

해양레저용 요트의 마스트 리그 형상에 따른 응력집중계수 추정

노지선* · 오동진* · 김명현*·†

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

An Estimation of the Stress Concentration Factor for Mast Lug of Yacht with Different Shapes

Ji-Sun Roh*, Dong-Jin Oh* and Myung-Hyun Kim*·†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received December 5, 2011 ; Revised December 23, 2011 ; Accepted February 29, 2012)

Abstract

Recently, according to the increase of income and development of quality of life, the leisure industry has been developed. In particular, the interest of design and manufacture technology of leisure yacht has significantly increased. However, domestic market of leisure ships is currently in its initiating stage. So research and development for structural strength of leisure yacht need to be investigated.

In this study, lug of yacht's mast which is known for a critical damage region is explicitly considered. This paper deals with the estimation of stress concentration factors (SCFs) for lug of yacht's mast depending on dimensions of lug using hot spot stress. Also, SCF formulae is suggested using parametric study.

Key Words : Yacht, Mast, Lug, finite element analysis, Hot spot stress, Stress concentration factor (SCF), Parametric study, SCF formulae

1. 서 론

최근 국민생활의 질적 향상과 소득증가에 따라 해양 레저가 활성화 되었다. 따라서 해양레저의 꽃인 요트(yacht)에 대한 설계 및 생산 기술개발에 관심이 증가하고 있다. 하지만 국내 레저선박 시장은 아직 걸음마 단계로서 레저선박의 연구개발이 거의 도외시되고 있으며 레저 산업과 관련된 기술 수준도 선진국에 비하여 매우 낙후되어 있는 실정이다. 또한, 구조안전성에 관한 규정 및 적용 기준이 명확히 정립되어 있지 않고 기술개발의 실적이 없어 여러 가지 강도적인 측면에 대한 검토가 필요하다¹⁾.

요트와 같은 소형 선박에서 가장 문제시 되는 것은 국부강도의 평가이다. 특히, 요트 사고의 경우, Fig. 1과 같이 마스트(mast) 및 마스트의 선체 연결부, 마스트를 지지하는 각종 리깅(rigging)의 국부 손상에 의해 인명 및 경제적 손실 등의 다양한 사고가 발생하여 이

에 따른 대책마련이 시급하다.

이전에 수행되어진 연구에서 바람이 불어오는 방향과 마스트에 부착되어있는 세일이 이루는 각도에 따른 항행 조건에 따라서 마스트의 구조 안전성 평가를 수행하였다. 특히 세일과 바람의 각도가 직각을 이루는 경우 마스트에 부착된 리그(lug)에서 큰 응력이 분포하는 것을 확인 할 수 있었다²⁾.

본 연구에서는 해양레저 요트의 마스트 리그 형상에



Fig. 1 The failure of mast

다른 유한요소해석을 통해 응력집중계수를 산정하고 기하학적 파라미터(geometrical parameters)의 영향을 검토한 다음 파라메트릭 스터디(parametric study)를 수행하여 마스트의 리그에 대한 응력집중계수 추정 식(SCF formulae)을 제안하였다.

2. 핫스팟 응력(Hot Spot Stress, HSS)

용접 구조물의 피로 파괴는 응력이 집중되는 용접부에서 주로 발생한다. 이때, 응력집중부에서의 응력은 비선형적으로 급격히 증가하기 때문에 정확한 응력을 추정하기란 사실상 불가능하다. 따라서 응력집중부로부터 일정한 간격으로 떨어진 부분에서의 응력을 선형 외삽(linear extrapolation)하여 계산된 핫 스팟 응력을 적용하여 이를 바탕으로 작성된 피로수명곡선을 통해 실제 피로시험을 실시하지 않고 피로 수명을 추정할 수 있다. 이러한 핫 스팟 응력을 바탕으로 한 방법은 피로 해석을 수행할 경우, 통상적으로 이용되고 있다. 본 연구에서는 Niemi의 식 (1)을 이용하여 핫 스팟 응력을 구하였다³⁾.

