



38ft급 HDPE 파워보트 구조해석을 통한 선급별 하중 기준에 대한 비교 고찰

문병영^{1,*} · 홍현진^{2,*} · 김대현² · 이원민³ · 이상목^{2,†}
군산대학교 조선해양공학과¹
군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터²
(주)디에이치³

Comparative Study on Load Criteria by Class Based on Structural Analysis of 38ft HDPE Power Boat

Byungyoung Moon^{1,*} · Hyeonjin Hong^{2,*} · Dae-Hyeon Kim² · Wonmin Lee³ · Sangmok Lee^{2,†}
Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan National University¹
Shipbuilding and Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University²
DH Co., Ltd³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

According to the government policy of environmental regulations, interest of ship, which made with High-Density Polyethylene (HDPE) as a low-carbon and eco-friendly material, is growing as a substitute for the existing fishery boat hull materials such as FRP, aluminum, steel etc. However, regulations related to the production of HDPE ship are still quite incomplete. Even there are no regulations related to structural analysis. Therefore, in this study, structural analysis is carried out by applying different design loads for each international classification for 38ft class HDPE power boats, and the results are compared and analyzed. According to this study, although there is a correlation between the based pressure value and the analysis result value of each class regulation, it is not necessarily proportional. Also, This analysis result shows a difference not only depending on the size of design load, but also application range of the load, the pressure adjustment factor and section shape. However, the occurrence point and trend of the maximum stress values were quite consistent. It is hoped that the results of this study will be used when establishing HDPE ship structure analysis procedures and standards in the future.

Keywords : HDPE(고밀도폴리에틸렌), HDPE vessel(고밀도폴리에틸렌 선박), Eco-ship material(친환경 선박 소재), Structural analysis(구조 해석)

1. 서론

최근 해양레저에 대해 국민의 관심이 높아지고 있으며, 정부에서도 레저 선박 산업의 활성화를 위해 연구개발을 활발히 하고 있다. 현재 상용되고 있는 Fiber Reinforced Plastics(FRP)와 알루미늄의 단점을 보완하고 국내외 환경오염 강화정책에 대응하기 위해 저탄소 친환경 재질인 고밀도폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE) 소재의 선박을 향한 관심이 높아지고 있다. HDPE는 이미 터키를 비롯한 유럽을 중심으로 활발히 연구 및 상

용화되어 가고 있으며, 해경 순찰선, 구조선, 레저선, 여객선, 관공선 등으로 점차 확대 적용되고 있다.

국내에서도 이러한 필요성에 따라 기존 선박 소재(FRP, 알루미늄 등)를 대신해 HDPE 소재의 레저선박을 개발하고자 하나, HDPE에 관한 규정은 전무한 상황이며, 소형선의 구조해석 관련 규정 또한 아직 상당히 미비한 수준이다.

지금까지 국내에서 수행되었던 소형선박 구조해석에 관한 연구는 주로 레저선박과 어선을 대상으로 이루어져 왔는데, 2009년 목포해양대학교에서는 38피트 보급형 고속 카타미란 요트의 구조해석을 수행하였다. 이때 주요 구조부재의 스캔틀링은 Det

Norske Veritas(DNV)와 Korean Register(KR) 규정을 사용하였고, 구조해석은 American Bureau of Shipping(ABS) 지침을 적용하였다 (Park et al., 2009). 이외에도 2014년에 Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) 레저선박의 구조설계를 위한 국제 규정 비교 및 분석에 관한 연구가 이루어졌고 (Oh et al, 2014), 슬래밍 하중에 대한 선급 규정별 파워보트의 최적 구조 및 구조 강도 평가 연구 (Yum and Yoo, 2016), FRP 복합재료를 사용한 8m급 고속 활주 선형 레저 보트의 설계안에 대한 구조강도평가에 대한 연구 (Ko, 2018)가 진행된 바 있다. 이후 티타늄 합금으로 제작한 레저보트의 구조설계를 위해 국제 선급 규정의 설계하중을 비교분석하고, 그 결과를 통해 선체 두께 추정치를 비교한 연구 (Yum, 2021)가 진행되었다.

이상에서 살펴본 바에 의하면, HDPE 재질 선박의 구조해석 연구는 거의 전무한 상황이며, 기존 소재 선박의 구조해석도 각 선급에서 제시하는 설계하중 및 하중 적용 범위에 대한 기준이 서로 상이하고, 해석 절차 및 기준에 대한 정의도 명확히 확립되지 않은 상황임을 알 수 있다. 이에 더 많은 후속 연구가 지속적으로 이어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 HDPE 재질의 레저선박인 38ft급 파워보트를 대상으로 International Organization for Standardization(ISO) 및 각 선급 규정에서 제시하는 설계하중 기준을 적용하여 구조해석을 수행하고자 한다.

소형선박의 경우에는 보호수역 내를 운항하고 선박길이도 짧아서 종굽힘, 전단 및 축하중을 적게 받기에 해양수산부 ‘알루미늄선의 구조기준’에서는 선박의 길이가 50 m 미만인 일반 경구조선에 대하여는 국부강도를 만족하면 종굽힘, 전단 및 축하중을 만족하는 것으로 간주한다고 제정되어 있다. 따라서 소형선박의 기존 구조해석은 구조 배치상 횡격벽 간의 간격이 가장 넓고 갑판상에 큰 개구부를 가지고 있어 구조적으로 가장 취약하다고 할 수 있는 기관실 구역을 중심으로 이루어져 왔다.

하지만 본 연구에서는 국부 스캔들링(local scantling)을 위해 산정된 설계하중을 구조해석에 적용하는 타당성에 대한 보다 정확한 분석을 위하여 선박 전체 길이에 대하여 설계하중을 적용하고 그 결과를 평가하였다.

2. 규정 검토

본 연구에서 적용한 설계하중 기준은 국제표준화기구(ISO)의 ISO 12215-5 (2012), 노르웨이선급(DNV)의 DNVGL-ST-0342 Craft 규정 (2016), 영국 선급 (Lloyd’s Register, LR)의 Classification of special service craft 규정 (2021), 한국선급 (Korean Register, 이하 KR)의 고속경구조선 규칙 (2022)에서 제시하는 설계하중을 각각 계산하여 적용하였다.

