대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
eISSN:2287-7355, Vol. 57, No. 2, pp. 104-113, April 2020
https://doi.org/10.3744/SNAK.2020.57.2.104

FRP 기계적 물성을 고려한 복합소재 선체구조 적층판 경량화 설계

오대균[1]·Zhiqiang Han[2]·노재규[3]·정숙현[2,†]
목포해양대학교 조선해양공학과[1]
군산대학교 조선해양공학과[3]
목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과[2]

Laminate Weight Optimization of Composite Ship Structures based on Experimental Data

Daekyun Oh[1]·Zhiqiang Han[2]·Jackyou Noh[3]·Sookhyun Jeong[2,†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University[1]
Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University[2]
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kunsan National University[3]

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.

The study aims to improve the previous theory-based algorithm on the lightweight design of laminate structures of a composite ship based on the mechanical properties of fiber, resin, and laminates obtained from experiments. From a case study on using a hydrometer to measure the specific gravity of e-glass fiber woven roving fabric/polyester resin used as the raw material for the hull of a 52 ft composite ship, the equation for calculating the weight of laminate was redefined, and the relationship between decreasing mechanical properties and increasing glass content was determined from the results of material testing according to ASTM D5083 and ASTM D790. After applying these experimental data to the existing algorithm and improving it, a possible laminate design that maximizes the specific strength of the composite material was confirmed. In a case study that applied the existing algorithm based on rules, the optimal lightweight design of composite structures was achieved when the weight fraction of e-glass fiber was increased by 57.5% compared with that in the original design, but the improved algorithm allowed for an increase of only 17.5%.

Keywords : Composite ship(복합소재 선박), Composite materials(복합소재), GFRP(유리섬유강화플라스틱), Glass content(유리섬유강화재 비율), Light-weight design(경량 설계)

1. 서 론

FRP(Fiber Reinforced Plastics)는 비강도가 좋고 부식에도 강하며 작업성 또한 우수하여 어선, 요트 등 소형선박의 소재로 각광 받고 있으며, 실제로 국내 등록 선박 중 95.5%의 선박이 FRP로 제작되었다 (Oh, 2019; MOF, 2019). 선박에 의한 온실가스 감축을 위해 국제해사기구 IMO(International Maritime Organization)에서는 MARPOL(International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships) Annex VI에서 2011년 이후 신조선에 대해 에너지 효율 설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) 및 선박 에너지 효율 관리계획(Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) 강제화를 채택한 바 있다. 하지만 이는 GT(Gross Tonnage) 400톤 이상의 선박을 대상으로 하고 있으며 전체 선박의 절대 다수를 차지하고 있는 소형선박은 제외되어 있는 실정이다 (Jeong, 2019). 소형선박의 경량화를 위해 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)와 같은 초경량 신소재가 적용되는 경우가 있지만 이는 경제성 문제로 인하여 군사용 특수 선박 및 일부 고부가가치 선박에만 사용되고 있으며, 전기추진시스템 적용을 통한 온실가스 감축은 아직까지 배터리 효율 문제로 일반화에 어려움이 있다 (Oh et al., 2018a;

Received : 18 February 2020 | Revised : 2 March 2020 | Accepted : 3 March 2020
† Corresponding author : Sookhyun Jeong, jeongsookhyun@gmail.com

Bolvashenkov et al., 2014). 최근 알루미늄이 일부 사용되고 있으나 아직까지 FRP의 경제성과 작업성 그리고 경량화 성능에는 못 미치는 실정이다.

본 저자들은 FRP 선체구조 설계 시 비강도 특성을 극대화하기 위한 최적의 섬유 강화재 중량 비율 즉 함침율(Gc: Glass Content)의 결정과 그 변화에 따른 복합소재 적층판(laminate)의 기계적 물성 거동에 관한 연구를 수행한 바 있다 (Kang et al., 2014; Oh & Hwang, 2015; Song & Oh, 2016). 복합소재 선체구조 적층판 경량화 알고리즘은 선체구조의 종류, 섬유의 종류 및 강화방식 등에 따라 적층판의 기계적 물성 변화를 고려하여 구조설계 규정에 충족하는 범위 내에서의 경량화 설계안을 도출할 수 있는 함침율 Gc를 추정할 수 있으며, 이를 적용하여 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 등의 복합소재 레저선박, 특수선박, 어선 등의 선체구조의 경량화가 연구된 바 있고 (Han et al, 2018a, Oh et al., 2018b, Jang et al., 2019), 경량화 결과가 온실가스 감축에 미치는 효과에 대한 시뮬레이션 연구도 수행된 바 있다 (Jeong et al., 2018a; Jeong et al., 2018b).

복합소재 선체구조 적층판 경량화 알고리즘은 소재 설계의 조건 변화에 따른 두께와 무게의 변화 관계에 기초하고 있으며 위 선행연구들에서는 주로 ISO 표준(ISO, 2019)과 선급에서 제시하고 있는 FRP의 기계적 물성과 무게 추정식 등을 활용하고 있다. 이러한 추정식은 실험과 통계에 기반하고 있으며 강화재의 종류와 강화방식에 따라 일부 세분화하여 제시하기도 하지만 복합소재의 경우 설계조합이 매우 다양하고 FRP 제작환경 및 작업자의 숙력도에 따라서도 그 품질에 차이가 날 수 있기 때문에 선체 제작에 사용된 실원자재에 기반한 파괴시험 등을 통해 기계적 물성을 확인하는 것이 매우 중요하다 (Choi et al., 2013; Oh, 2019). 실제로 복합소재 선체구조 적층판에 대한 실험연구 (Song & Oh, 2016; Han et al., 2018a; Han et al., 2018b)에서 이러한 추정식과 FRP의 기계적 물성과의 차이를 지적한 바 있으며, 복합소재 적층판 내의 기포(Porosity), 공간(Void), 층간분리(Delamination) 등의 작고 큰 결함(Defect)이 구조의 기계적 성능을 저하시키며 (Abdelal, 2013; Kim, et al., 2014; Hakim et al., 2017) 특히 선박과 같이 피로하중을 받는 환경에서 수십여년을 운항하는 구조물의 경우 그 영향이 더욱 크다고 알려져 있다 (Mouritz et al., 2000).

따라서 본 연구에서는 선행연구 결과인 복합소재 선체구조 적층판 경량화 알고리즘에 실제 선체 제작에 적용된 GFRP의 원자재와 적층판의 기계적 물성을 고려할 수 있도록 개선하고자 하였다. 이를 위해 선체 길이(L_H)15.9m GFRP 선박을 사례대상으로 지정하여 복합소재 원자재 정보를 분석하고 선체 외판 시제품을 제작하여 재료시험을 수행함으로써 개선된 알고리즘을 도출하였다. 개선된 알고리즘을 사례선박에 적용함으로써 GFRP 기계적 물성이 고려된 구조 적층판 경량화 함침율을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 기존 알고리즘 및 설계 원안과 비교분석함으로써 그 효용성을 보이고자 하였다.

