

모듈 선체형 삼동 폰툰 보트의 구조설계 민감도 평가와 근사 최적화 해석

Sensitivity Evaluation and Approximate Optimization Analysis for Structure Design of Module Hull Type Trimaran Pontoon Boat

최보엽¹, 손창련¹, 손준식¹, 박민호¹, 송창용^{2*}

Bo-Youp Choi¹, Chang-Ryeon Son¹, Joon-Sik Son¹,
Min-Ho Park¹, Chang-Yong Song^{2*}

〈Abstract〉

Recently, domestic leisure boats have been actively researching eco-friendly product development to enter the global market. Since the hulls of existing leisure boats are mainly made of fiber reinforced plastic (FRP) or aluminum, design techniques for securing structural safety by applying related materials have been mainly studied. In this study, an initial structural design safety assessment of a trimaran pontoon leisure boat with a modular hull structure and eco-friendly high-density polyethylene (HDPE) material was conducted, and sensitivity evaluation and optimization analysis for lightweight design were performed. The initial structural design safety assessment was carried out by creating a finite element analysis model and applying the loading conditions specified in the ship classification regulation to check whether the specified allowable stresses are satisfied. For the sensitivity evaluation, the influence of stress and weight of each hull structural member was evaluated using the orthogonal array design of experiments method, and an approximate model based on the response surface method was generated using the results of the design of experiments. The optimization analysis set the thickness of the hull structural members as the design

1 중소조선연구원

2* 정회원, 교신저자, 목포대학교 조선해양공학과, 교수, 공학박사
E-mail: cysong@mokpo.ac.kr

1 Research Institute of Medium & Small Shipbuilding

2* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo
National University

variable and considered the optimal design formulation to minimize the weight while satisfying the allowable stress. The algorithm of the optimization analysis applied the Gradient-population Based Optimizer (GBO) to improve the accuracy of the optimal solution convergence while reducing the numerical cost. Through this study, the optimal design of a newly developed eco-friendly trimaran pontoon leisure boat with a weight reduction of 10% was presented.

Keywords : Trimaran Pontoon Leisure Boat, Modular Hull Structure, Structural Design Safety Assessment, Sensitivity Evaluation, Weight Reduction Optimization

1. 서론

최근 국내외 해양레저 산업의 활성화와 세계 시장 진출을 위해 다양한 형태의 레저선박 개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 대부분의 레저선박 선체는 주로 유리섬유강화플라스틱 (Fiber Reinforced Plastic, FRP) 이나 알루미늄 (Aluminum) 재질을 사용하여 제작되었기 때문에 레저선박의 구조안전성에 대한 설계기술 역시 관련 소재를 적용한 연구가 주로 수행되어 왔다.

레저선박의 선체 구조안전성에 관한 연구는 주로 FRP와 알루미늄 소재가 적용된 단동선과 쌍동선을 대상으로 수행되어 오고 있다. Ojed et al.[1]은 복합재료 소재를 적용한 55피트급 쌍동선의 구조강도를 평가하기 위해 선급규칙 설계하중을 적용하여 준정적 슬래밍하중을 산정하였고, 이를 이용하여 유한요소해석 기반의 선체강도 평가를 수행하였다. Park et al.[2]은 FRP 소재를 적용한 38피트급 쌍동선의 구조강도를 평가하기 위해 국내외 선급규칙 설계하중을 적용하고 유한요소해석 기반의 선체강도 평가를 수행하였다. Oh et al.[3]은 알루미늄 재료를 적용한 40피트급 레저보트의 단동선체 구조설계를 위해 디지털 목업 기술을 응용하였다. Oh et al.[4]은 탄소섬유강화 복합재료를 적용한 50피트급 크루즈 보트의 단동

선체 구조설계 평가를 위해 국제표준규정과 이탈리아 선급 규정을 적용하였다. Yum and Yoo[5]는 FRP 소재가 적용된 20피트급 파워보트의 단동선체 구조강도 평가와 최적화를 위해 국내외 선급과 국제표준규정에서 제시하고 있는 설계하중을 비교 검토하였다. Ko[6]는 FRP 샌드위치 복합재료를 사용한 8미터급 고속 활주 레저보트의 단동선체 구조강도를 평가하기 위해 한국선급 규정의 설계하중 조건과 유한요소해석을 이용하였다.

