

X형 관이음부의 보강방법에 따른 극한강도 해석

Effect of Reinforcement Type on Ultimate Strength of Tubular X-Joints

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

ABSTRACT

Tubular joints of jacket structures are usually reinforced using thicker can section, internally ring stiffeners, diaphragm, or externally gusset plates to increase load carry capacity. In this paper, the effect of reinforcement type and geometric parameters of stiffener on the ultimate strength of tubular X-joints subjected to brace compression have been studied numerically. Three reinforcement methods were considered; (1)can reinforcement (2)internally ring stiffener (3)internally longitudinal diaphragm. The ANSYS software was used nonlinear strength analysis. It was found that there is significant strength enhancement for reinforced joints.

1. 서 론

고정식 해양구조물의 하부구조인 자켓은 관형재(tubular member)인 주부재(main member; chord)와 지부재(branch; brace)로 이루어진 관이음부(tubular joint)로 구성된다. 관이음부의 구조해석은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 피로해석을 위한 용접연결부 근처에서의 응력집중 현상을 규명하는 것과, 극한상태에서의 정적하중에 대한 극한강도(ultimate strength)를 계산하는 것이다. 응력해석에 있어서는 1970년대부터 선형탄성영역에서의 응력분포 및 국부 최대응력산정을 위하여, 모형실험과 더불어 유한요소법이 널리 사용되어졌고, 이를 근거로 다양한 응력집중계수 산정식들이 개발되었다. 또한 극한강도의 수치적 계산을 위하여 비선형해석기법의 개발이 활발히 진행되어 왔고, 현재에는 다양한 형태의 관이음부에 대하여 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾

관이음부에 있어서 지부재간의 겹침(overlap)이 없고 보강(reinforcement)하지 않은 이음부를 단순 이음부(simple joint) 혹은 비보강 이음부(unstiffened joint)라고 한다. 강도증가를 위한 이음부의 보강방법으로는 주부재의 일부분의 두께를 증가시킨 캔(can) 보강, 이음부 내·외부에 링(ring)의 설치, 내부에 다이어프램(diaphragm) 및 외부에 거셋플레이트를 부착하는 방법 등이 있다. 실제 해양구조물에 있어서는 캔-보강 이음부와 내부에 링을 설치하는 것이 널리 사용된다. 내부 보강재가 있는 관이음부의 해석은 제한된 모형실험⁽²⁾ 및 수치실험⁽³⁾으로 강도 및 응력이 평가되고 있으나, 정확한 거동의 규명은 아직 미흡하다. 이렇듯, 관이음부의 설계를 위하여 수많은 지침이 제시되고 있으나, 아직도 설계 및 제작에는 많은 난점이 존재하고

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 박사수료
** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수
***정회원 · 부경대학교 해양공학과 조교수

있다.

따라서, 본 연구에서는 X형 관이음부의 보강방법에 따른 강도 변화를 유한요소법을 사용하여 계산하고, 링과 다이어프램 같은 보강재 단면의 기하학적 변화에 따른 이음부의 강도 변화를 해석하여 보강 관이음부의 설계에 있어서 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 관이음부의 강도와 보강방법

2.1 관이음부의 특성

관이음부의 형상에 따른 분류는 매우 다양하며, 이는 주부재와 지부재의 연결형태로써 T형, X형, K형등으로 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.

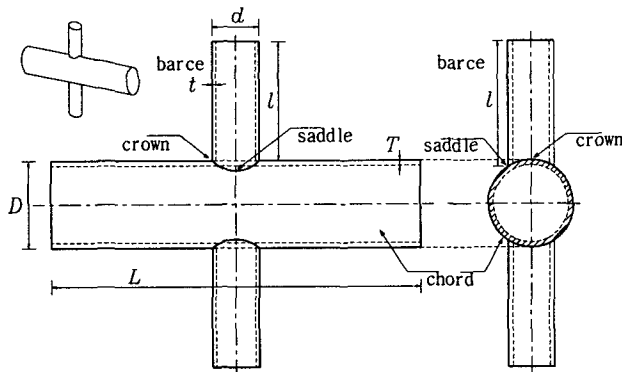


Fig. 1 Dimensions of tubular X-joints.