2.1 국제표준화기구(ISO)

ISO 12215-5는 섬유 강화 플라스틱, 알루미늄, 강재 합금의

재질로 된 선체의 설계하중 및 치수결정식을 제시하고 있으며, 선박길이 2.5 m~24 m, 최대 선속 50 knots 이하의 단동선에 적용된다. ISO 12215-5에서는 소형선박을 범선과 비범선으로 구분하고, 배수량 방식 및 활주 방식으로 나누어 설계하중을 제시하고 있다. 선저 및 선측하중은 동적하중계수 n_{CG} 를 통해 slamming 등의 충격하중을 고려하고 있으며, 선측하중은 깊이 변화에 따른 압력 변화를 고려하지 않고 있다. 본 연구에서 사용된 ISO 설계하중 기준은 다음 식에 의해 계산되었다.

선저압력 (P_{BMP} or P_{BMMIN} 중 큰 값 사용)

$$P_{BMP} = P_{BMPBASE} \times k_{AR} \times k_L \quad (kN/m^2) \quad (1)$$

$$P_{BMMIN} = 0.45m_{LDC}^{0.33} + (0.9 \times L_{WL} \times k_{DC}) \quad (kN/m^2) \quad (2)$$

여기서,

P_{BMP} : 활주 방식에서 비범선 선저압력 (kN/m^2)

P_{BMMIN} : 비범선의 선저 최소압력 (kN/m^2)

$P_{BMPBASE}$: 활주방식에서 비범선의 기본선저압력(kN/m^2)
 $= (0.1m_{LDC}/L_{WL}B_C) \times (1 + k_{DC}^{0.5} \times n_{CG})$

$P_{DM} = P_{DMBASE} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \quad (kN/m^2)$

m_{LDC} : 선박에 적재된 배수량 중량 (kg)

L_{WL} : m_{LDC} 에서 만재 수선의 길이 (m)

B_C : 차인 보(chine beam) (m)

k_{DC} : 설계범주계수

n_{CG} : 동적하중계수 $= (0.5 \times V)/m_{LDC}^{0.17}$

V : m_{LDC} 에서 최대 속력 (knots)

k_{AR} : 면적압력감소계수 $= (k_R \times 0.1 \times m_{LDC}^{0.35})/A_D^{0.3}$

k_R : 구조부재 및 선종에 대한 계수

A_D : 설계면적 (m^2)

k_L : 종방향 압력분포계수

$$= \frac{1 - 0.167 \times n_{CG}}{0.6} \frac{x}{L_{WL}} + 0.167 \times n_{CG}$$

x : m_{LDC} 조건에서 L_{WL} 의 후단으로부터 해당 패널의 중심 또는 보강재의 중간까지의 종방향 거리(m)

선측압력 (P_{SMD} or P_{SMMIN} 중 큰 값 사용)

$$P_{SMD} = [P_{DMBASE} + k_Z \times (P_{BMPBASE} - P_{DMBASE})] \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \quad (kN/m^2) \quad (3)$$

$$P_{SMMIN} = 0.9L_{WL} \times k_{DC} \quad (kN/m^2) \quad (4)$$

여기서,

P_{SMD} : 활주 방식에서 비범선 선측압력 (kN/m^2)

P_{SMMIN} : 비범선의 최소 선측압력 (kN/m^2)

P_{DMBASE} : 기준 갑판압력 $= 0.35L_{WL} \times 14.6 \quad (kN/m^2)$

k_z : 선측압력감소계수 = $(Z-h)/Z$
 Z : 만재흘수선 위의 선체 상부 또는 선체/갑판 한계의 높이 (m)
 h : 만재흘수선 위의 패널 중심 또는 보강재 중앙의 높이 (m)

갑판압력 (P_{DM} or P_{DMBASE} 중 큰 값 사용)

$$P_{DM} = P_{DMBASE} \times k_{AR} \times k_{DC} \times k_L \quad (kN/m^2) \quad (5)$$

$$P_{DMBASE} = 5 \quad (kN/m^2) \quad (6)$$

여기서,

P_{DM} : 비범선의 갑판압력 (kN/m^2)

P_{DMBASE} : 비범선의 기준 갑판압력 (kN/m^2)

2.2 노르웨이선급(DNV)

DNV는 DNVGL-ST-0342에서 폴리에틸렌(polyethylene), 강, 알루미늄, FRP 재질로 된 선체의 설계하중 및 치수 결정 식을 제시하고 있으며, 선박길이 6 m~24 m, 최대 선속 45 knots인 선박에 적용된다. DNV 규정에서 제시하는 선저 및 선측하중은 slamming 등의 충격하중은 고려되어 있지 않으며, 선측하중은 깊이 변화에 따른 압력 변화를 고려하고 있다. 본 연구에서 사용된 DNV 설계하중 기준은 다음 식에 의해 계산되었다.

선저압력

$$P_b = PF_b \cdot k_{ib} \cdot k_\beta \cdot k_a \quad (kN/m^2) \quad (7)$$

여기서,

PF_b : 압력계수

k_{ib} : 해수압의 종방향분포계수

k_β : 선저경사각 보정계수. 최대 22°

k_a : 기준면적 A_r 에 대한 설계면적 A_d 의 크기를 고려한 면적축소계수

선측압력

$$P_s = PF_s \cdot k_{is} \cdot k_v \cdot k_a \quad (kN/m^2) \quad (8)$$

여기서,

PF_s : 압력계수

k_{is} : 세로분포계수 = $(F_v - h)/F_v$

$F_v = (4.5 \Delta)/1000LB$

h : 선체 측부와 하부의 전환점에서 하중점까지의 거리 (m)

k_v : 종방향분포계수

갑판압력

$$P_d = k_d \cdot L + 4.5 \quad (kN/m^2) \quad (9)$$

여기서,

k_d : F.P.에서 전방 0.25L의 노출된 주 노출갑판 및 선루갑판 = 0.2, 이 외에 노출된 상부 구조 데크 = 0.1.

