

환보강 X형 관이음부의 정적강도에 관한 수치적 연구

A Numerical Study on the Static Strength of Tubular X-Joints With an Internal Ring Stiffener

조 현 만†

Cho, Hyun-Man

류 연 선*

Ryu, Yeon-Sun

(논문접수일 : 2004년 11월 23일 ; 심사종료일 : 2005년 8월 19일)

요 지

본 논문의 목적은 내부환보강 X형 관이음부의 거동을 수치적으로 평가하여 환보강재의 보강효과를 규명하고, 강도 산정식을 제안하는 것이다. 축방향력을 받는 관이음부의 정적강도를 산정하기 위해 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였고, X형 관이음부의 주부재 단부효과를 감소시킬 수 있는 주부재의 적정길이를 제시하였다. 내부 환보강재는 단순 X형 관이음부의 정적강도를 증가시키는데 효율적임이 판명되었고, 최대 보강효과를 나타내는 최대강도비가 1.5에서 3까지 산정되었다. 환보강재의 실용적 크기를 고려한 이음부에 대해 유한요소해석 결과를 이용하여 회귀분석을 실시하고 내부 환보강 X형 관이음부의 강도산정식을 제안하였다.

핵심용어 : X형 관이음부, 관형재, 정적강도, 유한요소해석, 환보강재, 보강효과

Abstract

The objective of this paper is to numerically assess the behavior of tubular 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. Numerical and experimental results are in good agreement for tubular X-joints. The chord lengths of simple and ring-stiffened X-joints are suggested to reduce chord end effect. And, 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. Regression analyses are performed considering practical size of ring stiffener and strength estimation formulae for tubular X-joints with an internal ring stiffener are proposed.

keywords : tubular X-joint, tubular member, static strength, finite element method, ring stiffener, reinforcement effect.

1. 서 론

관형재(tubular member)는 좌굴이나 비틀림에 대한 강한 강성을 가지며, 항력계수가 작고, 충격하중의 영향을 적게 받으며, 최소의 도장면적을 가지고 있는 이유 등으로, 육상 및 해양, 우주 구조물에서 다양하게 사용되고 있다. 관형재로 연결된 관이음부(tubular joint)의 구조강도 해석은 피로수명 및 응력집중현상을 평가하기 위한 국부적 최대응력의 산정과, 극한 과도하중상태에 대한 정적강도의

산정으로 나눌 수 있다. 특히 극한상태의 하중조건에 노출되어 있는 구조물의 경우에, 부재는 항복강도 이후에도 상당한 인여강도를 유지하기 때문에 국부적 반복응력에 따른 피로강도와는 별도로 정적하중에 대한 극한강도를 고려한 설계가 필수적이다(김재동, 1996).

관이음부의 구조강도를 증가시키기 위해 다양한 보강법이 개발되었고, 자켓과 같은 해양구조물의 경우에는 이음부 내부에 환보강재(ring stiffener)를 설치하는 방법이 대형 관형재에서 사용되고 있다. 단순이음부의 정적강도

† 책임저자, 정회원 · 삼성물산 건설부문 부산신항 민자부두현장 설계과장
전화: 055-552-9873 ; Fax: 055-552-9876

E-mail: oldsea@nate.com

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

및 최대응력 산정에 대한 연구는 수치적 방법과 실험적 방법에 의해 수행되어 설계규준이 마련되었지만(API, 1993; AIJ, 1992; Packer 등, 1997), 보강이음부의 구조강도를 평가하는 연구는 소수의 이음부에 대해 실험적 방법으로 거동특성을 파악한 것이거나, 응력평가에 대한 것이다(Karamonos 등, 2000). 특히, 내부 환보강재를 설치함으로써 이음부의 정적강도와 피로강도가 증가되는 것은 일부 실험 및 수치해석을 통해 확인되었지만(Rhee, 1992; Thanda-vamoorthy, 1999), 부재와 보강재 단면의 기하학적 특성이 이음부 강도에 미치는 영향을 구체적으로 파악한 연구는 거의 수행되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 X형 관이음부의 축방향강도에 대한 내부 환보강재의 보강효과를 파악하고, 보강재 및 부재 치수와 강도의 상관관계를 규명하여 환보강 X형 이음부의 강도식을 제안하고자 한다.

연구목적을 달성하기 위해 다음과 같은 연구내용을 수행한다. 우선, 본 연구에서 사용되는 유한요소모델을 실험결과를 알고 있는 이음부에 적용하여 유한요소모델을 검증한다. 또한 주부재의 길이에 따른 강도변화를 파악하여 환보강 X형 관이음부에 대한 유한요소모델의 기준을 제시한다. 보강이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순이음부를 주부재와 지부재의 치수를 서로 달리하여 구성하고 정적강도를 계산한다. 단순 이음부의 교차부 내부에 환보강재를 설치하고 보강재의 크기를 달리하여 환보강 X형 관이음부의 유한요소모델을 구성한다. 환보강 X형 관이음부의 해석 결과로부터 환보강재와 이음부의 기하학적 치수 변화에 따른 보강효과를 평가하고, 회귀분석을 수행하여 환보강 X형 관이음부의 강도산정식을 제안한다.

2. 관이음부의 강도

2.1 관이음부의 구조적 특성과 이음부 보강

관이음부의 기하학적 성질은 교차부재의 형상, 크기, 위치, 방향의 요소들로 표현할 수 있으며, 주부재(main member, chord)와 지부재(branch member)의 연결형태에 따라 이음부의 종류를 분류한다. 그림 1은 X형 관이음부의 형상이다.

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. 또한, 이음

부에 인장하중이 작용하는 경우가 압축하중이 작용하는 경우보다 변형률경화 등의 원인으로 인해 강도가 증가하므로 이음부 설계에 있어서 압축하중이 축방향 강도의 기준하중으로 사용된다(Cho 등, 2002).

