

소형 요트의 기본 구조 설계 및 구조 해석 기법에 대한 연구

신종계*, 이재열**, 이장현†***, 반석호****, 이상홍*****, 유재훈****

서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소*

(주)지노스**

인하대학교 기계공학부***

한국해양연구원 해양시스템안전연구소****

(주)어드밴스드마린테크*****

A Study on the Structural Design and Structural Analysis for Small Yacht

Jong Gye Shin*, Jae Yeol Lee**, Jang Hyun Lee†***,
Suak Ho Van****, Sang Hong Lee***** and Jaehoon Yoo****

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University*
XINNOS Co., Ltd.**

School of Mechanical Engineering, Inha University***
Korea Ocean Research & Development Institute****
AMTEC Co., Ltd.*****

Abstract

The scantling and structural design work is done during the initial stage in yacht design. This paper studies a procedure of the structural design for yacht with an illustrative design. Scantling of structural members and loads are defined based on the rules suggested by ISO(International Standard Organization) and ABS(American Bureau of Shipping). Also, FEA(Finite Element Analysis) model is presented for a practical guide for structural analysis. An equivalent structural element is used to simplify the composite material for the analysis.

※Keywords: Scantling(부재치수계산), Yacht design(요트 설계), FEA(유한요소해석)

접수일: 2005년 2월 11일, 승인일: 2005년 3월 4일

+ 주저자, E-mail: jh_lee@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7345

1. 서론

최근 해양 레저 문화의 확산에 따라 요트와 같은 레저 선박의 설계 기술이 요구되고 있다. 현재

까지 요트 설계 및 생산을 위한 국내 기술 개발은 해양 레저 선진국에 비해 활발하지 않았으나, 최근에 독자적인 요트 설계 기술과 설계 기준 및 기법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 해양레저 선박으로서 소형 요트의 기본 구조 설계 및 구조 해석을 위한 기법을 제시하고자 한다.

장창두와 김호경(1998)의 연구에서 복합재료를 이용한 쌍동형 곡선의 최적 설계 방안을 제시하였으며, 천승현 등(1999)이 경주용 선박의 안정성 해석을 수행하였다. 그러나 요트와 같이 길이 50미터 이하, 길이와 폭 비가 12보다 작은 복합재료 형 소형 고속 선박의 강도 해석에 대한 규정이나 방법론은 아직까지 선급 등에서 공식적으로 제안되어 있지는 않고 있다(Ojeda et al. 2004). 따라서 본 연구는 Larsson and Eliasson(2000)이 YD40 요트 설계에 적용하였던 방법을 기본으로, ISO의 비공식 요트 설계 룰(rule)과 ABS(1994)의 룰을 혼합하여 요트 구조 설계 절차를 예와 함께 제시하였다.

요트의 판넬(panel) 및 보강재의 설계 하중, 치수와 두께를 정하는 절차를 설명하였다. 룰 설계는 각각의 판넬을 독립적으로 간주하여 강도를 규정하므로 타 부재와 기하학적인 연관 관계에 의한 강도 평가의 정확성은 떨어질 수 있다. 따라서 유한요소해석에 의한 응력 계산을 통해서 요트 구조 설계 결과를 검증하고 강도 평가를 수행한 예를 보였다. 본 연구에서 사용한 요트 선형은 유재훈 등(2005)이 제시한 정보를 이용하였으며, 유한요소해석에는 ANSYS™를 사용하였다.

2. 요트 구조 재료 검토

요트는 경주와 유람을 목적으로 설계하기 때문에 중량을 경량화 시키는 것이 중요하다. FRP(Fiber Reinforced Plastic)는 불포화 폴리에스테르 수지와 유리섬유로 이루어진 복합재료로서 내식, 내열, 내구성과 성형성이 우수하다. 일반적으로 FRP 재료 사이에 코어(Core)가 있고 양면에 FRP를 덧붙여 만든 샌드위치 재료로 제작한다. 본 연구에서는 코어(Core)를 가진 샌드위치 형 FRP 재료를 요트 구조 재료로 가정하였다.

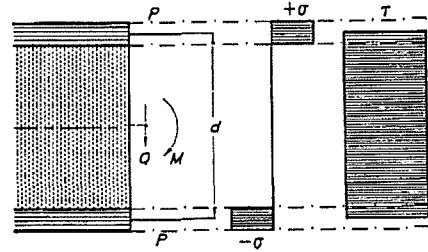


Fig. 1 Stresses distribution in a sandwich beam

2.1 재료 강도 계산

Fig. 1은 일반적인 샌드위치 구조의 단면적을 보여주고 있다. 샌드위치 재료의 강도는 다음의 식(1)~(4)와 같이 평가할 수 있다.

E_c, E_f, t_c, t_f 는 각각 core 및 face재의 탄성 계수와 두께를 의미하며, b 는 보(beam)의 폭을 의미한다. P, Q 는 각각 인장력과 전단력이며, σ, τ 는 각각 인장응력, 전단응력이다.

$$I_b = 2 \cdot b \cdot t_f \cdot \left(\frac{t_c + t_f}{2} \right)^2 = b \cdot t_f \cdot \frac{d^2}{2} \quad (1)$$

$$A_f = b \cdot t_f \quad M = P \cdot d \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{M \cdot (d/2)}{A_f \cdot d^2/2} = \frac{P}{A_f} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{Q}{b \cdot d} \quad (4)$$

일반적으로 $E_c \ll E_f, t_f \ll t_c$ 이므로 샌드위치 재료의 굽힘이나 인장, 압축 강도 계산에는 FRP만을 고려하여 $\sigma_f = P/A$ 로 가정하고, 전단 강도의 경우에는 core의 두께를 포함한 전체 단면적을 고려하여 $\tau_c = Q/(b \cdot d)$ 로 가정하더라도 오차는 2~3% 이내로 보아도 된다. 본 연구에서는 샌드위치 복합 재료 특성 값을 등방성 재료의 등가 값으로 변환함으로써 구조 해석 절차를 간략화 하였다. 요트 판넬에 발생하는 응력은 hull girder bending moment 뿐만 아니라 마스트 장력에 의한 하중 등 여러 가지가 있다. 이러한 하중들의 대부분이 판넬 관점에서 볼 때, 판넬 단면에 굽힘 모멘트가 작용하여 응력을 발생함을 의미한다. 요

