Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 10 pp. 418-423, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.418
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

8m급 고속 활주선형 레저보트의 구조강도 평가

고대은
동의대학교 조선해양공학과

Strength Assessment of 8m-class High-Speed Planing Leisure Boat

Dae-Eun Ko
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요 약 최근 국내에서는 해양레저 산업의 활성화와 세계 해양레저 시장 진출을 위해 고부가가치 레저선박에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 레저선박의 소재로는 물성이 우수하고 경량선체의 제작이 가능한 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 복합재료가 널리 사용되고 있으며, FRP 복합재료로 제작되는 레저선박의 구조안전성 확보를 위한 설계기술 개발이 중요한 연구개발 목표중의 하나가 되고 있다. 본 연구에서는 RTM(Resin Transfer Molding) 공법으로 제작되는 FRP 복합재료 소재의 샌드위치 판넬을 주 구조부재로 하는 8m급 고속 활주선형 레저보트의 설계안에 대하여 구조강도를 평가하였다. 한국선급의 고속 경구조선 규칙 및 적용지침에 의거하여 선체 구조 안전성 검증을 위한 선저 슬래밍 충격하중 분포를 구하고, 샌드위치 구조의 복합재료 판을 등가의 굽힘 강성을 갖는 단일 재료의 등방성 판으로 치환하여 구조 해석을 수행하였다. 해석 결과를 실 제작 부재 시험편에 대한 강도 시험 결과와 비교한 결과 모든 내부 구조부재가 요구 강도를 충분히 만족함을 확인하였다.

Abstract Recently, research and development of high-value leisure vessels has been carried out in Korea to revitalize the marine leisure industry and tap into the global maritime leisure market. FRP composite materials, which have excellent physical properties and are available for the manufacture of light hulls, are used widely. One of the most important design technologies is to secure structural safety of leisure vessels made from FRP composite materials. In this study, the structural strength was assessed for the design of an 8-meter high-speed planing leisure boat made from FRP composite materials. The design loads to verify the structural safety were calculated according to the rules for the classification of high speed light craft (KR, 2015), and structural analysis was conducted using a finite element model composed of an isotropic shell element, which has equivalent bending rigidity with the FRP sandwich panel. The analysis results were compared with the results of the strength test for fabricated specimens, and all internal structural components are sufficiently satisfied with the structural strength.

Keywords : Bottom Slamming, FRP, Leisure Boat, RTM, Strength Assessment

1. 서 론

최근 국내에서는 해양레저 산업의 활성화와 세계 해양레저 시장 진출을 위해 고부가가치 레저선박에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 레저선박의 소재로는 물성이 우수하고 경량선체의 제작이 가능한 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 복합재료가 널리 사용되고 있으며, FRP 복합재료로 제작되는 레저선박의 구조안전성 확보를 위한 설계기술 개발이 중요한 연구개발 목표중의 하나가 되고 있다.

소형 레저선박의 구조강도 평가에 관한 연구는 주로 FRP 복합재료를 사용한 단동선 및 쌍동선을 대상으로 이루어져 왔다. Shin 등[1]은 샌드위치형 FRP 재료를 사용한 소형 요트에 대해 기본 구조설계 및 구조해석을 위

*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)
Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr
Received July 27, 2018 Revised (1st August 17, 2018, 2nd August 20, 2018)
Accepted October 5, 2018 Published October 31, 2018

한 절차적 기법을 제시하였다. 그들은 당시 요트 설계에 대한 선급규정 등이 정립되지 않은 상황에서 국제표준화기구(ISO)와 미국선급(ABS)에서 제시하는 비공식 규정들을 혼용하였다. 이후 관련 연구들이 진행되어 왔으며 Yum 등[2]은 20피트급 파워보트의 구조강도 평가 및 최적화에 관한 연구에서 국제표준화기구, 로이드선급(LR) 및 한국선급(KR)에서 제시하고 있는 동적효과를 고려한 설계하중을 각각 산출하여 비교 검토하였다. 한편, 35노트 이상의 고속 레저보트 개발 관련 연구로는 Jeong 등[3]이 파랑관통형 고속 활주선의 실선 성능에 대한 유체역학적 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 FRP 복합재료를 사용한 8m급 고속 활주선형 레저보트의 설계안에 대하여 구조강도를 평가하였다. 한국선급의 '고속 경구조선 규칙 / 고속경구조선 규칙 적용지침(2015)'[4]에 의거하여 선체 구조 안전성 검증을 위한 설계하중을 산정하고, 샌드위치 구조의 복합재료 판을 등가의 굽힘 강성을 갖는 단일 재료의 등방성 판으로 치환하여 구조해석을 수행하였다. 해석 결과를 부재 시험편에 대한 강도 시험 결과와 비교하여 구조강도 만족여부를 검토하였다.

