



고정식 자켓구조물의 기하형상 조건에 따른 구조거동특성

경갑수¹ · 이준호^{2*} · 박진은³ · 이성진⁴

¹교수, 한국해양대학교, 건설공학과, ²차장, 서영엔지니어링, 철도본부,
³연구교수, 한국해양대학교, Linc+사업단, ⁴박사후연구원, 한국해양대학교, 건설공학과

Structural behavior characteristics of jacket structure according to geometrical condition

Kyung, Kab Soo¹, Lee, Jun Ho^{2*}, Park, Jin Eun³, Lee, Sung Jin⁴

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea
²Senior Manager, Railroad Supervision Team, Seoyoung Engineering Co., Ltd., Gyeonggi-do, 13595, Korea
³Research Professor, Linc+ Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea
⁴Post Doctor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

Abstract—In this study, stress concentration factors of welded joints were analyzed. The stress concentration factor calculated from the hot spot stress equation suggested by IIW was compared with the existing equations. As a result, the stress concentration factor was confirmed to be similar to the Efthymiou proposed equation. and, the stress concentration factor is increased as the geometric parameter($\zeta, \tau, \gamma, \theta$) increased. And the fatigue life is considered to be affected by the geometric parameter of the joint, the connection of the neutral point of the joint and the load direction of the member.

Keywords—Stress Concentration Factor(SCF), Hot Spot Stress(HSS), Geometric Parameter, Jacket structure, K-joint

1. 서론

고정식 자켓구조물은 천해영역의 해양플랜트 구조에 적용되는 대표적인 하부구조형식 중의 하나이며, 현재 석유기지시설의 접안시설물과 향후 친환경 해상풍력발전 시설물 등에 매우 다양한 형식으로 사용될 수 있는 구조물이다. 그러나, 고정식 자켓구조물은 공용기간 동안 풍력 및 파력 등과 같이 자연에 의해 발생하는 다양한 외력을 지속적이며 랜덤하게 받게 되므로 피로현상이 발생하게 된다. 특히 용접이음이 집중되는 격점부는 기하학적 형상의 영향 등에 의해 공용 중에 피로에 대하여 취약한 구조가

될 수 있다. 그러므로 고정식 자켓구조물 구조의 안전성 향상을 위해서는 이들 격점부의 피로강도 평가가 중요할 것으로 판단된다.

자켓구조물의 주부재인 원형강관과 관련하여 국내에서 강관 구조 접합부의 재료 및 형상에 따른 실험 및 해석연구^{[1],[2],[3],[4]}가 수행되고 있으나, 기하형상에 따른 응력집중에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 국내외의 해양구조물 관련기준에서는 자켓 구조물 등의 구조부 연결격점부의 구조상세 및 피로강도에 대한 규정은 제정되어있으나, 격점부의 피로강도 평가에 대한 연구는 제한적으로 수행되고 있다. 그러므로 해양구조물의 경제성 및 사용성 증대를 위해서 격점부의 피로강도를 용이하게 평가할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이 연구에서는 자켓구조물 격점부 기본 이음형태의 하나인 K형 이음부를 대상으로 이음부 형상에 관계되는 다양한 기하학적 형상 및 이음부에서의 응력집중과의 관계를 기존 제안식과의 비교를 실시하며, 또한 응력집중에 영향을 미치는 형상 매개변수의 영향 평가를 실시하고자 한다. 또한 3차원 기하특성을 갖는 실물

Note.—Discussion open until December 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 09, 2018; revised June 01, 2018; approved on June 03, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

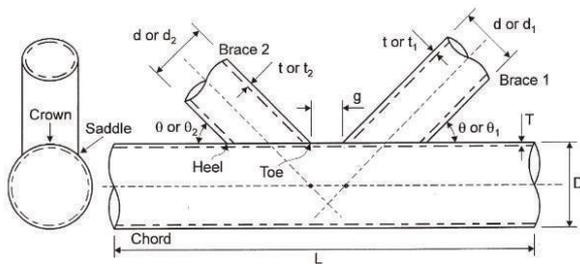
*Corresponding author.

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-403-3762
E-mail. kyungks@kmou.ac.kr

자켓구조물을 대상으로 설계시 가장 중요한 외력인자 중 하나인 파랑하중에 대한 구조해석을 실시하여 실물 자켓구조물 격점부에서의 응력집중계수 및 거동 특성을 분석하고자 한다.

2. 단순형상의 격점이음부에 대한 응력집중계수 평가

자켓구조물 격점부의 기하형상을 매개변수로 하여 격점부의 응력집중계수(Stress Concentration Factor, 이하 SCF)를 산정하는 연구는 다양한 연구자에 의해 활발하게 진행되고 있다. 선행 연구에서 사용되는 자켓구조물 격점부의 기하학적 형상 계수는 Fig. 1과 같다.



- θ : Inclination of the Brace(s) with Chord axis
- α : $2L/D$ (L : Chord length, D : Chord diameter)
- β : d/D (d : Brace diameter, D : Chord diameter)
- ζ : g/D (g : Gap, D : Chord diameter)
- τ : t/T (t : Brace thickness, T : Chord thickness)
- γ : $D/2T$ (D : Chord diameter, T : Chord thickness)

Fig. 1. Geometric notaitons for a k-joint^[8]

대표적인 선행연구인 Efthymiou(1988)^[5], Lloyd's Register(1990)^[6], Hansen(1996)^[7], Lee(1999)^[8]의 연구에서는 격점부 SCF 산정을 위한 식이 제안되었다. 이들 제안식에서는 격점부의 형상 및 기하형상에 대한 영향함수를 사용하여 SCF를 산정할 수 있다는 공통점이 있다. 그러나, 각 연구에서의 구조해석 모델 및 기하형상의 상이, SCF 산정방법의 차이, 적용 용접구조상세 등에 의해 동일 모델에 대해서도 일률적인 SCF가 산정되지 않는다는 문제점이 있다. Hansen(1996)^[7]은 총 25종류의 K 이음부 형상에 대해 Brace의 이음각도 θ 가 45° - 45° 일 때, 형상 계수 β , γ , τ , ζ 의 변화를 매개변수로 하는 유한요소해석을 실시하며 SCF 산정식을 제안하였다. Lee(1997)는 기존의 Hansen 산정식을 보완하여 Lee의 산정식을 제안하였다. Hansen과 Lee의 제안식은 제작의 경제성을 고려하여 Chord와 Brace의 용접 이음부 상세가 모두 일면면측용접에 의해 실시되는 경우를 대상

으로 구조해석을 실시하였다. 이 경우 피로균열은 용접루트부에서 발생되므로 연구에서는 용접부 상세에 따른 힘의 흐름을 고려하고, 용접부 모델을 용접 지단부와 루트부로 모델링하기 위하여 솔리드 모델을 사용하여 용접비드를 형상화하고 이들 구조에 대한 SCF 산정식을 제시하였다.