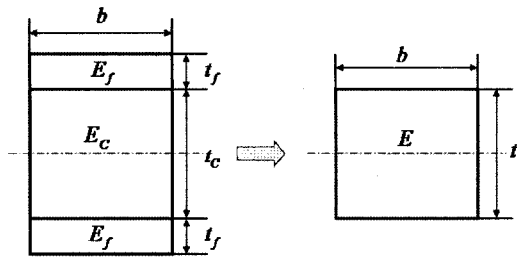


Fig. 2 Equivalent sectional shapes of sandwich FRP and homogeneous material

트의 길이가 짧고 격벽들이 존재하기 때문에 요트의 선체 길이 방향 비틀림 하중에 의한 응력은 작을 것이라고 가정하였다. 따라서 일반적으로 요트에 발생하는 응력은 대부분 굽힘 모멘트에 의해 발생한다고 가정하여 복합 재료를 등가 치수의 등방성 재료로 변경하여 구조해석을 수행하는 방법을 선택하였다(Fig. 2). 물론 FRP 재료 자체만을 고려했을 때는 압축이나 인장 응력만이 존재하나, 샌드위치 단면 전체를 보았을 경우에는 모멘트에 의한 것으로 볼 수 있다. 응력 굽힘 하중에 의해 발생하는 응력은 관성 모멘트와 단면적의 두께와 관련이 있으며, 변형 값은 탄성계수와 관성모멘트와 관련이 있다.

위 Fig. 2에 보인 두 재료의 단면 계수는 다음의 식(5), (6)에 보인 것과 같다.

샌드위치 복합재료 단면계수

$$\frac{I_b}{y} = \frac{b \cdot t_f \cdot (t_c + t_f)^2}{(t_c + 2t_f)} \quad (5)$$

단일 재료 단면 계수

$$\frac{I_b}{y} = \frac{b \cdot t^3}{12} = \frac{b \cdot t^2}{6} \quad (6)$$

다음 식(7)과 같이 굽힘력에 의해 발생하는 응력(σ)과 변형(δ)은 단면계수와 탄성계수의 함수이므로, 동일한 모멘트가 부가되었을 때 동일한 응력과 변형 값을 가지도록 하는 등가 두께와 탄성계수를 구하여야 한다.

$$\propto \frac{1}{I_b y}, \quad \propto \frac{1}{E I_b} \quad (7)$$

즉, 샌드위치 재료와 같은 응력, 변형 값이 발생하도록 가상의 단일 재료의 두께 및 탄성 계수를 변환하면 아래의 식 (8)과 식 (10)로부터 식 (9), 식(11)의 등가 두께 및 등가 탄성 계수를 구할 수 있다.

$$\frac{b \cdot t^2}{6} = \frac{b \cdot t_f \cdot (t_c + t_f)^2}{(t_c + 2t_f)} \quad (8)$$

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot t_f \cdot (t_c + t_f)^2}{(t_c + 2t_f)}} \quad (9)$$

$$E_f \cdot 2 \cdot b \cdot t_f \cdot \left(\frac{t_c + t_f}{2}\right)^2 = E \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (10)$$

$$E = \frac{(t_c + 2t_f)}{t} E_f \quad (11)$$

샌드위치의 재료는 위의 식에서 계산한 탄성계수와 두께를 갖는 단일 등방성 재료로 치환하여 해석에 사용할 수 있다고 가정하였다. 그러나 등가 치환방법은 단면에 굽힘 모멘트를 발생시키는 하중에 대해서만 적용되는 식이므로 좌굴에 대한 평가에는 적절하지 않은 단점을 가지고 있다.

3. 주요 하중 조건

요트 설계에 대한 선급이나 규정으로 정립된 예는 찾기 어려우며, 여러 선급에서 소형 선박에 대해 정하고 있는 규칙들을 적용하여 설계하고 있다. ISO에서는 비공식적으로 권장하고 있는 규정이 있으며, 이를 표준화하기 위해 실제 요트 설계 및 제작에 적용하는 과정에 있다. 본 연구에서는 요트 설계를 위해 ISO 및 ABS에서 제시하는 룰을 혼용하였다. 본 절에서는 요트 구조 부재에 작용하는 설계 하중 조건에 대하여 정리하고자 한다.

3.1 구조 부재 용어 정의

아래 Fig. 3은 일반적인 요트의 모습이다 (Larsson and Eliasson 2000). Ballast keel을 제외한 선체 부분과 keel 부분을 따라 분리하여 계산을 하기 때문에 아래와 같이 구분된다. 일반적으로 흘수는 keel을 제외한 부분만을 말한다.

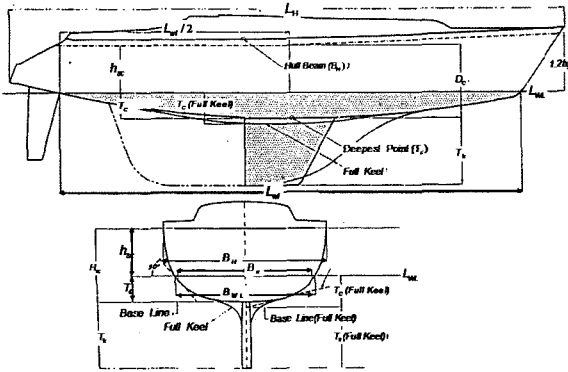


Fig. 3 Main dimension of yacht

여기서,

- L_H 요트 전체 길이 [m]
- L_{WL} 수선면상에서 요트 길이 [m]
- B_H 요트의 최대 폭 [m]
- B_C 경사각 50도의 접선이 만나는 거리 [m]
- T_C Ballast keel을 제외한 최대 흘수 [m]
- H_{TC} 기선으로부터 깊이 [m]
- T_k 선저에서 Ballast keel 끝단 깊이 [m]
- h_{sc} 측면 하중이 작용하는 최대 높이 [m]
- m 배수량 [kg]
- ∇ 배수용적 [m^3]
- v 요트의 속도 [knots]