2. 복합소재 선체구조 적층판 경량화 알고리즘 개요와 연구방법

2.1 구조 적층판 경량화 알고리즘 개요

일반적으로 복합소재 선체구조 적층판의 두께를 결정하는 변수는 배수량, 선속, 구획 및 보강재의 배치, 설계하중과 같은 선박설계 요소와 복합소재의 설계조건에 의해 결정되며 소재설계 조건은 강화재의 종류, 직물의 직조방식, 함침율에 따른 적층판의 기계적 물성 등에 따라 결정된다 (ISO, 2019; Song & Oh, 2016). Fig. 2는 ISO 표준 및 LR(Lloyd's Register, 이하 LR), RINA(Registro Italiano Navale, 이하 RINA) 등의 선급 (LR, 2018; RINA, 2015)에서 제시하고 있는 복합소재 선체 구조의 설계규정을 선박설계 요소와 소재설계 조건으로 재그룹하여 적층판 설계 과정을 도식화하고 있다.

복합소재 적층판 경량화 알고리즘은 선체구조의 종류 및 섬유의 직조방식 등의 변화에도 적층판의 구조 안정성을 확보하고 단위면적 당 무게를 최소화하는 함침율 Gc를 결정하는 소재설계 알고리즘이다. 기존 알고리즘에서는 강화재와 기지재의 밀도와 함께 물성 변화 등을 ISO 표준 및 선급에서 제시하는 추정식을 차용하고 있으며, Fig. 1은 유리섬유 강화재에 대하여 각 규정에서 제시하고 있는 물성 추정식 결과를 도식화하여 보이고 있다.

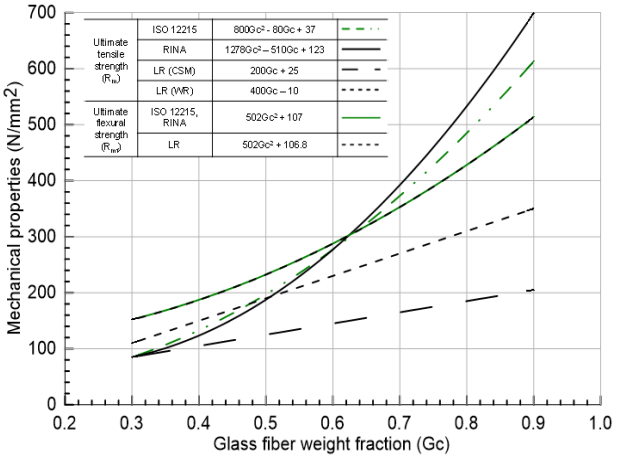


Fig. 1 Mechanical properties with change in glass fiber weight fraction of composite laminate (Jang et al., 2019)

이론적으로는 Fig. 1과 같이 유리섬유 강화재의 양 즉, 함침율을 증가시키면 적층판의 물성 또한 무한히 증가하는 것으로 추정되지만 실제로는 그렇지 않으며, 함침율 증가에 따라 적층판의 요구두께 또한 무한히 감소되지 않는다 (Song & Oh, 2016; Jang, et al., 2019). 그리고 ISO 표준 및 선급에서 제시하고 있는 이러한 추정식은 매우 오랜 기간 동안의 통계와 경험에 기반하고 있으나 상당한 수준의 안전율 또한 포함되어 있다. 따라서 구조 경량화를 위해 소재설계를 최적화 하기 위해서는 소재의 기

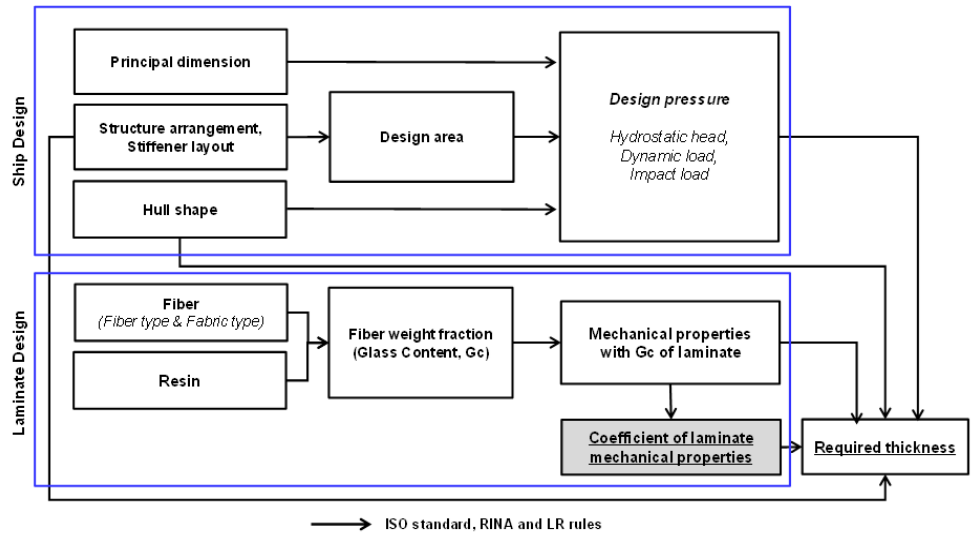


Fig. 2 FRP-laminate design processes of ISO standard and international rules (Song & Oh, 2016)

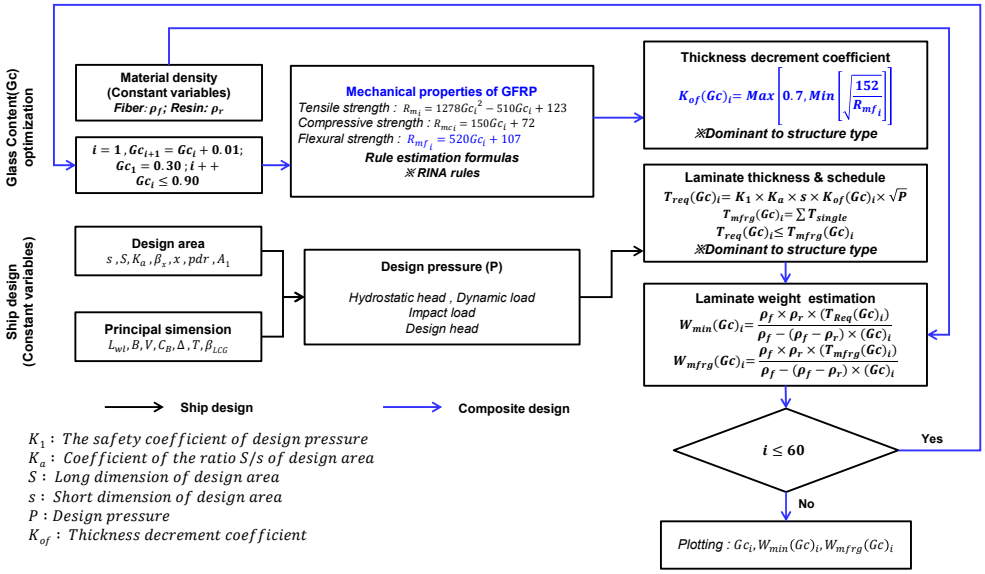


Fig. 3 GFRP laminate-weight optimization algorithm (Jang et al., 2019)

