쌍동선의 설계규정 검토를 위한 규정 비교 및 구조 해석

김병중¹ · 권수연² · 김성찬³ · 이장현^{1,†}
인하대학교 조선해양공학과¹
선박안전기술공단²
인하공업전문대학 조선해양과³

Comparison Study and Structural Analysis to Investigate the Design Rule and Criteria of Catamaran

Byung Jong Kim¹ · Soo Yeon Kwon² · Sung Chan Kim³ · Jang Hyun Lee^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Korea Ship Safety Technology Authority²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College³

Abstract

Leisure boat and yacht should be designed to meet the domestic regulation and international standards as large merchant vessels do. Recently, each countries are encouraged to follow the regulation of International standards organization. Furthermore domestic organization has not yet announced the design rule and regulation for FRP-catamaran yacht design. Therefore, it has been required to make the regulation for domestic situations of FRP-catamaran. This study deals with the structural strength evaluation of 50ft catamaran by using finite element analysis. Design load of the regulation of International standards organization are compared with the regulation of Korea Register of shipping and Lloyd's Register.

Keywords : Catamaran(쌍동선), Structural strength(구조강도), FRP(섬유강화플라스틱), Slamming load(슬래밍 하중), FEM(유한요소법)

1. 서 론

1.1 연구 배경

최근 국내의 해양 레저 산업은 해상 마arina 증가, 요트 수요의 증가에 따라 비중이 점점 커지고 있다. 특히 쌍동선(catamaran)의 경우, 단동형 선박에 비해 갑판의 면적이 넓어 공간 활용이 유리하고, 복원성능도 뛰어난 장점이 있어 앞으로 그 수요가 크게 늘어 날것으로 예상된다(Park, et al., 2010). 선박 설계 및 건조시 설계 규정 및 법규가 정하는 바를 준수하여야 하지만, 한국의 국가기준은 알루미늄 재질의 쌍동선의 구조기준만 제정되어 있으며, 한국선급의 알루미늄 쌍동선 규정을 바탕으로 통용되고 있다(Korea Ship Safety Technology Authority, 2009; Korea Register of Shipping, 2010). 따라서 FRP 재질의 쌍동선 설계 건조 과정에 적용하기 위한 규정이 정의되어 있지 않아 검사 및 승인 절차에 어려움을 겪고 있다. 또한 향후 쌍동선 구조기준에 대한 ISO-TC188.12215-7(안)이 국제표준으로 제정될 것으로

예상되며 이러한 국제표준은 한국국가기준 및 수출 선박의 설계 건조 및 승인 절차에 수용될 것으로 전망된다. 따라서 ISO-TC188.12215-7이 국제표준으로 제정될 것에 대비하여 국제표준 규정을 다른 선급 규정과 비교 분석하고, FRP 쌍동선의 구조 강도 평가 방법을 개발할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 각 선급들의 구조기준과 ISO-TC188.12215-7(안)을 비교 분석하였다. 또한 실제로 이미 건조된 국내의 50ft 급 FRP 쌍동선을 대상으로 ISO 규정 및 국내외 규정이 정한 바에 따라 규정 계산을 통해 설계 하중을 산출하고 설계 규정 적합성을 검토하였다. 또한 유한요소법을 이용하여 검토한 설계 하중에 대한 구조강도평가를 수행하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 쌍동선 설계에 필요한 한국국가기준 제정을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

1.2 기존 연구

쌍동선 또는 요트의 구조강도 평가에 관한 검토는 몇 차례 연구에 의하여 수행되었다(Oh, et al., 2009; Cho, et al., 1994;

Larsson & Eliasson, 1996). 기 수행된 연구는 국내외에서 정한 설계 규정을 알루미늄 재질의 쌍동선에 대해 적용하여 설계 하중을 산정하고 구조해석에 적용하는 과정을 제시한 연구로 파악되며, 이러한 선행 연구는 알루미늄 쌍동선의 설계에 필요한 적절한 절차를 제시하였다. 그러나 FRP 쌍동선에 대한 각 규정 검토는 아직까지는 심도 있게 이루어지지 못하였다. 또한 구조 해석 시 다양한 하중에 대한 쌍동선 전선 해석 방법이 제시 되지 못했었다 (Oh, et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 각 기관의 규정을 비교 분석하여 쌍동선 설계를 위한 합리적인 기준을 제시하고자 한다. 뿐만 아니라, 다양한 하중을 반영하고 해석 결과의 향상을 가져올 수 있는 쌍동선 전선 모델에 대한 구조강도평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 각 규정 별 적용 범위

2.1 ISO(국제표준) - TC188.12215-7

ISO는 소형 쌍동선을 위한 규정으로 TC188.12215-7를 수립하는 과정에 있다. 특히 12215-7 규정은 선체길이 24m 미만의 소형 쌍동선을 위한 규정으로 현재 회람 및 검토 중에 있다. 이 규정에 적용되는 선박의 요건으로는 선체길이 24m 이내, 속도는 최대 50knots 이하, 선박의 선질은 복합재료, 알루미늄 합금, 강재 등이 있다. 특히 배의 운항 제한범위 변수를 유의파고와 풍력에 따라 나눈 것이 주요 특징이다 (International Standard, 2008, 2009).

