

# 해양 K-Joint 구조의 수치해석 연구

## Numerical Parametric Study of Offshore K-Joint Structure

박관규\* · 임성우\*\* · 조철희\*\*\*

Park, Kwan-Kyu · Im, Sung-Woo · Jo, Chul-Hee

### ABSTRACT

The fundamental joint configuration that is often applied in offshore structures is the K-joint. The paper describes a numerical parametric study for K-joint parameters(using the finite element program) and compared with results of the experimental test. The stress effects of various parameters including  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$  and  $\theta$  were investigated. The paper introduces the stress distributions as per each parameter. From the study, the maximum stress of joint became different according to the variation of joint parameters.

**Keywords:** offshore K-joint structure, numerical parametric study, K-joint parameters.

### 1. 서론

육상 유전 개발이 성숙기에 도달함에 따라 심해 자원을 개발하고 생산하는 해양 구조물의 수요가 현재보다 증대될 것이고, 고정식 해양 구조물보다는 심해 자원 개발에 적합한 FPSO, Semi-FPS, TLP 등과 같은 부유식 해양 구조물의 수요가 증가될 전망이다. 과거 1990년대에는 육상과 해상 유전의 비율이 7:3이었으나, 2000년대를 넘어서면서부터 그 비율이 6:4로 점차 좁아지고 있어서 향후에는 해상 유전 생산량이 육상 유전 생산량을 상회할 것으로 예상된다. 특히 그림 1에서 보는 것처럼 서부 아프리카, 멕시코만, 브라질의 세계 3대 심해시장에서의 유전 개발이 활발해질 것으로 기대되고 있어서, 심해 투자 자본의 75%가 이 지역에 집중될 것으로 보인다.(조갑래, 2003) 또한 해상 유전 개발도 근해 유전 고갈로 수심이 1,500m를 넘는 심해로 이동됨에 따라 채굴조건이 더욱 악화되고 있다. 이로 인해서 해양구조물에 작용하는 하중조건이 과거보다 훨씬 가혹해지면서 구조물의 안정성 또한 요구되어지고 있다.(임성우, 2005)

Joint의 변수에 관한 연구는 하중과 편심비에 따른 영향(김홍준 등, 1996), Joint 사이 거리에 따른 영향(Dexter et al., 1999), 하중조건에 따른 영향(Rasmussen et al., 1994), 하중과  $\beta$ 에 따른 영향(Rasmussen et al., 2001), Joint 형상과 하중 type에 따른 SCF의 영향연구(Ghanameh et al., 2005)등 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 최적 K-Joint 설계를 위한 가이드라인 제시를 위한 기초 연구로서 동일 하중조건하에서 실험(임성우 등, 2004; 임성우 등, 2005; Im et al., 2005)을 바탕으로 변수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ 의 변화에 따른 응력 집중부의 응력 변화를 분석하였다.