$$\sigma_{HSS} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \quad (1)$$

(여기서, $\sigma_{0.5t}$ 는 부재두께 0.5t에서의 응력이며 $\sigma_{1.5t}$ 는 부재두께 1.5t에서의 응력)

응력집중이 발생하는 용접끝단부에서의 최대응력 σ_{peak} 는 다음 식 (2)와 같이 응력집중계수(Stress Concentration Factor, SCF)와 공칭응력 σ_{nom} 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{HSS} = SCF \times \sigma_{nom} \quad (2)$$

3. 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)

3.1 유한요소모델

유한요소해석에 수행된 요트 마스트 리그의 실제형상 및 주요치수는 Fig. 2 및 Table 1에 각각 나타내었다. 또한, 마스트와 리그에 사용된 재료는 Aluminum 6061이며 물성치는 다음의 Table 2와 같다⁴⁾.

리그의 유한요소해석을 수행하기 위하여 상용프로그램인 MSC. Patran/Nastran을 사용하였으며 모델을 4절점 쉘(shell)요소로 모델링하였다. 사용된 요소의 수와 절점의 수는 각각 20,084, 34,351개이고 핫 스팟 응력 기법을 적용하기 위하여 마스트의 두께와 동일한 4×4mm로 모델링 하였다.

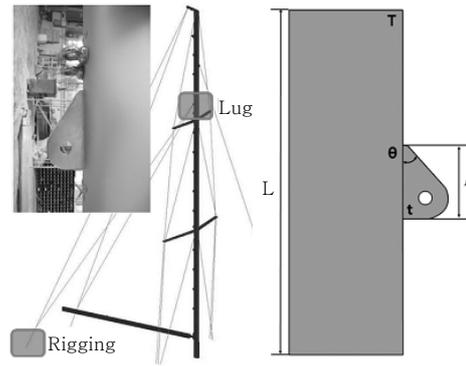


Fig. 2 Real dimension and model

Table 1 Dimension of model

Mast		Lug	
Thickness	4mm	Thickness	12mm
Length	600mm	Length	128mm
Area	2107mm ²	Degree	38°

Table 2 Mechanical properties of Al 6061

Yield strength	145MPa
Tensile strength	241MPa
Modulus of elasticity	68.9GPa
Poisson's ratio	0.33

3.2 하중 및 경계조건

실제 마스트의 거동을 고려하여 경계조건을 적용하였다. 다음 Fig. 3와 같이 마스트에 부착된 리그는 길이 방향으로 굽힘 하중을 받을 뿐만 아니라 리깅(rigging)에 의해 고정되어진다. 따라서 리그와 리깅의 연결부인 구멍(hole)의 도심 위치에 2절점 보(beam) 요소인 RBE2 요소를 적용하여 모든 자유도에 대하여 완전구속을 적용하였으며 다음의 Table 3에 나타내었다.

또한, 마스트에 부착된 돛(sail)에 풍압이 작용하면,

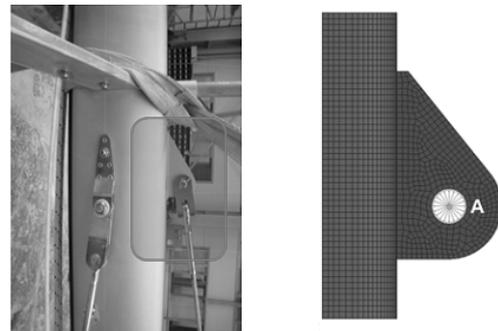


Fig. 3 Real behavior and boundary condition for hole of lug

Table 3 Boundary condition for hole of lug

Location	Displacement (0=fix)					
	D _x	D _y	D _z	R _x	R _y	R _z
Point A	0	0	0	0	0	0