거주갑판 및 화물용 갑판압력

$$P_{de} = 10H(1 + 0.2(V/\sqrt{L})) \quad (10)$$

여기서,

H : 갑판 화물 (t/m^2)

2.3 영국선급(LR)

LR의 Classification of special service craft 규정은 강, 알루미늄 합금, 복합재료 등으로 제작된 고속선, 경량 배수선, 다중 선체 선박, 선박길이 24 m 이상의 요트, 흘수 대 깊이 비율이 0.55 이하인 보트의 설계하중 및 치수 결정 식을 제시하고 있다. 여기서 고속선은 최대 선속 $7.19 \nabla^{1/6}$ knots 이상의 선박을 말한다. ∇ 은 대상 선박의 만재배수용적으로 이에 따라 $7.19 \nabla^{1/6}$ 을 계산했을 때, 그 값보다 큰 선속을 가진 선박의 경우 고속선임을 뜻한다. LR 규정의 선저압력은 hydrostatic pressure와 hydrodynamic wave pressure를 합하여 고려하고 있으며, 선측하중은 깊이에 따라 선형적으로 변화하는 hydrodynamic wave pressure에 대하여 고려한다. Slamming으로 인한 impact pressure는 선박에 따라 displacement mode와 non-displacement mode로 나누어 정의하고 있다. 본 연구에서 사용된 LR 설계하중 기준은 다음 식에 의해 계산되었다.

정수압

$$P_h = 10(T_x - (z - z_k)) \quad (kN/m^2) \quad (11)$$

여기서,

T_x : 고려 중인 종방향 위치의 용골 밑면에서 운항 흘수선까지 측정된 거리

z : baseline에서 무게중심 위치까지의 수직거리 (m)

z_k : baseline에서 용골 밑면까지의 수직거리 (m)

유체역학적 파동압력 (P_m or P_p 중 큰 값을 사용)

$$P_m = 10f_z H_{rm} \quad (kN/m^2) \quad (12)$$

여기서,

f_z : 종방향분포계수 = $k_z + (1 - k_z)((z - z_k)/T_x)$

$k_z = e^{-u}$

$u = (2\pi T_x/L_{WL})$

$H_{rm} = C_{w,\min} \left(1 + \frac{k_r}{(C_b + 0.2)} \left(\frac{x_{wl}}{L_{WL}} - x_m\right)^2\right)$

$C_{w,\min} = C_w/k_m$

$C_w = 0.0771L_{WL}(C_b + 0.2)^{0.3} e^{(-0.0044L_{WL})}$

$$k_m = 1 + (k_r(0.5 - x_m)^2 / (C_b + 0.2))$$

k_r : 선체파압계수

x_{wl} : L_{WL} 끝에서부터 고려 중인 위치까지의 거리 (m)

$$x_m = 0.45 - 0.6F_n$$

L_{WL} : 흘수선 길이(m)

$$P_p = 10H_{pm} \quad (kN/m^2) \quad (13)$$

여기서,

$$H_{pm} = 1.1(2x_{wl}/L_{WL} - 1)\sqrt{L_{WL}}$$

$$H_{pm} \geq f_L\sqrt{L_{WL}}$$

$$f_L = 0.6 \text{ for } L_{wl} < 60$$

갑판압력

$$P_{wl} = f_L(5 + 0.01L_{WL})(1 + 0.5a_v) + E \quad (kN/m^2) \quad (14)$$

여기서,

f_L : 갑판의 위치계수

$$a_v = 1.5\theta_B L_1 (H_1 + 0.084)(5 - 0.1\theta_D) \Gamma^2 \times 10^{-3}$$

θ_B : 운항 중 트림 각도 (°)

$$L_1 = (L_{WL} B_C^3) / B_W \Delta$$

B_C : 차인 또는 빌지 접선 사이의 선체 폭 (m)

B_W : 흘수선에서 측정한 LCG에서의 선체 폭 (m)

$$H_1 = H_{1/3} / B_W$$

$H_{1/3}$: 유효파고높이 (m)

θ_D : LCG에서의 선저경사각도 (°)

Γ : 테일러지수

선저 충격압력

$$P_{dlb} = (f_d \Delta \Phi (1 + a_v)) / (L_{WL} G_0) \quad (kN/m^2) \quad (15)$$

여기서,

f_d : 선형압력계수, 단동선은 54.

Φ : 1.0

G_0 : 하중 작용 범위 내의 선저 둘레 (m)

선측 충격압력

$$P_{dls} = P_{dlb} \times (\tan(40 - \theta_B) / \tan(\theta_S - 40)) \quad (kN/m^2) \quad (16)$$

여기서,

θ_S : 선측부 각도 (°)

2.4 한국선급(KR)

KR의 고속경구조선 규격에는 강, 내식 알루미늄 합금, 강화

플라스틱(FRP) 등의 재질로 된 경구조선 또는 고속경구조선에 대한 설계하중 및 치수 결정식을 제시하고 있다. 여기서 경구조선은 만재배수량이 $(0.13LB)^{1.5}$ ton 이하인 선박을 말하며, 고속경구조선은 최대속력이 25 knots 또는 $7.16 \nabla^{0.1667}$ knots 또는 $3.7 \nabla^{0.1667}$ m/s 중 큰 것 이상인 경구조선을 말한다. KR 규정에서 선저하중은 slamming으로 인한 impact pressure로만 정의되어 있으며, 선측하중은 만재흘수선을 기준으로 상부와 하부로 나뉘어 정의되어 있다. 본 연구에서 사용된 KR 설계하중 기준은 다음 식에 의해 계산되었다.

선저 슬래밍압력

$$P_{sl} = 1.3k_l \left(\frac{\Delta}{nA} \right)^{0.3} d_o^{0.7} \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} a_{cg} \quad (kN/m^2) \quad (17)$$

여기서,

k_l : 종방향 슬래밍 압력 분포 계수

n : 선체의 수, 단동선인 경우=1, 쌍동선인 경우=2

A : 고려하는 부재의 설계하중 작용면적 (m²)

d_o : 운항속도시 정상운항상태에서 L 의 중앙에서 측정한 흘수 (m)

β_x : 고려하는 횡단면에서의 선저경사각도. 최소 10°, 최대 30°.