Table 1 Thickness decrement coefficients by each rule

	Thickness decrement coefficient	Condition
ISO standard	$K=\sqrt{\frac{152}{R_{mf}}}$ $R_{mf}=502G_C^2+10^7$	$0.3 \le G_C$
LR rule	$K=\sqrt[3]{\frac{8500}{E_{tp}}}$ $E_{tp}=30G_C-0.5\times10^3$	$0.3 \le G_C \le 0.7$
RINA rule	$K=\sqrt{\frac{152}{R_{mf}}}$ $K=502G_C^2+10^7$	$0.3 \le G_C \le 0.7$ $0.7 \le K \le 1.0$

R_{mf} : *Ultimate flextural strength*
E_{tp} : *Tensile modulus*

계적 물성과 구조 적층판의 두께 감소의 관계에 대한 재정의가 필요하며 이를 위해서는 선체 제작에 사용되는 GFRP 원자재 정보와 적층판의 재료시험 결과 등을 알고리즘 개선에 적용할 필요가 있다. Table 1은 ISO 표준과 각 규정에서 제시하고 있는 함침율 변화에 따른 두께 감소 계수의 사례를 보이고 있으며, 기존 알고리즘에서는 이를 적용하고 있다.

2.2 연구방법

본 연구에서는 ISO 표준 및 선급 규정에 기반한 GFRP 구조 적층판 경량화 알고리즘을 원자재 정보와 재료시험 결과에 기반하여 개선하고자 한다. 이를 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 함침율과 관련되어있는 식들에 대한 재정리가 필요하며, Fig. 1 내의 인장강도, 굽힘강도와 같은 물성 추정식, 두께추정을 위한 두

께 감소 계수 그리고 적층판 무게 추정식 등을 재료시험 등을 통해 얻어 재정의 해야한다.

실제 GFRP 원자재의 정보와 재료시험 결과 등을 적용하기 위하여 선체 길이(L_H)15.9m 레저선박을 사례연구 대상으로 정의하였으며, 유리섬유 직물과 수지의 밀도 측정 그리고 생산설계 정보로 제작된 시편에 대한 재료시험을 실시하였다. ISO 및 선급 규정에서 물성 추정식을 함침율 변화에 따라 제시하고 있기 때문에 재료시험 또한 이에 맞춰 진행하였으며 시험결과를 회귀분석하여 물성추정식을 도출하였고, 이 식을 기반으로 구조 적층판 무게와 두께 감소 계산 함수를 재정의하였다. 재정의한 알고리즘을 사례선박에 적용함으로써 함침율 증가에 따른 구조 적층판의 두께 감소 변화와 무게 변화 시뮬레이션을 통해 경량화 설계안을 도출하였으며, 최종적으로 기존 알고리즘과 개선된 알고리즘의 적용결과를 비교분석하였다.

2.3 구조 적층판 무게와 두께 감소 변화 계산 함수

구조 적층판을 유리섬유 강화재 중량 변화에 따라 경량 최적화하기 위해서는 함침율 Gc 변화에 따른 두께 감소 함수의 정의가 필요로 하며, 재료시험 결과를 반영하기 위해서는 이에 대한 재정리가 필요하다. 기존 알고리즘은 ISO 표준과 선급에서 제시하고 있는 원자재의 물성과 적층판 두께 감소 함수 등에 기반하여 정의되어 있으며, 이를 개선하기 위하여 적층판의 무게 추정과 두께 감소 관계를 Gc 변화에 따라 함수로 정의하였다.

두께가 T인 구조 적층판은 한 장의 섬유직물에 수지가 함침되어 있는 단일 층(Single ply)의 두께 합으로 표현될 수 있으며, 단위면적의 단일 층의 두께 $T_{single\ ply}$는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{single\ ply} = T_{fiber} + T_{resin} = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_r}{\rho_r} \tag{1}$$

T : $Thickness\,(mm)$
m_f : $Mass\ of\ fiber(kg)$
m_r : $Mass\ of\ resin(kg)$
ρ_f : $Density\ of\ fiber(kg/m^3)$
ρ_r : $Density\ of\ resin(kg/m^3)$

유리섬유 강화재의 중량 비율 Gc는 식 2와 같이 표현할 수 있으므로,

$$G_c = \frac{m_f}{m_f + m_r} \tag{2}$$

G_c : $Glass\ Content$

단일 층 두께 식 1은 유리섬유 강화재의 변화에 따른 식 3과 같이 정리할 수 있다.

$$T_{single\ ply} = \frac{m_f}{\rho_f} + (\frac{m_f}{G_c} - m_f)/\rho_r \tag{3}$$

위 식에 ISO 표준의 GFRP 구조설계 규정에서 제시하고 있는 유리섬유와 수지의 밀도 2.56과 1.20을 적용하면 식 4와 같이 단일 층의 두께를 함침율, Gc로 정리할 수 있다.

$$T_{single\ ply} = \frac{w}{3.072}(\frac{2.56}{G_c} - 1.36) \tag{4}$$

w : $Weight\ per\ \ unit\ area\ of\ fabric(kg/m^3)$

단위면적의 적층판 무게 추정은 식 (4)를 w로 정리하고(식 (5)) 여기에 수지의 무게를 고려한 다음, 선체구조에 적용된 직물의 적층 수를 곱하면 구조 적층판의 무게를 계산할 수 있다. 함침율 Gc를 식 6과 같이 정의할 수 있으므로, 단일 층의 무게는 식 (7)과 같이 정리할 수 있으며, n개의 직물로 구성된 적층판의 무게는 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$w = \frac{3.072 \times T_{single\ ply} \times G_c}{(2.56 - 1.36) \times G_c} \tag{5}$$

$$G_c = \frac{w}{W_{laminate}} \tag{6}$$

$$W_{single\ ply} = \frac{3.072 \times T_{single\ ply}}{(2.56 - 1.36) \times G_c} \tag{7}$$

$$W_{laminate} = (\frac{3.072 \times T_{single\ ply}}{(2.56 - 1.36) \times G_c}) \times n \tag{8}$$

선급에서는 GFRP 선박의 구조 적층판이 가져야 하는 요구두께 T_{Req}를 제시하고 있으며, 실제 생산설계 결과 T_{mfrg}는 그 이상이어야 한다(식 (9)). 선급 규정식을 고려하여 얻은 T_{mfrg}을 앞서 정리한 함침율에 따른 적층판 무게 함수에 적용하면 구조 적층판의 무게 변화를 시뮬레이션 할 수 있다. 즉, 구조 적층판의 무게를 최소화 하며 최소 요구두께를 충족시킬 수 있는 유리섬유 강화재의 중량비율 Gc를 찾을 수 있다.