2.2 한국선급 - 고속경구조선

한국선급(KR)은 고속 경구조선을 위한 규정의 일부로서 쌍동선에 대한 설계 규정을 포함 시켰다. 이 규정에 적용되는 선박의 요건으로는 만재배수량이 $(0.135 \times L \times B)^{1.5}$ ton 이하인 선박, 속도는 고속경구조선의 경우, 최대 속력이 25knots 이상, 또는 $7.16 \times \nabla^{0.1667}$ knots 보다 큰 선박, 선질은 강재, 알루미늄 합금, 복합재료 등이 있으며 주요 특징으로는 운항제한 범위 변수를 항행 구역별 피항지로 부터 최대거리로서 구분하고 있다(Korea Register of Shipping, 2010). 이때 L은 선박의 길이, B는 선체의 너비, ∇ 는 만재배수용적을 말한다.

2.3 로이드선급 - SPECIAL SERVICE CRAFT

로이드선급(LR)은 선체의 길이를 최대 150m 이하, 고속선의 경우 속도는 $7.19 \times \nabla^{1/6}$ knots 이상, 경구조선의 경우 배수량이 $0.04 \times (L_R \times B)^{1.5}$ ton 미만의 선박에 대해 규정을 적용하게 되어 있으며, 선박의 선질은 강재, 알루미늄 합금, 복합재료 등이 있다. 한국선급의 고속 경구조선 규정과 마찬가지로 운항제한 범위 변수를 피항지로부터 최대거리로서 구분하고 있다(Lloyd's Register, 2008). 이때 L_R 는 선박의 길이를 말한다.

3. 각 규정 별 가속도 계수

3.1 ISO 12215-7의 가속도 계수

선박 운항 시 각 부재에 작용 하는 하중을 계산하기 위해 가장 먼저 계산 되어야 하는 계수로써, ISO 규정은 크게 단동선과 다동선의 가속도 계수로 나누어져 있다. 다동선의 경우 L_{WL} (흘수선상에 배의 길이)와 B_{WL} (흘수선면 상에서의 선체들의 폭의 합), V (최대 속도)에서 M_{LDC} (배수량)을 나누어서 n_{CGMH} (가속도 계수)를 구한 후 각 부재에 작용하는 압력 산출 시 사용되며 아래 식 (1) 과 같다. ISO 규정에 의한 쌍동선 강도 평가 절차는 Fig. 1 과 같다.

$$n_{CGMH} = \frac{1.25 \times L_{WL} \times B_{WL} \times V^2}{M_{LDC}} \quad (1)$$

Fig. 1 Procedure of structural strength evaluation for catamaran (Jang, et al., 1998)

3.2 한국선급 고속경구조선의 가속도 계수

한국선급은 a_{cg} (설계 수직 가속도)와 a_l (종방향 가속도 계수), a_t (횡방향 설계 가속도)로 구분되어 있다. a_{cg} 의 경우, f_g (선종과 항행범위 제한부호에 따라 구분된 가속도 계수)와 g_0 (중력 가속도)를 이용하여 구한다. 이때 a_{cg} 는 식 (2)와 같다.

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} \frac{3.2}{L^{0.76}} f_g g_0 \quad (2)$$

a_l (종방향 가속도 계수)의 경우 속도, 길이, 가속도, C_w (파랑 계수)를 이용하여 구하게 되며 식 (3)과 같다.

$$a_l = 2.5 \frac{C_w}{L} \left(0.85 + 0.25 \frac{V}{\sqrt{L}} \right)^2 g_0 \quad (3)$$

a_t (횡방향 설계 가속도)의 경우, T_R (횡요주기)와 θ_r (최대횡요의 기울기), h_w (최대속력의 0.7배를 유지할 수 있을 때의 최대파고), r_r (횡요중심으로부터 고려하는 위치까지의 높이)를 이용하여 구하게 되며 식 (4) 와 같다. 또한 T_R 은 식 (5)와 같다.

$$a_t = \left(2 \frac{\pi}{T_R}\right)^2 \theta_r r_r \quad (4)$$

$$T_R = \frac{\sqrt{L}}{1.05 + 0.175 \frac{V}{\sqrt{L}}} \quad (5)$$

3.3 로이드선급의 가속도 계수

로이드선급은 h_m (상대 수직 운동 계수), a_v (수직 가속도 계수)로 나누어지며, 이때 a_v 는 선박의 주행상태에 따라 배수형인 경우와 활주형인 경우로 구분된다. 활주형인 경우, 선체의 수직 운동에 의한 동하중 계수로서 선체 외판에 작용하는 충격하중이나 압력하중을 구하는데 사용된다. 이때 f_a (선체 형상 가속 계수), B_M (선체들의 총 폭), $H_{1/3}$ (허용 유의 파고), θ_D (L_{CG} 에서의 선저 기울기 각도), Γ (Taylor quotient), Δ (배수량)을 고려한다.

$$a_v = \frac{f_a L_{WL}}{\Delta} (B_M H_{1/3} + 0.084 B_M^2) (5 - 0.1 \theta_D) \Gamma^2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

배수형인 경우의 a_v (수직 가속도 계수)는 Γ ($V/\sqrt{L_{WL}}$) 와 L_{WL} (수선 길이)를 이용하여 식 (7)과 같이 계산한다.

