부재 직경을 달리하여 Table 1과 같이 28개의 수치모델로 구성하였다. 수치모델의 주부재 길이는 단부효과의 영향을 받지 않도록 길이계수($\alpha=2L/D$)를 16으로 하여 6400mm로 설정하였다⁽⁷⁾. Table 1의 무차원 계수의 범위는 일반적으로 해양구조물에서 널리 사용되는 관이음부의 기하학적 특성을 고려하여 구성한 것이다.

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
0.3	X1-1	X1-2	X1-3	X1-4	X1-5	X1-6	X1-7	X1-8
0.5	X2-1	X2-2	X2-3	X2-4	X2-5	X2-6	X2-7	X2-8
0.7	X3-1	X3-2	X3-3	X3-4	X3-5	X3-6	X3-7	X3-8
1.0	X4-1	X4-2	X4-3	X4-4	-	-	-	-

3.2 유한요소 모델링

관이음부의 정적강도 산정을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였고, 유한요소 모델링에는 한 절점당 6개의 자유도를 가지는 구조용 8절점 쉘요소를 사용하였다. 계산의 효율성을 위해 이음부의 위치에 따라 요소망의 밀도를 다르게 형성하였다. 응력집중 및 구조거동이 복잡하고 강도계산을 위한 변위의 관측점이 있는 주부재와 지부재의 교차부는 조밀하게 형성하였고, 부재의 단부로 갈수록 상대적으로 큰 요소를 사용하였다. Fig. 2는 수치모델의 유한요소망 형성의 예이다.

구조물의 하중조건과 기하학적 대칭성을 이용하여 전체 이음부의 1/8만을 모델링하였고, 대칭면에 존재하는 절점에 대칭경계조건을 설정하였다. 정적강도의 산정을 위해 평가되는 하중-변위관계에서, 하중은 지부재에 작용하는 압축력으로 하고, 변위는 크라운 부분에서의 지부재 축방향 변위로 설정하였다. 하중의 모델링을 위해 변위제어 방법을 사용하였고, 기하학적, 재료적 비선형성을 고려하였으며, 항복 후 재료의 특성은 선형탄성-완전소성의 관계로 설정하였다. 주부재와 지부재, 용접부는 동일한 재료로 구성하였고, 항복강도(f_y)는 350MPa, 탄성계수는 200GPa, 프와송비는 0.3이다. 이음부의 용접부는 동일한 쉘요소를 사용하여 형성하였으며, 용접부의 기하학적 모델링이 곤란한 X3-5~X3-8 모델과 X4 모델은 용접형상을 고려하지 않았다.

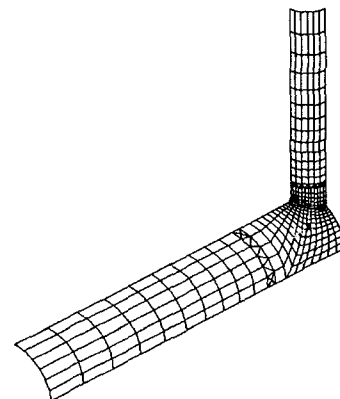


Fig. 2 Finite element mesh for tubular X-joint.

3.3 단순 X형 관이음부의 수치해석 결과

단순 X형 관이음부 모델의 유한요소해석 결과로 하중-변위곡선을 구하였다. Fig. 3은 단순이음부 모델 중 X1 모델의 해석결과이며, 다른 모델에 대해서도 이와 유사한 하중-변위곡선을 구할 수 있었다. 여기서, 하중

과 변위는 각각 무차원화 하였으며, 이로부터 단순이음부 모델의 강도를 구해 Table 2에 정리하였다.

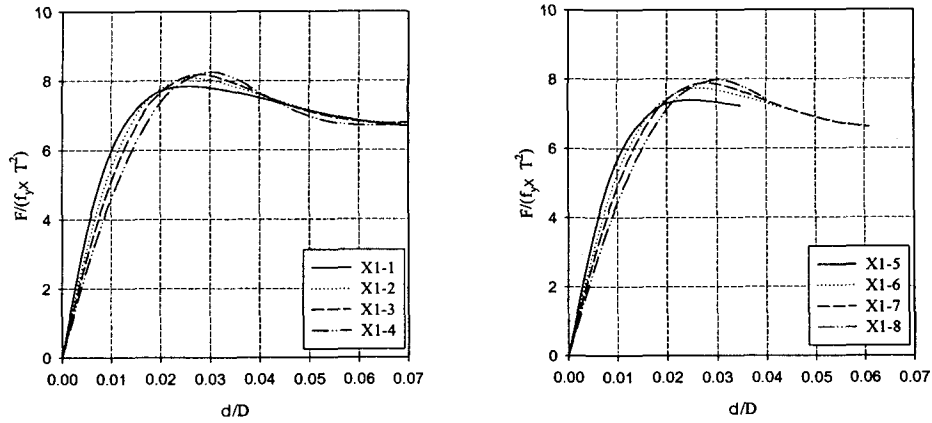


Fig. 3 Load-displacement curves of X1 models.