그러나, 이 연구의 대상 자켓구조물의 격점부 용접상세는 완전 용입을 적용하고 있다. 따라서 이 연구에서는 해석의 간편성 등을 고려하여 격점부 상세모델에 shell 요소를 사용하여 제안식을 제시한 Efthymiou 제안식 및 LR(Lloyd's Register) 제안식을 사용하여 대상 자켓구조물 격점부의 SCF를 평가하였으며, 또한 이 연구에서 실시한 유한요소해석 결과와의 비교를 실시하였다.

이 연구에서 대상으로 하는 K형 이음부의 모델링 및 형상조건 등에 대한 비교모델에서는 Lee(1999)^[8] 연구에 사용된 구조상세 및 현재 공용중인 Inner Breasting Dolphin 구조상세를 고려하였다. 기본모델로는 K형 격점부 구조상세에서 Chord와 Brace의 이음각도(θ)가 대칭인 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 를 적용하였으며, 공용 중인 구조물 상세를 반영하여 $\beta = 0.46$, $\zeta = 0.073$, $\tau = 0.67$, $\gamma = 18.83$ ($g = 105\text{mm}$, $d = 660\text{mm}$, $D = 1,435\text{mm}$, $t = 25.4\text{mm}$, $T = 38.1\text{mm}$)를 적용하였다. 그리고 공용중인 자켓구조물의 경우, 부재 배치에 따라 부재의 직경(d, D) 및 gap(g)이 달라지기 때문에 이 연구에서는 Table 1과 같은 매개변수를 설정하고 매개변수 변화에 따른 SCF 평가를 실시하였다.

Table 1. Geometric parameters in previous and this study

Joint ref.	β	ζ	τ	γ	θ_1, θ_2	Note	
Previous study	0.6	0.075	0.35	-	$45^\circ, 45^\circ$		
Existing structure	0.46	0.072~0.088	0.67	18.83	var.		
This study							
Model 1 (var. β)	M1-1	0.25	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M1-2	0.46	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	main
	M1-3	0.70	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M1-4	0.85	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
Model 2 (var. ζ)	M2-1	0.46	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	main
	M2-2	0.46	0.146	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M2-3	0.46	0.292	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M2-4	0.46	0.584	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
Model 3 (var. τ)	M3-1	0.46	0.073	0.35	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M3-2	0.46	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	main
	M3-3	0.46	0.073	0.80	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
	M3-4	0.46	0.073	1.00	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	
Model 4 (var. γ)	M4-1	0.46	0.073	0.50	14.12	$45^\circ, 45^\circ$	
	M4-2	0.46	0.073	0.67	18.83	$45^\circ, 45^\circ$	main
	M4-3	0.46	0.073	1.00	28.25	$45^\circ, 45^\circ$	

구조해석모델은 3차원 4-node 절점을 가지는 shell요소를 사용하여 K형 이음부를 모델링하였다. 해석에서의 경계조건은 선형연구(Lee, 1999)^[8]를 참조하여 K형 이음부의 한쪽은 변위 및 회전을 모두 구속하였으며, 다른 한쪽은 회전만 구속하여 적용하였다. 하중조건은 Brace 양단에 1kN의 축력을 적용하였으며, 최소요소크기는 용접부 응력집중에 대한 평가를 위하여 국제용접학회(IIW)^[9]에서 제시하는 1.0t보다 작은 10mm를 적용하였다.

기본 해석모델에서 Chord의 직경 및 두께는 각각 1,435mm, 38.1mm, 사용강재는 API Spec 2H Gr.50이며, Brace의 직경과 두께는 각각 660mm, 25.4mm, 사용강재는 ASTM A36이다. Fig. 2 ~ Fig. 5에 각 모델에 대한 해석모델 및 해석결과의 일례를 나타내었다.

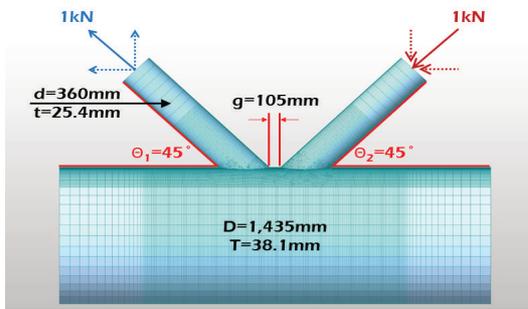


Fig. 2. Model 1-1(symmetry, g=105mm, t=25.4mm))

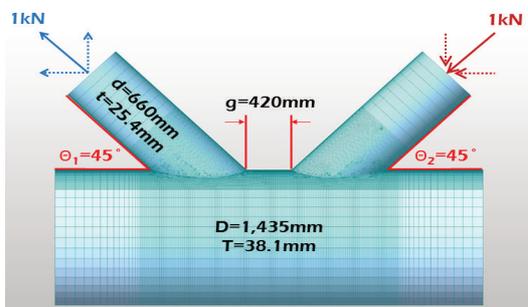


Fig. 3. Model 2-3(symmetry, g=402mm, t=25.4mm))

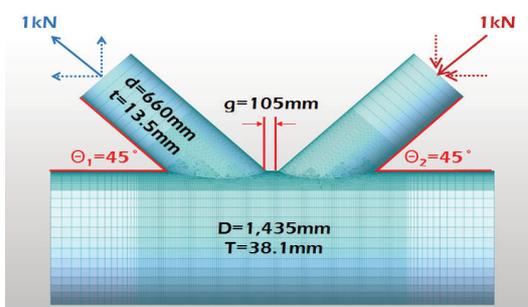


Fig. 4. Model 3-1(symmetry, g=105mm, t=13.5mm))

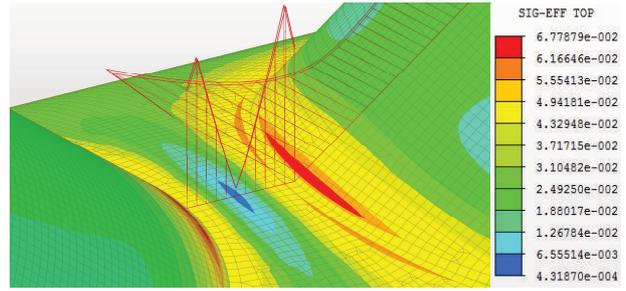


Fig. 5. Effective stress distribution of the Model 1-2 (symmetry, g=105mm)

유한요소해석 결과에 기초하여 Chord와 Brace에서의 hot spot 응력을 산정하였다. Hot spot 응력은 IIW^[9]에서 제시한 fine한 요소를 사용하는 경우에 해당되어 hot spot 응력 산정에 사용되는 0.4t와 1.0t 절점 위치를 이용한 선형 외삽법의 계산법인 식 (1)을 적용하였다. Fig. 6에 부재별 길이방향에 대한 응력분포곡선의 일례를 나타내었다. 식 (1)에 의해 산정된 hot spot 응력을 산정하여 Table 2에 나타내었다.