$$T_{mfrg} \geq T_{Req} \tag{9}$$

T_{mfrg} : $Thickness\ by\ manufacture\ design$
T_{Req} : $Requiered\ thickness\ by\ rules$

예를 들어 ISO 표준을 따르고 있는 RINA 규정의 구조 적층판 요구두께 계산식(식 (10))을 인용하여 설명하면 다음과 같다.

$$T_{Req} = K_1 \times K_a \times s \times \sqrt{P} \times K_{of} \tag{10}$$

K_1 : $The\ safety\ coefficient\ of\ design\ pressure$
K_a : $Coefficient\ of\ the\ ratio\ S/s\ of\ design\ area$
S : $Long\ dimension\ of\ design\ area$
s : $Short\ dimension\ of\ design\ area$
P : $Design\ pressure$
K_{of} : $Thickness\ decrement\ coefficient$

여기서 K_1은 선저에 작용하는 설계하중의 종류에 따른 계수이며, K_a는 설계하중을 받는 설계면적의 종횡비로 이 역시 계수이다. K_{of}는 앞서 설명한 함침율 변화에 따른 두께 변화 계수로 (Table 1) 유리섬유 강화재의 무게 변화에 따른 적층판의 굽힘강도에 종속된다. 즉 K_1, K_a, s와 같은 설계조건이 결정되면 선저에 작용하는 설계하중 P가 결정되고 결국 함침율 Gc의 변화에 따른 적층판의 굽힘강도에 따라 적층판의 요구두께가 결정되는 것이다(식 (10)). 따라서 어떠한 선박의 설계조건 변화가 없을 때 함침율 Gc 변화에 따른 두께 감소를 찾아낼 수 있으며, 요구두께를 충족시키는 적층판의 최소무게 또한 도출할 수 있다. 이 역시 RINA 규정에서 제시하고 있는 두께 감소 계수를 인용하여 설명하면 다음과 같다.

Table 1 내의 식을 식 (10)에 대입하고 이를 식 (8)에 대입하여 정리하면 식 (11)과 같은 적층판의 무게 함수로 정리할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 설계조건에 따라 K_1, K_a, s, P는 상수가 되므로 이를 α로 정의하면 식 (12), 식 (13)과 같이 함침율 Gc에 따른 구조 적층판의 무게 함수로 표현할 수 있다.

$$W_{laminate} = \frac{3.072 \times K_1 \times K_a \times s \times \sqrt{P} \times K_{of}}{(2.56-1.36) \times G_c} \quad (11)$$

$$\alpha = K_1 \times K_a \times s \times \sqrt{P} \quad (12)$$

$$W_{laminate} = \frac{3.072 \times \alpha \times K_{of}}{(2.56-1.36) \times G_c} \quad (13)$$

식 (13)의 값이 최소화 될 때의 Gc가 구조 적층판의 무게를 최소화하는 함침율이며, 함침율 변화는 적층판의 굽힘강도와 요구두께 감소 변화에 영향을 주므로 이를 식 (13)에 영향을 주는 두께 감소 변화 함수를 정리하면 식 (14)와 같다. 이 때 Gc는 선급 규정에 따라 해양 복합소재는 유리섬유 강화재가 30% 이상이어야 하며 70%를 초과할 수는 없다. 즉, 식 (14)를 통해 요구두께를 최소화 할 수 있는 함침율 Gc를 결정할 수 있다.

$$K_{of}(G_c) = \max\left[0.7, \min\left[1.0, \sqrt{\frac{152}{(502 G_C^2 + 107)}}\right]\right]$$

$$\text{Subject to : } 0.3 \leq Gc \leq 0.7 \quad (14)$$

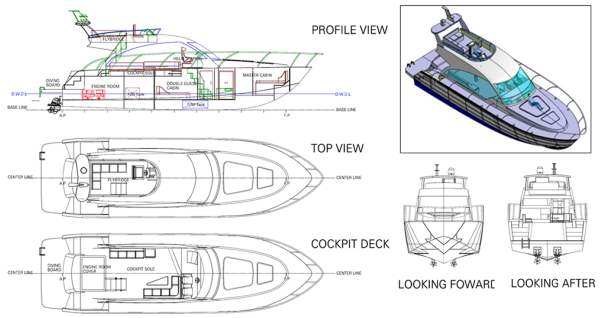
지금까지 ISO 및 선급규정에 기반하여 GFRP 구조 적층판 경량화 알고리즘을 함침율 Gc를 중심으로 정리하였으며 이를 도식화하면 Fig. 3과 같다. 사례연구 대상 선박에 적용된 유리섬유와 수지의 밀도, 그리고 재료시험을 통해 얻은 강도 추정식 등을 이용하여 식 (11), (14)를 재정의함으로써 실 선박 선체소재의 기계적 물성에 기반한 알고리즘으로 개선할 수 있으며, 이는 다음 장에서 상세히 다루었다.

3. 재료시험을 통한 알고리즘 개선

3.1 사례선박 개요와 FRP 원자재 정보

FRP 원자재 정보와 재료시험 결과를 적용하기 위한 사례선박은 52피트(15.9m)급 레저선박으로 주요 설계사양은 Table 2와 같다. MMU-G52는 일반적으로 널리 사용되는 유리섬유 강화재로 제작된 활주 형 레저선박이며 RINA로부터 CE RCD(European Union, 2013) 설계 인증을 받았다.

Table 2 Principal particulars of MMU-G52



Item	Value	Unit
L_H	15.9	m
L_{WL}	13.15	m
B_{MAX}	4.64	m
B_{WL}	4.29	m
D	2.5	m
T(Displ.)	0.95	m
Displacement	25.47	ton
Speed	32	knot

Table 3 Design coefficients of MMU-G52 related to 'α'

$$\alpha = K_1 \times K_a \times s \times \sqrt{P}$$

Symbol		Value	Unit
K_1	The Safety coefficient of design pressure	22.1	-
K_a	Coefficient of the ratio S/s	0.15	-
s	Shorter dimension	0.41	m
P	Design pressure	111	kN/m^2
α		14.32	

경량화 대상 선체구조는 선측과 선저 판으로 최대 설계하중(111kN/m^2)을 받는 선저 설계면적에서의 설계변수를 요약하면 Table 3과 같으며, 이는 앞서 정리한 식 (13)의 계산에 적용된다. GFRP 선체 외판 제작에는 유리섬유가 단위면적당 570g인 로빙(Woven Roving, WR)직물과 열경화성 수지 폴리에스터(Polyester)가 사용되었고 선측과 선저 모두 로빙직물 함침율 Gc 40%로 제작되었

으며 생산설계 상의 적층판 두께는 13.86mm, 단위면적당 무게는 19.65kg였다.