3.2 길이 방향 유체 압력

Fig. 4는 ABS 룰에서 제시한 소형 선박 선저에 작용하는 동유체력 분포도이다(Larsson and Eliasson 2000). 이 하중은 slamming 을 고려하여 제시되었다. ISO가 비공식적으로 제시하는 유체 하중 분포도 위와 유사한 값을 가지고 있으나 판넬의 크기와 위치에 따라 정의되어 있기 때문에 전선 해석의 하중으로 사용하기는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 구조 부재 치수 설계는 ISO 비공식 룰을 이용하였으며, 하중 분포는 ABS 룰에서 언급한 값으로 가정하였다.

Fig. 4의 상단과 하단은 각각 요트와 모터보트 선저부의 유체 압력을 보인 것 이다.본 연구에서는 두 가지 압력 값 중 큰 값이 선저부에 길이 방향으로 작용하는 압력으로 가정하였다.

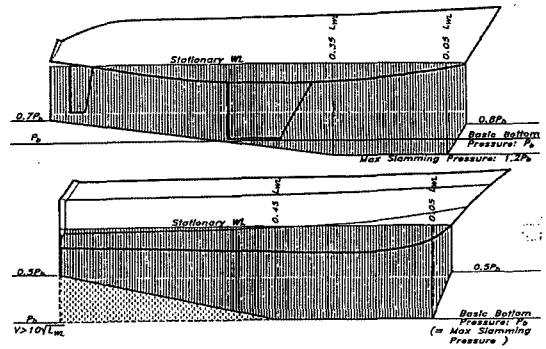


Fig. 4 Longitudinal hydrodynamic loads(ABS)

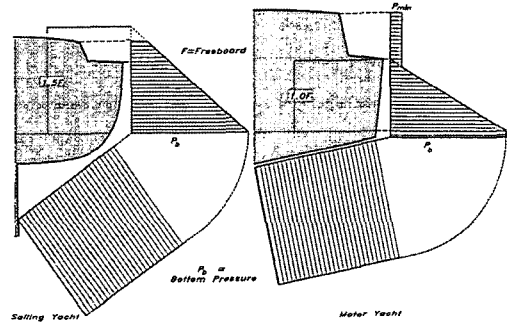


Fig. 5 Side pressure distribution

3.3 횡 압력

수선 면 위 부분에 작용하는 하중은 ABS 룰에서 언급하고 있는 분포를 적용하였다. 수선 면 위에서의 압력은 그 지점에서의 bottom pressure와 일치하며, 수선 면에서 건현까지 높이의 1.5배 지점에서 '0'이 되도록 분포하였다. 아래 Fig. 5는 bottom pressure는 길이 방향 임의의 지점에서 압력이 P_0 일 때 그 값을 기준으로 분포된 값을 보여주고 있다(Larsson and Eliasson 2000).

3.4 리그(Rig) 하중

요트는 heeling 상태로 운항할 때가 많다. 힐(heel)상태가 되었을 때 부력과 중력에 의해 우력이 발생한다. 이 짝힘의 크기를 M_1 이라고 하였을 때, 크기는 같고 방향이 반대인 또 다른 짝힘(M_2)이 존재한다(Fig. 6). 체인 플레이트(chain plate)

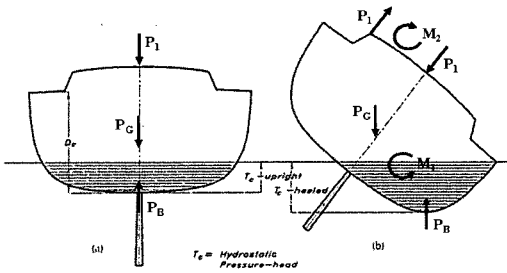


Fig. 6 Heeling moment and forces

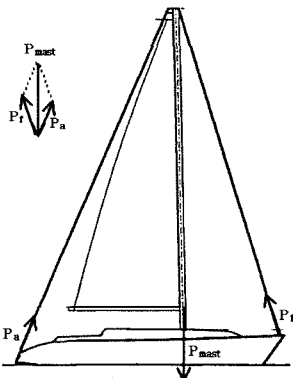


Fig. 7 Rig load distribution

와 마스트의 발생하는 장력이 만들어내는 짝힘 M_2 가 M_1 과 일치하면 힘의 평형을 유지할 수 있고 그 상태로 운항할 수 있다. 식 (12)과 (13)에 보인 바와 같이 이때 마스트 하중의 1.8배를 가정하여 설계항으로써 안전계수를 감안하였다.

요트가 30도 정도 heeling 되었을 때 발생하는 우력으로부터 마스트 설계하중을 계산할 수 있다.

$$M_1 = P_1 \times d \quad (12)$$

$$P_{mast} = 1.8 \times P_1 \quad (13)$$

$$\vec{P}_{mast} = \vec{P}_a + \vec{P}_f \quad (14)$$

M_1 Heeling moments

d 마스트 중심축과 chain plate 간의 거리

식 (13)와 식(14)를 이용하여 rig 하중 P_a, P_f 를 계산한다(Fig. 7).