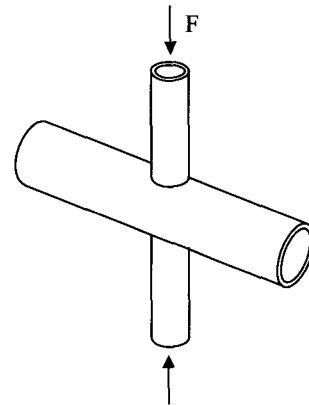


그림 1 Tubular X-joint.

관이음부의 구조강도를 증가시키기 위해서 거셋판(gusset plate)의 설치, 지부재의 중첩, 주부재의 국부적 벽두께 증가, 이음부 내·외부에 환보강재 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(Marshall, 1992; 조현만 등, 2000).

2.2 환보강 이음부의 강도

이음부의 정적강도 및 응력집중계수와 같은 구조적 거동수치는 기하학적 치수들을 무차원화한 계수들과 이음부의 종류에 따라 표현된다.

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

관이음부의 기하학적 무차원 계수에는 주부재의 길이계수($\alpha = 2L/D$)와 직경비($\beta = d/D$), 반경-두께비($\gamma = D/2T$), 두께비($\tau = t/T$) 등이 있다(Marshall, 1992).

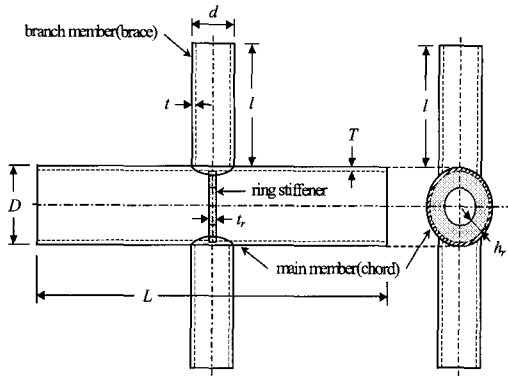


그림 2 Dimension of ring-stiffened tubular X-joint.

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(조현만 등, 2002A).

$$\eta = h_r / D \quad (1)$$

$$\xi = t_r / T \quad (2)$$

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

$$SR = \frac{F_{u, ring}}{F_{u, smb}} \quad (3)$$

여기서, $F_{u, ring}$ 은 환보강 이음부의 강도이고, $F_{u, smb}$ 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.

$$SR_{max} = \frac{F_{max, r}}{F_{u, smb}} \quad (4)$$

3. 관이음부의 유한요소 모델

3.1 유한요소모델링

관이음부의 정적강도 산정을 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 유한요소 모델링에는 한 절점당 6개의 자유도를 가지는 구조용 8절점 쉘요소를 적용

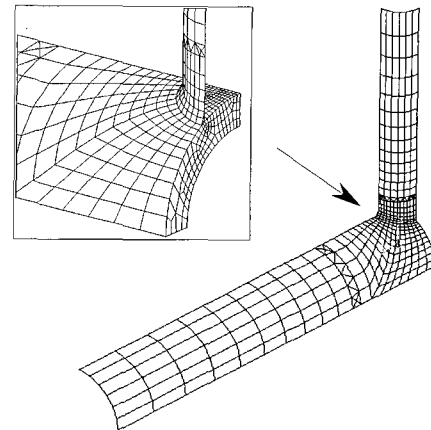


그림 3 Finite element mesh for tubular X-joint.

하였다(ANSYS, 2002). 그림 3은 X형 관이음부의 유한요소망 형상의 예이다.

관형재와 환보강재는 동일한 유한요소로 구성되었고, 구조물의 하중조건과 기하학적 대칭성을 이용하여 전체 이음부의 1/8만을 모델링 하였다. 대칭면에 존재하는 절점에 대해서는 대칭경계조건을 설정하였다.

정적강도의 산정을 위해 평가되는 하중-변위관계에서 하중은 지부재에 작용하는 압축력으로 하고, 변위는 크라운(crown) 부분에서의 지부재 축방향 변위를 측정하였다. 하중의 모델링을 위해 변위제어 방법을 사용하여 지부재의 단부에 있는 절점 변위를 증가시켰다. 기하학적, 재료적 비선형성을 고려하였으며, 항복 후 재료의 특성은 선형탄성-완전소성의 관계로 설정하였다. 소성해석 과정에는 등방성 변형률경화와 von Mises의 항복기준을 적용하였고, 하중단계의 반복적 계산에는 full Newton-Raphson법을 사용하였다.

3.2 실험결과와 비교

본 연구에서 사용하는 유한요소모델이 실제 구조물의 거동을 잘 재현하는가를 확인하기 위해 강재(steel)모형에 대한 실험결과를 알고 있는 이음부에 대해 유한요소해석을 수행하였다(Kang 등, 1998; Vegte, 1995; Togo, 1967).

실험모델의 기하학적 치수와 재료의 성질 및 해석결과는 표 1과 같다. 여기서, f_y 는 재료의 항복응력, $F_{u, test}$ 는 실험결과로 구한 강도, F_u 는 본 연구에서 유한요소해석 결과로 구한 강도이다. 실험 시에 지부재에 작용하는 축방향력과 이음부의 크라운 부분에서의 변위 관계로부터 정적강도(극한강도)가 산정되었다.

해석 결과들은 실험 결과와 거의 일치하여 단순이음부와

보강이음부의 유한요소모델이 실제 구조물에 대한 구조적 거동을 잘 재현하는 것이 확인되었다.