$$a_v = 0.2 \Gamma + \frac{34}{L_{WL}} \quad (7)$$

식 (8)과 (9)에 보인 것과 같이 a_x (선미로부터 특정 위치에서의 수직 가속도 계수)는 x_a (만재 흘수선에서의 선미로부터 수직 가속도를 계산 지점까지의 거리)를 이용하여 구한다.

$$a_x = a_v \left(0.86 - 0.32 \frac{x_a}{L_{WL}} + 1.76 \left(\frac{x_a}{L_{WL}} \right)^2 + \xi_a \right) \quad (8)$$

$$\xi_a = 0.14 + 0.32 \frac{x_{LCG}}{L_{WL}} - 1.76 \left(\frac{x_{LCG}}{L_{WL}} \right)^2 \quad (9)$$

4. 각 규정 별 주요 하중

4.1 ISO 12215-7의 주요 하중

ISO의 경우 쌍동선에 작용하는 주요 하중으로는 크게 선체

전체에 작용 하는 종굽힘 모멘트 (moment), 비틀림 모멘트와 파랑 등에 의한 선저나, 연결부 갑판 밑바닥에서 국부적으로 작용하는 슬래밍 하중 등이 있다. 종굽힘 모멘트 (M_{BH})는 파랑이나 자중에 의한 선체 중 길이 방향으로 굽힘 모멘트에 의한 하중으로, ISO 규정(안)에서는 M_{BH} (정수중 굽힘 모멘트)에 대해서만 정의하였다. M_{LDC} (만재배수량)에 L_{WL} (수선면 길이)에서의 선체 길이를 이용하여 식 (10)과 같이 구하였다.

$$M_{BH} = 0.5 \times M_{LDC} \times L_{WL} \quad (10)$$

비틀림 모멘트(T)는 선체의 운동이나 파도의 영향으로 선체가 뒤틀릴 때 발생하는 하중으로 L_{WL} (수선의 길이), M_{LDC} (만재배수량), n_{CGMH} (동하중 계수)를 이용하여 식 (11)과 같이 구한다.

$$T = 1.25 \times L_{WL} \times M_{LDC} \times n_{CGMH} \quad (11)$$

선저 슬래밍 하중 (bottom slamming pressure, P_{BMH})은 선체 바닥면에 파랑의 충격에 의한 하중으로 K_{DC} (해상 상태 계수), K_L (종방향 압력 분포 계수), K_{AR} (슬래밍 압력 작용 면적 분포 계수), K_R (부재 및 보트 타입 계수), K_{DR} (압력 분포 계수)를 이용하여 식 (12)와 (13)을 이용하여 구한다.

$$P_{BMH} = P_{BPMHBASE} \times K_L \times K_{AR} \times K_{DR} \quad (12)$$

$$P_{BPMHBASE} = \frac{0.1 \times M_{LDC}}{L_{WL} \times B_{WL}} \times (1 + K_{DC} \times 0.5 \times n_{CGMH}) \quad (13)$$

연결부 갑판 슬래밍 하중 (cross deck slamming pressure, P_{WDMH})은 선체 연결부 바닥에 면에 파랑의 충격에 의한 하중으로 M_{LDC} (배수량), K_{DC} (해상 상태 계수), K_{LWD} (종길이 방향의 압력 계수), K_{ZWD} (수직 방향으로의 압력 계수)로서 식 (15)와 식 (16)중 더 큰 값으로 한다.

$$P_{WDMH} = P_{WDMHBASE} \times K_{DC} \times K_{AR} \times K_{LWD} \times K_{ZWD} \quad (14)$$

$$P_{WDMHMIN} = 11 \times K_{LWD} \times K_{DC} \times \sqrt{L_{WL}} \quad (15)$$

$$P_{WDMHBASE} = 3 \times n_{CGMH} \cdot M_{LDC}^{0.33} \quad (16)$$

4.2 한국선급 고속경구조선의 주요 하중

한국선급의 쌍동선에 작용하는 주요 하중은 ISO와 크게 다르지 않으나 횡방향 굽힘 모멘트가 추가되어 있고, 종방향 굽힘 모멘트에서 파랑에 의한 모멘트가 고려되어 있는 특징이 있다.

식 (17)과 (18)에 보인 것과 같이 종굽힘 모멘트 (M_{hog} , M_{sag})의 경우, 파랑에 의한 호깅 (hogging) 및 새깅 (sagging) 상태의 모멘트를 각각 구분하여 정수 중 굽힘 모멘트를 합하여 계산하도록 되어 있다 (Korea Register of Shipping, 2010).

$$M_{hog} = \Delta 0.5L + 0.19C_W + 0.19C_W L^2 (B_{WL} + K_2 B_m) C_b \quad (17)$$

$$M_{sag} = M_{SW} + 0.14C_W \times L^2 (B_{WL} + K_3 B_{tn}) (C_b + 0.7) \quad (18)$$

한국선급의 비틀림 모멘트는 종비틀림 모멘트 (M_p)와 횡비틀림 모멘트 (M_T)로 구분되어 있는 것이 특징이며, Δ (배수량), a_{cg} (설계 가속도), L (선체길이), b (쌍둥선체 중심선간의 길이) 등을 이용하여 구하게 된다.