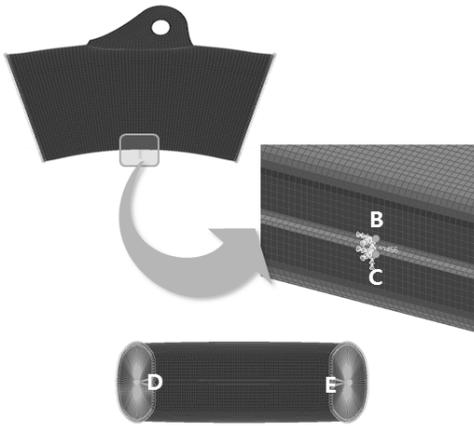


Fig. 4 Boundary condition for bending

Table 4 Boundary condition for bending

Location	Displacement (0=fix)					
	D _x	D _y	D _z	R _x	R _y	R _z
Point B	0	0	0	0	0	0
Point C	0	0	0	0	0	0
Point D	0	0	0	0	0	0
Point E	0	0	0	0	0	0

Table 5 Boundary condition for bending moment

Location	Moment [N·mm]		
	M _x	M _y	M _z
Point D	0	+	0
Point E	0	-	0

마스트가 굽어지는데 이와 같이 굽힘 하중을 적용하기 위하여 다음의 Fig. 4과 같이 마스트 단면의 도심 위치에 2절점 보(beam) 요소인 RBE2 요소를 적용하여 모멘트가 발생하도록 설정하였다.

다음 Table 4, 5는 각 자유도에 대하여 완전 구속인 경계조건 및 적용 모멘트의 부호를 나타낸 것이다.

3.3 핫 스팟 응력 및 응력집중계수 계산

유한요소해석 결과, 러그와 마스트의 연결부에서 최대응력이 분포하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에서

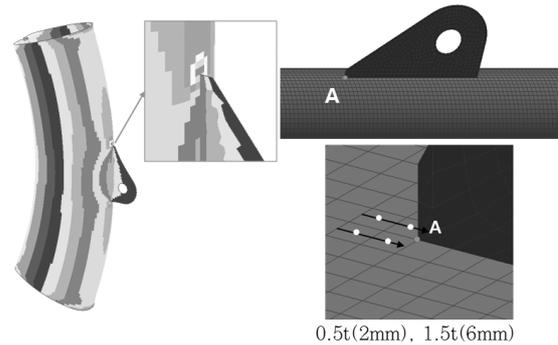


Fig. 5 Hot spot stress

응력집중부를 확인할 수 있다. 각각 두께의 0.5t, 1.5t 지점인 2, 6mm의 응력을 식 (1)을 이용하여 선형적으로 외삽하여 핫 스팟 응력을 계산하였고, 식 (2)를 이용하여 응력집중계수를 계산하였다.

이 때, 응력집중계수를 구하기 위해서는 공칭응력도 계산되어야 하는데, 본 연구에서는 공칭응력을 Fig. 5에서 응력집중부로부터 멀리 떨어져 응력의 값이 일정해 지는 부분의 값으로 약 48.2MPa를 사용하였다.

3.4 기하학적 파라미터 및 유효범위 설정

마스트 및 러그 형상의 변화에 따른 응력집중계수를 추정하기 위하여 다음 Fig. 6의 각종 치수들을 사용하여 무차원화한 기하학적 파라미터를 설정하였다. 부착된 러그의 길이($\alpha(= \frac{l}{L})$)와 마스트의 단면형상($\beta(= \frac{a}{b})$), 부착된 러그의 각도($\gamma(= \frac{\theta}{\pi})$)와 두께($\tau(= \frac{t}{T})$)의 영향을 확인하기 위하여 다음과 같은 유효범위 내에서 파라미터를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

$$SCF = f(\alpha, \beta, \gamma, \tau) = f\left(\frac{l}{L}, \frac{a}{b}, \frac{\theta}{\pi}, \frac{t}{T}\right) \quad (3)$$