2. 선체구조 및 재료

2.1 구조 제원

8m급 고속 활주선형 레저보트의 설계안으로 작성된 선박의 주요 요목과 구조 배치도는 각각 Table 1, Fig. 1과 같다. 선박의 초기 스캔틀링(scantling)의 적절성과 강도는 한국선급의 'FRP선 규칙 / FRP선 규칙 적용지침(2015)'[5]에 의거하여 사전 검토하였으며, 여기서는 이에 대한 상세한 내용을 다루지 않는다.

Table 1. Principal particulars

Length Overall (LOA)	8.14 m
Length Between Perpendiculars (LBP)	8.1 m
Length of Waterline (LWL)	8.03 m
Moulded Breadth (B)	2.44 m
Moulded Depth (D)	0.8 m
Moulded Draft (T)	0.467 m
Design Speed (V)	45 knots
Block Coefficient (C_b)	0.329

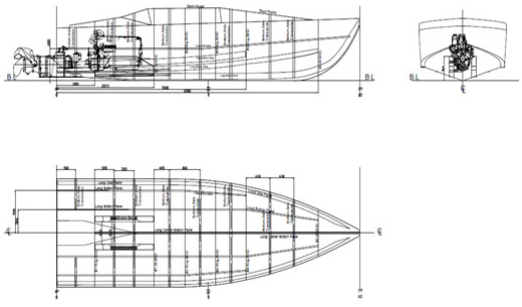


Fig. 1. Structural arrangement

2.2 구조 재료

일반적으로 보트는 경주와 유람을 목적으로 설계되며, 본 연구의 대상 선박과 같은 고속 활주선형 보트의 경우에는 선체의 경량화가 특히 중요하다고 할 수 있다.

FRP는 불포화 폴리에스테르 수지와 유리섬유로 이루어진 복합재료로서 성형이 용이하고 내식, 내열, 내구성이 좋으며, 비강도(specific strength)가 우수하므로 선체의 경량화에 유리하다.

FRP 선박의 구조부재는 PVC 폼과 같은 코어의 양면에 FRP가 덧붙여진 샌드위치 구조로 제작하는 것이 일반적이다. 본 연구의 대상 선박에 사용된 재료와 적층사양을 Table 2와 Table 3에 각각 정리하여 보였다.

샌드위치 구조의 제작에는 RTM(Resin Transfer Molding) 공법을 적용하였다. 제작된 구조 재료의 강도는 적층재의 구성, 적층 방법, 수지의 종류 등에 따라 달라질 수 있으며, RTM과 같은 진공적층법(vacuum infusion)은 수적층법(hand lay-up)에 비하여 50% 이상 강도가 우수한 것으로 알려져 있다[6].

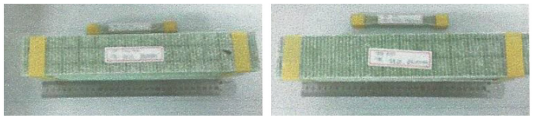
Table 2. Material specification

Mat. ID	Specification	
GC	Gel-Coat	0.4 mm
M	Mat	450 g/m^2
M'	Mat	300 g/m^2
R	Roving	570 g/m^2
U/F	Urethan Foam	0.035 g/m^3
PW	Marine Ply-Wood	12t
EDBM	Roving + Mat	825 g/m^2
C70.75	PVC Foam	80 g/m^3

Table 3. Laminate schedule and thickness

Str. ID	Laminate Schedule	Thickness
Hull/Deck Shell	GC+M+EDBM+C70.75(20t) +M'+EDBM	24.3 mm
House Shell		
W.BHD	GC+M+EDBM+C70.75(20t) +M'+EDBM	25.3 mm
Ring BHD		
Transverse	50*50UF+2M+R+M	3.9 mm
Longi. Btm/Side Panel	GC+2M+EDBM+C70.75(20t) +M'+EDBM	25.3 mm
E-Room BHD	M+R+M+PW(12t)+M+R+M	17.6 mm

실제 구조 재료의 강도 확인을 위해 Fig. 2와 같이 시험편 제작 및 국제공인 시험기관에 의뢰하여 강도 시험을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 정리하였다. 선체의 주요 구조부재에 대한 인장강도는 184MPa 이상인 것으로 나타났으며, 이 값은 선체구조 해석 결과의 안전성 판단을 위한 설계 기준 응력으로 활용할 것이다.