β_{cg} : 선박의 종방향 무게중심에서의 선저경사각도. 최소 10°, 최대 30°.

a_{cg} : 설계수직가속도

$$= \frac{k_h g_0}{1650} \left(\frac{H_s}{B_{WL}} + 0.084 \right) (50 - \beta_{cg}) \left(\frac{V}{\sqrt{L}} \right)^2 \frac{L B_{WL}^2}{\Delta} \quad (m/s^2)$$

k_h : 선체형상에 따른 형상계수, 단동선은 1.0.

g_0 : 중력가속도 (m/s²)

H_s : 유효파고의 높이 (m)

B_{WL} : L 의 중앙에서 측정한 수선 상 각 선박의 너비 (m)

해수압력

$$P = ak_s (C_w - 0.67h_o) \quad (kN/m^2) \quad (\text{만재흘수선 상부}) \quad (18)$$

$$P = 10h_o + (k_s - 1.5h_o/d) C_w \quad (kN/m^2) \quad (\text{만재흘수선 하부}) \quad (19)$$

여기서,

h_o : 만재흘수(d)에서의 수선으로부터 하중 작용점까지의 거리 (m)

k_s : 해수압력의 선박길이 방향의 분포계수. L 의 중앙에서 선미단 = 7.5, 선수단의 앞쪽 = $5/C_b$, 그 사이는 보간법으로 한다.

C_w : 파랑계수

a : 노출건현갑판 및 선측 = 1.0, 건현갑판 상방의 노출갑판 = 0.8.

3. 선체 구조해석

본 연구의 대상 선박은 Fig. 1의 국내 최초로 개발된 HDPE 파워보트의 시제선 실데이터를 기반으로 하였고, Fig. 2와 같이

유한요소모델링 및 구조 이상화를 수행하였다.

구조해석에 사용된 전/후처리(pre/post processing) 프로그램은 한국선급(KR) SeaTrust-HullScan을 사용하였고, Solver는 MSC Nastran을 사용하였다. HDPE 파워보트 시제선의 3D 형상 및 주요 제원은 다음과 같다(Fig. 3, Table 1 참조). 유한요소 모델의 element 수는 8,430개, node 수는 7,235개이며, 외판, 갑판, 종/횡격벽, 웹 프레임 등은 판 요소(shell element), 선축 및 선저 종늑골, 횡격벽 보강재 등은 보 요소(beam element)로 모델링하였다. 본 해석에 사용된 단위는 하중은 N, 길이는 mm, 응력은 N/mm²이다. 유한요소모델의 요소 크기(mesh size)는 한국선급(KR)의 '선급 및 강선규칙, 부록 3-2 직접강도평가에 관한 지침'에 따라 종방향 늑골(longitudinal stiffener) 간격인 200×200 mm으로 모델링 하였다.



Fig. 1 HDPE power boat prototype

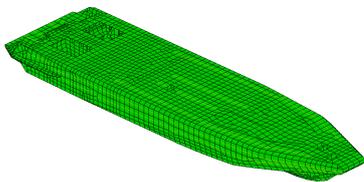


Fig. 2 Finite-element model



Fig. 3 Rhino 3D model

Table 1 Principal dimensions

Hull dimensions	Unit	Value
Length overall (L _{OA})	m	16.03
Length of waterline (L _{WL})	m	13.54
Moulded breadth (B)	m	4.0
Moulded depth (D _{mid})	m	2.05
Full load weight	ton	19.1
Full load draft (T)	m	0.97
Maximum speed	knots	40

3.1 재료물성치

본 연구 대상 선박의 선체 재질은 HDPE 소재의 해양 적용을 위해 원료 및 안료의 배합을 통하여 새로 개발한 신소재인 마린용 HDPE 소재이다. 마린용 HDPE 소재 선박의 구조해석에 앞서 정확한 재료물성치 파악이 필요하였기에 American society for testing and materials(ASTM)의 ASTM D638의 규정에 따라 5개의 시편을 제작하여 23±2°C, 상대습도 50±5%의 환경에서 인장시험을 진행하였고, 본 연구에서는 시편 시험 결과의 평균값을 기준으로 Table 2와 같이 적용하였다(Fig. 4, Fig. 5 참조).



Fig. 4 Test specimen

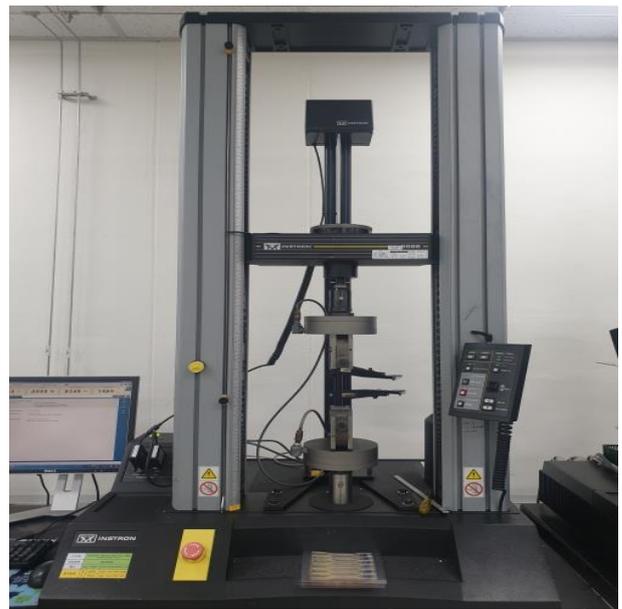


Fig. 5 Tensile strength test

Table 2 Material properties

Material	
Elastic modulus [MPa]	1286
Density [ton/mm ³]	9.52e-10
Poisson's ratio	0.46
Yield strength [MPa]	30
Tensile strength [MPa]	33

3.2 하중조건

본 연구 대상 선박에 작용하는 하중은 크게 해수에 의한 외력과 엔진 무게에 의한 내력이 대부분을 차지한다.