4. 주부재 길이가 이음부 강도에 미치는 영향

4.1 단순 X형 관이음부 모델과 주부재 길이

관형재로 구성된 구조물의 부재 해석은 구조물 전체의 해석과 이음부 해석, 그리고 미세적인 관점에서 용접부 해석의 단계로 구분할 수 있다(조현만 등, 2002 B). 관이음부의 국부적 거동을 파악하기 위해서는 전체구조물의 연결 시스템으로 이음부만을 해석하여야 한다. 실제 구조물의 경우에는 부재의 단부조건은 완전구속, 또는 완전자유도 아닌 이들 양자의 중간상태이므로, 공학적 모델을 결정할 때에는 적당한 가정이 필요하다. 이와 같이, 수치실험 및 강재 모형 실험에 있어서 이음부 부분만을 해석할 경우에, 주부재 양단의 단부조건(chord end condition)을 실제구조물과 유사하게 적용하고 주부재의 적절한 길이를 선택하여 단부효과(end effect)를 최소화시켜야 한다.

일반적으로, X형 관이음부의 경우에는 주부재의 길이가 길어짐에 따라 이음부에서 발생하는 정적강도와 소성영역 거동의 변화가 발생하지만, 주부재를 일정 길이 이상으로 증가시키면 강도에 영향을 주지 않는다(Kang 등, 1998; Moffat 등, 1994).

단순 X형 관이음부의 강도에 주부재 길이가 미치는 영향을 수치적으로 검증하기 위하여 표 2와 같은 단면특성을 가진 이음부를 구성하였다. 표 2의 이음부들은 4가지 경우의 직경비(β)에 대해(0.3, 0.5, 0.7, 1.0), 반경-두께비($\gamma = D/2T$)가 16.67 인 경우이다. 또한, 주부재의 길이를 변화시키기 위해 길이계수($\alpha = 2L/D$)를 4부터 25까지 9 단계로 증가시켜 36개의 유한요소모델을 구성하였다(표 3). 주부재와 지부재, 용접부는 동일한 재료로 설정하였

고, 항복강도(f_y)는 350MPa, 탄성계수는 200GPa, 프와송비는 0.3이다.

표 2 Nominal Dimensions of simple X-joint models

Model	Nominal dimension			
	D(mm)	T(mm)	d(mm)	t(mm)
X1	800	24	240	24
X2	800	24	400	24
X3	800	24	560	24
X4	800	24	800	24

주부재 길이에 따른 단순 X형 관이음부의 정적강도의 해석결과는 표 3과 같다. 여기서 정적강도는 무차원강도($F_u / (f_y \times T^2)$)로서, F_u 는 극한강도 f_y 는 항복응력, T 는 주부재의 두께이다(Marshall, 1992). 해석결과에서 α 가 증가할수록, 즉 주부재의 길이가 길어질수록 이음부 강도가 증가하다가 일정한 수치에 수렴하는 현상이 나타났다. 직경비(β)에 따라서 주부재의 길이에 대한 강도변화의 양상은 차이를 보이는데, $\beta = 0.5$ 인 경우에 주부재 길이에 대한 강도의 변화가 가장 민감하게 나타났고, $\beta = 1.0$ 인 경우에는 주부재의 길이가 이음부의 강도에 큰 영향을 미치지 않았다. 이러한 현상은 주부재와 지부재의 직경이 동일한 경우에 변형의 저항성이 증가하여 주부재의 길이영향이 상대적으로 작게 발생하는 것이다. 주부재의 길이에 대한 강도 변화가 3%이내로 되게 하려면, 길이계수(α)를 $\beta = 0.3$ 인 경우에는 12이상으로, $\beta = 0.5$ 와 0.7인 경우 16이상으로, $\beta = 1.0$ 인 경우는 8 이상으로 설정하여야 한다. 따라서 직경비에 관계없이 주부재 길이에 대한 정적강도의 영향을 3%이내로 하려면 길이계수를 16으로 설정해야 한다. 즉 단순 X형 관이음부에 있어서 주부재 길이가 주부재 직경의 8배 이상이면 단부효과는 거의 발생하지 않는다.

표 1 Experimental and numerical result of tubular X-joints

Model	Main member			Branch member		f_y (MPa)	$F_{u, test}$ (kN)	Result	
	D(mm)	T(mm)	L(mm)	d(mm)	t(mm)			F_u (kN)	$F_u / F_{u, test}$
X-EXP1	408.0	10.20	2440	245.0	10.20	331	430	440	1.02
X-EXP2	169.5	7.30	1700	88.5	5.45	340	221	239	1.08
X-EXP3	101.6	2.97	800	48.6	2.30	318	33	31	0.94
X-EXP4	101.6	3.29	800	48.6	3.50	380	49	43	0.88
X-EXP5	101.6	4.18	800	48.6	3.50	400	79	69	0.87
X-EXP6	101.6	4.11	800	48.6	3.50	438	82	72	0.88

표 3 Static strength of simple X-joint models with variable chord lengths

$\alpha \backslash \beta$	0.3	0.5	0.7	1.0
4	5.67	7.23	9.84	35.42
8	7.75	10.56	13.53	36.36
10	7.80	10.71	13.71	36.47
12	7.91	10.99	14.04	36.66
14	8.02	11.30	14.41	36.83
16	8.09	11.55	14.73	36.96
18	8.13	11.69	14.94	37.03
20	8.15	11.77	15.05	37.06
25	8.15	11.81	15.12	37.08

표 4 Static strength of ring-stiffened X-joint models with variable chord lengths

$\alpha \backslash \beta$	0.3	0.5	0.7	1.0
4	13.20	16.65	21.77	52.76
8	14.81	19.42	24.89	54.18
10	14.88	19.50	25.00	54.27
12	15.02	19.70	25.24	54.48
14	15.17	19.92	25.53	54.72
16	15.27	20.09	25.78	54.89
20	15.36	20.25	26.01	55.06
24	15.37	20.28	26.06	55.08
26	15.37	20.28	26.07	55.08

4.2 환보강 X형 관이음부 모델과 주부재 길이

표 2의 단순이음부에 대해 이음부 교차부 내부에 폭 (h_r)이 160mm 두께(t_r)가 24mm인 환보강재를 설치하고 길이계수($\alpha = 2L/D$)를 4에서 26까지 변화하며, 36개의 환보강 X형 관이음부를 구성하였다(표 4).