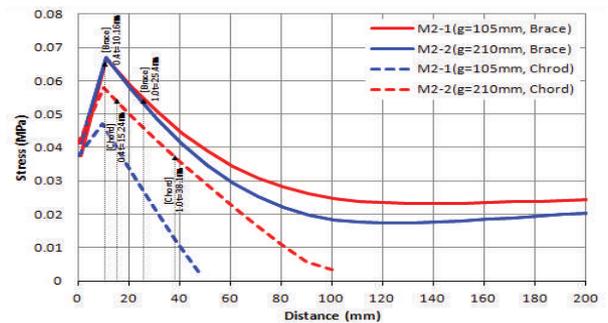


Fig. 6. Effective stress distribution graph (Brace and Chord, Model2-1, 2-2)

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma(0.4t) - 0.67\sigma(1.0t) \quad (1)$$

Table 2. Results of the hot-spot stress(σ_{hs})(MPa)

CASE	Brace_Crown	Brace_Saddle	Chord
Model 1 (M1-1)	0.16354	0.07142	0.11754
Model 2 (M2-1)	0.07122	0.02671	0.05814
Model 3 (M3-1)	0.09861	0.04630	0.05179
Model 4 (M4-1)	0.05681	0.02060	0.03173

Note : Position of the Crown and Saddle make reference to Fig. 1.

앞에서 계산된 각 모델의 hot spot 응력에 대한 SCF를 산정해 Table 3에 나타내었다. 단, 이 연구에서 적용한 K형 이음부는 Brace가 인접해 있어 FEM 해석(shell 모델)으로 Chord부의 공칭응력을 산정하는 것이 어려우며, Fig. 6과 같이 응력집중에 따른 응력분포의 기울기가 급격하여 합리적인 SCF 산출이 불가하므로 본 연구에서는 Brace에 대해서만 평가하였다.

Table 3. Results of the stress concentraion factor(SCF)

CASE		SCF(Brace)		Note
		Crown	Saddle	
Model 1 (var. β)	M1-1 (β=0.25)	4.27	1.96	Main
	M1-2 (β=0.46)	3.59	1.43	
	M1-3 (β=0.70)	2.54	1.38	
	M1-4 (β=0.85)	2.23	1.40	
Model 2 (var. ζ)	M2-1 (ζ=0.073)	3.59	1.43	Main
	M2-2 (ζ=0.146)	3.78	1.56	
	M2-3 (ζ=0.292)	3.71	1.79	
	M2-4 (ζ=0.584)	3.94	2.05	
Model 3 (var. τ)	M3-1 (τ=0.35)	2.64	1.25	Main
	M3-2 (τ=0.67)	3.59	1.43	
	M3-3 (τ=0.80)	3.77	1.53	
Model 4 (var. γ)	M4-1 (γ=14.12)	2.87	1.10	Main
	M4-2 (γ=18.83)	3.59	1.43	
	M4-3 (γ=28.25)	4.63	2.17	

본 연구에서 비교하고자 하는 Efthymiou식과 LR식은 OFF-SHORE TECHNOLOGY REPORT-OTH 354^[10]에서 제공하는 K-Joints의 Balanced axial load에서의 SCF 산정식을 사용하였다. Table 4에 나타낸 Efthymiou식을 보면, β, γ, τ, ζ, θ의 형상계수에 따라 SCF가 산정된다. LR식의 경우도 형상계수를 사용하는 것은 동일하나, 다양한 영향함수의 조합에 의해 이음부의 Chord와 Brace에서의 Saddle부와 Crown부의 두 영역의 SCF를 각각 구할 수 있다. 이 연구에서는 LR식을 적용하는 경우, 실제 구조해석 모델에서 응력집중이 발생하는 Crown부에 대해서만 SCF_{CC} 및 SCF_{BC} 식을 사용하였다.

Table 4. Efthymiou and LR Equation for K-Joint(Balanced axial load)

LR식 - SCF of Brace
$SCF_{BS} = 1.12 \times (T_{3A}S_{1AB} - T_{3B}S_{1BA}IF_{3AB}) \times (F_{1A} \text{ or } F_{2A})$ $SCF_{BC} = 1.26 \times (T_{4A}S_{2AB} - T_{4B}S_{2BA}IF_{4AB})$

$$\begin{aligned}
 & \text{Efthymiou equation - SCF of Brace} \\
 & 1 + [SCF_{chord}](1.97 - 1.57\beta^{0.25})\tau^{-0.14}\sin^{0.7}\theta_{max} \\
 & + \beta^{1.5}\gamma^{0.5}\tau^{-1.22}\sin^{1.8}(\theta_{max} + \theta_{min}) \\
 & [0.131 - 0.084\arctan(14\zeta + 4.2\beta)]
 \end{aligned}$$

Note : HSE, OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT-OTH 354^[10]

Table 5. The SCF of Efthymiou and LR Eq.(Brace_Crown)

Brace Crown	SCF			
	FEM	Efthymiou	LR	
Model 1 (var. β)	M1-1 (β=0.25)	4.27 (1)	3.59 (0.84)	2.47 (1.73)
	M1-2 (β=0.46)	3.59 (1)	3.19 (0.89)	3.12 (1.15)
	M1-3 (β=0.70)	2.54 (1)	2.70 (1.06)	3.26 (0.78)
	M1-4 (β=0.85)	2.23 (1)	2.38 (1.07)	3.16 (0.71)
Model 2 (var. ζ)	M2-1 (ζ=0.073)	3.59 (1)	3.19 (0.89)	3.12 (1.15)
	M2-2 (ζ=0.146)	3.78 (1)	3.35 (0.89)	2.90 (1.30)
	M2-3 (ζ=0.292)	3.71 (1)	3.49 (0.94)	2.56 (1.45)
	M2-4 (ζ=0.584)	3.94 (1)	3.58 (0.91)	2.20 (1.79)
Model 3 (var. τ)	M3-1 (τ=0.35)	2.64 (1)	2.34 (0.89)	3.12 (0.85)
	M3-2 (τ=0.67)	3.59 (1)	3.20 (0.89)	3.12 (1.15)
	M3-3 (τ=0.80)	3.77 (1)	3.52 (0.93)	3.12 (1.21)
	M3-4 (τ=1.00)	3.83 (1)	3.96 (1.03)	3.12 (1.23)
Model 4 (var. γ)	M4-1 (γ=14.12)	2.87 (1)	2.90 (1.01)	2.94 (0.98)
	M4-2 (γ=18.83)	3.59 (1)	3.19 (0.89)	3.12 (1.15)
	M4-3 (γ=28.25)	4.63 (1)	3.69 (0.80)	3.39 (1.37)

Table 1의 기하구조 조건을 적용하여 Efthymiou식과 LR식 으로부터 SCF를 산정하였으며, Table 5에 구조계산에 의해 산정되어진 SCF와의 차이를 비교하였다. Efthymiou식에 의한 SCF는 구조해석결과 대비 0.80 ~ 1.07 수준이었으며, M4-3(γ=28.25)의 경우를 제외하고는 ±10% 이내 오차율을 나타내었다. 반면 LR식은 구조해석에 의한 SCF 대비 0.71 ~ 1.79로 대부분 ±15 ~ ±30%의 오차율을 나타내고 있다. 따라서, Efthymiou식이 K-Joints의 balanced axial load 조건에서는 비교적 정확한 SCF를 제시하는 것으로 판단된다.