해수에 의한 외력, 즉 해수압력은 ISO 및 각 선급 규정 설계하중에 따르면 크게 선저부, 선측부, 갑판부로 나뉘어 명시되어 있다. ISO 규정의 선저압력은 선미에서 선수로 갈수록 증가하는데, 이는 슬래밍하중이 고려된 종방향 압력조정계수 k_z 에 의한 것이며, 선측압력 또한 압력조정계수 k_L , k_z 에 따라 선박의 길이 방향으로 변화한다.

반면 DNV 규정의 선저압력은 ISO 규정과는 반대로 선미에서 선수로 갈수록 감소하는데, 이는 압력조정계수가 슬래밍하중을 고려하지 않으며, 단면 형상 변화에 따른 영향만을 받기 때문이다. 즉 DNV 규정은 설계하중에 슬래밍하중과 같은 충격하중을 고려하지 않음을 알 수 있다. 선측압력은 압력조정계수 k_a , k_s 에 따라 선박의 길이 방향, 높이 방향 모두 변화한다.

LR 규정에서는 hydrostatic pressure 및 hydrodynamic wave pressure를 합한 combined pressure와 slamming으로 인한 impact pressure를 따로 고려하도록 정의되어 있는데, 그에 따라 Table 3과 같이 LC1, LC2로 하중조건을 구분하여 적용하였다.

LC1 combined pressure의 선저압력은 선미에서 선수로 갈수록 증가하며, 선측압력은 선박의 길이 방향, 높이 방향 모두 변화한다. LC2 impact pressure의 선저 및 선측압력은 선수로 갈수록 감소하는데, 이는 단면 형상의 변화에 따른 영향을 받기 때문이다.

KR 규정의 선저압력은 슬래밍으로 인한 impact pressure로만 정의되어 있기에 길이 방향의 슬래밍 압력 분포계수 k_a 에 의해 선수로 갈수록 압력이 점차 증가한다. 반면, 선체 중앙부를 지나면서는 오히려 점차 감소하는 경향을 보이는데, 이는 선수로 갈수록 단면 형상의 변화 때문에 침수 표면적이 급격히 줄어들기 때문이다. 선측압력은 만재흡수선 상부 및 하부로 구분되어, 종방향 압력조정계수 k_a 에 따라 선박의 길이 방향으로 변화한다.

ISO 및 각 선급 규정의 계산식에 따라 산출한 선저부 및 선측부의 설계하중은 각각 Table 4, Table 5에 나타내었고, Table 6과 같이 적용하였다. 또한, 엔진 하중은 Table 7과 같이 계산하여 선미부 기관실에 Fig. 6과 같이 적용하였다.

Table 3 Load case of LR regulation

LC1	Combined pressure (Hydrostatic pressure + Hydrodynamic wave pressure)
LC2	Impact pressure

Table 4 Sea pressure on bottom shell (Unit : MPa)

Regulation	A.P. - Fr.8	Fr.8 - Fr.14	Fr.14 - Fr.17	Fr.17 - F.P.	
ISO	0.0471	0.0512	0.0586	0.0760	
DNV	0.0400	0.0395	0.0395	0.0392	
LR	LC1	0.0221	0.0221	0.0221	0.0358
	LC2	0.1581	0.1367	0.1367	0.1024
KR	0.0515	0.0561	0.0623	0.0442	

Table 5 Sea pressure on side shell (Unit : MPa)

Regulation		A.P. - Fr.8	Fr.8 - Fr.17	Fr.17 - Fr.20	Fr.20 - F.P.	
ISO	0-1.0h	0.0119	0.0114	0.0118	0.0117	
	1.0h	0.0050	0.0049	0.0060	0.0075	
DNV	0.8h	0.0062	0.0062	0.0075	0.0094	
	0.6h	0.0075	0.0074	0.0091	0.0113	
	0.4h	0.0088	0.0087	0.0106	0.0132	
	0.2h	0.0100	0.0099	0.0121	0.0151	
LR	LC1	1.0z	0.0120	0.0120	0.0120	0.0148
		0.8z	0.0145	0.0145	0.0145	0.0200
		0.6z	0.0171	0.0171	0.0171	0.0253
		0.4z	0.0196	0.0196	0.0196	0.0305
		0.2z	0.0221	0.0221	0.0221	0.0358
LC2	0-1.0z	0.0563	0.0373	0.0373	0.0151	
	KR	Above waterline	0.0073	0.0073	0.0090	0.0134
Lower waterline		0.0133	0.0133	0.0156	0.0214	

Table 6 Sea pressure

Regulation	Bottom pressure	Side pressure	
ISO			
DNV			
LR	LC1		
	LC2		
KR			

Table 7 Engine load calculation

Engine weight	721kg
Total load by engine weight	7073.01N
Gravitational acceleration	9.81m/s ²
The number of nodes of the load point	45EA
Force per node	157.18N

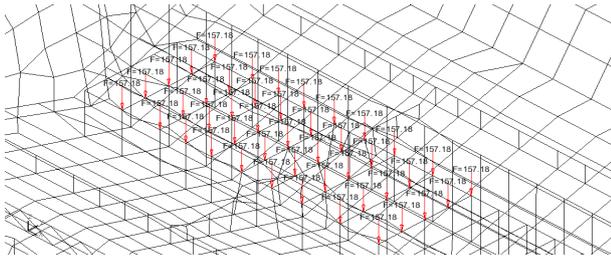


Fig. 6 Engine load for F.E.A

3.3 경계조건

해석에 고려된 경계조건은 Fig. 7, Fig. 8과 같이 모델 양단에 단순지지 조건을 적용하였으며, 구속에 의한 영향(Boundary Effect)을 최소화하기 위해 구조 관심 부위에서 최대한 떨어진 지점을 구속하였다. 구속조건은 선수/선미부 양단의 단면에 다중점 구속조건(Multi-Point Constraint, MPC)을 적용한 RBE2(Rigid Body Element)로 구속하였으며, 선수부 구속점 position A, 선미부 구속점 position B에 Table 8과 같이 6 자유도(DOF)를 적용하였다.