레저선박의 선체구조 안전성에 관한 기존의 연구들은 대부분 FRP나 알루미늄 재질이 적용된 단동형 혹은 쌍동형 선체의 구조설계를 검증하는 것으로 조사되었다. 그러나 노후화된 FRP 선박의 환경오염 문제나 알루미늄 선박의 높은 건조비용은 레저선박산업에서 해결해야 할 중요한 사항 중 하나이다[7]. 최근 기존 레저선박 소재의 단점을 대체할 수 있는 친환경 소재인 고밀도 폴리에틸렌 (High-density polyethylene, HDPE)을 선체구조에 적용하는 방안에 대한 관심이 높아지고 있다[8].

본 연구에서는 HDPE 소재가 적용된 9m급 모듈 선체형 삼동(Trimaran) 레저보트의 초기 구조설계 안전성 평가를 수행하고, 경량화 설계를 위한 민감도 평가 및 최적화 해석을 수행하였다. 초기 구조설계 안전성 평가는 유한요소해석 모델을 생성하고 선급 규칙에 명시된 하중 조건을 적용하

여 규정된 허용응력 만족 여부를 확인하는 방식으로 수행하였다. 민감도 평가는 직교 배열 실험계획법을 사용하여 선체 구조 부재별 응력 및 중량의 영향도를 평가하였고, 실험계획법 결과를 이용하여 반응표면법(Response surface method, RSM) 기반의 근사모델을 생성하였다. 최적화 해석에서는 선체 구조 부재의 두께를 설계 변수로 설정하고 허용응력을 만족하면서 중량을 최소화할 수 있는 최적의 설계안을 근사모델을 이용하여 탐색하였다. 최적화 해석의 알고리즘은 구배율-개체군 기반 최적화 기법(Gradient-population Based Optimizer, GBO)을 적용하여 최적해의 수렴 정확도를 높이면서 수치비용을 절감하였다. 본 연구를 통해 새롭게 개발된 9미터급 친환경 삼동선체 레저보트의 경량화 최적 설계방안을 제시할 수 있었으며, 연구결과는 상세설계 단계에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 유한요소해석 기반 구조성능 평가

본 연구에서 고려된 선박은 HDPE 소재와 모듈형 선체 공법을 적용하여 설계된 9미터급 삼동 레저보트이다. 해당 레저보트는 HDPE 소재를 사용하여 친환경적이고, Fig. 1에 나타난 것처럼 모듈형 선체 제작 공법을 통해 선박의 길이를 자유

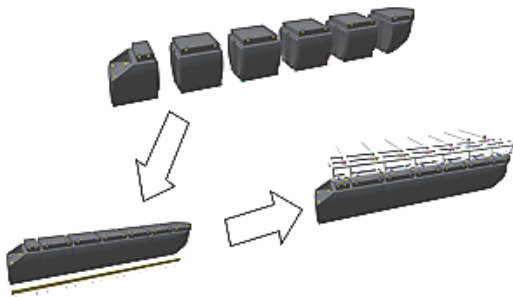


Fig. 1 Module type hull construction

롭게 조정할 수 있기 때문에, 수리가 용이하고, 빠른 양산이 가능한 보급형 레저 선박이다.

Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 모듈 선체형 삼동 레저보트의 구조는 상자모양의 선체 모듈을 HDPE 소재를 적용하여 각각 제작한 후에 연결하고, 상부에 사각 튜브 단면의 알루미늄 골조 부재를 장착하여 완성된다.

레저선박의 소재로 적용된 HDPE는 재활용이 가능한 친환경 소재이며, 소재 생산 과정에서 탄소배출량이 낮은 친환경 소재이다. 또한 HDPE는 내충격성, 내부식성, 전기 절연성 등이 기존 폴리에틸렌 소재 대비 우수하다. 본 연구에서 고려된 레저선박의 소재인 HDPE와 5083 계열 알루미늄의 주요 기계적 특성치는 Table 1에 나타내었다.

모듈 선체형 삼동 레저보트의 주요제원은 Table 2에 나타내었다.

초기 설계된 레저보트의 구조안전성은 유한요소 해석(Finite element analysis, FEA) 기반의 강도 성능을 평가하였다. 유한요소 모델링 형상은 Fig.