$$M_p = \frac{\Delta a_{cg} L}{8} \quad (19)$$

$$M_T = \frac{\Delta a_{cg} b}{4} \quad (20)$$

횡굽힘 모멘트 (M_b)는 $V/\sqrt{L}$ 의 값이 3.0이상, $L < 50m$ 인 쌍둥선의 경우와 $L \geq 50m$ 인 경우로 구분되는 특징이 있으며 Δ (배수량), a_{cg} (설계 가속도), L (선체길이), b (쌍둥선체 중심선간의 길이), s (항행범위에 따른 계수)를 이용하여 구하게 된다. 이때 $L < 50m$ 인 쌍둥선의 경우는 식 (21)과 같다.

$$M_b = \frac{\Delta a_{cg} b}{s} \quad (21)$$

선저 슬래밍 하중 (P_{sl})은 종방향 슬래밍 압력 분포 계수 (k_i), 선체의 개수 (n), 고려하는 부재의 설계하중 작용면적 (A), 정상 운항상태에서 L 의 중앙에서 측정한 흘수 (d_o), 고려하는 횡단면에서의 선저 경사 각도 (β_x), 선박의 무게중심에서의 선저 경사각도(β_{cg})등을 이용하여 식 (22)와 같이 계산하였다.

$$P_{sl} = 1.3k_i \left(\frac{\Delta}{nA} \right)^{0.3} d_o^{0.7} \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} a_{cg} \quad (22)$$

쌍둥선 연결부 갑판의 슬래밍 하중 (P_{sl})은 식 (23)에 보인 것과 같이 고려하는 부재의 설계 하중 작용 면적 (A), 흘수선으로부터 하중 작용 점까지 수직거리 (H_c), 슬래밍 압력의 선박 길이 방향 분포 계수 (k_i), 수선으로부터 슬래밍을 피하기 위한 하중 작용점까지의 필요한 수직거리 (k_c)를 이용하여 구하였다. H_L 은 식 (24)에 보인 값으로 계산하였다.

$$P_{sl} = 2.6k_i \left(\frac{\Delta}{A} \right)^{0.3} a_{cg} \left(1 - \frac{H_c}{H_L} \right) \quad (23)$$

$$H_L = 0.22L (k_c - 0.0008L) \quad (24)$$

4.3 로이드선급 규정의 주요 하중

로이드선급의 주요하중 항목은 한국선급과 거의 동일하다. 파랑 하중에 의한 종굽힘 모멘트 (M_{MW})의 경우에 식 (25)와 (26)에 보인 것과 같이 정수중 굽힘 모멘트와 파랑중의 굽힘 모멘트의 합을 고려하여 정의하고 있다 (Lloyd's Register, 2008).

$$M_{MW} = F_f D_f M_M \quad (25)$$

$$M_M = S_f G_f E_f C_{WP} L_s^{2.5} B_M \quad (26)$$

여기서, S_f 는 선박의 종류, E_f 와 F_f 는 새깅 및 호깅 상태에 따른 상수, D_f 는 길이 방향 위치별 상수, C_{WP} 는 수선면 계수, L_s 는 선체 길이, B_M 은 선체의 폭을 각각 의미한다.

비틀림 모멘트 (M_T)는 항행 제한 범위에 따른 계수 (G_t)와 배수량 (Δ), 수직 가속도 계수 (a_v), 규정에서 정한 선체 길이 (L_R)등을 이용하여 구하여야 한다.

$$M_T = G_f \Delta L_R a_v \quad (27)$$

횡굽힘 모멘트 (M_b)의 경우 항행 제한 범위에 따른 계수 (G_t), 쌍둥선체 중심선간의 길이 (b), 배수량 (Δ), 수직 가속도 계수 (a_v)를 이용하여 계산한다.

$$M_B = G_f b \Delta a_v \quad (28)$$

로이드선급의 선저 슬래밍 하중은 선체 외판에 작용하는 압력 (P_s)과 배 종류 계수 (S_f), 선박의 운항 상태 계수 (H_t), 항행 제한 범위 계수 (G_t), 바닥의 충격 압력 (P_{dh}), 선수쪽 충격 압력 (P_f)등을 이용하여 식 (29), (30), (31) 중 가장 큰 값을 적용한다.

$$P_{sl} = H_f S_f P_s \quad (29)$$

$$P_{sl} = H_f S_f P_{dh} \quad (30)$$

$$P_{sl} = H_f S_f G_f P_f \quad (31)$$

로이드선급의 연결부 갑판 슬래밍 하중은 선박의 운항 상태 계수 (H_t), 배 종류 계수 (S_f), 수선면 아래까지의 유체 동역학적인 압력 (P_p), 연결 갑판부에서의 충격 압력 (P_s)를 이용하여 식 (32)와 식 (33)중 큰 값으로 한다.

$$P_{sl} = H_f S_f P_s \quad (32)$$

$$P_{sl} = H_f S_f P_{pc} \quad (33)$$

$$P_p = 10 \times Hrm \quad (34)$$

$$Hrm = C_{W, \min} \left(1 + \frac{k_r}{(C_b + 0.2)} \left(\frac{x_{WL}}{L_{WL}} - x_m \right)^2 \right) \quad (35)$$

$$P_{pc} = \nabla_{pc} K_{pc} V_R V \left(1 - \frac{G_A}{H_{03}} \right) \quad (36)$$