Table 2 Numerical results of simple X-joints

Models	X1-1	X1-2	X1-3	X1-4	X1-5	X1-6	X1-7	X1-8
$F_u / (f_y \times T^2)$	7.84	8.08	8.18	8.26	7.39	7.74	7.89	7.98
Models	X2-1	X2-2	X2-3	X2-4	X2-5	X2-6	X2-7	X2-8
$F_u / (f_y \times T^2)$	10.94	11.54	11.83	12.09	10.68	11.39	11.66	12.01
Models	X3-1	X3-2	X3-3	X3-4	X3-5	X3-6	X3-7	X3-8
$F_u / (f_y \times T^2)$	14.03	14.73	15.08	15.42	14.00	14.80	15.16	15.49
Models	X4-1	X4-2	X4-3	X4-4				
$F_u / (f_y \times T^2)$	33.11	36.96	39.55	42.87				

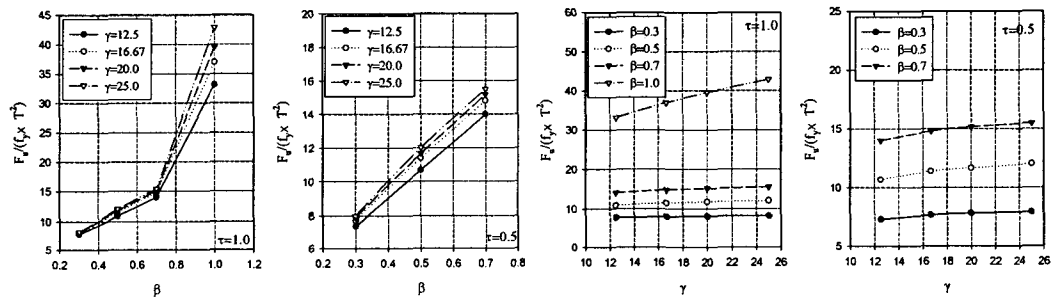


Fig. 4 Variation of static strengths according to non-dimensional geometric parameters.

단순 X형 관이음부의 해석결과를 바탕으로 직경비(β)와 반경-두께비(γ)에 대한 강도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. β 와 정적강도와와의 관계에서, β 가 커질수록 정적강도는 증가하며, 특히 β 가 0.7이하에서는 선형적으로 강도가 증가하다가 $\beta=1$ 에서는 강도가 급증하는 현상을 보인다. 또한 동일한 β 에 대해 γ 가 커질수록 정적강도는 증가하고, 그 차이도 β 가 커질수록 증가한다.

γ 와 정적강도의 관계에서 $\beta=1$ 인 경우에 γ 에 대한 강도의 변화량이 가장 크게 나타난다. 그 이유는 주부재와 지부재의 단면형상이 동일하면 지부재의 작용하중이 주부재 벽에서 주로 막응력으로 전달되기 때문이다. API 등에서 제시한 단순이음부에 대한 일반적인 강도산정식⁽⁸⁾은 지부재 두께(t)가 고려인자로 포함되지 않고 β 와 γ 의 함수로 표현된다. 수치해석 결과에서도 τ 에 대해 강도변화가 거의 발생하지 않아, 지부재 두께는 단순 이음부의 강도에 큰 영향을 주지 못함이 확인되었다.

4. 환보강 X형 관이음부의 정적강도

4.1 환보강 X형 관이음부 모델

단순 X형 관이음부의 내부에 환보강재를 설치한 보강이음부의 정적강도를 유한요소해석 프로그램을 이용해 계산하였다. 환보강재는 이음부와 동일한 재료로 구성되었고, 수치모델의 유한요소 모델링의 과정은 단순 이음부의 경우와 동일하다. 이음부 내부에 설치할 환보강재의 기하학적 조건은 식(4)와 같다.

$$0.05 \leq \eta \leq 0.375, \quad 0.25 \leq \xi \leq 2.0 \quad (4)$$

식(4)의 범위 내에서 각각 9가지 경우를 고려하여 Table 3과 같은 환보강재 모델을 구성하였다. 주부재 직경은 동일하므로 환보강재 폭에 대한 기하학적 조건(η)은 case별로 상수로 나타나지만, 환보강재의 두께는 주부재 두께에 따라 다르게 나타난다. 즉 보강재의 폭과 두께를 고려하면 Table 1의 한 개의 이음부 모델에 대해 81개의 환보강재 모델이 설정되고, 따라서 총 2268개의 환보강 X형 관이음부 모델이 구성되었다.