해석 결과로 표 4와 같은 무차원 강도를 구하였다. 위의 결과에서 주부재의 길이가 길수록 강도는 증가하며 일정한 값에 수렴한다. 이러한 현상은 단순이음부의 경우와 동일한 경향이다. 지부재의 직경에 따라 주부재의 길이가 강도에 미치는 영향은 차이를 보였는데, 길이에 대한 강도의 변화는 직경비가 0.5, 0.7인 경우에 가장 민감하며, 직경비가 1인 경우에 주부재 길이의 영향을 가장 작게 받는 것으로 나타났다. 또한 주부재의 길이가 강도에 미치는 영향이 3%이내가 되는 길이계수는 12이상이다. 표 4의 결과를 단순이음부의 경우와 비교하면 환보강 이음부의 강도는 단순이음부에 비해 주부재 길이의 영향을 상대적으로 작게 받는 것을 알 수 있다. 이것은 환보강재가 압축력에 대해 주부재의 변형을 제한하여 상대적으로 주부재의 단부 효과가 작게 나타나는 것으로 사료된다.

표 5 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	-	-	-	-

5. 정적강도의 산정

5.1 단순 X형 관이음부의 정적강도

5.1.1 유한요소모델

환보강재의 보강효과를 파악하기 위해 기준이 되는 단순 X형 관이음부를 표 5와 같이 구성하였다. 표 5의 무차원 계수의 범위는 해양구조물에서 많이 사용되는 관이음부의 기하학적 특성을 고려하여 구성한 것이다(김재동, 1996).

표 6 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				

재료의 항복강도(f_y)는 350 MPa, 탄성계수는 200GPa, 프와송비는 0.3이다.

5.1.2 해석결과

단순 X형 관이음부의 유한요소해석 결과로 하중-변위곡선을 구하였다. 그림 4는 $\tau=1.0$, $\beta=0.5$ 인 X1모델 중, X1-1, X1-2, X1-3, X1-4의 4개 이음부에 대한 하중-변위곡선이며 다른 이음부에 대해서도 이와 유사한 결과를 구할 수 있었다. 여기서 하중과 변위는 각각 무차원화 하였으며, F 는 지부재에 작용하는 압축력, δ 는 부재의 교차부 중에서 크라운 부분에서의 지부재 축방향 변위이다. 각 이음부의 하중-변위 관계로부터 무차원 강도를 구해 표 6에 정리하였다.

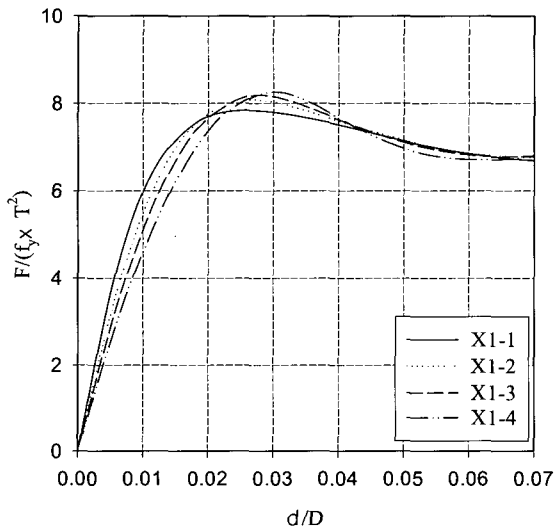


그림 4 Load-displacement curves of simple X-joints ($\tau=1.0$, $\beta=0.5$)

5.2 환보강 X형 관이음부의 정적강도

5.2.1 유한요소모델

표 5에 제시한 단순이음부의 교차부 중앙 내부에 환보강재를 설치한 환보강 이음부를 구성하였다. 내부 환보강재의 기하학적 조건은 식 (5)와 같다.

$$0.05 \leq n \leq 0.375, \quad 0.25 \leq \xi \leq 2.0 \quad (5)$$

28개의 단순이음부 대해, 식 (5)의 범위내에서 n 와 ξ 에 대해 각각 9가지 경우를 고려하여 환보강재 크기를 표

7과 같이 구성하였다.

표 7 Internal ring stiffeners of tubular X-joints.

n	0.05	0.057	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

한개의 단순이음부에 대해 81개의 보강이음부를 구성하였으며, 총 1944개의 이음부를 설정하였다. 주부재의 직경이 모두 동일하므로 $n(=h_r/D)$ 에 대한 조건은 상수로 결정되나, $\xi(=t_r/T)$ 에 대한 조건은 주부재의 두께에 따라 다르게 구성된다.

환보강 이음부의 이름은 표 5의 단순이음부에 대해 각각 X1R, X2R, X3R, X4R이라고 정하였다. 환보강재는 이음부와 동일한 재료의 특성을 가지며, 유한요소 모델링 시에 8절점 쉘요소를 사용하였다.

5.2.2 해석결과

내부 환보강 X형 관이음부에 대해 유한요소해석으로 구한 하중-변위 관계로부터 보강 이음부의 정적강도를 계산하였다. 보강효과를 평가하기 위해 강도비(SR)를 계산하였고, 환보강재의 크기가 강도에 미치는 영향을 조사하고자 환보강재의 무차원계수(n , ξ)에 대한 강도비의 변화를 고찰하였다.