선체 외판 제작에 사용된 로빙직물과 수지로 두께 약 12.23mm의 시제품을 제작하였으며, 고체비중계(Hydrometer)를 이용하여 적층판 시제품과 수지의 비중을 측정하였고(Fig. 4) 이를 정리하면 Table 4와 같다. 이는 식 3에 적용하여 구조 적층판의 무게 시뮬레이션(식 (11))에 적용된다.

Fig. 4 Measurement of the relative densities from sample GFRP using a hydrometer

Table 4 Raw material's specifications for hull plate from experiments

Item		Value
E-glass fiber (Reinforcement)	Fabric type	Woven Roving
	Weight per unit	570 g/m^2
	Density	2.62 g/cm^3
Polyester (Matrix)	Type	Thermosetting resin
	Density	1.10 g/cm^3

3.2 적층판 시제품 제작 및 재료시험

GFRP 구조 적층판 경량화 알고리즘에 적층판의 기계적 물성을 적용하기 위하여 원자재인 직물과 수지의 밀도를 재측정하였으며, E-glass 로빙직물의 층 수 변화에 따른 적층판의 기계적 물성 변화를 확인하기 위하여 ASTM D5083(ASTM, 2017a)과 ASTM D790(ASTM, 2017b)에 따라 인장과 굽힘시험을 실시하였다.

Table 5 Laminate design for material testing

Gc	$T_{single\ ply}$ (mm)	Ply No.	$T_{laminate}$ (mm)	Weight (g)
0.3	1.43	4	5.72	12.51
0.4	0.99	5	4.95	11.74
0.5	0.74	7	5.18	13.14
0.6	0.56	9	5.04	14.08
0.7	0.44	12	5.28	16.09

로빙직물 층 수를 4~12까지 변화시키며 사이즈 40mm x 40mm 적층판 시제품 5가지(함침율 Gc 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7)를 설계하였으며(Table 5), 수적층 공법을 통해 적층판을 제작하였다. Fig. 5는 E-glass 로빙직물이 70% 포함된 시제품 제작 사례와 재료시험을 위해 컷팅된 시편을 보이고 있다.

시편은 재료시험 전에 정확한 함침율을 계산하기 위하여 크기와 무게를 측정하였으며(Table 6) 이를 바탕으로 각 시편의 함침율을 재계산하였다(Table 7). 시제품 설계보다 함침율이 다소 낮게 제작된 경향을 보이고 있으나, 시험과 분석에는 큰 영향이 없는 오차로 판단되며(Fig. 6), 이는 함침율 변화(Gc 0.318, 0.327, 0.474, 0.511, 0.601)에 따른 재료시험 결과 분석에 반영하였다.

5가지 함침율 그룹에 대해 인장과 굽힘시험을 각 7회 반복 실시하였으며 시험결과를 도식화하면 Fig. 7과 같다. 시험결과와 함께 ISO 표준, RINA 규정의 추정결과 그리고 회귀분석 결과를 비교하여 보이고 있으며, 두께 감소 계산 함수 식 14를 재정의하기 위해서는 굽힘강도 추정식(Table 1)을 필요로 하기 때문에 본 절에서는 굽힘시험 결과만 다루도록 하였다. 인장강도 시험결과는 다음 장의 종강도 평가 과정 중 적층판의 허용응력 산출에 적용되었다.

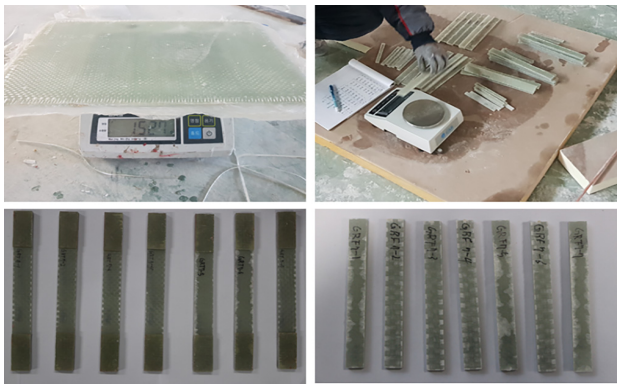


Fig. 5 GFRP structure with 70% E-glass woven roving cloth and specimens cuts for testing of tensile and flexural

Table 6 Dimension measurements of the specimens

Gc design	Length (mm)	Width (mm)	Mean thickness (mm)	Mean weight (g)
0.3	125.7	13.1	4.94	11.83
0.4	125.7	13.1	5.66	14.36
0.5	125.7	13.1	4.96	13.86
0.6	125.7	13.1	5.54	16.52
0.7	125.7	13.1	5.95	18.76

Table 7 Gc(Glass Content) measurements of the specimens

Gc design	1	2	3	4	5	6	7	Mean
0.3	0.328	0.326	0.322	0.315	0.304	0.314	0.314	0.318
0.4	0.326	0.33	0.327	0.325	0.325	0.33	0.325	0.327
0.5	0.473	0.482	0.469	0.476	0.47	0.471	0.478	0.474
0.6	0.514	0.51	0.51	0.511	0.509	0.51	0.514	0.511
0.7	0.601	0.6	0.608	0.606	0.599	0.595	0.595	0.601