Table 3 Internal ring stiffeners of tubular X-joints

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8	case 9
η	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.2	0.25	0.3	0.375
ξ	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	1.0	1.25	1.5	2.0

4.2 환보강 X형 관이음부모델의 수치해석 결과

지부재에 축방향력이 작용하는 환보강 X형 관이음부 모델을 유한요소법에 의해 해석하고, 무차원강도와 강도비를 계산하였다. 환보강재의 보강효과를 평가하기 위해 환보강재의 무차원 계수(η, ξ)에 대한 강도비의 변화를 고찰하였다. Fig. 5는 수치해석 결과 중, 환보강 X2-2와 X2-6 모델의 보강재의 두께비(ξ)와 보강재의 폭비(η)에 대한 강도비의 변화를 나타낸 것으로 다른 모델에 대해서도 이와 유사한 경향의 결과가 나타났다. Fig. 5에서 ξ 와 η 가 커질수록 강도비는 증가하지만 최대강도비(SR_{max})를 초과하지는 않는다. 전체 환보강 관이음부모델의 해석결과에서 보강재의 무차원 계수가 증가할 때 강도비의 증가율이 감소하지 않는 보강재 치수의 기하학적 범위는 식(5)와 같이 일반적으로 나타낼 수 있다.

$$\eta \leq 0.2, \quad \xi \leq 1.0 \quad (5)$$

강도비의 증가율이 감소하지 않는다는 것은 보강재의 크기가 커질수록 보강효과도 효율적으로 증가한다는 것으로, 효율적인 보강재의 크기를 결정하는 기준으로 적용시킬 수 있으며, 식(5)의 범위는 실제 해양구조물 등의 관이음부에서 환보강재 실용적 크기의 범위와도 유사하다.

τ 에 대한 보강강도의 변화를 보면, X2R-6 모델의 경우에 전반적인 그래프의 경향은 X2R-2 모델과 유사하나 X2R-2 모델에 비해 최대강도비가 무차원 계수가 작은 지점에서 발생하며 그 크기도 감소하였다. 이와 같은 현상은 다른 환보강 관이음부의 해석결과에서도 동일하게 나타났으며, 이것은 단순 이음부의 해석 결과

와는 차이를 보인다. 즉, 단순 X형 이음부의 경우에는 지부재 두께가 강도에 영향을 거의 미치지 못하였지만, 환보강 X형 이음부의 최대보강강도에는 지부재 두께가 고려되어야하는 인자로 판명되었다.

Table 4는 환보강재를 설치함으로써 이음부에 발생하는 최대강도비를 나타낸 것이다. 최대강도비를 계산할 때 환보강재의 기하학적 조건을 식(4)와 식(5)의 범위를 각각 고려하였는데, $\eta \leq 0.375$, $\xi \leq 2.0$ 의 범위(case-A)에서 최대강도비는 1.5~3.5이고, $\eta \leq 0.2$, $\xi \leq 1.0$ (case-B)에서 1.5~2.6으로 보강효과가 우수하게 나타났다. τ 에 따른 최대강도비의 변화는 $\eta \leq 0.375$, $\xi \leq 2.0$ 는 크게 나타났으나, $\eta \leq 0.2$, $\xi \leq 1.0$ 에서는 비교적 그 차이가 감소하였다. Fig. 6은 직경비에 대한 최대강도비의 변화를 환보강재의 기하학적 조건에 따라서 나타낸 것이다. Fig. 6에서 직경비가 1인 경우에 최대강도비가 감소하여 보강효과가 상대적으로는 작게 나타났지만, 최대강도비의 크기가 1.5~2.2로서 효과적인 보강이 이루어졌다.