\* 인하대학교 선박공학과 석사과정 E-mail: park@inha.ac.kr

\*\* (재)포항산업과학연구원 수석연구원 E-mail: sim@rist.re.kr

\*\*\* 정희원 · 인하대학교 선박해양공학과 교수 E-mail: chjo@inha.ac.kr

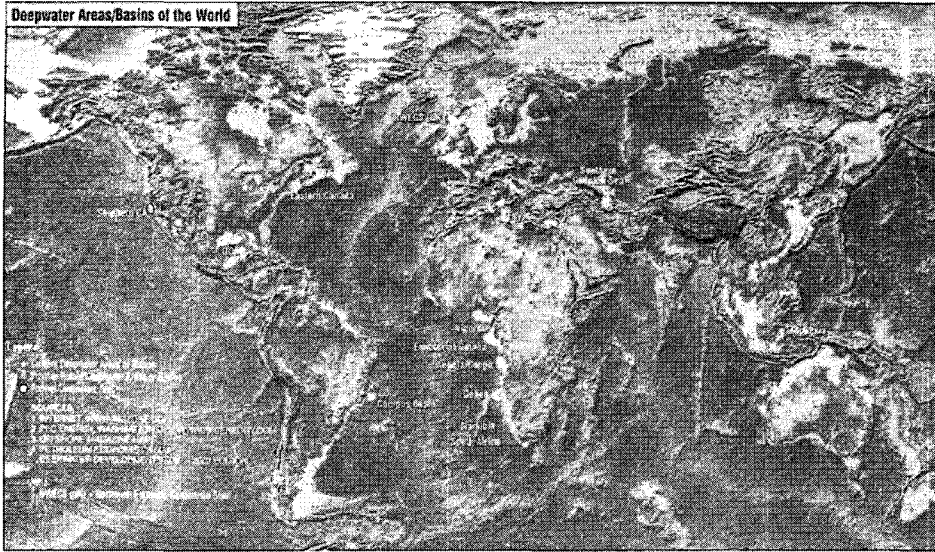


그림 1 심해 유전지대 분포

## 2. 수치해석

수치 해석의 신뢰성을 입증하기 위해 국내 중공업사에서 제작중인 K-Joint의 제원으로 제작된 실험체를 포항산업과학연구원의 강구조연구소에서 실험하여, 결과 데이터와 수치해석 데이터를 비교하였다.

수치해석을 위한 Solver로는 범용 유한요소 해석 패키지인 MSC/NASTRAN을 이용하였고, Pre- & Post-Processor로는 PATRAN을 이용하였다. 이 수치해석의 값과 Strain gage로 측정된 주요 81곳의 응력값을 비교하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

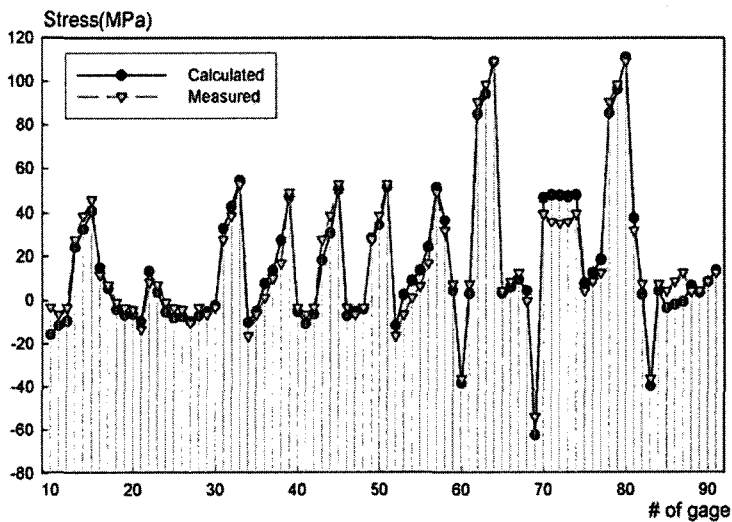


그림 2 실험값/해석값 비교

그림 2는 각 측정 위치별로 실험값과 모델해석 값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 실험값과 모델해석 값의 경향은 매우 흡사하며 대부분 일치함을 알 수 있다. 좀 더 세부적으로 응력 집중 주요 부위인 Chord heel의 값을 정리하면 표 1과 같이 응력 집중이 발생하는 Chord heel에서 오차가 1.5% 정도로 모델 해석이 실험값과 거의 일치하게 되었다.

표 1 Chord heel 부의 실험값 해석값 비교(MPa)

Left Side (# of gage=80)			Right Side (# of gage=64)		
Measured	Calculated	error(%)	Measured	Calculated	error(%)
111.0	109.3	1.5	109.1	109.3	0.2

2.1 모델 결정

K-Joint의 변수를 표 2에 나타내었다. 모델의 변수 결정에 있어 Brace member와 Chord member의 diameter, thickness는 API code에 따라 t/D ratio를 기준으로 하여, 실제 생산이 가능한 pipe제원으로 표 3과 같이 결정하였다.