(a) Hull/Deck (b) BHD

Fig. 2. Material test specimens

Table 4. Material test result

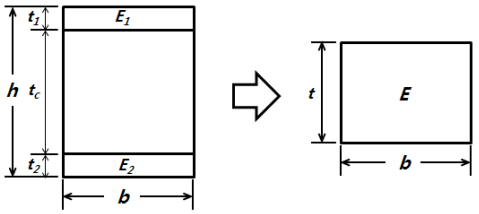
Specimen	Item	Value	Unit	Method
Hull /Deck	Tensile Strength	200	MPa	KS M ISO 527-4 : 2002
	Tensile Modulus	15.5	GPa	
	Flexural Strength	420	MPa	KS M ISO 178 : 2012
	Flexural Modulus	15.8	GPa	
BHD	Tensile Strength	184	MPa	KS M ISO 527-4 : 2002
	Tensile Modulus	12.4	GPa	
	Flexural Strength	560	MPa	KS M ISO 178 : 2012
	Flexural Modulus	34.2	GPa	

3. 선체구조 해석

3.1 재료 강도 평가

폭이 b인 샌드위치 구조부재의 단면에서 E_c, E_1, E_2와 t_c, t_1, t_2가 각각 코어, 상부FRP, 하부FRP의 탄성계수와 두께라고 하면, 일반적으로 $E_c \ll (E_1 \text{ or } E_2)$, $t_c \gg (t_1 \text{ or } t_2)$ 의 특징을 갖는다. 따라서 인장 및 압축강도 계산 시에는 코어의 역할을 무시할 수 있으나, 전단 및 굽힘강도 계산 시에는 그 역할이 크게 된다.

선체에 작용하는 하중은 여러 가지가 있으나, 보트의 길이가 짧으므로 선체 종방향 비틀림에 의한 전단응력은 무시할 수 있고, 샌드위치 구조부재의 응력은 주로 샌드위치 단면에 작용하는 굽힘모멘트에 의해 발생한다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 Shin 등[1]이 제안한 방법에 따라 샌드위치 구조의 복합재료 판을 등가의 굽힘 강성을 갖는 단일 재료의 등방성 판으로 치환하여 구조해석을 수행하였다(Fig. 3). 다만, 이러한 등가 치환 방법은 두께의 영향을 많이 받는 좌굴 평가에는 적절하지 않은 단점이 있다.



$$I_1 = \frac{bt_1(t_c+t_1)^2}{4} \qquad I_H = \frac{bt^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{bt_2(t_c+t_2)^2}{4} \qquad Z_H = I_H/(t/2)$$

$$I_S = I_1 + I_2$$

$$Z_S = I_S/(h/2)$$

$$Z_S = Z_H \quad \therefore\ t = \sqrt{\frac{12}{bh}\cdot I_S}$$

$$EI_H = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad \therefore\ E = \frac{1}{I_H}[E_1 I_1 + E_2 I_2]$$

Fig. 3. Equivalent isotropic shell element

3.2 구조해석 모델

전용 CAD 프로그램으로 작성한 보트의 CAD 데이터를 기반으로 Fig. 1의 구조배치도를 참조하여 구조해석 모델을 작성하였다. 기본적으로 보트의 3차원 CAD 데이터는 선체를 구성하는 모든 부재의 두께가 입체적으로 표현되도록 작성되므로, 이로부터 쉘요소를 이용한 유한요소해석 모델을 효율적으로 작성하기 위해 본 연구에서는 다음의 단계들을 거쳤다.

우선, AUTODESK INVENTOR(ver.2016)를 이용하여 각 구조부재의 중립면을 추출하고, 선체구조에 부합

하도록 중립면들의 겹침과 단절을 수정하여 새로운 CAD 데이터를 만들었다. Fig. 4에 중립면들로 표현된 대상보트의 내부 구조부재들을 명칭과 함께 보였다.