3.5 Ballast keel 자중에 의한 하중

요트가 Fig. 8과 같이 수직으로 세워져 있는 경

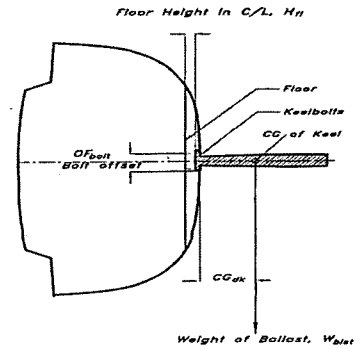


Fig. 8 Self weight of ballast keel

우 ballast keel 자중에 의해서 연결 부위에 파단이 발생할 수 있다. 그래서 ballast keel이 선체 바닥에서 분리되지 않도록 하기 위해 ballast keel과 수직하게 가로 M_f 지르는(요트 폭 방향) 보강재를 설치하는데 이를 floor라고 부른다. Ballast keel과 맞닿는 보강재의 개수가 중요하며 최소한 3개 이상 설계해야 한다.

Ballast keel 자중에 의해 발생하는 모멘트에 안전 계수 η_{kb} (4~6)를 곱하여 총 모멘트를 계산한다. 그리고 이 값에 floor 개수를 나눠 하나의 floor에 발생하는 모멘트 M_{fl} 은 아래의 식으로 계산할 수 있다. 여기서 계산된 M_{fl} 를 floor의 재료의 ultimate strength σ_{ud} 로 나누어 최소 요구 section modulus(SM_{fl})를 계산할 수 있다.

Transverse keel moment

$$M_{kt} = CG_{dk} \cdot W_{bst} \cdot g \quad (15)$$

Floor bending moment

$$M_{fl} = \frac{M_{kt} \cdot \eta_{kb}}{n_{fl}} \quad (16)$$

Required section modulus

$$SM_{fl} = \frac{M_{fl}}{\sigma_{ud}} \quad (17)$$

4. 구조 설계

ISO 12215-5에서 선체 길이 24m 이하의 요트

구조 부재 scantling에 비공식적으로 제시한 물을 이용하였다. 선체 구조 부재를 보강재, 격벽, 웨브 프레임(web frame) 등으로 구별하여 판넬의 크기를 결정하고 위치 관련 계수들을 계산하여 설계 하중을 계산하였다. 그리고 계산된 하중에 따라 각 판넬별로 최소 요구 관성모멘트와 단면 계수를 계산할 수 있었다. 샌드위치 구조에서 skin으로 구성된 FRP 두께는 ABS 룰에서 정리하고 있는 방법에 의해 계산하고 core의 두께는 최소 요구 값을 초과하도록 설계하였다.

Table 1 Material properties of FRP

Properties (N/mm ²)	CSM (spray)	CSM (hand)	WR	UDR
Tensile modulus	6200	6500	13900	23400
Compressive modulus	5200	6000	13200	18000
Flexural modulus	4820	5200	9900	14200
Shear modulus	2720	2750	3050	3250
Tensile strength	81	85	182	318
Compressive strength	114	117	144	162
Flexural strength	146	152	222	288
Shear strength	60	62	76	86

4.1 FRP 재료 특성값

본 연구에서는 ISO rule에서 제시하고 있는 FRP 재료의 재료 특성값을 이용하여 설계 하였으며 가장 강성이 약한 CSM(spray)을 기준으로 설계하였다. Table 1은 ISO에서 제시한 재료 특성값이다.

4.2 판넬 부재치수 계산

요트 선체를 구성하는 판넬은 각각 stiffener, girder, bulkhead, web frame 등으로 나누어 결정한다. 각 판넬의 긴 변의 길이를 'l', 짧은 변의 길이를 's', 곡률 깊이를 'A'라고 정의한다(Fig. 9).

판넬의 크기와 관련된 계수로는 f_k, k_1, k_2, k_3 가 있다. 이 값들은 판넬의 최소 요구 단면적 계수와 관성 모멘트 값을 계산하는데 이용된다.

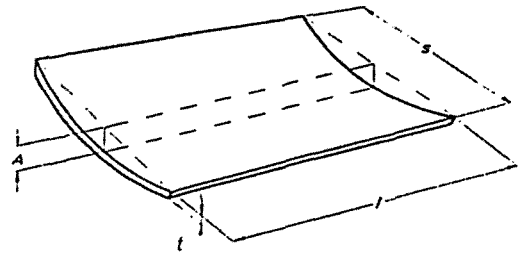


Fig. 9 Dimension of the panel

$$f_k = 1.1 - 3 \cdot A/s \quad (0.8 \leq f_k \leq 1.0) \quad (18)$$

$$k_1 = 0.167 \text{ (sandwich)} \quad (19)$$

$$k_2 = \frac{0.5}{1 + 0.623 \cdot (s/l)^6} \quad (k_2 \leq 0.5) \quad (20)$$

$$k_3 = \frac{0.028}{1 + 1.056 \cdot (s/l)^5} \quad (k_3 \leq 0.028) \quad (21)$$

Slamming 하중 때문에 deck 부 이외의 판넬과 보강재에 면적축소계수(Area Reduction Factor K_{ar})를 적용하여야 한다. K_{ar} 은 식(23)에 의하여 계산하며, K_{ar} 은 0.4 보다는 큰값으로 계산하였다.

$$w = 100 \cdot \frac{A_d}{0.36 \cdot A_g} \quad (22)$$

$$K_{ar} = \left[0.455 - 0.35 \left(\frac{u^{0.75} - 1.7}{u^{0.75} + 1.7} \right) \right] \times 1.35 \quad (23)$$

$$K_{ar} \geq 0.4 \text{ (sandwich)} \quad (24)$$

여기서, A_d 는 판넬과 보강재의 설계 면적이며, A_{WP} 는 수선 면적이다.