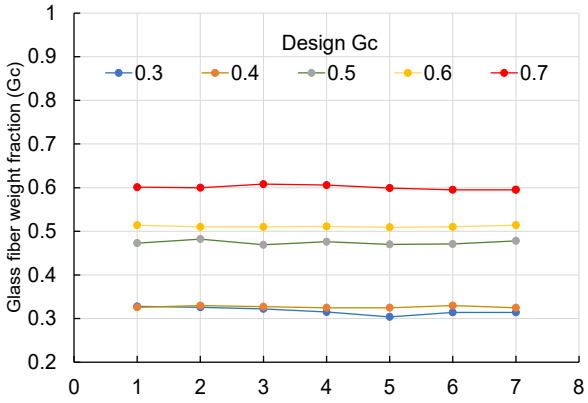


Fig. 6 Comparisons of design Gc and measured Gc

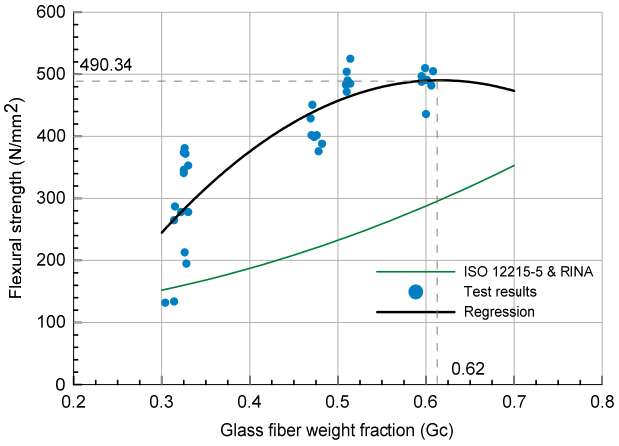


Fig. 7 Flexural strength with change in Gc

시험결과 함침율 0.3 인근 저함침율 영역에서는 일부 낮은 물성을 보이는 결과가 있었으며 이는 저함침율 적층판 제작에서 나타나는 수지 불균일이 원인인 것으로 판단된다. 함침율 0.5 이상 고함침율 영역에서는 ISO 표준 및 선급 규정 추정치의 약 두 배가량의 강도를 보였으며, 함침율 0.62(490.34N/mm^2) 이후에서는 함침율이 증가하여도 강도가 감소하는 경향을 보였다. 전체적인 시험결과는 ISO 표준 및 선급 규정의 추정치를 크게 상회하는 것으로 나타났으며 특정 고함침율 이후에서는 급격한 물성의 저하를 보였다. 이는 선행연구 결과들 (Han et al., 2018a; Song & Oh, 2016)과 유사한 경향을 보이는 것이며, 특정 고함침율 영역 이후에서의 강도 저하는 기공(porosity or voids) 혹은 박리(delamination)의 증가로 인한 적층판의 품질 저하 때문인 것으로 일반적인 경향이다. 회귀분석 결과가 선급 규정 추정치보다 전반적으로 상회함으로써 적층판의 품질과 재료시험 결과에는 이상이 없음을 확인할 수 있었으며, 사례선박에 적용된 E-glass 로빙직물의 함침율 Gc 변화에 따른 적층판의 굽힘강도 추정식을 식 15와 같이 도출하였다.

$$R_{mf} = -2457.35\,G_C^2 + 3028\,G_C - 442.41 \tag{15}$$

3.3 기계적 물성 기반의 알고리즘 개선

사례선박의 선체 외판 제작에 사용된 직물과 수지의 밀도를 측정하였고 재료시험을 통해 굽힘강도 추정식을 도출하였다. 사례선박의 설계상수(Table 3)와 직물과 수지의 밀도를 적용하여 구조 적층판의 무게 함수를 식 16과 같이 정의하였다. 또한 굽힘강도 추정식으로부터 식 17과 같이 두께 감소 계산 함수를 정의할 수 있었다. 이들을 Fig. 3에서 보이고 있는 구조 적층판 경량화 알고리즘에 적용함으로써 기존 알고리즘을 실제 선체에 사용된 원자재의 기계적 물성을 고려할 수 있도록 개선할 수 있다.

$$W_{laminate} = \frac{43.99 \times K_{of}}{2.56 - 1.36 \times G_c} \tag{16}$$

$$K_{of} = \sqrt{\frac{152}{-2457.35\,G_C^2 + 3028\,G_C - 442.41}} \tag{17}$$

두께 감소 계산 함수를 통해 선체 외판 제작에 사용된 직물의 증가 즉, 함침율 증가에 따른 요구두께의 감소 경향을 시뮬레이션 할 수 있으며 무게 추정식을 통해 적층판의 무게를 최소화할 수 있는 구조 적층판 설계안을 도출 할 수 있다.

4. 개선된 알고리즘 적용 사례연구

4.1 사례연구 방법

선체 제작에 사용된 원자재의 기계적 물성을 고려하여 개선된 알고리즘을 사례선박의 선체 외판에 적용하였다. 사례선박의 선체 형상과 구획 그리고 보강재의 배치는 설계 원안을 그대로 따랐으며, 선체 외판 제작에 적용된 함침율을 변화시키며 단위면적당 구조 적층판의 무게를 최소화하는 함침율을 도출하였다. 또한 개선된 알고리즘을 적용하였을 때의 최적화 결과를 기존 알고리즘 적용 결과 및 설계 원안과 비교분석하였다.

4.2 선체 외판 경량화 함침율 추정

사례선박의 선저판에 최대 하중(111kN/m^2)이 작용하는 설계면적을 대상으로 개선된 알고리즘을 적용하여 함침율 변화에 따른 요구두께 변화를 시뮬레이션 하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 기존 두께 감소 함수의 경우 함침율 0.63 이후부터는 더 이상(30%) 요구두께가 줄지 않는 경향을 보인다. 개선된 함수(식(17))의 경우도 유사한 경향성을 보이나 함침율 증가에 따른 요구두께 감소가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실제 적층판의 굽힘강도가 선급의 추정식 결과보다 큰 것이 반영되었기 때문으로 판단된다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 최적 강도를 나타내는 함침율에서 최대 44%까지 요구두께를 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

적층판의 무게를 최소화하는 함침율을 얻기 위해서는 Fig. 8을 단위면적당 적층판의 무게 변화로 변환이 필요하며 식 16에 의해 Fig. 9과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 선체 외판의 무게를 최소화 할 수 있는 함침율은 0.47로 도출되었으며 이때 적층판의

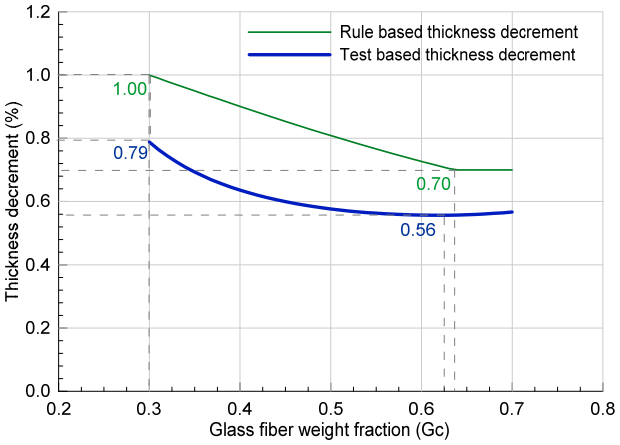


Fig. 8 Thickness decrement with change in Gc

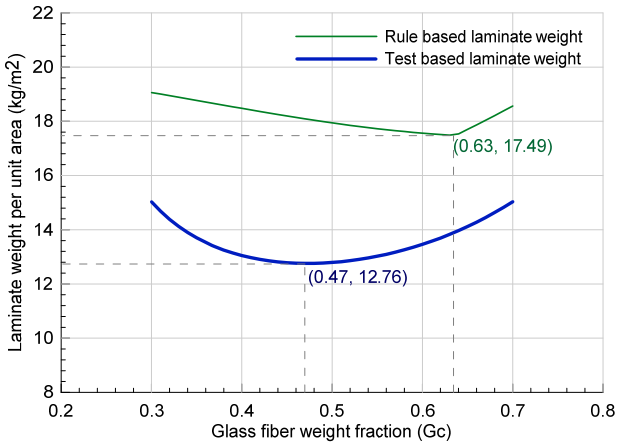


Fig. 9 Optimum Gc to minimize laminate weight

단위면적당 무게는 12.76kg으로 기존 알고리즘을 적용하는 경우보다 약 28% 더 감량이 가능한 것으로 확인되었다. 즉, 사례선박의 경우 기존 알고리즘을 사용하는 경우 로빙직물을 63% 사용할 때 선체 외판의 무게를 최소화할 수 있었지만, 원자재의 기계적 물성을 고려하여 최적화한 알고리즘을 적용할 경우 47% 일 때 선체 외판의 무게를 최소화할 수 있다. 유리섬유 강화재를 47% 이상 적용하는 경우 요구두께는 더 감소시킬 수 있으나 수지보다 상대적으로 큰 비중을 갖고 있는 유리섬유의 무게 비율이 크게 증가하면서 적층판의 무게는 오히려 더 증가함을 알 수 있다.