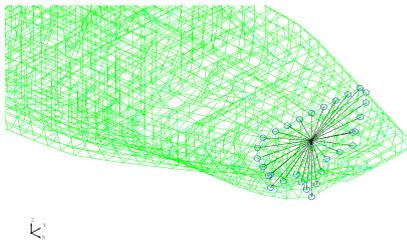


Fig. 7 Boundary condition of FWD (Fr.30 BHD)

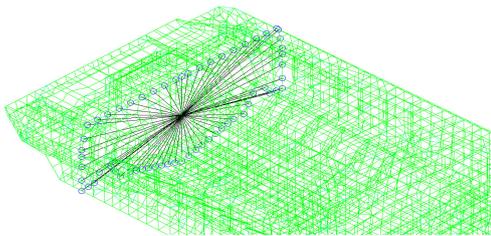


Fig. 8 Boundary condition of AFT (Fr.1 web frame)

Table 8 Six degree of freedom

Constraints position	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Position A (FWD)	-	fix	fix	fix	-	-
Position B (AFT)	fix	fix	fix	fix	-	-

X : Longitudinal axis
 Y : Transverse axis
 Z : Vertical axis

4. 해석 결과

본 구조해석을 통하여 HDPE 선체 재질을 가진 소형선박의 주

요 구조부재의 구조 강도를 평가해보았다. 구조 강도 평가는 부재가 영구변형을 일으키지 않는 상태, 즉 탄성 영역 내의 항복강도(yield strength)를 기준으로 평가하였으며, 응력(stress) 값은 등가응력(equivalent stress)으로 평가하였다.

Fig. 10는 선박길이 방향의 전체적인 변형을 ISO 및 각 선급 규정별로 비교하여 보여주고 있는데, 대체로 모든 규정에서 선체 종강도(hull girder strength) 최대 종굽힘(max. bending)의 발생은 호킹(hogging) 상태의 변형에서 일어남을 알 수 있다. 이는 해석 대상 선박인 파워보트가 화물, 밸러스트 등의 내력이 거의 없는 활주형 레저 선박이기 때문에 해수 압력에 의한 외력이 내력에 비해 상대적으로 크게 작용함을 알 수 있다.

해석 결과, 선저부 및 선측부, 갑판부, 격벽, 횡능골 등 선체 주요 구조 부재의 von Mises stress를 Fig. 10~15에서와 같이 각각 보여주고 있으며, 이를 살펴보면 max. von Mises stress의 발생지점 및 경향은 상당히 일치함을 알 수 있었다. 각 주요 구조부재의 max. von Mises stress를 Table 9에 요약하였다.

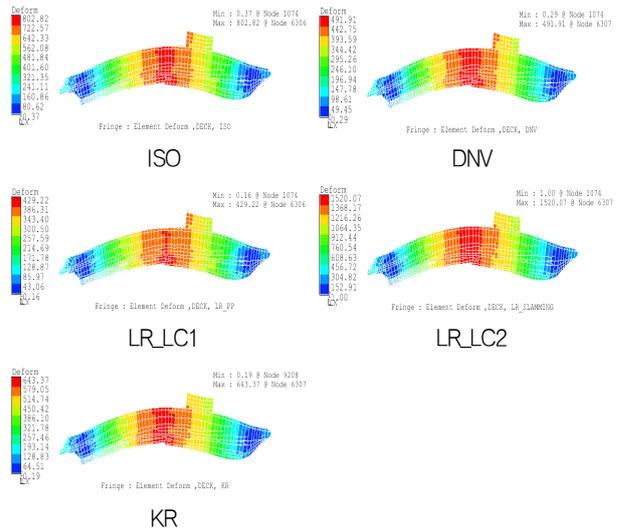


Fig. 9 Hull deformation

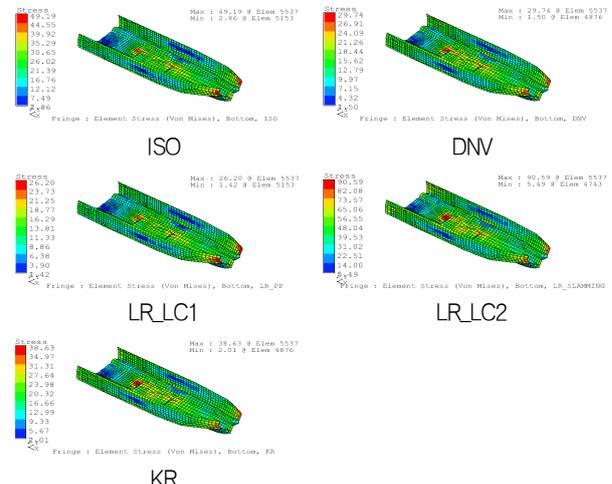


Fig. 10 von Mises stress (outer shell)

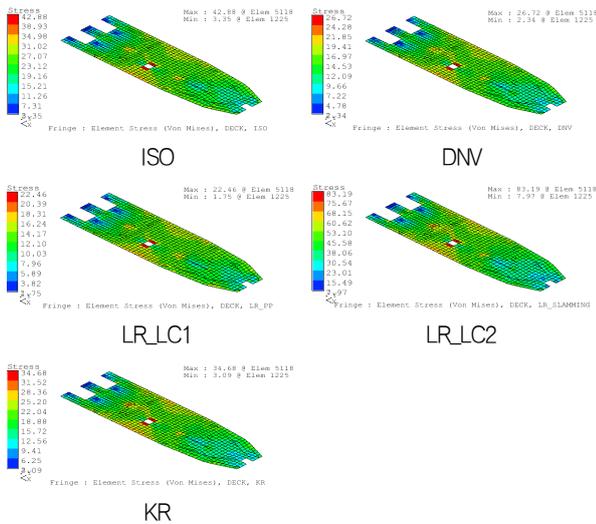


Fig. 11 von Mises stress (upper deck)