다음으로 각 형상계수가 K형 이음부의 SCF에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 각 형상계수를 매개변수로 하여 그 영향을 분석하였다. 단, 연구에서는 구조해석으로부터 검증된 Brace부에 대해서만 그 영향성을 분석하였다.

1) β 의 영향

직경비 β 의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 구조해석 결과는 Efthymiou식과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 그림과 같이 Brace부에서는 β 가 증가할수록 SCF는 감소하는 경향을 나타내었다. SCF의 범위는 2.2 ~ 4.3정도로 다른 형상계수에 비교하면 직경비 β 의 영향은 SCF에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

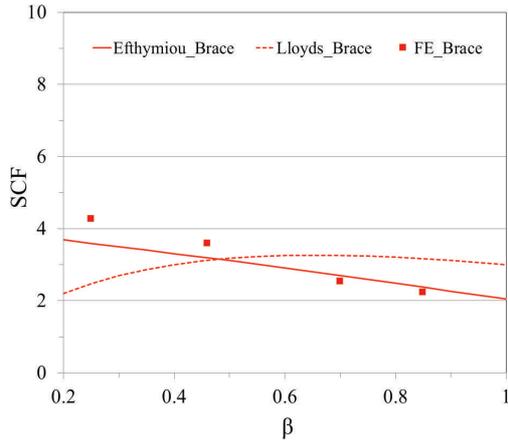


Fig. 7. Relationships between $\beta(=d/D)$ and SCF

2) ζ 의 영향

간격비 ζ 의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 구조해석 결과는 Efthymiou식과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 그림과 같이 Brace부에서는 SCF가 3.0에서 부터 시작해서 3.5로 수렴하는 경향을 볼 때 SCF에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

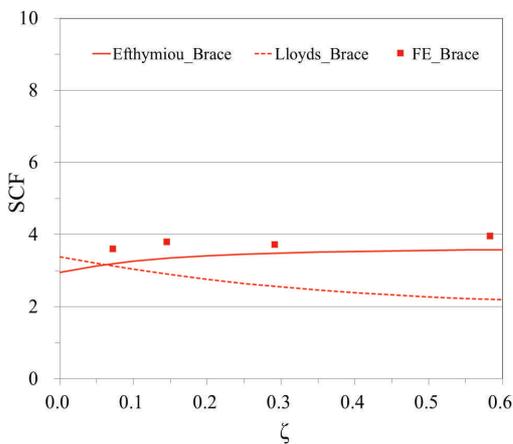


Fig. 8. Relationships between $\zeta(=g/D)$ and SCF

3) τ 의 영향

두께비 τ 의 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 구조해석 결과는 Efthymiou식과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 그림과 같이 Efthymiou식에 대해서는 τ 가 증가할수록 SCF는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, Brace부에서는 전체 범위에서 τ 가 증가할수록 SCF는 증가하는 경향을 나타내었으며, 그림과 같이 Brace부에서는 τ 가 증가할수록 SCF는 증가하는 경향을 나타내었다. SCF의 범위는 2.6 ~ 3.8정도로 다른 형상계수에 비교하면 직경비 τ 의 영향은 SCF에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

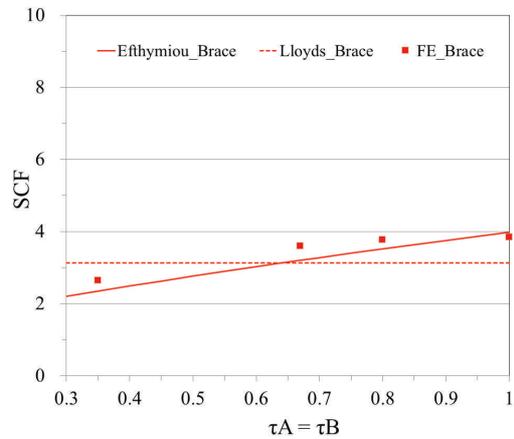


Fig. 9. Relationships between $\tau(=t/T)$ and SCF

4) γ 의 영향

반경-두께비 γ 의 영향을 Fig. 10에 나타내었다. Efthymiou식과 LR식은 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었으나, 구조해석결과는 비교적 Efthymiou식과 유사한 경향을 나타내었다. 그림과 같이 Brace부에서는 SCF의 범위가 2.6 ~ 3.7정도로 반경-두께비 γ 에 대해서는 다른 형상계수에 비해 SCF에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

5) θ 의 영향

Brace의 각도 θ 의 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 그림과 같이 Brace부에서는 SCF의 범위는 2.3 ~ 5.2정도로 다른 형상계수에 비해 θ 가 증가할수록 SCF에 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

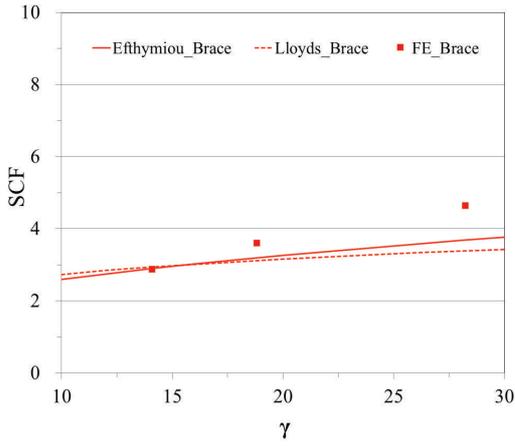


Fig. 10. Relationships between $\gamma(=D/2T)$ and SCF

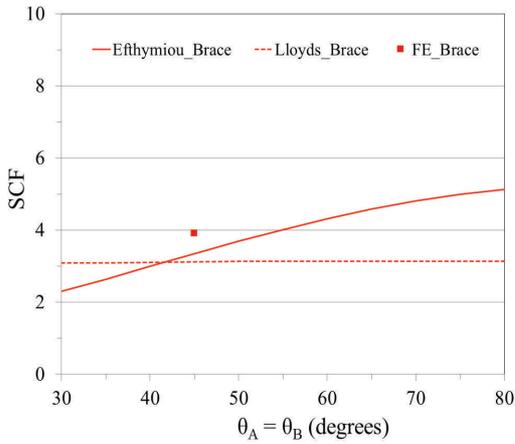


Fig. 11. Relationships between θ and SCF

Fig. 7 ~ Fig. 11의 그래프에 나타난 바와 같이 g 의 값이 일정할 때 τ , γ 의 값이 클수록 Chord와 Brace에서의 SCF가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 그 중 τ 의 증가에 의한 영향이 더 큰 것을 볼 수 있다. 직경비 β 의 경우, β 값이 점점 증가하여 1에 가까워질수록 SCF가 감소하는 것으로 나타났으며 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

SCF 산정결과 형상계수에 따라 다음과 같은 내용을 확인할 수 있었다.