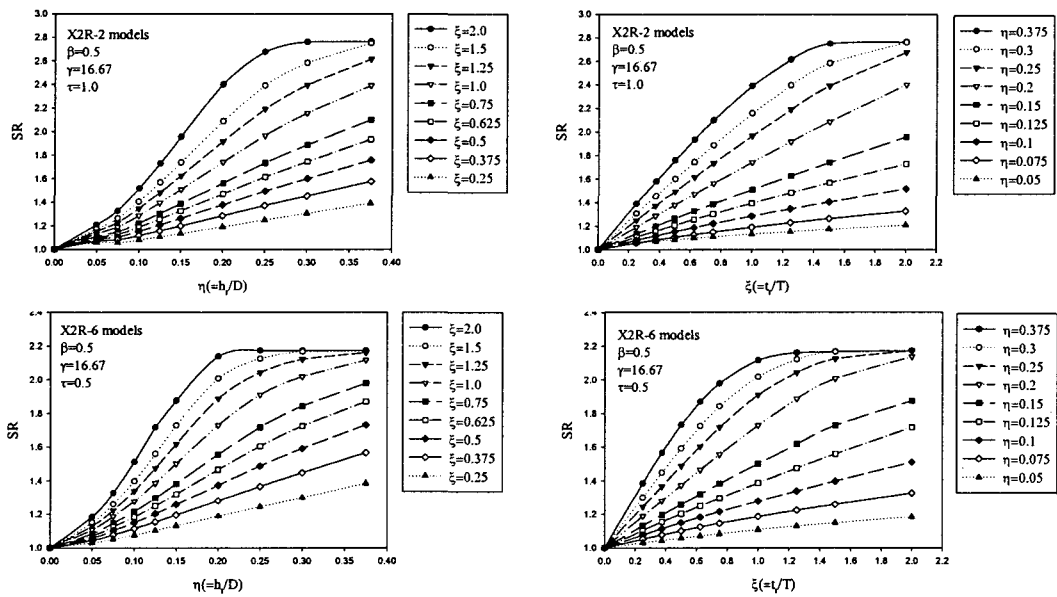


Fig. 5 Strength ratio of ring-stiffened X2-2 and X2-6 models.

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

τ	γ	$\beta=0.3$ (X1R)		$\beta=0.5$ (X2R)		$\beta=0.7$ (X3R)		$\beta=1.0$ (X4R)	
		case-A*	case-B**	case-A	case-B	case-A	case-B	case-A	case-B
1.0	12.5	2.360	1.937	2.521	1.796	2.609	1.785	1.730	1.485
	16.67	2.670	2.165	2.764	1.965	2.891	1.952	1.907	1.586
	20.0	2.916	2.337	2.935	2.095	3.118	2.084	2.205	1.655
	25.0	3.158	2.588	3.202	2.289	3.468	2.275	2.242	1.803
0.5	12.5	1.458	1.485	1.761	1.731	1.876	1.734	-	-
	16.67	1.926	1.912	2.173	1.910	2.228	1.923	-	-
	20.0	2.223	2.214	2.414	2.063	2.451	2.056	-	-
	25.0	2.490	2.371	2.654	2.247	2.746	2.248	-	-

case-A* : $0.05 \leq \eta \leq 0.375$, $0.25 \leq \xi \leq 2.0$, case-B** : $\eta \leq 0.02$, $\xi \leq 1.0$

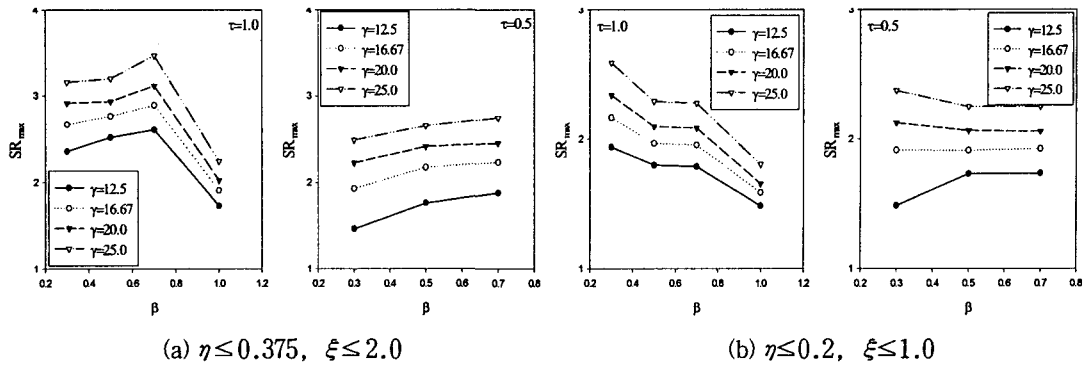


Fig. 6 Effect of β on ring-stiffened X-joints.