Table 1. Material properties of HDPE and 5083 aluminum

Mechanical property	HDPE	Al-5083
Density (g/cm ³)	0.97	2.7
Tensile strength (MPa)	52	275
Yield strength (MPa)	37	125
Elastic modulus (MPa)	1,200	7,200

Table 2. Principal dimensions

Mechanical property	Value
Length Over All (LOA)	8.80m
Length Between Perpendicular (LBP)	8.63m
Moulded Breadth	3.00m
Moulded Depth	0.82m
Draft	0.36m
Hull weight	0.69ton

2에 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 것처럼, 유한요소모델은 사절점 쉘(Quadrilateral shell) 요소를 사용하였고, 부재 간의 조립을 위해 강제연결(Rigid link) 요소를 사용하였다. 유한요소모델의 요소크기는 15mm로 설정하였고, 모델링에 사용된 요소의 수와 절점의 수는 각각 490,127개와 494,627개이다. FEA에 적용된 하중조건은 한국선급의 고속 경구조선 규칙[9]에 규정된 슬래밍 하중(Slamming load)을 산정하였다. 선체 하부에 작용하는 슬래밍 하중(P_{sl})은 다음의 식으로부터 산출되었다.

$$P_{sl} = 1.3k_l \left(\frac{\Delta}{nA} \right)^{0.3} d_0^{0.7} \frac{50 - \beta_X}{50 - \beta_{cg}} a_{cg} \quad [kN/m^2] \quad (1)$$

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

여기서,

k_l = 종방향 슬래밍 압력 분포 계수

Δ = 만재 배수량 [

n = 선체의 수

A = 부재의 설계하중 작용면적 [m^2]

d_0 = 정상운항기준 L 의 중앙에서 측정한 흘수 [m]

β_X = 횡단면 선저경사각도 (최소 10° , 최대 30°)

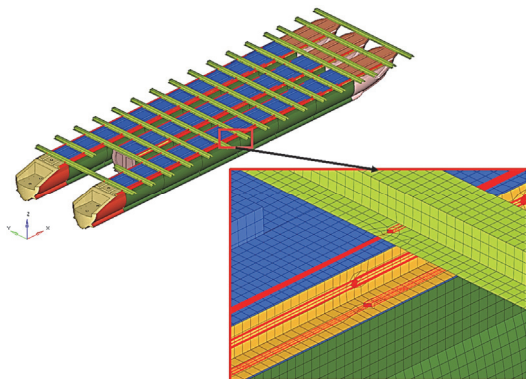


Fig. 2 Finite element modeling

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

a_{cg} = 설계수직가속도

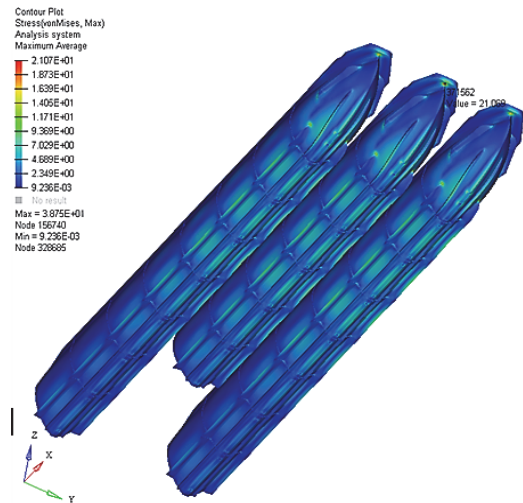
V = 운항속도 [kt]

L = 선박길이 [m]

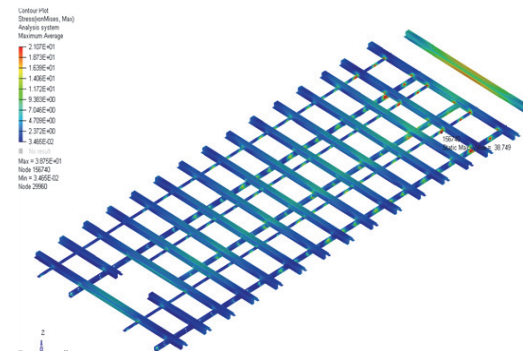
f_g = 가속도 계수

g_0 = 중력가속도 [$9.81 m/s^2$]

식(1)과 (2)로부터 계산된 슬래밍 하중은 선미부(선미부터 2.6 m 구간)에서 $29.5 kN/m^2$, 중앙부(2.6 m에서 4.4 m 구간)에서 $47.1 kN/m^2$, 그리



(a) HPDE module type hull part



(b) Aluminum upper frame part

Fig. 3 Stress contour results

고 선수부(4.4 m에서 선수 구간)에서 58.9 kN/m²으로 각각 산출되었다. FEA에 적용된 경계조건은 상부 선측부의 알루미늄 골조 부재에 고정 조건을 적용하였다.