- 1) 형상계수(ζ , τ , γ , θ)가 클수록 SCF가 증가한다.
- 2) Chord와 Brace의 두께 차이를 적게 하는 것이 피로강도 향상에 유리하다.(τ 의 영향)
- 3) 편심의 영향을 줄여 설계하는 것이 피로강도 향상에 유리하다.

다.(g 의 영향)

4) Chord와 Brace의 직경 차이가 작을수록 피로강도 향상에 유리하다.(β 의 영향)

3. 대상 구조물에서의 응력집중계수평가

3.1 대상 구조물의 개요 및 구조해석 모델

이 연구에서의 대상 구조물은 현재 공용중인 Inner Breasting Dolphin으로 320,000 D.W.T급의 유조선 접안에 사용되고 있다. 공용하중 하의 연결 격점부에 대한 SCF를 산정하기 위하여 3차원 격자해석을 실시하여 구조응답을 산정한 후 상세해석 단면을 선정하였다. Fig. 12 대상구조물의 정면도와 측면도를 나타내었다.

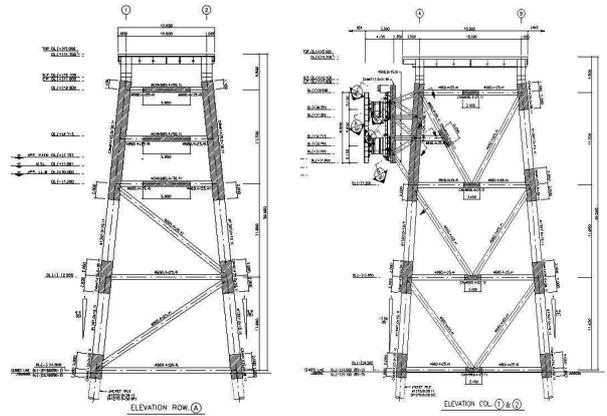
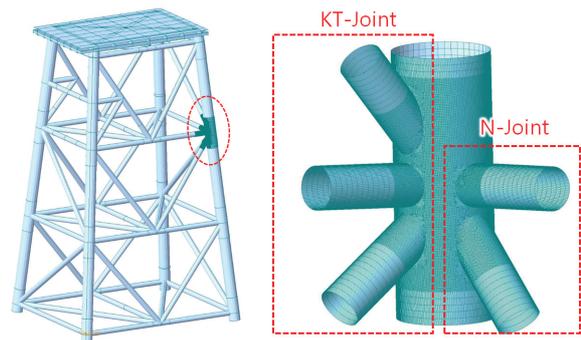


Fig. 12. Jacket structure (Inner Breasting Dolphin)



(a) FEM Model (Frame) (b) Detail Model (Shell)

Fig. 13. 3-D analysis model (frame) and detail model (shell)

공용하중에서 복잡한 기하형상의 연결격점부에 대한 SCF를 산정하기 위하여 상세해석을 위한 선행해석으로 3차원 격자해석

을 실시하였다. 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL 2016을 사용하였다. 해석요소는 3차원 frame 요소와 shell 요소를 결합한 모델을 적용하고, 대상구조물의 해석모델을 Fig. 13에 나타내었다.

3차원 frame 모델에서 상세해석을 실시할 격점부를 선정하였다. 이 부분은 KT형 이음부와 N형 이음부가 접합되는 부분으로서, 간판대의 위치에 있기 때문에 파력 및 풍하중에 대한 변동응력이 상당히 클 것으로 판단되어 이 부분으로 선정하였다. 상세해석모델에서의 요소는 shell 요소로 하였으며 최소요소 크기는 10.0mm로 하였다. 본 해석 모델에서 사용한 10mm의 요소사이즈는 두께 38.1mm 및 25.4mm를 고려하면 IIV⁽¹¹⁾등의 기준에서 요구하고 있는 용접부의 특성을 충분히 반영할 수 있는 것으로 판단되었다.

3.2 적용하중

본 연구에서 적용한 하중조건은 Table 6과 같이 자중, 활하중, 파력 및 풍하중 등을 고려하였으며 파력 및 풍하중은 피로에 영향을 주는 변동하중으로 고려하여 해석을 실시하였다. 여기서 파력은 대상 구조물의 설계 조건인 H=8.14m, T=16.27sec, L=255.84m의 설계하중 조건 하에서 일반적으로 많이 사용되는 Morison 공식을 적용하여 파력을 산정하였다. 파력은 항력 항과 관성력의 항으로 나누어지며 Table 6의 식과 같이 산정하였다.

위의 공용하중에 대한 격자해석 변위 결과를 상세해석 모델의 경계조건으로 적용하여 연결격점부에 대한 유한요소해석을 실시하였다.

Table 6. Load Condition

Dead	R.C.		Steel	
	Air	Under water	Air	Under water
	24.5 kN/m ³	14.5 kN/m ³	78.5 kN/m ³	68.5 kN/m ³
Live	Breasting facility		Deck facility	
	WP(1)	BD(2), MD(3)	Trestle	Catwalk
	Pipe: 10kN/m ² etc.: 5kN/m ²	3.0 kN/m ²	Trestle : DB-13.5	3.0 kN/m ²
Wave	$F^{(4)} = F_D^{(5)} + F_I^{(6)} = C_d \times \frac{W}{2g} A U U + C_m \frac{W}{g} V \frac{\partial U}{\partial t}$			
Wind	WO(7)		WN(8)	
	1.5 kN/m ²		3.0 kN/m ²	

Note : (1) WP (Working Platform), (2) BD (Breasting Dolphin), (3) MD (Mooring Dolphin), (4) F (Wave force) (5) F_D (Drag force), (6) F_I (Inertia force) (7) W_o (Wind Operating Condition) (8) W_N (Wind Non-Operating Condition)

3.3 구조해석

3.3.1 구조해석 케이스

일반적으로 자켓과 같은 구조물에서는 이상적으로 모든 부재의 중립축을 기준으로 모델을 구현하여 구조해석을 실시한다. 그러나 실제 강관이음부의 설계기준(ESDEP 15A.7)⁽¹²⁾에서는 Brace간의 간격(gap)을 70~75mm로 제안하고 있다. 따라서 편심의 영향과 이에 따른 Brace 간격에 대한 구조거동을 조사하기 위해 대상 자켓구조물을 대상으로 다음의 3가지 경우로 나누어서 유한요소해석을 실시하고 hot spot 응력을 계산하였다.