5. 쌍동선 구조해석

5.1 구조해석 모델

앞 장에서는 각 규정 별 설계 하중을 요약하였다. 각 규정 별로 제시한 설계 하중에 따른 응력 및 변형을 검토하고 이를 쌍동선 설계 기준 정립에 활용하고자 기 건조된 실제 선박을 이용하여 구조 강도를 평가하고자 한다. 각 규정에 따라 설계 하중을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 선정된 선박은 국내에서 운항중인 50ft급 FRP 쌍동선이다. 쌍동선의 주요 치수 정의는 Fig. 2와 같고 주요 치수는 Table 1에 요약하였다.

Fig. 2 Dimensions of a catamaran(International Standard, 2009)

Table 1 Principal dimension of catamaran

Design Parameters	Value
LOA	16.02m
BWL	3.20m
LWL	15.47m
BCB	5.8m
ZWi	0.82m
Depth	2.95m
Draft	0.9m
Displacement	19.8ton

쌍동선은 선체(hull), 격벽(bulkhead), 보강재(stiffener), 용골(keel)등으로 구성 되어 있으며 선체의 재질은 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)로 구성 되어 있다. 각 부재의 두께는 도면에서 제공한 유리 섬유(mat)와 섬유재(oving)의 혼합 비율의 계산을 통해 산정하여 Table 2에 나타냈다.

또한 쌍동선의 구조해석을 수행 하기위해 실제 운항 선박의 도면 구조 형상과 부재 배치 정보를 얻어 전선 모델링을 위해 수행하였다. 이때 사용한 상용 유한 요소 프로그램은 MSC.Patran 및 Nastran을 사용하였으며, 판넬로 구성된 선체 부재는 4절점 사각형 요소를 사용하였으며, 보강재는 빔 요소를 사용하여 모델링 하였으며 선체 모델링의 형상과 내부 부재 배치는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

Table 2 Thickness of structural members

Structural member(mm)	Thickness		
	Outer skin	Core	Inner skin
Hull	7.1	20	4.95
Keel	9.9	20	4.95
Bulkhead	4.6	18	4.6

Fig. 3 Finite element model of catamaran

Fig. 4 Arrangement of stiffeners in the catamaran

선체 재료의 물성치는 예제 선박의 도면에서 나타난 매트와 로빙의 혼합 비율을 바탕으로 ISO 12215-5 Annex D의 계산식을 이용하여 계산하였다 (International Standard, 2008). 또한 구조 해석 시, 샌드위치와 같은 이방성 재료가 모멘트에 의해 동일한 응력과 변형이 나타나도록 계산식 (Shin, et al., 2006)을 사용하여 등가의 단일 재료로 치환하였으며, 이를 Table 3에 나타냈다.

Table 3 Property of materials

Material Property	Sandwich
Elastic modulus	7,103MPa
Poisson's ratio	0.3
Density	$0.93 \times 10^{-6} \text{Kg/mm}^3$
Yield strength	126.1MPa

5.2 하중 조건

본 연구에서는 앞서 4장에서 설명한 각 규정의 쌍둥선 주요하중을 직접 계산하여 구조해석을 위한 하중으로 적용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 국제표준규정 (ISO TC 188.12215-5,7, 2008), 한국선급(고속경구조선 규정), 로이드선급(Special service craft 규정)을 검토하였다. 각 규정에서 정한 바에 따라 산정한 주요 하중 값을 Table 4 ~ Table 6에 정리하였다. 선수 및 선체 연결부의 갑판에 작용하는 압력은 Fig. 5 및 Fig. 6과 같고, 이때 판의 치수는 보통 $0.8 \times 0.8 \text{ m}$ 로 계산하였으며, 선수를 기준으로 각 판의 무게 중심점까지의 거리를 기준으로 압력 값을 나타냈다. 설계 하중은 로이드선급이 정한 규정이 가장 큰 값을 보이고 있으나, ISO 규정이 정한 값은 가장 작은 값을 보이고 있다. ISO 규정은 횡굽힘 모멘트는 정하지 않고 있다.

Table 4 Longitudinal bending moment of catamaran

Longi. bending moment(kN-m)	ISO	KR	Lloyd
Hogging	153.1	278.1	322.39
Sagging	153.1	272.1	201.5

Table 5 Transverse bending moment of catamaran

Trans. bending moment(kN-m)	ISO	KR	Lloyd
	Not defined	207.52	553.72

Table 6 Twisting moment of catamaran

Twisting moment(kN-m)	ISO	KR	Lloyd
	459.4	449.72	716.3

Fig. 5 Bottom slamming load

Fig. 6 Cross deck slamming load

5.3 경계 조건

종굽힘 모멘트의 경우, 선수와 선미 끝 부분의 격벽에 MSC. NASTRAN의 RBE2요소를 적용하여 그 단면의 무게 중심점에 계산된 모멘트 값을 적용하여 종굽힘 방향으로 굽힘 모멘트가 발생하도록 설정하였다. 또한 호킹 및 세킹 모멘트는 작용하는 부호의 값을 + 에서 - 로 또는 - 에서 +로 바뀌어서 적용하였다.