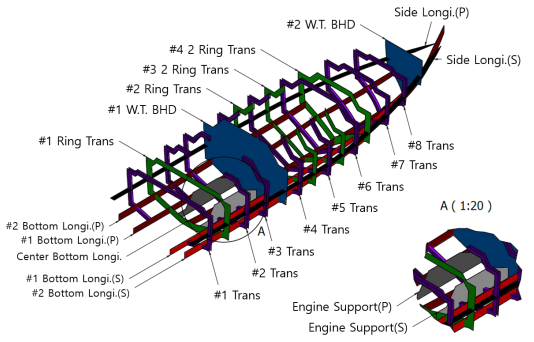


Fig. 4. Internal structural members

다음, 중립면들로 표현된 선체를 대상으로 ALTAIR HYPERMESH(ver.13.0)를 이용하여 유한요소 자동분할을 실시하였으며, 마지막으로, 자동 분할된 유한요소망을 MSC PATRAN(ver.2010)으로 읽어들여 자동 분할 시 발생한 오류사항들을 수정하고 구조해석을 위한 재료 물성치를 입력하였다.

전선 구조해석 모델에 사용된 유한요소의 크기는 선체 부재의 구조적 특징을 충분히 표현할 수 있도록 약 50×50 mm 내외로 하였으며, 전선 모델에 사용된 절점의 수는 27,917이고 유한요소의 개수는 29,688이다.

3.3 하중 조건

한국선급의 '고속 경구조선 규칙 / 고속경구조선 규칙 적용지침(2015)'[5]에 의거하여 선체 구조 안전성 검증을 위한 하중을 산정하였다. 흘수에 따라 작용하는 해수압력 P는 식(1)에 따라 계산하여 Table 5에 정리하였고, 설계 수직 가속도 a_{cg}는 식(2)에 따라 $19.21 m/s^2$으로 계산되었다. 또한, 선저 슬래밍 압력 P_{sl}은 식(3)에 따라 계산하여 Table 6에 정리하여 보였다. 계산에 필요한 각종 계수값은 동 규칙 및 적용지침에 제시된 해당 그래프 등으로부터 결정하였다.

계산 결과에서 알 수 있듯이 선저 슬래밍에 의한 하중조건이 지배적이므로 본 해석에서는 선저 슬래밍 충격압력을 설계하중으로 하고 이에 대한 구조안전성을 검토 대상으로 하였다.

$$P = 10h_0 + \left(k_s - 1.5\frac{h_0}{d}\right)C_w \quad (kN/m^2) \tag{1}$$

여기서,

h_0 = 만재흘수(d)에서의 수선으로부터 하중작용점까지의 거리(m)

k_s = 해수압력의 선박길이 방향의 분포계수

C_w = 파랑계수

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

여기서,

g_0 = 중력가속도 ($9.81 m/s^2$)

f_g = 가속도 계수

$\frac{V}{\sqrt{L}}$ = 3.0 이상일 필요 없음

$$p_{sl} = 1.3k_l\left(\frac{\triangle}{nA}\right)^{0.3} d_0^{0.7}\frac{50-\beta_X}{50-\beta_{cg}}a_{cg} \quad (m/s^2) \tag{3}$$

여기서,

k_l = 종방향 슬래밍 압력 분포 계수

n = 선체의 수(단동선 = 1, 쌍동선 = 2)

A = 부재의 설계하중 작용면적(m^2), $0.002\frac{\triangle}{d}$ 보다 작을 필요 없음

d_0 = 운항속도로 정상운항 상태에서 L의 중앙에서 측정한 흘수(m)

β_X = 고려하는 횡단면에서의 선저경사각도(최소 10°, 최대 30°)

β_{cg} = 선박의 종방향 무게중심에서의 선저경사각도 (최소 10°, 최대 30°)

Table 5. Sea pressure

Location	AP-0.5L	0.6L	0.8L	FP
h_0	0.467	0.467	0.467	0.467
k_s	7.5	9.1	12.2	15.3
d	0.467	0.467	0.467	0.467
Cw	0.648	0.648	0.648	0.648
P(kPa)	8.558	9.595	11.604	13.612

Table 6. Bottom slamming pressure

Location	AP	0.1L	0.3L	0.5L	0.6L	0.8L
β_X	22	22	23	28.5	30	30
k_l	0.5	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0
P_{sl}(kPa)	52.667	63.201	81.258	80.882	75.239	75.239

3.4 경계 조건

일반적으로 선박에 대한 전선구조해석을 수행하기 위해서는 구속에 의한 응력이 발생하지 않도록 단순지지 형태의 경계 조건을 적용하고, 경계조건에 의해 발생하는 불평형력을 제거하기 위해 해석 프로그램에서 제공하는 관성 제거(inertia relief) 기능을 사용하기도 한다. 그러나 본 해석의 목적은 슬래밍 압력에 의한 선체 보강 구조의 거동을 파악하고 안전성을 확보하는 것이므로, 선저 보강 구조가 슬래밍 압력을 직접적으로 감당하도록 하기위해 갑판 레벨의 선측 판에 고정 조건을 적용하였다. 경계 조건과 함께 선체의 길이 방향에 따라 계산된 슬래밍 하중 값을 선저의 충격압 작용 면적에 적용한 모습을 Fig. 5에 보였다.