선체 길이 방향에 판넬에 작용하는 압력을 계산하기 위해서는 slamming에 의한 충격지수(impact factor: K_L)를 적용해야 한다. 수직 방향 충격지수 (K_V)도 함께 적용해야 한다. K_L 은 식(25)에 보였으며 값의 범위는 식(26)과 같다. K_V 의 값은 식(27)과 (28)에 정리하였다.

$$K_L = 0.13 \left[1.4 \left(10 - \frac{v}{\sqrt{L_{ut}}} \right) + \frac{0.706v}{\sqrt{L_{ut}}} + 0.64 \right] \quad (25)$$

$$0.13 \left[\left(0.35 \frac{v}{\sqrt{L_{ut}}} \right) + 4.14 \right] \leq K_L \leq 1.0 \quad (26)$$

$$K_V = \frac{h_{sc} - h}{h_{sc}} \quad (27)$$

$$h_{sc} = \frac{L_H}{12} \cdot f_{u2} \cdot \sqrt{\frac{m}{20 \cdot L_{ul}^{1.7} \cdot B_{ul}^{1.5}}} \quad [m] \quad (28)$$

여기서, v 는 선속(Knot)을 의미한다. 요트는 안정지수(Stability Index)에 따라 4개의 category로 나뉘며, 각 A, B category의 f_{u2} 는 1.0이며, C, D category는 각각 0.9, 0.8을 적용한다(Larsson and Eliasson 2000). 변수 x 는 전체 수선 면 길이를 '1'이라 하고 선미를 '0', 선수를 '1'이라고 할 때, 판넬 중심의 길이 방향 위치를 나타내는 값이다, 변수 h 는 수선 면에서 '0', h_{sc} 에서 '1' 된다. 이렇게 계산된 판넬의 수정 값들을 각 위치의 기본 압력에 곱하여 설계 하중을 계산한다.

4.3 선저 설계 압력

선저 설계 압력은 Fig. 4에 보인 분포를 사용한다. 식(29)과 (30)에서 보인 P_{b1} 은 motor craft에 적용되고, P_{b2} 는 sailing craft에 적용되는 식이나 둘 중에 큰 값을 사용한다. 첨자 basic으로 표현된 값에 판넬의 위치와 면적에 대한 수정 요소들을 곱하여 아래의 식을 통하여 선저 압력을 계산할 수 있다. n_{og} 는 dynamic load factor이며, 식(31)과 (32)에 의해 계산한다. f_{u1} 은 $1.1-0.4 \cdot s/100$ 로 계산하며 0.6 보다 작은 값을 선택한다. β 는 bottom dead rise 각도이며, $10^\circ \sim 30^\circ$ 사이 값이다. τ 는 running trim angle을 의미한다.

$$P_{bl_{bas}} = \frac{0.1m}{L_{ul} \cdot B_c} (1+n_{og}) \quad (29)$$

$$P_{bl_{bas}} = 11.76(3T_c + 0.16L_{ul} + 1.62)f_{u2} \quad (30)$$

$$n_{og} = 0.078 \left(\frac{f_{u1} \cdot L_{ul}}{10B_c} + 0.084(50-\beta) \frac{v^2 B_c^2}{m} \right) \tau \quad (31)$$

$$3 - \frac{L_h}{12} \leq n_{og} \leq 6.0 \quad (32)$$

$$P_b = \max(P_{bl_{bas}}, P_{bl_{bas}}) K_{ar} \cdot K_L [kN/m^2] \quad (33)$$

4.4 선측 설계 압력

선측 설계 압력(P_s)은 Fig. 5에 보인 형상이다. 압력이 작용하는 범위는 수선 면 윗부분에서 높이

h_{sc} 까지 측면 부분이다. 수선 면에서 크기는 선저 압력 값과 비슷하며, 위로 올라갈수록 선형적으로 감소된다. P_s 은 아래의 식(34)~(38)을 이용하여 결정한다. 여기서 f_L 은 $L_W/12$ 이지만, 0.5보다 크고 1보다는 작은 값으로 결정한다.

$$P_{sl_{bas}} = (f_{u2} \cdot (H_{TC} \cdot 10) + 0.2 \cdot P_{bl_{bas}}) \quad (34)$$

$$P_{sl_{bas}} \geq (0.278 \cdot L_{ul} + 4.33) \cdot f_{u2} \quad (35)$$

$$P_{sl_{bas}} = f_{u2} \cdot 10.57 \cdot (2T_c + 0.16L_{ul} + 1.62f_L) \quad (36)$$

$$P_{sl_{bas}} \geq 5 \cdot H_{TC} \cdot f_{u2} \quad (37)$$

$$P_s = \max(P_{sl_{bas}}, P_{sl_{bas}}) \cdot K_{ar} \cdot K_L \cdot K_V [kN/m^2] \quad (38)$$

4.5 데크 (Deck) 및 격벽 설계 압력

Deck의 설계 하중(P_d)은 판넬의 위치와는 관계 없이 짧은 변 길이에 대한 함수로 계산된다. Deck부의 판넬에는 특별히 보강재가 들어가지 않기 때문에 판넬이 각을 이루면서 구부러지는 부분을 경계면으로 계산한다. 식(39)와 (40)에 의해 계산한다.

식(42)은 수밀 격벽의 설계 하중(P_t)을 의미한다. 여기서 h_b 는 bulkhead의 전체 높이를 말한다.

$$P_d = f_{u2} \cdot f_1 \cdot (0.26L_{ul} + 4 \cdot L_{ul}/12) [kN/m^2] \quad (39)$$

$$P_d \geq 6 \cdot f_1 \cdot f_{u2} \quad (40)$$

$$f_1 = 1.1 - 0.4 \cdot s/100 \quad (f_1 \geq 0.6) \quad (41)$$

$$P_t = 7.20 \cdot (2/3 \cdot h_b) [kN/m^2] \quad (42)$$

4.6 샌드위치 판넬 부재치수 계산

앞 절에서 제시한 설계 하중이 판넬에 작용할 때, 허용 응력 (σ_a)은 ultimate stress의 1/2보다 작게 발생하도록 설계한다. 아래의 식(43)과 (44)은 허용응력을 만족하기 위해서 각 판넬에 요구되는 최소 단면 계수(SM)와 관성 모멘트(I)값이다. s 는 Fig. 9에 보인 값이며, P_r 은 4.3절, 4.4절과 4.5절에서 정의한 선체 판넬 별로 작용하는 압력 값을 의미한다.