이때 구속 조건은 A, C 위치는 Dx, Dy, Dz를 0으로 하였으며, B, D 위치는 Dy, Dz를 0으로 하였으며 이를 Fig. 7에 나타냈다.

Fig. 7 Boundary condition of longitudinal bending moment

횡굽힘 모멘트의 경우, 5.2 장에서 계산된 횡굽힘 모멘트 값을 선체 중심선으로부터 양 Point 하중 작용점까지의 거리로 나누어 Force를 구하였다. 이때 구속 조건은 A, C 위치에서 Dx, Dy, Dz를 구속하였으며, B, D 위치는 Dy, Dz를 구속하였고 이를 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 8 Boundary condition of transverse bending moment

비틀림 모멘트의 경우, 선수나 선미 끝 부분의 격벽 한곳에 RBE2 요소를 적용하고 그 단면의 무게 중심점에 계산된 모멘트 값을 적용하였다. 구속 조건은 RBE2 요소를 적용한 반대편 끝에 위치한 격벽 전체에 Dx, Dy, Dz를 구속하였고 이를 Fig. 9에 나타냈다.

Fig. 9 Boundary condition of twisting bending moment

선저 슬래밍의 경우, 하중은 Fig. 5와 같이, 선미를 기준으로 수선면 하부의 선체 바닥 부분에 가하였다. 이때 구속 조건과 위치는 Fig. 8과 동일하다.

연결부 갑판 슬래밍의 경우, 하중은 Fig. 6와 같이, 선미를 기준으로 연결부 갑판 밑면에 가하였다. 이때 구속 조건은 A, C 위치는 Dx, Dy, Dz를 구속하였으며, B, D 위치는 Dy, Dz를 구속하였고 이를 Fig. 11에 나타냈다.

Fig. 11 Boundary condition of bottom slamming

6. 구조해석 결과

FRP 쌍동선의 구조 안전성 평가를 위해, 세 가지 규정 (ISO 규정, 한국선급, 로이드선급)이 정의한 부재 위치별 허용 계수를 인장강도와 곱하여 허용 응력을 산정하였다. 또한 구조 해석 결과 최대 응력이 작용하는 영역을 취약 구조부로 선정하고 허용 응력과 비교하여 이를 Table 7에 나타냈으며, 이때 계수(factor)는 각 규정에서 정한 안전계수이다. Table 7에 정리한 것과 같이 선저 및 연결부 갑판의 외판에 대한 허용 응력은 ISO 규정이 가장 큰 것으로 나타났으며, 타 선급은 허용 응력 값이 작은 것으로 나타났다. 그러나 보강재의 경우에 선저 및 연결부 갑판에 관련 없이 거의 유사한 수준의 허용 응력을 요구하는 것으로 정리되었다.

Table 7 Allowable stress of members

Rule	Members		Allowable stress	
			Factor	Value(MPa)
ISO	Shell	Bottom	0.5	63.1
		Cross deck	0.5	63.1
	Stiff.	Bottom	0.33	41.6
		Cross deck	0.33	41.6
KR	Shell	Bottom	0.3	37.8
		Cross deck	0.3	37.8
	Stiff.	Bottom	0.3	37.8
		Cross deck	0.3	37.8
Lloyd	Shell	Bottom	0.28	35.3
		Cross deck	0.33	41.6
	Stiff.	Bottom	0.33	41.6
		Cross deck	0.33	41.6

6.1 종굽힘 모멘트에 의한 해석결과

각 규정에서 정한 종굽힘 모멘트에 따른 구조 해석을 수행한 결과 최대 응력은 로이드선급의 호깅 조건이며, 선체 중앙부근과 선체 외판에서 약 1.39MPa으로 계산되었다. 허용응력인 33.63MPa에 크게 미치지 않으므로 구조적으로 안정하다고 평가할 수 있다. 각 규정에 따른 변형 및 응력 해석 결과는 Table 8에 정리하였다. Fig. 12 ~ Fig. 15은 각 규정에 따라 계산된 변형 및 응력 결과를 보인 것이다. 허용응력에 비하여 응력은 매우 작은 값을 보이고 있다.

Table 8 Result of longitudinal bending moment

Rule	Displacement (mm)	σ_{xx} (MPa)	Von Mises stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
KR(hogging)	0.78	0.72	1.2	33.63
KR(sagging)	0.76	1.22	1.17	
Lloyd(hogging)	0.9	0.84	1.39	33.63
Lloyd(sagging)	0.56	0.91	0.87	
ISO(hogging)	0.43	0.38	0.66	33.63
ISO(sagging)	0.43	0.69	0.66

Fig. 12 Displacement of longitudinal bending moment (ISO-Sagging)

Fig. 13 Von Mises stress of longitudinal bending moment (ISO-Sagging)

Fig. 14 Displacement of longitudinal bending moment (ISO-Hogging)

Fig. 15 Von Mises stress of longitudinal bending moment (ISO-Hogging)

6.2 횡굽힘 모멘트에 의한 해석결과

각 규정별 횡굽힘 모멘트에 의한 구조 해석 결과 최대 응력은 로이드선급의 값으로서 용골 바닥면에 약 6~7MPa로 작용하였다. 이는 하중 작용 위치에 의한 응력 집중 현상으로 판단된다. 또한 횡굽힘 모멘트에 의한 전단 응력은 선체와 연결부 갑판의 연결 부재 사이에서 약 1.5MPa 정도로 분포하였다. 하지만 허용응력인 37MPa에 크게 미치지 않으므로 구조적으로 안정하다고 평가할 수 있다. 각 규정에 따른 결과를 Table 9에 정리하였고 Fig. 16 ~ Fig. 18에 나타냈다.