4.3 개선된 알고리즘의 효과분석

기존 알고리즘(Fig. 3)과 개선된 알고리즘에 의한 경량화 최적 함침율의 효과를 비교분석하였다. 설계 원안의 경우 로빙직물 40%가 사용되었고 이때 선체 외판의 단위면적당 무게는 19.65kg이었다. 기존 알고리즘을 적용한 경우 함침율 63%에서 18.19kg, 개선 알고리즘의 경우 함침율 47%에서 12.76kg으로 경량화 가능한 것으로 도출되었다. 이를 비교하여 정리하면 Table 8과 같다. Table 8에서 볼 수 있듯이 설계상수 α가 동일한 반면에, 최적화 결과 차이가 나는 것은 구조 적층판 경량화 시에 실제 유리섬유와 수지의 밀도 그리고 적층판의 강도 추정식 등을 사용했기 때문이다.

Table 7 Comparisons of optimization results

	Optimal case I (Rule based)	Optimal case II (Test based)	Unit
Gc	63	47	%
R_{mf}	306.24	437.92	MPa
K_{of}	0.7	0.56	
ρ_f	2.56	2.62	g/cm^3
ρ_r	1.20	1.10	g/cm^3
α	14.32		
$W_{laminate}$	18.19	12.76	kg/m^2

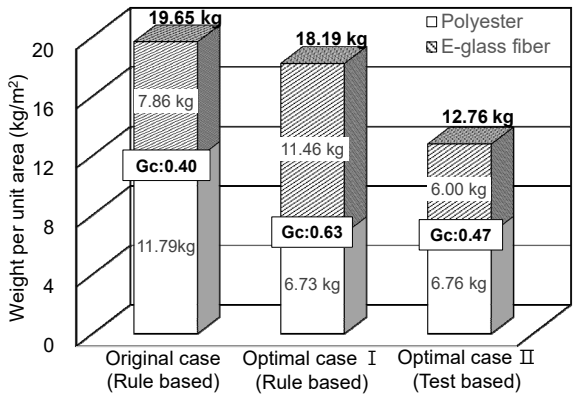


Fig. 10 Comparisons of laminate-weight change by material

설계 원안과 두 가지 경량화 설계안에 따른 선체 외판의 단위면적당 유리섬유와 수지의 원자재 양의 차이를 비교하면 Fig. 10와 같다. 기존 알고리즘의 경우 7.4% 경량화를 위해 유리섬유 강화재의 중량을 57.5% 늘려야 했지만 개선된 알고리즘의 경우 17.5%의 강화재 중량 증가를 통해 35.1%의 경량화가 가능한 것으로 시뮬레이션 되었다. 이 또한 실제 GFRP의 기계적 물성을 활용하여 더 정확한 경량화 시뮬레이션이 가능했기 때문으로 판단된다.

두 가지 경량화 설계안에 따라 유리섬유 강화재 중량의 변화가 발생하였고, 이에 따른 구조 적층판의 두께 변화로 인한 구조 안정성을 확인하기 위하여 선급 규정에 따라 선체 종강도 평가를 진행하였다. Fig. 11은 두 가지 경량화 설계안에 따른 중앙단면 선체 외판의 구조치수 변화를 도식화하여 보이고 있다. 개선된 알고리즘에서 유리섬유 강화재 중량이 줄어들었으나 선체 외판의 두께가 더 줄어든 경향을 보이는 이유는 적층판의 기계적 물

성에 기반한 두께 감소 계산 함수를 적용함으로써 적은 양의 강화재 증가로도 더욱 큰 두께 감소가 발생한 것으로 판단된다.

종강도 평가는 최적화에 적용한 RINA 규정에 따랐으며, Table 9는 평가결과를 비교하여 보이고 있다. 선체 외판 두께의 소폭 감소로 인하여 굽힘응력 또한 소폭 상승하였으나 적층판의 허용응력이 126.08N/mm^{2}으로 크게 상승함으로써 개선된 경량화 설계안의 허용응력에 대한 굽힘응력 비도 상승되었음을 확인하였다. 두 가지 경량화 설계안 모두 최대 굽힘응력은 데크에서 발생하였으며, 종강도 평가결과 문제가 없음을 확인하였다.

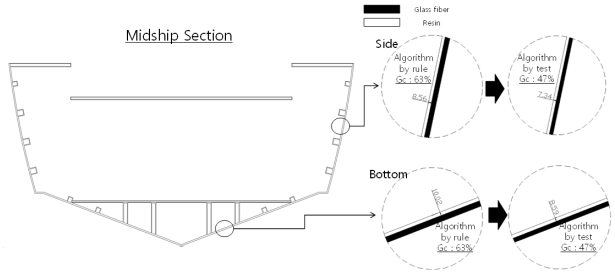


Fig. 11 Comparisons of hull plate thickness and Gc of original and improved algorithm

Table 8 Comparisons of longitudinal-strength evaluation results

Item	Original (Design)	Optimal case I (Rule)	Optimal case II (Test)	Unit
Bending stress	5.707	8.33	9.84	N/mm^2
Allowable stress	40.59	54.95	126.08	N/mm^2
Safety margin (Bending/ Allowable stress)	85.96	84.87	92.20	%

5. 결 론

본 연구에서는 복합소재 선체구조 적층판 경량화 알고리즘에 선체 제작에 사용된 GFRP 원자재와 적층판의 기계적 물성을 고려할 수 있도록 개선하였다. 기존 알고리즘에서는 ISO 표준 및 선급 규정에서 차용하고 있는 원자재의 물성과 적층판 강도 등을 시험을 통해 얻어 함침율의 변화에 따른 두께 감소와 적층판 무게 추정식 등을 재정의하였으며, 개선된 알고리즘을 사례선박에 적용함으로써 실제 GFRP 선박의 원자재 정보에 적절한 소재 최적설계가 가능함을 보였다. ISO 표준과 선급 규정에서 제시하는 물성과 여러 추정식이 매우 안정적이지만 복합소재 원자재의 종류와 그 조합이 매우 다양하고 제작환경 또한 큰 변수가 되기 때문에, 이러한 점에서 GFRP 선박의 소재 설계는 실제 소재의 기계적 물성을 고려하는 것이 매우 중요하다는 점을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 제안된 GFRP 구조 적층판 경량화 알고리즘을 활용한다면 선급의 요구조건을 충족하면서 복합소재의 비강도 특성을 극대화 할 수 있는 소재설계가 가능할 것으로 사료된다.