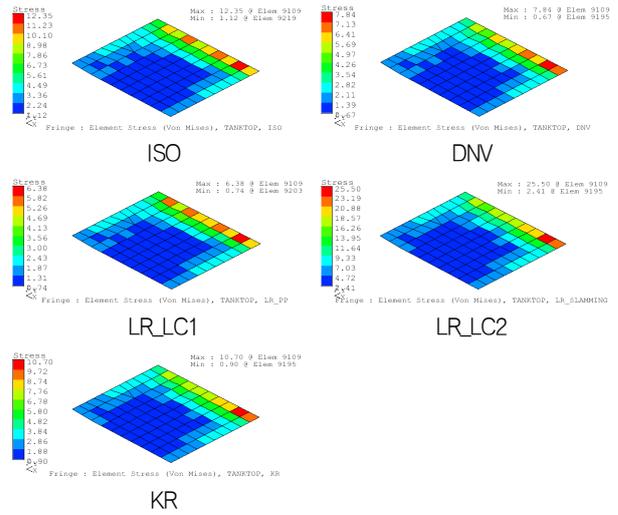


Fig. 14 von Mises stress (tank top)

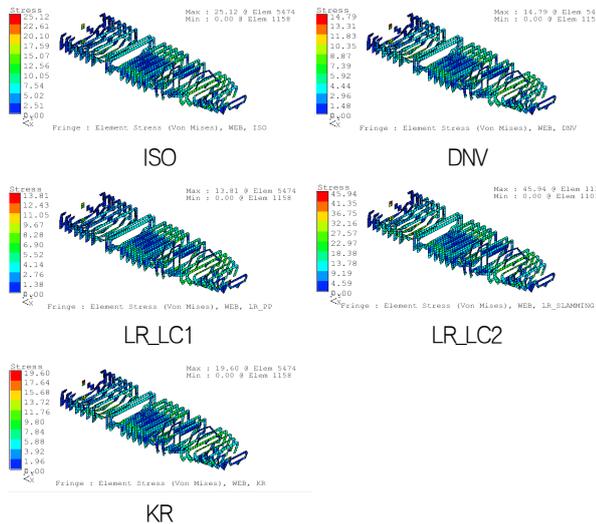


Fig. 12 von Mises stress (web frame)

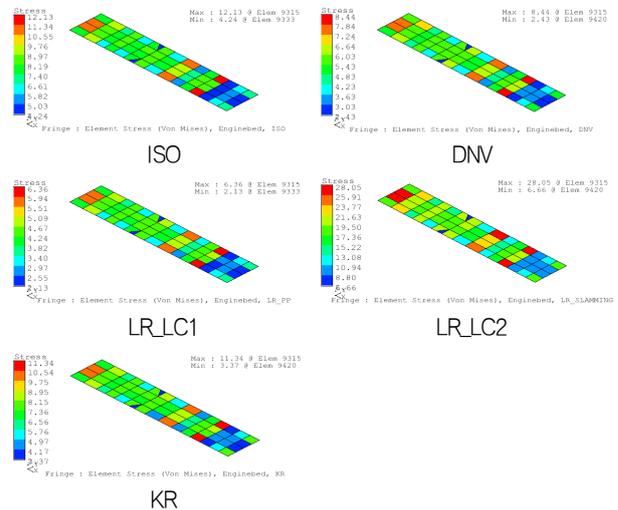


Fig. 15 von Mises stress (engine bed)

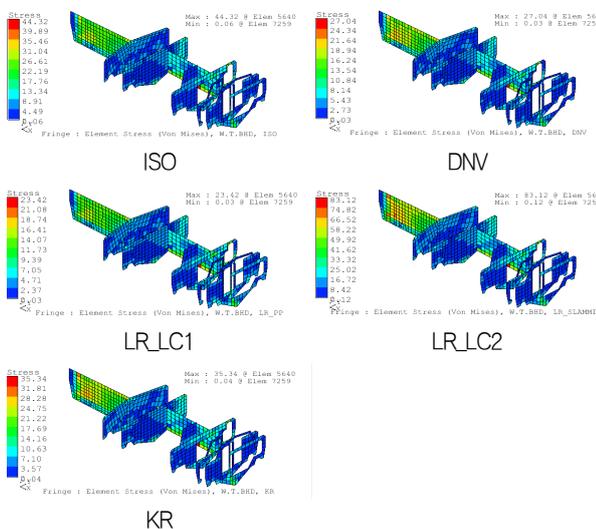


Fig. 13 von Mises stress (BHD)

Table 9 Result summary

Position	Regulation	Max. von Mises stress (MPa)	
Bottom shell	ISO	39.71	
	DNV	25.80	
	LR	LC1	20.97
		LC2	82.74
	KR	34.46	
Side shell	ISO	31.02	
	DNV	19.11	
	LR	LC1	16.36
		LC2	60.49
	KR	25.45	
Upper deck	ISO	42.88	
	DNV	26.72	
	LR	LC1	22.46
		LC2	83.19
	KR	34.68	

Table 9 Continued

Position	Regulation	Max. von Mises stress (MPa)	
Web frame	ISO	25.12	
	DNV	14.79	
	LR	LC1	13.81
		LC2	45.94
KR	19.60		
W.T. BHD	ISO	14.35	
	DNV	9.13	
	LR	LC1	7.84
		LC2	29.51
KR	12.66		
N.W.T. BHD	ISO	44.32	
	DNV	27.04	
	LR	LC1	23.42
		LC2	83.12
KR	35.34		
Tank top	ISO	12.35	
	DNV	7.84	
	LR	LC1	6.38
		LC2	25.50
KR	10.70		
Engine bed	ISO	12.13	
	DNV	8.44	
	LR	LC1	6.36
		LC2	28.05
KR	11.34		

Table 10, Table 11에서는 선저부와 선측부에 대하여 각각의 규정별 설계하중과 해석 결과값을 ISO 규정을 기준으로 백분율 환산하여 비교해 보았다.