표 2 K-Joint 주요변수

$\alpha$	$2Lch/D$	Chord length slenderness
$\beta$	$d/D$	Brace-to-chord diameter ratio
$\gamma$	$D/2T$	Chord slenderness
$\tau$	$t/T$	Brace-to-chord wall thickness ratio
$\theta$		Brace angle

d : Outside brace diameter    D : Outside chord diameter    t : Brace wall thickness  
 T : Chord wall thickness    Lch : Chord length

표 3 모델 결정

Models	Chord		Brace		Parameters				
	D(mm)	T(mm)	d(mm)	t(mm)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\tau$	$\theta(^{\circ})$
K1-A-45	406	17.5	168	7.1	29.56	0.41	11.60	0.41	45
K1-A-60	406	17.5	168	7.1	29.56	0.41	11.60	0.41	60
K1-B-45	406	17.5	324	14.3	29.56	0.80	11.60	0.82	45
K1-B-60	406	17.5	324	14.3	29.56	0.80	11.60	0.82	60
K2-A-45	508	22.2	219	9.5	23.62	0.43	11.44	0.43	45
K2-A-60	508	22.2	219	9.5	23.62	0.43	11.44	0.43	60
K2-B-45	508	22.2	406	17.5	23.62	0.80	11.44	0.79	45
K2-B-60	508	22.2	406	17.5	23.62	0.80	11.44	0.79	60
K3-A-45	610	27	273	12.7	19.67	0.45	11.30	0.47	45
K3-A-60	610	27	273	12.7	19.67	0.45	11.30	0.47	60
K3-B-45	610	27	457	19.1	19.67	0.75	11.30	0.71	45
K3-B-60	610	27	457	19.1	19.67	0.75	11.30	0.71	60
K4-A-45	762	31.8	324	14.3	15.75	0.43	11.98	0.45	45
K4-A-60	762	31.8	324	14.3	15.75	0.43	11.98	0.45	60
K4-B-45	762	31.8	559	23.8	15.75	0.73	11.98	0.75	45
K4-B-60	762	31.8	559	23.8	15.75	0.73	11.98	0.75	60

### 2.2 모델링

그림 3과 같이 각 모델을 약 1만 2천여개의 요소로 분할하였고, Joint 부분을 세밀하게 관찰하기 위해 좀 더 많은 수의 요소로 분할하여 정확한 값을 얻는데 노력하였다. 여기서 사용된 상수는  $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , Poisson ratio=0.3 이고, Chord부의 끝단을 각각 Fix, Simple 조건을 적용하여, Brace 상단을 Rigid 요소로 연결하여 중앙에 50톤(490kN)의 하중을 적용하였다.

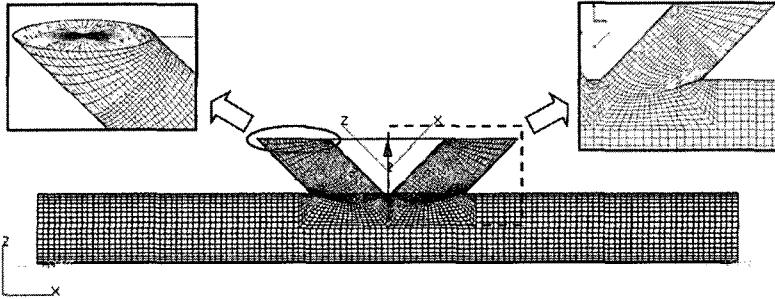
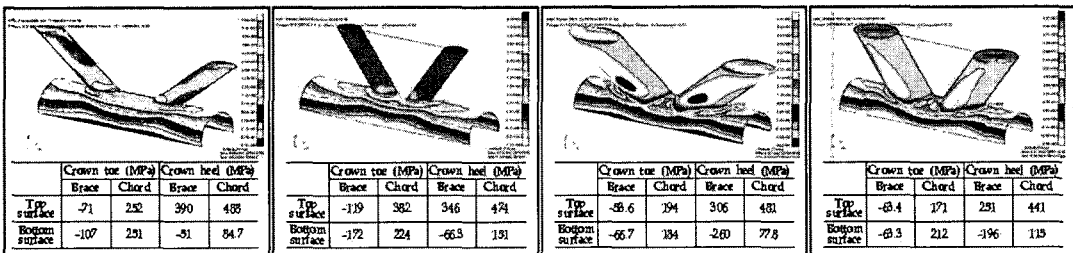