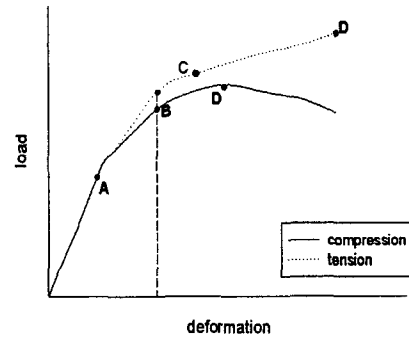


Fig. 2 Criteria of failure.

2.2 파괴의 기준(Criteria of failure)

관이음부의 정적강도(static strength)는 다음 세 가지 기준 중 하나로 나타낸다. 첫째가 극한 내하능력(ultimate bearing capacity, Fig. 2의 D)이고, 두 번째가 변형기준(deformation criteria, Fig. 2의 B) 그리고, 균열의 발단(visually observed crack initiation, Fig. 2의 C)이다. Fig. 2에서 A점은 탄성한도를 나타내고 B점은 변형한도(deformation limit), C점은 균열시작점, D점은 극한하중(ultimate strength)을 나타낸다. 일반적 파괴의 기준을 나타내는 정적강도는 극한하중(D점)을 말하며 연구자들에 의해서 가장 보편적으로 쓰여진다. 비선형 하중-변형 관계에 있어서, 변형한도는 여러 연구자들에 의해서 제안되어 졌고, 가장 널리 쓰이는 것은 Yura의 변형한도 공식⁽⁴⁾으로, 관이음부의 연결형상과 하중에 따라서 정의 되어진다. 관이음부의 강도평가를 위한 유한요소해석 결과를 보면, 축방향을 받는 이음부의 하중-변형 곡선에서 하중의 최고점(peak load)이 대부분 나타나고, 이를 극한하중이라고 정의한다. 하지만, 주부재의 직경에 비해 두께가 얇은 경우(γ 값이 작은 경우)나 굽힘을 받는 경우에 있어서, 하중곡선이 최고점을 형성하지 못하고 변형이 계속 증가하는 현상이 발생하기도 한다. 이러한 경우에는 변형한도를 결정하여, 변형한도에 해당하는 하중을 극한하중이라고 정의한다. 인장하중을 받는 경우에 있어서 이음부의 강도가 압축의 경우보다 증가하는데, 이는 변형을 경화의 영향에 의한 것이다. 따라서 축하중을 받는 이음부 설계 시에는 압축하중이 기준치가 된다.

2.3 관이음부의 보강

Fig. 3은 내부링으로 보강한 이음부이고, Fig. 4는 내부에 다이아프램을 설치한 이음부이다. Fig. 3에서 t_r 는 내부링의 두께, h_r 는 내부링의 복부판(web)의 폭이며, Fig. 4에서 l_d 는 다이아프램의 길이, t_d 는 다이아프램의 두께를 나타낸다. 링보강재의 설계는 등가-링의 탄성해석을 이용하여 일반적으로 수행되었고^{(5),(6)}, 현재에는 링의 개수 및 단면치수, 배치의 변화에 따른 강도해석이 주로 모형실험적 방법에 의해 이루어지고 있다.