부록의 그림 A1~A4는 해석 결과 중 $\tau=1.0$ 일 때 보강재의 폭비(n)에 대한 강도비의 변화를 나타낸 것으로 $\tau=0.5$ 인 경우에도 이와 유사한 경향의 결과가 나타났다. 여기서, 강도비의 변화양상을 살펴보면, 환보강재의 폭과 두께가 커질수록 강도비가 증가하였지만 일정수준의 강도비를 초과하지는 않았다.

보강이음부의 해석결과로 최대강도비(SR_{max})를 표 8에 정리하였다. 표 8에서 case-A는 해석 결과 전체를 고려하여 산정한 것이며 case-B는 식 (6)의 실용적인 환보강재의 크기를 고려하여 계산한 결과이다.

$$0.05 \leq n \leq 0.2, \quad 0.25 \leq \xi \leq 1.0 \quad (6)$$

그림 5는 부재의 무차원계수에 따른 최대강도비의 변화를 나타낸 그래프로, 반경두께비(γ)와 두께비(τ)가 클수록 최대강도비가 증가함을 알 수 있다. 표 8과 그림 5에서 최대강도비의 최대값은 3.5이고, $\beta=1.0$ 인 경우가 다른 경우에 비해 최대강도비가 작게 나왔다.

표 8 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* : $0.05 \leq n \leq 0.375, 0.25 \leq \xi \leq 2.0$ Case-B** : $0.05 \leq n \leq 0.02, 0.25 \leq \xi \leq 1.0$

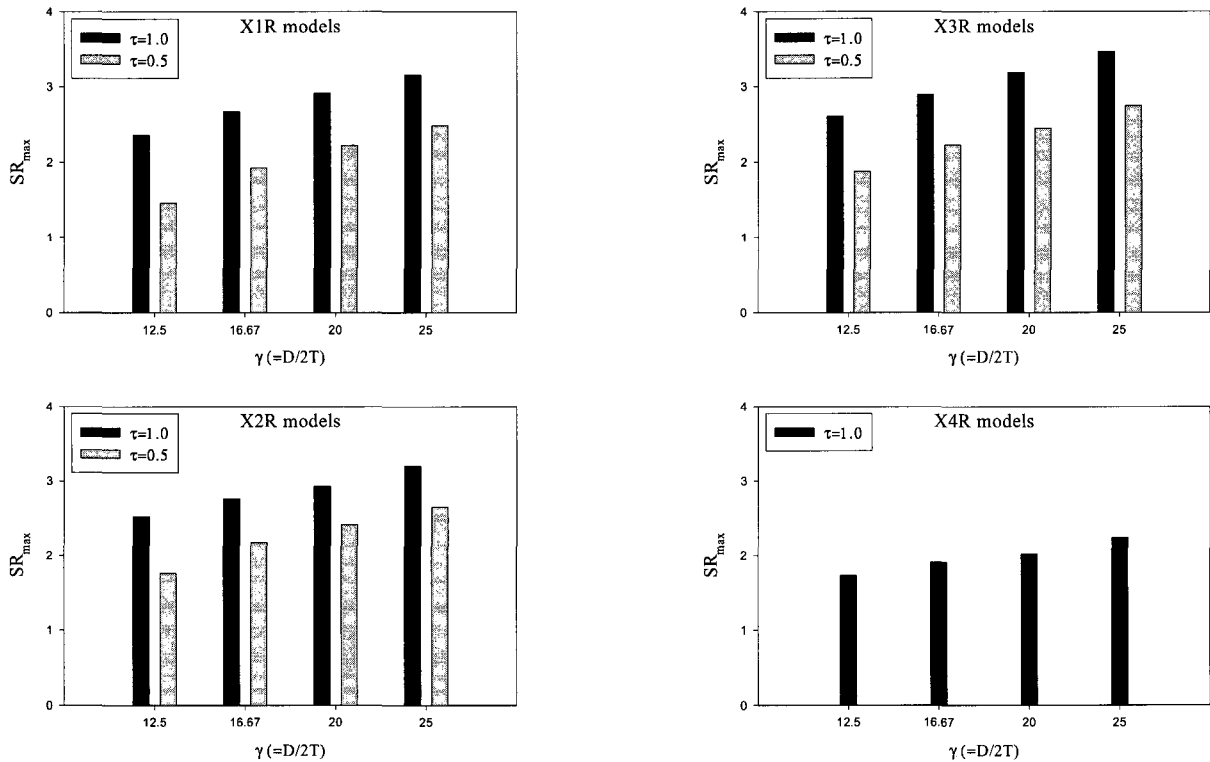


그림 5 Maximum Strength ratios of ring stiffened X-joints.

5.3 강도산정식의 제안

축방향력을 받는 환보강 X형 관이음부의 강도산정식을 개발하기 위해 유한요소해석 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 분석자료는 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 식 (7)의 범위내에서의 해석결과만을 이용하였다.

$$0 \leq \xi \leq 1.0, 0 \leq n \leq 0.2 \tag{7}$$

ξ, n, γ 를 독립변수로 하고, β 와 τ 의 조건에 대한 강도비(SR)를 종속변수로 설정하여 비선형 회귀모형을 식 (8)과 같이 구성하였다.

$$SR = a_0 + a_1\xi + a_2n + a_3\xi n \gamma \tag{8}$$

여기서, a_0, a_1, a_3 는 회귀계수이며, 회귀분석에는 SPSS 프로그램을 사용하였고, 회귀계수의 추정과정에는 Leven-

berg-Marquardt 알고리즘을 적용하였다. 회귀모형에 대한 분석결과는 표 9에 나타내었다. 회귀분석에는 총 1015개의 해석결과가 이용되었고, 개개의 회귀모형에 대해 145개의 자료를 적용하였다.