그림 3 모델링

## 3. 수치해석 결과

### 3.1 모델별 응력

모델별 수치해석 결과를 그림 4의 (a)~(p)와 표 4에 정리하였다.

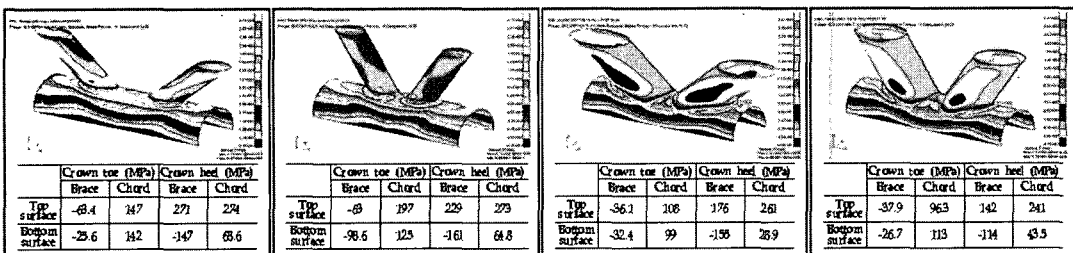


(a). K1-A-45

(b). K1-A-60

(c). K1-B-45

(d). K1-B-60



(e). K2-A-45

(f). K2-A-60

(g). K2-B-45

(h). K2-B-60

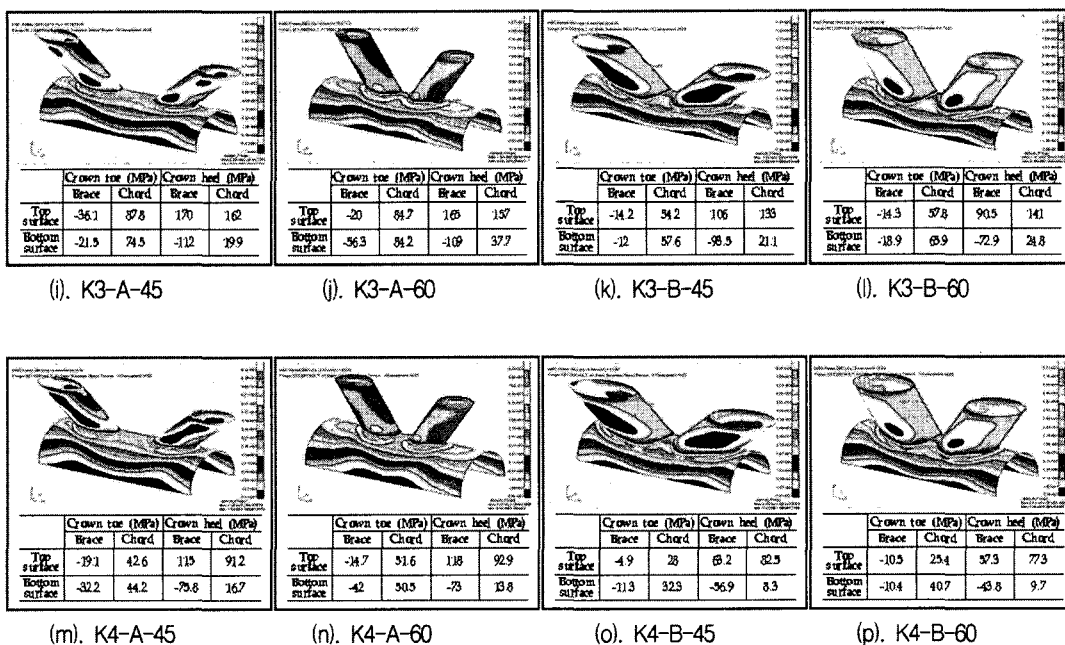


그림 4 수치해석 결과정리

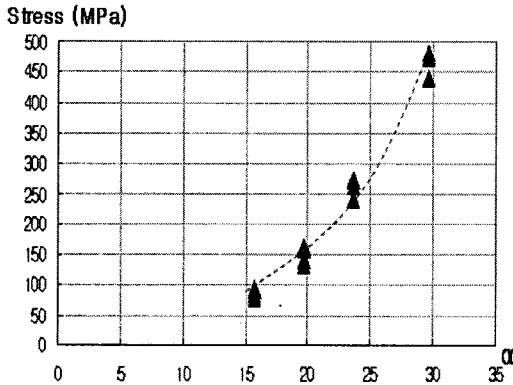
표 4 모델별 응력 (MPa)

	Top surface				Bottom surface			
	Crown toe		Crown heel		Crown toe		Crown heel	
	Brace	Chord	Brace	Chord	Brace	Chord	Brace	Chord
K1-A-45	-71	252	390	488	-107	251	-51	84.7
K1-A-60	-119	382	346	474	-172	224	-66.3	151
K1-B-45	-53.6	194	306	481	-66.7	184	-260	77.8
K1-B-60	-63.4	171	251	441	-63.3	212	-196	115
K2-A-45	-63.4	147	271	274	-25.6	142	-147	68.6
K2-A-60	-63	197	229	273	-98.6	125	-161	64.8