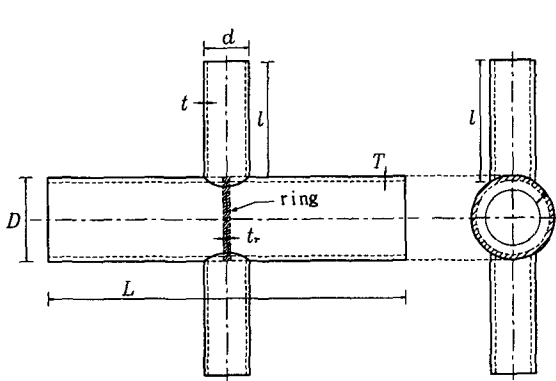


Fig. 3 Dimensions of internally ring stiffened tubular X-joint.

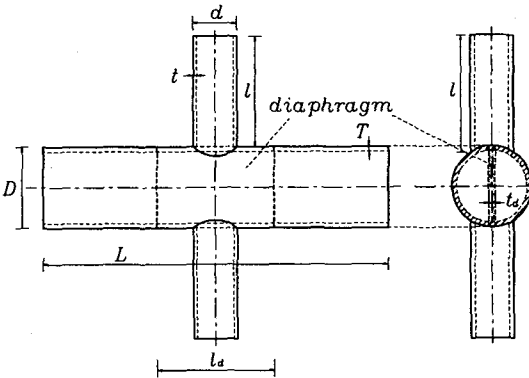


Fig. 4 Dimensions of longitudinal diaphragm stiffened tubular X-joint.

3. X형 관이음부의 유한요소모델

유한요소해석을 위해서 상용프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 요소는 한 절점당 여섯개의 자유도를 갖는 8절점 쉘요소(SHELL93)를 사용하였다. 지부재에 가해지는 축방향력은 변위제어방법을 사용하였으며, 지부재의 단부에 변위를 증가시켜 축방향력을 계산하였다. 전체 구조물의 대칭성을 이용하여 1/4만을 모델링하여 경계조건을 설정하였다. 비선형성해석을 위하여, 재료의 비선형성과 기하학적인 비선형성을 고려하였는데, 항복후의 재료의 특성에 대해서는 선형탄성-완전소성의 응력-변형률관계(simple linear-elastic, perfectly plastic stress-strain relationship)로 규정하였다.

3.1 수치모델의 검증

본 연구에서 해석하고자하는 모델의 수치적 검증을 위해서 모형실험의 결과⁽⁷⁾를 알고 있는 이음부의 유한요소해석을 수행하였다. 이음부의 기하학적 형상 및 재료의 특성은 Table 1과 같고, 재료의 항복응력은 $331\text{N}/\text{mm}^2$ 이다. Fig. 5는 수치해석결과로 하중-변형 관계이며, 변위는 crown부분에서의 지부재의 축방향 변형량이다. Fig. 6은 일반적으로 많이 사용되는 무차원 하중-변형 곡선이다. 여기서, f_y 는 재료의 항복응력이다. 유한요소해석결과로 극한강도가 432kN으로 계산되었는데, 이는 모형 실험치인 435kN과 거의 일치하는 값이다. 수치실험 결과는 기존의 모형실험 결과와 잘 일치하였다.

Table 1 Nominal dimensions and non-dimensional geometric parameters of Vegte's tubular X-joint model

Member	Outer diameter		Thickness		Length		α	β	γ	τ
	D	408 mm	T	10.2 mm	L	2440 mm				
Chord	D	408 mm	T	10.2 mm	L	2440 mm	11.96	0.6	80	1.0
Brace	d	245 mm	t	10.2 mm	l	1225 mm				

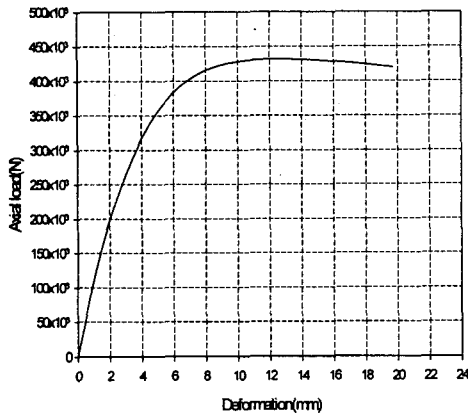


Fig. 5 Numerical load-displacement curves of X-joint(Vegte's model).