구조성능 평가를 위한 응력산출은 범용 FEA 솔버인 MSC.Nastran[10]을 사용하였고, 응력분포 결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 보여진 것처럼, HDPE 소재가 적용된 모듈 선체부분의 최대 응력은 중앙선체의 선수부에서 21.07 MPa로 나타났고, 알루미늄 소재가 적용된 상단 골조부분의 최대응력은 선수부에서 38.75 MPa로 나타났다. 모듈 선체부와 상단 골조부의 최대응력치는 재료 허용응력 기준으로 57%와 31%의 수준이며, 선급의 허용응력 기준이 통상 재료 항복응력의 70% 정도[8] 임을 고려할 때 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다. 따라서 레저보트의 초기설계 상태는 적재능력 향상을 위해 중량저감을 위한 최적 설계안에 대한 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

3. 구조설계 민감도 평가

본 연구에서는 삼동 레저보트의 선체 구조 부재별 응력 및 중량의 영향도를 평가하기 위해 직교 배열 실험계획법을 사용하여 민감도 평가를 수행하였다. 또한 민감도 평가 결과로부터 성능 영향도가 지배적인 설계변수를 선정하여 RSM 근사 모델을 생성하고, 근사모델을 최적화 해석에 연계하고자 하였다.

민감도 평가를 위한 실험계획법은 직교배열설계 [11, 12]를 사용하여 실험행렬을 구성하였고, FEA 이용하여 설계변수 변동에 따른 성능응답치의 변동에 대한 실험데이터 생성하였다. 설계변수의 정의와 변동 범위는 Fig. 4와 Table 3에 나타내었다.

Fig. 4와 Table 3에 나타나 있는 것처럼 설계변

수는 레저보트 선체 부재의 재질별 두께로 정의하였으며 총 11개의 부재를 고려하였다. HDPE 소재가 적용된 모듈형 선체 부재의 초기설계는 모두 6.0t로 적용되었고, 알루미늄 소재가 적용된 수평 부재와 수직 부재는 각각 5t와 4t로 적용되었다. 설계변수의 변동 범위는 실제 제작이 가능한 사양을 고려하여 초기설계 기준으로 ±1.0t가 적용되었다. 실험계획법에 적용된 설계행렬은 11개의 설계변수의 변동 범위를 3수준으로 고려하여 총 81회의 실험이 수행되도록 하였다. 81회의 실험계획에

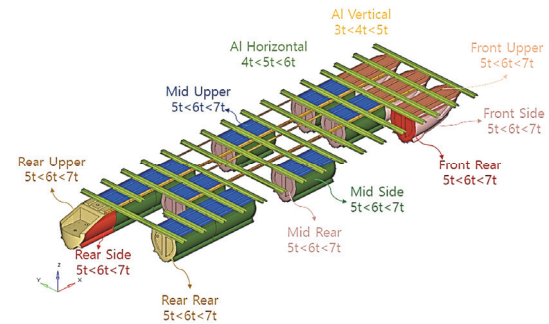


Fig. 4 Design variables of trimaran pontoon leisure boat

Table 3. Definition and level for design variables

Member	Symbol	Material	Thickness(t)
Front module upper	d_{Fu}	HDPE	5 < 6 < 7
Front module side	d_{Fs}		5 < 6 < 7
Front module rear	d_{Fr}		5 < 6 < 7
Mid module upper	d_{Mu}		5 < 6 < 7
Mid module side	d_{Ms}		5 < 6 < 7
Mid module rear	d_{Mr}		5 < 6 < 7
Rear module upper	d_{Ru}		5 < 6 < 7
Rear module side	d_{Rs}		5 < 6 < 7
Rear module rear	d_{Rr}		5 < 6 < 7
Al horizontal beam	d_{Ah}	Al-5083	4 < 5 < 6
Al vertical beam	d_{Av}		3 < 4 < 5

따라 FEA를 수행하였고, 성능응답치로 설정한 재질 별 최대응력과 중량에 대한 설계변수 별 민감도 평가 결과는 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 4에 나타나 있는 것처럼 민감도의 수치가 1.0에 가까울수록 설계변수의 변동에 따른 성능응답치의 영향도가 높다는 것을 의미한다. HDPE 소재가 적용된 모듈형 선체 부재의 강도성능에 가장 영향도가 높은 설계변수는 d_{Fu} 와 d_{Fs} 인 것을 알 수 있으며, 알루미늄 소재가 적용된 상부 부재의 강도성능에 가장 영향도가 높은 설계변수는 d_{Ah} 로 나타났고, 중량에 대한 영향도가 높은 설계변수는 d_{Ah} 와 d_{Ms} 인 것으로 파악되었다.