표 9 Regression analyses for ring-stiffened X-joint

β	τ	Regression coefficients				R^2 (%)
		a_0	a_1	a_3	a_4	
0.3	1.0	0.9675	-0.0001	0.5899	0.2243	99.37
0.3	0.5	0.9773	0.0010	0.5946	0.2221	99.01
0.5	1.0	0.9450	-0.0096	0.6607	0.1772	97.74
0.5	0.5	0.9541	-0.0238	0.6193	0.1843	98.38
0.7	1.0	0.9313	0.0153	0.7193	0.1768	97.61
0.7	0.5	0.9399	0.0011	0.6708	0.1801	98.06
1.0	1.0	1.0140	0.0284	0.0937	0.1319	98.56

표 9에서 R^2 은 회귀모형의 적합도 검토를 위해 정의 되는 결정계수(coefficient of determination)이다. 회귀분석의 과정에서 환보강재의 폭이 환보강재의 두께보다 이음부 강도에 지배적인 요소임이 확인되었고, R^2 이 97.6% 이상 계산되어 식 (8)의 회귀모형이 적합하다고 판명되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 환보강 X형 관이음부의 정적강도를 비선형 유한요소해석을 통해 산정하고, 부재와 환보강재의 기하학적 조건과 보강효과와의 상관관계를 규명하여 강도산정식을 제안하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주부재의 길이는 X형 관이음부의 강도에 영향을 미치며, 길이가 길어질수록 이음부강도는 증가하나 일정한 값들에 수렴하는 현상이 나타났다. 또한 지부재의 직경에 따라서, 주부재의 길이영향은 서로 다르게 나타났다.
- 2) 환보강이음부가 단순이음부에 비해 주부재 길이영향을 작게 받는 것으로 나타났고, 수치해석이나, 실험시에 주부재의 적정길이는 단순이음부의 경우에는 주부재 직경의 8배, 환보강 이음부의 경우에는 주부재 직경의 6배로 나타났다.
- 3) 환보강 이음부에 있어서, 보강재의 폭비와 두께비가 커질수록 강도비는 증가하지만, 강도비의 극한값인 최대

강도비를 초과하지 않았다. 이음부 별로 최대강도비를 계산하여 환보강재 설치로 인한 최대보강효과를 계산하였다. 그 결과, 환보강 이음부의 강도는 비보강 이음부에 비해 최대 1.5~3.5배 증가하였다. 단, 직경비가 1인 경우에는 다른 경우에 비해 보강효과가 작게 발생하였다.

- 4) 환보강재의 실용적 크기를 고려하여 회귀분석을 수행한 결과 강도산정식을 다음과 같이 구하였고, 계수는 표 9에 제시하였다.

$$SR = a_0 + a_1\beta + a_2\tau + a_3\beta\tau$$

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

감사의 글

이 논문은 2001학년도 부경대학교발전기금재단의 지원에 의하여 연구된 것으로, 저자는 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김재동(1996) 해양구조물 원통형 연결부의 구조강도에 대한 실험적 연구, 박사학위논문, 충남대학교, p.210.
 조현만, 류연선, 김정태(2000) X형 관이음부의 보강방법에 따른 극한강도해석, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.230~237.
 조현만, 류연선(2002A) 환보강 T형 관이음부의 강도산정식, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회 15(2), pp.533~540.
 조현만, 류연선(2002B) X형 관이음부 강도에 대한 주부재길이 영향, 대한토목학회 학술발표회 발표집, 대한토목학회, pp.301~304.
 American Petroleum Institute(1993) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP2A.
 ANSYS(2002) ANSYS-User Manual, Swanson Analysis System Inc., Houston, USA.
 Architectural Institute of Japan(2002) Recommendation for the Design and Fabrication of Tubular Truss Structures in Steel(in Japanese), AIJ, Japan.
 Cho, H. M., Ryu, Y. S.(2002) Effect of Internal

Ring Stiffener on the Ultimate Strength of Tubular X-joints, Proceeding of the 2nd International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, ASEM, pp.18.

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

Karamonos, S.A., Romenjin, A., War-denier, J. (2000) On the Fatigue Design of K-Joint Tubular Girders, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10(1), pp.50~56.

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

Moffat, D. G., et. al.(1994) Strength of T and DT Tubular Joints in Offshore Structure, Rep. No. A/169, Univ. of Liverpool, Liverpool, UK.

Packer, J. A., Henderson, J. E.(1997) Hollow Structural Section Connections and Trusses(A Design Guide), Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Canada.

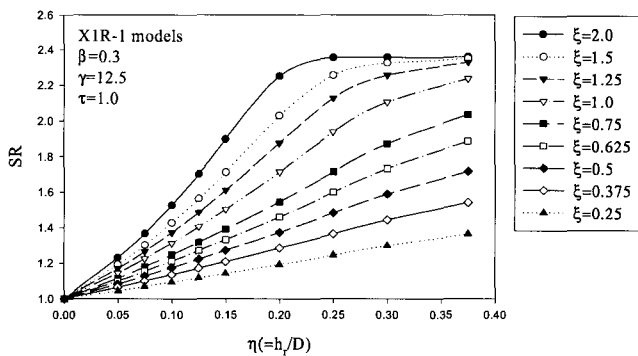
Rhee, H. C.(1992) Comparison of Finite element Stress Solutions of Multi-Plane Tubular Joint With and Without Ring and Longitudinal Stiffeners, OTC Paper 6942.

Thandavamoorthy, T. S., et al.(1999) Behavior of Internally Ring-stiffened Joints of Offshore Platforms, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 125(11), pp.1348~1352.