Table 9 Result of transverse bending moment

Rule	Displacement (mm)	τ_{yz} (MPa)	Von Mises stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
KR	5.7	2.94	6.88	33.63
Lloyd	15.2	7.83	18.4	36.99
ISO	-	-	-	-

Fig. 16 Displacement of transverse bending moment (KR)

Fig. 17 Von Mises stress of transverse bending moment (KR)

Fig. 18 Shear stress transverse bending moment (KR)

6.3 비틀림 모멘트에 의한 해석결과

비틀림 모멘트의 경우, 로이드선급의 값이 선미부의 격벽과 연결부 갑판의 하단부가 만나는 지점에서 15MPa 가량의 최대 응력이 나타났다. 또한 비틀림 모멘트에 의한 전단응력은 선미부 하단의 선체 횡단면을 모두 구성하는 격벽과 연결부 갑판이 만나는 부분에서 4.3MPa가량의 최대 응력이 분포하였다. 하지만 허용응력인 37MPa에 크게 미치지 않으므로 구조적으로 안정하다고 평가할 수 있다. 각 규정에 따른 결과를 Table 10에 정리하였고 Fig. 19 ~ Fig. 21에 나타냈다.

앞서 언급한 굽힘력을 비롯한 비틀림 하중에 의한 응력은 매우 허용응력에 비하여 작은 값으로 파악되었다. 이는 각 규정이 보수적 관점에서 설계 규정을 정하고 있다는 것을 추측하게 한다.

Table 10 Result of twisting moment

Rule	Displacement (mm)	τ_{yz} (MPa)	Von Mises stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
KR	18.1	2.64	9.41	33.63
Lloyd	28.9	4.26	15	36.99
ISO	18.5	2.73	9.62	36.99

Fig. 19 Displacement of twisting moment (ISO)

Fig. 20 Von Mises stress of twisting moment (ISO)

Fig. 21 Shear stress of twisting moment (ISO)

6.4 선저 슬래밍에 의한 해석결과

선저 슬래밍의 경우 한국선급이 하중이 구속 조건을 준 연결부 갑판의 양 끝 부분에서 0.17MPa로 최대 응력으로 나타났다. 이는 구속 조건에 의한 응력 집중 현상으로 판단되며, 그 값 또한 허용응력인 33.6MPa에 크게 미치지 않으므로 구조적으로 안정하다고 평가할 수 있다. 각 규정에 따른 결과를 Table 11에 정리하였고 Fig. 22과 Fig. 23에 나타냈다.

계산된 선저 슬래밍에 의한 응력 수준 또한 허용 응력에 비하여 작은 값을 보이고 있다. 이러한 응력은 운항하는 해상 상태 및 파의 특성과 쌍동선의 운동을 감안하여 구한 슬래밍 하중이 아닌 설계 규정에서 제시한 하중에 의하여 산정된 값이기는 하지만, 그 값의 수준이 낮음을 볼 수 있다.

Table 11 Result of cross bottom slamming load

Rule	Displacement (mm)	Von Mises stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
KR	0.48	0.17	33.63
Lloyd	0.1	0.12	31.39
ISO	0.3	0.13	36.99

Fig. 22 Displacement of bottom slamming load (ISO)

Fig. 23 Von Mises stress of bottom slamming load (ISO)

Fig. 25 Von Mises stress of cross deck slamming load (ISO)

6.5 연결부 갑판 슬래밍에 의한 해석결과

연결부 갑판 슬래밍의 경우 로이드선급과 한국선급의 값이 선수부의 연결부 갑판과 선체가 만나는 부분에서 0.18MPa로 가장 크게 분포하였다. 이 또한 허용응력인 37MPa에 크게 미치지 않으므로 구조적으로 안정하다고 평가할 수 있다. 각 규정에 따른 결과를 Table 12에 정리하였고 Fig. 24와 Fig. 25에 나타냈다.

연결부 갑판 슬래밍 하중 값도 선저 슬래밍 하중 값과 마찬가지로 설계 규정에 의한 값이다. 그러나 선저 슬래밍에서 보였던 현상과 같이 연결부 갑판 슬래밍 하중도 응력 관점에서는 심각한 하중으로 판단되지는 않았다.