근사모델 생성의 효율성을 높이기 위해서는 설계변수의 개수가 최소화되어야 하기 때문에 Table 4의 결과로부터 영향도가 높은 설계변수를 선별하였다. 근사모델 생성에 사용될 설계변수를 선별하기 위해 각각의 설계변수 별 전체 성능응답치의 평균 영향도를 산출하였고, 평균치가 상대적으로 높은 d_{Fu} , d_{Fs} , d_{Ms} , 그리고 d_{Ah} 를 선택하였다.

Table 4. Design sensitivity evaluation results

Design variables	Response effect value			
	Max. Stress (HDPE)	Max. Stress (Al-5083)	Weight	Average
d_{Fu}	0.741	0.324	0.087	0.384
d_{Fs}	0.643	0.111	0.136	0.297
d_{Fr}	0.032	0.015	0.025	0.024
d_{Mt}	0.022	0.087	0.300	0.136
d_{Ms}	0.006	0.142	0.583	0.244
d_{Mr}	0.022	0.063	0.289	0.125
d_{Ru}	0.022	0.027	0.041	0.030
d_{Rs}	0.009	0.023	0.064	0.032
d_{Rr}	0.005	0.014	0.024	0.014
d_{Ah}	0.178	0.913	0.643	0.578
d_{Av}	0.057	0.042	0.202	0.100

근사모델은 RSM을 사용하였고, RSM은 최소자승법을 이용하여 다음의 2차 다항식 형태의 회귀모델로 표현된다[13, 14].

$$g = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i Z_i + \sum_{i=1}^k A_{ii} Z_i^2 + \sum_{i < j}^k A_{ij} Z_i Z_j + e \quad (3)$$

식(3)에 나타나 있는 것처럼 n 개의 실험점으로부터 반응벡터 g 와 k 개의 기저변수로 정의되는 행렬 Z 가 주어지면, g 와 Z 의 관계로부터 랜덤오차 벡터 e 를 최소화하여 미지의 RSM 근사계수 벡터 A_R 이 다음의 식으로부터 산출된다.

$$A_R = (Z^T Z)^{-1} Z^T g \quad (4)$$

상기의 식으로부터 계산된 근사계수를 적용하면 RSM 2차 회귀근사모델을 생성할 수 있다. 근사모델의 정확도는 다음의 식에서 결정계수(Coefficient of determination)인 R^2 값으로 판별할 수 있다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (t_i - y_i)^2}{\sum (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (5)$$

여기서 t_i 는 실제 값, y_i 는 근사모델로부터 추정된 예측값, \bar{t}_i 는 실제 값의 평균치를 의미한다. R^2 값이 1.0인 경우 근사모델로부터 추정된 예측값이 전체 설계 공간상의 실제 값과 정확히 일치하는 것을 의미한다. 통상 R^2 값이 0.9 이상이면 근사모델의 정확도가 확보된 것으로 판단할 수 있다[14]. 식(3)과 (4)를 이용하여 생성된 근사모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{\sigma_H} = & 59.017 + 0.841d_{Ah} - 6.678d_{Fs} - 4.681d_{Fu} \\ & - 0.193d_{Ms} - 0.050d_{Ah}^2 + 0.392d_{Fs}^2 + 0.224d_{Fu}^2 \\ & - 0.027d_{Ms}^2 + 0.009d_{Ah}d_{Fs} - 0.023d_{Ah}d_{Fu} \\ & + 0.045d_{Ah}d_{Ms} - 0.031d_{Fs}d_{Fu} + 0.034d_{Fs}d_{Ms} \\ & + 0.012d_{Fu}d_{Ms} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{\sigma_A} = & 123.630 - 32.390d_{Ah} - 3.502d_{Fs} + 11.280d_{Fu} \\ & - 7.249d_{Ms} + 2.374d_{Ah}^2 + 0.109d_{Fs}^2 - 0.025d_{Fu}^2 \\ & + 0.179d_{Ms}^2 + 0.341d_{Ah}d_{Fs} - 1.229d_{Ah}d_{Fu} \\ & + 0.887d_{Ah}d_{Ms} - 0.134d_{Fs}d_{Fu} + 0.039d_{Fs}d_{Ms} \\ & - 0.154d_{Fu}d_{Ms} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{f}_W = & -0.126 + 0.115d_{Ah} + 0.007d_{Fs} + 0.004d_{Fu} \\ & + 0.098d_{Ms} - 0.014d_{Ah}d_{Ms} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, \tilde{g}_{σ_H} 는 HDPE 소재가 적용된 선체부재의 최대응력, \tilde{g}_{σ_A} 는 알루미늄 소재가 적용된 선체부재의 최대응력, 그리고 \tilde{f}_W 는 선체 중량을 각각 나타낸다. 식(5)으로부터 근사모델의 정확도는 \tilde{g}_{σ_H} , \tilde{g}_{σ_A} , 그리고 \tilde{f}_W 에서 0.994, 0.990, 0.901 로 각각 산출되었고, 근사모델의 정확도가 확보된 것으로 판단하였다.