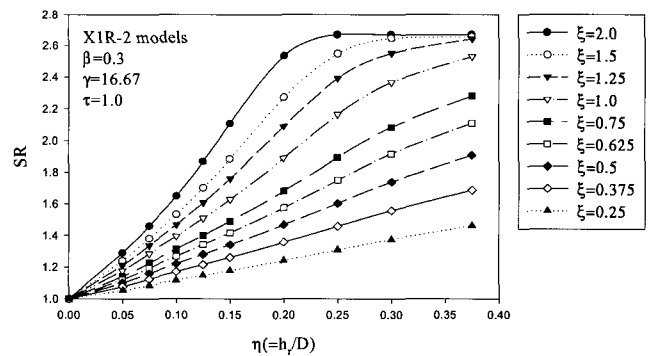
Togo, T.(1967) Experimental Study on Mechanical Behavior of Tubular Joints, Doctoral dissertation, Osaka University, Japan.

Vegte, G. J.(1995) Static Strength of Uniplanar and Multiplanar Tubular T-and X-joints, Doctoral dissertation, Delft Univ. of Technology, The Netherlands, p.378.

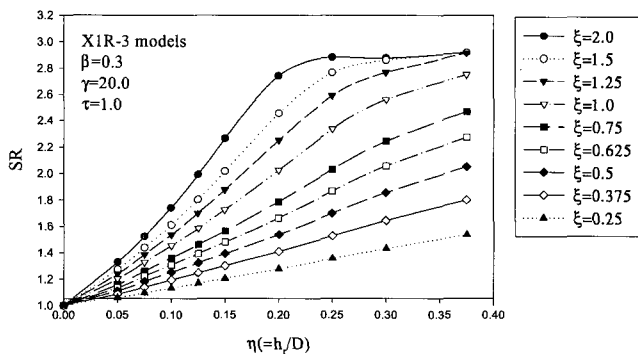
부 록 : 환보강 이음부의 강도비 변화



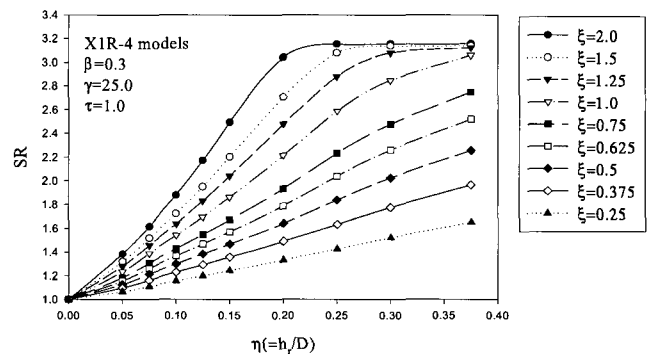
(1.a) X1R-1 models



(1.b) X1R-2 models

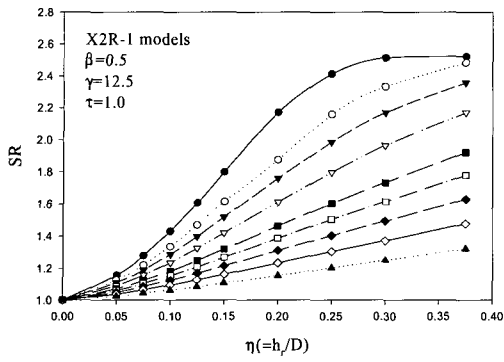


(1.c) X1R-3 models

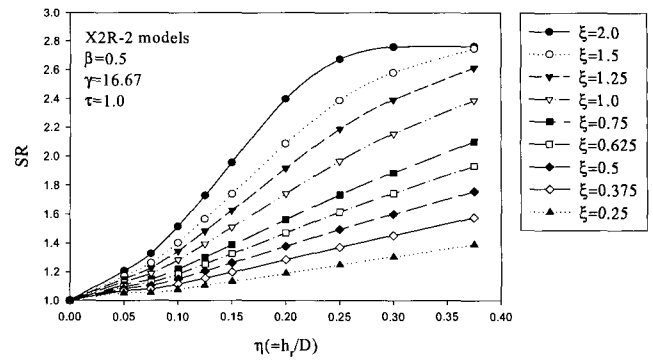


(1.d) X1R-4 models

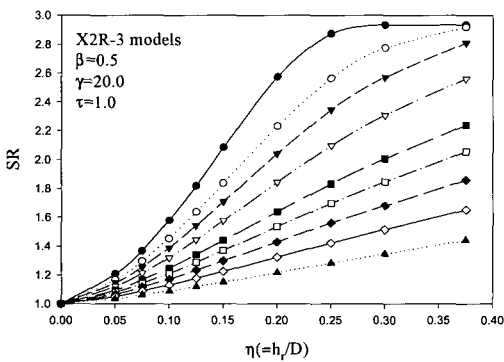
그림 A1 Strength ratio of ring-stiffened X-joints(X1R)