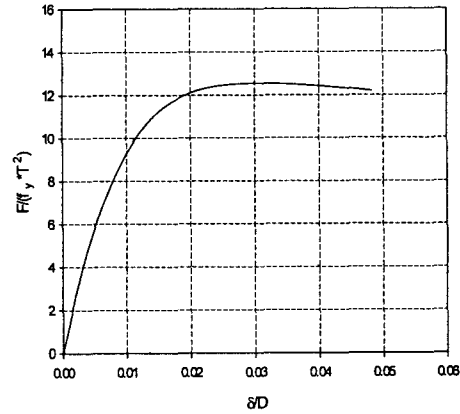


Fig. 6 Non-dimensional load-displacement curves of X-joint(Vegte's model).

3.2 X형 단순 관이음부의 유한요소모델

보강 이음부의 강도평가에 기준이 되는 단순 이음부의 모델링을 위하여 주부재의 직경이 800mm인 관이음부를 Table 2와 같이 설정하였다. 주부재의 적정 길이(L)를 선택하기 위해 L과 극한강도와의 상관 관계를 고찰하였다. 길이를 1600mm에서 10000mm로 변화하여 수치실험한 결과로 Fig. 7과 같은 $\alpha(=2L/D)$ 와 극한강도와의 관계를 구할 수 있었다. α 가 15이상에서는 강도값이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 기본모델의 주부재 길이는 α 가 16인 6400mm로 설정한다. Fig. 8은 X형 관이음부의 유한요소망의 형상이다.

Table 2 Geometric properties of simple joint

Joint	Chord (mm)			Brace (mm)			Non-dimensional parameters		
	D	T	L	d	t	l	α	β	γ
X800	800	24	6400 (1600~10000)	400	12	2500	16(4~25)	0.5	16.67

3.3 보강된 X형 관이음부의 모델

Table 2에 명시된 기본모델(X800 모델)에 (1)캔, (2)내부 링, (3)다이아프램으로 보강된 관이음부를 각각 설정한다. 캔-보강의 경우에는 캔의 길이는 일정하게 하고, 캔의 두께를 달리하며, 링-보강의 경우에는 링의 폭과 두께를 각각 변화시키고, 다이아프램-보강 경우에는 보강재의 길이와 두께를 달리하여 모델을 구성한다.

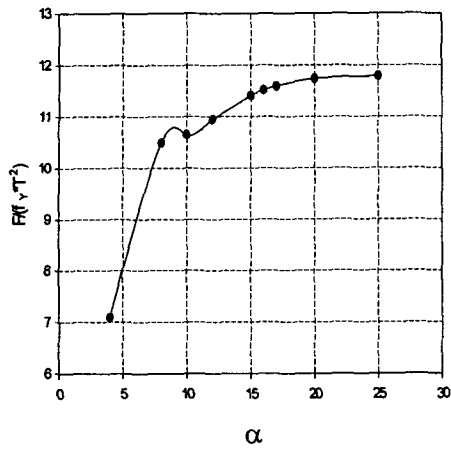


Fig. 7 Non-dimensional ultimate strength as function of α .

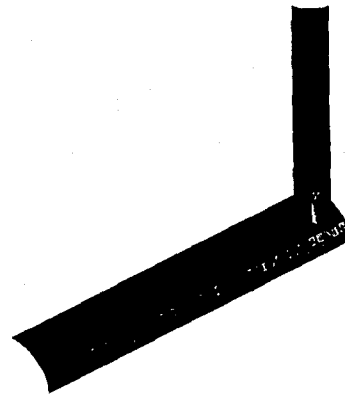


Fig. 8 Finite element mesh for tubular X-joint.