유효범위는 일반적으로 해양레저용 요트에 사용되는

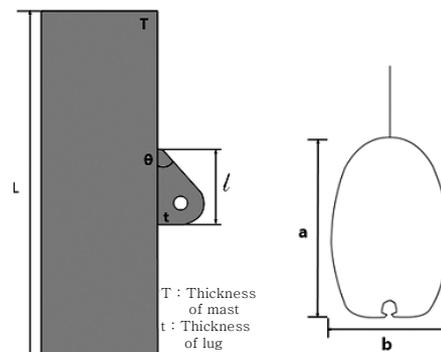


Fig. 6 Geometrical parameters

Table 6 Range of parameters

Parameter	Range
$\alpha(= \frac{l}{L})$	$0.36 \leq \alpha \leq 0.48$
$\beta(= \frac{a}{b})$	$0.75 \leq \beta \leq 3.0$
$\gamma(= \frac{\theta}{\pi})$	$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
$\tau(= \frac{t}{T})$	$1.5 \leq \tau \leq 5.0$

다양한 마스트 및 리그의 형상을 바탕으로 설정하였는데, 다음 Table 6과 같다.

3.5 파라미터의 영향 검토

마스트 리그의 형상에 따른 기하학적 파라미터들이 응력집중계수에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

1) $\alpha(= \frac{l}{L})$ 의 영향

Table 7의 No. 1~10은 나머지 변수를 고정해 놓고 α 의 값만 변화 시켰기 때문에 SCF와 α 의 경향을 찾을 수 있다. 이 경우, Table 8의 No. 1~10과 같이 SCF는 α 의 값이 증가함에 따라 증가한다. 이것은 유효범위 내에서 상대적으로 마스트보다 리그의 크기가

작을수록 효과적인 피로설계라는 것을 의미한다.

2) $\beta(= \frac{a}{b})$ 의 영향

Table 7의 No. 11~19는 나머지 변수를 고정해 놓고 β 의 값만 변화 시켰기 때문에 SCF와 β 의 경향을 찾을 수 있다. β 의 값이 증가하면 마스트 단면의 세로(a)와 가로(b)의 길이의 비가 커지므로 단면이 형상이 직사각형에 가까워진다. 이 경우, Table 8의 No. 11~19와 같이 SCF는 β 의 값이 증가함에 따라 증가한다. 이것은 β 의 값이 작을수록 즉, 마스트의 단면형상이 완만해질수록 효과적인 피로설계라는 것을 의미한다.

3) $\gamma(= \frac{\theta}{\pi})$ 의 영향

Table 7의 No. 20~31은 나머지 변수를 고정해 놓고 γ 의 값만 변화 시켰기 때문에 SCF와 γ 의 경향을 찾을 수 있다. 이 경우, Table 8의 No. 20~31과 같이 SCF는 γ 의 값이 증가함에 따라 감소한다. 이것은 리그의 SCF에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터이다. 따라서 유효범위 내에서 리그 각도의 감소는 피로강도 개선에 효과적이다.

4) $\tau(= \frac{t}{T})$ 의 영향

Table 7 Parameter sets

No.	α	β	γ	τ	No.	α	β	γ	τ
1	0.36	1.60	0.21	3.00	21	0.43	1.60	0.19	3.00
2	0.37	1.60	0.21	3.00	22	0.43	1.60	0.20	3.00
3	0.39	1.60	0.21	3.00	23	0.43	1.60	0.21	3.00
4	0.40	1.60	0.21	3.00	24	0.43	1.60	0.22	3.00
5	0.41	1.60	0.21	3.00	25	0.43	1.60	0.25	3.00
6	0.43	1.60	0.21	3.00	26	0.43	1.60	0.33	3.00
7	0.44	1.60	0.21	3.00	27	0.43	1.60	0.35	3.00
8	0.45	1.60	0.21	3.00	28	0.43	1.60	0.36	3.00
9	0.47	1.60	0.21	3.00	29	0.43	1.60	0.39	3.00
10	0.48	1.60	0.21	3.00	30	0.43	1.60	0.42	3.00
11	0.43	0.75	0.21	3.00	31	0.43	1.60	0.50	3.00
12	0.43	0.82	0.21	3.00	32	0.43	1.60	0.21	1.50
13	0.43	0.90	0.21	3.00	33	0.43	1.60	0.21	1.75
14	0.43	1.00	0.21	3.00	34	0.43	1.60	0.21	2.00
15	0.43	1.13	0.21	3.00	35	0.43	1.60	0.21	2.50
16	0.43	1.50	0.21	3.00	36	0.43	1.60	0.21	3.00
17	0.43	1.60	0.21	3.00	37	0.43	1.60	0.21	3.50
18	0.43	2.00	0.21	3.00	38	0.43	1.60	0.21	4.00
19	0.43	3.00	0.21	3.00	39	0.43	1.60	0.21	4.50
20	0.43	0.75	0.17	3.00	40	0.43	1.60	0.21	5.00