4. 중량감소 최적설계

최적화 해석에서는 삼동 레저보트 선체 구조 부재의 두께를 설계 변수로 설정하고 허용응력을 만족하면서 선체중량을 최소화할 수 있는 최적 구조설계안을 탐색하기 위해 RSM을 이용하여 생성된 근사모델을 이용하였다. 최적화 해석의 알고리즘은 최적해의 수렴 정확도를 높이면서 수치비용을 절감하기 위해 GBO 기법을 적용하였다. GBO 기법에서 최적해를 탐색하는 과정은 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타나 있는 것처럼 GBO는 전역탐색(Global search)과 국부탐색(Local search)을 혼합하여 적용하는 기법으로서 유전자 알고리즘을 기반으로 전역 최적해를 탐색하고, 전역 최적해와 개체군 최적값과의 비교 과정 중에 개체군 내의 염색체 최적해의 결정은 국부탐색법을 적용한다. 최적화해석의 정식화는 선체 구조 부재의 두께를

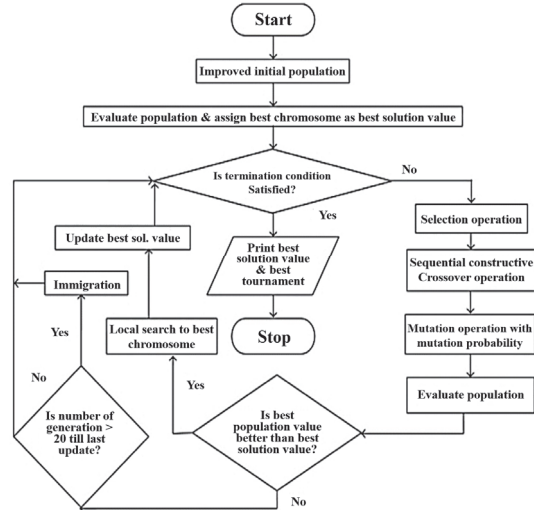


Fig. 5 GBO flowchart [15]

설계 변수로 설정하고 선급의 허용응력 기준인 재료 항복응력의 70% 이하를 만족하면서 중량을 최소화할 수 있도록 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize } \tilde{f}_W(d_{Ah}, d_{Fs}, d_{Fu}, d_{Ms}) \quad (9)$$

subject to

$$\tilde{g}_{\sigma_H}(d_{Ah}, d_{Fs}, d_{Fu}, d_{Ms}) \leq 26 \text{ MPa}$$

$$\tilde{g}_{\sigma_A}(d_{Ah}, d_{Fs}, d_{Fu}, d_{Ms}) \leq 88 \text{ MPa}$$

$$4.0 \leq d_{Ah} \leq 6.0 \text{ [mm]}$$

$$5.0 \leq d_{Fs} \leq 7.0 \text{ [mm]}$$

$$5.0 \leq d_{Fu} \leq 7.0 \text{ [mm]}$$

$$5.0 \leq d_{Ms} \leq 7.0 \text{ [mm]}$$

GBO 기법은 전역탐색 과정에서 랜덤탐색의 특징을 갖고 있기 때문에 개체군의 변화에 따른 최적해의 결과에 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 개체군의 크기에 따른 최적해의 수렴특성을 검토하기 위해 50부터 130까지 10의 간격으로 개체군의 크기를 설정하여 총 9가지 경우에 대해 최적화해석을 수행하였다. 개체군의 크기에 따른 최적화 결과는 Table 5에 정리하여 나타내었다.