3.3.1 캔의 보강

기본 모델(Table 2)에 캔으로 보강된 이음부의 모델을 해석하기 위하여 XC모델을 구성하였다. 캔의 길이는 API RP2A에서 규정한 것으로, 지부재와 주부재 교차부에서 $(0.25 \times D)$ 만큼 떨어진 곳까지로 하였다. 두께 변화에 따른 모델의 구성은 Table 3과 같다.

Table 3 Geometric properties of can-reinforced tubular X-joints

Joint	XC1	XC2	XC3
Thickness of can (mm)	36 (=1.5T)	48 (=2.0T)	60 (=2.5T)

3.3.2 링의 보강

링-보강 이음부의 모델은 기본모델에 주부재와 지부재의 교차부분에 링 한개를 설치하여(Fig. 2), 링의 폭과 두께를 달리하여 설정하였다. Table 4와 같이 링 복부판의 폭(h_r)을 주부재의 직경의 1/11에서 1/4까지 변화하여 XR모델을 만들었고(XRA, XRB, XRC, XRD, XRE), 또한 링의 복부판의 높이가 $D/10$ 인 경우에(XRB모델) 두께(t_r)를 주부재의 두께의 1/2배부터 2배까지 하여 5개의 XRB모델을 설정하였다(XRB1, XRB2, XRB3, XRB4, XRB5).

Table 4 Geometric properties of internally ring-stiffened tubular X-joints

Joint	h_r (mm)		t_r (mm)	Joint	h_r (mm)		t_r (mm)
XRA	73	D/11	24	XRB1	80		12
XRB	80	D/10	24	XRB2	80		18
XRC	100	D/8	24	XRB3	80		24
XRD	133	D/6	24	XRB4	80		36
XRE	200	D/4	24	XRB5	80		48

3.3.3 다이아프램의 보강

다이아프램을 설치한 이음부의 거동을 해석하기 위하여, 다이아프램의 길이(l_d)와 두께(t_d)를 변화하여, Table 5와 같은 XDA~E모델과 XDB1~5모델을 구성하였다.

Table 5 Geometric properties of diaphragm-stiffened tubular X-joints

Joint	l_d (mm)		t_d (mm)	Joint	l_d (mm)		t_d (mm)
XDA	73	0.5d	12	XDB1	80		12
XDB	80	1d	18	XDB2	80		18
XDC	100	1.5d	24	XDB3	80		24
XDD	133	2d	36	XDB4	80		36
XDE	200	2.5d	48	XDB5	80		48

4. 유한요소해석 결과 및 고찰

기본모델과 보강모델의 유한요소해석결과로 나타난 극한강도는 Table 6~8 와 같다. Fig. 9~14는 각 모델의 하중-변형 곡선을 나타낸 것이다.

Table 6 Numerical results of can-reinforced tubular X-joints

Joint	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$	Ratio*
X800 (simple joint)	1923	11.51	1
XC1	2903	17.38	1.51
XC2	3720	22.27	1.93
XC3	4190	25.08	2.18

Table 7 Numerical results of ring-stiffened tubular X-joints

Joint	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$	Ratio	Joint	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$	Ratio
XRA	2749	16.46	1.43	XRB1	2447	14.66	1.27
XRB	2873	17.20	1.49	XRB2	2667	15.97	1.39
XRC	3234	19.36	1.68	XRB3	2873	17.20	1.50
XRD	3688	22.08	1.91	XRB4	3189	19.09	1.66
XRE	3982	23.84	2.04	XRB5	3420	20.48	1.78

Table 8 Numerical results of diaphragm-stiffened tubular X-joints

Joint	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$	Ratio	Joint	F_u (kN)	$F_u/(f_y \times T^2)$	Ratio
XDA	2868	17.17	1.49	XDB1	2996	17.93	1.56
XDB	2971	17.78	1.54	XDB2	2980	17.85	1.55
XDC	3080	18.44	1.60	XDB3	2971	17.78	1.54
XDD	3224	19.30	1.68	XDB4	2968	17.77	1.54
XDE	3335	19.96	1.73	XDB5	2968	17.77	1.54