K2-B-45	-36.1	108	176	261	-32.4	99	-155	28.9
K2-B-60	-37.9	96.3	142	241	-26.7	113	-114	43.5
K3-A-45	-36.1	87.8	170	162	-21.5	74.5	-112	19.9
K3-A-60	-20	84.7	165	157	-56.3	84.2	-109	37.7
K3-B-45	-14.2	54.2	106	133	-12	57.6	-93.5	21.1
K3-B-60	-14.3	57.8	90.5	141	-18.9	65.9	-72.9	24.8
K4-A-45	-19.1	42.6	115	91.2	-32.2	44.2	-75.8	16.7
K4-A-60	-14.7	51.6	118	92.9	-42	50.5	-73	13.8
K4-B-45	-4.91	28	63.2	82.5	-11.3	32.3	-56.9	8.28
K4-B-60	-10.5	25.4	57.3	77.3	-10.4	40.7	-43.8	9.68

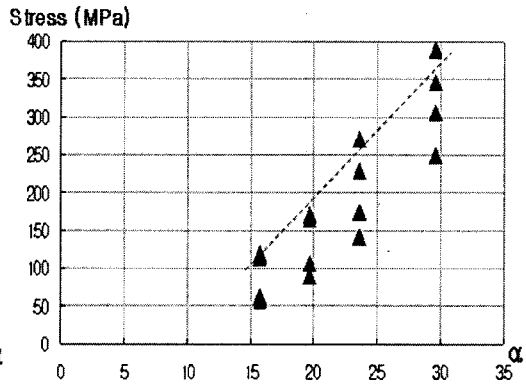
### 3.2. 변수에 따른 응력

#### 3.2.1 $\alpha$ 에 따른 응력

응력 집중을 보이는 Crown heel의 Chord member와 Brace member에서 응력의 변화를 살펴보면 그림 5와 같이  $\alpha$ 값이 증가 됨에 따라 증가하게 된다. 또한  $\alpha$ 값이 증가할 수 록 응력의 증가량도 커짐을 알 수 있다.