요구되는 단면 계수

$$SM = \frac{s^2 \cdot f_k^2 \cdot P_r \cdot k_2}{6 \cdot 10^5 \cdot \sigma_a} \quad [cm^3] \quad (43)$$

요구되는 관성 모멘트

$$I = \frac{s^3 \cdot f_k^3 \cdot P_r \cdot k_3}{12 \cdot 10^6 \cdot (E_T + E_C) / 2 \cdot k_1} \quad [cm^4] \quad (44)$$

여기서,

E_T Tensile modulus of basic laminate

E_C Compressible modulus of basic laminate

샌드위치의 FRP 최소 두께는 ABS에서 언급하고 있는 룰을 따라 계산하였다. 아래 값은 bottom의 outer skin의 두께로서 최소 요구 값 중 가장 큰 값이다. 아래의 식(45)을 기준으로 FRP의 두께를 결정하였다. 샌드위치의 단위 폭 당 관성 모멘트와(I_{panel}) 단면 계수(SM_{panel})는 식(46)과 (47)에 보인 것과 같다. 이때 변수 t_f 는 FRP로 만들어진 face 한쪽 두께를 말하며, 변수 t_c 는 코어로 만들어진 중앙 부분 전체의 두께를 말한다. 두 식을 통하여 요구되는 관성모멘트와 단면적 계수보다 크도록 t_c 의 값을 계산할 수 있다.

$$t_f = 0.35 \cdot 1.1 \cdot (3.2 + 0.26 \cdot L_H) \quad [mm] \quad (45)$$

$$I_{panel} = \frac{t_f \cdot (t_c + t_f)^2}{2} \quad (46)$$

$$SM_{panel} = \frac{I_{panel}}{(t_c + 2 \cdot t_f) / 2} = \frac{t_f \cdot (t_c + t_f)^2}{(t_c + 2 \cdot t_f)} \quad (47)$$

샌드위치의 FRP 두께와 core의 두께는 구했으나, 인장이나 압축 응력에 대해서만 계산되었기 때문에 전단 응력에 대해서 검토가 필요하다. 전단 응력은 단면적이 가장 큰 코어 부분이 중요하다. 아래 τ_u 는 코어 재료에게 요구되는 ultimate shear stress 값이다.

$$\tau_u = \frac{2 \cdot \nu \cdot 0.001 \cdot P_r \cdot s}{(t_f + t_c)} \quad (48)$$

4.7 Stiffener scantling

보강재의 치수도 각 panel에 작용하는 설계 하중 및 크기와 밀접한 관계가 있다. 설계 하중과

panel의 크기에 대한 정보는 보강재와 연결되어 있는 panel들의 평균값으로 계산한다.

Ballast keel과 맞닿는 부분의 보강재(요트의 중앙부에서 횡 방향으로 설치한 보강재)는 keel 자중에 의한 모멘트가 추가로 가해지기 때문에 이 점을 고려해서 계산해야 한다. SM_k 는 keel 자중에 의해 추가로 요구되는 단면적 계수 값이다.

$$SM = \frac{C \cdot P_r \cdot s \cdot l^2}{\sigma_a} + SM_k \quad [cm^3] \quad (49)$$

$$SM_k = \frac{W_k \cdot Y_k \cdot 9.8}{n \cdot \sigma_a} \quad [cm^3] \quad (50)$$

$$I = \frac{C_I \cdot P_r \cdot s \cdot l^3}{(E_T + E_C) / 2} \quad [cm^4] \quad (51)$$

위에서 각 변수는 아래와 같은 의미를 갖는다.

W_k Ballast keel 무게

Y_k 선저와 ballast keel 무게 중심의 거리

n Ballast keel과 맞닿는 보강재 개수

σ_a 설계 응력, 극한 응력의 1/2 값으로 계산

C , C_I 의 값은 보강재의 종류에 따라 아래와 같이 계산한다.

보강재 종류	C	C_I	SM_k
Ballast keel 과 맞닿는 보강재	183	57,290	계산
그 밖의 보강재	83.3	26,040	없음

5. 구조 해석

주요 구조 부재의 치수는 앞장에서 기술한 절차와 방법에 따라 정의하였으며, ABS와 ISO에서 제시한 방법에 따라 부재의 치수를 결정하였다. 본 장에서는 선체의 전선 강도 평가를 위한 유한요소 해석 예를 보였다. 해석을 위해서 선체 및 격벽은 ANSYSTM의 판(Shell63) 요소를 사용하였으나, 2장에서 기술한 바와 같이 복합재료 특성을 등가 등방성 재료로 치환하여 해석하였다. 보강재는 보요소(Beam188)를 사용하였으며, ballast keel은 솔리드 요소(Solid45)로서 정의하였다.

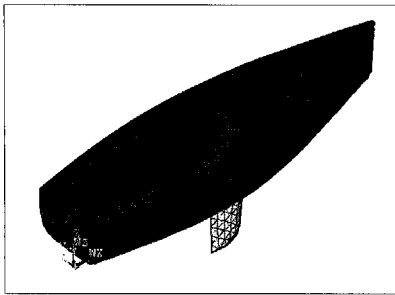


Fig. 10 Finite element meshes

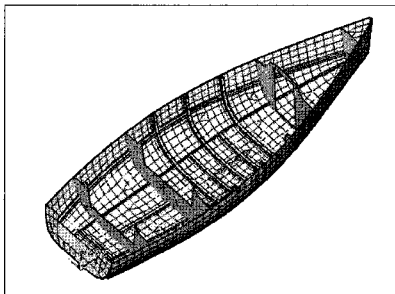


Fig. 11 The inner hull structures

5.1 유한요소 모델

3차원 구조해석을 위해서 아래의 Fig. 10과 같이 모델링을 하였다. Fig. 11은 요트 내부의 bulkhead와 girder 및 보강재를 3차원으로 보여주고 있다.

Table 2는 강도 평가를 위하여 가정한 하중조건을 정리하였다. 수평 상태의 선체 하중, 경사 상태의 하중, 운반 중 받는 하중 조건의 세 가지로 나누어서 해석을 수행하였다.