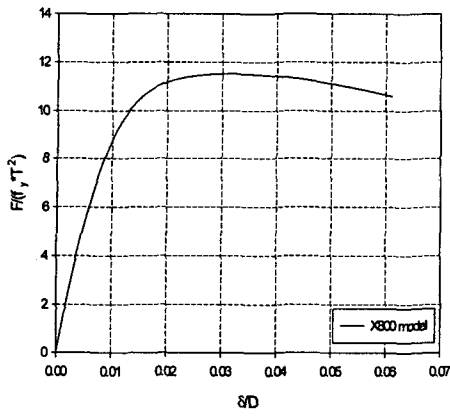


Fig. 9 Numerical load-displacement curves of X800 model (simple joint).

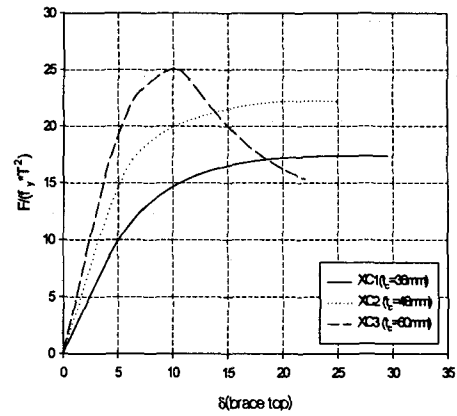


Fig. 10 Numerical load-displacement curves of XCA^C model.

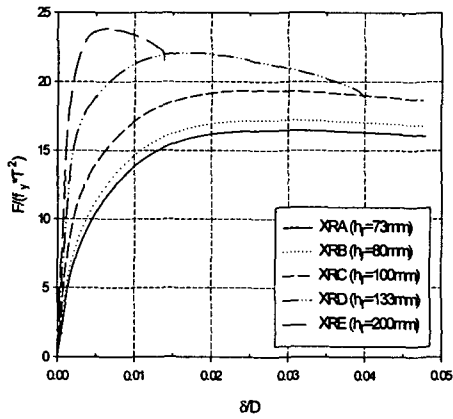


Fig. 11 Numerical load-displacement curves of XRA^E model.

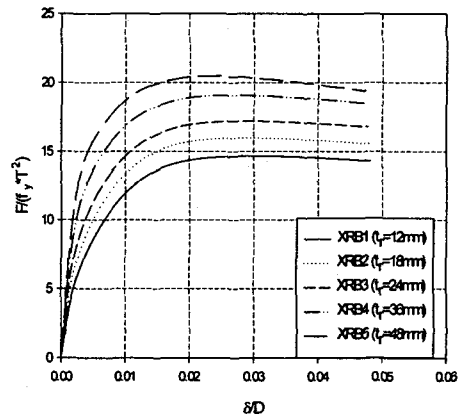


Fig. 12 Numerical load-displacement curves of XRBI^S model.

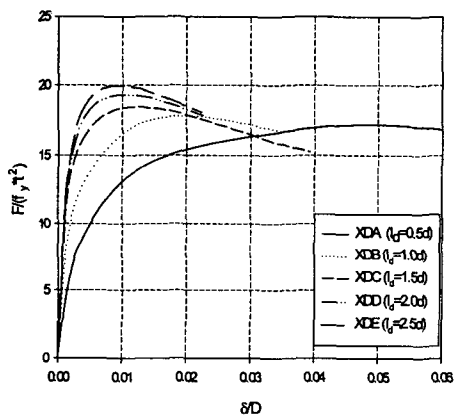


Fig. 13 Numerical load-displacement curves of XDA^C model.