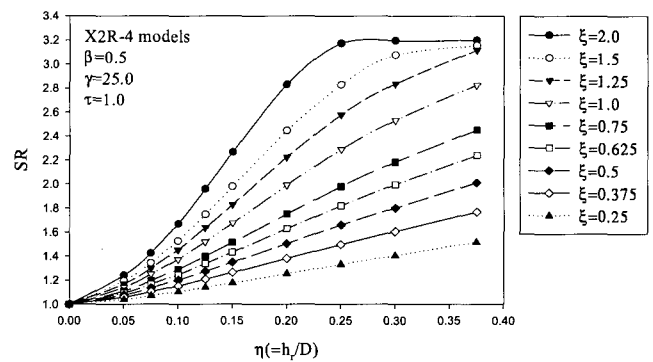
(2.a) X2R-1 models



(2.b) X2R-2 models

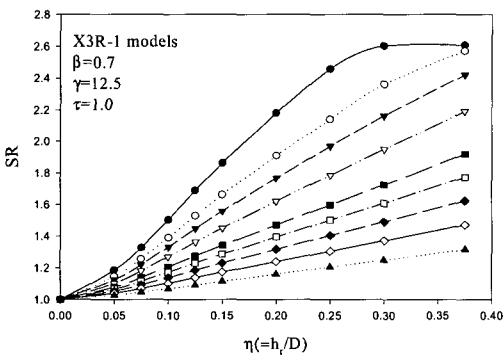


(2.c) X2R-3 models

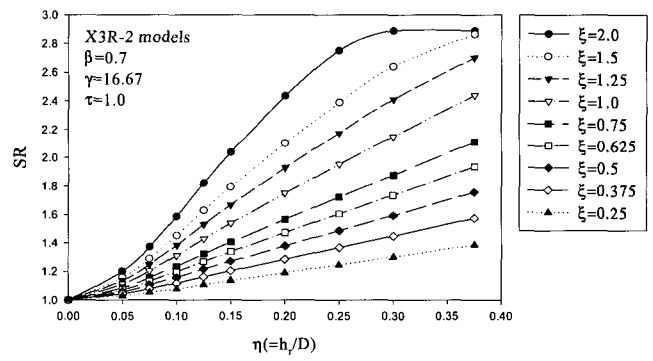


(2.d) X2R-4 models

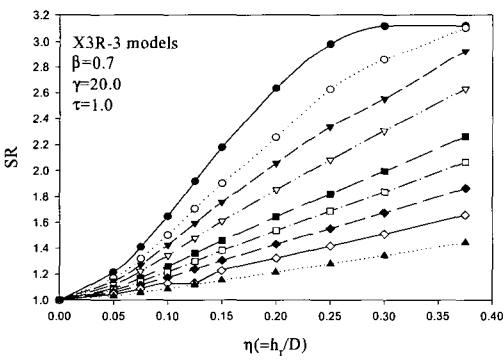
그림 A2 Strength ratio of ring-stiffened X-joints(X2R)



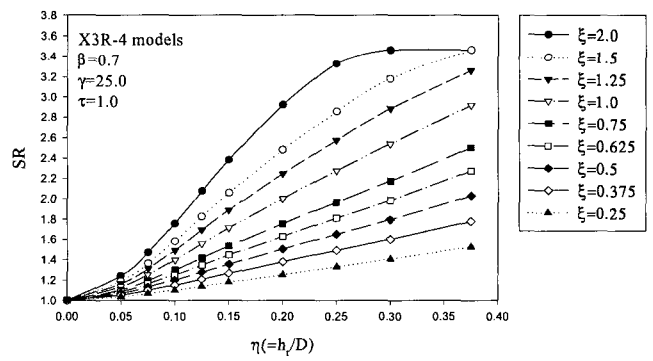
(3.a) X3R-1 models



(3.b) X3R-2 models

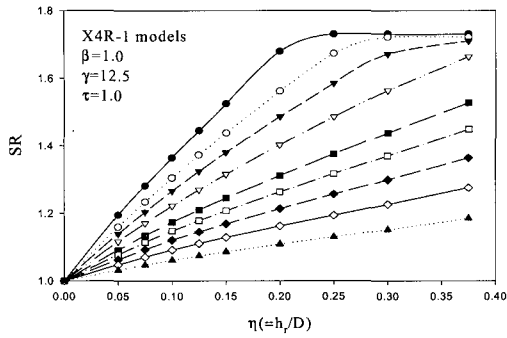


(3.c) X3R-3 models

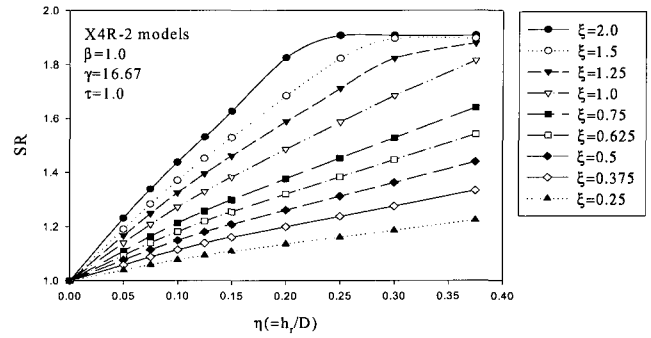


(3.d) X3R-4 models

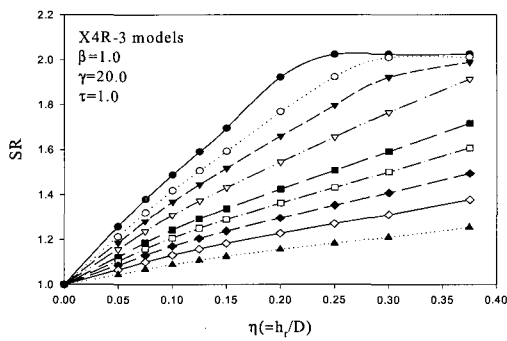
그림 A3 Strength ratio of ring-stiffened X-joints(X3R)



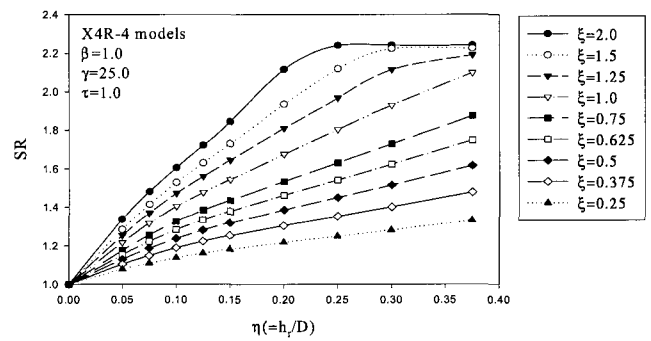
(4.a) X4R-1 models



(4.b) X4R-2 models



(4.c) X4R-3 models



(4.d) X4R-4 models

그림 A4 Strength ratio of ring-stiffened X-joints(X4R)