다만, GFRP 선박에서 사용되는 적층판의 두께가 자동차와 항공기보다 두껍고 대체적으로 수적층 공법을 통해서 제작된다는 점을 고려했을 때, 본 연구에서 실시한 재료시험이 다운 스케일의 적층판을 대상으로 하였기 때문에 향후 1:1 스케일로의 확장된 시제품에 대한 추가연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 함침율 변화에 따른 단위면적당 적층판의 무게 변화 경향성을 중심으로 시뮬레이션 하였지만, FRP가 다수의 직물 층 수로 제작되기 때문에 최적화의 수준을 적층 스케줄을 포함하는 생산설계로 확장한다면 기계적 성능뿐만 아니라 경제적 타당성 등 다양한 관점에서의 시뮬레이션이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A3B03032051)과 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(전남씨그랜트)의 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

References

Abdelal, N., 2013. Effect of voids on delamination behavior under static and fatigue Mode I and Mode II. University of Dayton, *2013 University of Dayton Stander Symposium*. Ohio, United States of America, April 2013.

American Society for Testing Materials, 2017a. *Standard test method for tensile properties of reinforced thermosetting plastics using straight-sided specimens*. ASTM D5083.

American Society for Testing Materials, 2017b. *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. ASTM D790.

Bolvashenkov, I., Herzog, H., Rubinraut, A. & Romanovskiy V., 2014. Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Coimbra, Portugal, 27-30 October 2014., pp.1-9.

Choi, H.K., Nam, K.W. & Aha, S.H., 2013. Strength characteristics of FRP composite materials for ship structure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(4), pp.45-54.

European Union, 2013. *Application guide to the recreational craft directive 94/25/EC*. [online] (Updated 18 Jan 2016) Available at : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013L0053 [Accessed 9 Feb 2020].

Hakim, I., Donaldson, S.L., Meyendorf, N. & Browning C.E., 2017. Porosity effects on interlaminar fracture behavior in carbon fiber-reinforced polymer composites. *Materials Sciences and Applications*, 8(2), pp.170-187.

Han, Z.Q., Jang, J.W., Noh, J.K. & Oh, D.K., 2018a. A study on material properties of FRP laminates for a composite fishing vessel's hull. Korean Society for Precision Engineering(KSPE), *2018 KSPE Spring Conference. Jeju, Republic of Korea*, 11 May 2018.

Han, Z.Q., Jeong, S.H., Jang, J.W. & Oh, D.K., 2018b. Laminates weight optimization of FRP fishing vessel using experimental result. Korean Society for Precision Engineering(KSPE), *2018 KSPE Autumn Conference. Gunsan, Republic of Korea*, 25 Oct 2018.

International Organization for Standardization, 2019. *Small craft -hull construction and scantlings*. ISO 12215-5.

Jang, J.W., Han, Z.Q. & Oh, D.K., 2019. Light-weight optimum design of laminate structures of a GFRP fishing vessel. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(6), pp.495-503.

Jeong, S.H., 2019. *Simulation of greenhouse gas emissions for environmental impact assessment of small craft*. Master's Degree Dissertation, Mokpo National Maritime University.

Jeong, S.H., Jung, K.S., Lee, D.K. & Oh, D.K., 2018a. Environmental impact evaluation of lightweight FRP laminates for composite ship structures by LCA(Life Cycle Assessment). Korean Society for Precision Engineering(KSPE), *2018 KSPE Spring Conference*. Jeju, Republic of Korea, 11 May 2018.

Jeong, S.H., Lee, D.K. & Oh, D.K., 2018b. Environmental impact assessment for a small craft considering operational condition. Korean Society of Marine Environment & Safety(KOSOMES), *2018 KOSOMES Autumn Conference*. Busan, Republic of Korea, 29 Nov 2018.

Kang, G.M., Jeong, Y.K., Lee, D.K. & Oh, D.K., 2014. A correlation study between carbon fibers weight-fraction and design area for CFRP hull plate. The Korean Society of Ocean Engineering(KSOE), *2014 Annual Spring Meeting of KSOE*. Busan, Republic of Korea, 23 May 2014.

Kim, S.Y., Shim, C.S., Sturtevant, C., Kim, D. & Song, H.C., 2014. Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures. *International Journal of Naval Architecture Ocean Engineering*, 6(3), pp. 723-736.

Lloyd's Register, 2018. *Rules & Regulations for the Classification of Special Service Crafts*.

Ministry of Oceans and Fisheries of Republic of Korea(MOF), 2019. *Statistics of registered fishing vessel*. [Online] (Updated 1 Jan 2019) Available at : http://www.mof.go.kr/statPortal [Accessed 9 Feb 2020].

Oh, D.K., 2019. *Marine composite, FRP small craft and eco-friendly*. [Online] (Updated 28 Aug 2019) Available at: http://www.snak.or.kr/newsletter/webzine/news.html?Item=board21&mode=view&s_catg=August%2C+2019&s_t=1&No=645 [Accessed 9 Feb 2020].

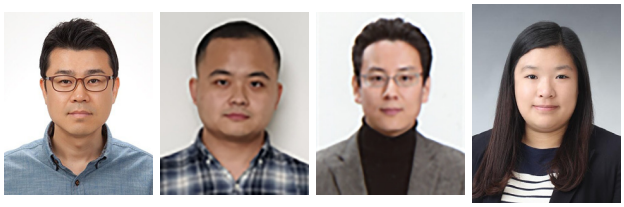
Oh, D.K., Han, Z.Q. & Noh, J.K., 2018b. Light-weight optimum design of 11m-CFRP high speed craft using laminates weight optimization method. *Marine Technology*, 5(145), pp.77-84.

Oh, D.K & Hwang T.H., 2015. An Experimental study of design and manufacture for lightweighting composites structures of a GFRP ship. The Korean Society of Ocean Engineering(KSOE), *2015 Annual Spring Meeting of KSOE*. Jeju, Republic of Korea, 2 May 2015.

Oh, D.K., Jung, S.H. & Jeong, S.H., 2018a. Effect of a lightweight hull material and an electric propulsion system on weight reduction: Application to a 45ft CFRP electric yacht. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 24(6), pp.818-824.

Registro Italiano Navale, 2015. *Rules for the Classification of Pleasure Yacht Part B - Hull and Stability*.

Song, J.H. & Oh, D.K., 2016. Lightweight structure design for composite Yacht with optimum fiber mass content. Proceedings of *International SAMPE Technical Conference*, Long Beach, United States of America, 2016.



오 대 균 | Zhiqiang Han | 노 재 규 | 정 숙 현