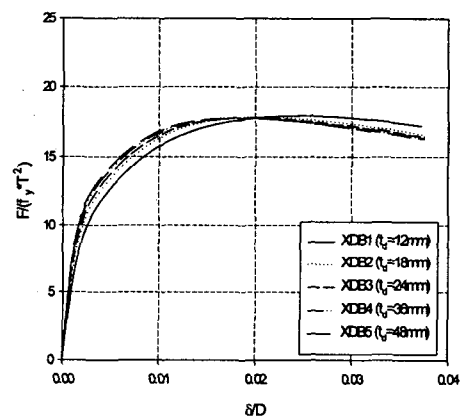


Fig. 14 Numerical load-displacement curves of XDBI^S model.

Table 6~8의 Ratio는 단순이음부(X800 모델)의 강도를 1로 하였을 때의 보강이음부의 강도의 비를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 단순 이음부에 비하여 강도가 약 1.5배에서 2배 정도 증가한다. Table 7에서 링으로 보강한 경우에는 링의 부재 치수에 대해 강도가 거의 선형적으로 증가하고, Table 8의 내부 다이아프램의 보강 경우에는 보강재의 길이를 증가함에 따라서 강도가 증가함을 볼 수 있지만, 다이아프램의 두께는 강도에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. Fig. 8~13에서, 단순 이음부와 링-보강 이음부(Fig. 8, 10, 11)는 crown에서의 변형량으로, 캔-보강의 경우(Fig. 9)에는 지부재의 단부에서의 변형량으로, 다이아프램 보강의 경우에는(Fig. 13, 14) saddle에서의 변형량으로 하여 무차원 하중-변형곡선을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 X형 관이음부의 보강방법에 따른 강도변화를 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하여 계산하였다. 수치모델의 검증은 위하여 기존의 모형실험 결과를 알고 있는 이음부의 극한강도를 평가하였고, 단순이음부의 모델 설정에 있어서 주부재의 적정길이를 산정하였다. 보강 방법으로는 캔으로 보강한 경우와 내부 링으로 보강한 경우, 그리고, 내부 다이아프램으로 보강한 경우로 나누어서 해석하였다. 연구 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유한요소해석결과는 기존의 모형실험결과와 잘 일치하였다.
 - 2) 보강이음부의 최종강도는 단순이음부에 비해 1.5배에서 2배정도 증가하였다.
 - 3) 캔-보강의 경우에 캔의 두께를 주부재의 두배 정도로 함에 따라 극한강도가 약 두배가 증가함을 알 수 있었는데, 이음부의 외형변화가 없는 링-보강이나 다이아프램의 보강 경우에도 이와 같은 강도 증가효과를 나타낼 수 있었다.
 - 4) 링-보강의 경우에는 보강재의 단면치수에 따라 이음부의 극한강도가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
 - 5) 다이아프램 보강의 경우에는 보강재의 두께는 강도에 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.
- 차후 연구과제로는 내부보강재인 링이나 다이아프램의 사용에 따른 이음부의 항복 후의 거동특징을 규명하고, 보강재 단면의 정확한 산정기준의 마련이 필요하다.

참고문헌

1. 김재동, "해양구조물 원통형연결부의 구조강도에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 충남대학교, 1992, p.215.
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. Rhee, H.C. "Comparision of finite-element stress solution of multi-plane tubular joint with and without ring and logitudinal stiffeners", *Offshore Technology Conference*, OTC 6942, 1992, pp.621-627.
4. Yura J.A. etc., "Ultimate Capacity Equations for Tubular Joints." *Proceedings Offshore Technology Conference*, Paper OTC 3690, Houston, U.S.A. 1980, pp.113-115.
5. Wardenire, J., *Hollow section Joints*, Delft University Press, 1982, p.10-46.
6. Marshall, P.W., *Design of Welded tubular connections*, Elsevier science publishers, 1992, p.412.
7. Vegte G.J. van der, "The static strength of uniplanar and multiplanar tubulr T- and X-joints", Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1995, p.378.