Table 12 Result of cross deck slamming load

Rule	Displacement (mm)	Von Mises stress(MPa)	Allowable stress(MPa)
KR	1.21	0.18	33.63 / 39.24(shear)
Lloyd	1.2	0.18	36.99
ISO	0.93	0.14	36.99

Fig. 24 Displacement of cross deck slamming load (ISO)

7. 결 론

본 논문은 FRP 재질의 쌍동선 요트의 각 선급의 설계 규정을 검토하기 위한 목적으로 수행하였다. 이를 위하여 먼저 ISO, 로이드선급, 한국선급이 정한 쌍동선 설계 규정을 비교 검토하였다. 또한 각 규정별로 정한 설계 하중을 산정하고 그 특성을 비교하였다. 최종적으로는 이미 건조되어 운항 중인 50ft급 FRP 쌍동선 요트를 대상으로 주어진 설계 하중에 대한 응력 수준을 유한요소해석을 통하여 파악하였다. 산출된 최대응력과 각 규정에서 정의한 허용응력을 비교하여 안전성을 평가하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 50ft급 샌드위치 FRP 쌍동선을 대상으로 규정 계산 수행 시, 로이드선급 규정이 종굽힘 모멘트 322.4kN·m, 횡굽힘 모멘트 553.7kN·m, 비틀림 모멘트 716.3kN·m 등으로 한급선급 규정이나 ISO에 비해 가장 크게 나타났다. 뒤를 이어 한국선급 규정이 높게 나타났으며 ISO가 가장 작은 하중 값이 계산되었다.
- 2) 유한요소해석을 수행한 결과 종굽힘 모멘트에 의한 최대 응력은 1.4MPa, 횡굽힘에 의한 최대 응력은 18.4MPa, 비틀림에 의한 최대 응력은 9.6MPa, 선저나 연결부 갑판의 슬래밍에 의한 최대 응력은 약 0.2MPa로서 허용 응력인 37MPa에 크게 미치지 못하였다.
- 3) 구속 조건에 의한 응력집중 현상을 제외하고 각 하중 조건에 의한 응력분포를 살펴보면 주로 하중이 직접 작용하는 점과, 연결부 갑판과 선체사이에서 가장 높은 응력이 분포하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 다른 규정에 비해 전체적으로 가장 낮게 계산된 ISO 설계 하중을 토대로 FEM을 통한 정적 구조 강도 평가 시, 충분한 안전성을 가지고 있는 것으로 파악 되었다. 따라서 국내 규정 제정 시, ISO의 규정을 참고 한다면 과도한 설계가 되지 않도록 하는 합리적인 쌍동선 설계 기준이 되리라 판단된다.

5) 본 연구에서는 FEM을 통한 정적 구조 강도 평가를 수행하였으며, 허용응력에 크게 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 FRP 재질의 선박은 강재로 된 선박보다 충격이나 피로파괴에 취약하기 때문에 이에 대한 고려를 하지 않고서는 기존 규정들이 과도한 규정이라고 판단 내릴 수는 없다. 따라서 보다 정확한 구조 강도 평가를 위해 추후 연구로 FRP 쌍동선을 위한 FEM을 통한 동적 구조 강도 평가 기법 개발을 계획 중이다.

본 연구를 통해 국내외 선급 규정 및 국제 표준이 요구하는 설계 규정을 검토함으로써 간접적으로 국제표준에서 검토 중인 쌍동선 설계 규정에서 정한 안의 요구 수준을 파악하였다. 이를 통해 국내 쌍동선 규정의 제정을 위한 초안 마련에 기여하기를 바란다.

후 기

본 논문의 내용은 선박 안전 기술 공단의 개발 과제인 ‘쌍동선 연결부의 횡강도 구조안전성 평가기준 개발’ 연구 결과의 일부이며, 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cho, S.R., 1994. *A Rationally Based Structural Design of High Speed Catamarans-Part 1*. KOSEF Report No 91-0200-06.
- International Standard, 2008. Small craft - Hull construction and scantlings. *International Standard: Geneva*.
- International Standard, 2009. Small craft - Scantlings - Part 7 : Multihulls. *International Standard: Geneva*.
- Jang, C.D. & Kim, H.K., 1998. The Optimum structural design of the high-speed surface effect ship using composite materials minimum weight design. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(2), pp.94-103.
- Korea Register of Shipping, 2010. *Guidance Relating to the Rules for the Classification of High Speed Light Craft*. Korean Register: Deajeon.
- Korea Ship Safety Technology Authority, 2009. *Guidance Relating to the Rules for Aluminium Craft*. Incheon: Korea Ship Safety Technology Authority.
- Korea Ship Safety Technology Authority, 2009. *Guidance Relating to the Rules for FRP Craft*. Incheon: Korea Ship Safety Technology Authority.
- Larsson, L. & Eliasson, R.E., 1996. *Principles of yacht design*, Adlard Coles Nautical, London.
- Lloyd's Register, 2008. *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*. Lloyd's Register: London.
- Oh, Y.C. Ko, J.Y. Cho, D.H. & Lee, G.W., 2009. Estimation for the global strength and local strength analysis of 50 feet catamaran. *The 8th International Symposium on Marine Engineering*, Busan, Republic of Korea, pp.229~230.
- Park, C.H. et al., 2010. A Study on the Ship Resistance and Moment Prediction for Running Attitude of 30 Feet Catamaran Sailing Yacht. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.321-327.
- Shin, J.G. et al., 2006. A study on the Structural Design and Structural Analysis for Small Yacht. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.75-86.

김 병 중

권 수 연

김 성 찬

이 장 현