(a) Chord heel의 응력

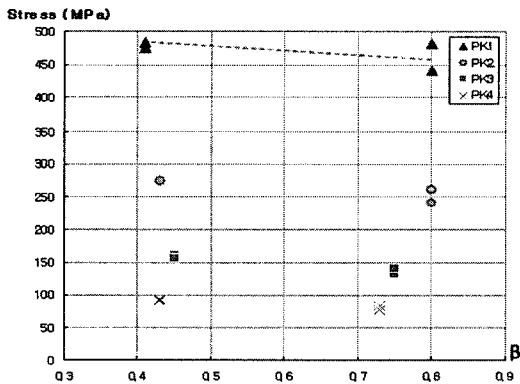


(b) Brace heel의 응력

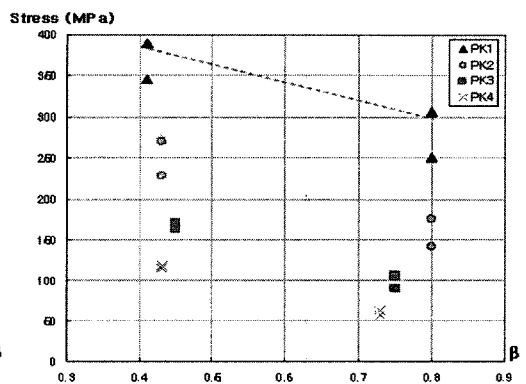
그림 5 변수  $\alpha$ 에 따른 주요 부재의 응력

#### 3.2.2 $\beta$ 에 따른 응력

응력 집중을 보이는 Crown heel의 Chord member와 Brace member에서 응력의 변화를 살펴보면 그림 6과 같이  $\beta$ 값이 증가 됨에 따라 Chord heel과 brace heel 모두 응력은 감소하게 되고, Chord heel에 비하여 Brace heel의 응력 감소가 더욱 크다. 또한  $\theta$ 가 30도에 비해 60도의 경우가 더 큰 감소를 보인다.



(a)  $\beta$ 에 따른 Chord heel의 응력

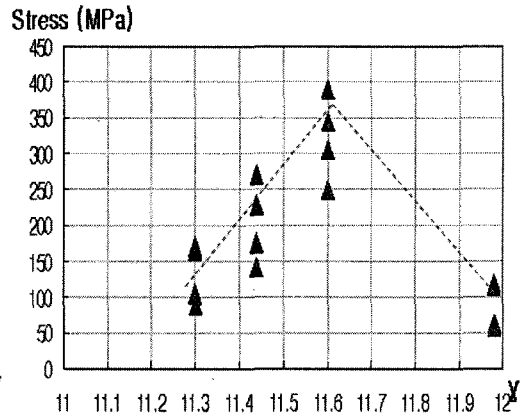
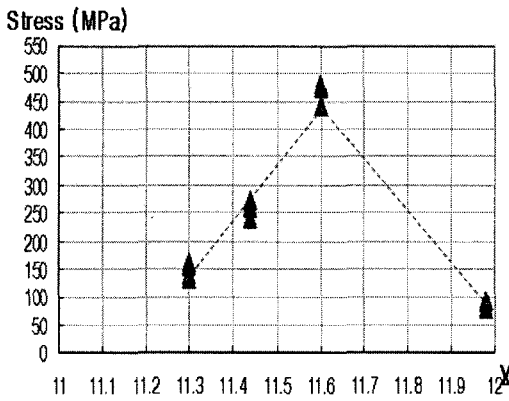


(b)  $\beta$ 에 따른 Brace heel의 응력

그림 6 변수  $\beta$ 에 따른 주요 부재의 응력

3.2.3  $\gamma$ 에 따른 응력

응력 집중을 보이는 Crown heel의 Chord member와 Brace member에서 응력의 변화를 살펴보면 그림 7과 같이  $\gamma$ 값이 증가함에 따라 Chord heel, Brace heel의 응력이 증가되다가  $\gamma$ 값이 더 커지게 되면 오히려 응력은 떨어지게 된다.