Table 5에 나타난 것처럼 모든 경우에서 재질

Table 5. Optimization results for population size variation

Population size	d_{Ah} (mm)	d_{Fb} (mm)	d_{Fu} (mm)	d_{Ms} (mm)	\tilde{g}_{σ_B} (MPa)	\tilde{g}_{σ_A} (MPa)	\tilde{f}_w (ton)
50	4.09	5.64	5.02	5.04	18.01	32.90	0.627
60	4.15	6.14	5.02	5.08	17.00	31.48	0.635
70	4.04	5.22	5.51	5.62	17.69	35.09	0.649
80	4.38	5.14	6.13	5.07	16.74	34.65	0.643
90	4.49	5.07	5.34	5.02	18.78	30.25	0.642
100	4.04	5.00	5.03	5.72	19.45	32.94	0.650
110	4.35	5.11	6.14	5.01	16.74	35.30	0.641
120	4.19	5.32	5.87	5.01	16.73	35.93	0.632
130	4.01	5.00	5.00	5.65	19.50	33.37	0.645

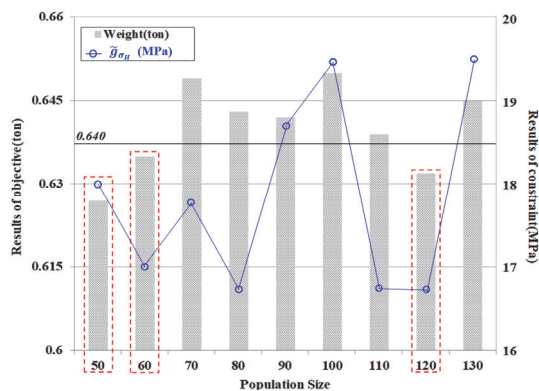


Fig. 6 Comparison of weight and HDPE part stress

별 응력 제한조건을 만족하는 것으로 나타났고, 목적함수인 중량도 초기 설계 대비 감소하는 경향을 보였다. 최적설계 상태에서 HDPE 재질 부재의 응력이 알루미늄 재질 부재의 응력 대비 제한조건 한도에 더 근접하기 때문에 설계안전도 측면에서 HDPE 재질이 적용된 부재의 설계가 더 중요하게 고려되어야 하는 것으로 판단되었다. 모든 경우에서 응력 제한조건이 만족되었기 때문에 중량의 목적함수를 기준으로 적합한 개체군 크기의 조건을 결정하는 것이 타당하다고 판단되었다. 개체군 크기의 조건 별로 산출된 목적함수의 평균치가 0.640으로 계산되었고, 이 평균치보다 중량감소

효과가 더 높은 경우를 Fig. 6과 같이 도식적으로 검토하였다.

Fig. 6에 나타난 것처럼, 개체군 크기의 변화에 따라 좌측 세로축에는 중량의 결과를 정리하였고, 우측 세로축에는 HDPE 재질 부재의 응력을 정리하였다. 또한, 목적함수 평균치인 0.640보다 중량 감소 효과가 더 높은 경우는 붉은색 점선으로 표시하여 나타내었다. 결과에 알 수 있듯이 개체군의 크기가 50, 60, 그리고 120일 때 중량감소 효과가 평균치보다 더 높게 나타났으며, 가장 높은 중량감소 효과는 개체군의 크기가 50인 경우였다. 이 경우에 초기설계 대비 선체 중량이 10% 이상 감소한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 친환경 HDPE와 알루미늄 소재로 설계된 9m급 모듈 선체형 삼동 레저보트의 초기 구조설계 안전성 평가를 위해 구조해석을 수행하였고, 선체 중량감소 설계를 위해 직교배열법 기반 민감도 평가와 GBO 알고리즘을 이용한 최적화 해석을 수행하였다.

초기 구조설계 안전성 평가는 FEA 모델을 생성하고 선급 규칙 하중 조건을 적용하여 수행하였으며, HDPE 소재가 적용된 모듈 선체부와 알루미늄 소재가 적용된 상단 골조부의 최대응력치는 재료 허용응력 기준으로 57%와 31%의 수준으로 선급의 허용응력 기준을 충분히 만족하는 것을 확인하였다. 이를 통해 레저보트의 초기설계 상태는 적재능력 향상을 위해 중량저감을 위한 최적 설계에 대한 검토가 필요한 것으로 판단되었으며, 민감도 평가와 최적화해석을 연계하여 수행하였다.