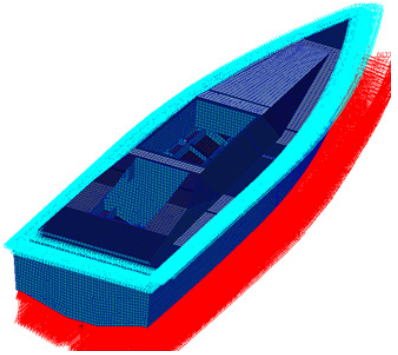


Fig. 5. Loading and boundary condition for bottom slamming

4. 해석 결과 및 고찰

구조 해석은 MSC NASTRAN(ver.2010)을 이용하여 수행하였다. 초기 해석 결과, 선체 내부 구조부재의 여러 지점에서 무시할 수 없는 국부 응력집중 현상이 나타나 몇 가지 보강이 이루어졌다. 주요 보강 사항으로는 선저 사이드거더(bottom side-girder)의 두께 증가와 엔드브라켓(end-bracket) 추가 설치, Partial Trans.의 Ring Trans.로의 변경 등이 있었으며, 이후로는 보강 사항들이 모두 반영된 최종 해석 결과에 대해 기술한다.

설계하중에 대한 유한요소 모델의 변형 형상을 Fig. 6에 보였다. 선저판을 제외한 내부 구조부재의 최대 변위는 9.9mm로 나타났다. 전체적인 변형 결과는 적용 하중에 대하여 합리적인 변형을 보여주고 있으며 이는 응력 해석 결과가 타당하다는 것을 의미한다.

또한, 설계하중에 대한 von-Mises 응력을 구조 부위별로 Fig. 7에 보였다. Ring BHD 국부 부위에서 최대 응력 95.9MPa이 발생하였고 전체적인 응력 수준은 70MPa 이하로 낮게 나타났다. 앞서 재료 강도 시험 결과에서 살펴본 바와 같이, 선체의 주요 구조부재의 인장 강도는 184MPa 이상이므로 해석 결과는 구조강도 상으로 상당히 여유가 있음을 알 수 있다.

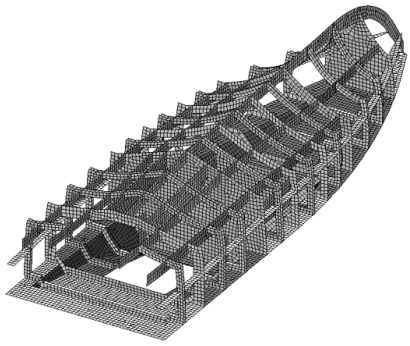
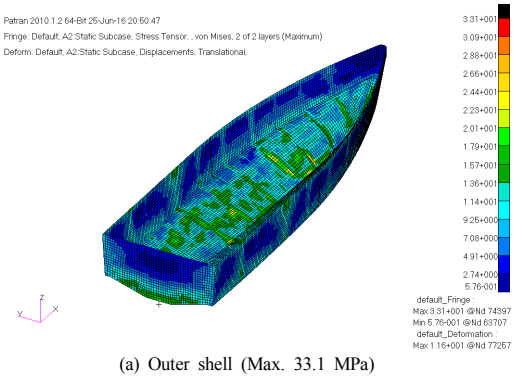
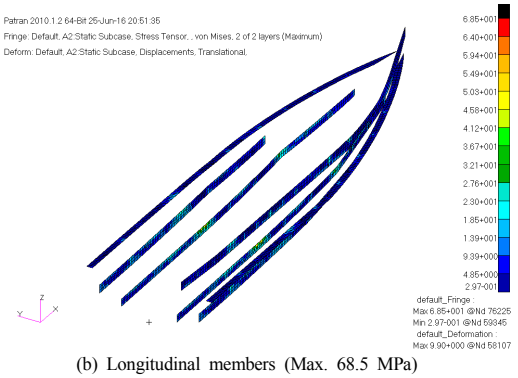