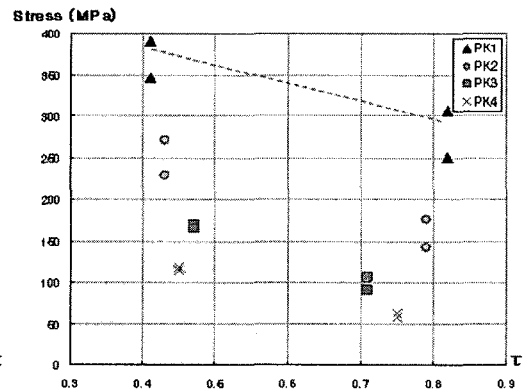
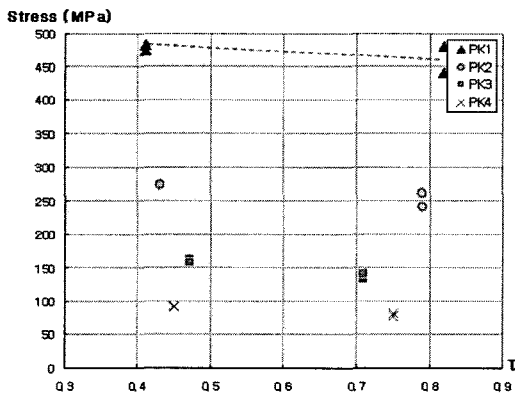
(a)  $\gamma$ 에 따른 Chord heel의 응력

(b)  $\gamma$ 에 따른 Brace heel의 응력

그림 7 변수  $\gamma$ 에 따른 주요 부재의 응력

3.2.4  $\tau$ 에 따른 응력

응력 집중을 보이는 Crown heel의 Chord member와 Brace member에서 응력의 변화를 살펴보면 그림 8과 같이 Brace heel의 응력은  $\tau$ 가 증가함에 따라 감소하고, Chord heel에 비하여 Brace heel의 응력 감소가 더욱 크다. 또한  $\theta$ 가 30도보다 60도인 경우 응력의 감소량이 더 크다.



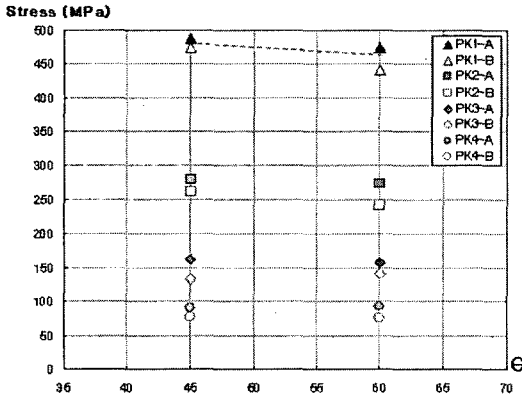
(a)  $\tau$ 에 따른 Chord heel의 응력

(b)  $\tau$ 에 따른 Brace heel의 응력

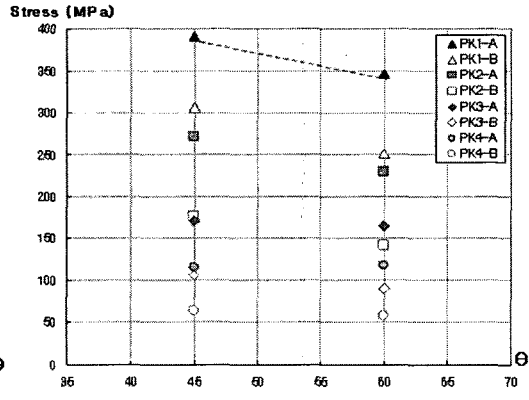
그림 8 변수  $\tau$ 에 따른 주요 부재의 응력

3.25  $\theta$ 에 따른 응력

응력 집중을 보이는 Crown heel의 Chord member와 Brace member에서 응력의 변화를 살펴보면 그림 9와 같이  $\theta$ 값이 증가하면 Chord heel과 Brace heel의 응력은 감소하게 된다. 특히 Chord heel에 비하여 Brace heel에서의 응력 감소가 더욱 크게 나타난다.