- 모델 1) 중립축이 일치하는 이상적인 경우(gap=70mm)
- 모델 2) 중립축이 불일치하는 경우(gap=70mm)
- 모델 3) 실구조 모델(중립축 일치, gap=36~143mm)

1) 모델 1(상세모델 gap=70mm, 격점부 : 편심 없음)

(Brace 편심 없음, Brace각 조정하여 gap을 70mm로 고정)

상세해석모델 1은 설계기준에서 Brace부 최소간격으로 제시하고 있는 70mm를 적용하여 Fig. 14(b)와 같이 상세 모델링을 하였고 상세해석모델의 경계 조건은 Fig. 14(a)와 같이 격점부의 중립축이 한 점에서 연결되도록 모델링(편심 없음)한 전체계 격자모델의 구조응답치(해당 절점 변위)를 적용하였다.

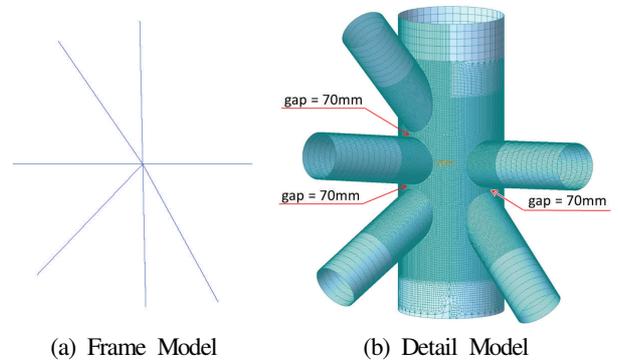


Fig. 14. Analysis Model 1

2) 모델 2(상세모델 gap=70mm, 격점부 : 편심 있음)

상세해석모델 2는 모델 1과 같이 Brace부 최소간격을 70mm로 적용하여 Fig. 15(b)와 같이 상세 모델링을 하였고 상세해석 모델의 경계 조건은 Fig. 15(a)와 같이 격점부의 중립축이 한 점에서 연결되지 않도록 모델링(실공용 중 구조물의 기하조건)한 전체계 격자모델의 구조응답치(해당 절점 변위)를 적용하였다.

모델 1과 모델 2에서 동일 Brace 간격 70mm 상세모델을 적

용한 이유는 동일 모델에 대하여 편심의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하기 위함이다.

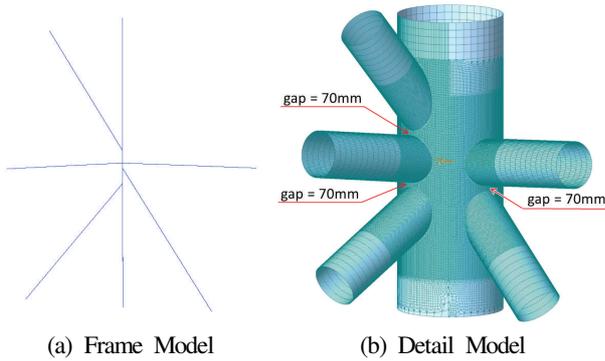


Fig. 15. Analysis Model 2

3) 모델 3(상세모델, 격점부 : 편심 없음)

(Brace 편심 없음, Brace각 미조정므로 gap은 변화됨)

상세해석모델 3의 경우는 이상적으로 중립축으로 연결되어 있는 경우에 대해서 격자해석 및 상세해석을 실시하였다. 이 해석대상 구조물은 실제 중립축이 한 점에서 만나는 기하형상의 구조물을 적용하고 있다.

이 경우에는 상세해석모델의 Brace 중심이 이상적으로 중립축에 연결되어 있으므로 Brace 간격이 Fig. 16(b)와 같이 다양하게 나타난다. 상세해석 모델의 경계 조건은 Fig. 16(a)와 같이 격점부의 중립축이 한 점에서 연결되도록 모델링(편심 없음)한 전체계 격자모델의 구조응답치(해당 절점 변위)를 적용하였다.

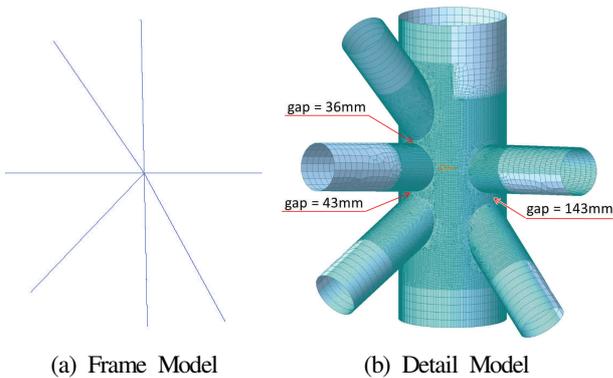


Fig. 16. Analysis Model 3

3.3.2 구조해석 결과

모델 1(상세해석모델의 Brace 간격이 70mm이며, 상세해석 모델의 경계조건 산정 시 격자해석 모델의 중립축이 한 점에 연결되는 경우)은 공용하중에 대해 최대응력 발생되는 N형 Brace

Crown 이음부에서 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대응력은 129.6MPa, 최소응력은 44.6MPa로 나타났다.

모델 2(상세해석모델의 Brace 간격이 70mm이며, 상세해석 모델의 경계조건 산정 시 격자해석모델의 중립축이 한 점에 연결되는 않는 경우)는 공용하중에 대해 최대응력 발생되는 N형 Brace Crown 이음부에서 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대응력은 133.5MPa, 최소응력은 45.2MPa로 나타났다.

모델 3(상세해석모델과 격자해석 모델의 Brace 중립축이 한 점에 연결되는 경우)은 공용하중에 대해 최대응력 발생되는 N형 Brace Crown 이음부에서 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대응력은 119.4MPa, 최소응력은 41.4MPa로 나타났다.

상세해석 stress contour의 일례와 상세해석 결과 최대응력과 최소응력의 비교를 Fig. 17과 Table 7에 각각 나타내었다.