Table 3은 재료 특성값을 보인 것이다.

Case 1은 일반적인 롤 설계 하중 조건이다. 동유체력 분포는 ISO 비공식 룰을 적용하였다. 여기에 30도 heeling 모멘트에서 계산된 rig 하중을 추가로 적용하였다. 이 때 하중은 요트를 sagging 모드로 변형되도록 선미, 선수, 마스트 부분에 적용하였다.

Case 2는 30° heeling 상태였을 때 동유체력과 rig 하중을 적용하였다. 동유체력은 Case 1과 동일한 방법으로 적용하였다.

Case3은 ballast keel의 연결 부위의 안전도를 평가하기 위해서 운반 시에 keel이 받는 하중 조

Table 2 Loading conditions

Cases	하중 조건
[Case 1] Design Condition	동유체력과 rig 하중
[Case 2] Heeling Condition	Heel 상태에서 동유체력과 rig 하중
[Case 3] Carrying Condition	Keel의 자중에 의한 하중

Table 3 Material properties

Material properties	Sandwich	FRP
탄성 계수 [MPa]	10,524	8,770
Poisson 비	0.25	0.25
밀도 [kg/mm ³]	0.93×10 ⁻⁶	2.08×10 ⁻⁶
인장 항복응력 [MPa]	115	
압축 항복응력 [MPa]	124	

건이다. Table 3은 해석에 사용된 재료 물성 값이다. FRP는 매트와 로빙이 2:1로 조합되기 때문에 이 값을 기준으로 정리하였다. 샌드위치의 강성은 단일 재료로 치환하여 계산된 물성 값이다.

5.2 Design condition [Case 1]

Fig. 12는 수평 상태에서의 모습이다. 4장에서 제시한 slamming을 포함한 유체 동하중을 선체 외판에 분포시켰다. 이 하중의 압력 분포는 Fig. 13에 보인 형상과 같다.

Fig. 14는 rig에 발생하는 하중이며, 그 값은 3장의 식 (3.1), (3.2), 그리고 (3.3)에서 제시한 방법에 의해 계산하였다. 최대 응력은 56.2 MPa로 항복응력의 49% 정도로 나타났다. Table 4는 요트에 작용하는 주요 응력과 변위를 표로 나타낸 것이다.

5.3 Heeling Condition [Case 2]

Fig. 17과 같이 30도 heeling 되었을 때의 하중조건을 가정하였다. 동유체력 분포는 Case 1에서의 계산 방식과 동일하게 적용하였다. Fig. 18과

Fig.19는 각각 압력분포와 리그의 집중 하중을 보였다. Fig. 20은 선체 응력 분포를 나타낸 것이다. 압력과 리그 하중은 3장에서 제시한 식을 이용하였다.

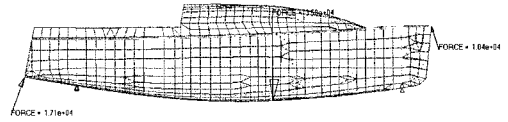


Fig. 14 Longitudinal rig forces

Table 4 Stress and deformation[Case1]

물리량	최대값
선체 응력	56.2 N/mm^2
보강재 응력	21.9 N/mm^2
Deck 응력	42.2 N/mm^2
최대 변위	34.4 mm

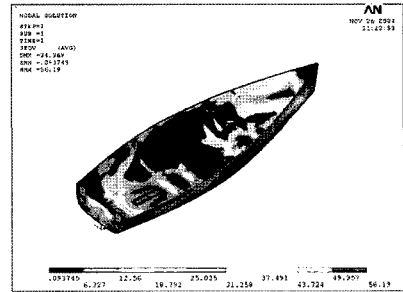


Fig. 15 Stress distribution on the hull surface

Table 5 Stress and deformation[Case2]