Table 10 Comparison of result on bottom shell

Regulation	Design load (MPa)	Ratio	Result (MPa)	Ratio	
ISO	0.0584	100%	39.71	100%	
DNV	0.0396	68%	25.80	65%	
LR	LC1	0.0255	44%	20.97	52%
	LC2	0.1335	228%	82.74	208%
KR	0.0535	92%	34.46	87%	

Table 11 Comparison of result on side shell

Regulation	Design load (MPa)	Ratio	Result (MPa)	Ratio	
ISO	0.0117	100%	31.02	100%	
DNV	0.0088	75%	19.11	62%	
LR	LC1	0.0104	89%	16.36	53%
	LC2	0.0365	311%	60.49	195%
KR	0.0126	108%	25.45	82%	

네 가지 규정에서 산출한 설계하중은 적용 위치에 따라 차이는 있지만 대체로 LR_LC2 > KR > ISO > DNV > LR_LC1 순이었으며, 해석 결과는 LR_LC2 > ISO > KR > DNV > LR_LC1 순임을 확인하였다. 설계하중의 크기 순서와 그 해석 결과의 순서 사이에 상관관계는 있었으나, 그 결과가 반드시 비례하는 것은 아니었다. 이는 각각의 규정에서 산출한 설계하중이 하중 값의 크기에서도 차이가 나지만, 하중이 가해지는 적용 범위도 서로 상이하기 때문이다. 예를 들어 선저부의 경우, 선수로 갈수록 해수 압력이 점점 증가하는 경향을 나타내는 규정이 있는가 하면, 반대로 점점 감소하는 경향을 나타내는 규정도 있었다. 선측부의 경우도 마찬가지로 길이 방향, 높이 방향 모두 구분하는 규정이 있는가 하면, 길이 방향만 구분하여 적용하는 규정도 있었다. 이는 앞서 Table 6에서 한눈에 확인해 볼 수 있다.

즉, 각각의 규정에서는 경험치를 바탕으로 기준압력(P_{Base}) 값을 제시하고 이 값의 크기가 해석 결과를 좌우하긴 하지만, 그 하중을 적용하는 범위, 그리고 선박의 제원, 선형, 단면 형상 등에 따라 변화하는 압력조정계수의 차이에 의해서도 해석 결과에 상당한 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

38ft급 HDPE 재료의 파워보트를 대상으로 ISO 및 각 선급 규정에서 제시하는 설계하중을 각각 적용하여 구조해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석해 보았다.

지금까지 살펴본 바에 의하면, ISO, DNV, LR, KR에서 제시하는 설계하중은 하중의 크기뿐만 아니라 하중 적용 범위, 압력조정계수, 단면 형상의 고려 등에 있어서도 상당한 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 또한, slamming으로 인한 충격하중의 고려에 있어서도 해수 압력과 함께 적용하는 규정이 있는가 하면, 가장 가혹(severe)하다고 볼 수 있는 충격하중으로만 고려하는 규정도 있었고, 설계하중 계산식에 전혀 고려하지 않고 별도로 정의하는 규정도 있었다. 이러한 요소들은 각각의 규정에서 경험치를 바탕으로 제시하는 기준압력(P_{Base}) 값의 절대적인 크기와 해석 결과 값이 반드시 비례하는 것은 아님을 보여주었다.

따라서, 더 정확하고 합리적인 구조해석을 위한 규정 적용 시에는 이러한 요소들을 복합적으로 고려하여 선별적으로 적용하여야 할 것으로 판단된다. 특히 선박의 단면 형상과 충격하중의 영향이 상당함을 고려했을 때, 선형에서 큰 차이를 보이는 활주형 선박과 비 활주형 선박의 경우에는 설계하중을 각각 구분하여 적용하는 것이 더 합리적일 것으로 생각된다. 이에 향후 선수부 침수 단면적이 확연히 차이가 나는 선형을 가진 서로 다른 선박을 해석 후, 비교 분석해 보는 연구를 진행해 볼 계획이다.

또한, 앞서 Table 9 해석 결과값의 요약을 보면, HDPE 소재의 항복강도가 30MPa임을 고려했을 때 일부 규정의 하중조건에서는 허용치를 초과하는 부분도 있음을 확인할 수 있었다. 여기서 추가로 생각해볼 부분은 국부 강도의 최대 허용치 평가를 위하여 산출된 설계하중을 선박 전체 길이에 대한 글로벌 거동이 반영되는 구조해석을 통한 강도 평가에 그대로 적용하는 것은 상

당히 가혹(severe)한 조건으로 판단된다. 따라서 이에 대한 설계 하중의 조정도 필요할 것이다. 향후 경계조건 구속 단면의 길이 방향 위치를 조정하여 하중 적용 범위를 변화시켜봄으로써, 선박의 글로벌 거동으로 인한 영향의 크기를 비교 분석하고 설계하중을 조정하는 연구도 수행해 보고자 한다.

끝으로 소형선박에 대한 보다 정확한 구조 강도 평가를 위해서는 명확하고 합리적인 구조해석 관련 규정이 정립되어야 할 것이다. 이를 위해서는 소형선박 구조해석을 위한 설계하중 산출, 설계파(design wave)의 개념, 요소 크기(mesh size)에 따른 허용 응력의 민감도 등에 관한 연구들이 활발히 이루어져 더욱 많은 경험치 데이터들이 쌓여야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 논문의 내용은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구 결과임을 밝히며, 위 기관의 연구지원에 감사드립니다 (친환경 HDPE 소재의 38ft급 파워보트 개발 20210199).

References

DNV·GL., 2016. *DNVGL-ST-0342 Craft*.

ISO 12215-5, 2012. *Small craft - Hull construction and scantlings - Part5 : Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination*.

Ko, D.E., 2018. Strength assessment of 8m-class high-speed planing leisure boat. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 19(10), pp. 418-423.

Korean Register., 2022a. *Rules for the classification of high speed light craft*.

Korean Register., 2022b. *Rules for the classification of steel ships, Annex 3-2 guidance for the direct strength assessment*.

Lloyd's Register., 2021. *Rules and regulations for the Classification of Special Service Craft*.

Oh, D.K., Lee, D.K., Kang, G.M., Ryu, C.H. and Noh, J.K., 2014. Comparative study of rules of ISO 12215 and international classification society for structural design of CFRP cruise boat. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.77-84.

Park, J.s, Ko, J.Y, Lee K.W and Oh, W.J., 2009. Structural analysis of an 38 feet diffusion style for high-speed catamaran yacht. *Journal of Navigation and Port Research*, 33(3), pp.167-174.

Yum, J.S. and Yoo J.H., 2016. Structural strength assessment and optimization for 20 feet class power boat. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(2), pp. 108-114.

Yum, J.S., 2021. Comparative study of design loads for the structural design of titanium leisure boat. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(2), pp.733-738.



문병영



홍현진



김대현



이원민



이상목