Table 7의 No. 32~40은 나머지 변수를 고정해 놓고 τ 의 값만 변화 시켰기 때문에 SCF와 τ 의 경향을 찾을 수 있다. 이 경우, Table 8의 No. 32~40과 같이 SCF는 τ 의 값이 증가함에 따라 증가한다. 이것은 리그의 길이 영향과 같이 유효범위 내에서 상대적으로 마스트보다 리그의 크기가 작을수록 효과적인 피로설계라는 것을 의미한다.

전체적으로 마스트의 치수가 리그의 치수보다 상대적으로 클수록 응력집중계수가 감소하는 경향을 보인다.

4. 파라메트릭 스터디(Parametric Study)

4.1 SCF 추정 식(SCF Formulae) 유도

다음의 절차를 따라 마스트 리그에 대한 SCF 추정 식을 유도하였다⁵⁾.

$$SCF_{LUG} = c \left(\frac{l}{L}\right)^{m_1} \left(\frac{a}{b}\right)^{m_2} \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{m_3} \left(\frac{t}{T}\right)^{m_4}$$

1) $\log(SCF)$ 와 $\log(\frac{l}{L})$ 의 그래프 기울기를 이용하여 m_1 을 찾는다.

2) $\log(\frac{SCF}{(\frac{l}{L})^{m_1}})$ 와 $\log(\frac{a}{b})$ 의 그래프 기울기를 이용

하여 m_2 을 찾는다.

3) $\log(\frac{SCF}{(\frac{l}{L})^{m_1}(\frac{a}{b})^{m_2}})$ 와 $\log(\frac{\theta}{\pi})$ 의 그래프 기울기를

이용하여 m_3 을 찾는다.

4) $\log(\frac{SCF}{(\frac{l}{L})^{m_1}(\frac{a}{b})^{m_2}(\frac{\theta}{\pi})^{m_3}})$ 와 $\log(\frac{t}{T})$ 의 그래프 기

울기를 이용하여 m_4 를 찾는다. 또한, 위의 그래프의 y 절편을 이용하여 상수 c를 찾는다.

4.2 SCF 추정 식

다음 식 (4)는 해양레저용 요트 마스트의 리그에 대한 응력집중계수 추정을 위해 제안된 식이다.

$$SCF_{LUG} = 3.10384 \left(\frac{l}{L}\right)^{0.08943} \left(\frac{a}{b}\right)^{0.12774} \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{-0.00558} \left(\frac{t}{T}\right)^{-0.01370} \quad (4)$$

유한요소해석을 이용하여 계산되어진 응력집중계수 값과 파라메트릭 스터디를 통해 제안되어진 응력집중계수 추정 식을 통해 얻어진 응력집중계수 값을 비교해 보았다⁶⁾. Table 8 및 Fig. 7와 같이 최대 오차 약 14.67% 이내에서 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 8 Errors of reproduced SCFs