물리량	최대값
선체 응력	57.4 N/mm^2
보강재 응력	23.1 N/mm^2
Deck 응력	52.9 N/mm^2
최대 변위	64.7 mm

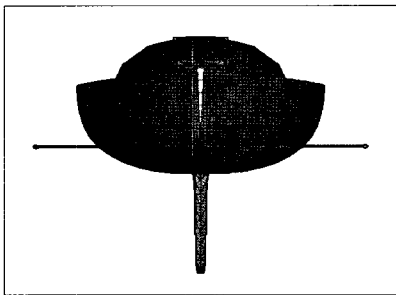


Fig. 12 Design condition

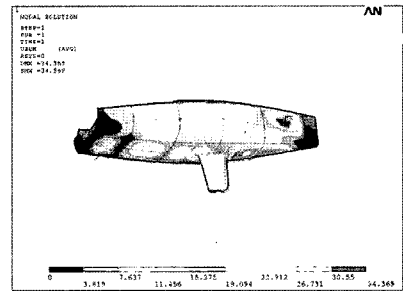


Fig. 16 Deformed shape

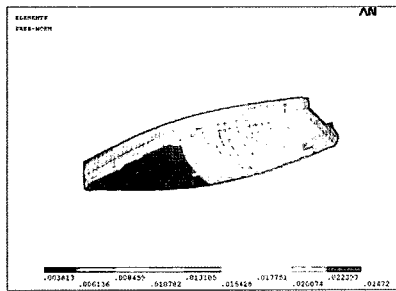


Fig. 13 Design pressure

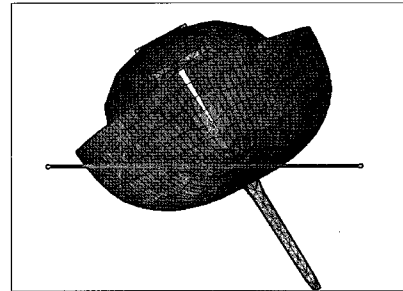


Fig. 17 Heeling condition

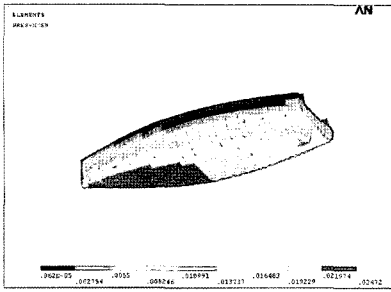


Fig. 18 Hydrodynamic design pressure in heeling condition

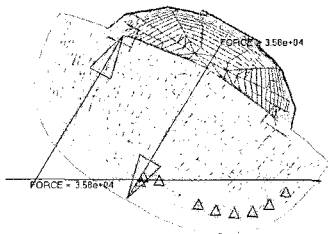


Fig. 19 Rig forces

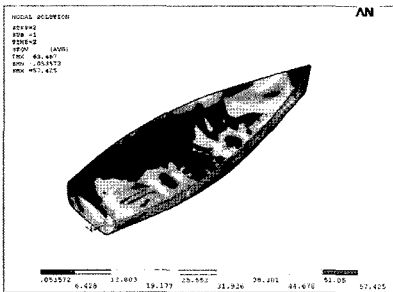


Fig. 20 Stress distribution on the hull surface

Table 6 Stress and deformation[Case3]

물리량	최대값
선체 응력	66.0 N/mm^2
보강재 응력	7.2 N/mm^2
Deck 응력	4.1 N/mm^2
최대 변위	59.3 mm

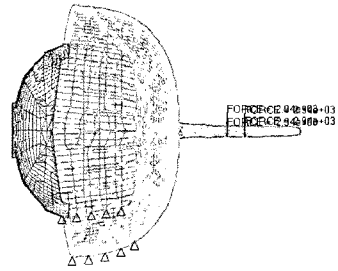


Fig. 21 Ballast keel weight

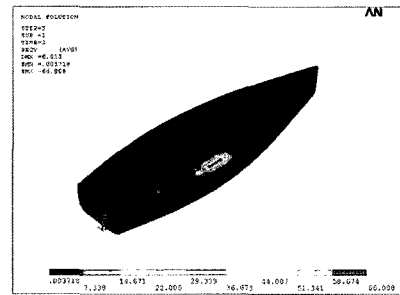


Fig. 22 Stress distribution on the hull surfaces

5.4 Ballast keel 자중에 의한 하중 조건 [Case 3]

Ballast keel의 무게는 약 1,200kg로 가정하였으며, Fig. 21은 자중에 의하여 발생하는 하중을 보여주고 있다. 자중은 4개의 절점에 각각 2,943N 으로 추가하였다.

최대 응력은 선체 외판과 keel의 접합부에서 나타났다으며 66.0MPa로 항복응력의 58% 정도로 나타났다(Table 6).

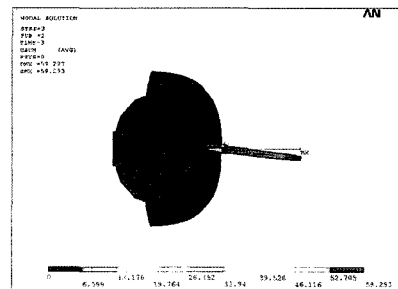


Fig. 23 Deformed shape

6. 결 론

본 연구는 요트의 구조 설계 및 구조 해석을 위한 절차적 기법을 마련하기 위하여 수행되었다. 요트 구조 재료 특성과 요트 구조 설계 방안 및 과정을 정리하였다.

구조 재료로서 강성이 높고 경량화가 좋은 샌드위치 형 FRP 재료를 선체 구조 재료로 가정하였다. 요트 선체 구조 부재 결정을 위하여 ISO, ABS에서 제공하는 룰을 혼용하여 설계 하중 및 구조 부재를 설계함으로써 요트 구조 설계 방안 및 과정을 제시하였다. 또한 ISO, ABS에서 제시한 설계 하중을 적용하여 선체 구조 유한요소 해석을 병행함으로써 구조 설계 타당성 검증을 위한 계산을 수행하였다. 본 연구를 통하여 아직까지 공식적인 설계 룰이 정해지지 않은 요트의 구조 부재 scantling 절차와 구조 해석 방법의 예를 보임으로써 요트 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

그러나 본 연구에서는 상세설계 검증이라기보다는 기본 설계 단계의 구조 설계 및 구조해석을 통한 평가를 수행하였으므로, 상세 설계 단계에서는 응력 집중이 발생하는 mast 연결부위, rig부분의 국부 강도 해석, 장비 하중 분포에 따른 하중 등이 추가된 엄밀한 하중 조건을 수행할 필요가 있을 것으로 생각된다. 또한 복합 재료의 특성을 반영할 수 있는 복합재료 요소를 사용한 구조해석이 추가로 수행하여야 할 필요가 있으며, 구조 부재의 최적화를 통한 선체 중량 최소화 절차도 필요할 것을 생각된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 개발 과제인 ‘보급형 해양 레저 선박 개발’ 연구의 일부로서 한국해양연구원 의 위탁연구를 통하여 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

• 유재훈, 반석호, 안해성, 김진, 김상현, 2005,

"30 피트급 요트의 선형개발 및 성능추정," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 34-42.

- 장창두, 김호경, 1998, "복합재료 쌍동형 초고석선의 최적 구조 설계 - 최소 중량 설계," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 2호, pp. 94-103.
- 천승현, 전호환, 하운근, M. Nakato, 1999, "바람과 파랑충격을 고려한 소형경주정의 안정성 해석," 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 1호, pp. 1- 14.
- ABS, 1994, Guide for Building and Classing Offshore Racing Yachts, American Bureau of Shipping, New York
- Lars Larsson and Rolf E. Eliasson, 2000, "Principles of Yacht Design," 2nd ed. International Marine of McGraw-Hill, Camden Marine.
- Ojeda R.B., Prusty G., Salas M., 2004, "Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads," Ocean Engineering, Vol. 31, pp. 901-929.



< 신 중 계 >



< 이 재 열 >



< 이 장 현 >



< 반 석 호 >



< 이 상 호 >



< 유 재 훈 >