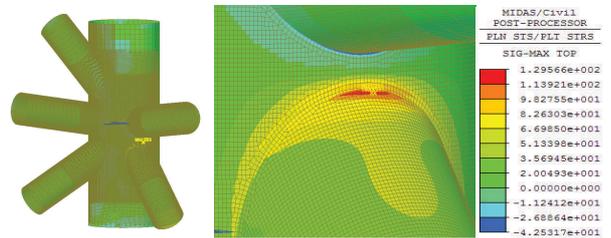


Fig. 17. Results of the Detail Model (Model 1)

Table 7. Results of the Detail Model(Max., Min. stress)

CASE	Max. stress(MPa)	Min. stress(MPa)	Stress range(MPa)
Detail Model 1	129.6	44.6	85.0
Detail Model 2	133.5	45.2	88.3
Detail Model 3	119.4	41.4	78.0

Note: Max.stress Load Case(Wind, Wave, Dead, Live Load)
Min.stress : Load Case(Dead, Live Load)

위의 Table 7에 나타난 바와 같이 유한요소해석의 결과를 비교해 볼 때, 3차원의 복잡한 연결 이음부 형태를 갖는 형상에서는 기하형상에 따라 응력분포가 변화하는 것으로 나타났다. 특히 편심의 영향을 많이 받는 것으로 나타난 바, 편심의 영향을 줄여 설계하는 것이 피로강도 향상에 유리한 것으로 판단된다. 따라서 편심 축하중으로 발생하는 휨모멘트의 영향을 줄이는 것이 중요하며, 편심 e에 직접적인 영향을 미치는 θ 와 ζ 의 형상계수를 적절하게 조절하는 것이 중요하다고 판단된다. 또한 응력집중의 위치가 대부분 Crown와 Saddle에 위치하고 있으므로 이 부분의 응력집중을 감소하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.4 Hot spot 응력 및 대상구조물 응력집중계수 산정

상세구조해석의 결과를 기술로 Hot spot 응력 및 공용하중에서 대상구조물 연결 격점부에서의 SCF를 산정하였다. Hot spot 응력산정은 앞의 식 (1)을 적용하여 산정하였다.

Fig. 18에 길이방향에 따른 응력분포곡선의 일례를 나타내었으며, Table 8에 Brace 부재에 대한 hot spot 응력 및 SCF 산정 결과를 나타내었다.

Fig. 18을 보면, Brace부에서는 용접이음부로부터 거리가 멀어짐에 따라 응력이 수렴하였으나, Chord부에서는 격점부재 사이의 거리가 매우 작은 값으로 제한되어 응력수렴 등의 특성을 파악하기 어려운 것으로 나타났다. 이로부터 상세구조해석에서의 SCF의 산출은 Brace 부재에 대해서만 검토하는 것으로 한다.

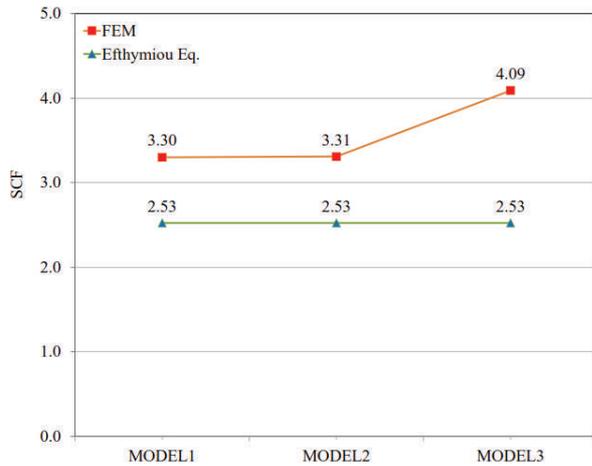


Fig. 18. Stress Concentration Factor(Model 1, 2, 3)

Table 8. Results of the Hot Spot Stress and SCF

Brace	Hot-Spot Stress	Nominal stress	SCF	Efthy.Eq.
Model1	128.4	38.9	3.30	2.53
Model2	132.2	40.0	3.31	
Model3	114.4	28.0	4.09	

이상의 구조해석 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다. 모델 1과 2는 편심의 차이가 있음에도 불구하고 SCF의 차이는 없었으며, 모델 3은 hot spot응력이 낮았으나, 공칭응력 이 상대적으로 더 낮게 평가되어 SCF가 가장 크게 나타났다. 편심의 영향은 크게 없는 것으로 볼 때 설계시 격점부의 중립축이 한 점에서 연결되도록 모델링 하여도 무방할 것으로 판단되며, Brace의 간격에 따른 SCF의 차이가 발생하므로 설계시 Brace의 gap을 확

인하여 모델링을 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.5 작용하중 방향에 따른 복잡한 기하형상을 갖는 격점부에서의 응력분포

복잡한 기하형상의 연결격점부에서는 공용하중에서 다양한 방향의 하중이 작용하기 때문에 이에 따른 응력분포 특성의 경향을 분석하였다. 대상구조물의 Brace 부재명을 Fig. 19에 나타내었다. 대상구조물의 경계조건은 주부재인 Chord의 아랫 부분은 변위와 회전 모두 구속하였으며, 윗 부분은 회전만 구속하여 적용하였다. 하중조건은 Brace 양단에 단위 변위 1mm의 강제변위를 적용하여 해석을 실시하였다. 작용하중에 대한 하중경우를 Table 9에 나타내었으며, “+”는 인장을 의미하며, “-”는 압축을 의미한다.

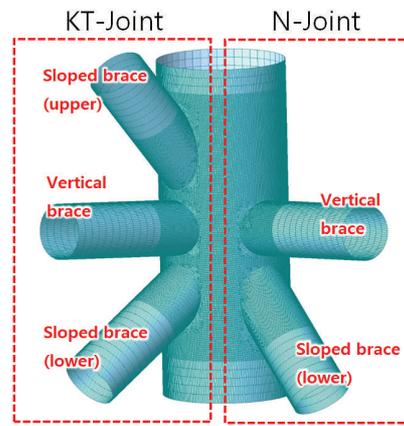


Fig. 19. Notation of the Brace

Table 9. Combinations of the load for load direction

Joint		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
N-Joint	Vert.Brace	-1.0	+1.0	+1.0	-1.0
	Slop.Brace	-1.0	+1.0	+1.0	-1.0
KT-Joint	Vert.Brace	+1.0	+1.0	-1.0	-1.0
	Slop.Brace(up.)	+1.0	+1.0	-1.0	-1.0
	Slop.Brace(low.)	+1.0	+1.0	-1.0	-1.0

작용하중에 대한 하중경우별 해석결과를 Table 10에 나타내었다.