No.	SCF _{FEM}	SCF _{LUG}	Error[%]	No.	SCF _{FEM}	SCF _{LUG}	Error[%]
1	2.61	2.82	2.24	21	2.98	2.89	2.98
2	2.68	2.84	0.21	22	2.92	2.89	1.17
3	2.71	2.85	1.84	23	2.87	2.89	0.70
4	2.76	2.86	3.64	24	2.86	2.88	0.71
5	2.81	2.87	2.72	25	2.81	2.88	2.57
6	2.87	2.88	1.52	26	2.78	2.88	3.40
7	2.92	2.90	0.71	27	2.70	2.88	6.56
8	2.97	2.91	1.60	28	2.67	2.88	7.73
9	3.05	2.92	3.18	29	2.64	2.88	8.83
10	3.07	2.93	8.33	30	2.64	2.87	8.70
11	2.64	2.70	5.64	31	2.58	2.87	11.12
12	2.71	2.72	4.98	32	2.56	2.87	1.66
13	2.79	2.74	3.58	33	2.64	2.87	3.05
14	2.87	2.77	2.21	34	2.72	2.87	6.71
15	2.87	2.80	0.69	35	2.82	2.88	0.74
16	2.91	2.87	0.68	36	2.87	2.89	1.68
17	2.87	2.89	2.04	37	2.91	2.89	12.28
18	2.90	2.94	4.28	38	2.93	2.90	8.86
19	2.96	3.05	4.65	39	2.96	2.91	3.73
20	3.39	2.89	14.67	40	2.98	2.91	3.09

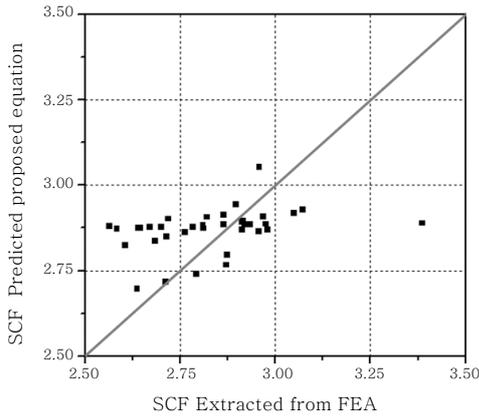


Fig. 7 Comparison with FE results

5. 결 론

본 연구에서는 해양레저용 요트의 마스트 리그 형상에 따라서 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 파라메트릭 스타디를 수행하여 리그의 응력집중계수 추정 식을 제안하였다.

1) 마스트 및 리그의 형상에 따른 영향을 검토하였고 상대적으로 리그의 길이와 두께가 작은 부재를 선택하는 것이 피로 강도 개선에 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.

2) 제안된 응력집중계수 추정 식이 파라미터의 유효범위 내에서 유한요소해석 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 유효범위 내에서 마스트 및 리그의 치수가 결정되면 추정식을 통해 응력집중계수가 계산 되고, 핫 스팟 응력의 계산이 가능하다. 따라서 피로 안전 알람의 기준을 핫 스팟 응력 기준으로 하였을 경우, 더 보수적인 설계를 할 수 있다.

향후 요트 마스트의 구조 모니터링 시스템 개발을 위한 안전성 평가 기준 산정을 위한 자료로 활용될 계획이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. Sang-Hyun Ji, Ji-Sun Roh, Sung-Won Kang, Hyen-Woo Kim, Myung-Hyun Kim : Structural Safety Evaluation of 40 Feet Sailing Yacht by Computational Structure Analysis, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **47**(2010)
2. Sang-Hyun Ji : A Study on Structural Safety Evaluation of 40 Feet Sailing Yacht by Computational Structure Analysis, Pusan National University, 2010
3. Niemi, E : Structural Hot Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's Curve, IIW Documents XIII-1919-00/XV-1090-01
4. Stephen F. Pollard : Boatbuilding with Aluminum, The McGraw-Hill Companies, 181-183(2007)
5. Ai-Kah Soh, Chee-Kiong Soh : SCF Equation for DT/X Square-to-Round Tubular Joints, Journal of Constructional Steel Research, **19** (1991), 81-95
6. Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin, Hamid Ahmadi : Geometric stress distribution along the weld toe of the outer brace in two-planar tubular DKT-joints: Parametric study and deriving the SCF design equations, Journal of Marine Structures, **24** (2011), 239-260