민감도 평가는 직교 배열 실험계획법을 사용하여 11개의 선체 부재의 설계변수 변동 범위를 3 수준으로 고려하여 총 81회의 실험이 수행되도록 설계행렬을 구성하였다. 민감도 평가를 통해 HDPE 소재가 적용된 모듈형 선체 부재의 강도성능에 가장 영향도가 높은 설계변수와 알루미늄 소재가 적용된 상부 부재의 강도성능에 가장 영향도가 높은 설계변수, 그리고 중량에 대한 영향도가 높은 설계변수를 선정하였다. 또한 최적화해석과 연계하기 위해 선정된 설계변수를 이용하여 RSM 근사모델을 생성하였다.

최적화 해석에서는 선체 구조 부재의 두께를 설계 변수로 설정하고 선급규정 허용응력을 만족하면서 중량을 최소화할 수 있는 최적 설계안을 근사모델을 이용하여 탐색하였다. GBO 알고리즘의 특성을 고려하여 개체군의 크기에 따른 최적해의 수렴특성을 검토하기 위해 50부터 130까지 10의 간격으로 개체군의 크기를 설정하여 총 9가지 경우에 대해 최적화해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려된 레저보트 선체설계 최적화에 가장 적합한 개체군 크기를 결정하였으며, 초기설계 대비 선체 중량이 10% 이상 감소한 최적설계안을 제시할 수 있었다.

본 연구를 통해 새롭게 개발된 9미터급 친환경 삼동선체 레저보트의 경량화 최적 설계방안을 제

시할 수 있었으며, 연구결과는 상세설계 단계에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 본 연구는 전라남도과 (재)전남테크노파크의 뿌리산업선도기업육성사업의 지원과 해양수산부의 재원으로 한국해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제(친환경 선박용 전기추진 시스템 시험평가 및 무탄소연료 선박 적용성 실증 기술개발, No. 1525013494/PMS5390)의 결과입니다.

참고문헌

- [1] R. Ojeda, B. G. Prusty, and M. Salas, "Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads," *Ocean Engineering*, vol. 31, no. 7, pp. 901-929, (2004).
- [2] J. S. Park, J. Y. Ko, K. W. Lee, and W. J. Oh, "Structural analysis of 38 feet diffusion style for high-speed catamaran yacht," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 33, no. 3, pp. 167-174, (2009).
- [3] D. K. Oh, K. W. Lee, and C. W. Lee, "Basic design of 40ft class pleasure boat based on digital mock-up," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safet*, vol. 17, no. 3 pp. 283-289, (2012).
- [4] D. K. Oh, D. K. Lee, G. M. Kang, C. H. Ryu, and J. K. Noh, "Comparative study of rules of ISO 12215 and international classification society for structural design of CFRP cruise boat," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 77-84, (2014).

- [5] J. S. Yum and J. H. 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).
- [6] D. E. Ko, "Strength assessment of 8m-class high-speed planing leisure boat," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 10, pp. 418-423, (2018).
- [7] H. B. Moraes, J. M. Vasconcellos, and P. M. Almeida, "Multiple criteria optimization applied to high speed catamaran preliminary design," *Ocean Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 133-147, (2007).
- [8] A. Sözen, G. Neşer, and M. Bengisu, "Effect of the geometry on the structural performance of high-density polyethylene small craft joints," *Ships and Offshore Structures*, vol. 17, no. 9, pp. 1939-1946, (2022).
- [9] KR, Rules for the classification of high speed light craft, Korean Register of Shipping, (2023).
- [10] MSC Software, MSC.Nastran User Manual, MSC Software, (2018).
- [11] D. J. Lee, C. Y. Song, and K. Lee, "Surrogate model based approximate optimization of passive type deck support frame for offshore plant float-over installation," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 131-140, (2021).
- [12] S. H. Park, *Design of Experiments*, Minyoung Publishing, Seoul, (2012).
- [13] C. Y. Song and J. Lee, "Comparative study of approximate optimization techniques in CAE-based structural design," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, vol. 34, no. 11, pp. 1603-1611, (2010).
- [14] W. C. Park and C. Y. Song, "Evaluation on sensitivity and approximate modeling of fire resistance performance for A60 class deck penetration piece using heat transfer analysis and fire test," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 141-149, (2021).
- [15] B. R. Lee, G. S. Park, and I. S. Kim, "Structural safety of the incinerator transfer conveyor roller chain using GBO," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 29, no. 1, pp. 9-16, (2020).

(접수: 2023.11.14. 수정: 2023.11.24. 게재확정: 2023.12.04.)