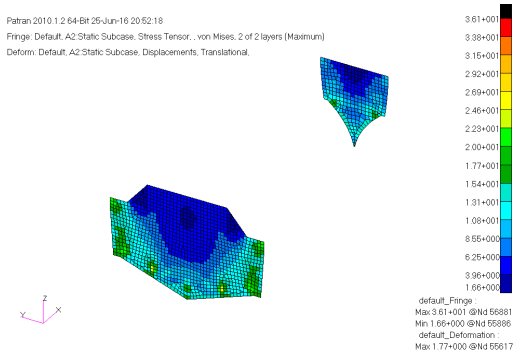
Fig. 6. Deformation results without outer shell (Max. 9.9 mm)



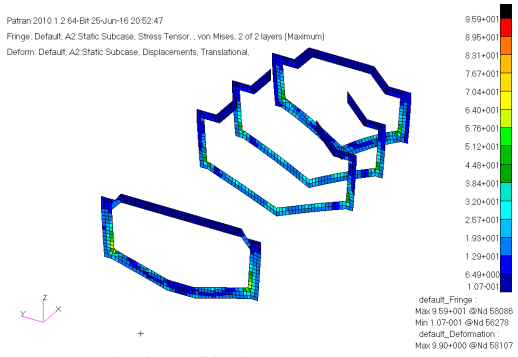
(a) Outer shell (Max. 33.1 MPa)



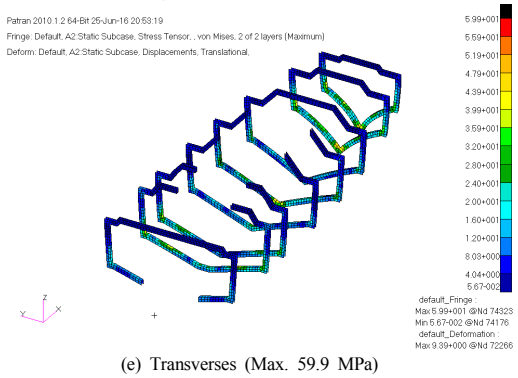
(b) Longitudinal members (Max. 68.5 MPa)



(c) Watertight Bulkheads (Max. 36.1 MPa)



(d) Ring Bulkheads (Max. 95.9 MPa)



(e) Transverses (Max. 59.9 MPa)

Fig. 7. von-Mises stress results

5. 결 론

본 연구에서는 FRP 복합재료를 이용한 8m급 고속 활주선형 레저보트의 설계안에 대한 구조강도 평가를 수행하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

1) 한국선급의 '고속 경구조선 규칙 / 고속경구조선 규칙 적용지침(2015)'에 의거하여 설계하중들을 산정하였으며, 선저 슬래밍에 의한 하중 조건이 지배적으로 나타나 선저 슬래밍 충격압력에 대한 구조안전성을 검토하였다.
2) 샌드위치 구조의 복합재료 판을 등가의 굽힘 강성을 갖는 단일 재료의 등방성 판으로 치환하여 구조해석을 수행하였으며, 해석 결과를 실 제작 부재 시험편에 대한 강도 시험 결과와 비교한 결과 모든 내부 구조부재가 구조강도를 만족하는 것으로 판단된다.
3) 향후 슬래밍 시의 최대 충격압력을 시계열로 산정하고 이에 대한 선체구조의 동적 거동을 파악하기 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

References

[1] J.G. Shin, J.Y. Lee, J.H. Lee, S.H. Van, S.H. Lee and J.H, Yoo, "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, 2006.

[2] J. S. Yum, J. Yoo, "Structural Strength Assessment and Optimization for 20 Feet Class Power Boat", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.53, No.2, pp.108-114, 2016.
DOI: https://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.2.108

[3] U. C. Jeong, C. W. Lee, S. C. Han, "Study on Sea Trial Analysis of Wave Piercing High Speed Planing Boat", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.31, No.5, pp.335-339, 2017.
DOI: https://dx.doi.org/10.26748/KSOE.2017.10.31.5.335

[4] Korean Register, Rules for the classification of high speed light craft, 2015.

[5] Korean Register, Rules for the FRP vessels, 2015.

[6] H.C. Song and J.S. Yum, "A Study of the Mechanical Properties of Fiberglass Reinforcements with Constitution of Lay-up, Manufacturing Method, and Resins", Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(5), pp.75-80, 2010.

고 대 은(Dae-Eun Ko) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>
선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계