5. 회귀분석과 강도산정식

환보강 X형 관이음부의 유한요소해석 결과를 바탕으로 강도식 산정을 위한 회귀분석을 수행하였고, 이를 위해 SPSS를 사용하였다. 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 $0 \leq \eta \leq 0.2$, $0 \leq \xi \leq 1.0$ 의 해석 자료만을 사용하였고, 회귀분석을 위해 환보강재의 무차원 계수인 η , ξ 와 이음부의 무차원 계수인 γ 를 독립변수로 하고 강도비(SR)를 종속변수로 설정하여 β 와 τ 의 조건별로 비선형 회귀모형을 식(6)과 같이 구성하였다.

$$SR = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta\gamma \quad (6)$$

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

회귀모형에 대한 분석 결과는 Table 5와 같다. 개개의 회귀모형에 대해 145개의 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 회귀분석결과 R^2 이 약 98% 이상으로 나타나 본 회귀모형이 수치해석 결과를 잘 재현하는 것으로 추정된다.

Table 5 Regression analyses for ring-stiffened X-joint

β	τ	No. of data points	Regression coefficients				$R^2(\%)$
			a_0	a_1	a_3	a_4	
0.3	1.0	145	0.9675	-0.0001	0.5899	0.2243	99.37
0.3	0.5	145	0.9773	0.0010	0.5946	0.2221	99.01
0.5	1.0	145	0.9450	-0.0096	0.6607	0.1772	97.74
0.5	0.5	145	0.9541	-0.0238	0.6193	0.1843	98.38
0.7	1.0	145	0.9313	0.0153	0.7193	0.1768	97.61
0.7	0.5	145	0.9399	0.0011	0.6708	0.1801	98.06
1.0	1.0	145	1.0140	0.0284	0.0937	0.1319	98.56

6. 결 론

본 연구에서는 환보강 X형 관이음부의 정적강도를 기하학적, 재료적 비선형성을 고려한 유한요소해석을 통해 계산하고, 이음부와 보강재의 기하학적 조건과 보강 효과와의 상관관계를 규명하여 강도산정식을 제안하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 내부 환보강재의 치수가 커질수록 강도비가 증가하였고, 최대강도비는 1.5~3.5로서 축방향력에 대한 보강효과의 우수성이 증명되었다.

2) 환보강재의 무차원 계수와 강도비의 관계에서 보강재의 폭비와 두께비가 커질수록 강도비는 증가하지만 강도비의 극한값인 최대강도비를 초과하지 않았다. 또한 이음부 별로 최대강도비를 계산하여 환보강재의 설치로 인한 최대 보강효과가 계산되었다.

3) 단순 X형 관이음부의 정적강도에는 지부재 두께가 영향을 주지 못하였지만, 환보강 X형 관이음부의 강도에서는 지부재 두께가 고려되어야 하는 인자이다.

4) 환보강재의 실용적 크기를 고려하여, $0 \leq \eta \leq 0.2$, $0 \leq \xi \leq 1.0$ 에서 강도비의 변화를 고찰하였다. 이 범위 내에서는 거의 모든 모델에 있어서, 보강재의 치수가 증가하면 강도비의 증가율이 감소하지 않는 범위가 되어 효율적인 보강재의 선택 범위로 판명되었다.

5) $12.5 \leq \gamma \leq 25.0$, $0 \leq \eta \leq 0.2$, $0 \leq \xi \leq 1.0$ 의 범위 내에서 비선형 회귀분석을 수행하여, 강도산정식을 $SR = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta\gamma$ 와 같이 구하였고 계수는 Table 5에 나타내었다. 또한 회귀분석 과정에서 내부 환보강재의 기하학적 성질 중 보강재의 폭이 보강재의 두께에 비해 정적강도에 지배적인 인자임이 판명되었다.

본 수치결과는 환보강 X형 관이음부의 정적강도 및 이음부와 보강재의 치수에 따른 보강효과를 예측하는 보강재의 설계자료에 활용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. Kang, C. T., Moffat D. G., Mistry, J., "Strength of DT Tubular Joints with Brace and Chord Compression", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 7, 1998, pp.775~783
2. 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
3. Sawada, Y., Idogaki, S., Sekita, K., "Static and Fatigue Tests on T-joints Stiffened by an Internal Ring", OTC Paper 3422, 1979
4. Rhee, H. C., "Comparison of Finite-element Stress Solutions of Multi-Plane Tubular Joint With and Without Ring and Longitudinal Stiffeners", OTC Paper 6942, 1992
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. Marshall, P. W., *Design of Welded Tubular Connections, Basis and Use of AWS Code Provision*, Elsevier Science Publishers, 1992, p.412
7. 조현만, "환보강 관이음부의 정적강도 산정에 관한 연구", 부경대학교 박사학위논문, 2002
8. American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*, API RP2A, 1993