Table 10. Analysis Result of FEM for load direction

구분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Max.stress	138.9 MPa	202.4 MPa	135.6 MPa	109.0 MPa
Location	KT-Joint Slop(up)Crown	KT-Joint Slop(low)Saddle	N-Joint Slop. Saddle	KT-Joint Vert. Crown

해석결과, 최대응력이 발생하는 경우는 KT형 이음부와 N형 이음부가 모두 인장이 발생하는 Case 2의 경우이며, 이때의 최대 응력 발생위치는 KT형 sloped Brace(lower)의 Saddle부에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 KT형 이음부와 N형 이음부가 모두 압축이 발생하는 Case 4의 경우는 최대응력이 가장 낮게 나타났다. 이때의 최대응력 발생위치는 KT형 vertical Brace의 Crown부에서 발생하는 것으로 나타났다. 복잡한 기하형상에 작용하중의 방향에 따라서 최대응력의 발생위치는 다양함을 알 수 있었으며, 주로 최대응력의 발생위치는 Crown부와 Saddle부에서 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고정식 자켓구조물을 대상으로 기하형상계수 ($\alpha, \beta, \zeta, \tau, \gamma, \theta$) 및 주요 외력인자(파랑하중 등)에 따른 구조 해석을 통하여 응력집중계수(SCF)를 분석하였다.

(1) 형상계수에 따른 응력집중계수 분석

- ① 형상계수 ($\zeta, \tau, \gamma, \theta$)가 클수록 SCF 증가
- ② Chord와 Brace의 두께 차이를 적게 하는 것이 피로강도 향상에 유리(τ 의 영향)
- ③ Brace 중립축이 Chord의 중립축 상에서 일치하는 것이 피로강도 향상에 유리(γ 의 영향)
- ④ Chord와 Brace의 직경 차이가 작을수록 피로강도 향상에 유리(β 의 영향)

(2) 3차원적으로 복잡한 연결구조를 가지는 자켓구조물에서 Brace의 중립축이 한점에 연결될 경우 변동응력의 폭이 줄어들므로 편심 e에 직접적인 영향을 미치는 θ 와 ζ 의 형상 계수를 적절하게 조절하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

(3) Brace 중립축 편심의 영향을 고려한 상세해석 결과, 연결 격점부의 중립축을 일치시켜 편심의 영향을 줄이는 것이 피로강도 향상에 유리한 것으로 나타났다. 단, Brace 이음부 간격이 설

계기준 이하로 설계되지 않도록 하는 것이 중요하다.

(4) 작용하중 방향에 따른 자켓구조물의 응력분포를 분석한 결과, KT형 이음부와 N형 이음부가 모두 인장이 발생하는 조건에서 Saddle과 Crown부에서 최대응력이 발생하였다. 따라서 연결 격점부의 피로강도 개선을 위해서는 인장력이 발생하는 부재 Saddle부와 Crown부의 응력집중을 낮출 수 있는 방안이 검토될 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌(References)

[1] 안관수, 최병정, 오영석, 김재운(2010) 고강도 원형강관 겹K형 접합의 사용성 해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제2호, pp.109-119.
Ahn, K.S., Choi, B.J., Oh, Y.S., and Kim, J.W. (2010) An Availability Analysis on the Gap K-Joints Using High Strength Circular Hollow Section Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No. 2, pp.109-119 (in Korean).

[2] 이성주, 김주우, 김상섭, 이명재, 양재근(2011) 반복하중을 받는 고강도 원형강관의 T형 접합의 면내 휨모멘트 내력, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.169-177.
Lee, S.J., Kim, J.W., Kim, S.S., Lee, M.J., and Yang, J.G. (2011) In-Plane Bending Moment Capacity of T-Joints in the Circular Hollow Section of New High Strength Steel Subjected to Cyclic Loadings, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.2, pp.169-177 (in Korean).

[3] 이경구, 신용섭, 손은지(2015) 원형강관 X-이음 트러스접합부의 압축 주강관소성화 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제5호, pp.447-454.
Lee, K., Sin, Y.S., and Son, E.J. (2015) Evaluation of Compressive Chord Plastification of Circular Hollow Section X-Joint Truss Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.447-454 (in Korean).

[4] 이철호, 김선후, 정동현, 김대경, 김진원(2017) 지관 압축을 받는 고강도강 X형 원형강관접합부의 구조적 성능에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제4호, pp.291-301.
Lee, C.H., Kim, S.H., Chung, D.H., Kim, D.K., and Kim, J.W. (2017) Experimental Study of High-Strength Steel

- CHS X-Joints Under Axial Compression, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No. 4, pp.291-301 (in Korean).
- [5] Efthymiou, M. (1988) Development of SCF Formulae and Generalised Influence Functions for Use in Fatigue Analysis, *Proceedings of Offshore Tubular Joints Conference on Recent Developments in Tubular Joints Technology*, UEG Offshore Research, UK, pp.1-13.
- [6] Smedley, P., and Fisher, P. (1990) A Review of Stress Concentration Factors for Tubular Complex Joints, *Integrity of Offshore Structures - 4 (Papers Presented at the Fourth International Symposium on Integrity of Offshore Structures)*, University of Glasgow, UK, pp.279-295.
- [7] Hansen, K. (1996) *Single Side Welded Tubular Joints: A Study of the Stress Concentrations at the Weld Root*, Master's Thesis, Høgskolen I Stavanger, Norway.
- [8] Lee, M.M.K. (1999) Estimation of Stress Concentrations in Single-Sided Welds in Offshore Tubular Joints, *International Journal of Fatigue*, Elsevier, Vol.21, No.9, pp. 895-908.
- [9] Huther, M., and Henry, J. (1991) *Recommendations for Hot Spot Stress Definition in Welded Joints (IIW Doc. XIII-1416-91)*, International Institute of Welding, France.
- [10] Health and Safety Executive (1997) *Stress Concentrations Factors for Simple Tubular Joints*, Offshore Technology Report 354, Health and Safety Executive, UK.
- [11] Hobbacher, A. (1996) *Fatigue Design of Welded Joints and Components: Recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV*, Abington Publishing, UK.
- [12] ESDEP Society (n.d.) *European Steel Design Education Programme: Tubular Joints in Offshore Structures (ESDEP WG 15A.7)*, Steel Construction Institute, UK.

요 약 : 고정식 자켓 구조물은 공용기간 동안 풍력 및 파력 등과 같은 랜덤한 하중을 받게 되므로 피로현상이 발생한다. 본 연구에서는 용접이음이 집중되는 격점부의 응력집중계수를 분석하여 설계시 피로응력이 저감될 수 있는 기하형상 조건을 제안하고자 한다. IIW에서 제안하고 있는 핫스팟응력 산출식을 통하여 계산한 응력집중계수와 기존 제안식을 비교하였다. 그 결과, Efthymiou 제안식이 유사한 거동을 나타냈으며, 형상계수(ζ , τ , γ , θ)가 클수록 응력집중계수가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고, 공용중인 Jacket 구조물에 대하여 응력집중계수를 산정한 결과, 격점부 기하형상, 격점부 중립축 연결여부와 부재의 하중 적용방향이 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 응력집중계수, 핫스팟응력, 기하형상조건, 자켓구조물 격점부, K-Joint