(a)  $\theta$ 에 따른 Chord heel의 응력



(b)  $\theta$ 에 따른 Brace heel의 응력

그림 9 변수  $\theta$ 에 따른 주요 부재의 응력

각 변수에 따른 응력의 변화를 정리하면 표 5와 같다.

표 5 변수의 증가에 따른 응력 변화

	$\alpha \uparrow$	$\beta \uparrow$	$\gamma \uparrow$	$\tau \uparrow$	$\theta \uparrow$
$\Delta\sigma$ , Chord heel	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow (\downarrow)$	$\downarrow$	$\downarrow$
$\Delta\sigma$ , Brace heel	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow (\downarrow)$	$\downarrow$	$\downarrow$

Note :  $\uparrow$ :증가,  $\downarrow$ :감소,  $\uparrow$ :대증가  $\downarrow$ :대감소

4. 결론

K-Joint 설계 시 주요 변수인  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ 에 따른 응력 변화를 실험과 Parametric study를 통하여 연구하였다. 주요 변수에 따른 응력 경향을 요약하면 다음과 같다.

- (1).  $\alpha$ 가 증가하면 응력도 증가하지만,  $\beta$ 가 증가하면 응력은 감소한다.
- (2).  $\tau$ 와  $\theta$ 가 증가하면 응력은 감소한다.
- (3).  $\beta$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ 가 증가하면 응력은 감소하게 되는데, Chord부에 비하여 Brace부의 응력 감소량이 더 크다.
- (4).  $\gamma$ 가 증가하면 응력은 커지다 감소하게 된다.

앞으로 연구에서는 좀 더 세부적인 모델해석 후 그 결과를 토대로 경제성과 안정성에 적절한 최적 구조 K-Joint 모델을 구상하여 설계시 좋은 참고 자료로 제시할 것이다.



**참고문헌**

- 김홍준, 박금성, 배규용, 문태섭 (1996) 각형강관 트러스의 K형 접합부에 관한 연구, 한국 강구조학회 논문집, 제 8권 4호, pp 3~17.
- 임성우, 박노식, 조철희, 박관규 (2004) 해양구조물의 K-Joint 피로연구, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 291~296.
- 임성우 (2005) 해양구조물 전망 및 실대 구조물 피로 성능 평가, 제14회 건설해양분야 철강이용 기술 발표회 논문집, pp 221~232.
- 임성우, 장인화, 조철희, 박관규 (2005) API 2WGr.50 강재를 이용한 대형 Tubular Joint 피로성능평가, 한국 해양공학회 논문집, 제19권 3호, pp 54~58.
- 조갑래 (2003) 해양 시장의 전망과 대응전략, 제12회 건설해양 분야 철강이용기술 발표회 논문집, pp 282~305.
- Dexter, E. M., Lee, M. M. K. (1999) Static Strength of Axially Loaded Tubular K-joints, *Journal of Structural Engineering*.
- Ghanameh, M.F., Thevenet, D., Zegloul, A. (2005) Effects of Joint Configuration and Loading Type on Stress Concentration in Offshore Welded Tubular Joints, *Advanced Problems in Mechanics*, pp 1~8.
- Im Sung-Woo, Chang In-Hwa, Park Kwan-Kyu, Jo Chul-Hee, Kim Ku-Youn (2005) Fatigue Analysis of Offshore Tubular Joints, *The International Conference on Asian and Pacific Coasts*, pp 155-158.
- Rasmussen, K. J. R., Hasham, Anthony S. (1994) Tests of K-joints in Stainless Steel Circular Hollow Sections, *Australasian Structural Engineering Conference*, pp 241~246.
- Rasmussen, K. J. R., Hasham, Anthony S. (2001) Tests of X- and K-joints in CHS Stainless Steel Tubes, *Journal of Structural Engineering*, pp 1183~1189.