

티타늄합금 레저보트의 구조설계를 위한 설계하중 비교연구

염재선
목포대학교 조선해양공학과

Comparative Study of Design Loads for the Structural Design of Titanium Leisure Boat

Jae-Seon Yum

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

요약 최근 국내 해양레저에 대한 국민들의 관심이 높아지고 있고, 해외 시장 개척을 위한 레저선박 건조 및 제조업체들의 연구개발이 활발한 실정이다. 기존 레저보트에 많이 사용되어 온 재료 중에서 FRP와 알루미늄합금은 각각 장기간 사용으로 인한 흡습성과 재활용이 불가능한 환경문제와, 높은 열전도도와 고열에 약해 화재에 취약하다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 높은 비강도와 내식성을 갖춘 티타늄합금을 선체 재료로 선택하였고, 선박의 구조설계를 위해 충격하중에 의한 설계하중을 4가지 규정으로부터 산정하고, 이 하중에 대응하는 선체 판두께를 추정하였다. 국제표준인 ISO 12215-5, 이탈리아선급인 RINA Pleasure Yacht, 영국선급인 LR Special Service Craft, 한국선급인 KR 고속경구조선규칙을 비교 분석한 결과, 최대 슬래밍하중은 ISO, KR, LR, RINA의 크기 순서로 높게 계산되었고, 요구되는 판 두께도 ISO, KR, LR, RINA의 크기 순서로 추정되었다. 레저보트는 국제 규정에 적합한 설계와 인증이 필수적이므로, 각 규정에 대한 사용자의 이해를 높이고 해외 수출 선박의 설계 및 승인 절차에 도움이 되리라 생각한다.

Abstract Recently, people's interest in marine leisure has been increasing, and research and development on leisure boats are actively being carried out to pioneer overseas markets. These days, the materials used for leisure boats are fiber-reinforced plastic (FRP) and aluminum alloy. However, FRP is hygroscopic and causes environmental problems, and aluminum alloy has high thermal conductivity and fire susceptibility. Therefore, titanium alloy is being adopted as a material for leisure boats instead. In this study, hull thicknesses and design pressures were calculated while considering dynamic effects for titanium boats. Four sets of rules and regulations were used: ISO 12215-5, RINA Pleasure Yacht, LR Special Service Craft, and KR High-speed Light Craft. The maximum bottom slamming loads were in the order of ISO, KR, LR, and RINA, and the required hull thicknesses were in the same order. This research might be helpful for understanding the rules, regulations, and overseas export of leisure boats.

Keywords : Titanium Alloy, Aluminum Alloy, Slamming Load, Plating Thickness, ISO, RINA, LR, KR

1. 서론

최근 국내 해양레저에 대한 국민들의 관심이 높아지고 있고, 해외 시장 개척을 위한 레저선박 건조 및 제조업체들의 연구개발이 활발한 실정이다. 기존 대부분 레저보트

에는 FRP 복합재료가 사용되고 있다. 그러나 FRP 재료는 장기간 사용시 나타나는 흡습성이나 폐선 후 재활용이 불가능하다는 환경문제 때문에 요즘은 알루미늄합금이 레저보트의 대체재로 사용되고 있다. 그러나 알루미늄합금도 높은 열전도도와 고열에 약해 화재에 취약하다는

*Corresponding Author : Jae-Seon Yum(Mokpo National Univ.)

email: yummy@mokpo.ac.kr

Received December 18, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised January 21, 2021

Published February 28, 2021

단점을 가지고 있다.

지각에 아홉 번째로 많이 함유된 원소인 티타늄은 밀도가 강철의 약 57.4%로 가볍지만, 비강도는 알루미늄의 약 2배, 강철의 약 4배이며 열전도도와 열팽창률도 작은 편이다. 그래서 티타늄의 약 60%가 항공우주산업에서 사용되고 있는데, 바닷물에서도 부식되지 않는 뛰어난 내식성 때문에 Fig. 1과 같이 세일 요트나 잠수함의 재료로도 사용되고 있다.



Fig. 1. Titan Lady - a sailing cruiser custom built entirely of titanium

따라서 본 연구에서는 티타늄합금을 이용한 선박의 구조설계를 위해 선체에 작용하는 충격하중의 동적효과를 고려한 설계하중을 산정하고, 이 하중에 대응하는 선체 판 두께를 추정하였다. 특별히 선저외판에 가해지는 충격하중인 슬래밍하중에 대해 충분한 강도를 유지하기 위해 다음 4가지 규정을 비교 검토하였다. 그것은 국제표준규정인 ISO 12215-5(이하 ISO)[1], 이탈리아선급(이하 RINA)의 Pleasure Yachts 규정[2], 영국선급(이하 LR)의 Special Service Craft 규정[3], 한국선급(이하 KR)의 고속경구조선규칙[4]이다.

4가지 규정을 비교 분석한 이유는 레저선박의 해외 수출을 위해서는 국제규정에 적합한 설계와 인증이 필수적이므로, 각 규정에 대한 사용자의 이해를 높이고 수출 선박의 설계 건조 및 승인 절차에 적용을 돕기 위함이다.

2. 관련규정 및 연구동향

ISO 규정은 2008년 국제표준으로 개발, 발간되어 세

계적으로 사용되도록 조치를 취하고 있지만, 국가간 서로 상이한 표준을 단일 표준으로 사용하도록 하기는 쉽지 않은 실정이다. RINA는 슈퍼요트를 포함한 레저선박 인증의 40% 정도 점유율을 차지하고 있고, LR은 레저선박의 인증을 주도하는 선급 중 하나이며, KR은 국내에서 건조하고 사용되는 레저보트에 대한 규칙을 제공하고 있다는 특징이 있다.

그동안 다양한 선체재료에 대한 선체구조설계 연구가 있었는데, Cho[5]는 카누나 카약에 사용되는 고밀도 폴리에틸렌을 플레저 보트에 적용하여 구조설계를 수행하였고, Oh[6] 등은 탄소섬유강화복합재료(CFRP) 선박 설계를 위해 ISO와 RINA의 규정을 비교분석하여 설계하중과 요구두께를 추정한 바 있으며, Yum[7] 등은 20피트급 알루미늄 파워보트에 ISO, LR, KR의 설계하중을 적용한 바 있고, Ko[8]는 샌드위치 구조로 된 FRP 복합재료를 사용한 8미터급 고속 활주선형 레저보트에 대해 KR의 선저슬래밍하중을 적용하여 구조강도를 평가한 바 있다.

이처럼 다양한 선체재료에 대한 사례연구가 있었지만 티타늄합금 소재에 대한 국제규정 검토는 이루어진 바가 없다.

3. 선저슬래밍하중

일반적으로 정수 중의 활주선은 활주상태로 운항하지만, 항해시 파도가 높아지면 속도를 줄여야 하므로 그 경우는 배수량 상태로 운항한다. 배수량 상태(displacement mode)보다 활주상태(planing mode)에서는 동적인 효과가 추가되어 선체에 더 큰 압력이 작용하므로, 가장 중요하게 고려할 선저부 충격하중인 선저슬래밍압력(bottom slamming pressure)을 4가지 국제규정들로부터 계산하여 비교하였다.

3.1 ISO 12215-5

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

$$P_{BM\ MIN} = 0.45m_{LDC}^{0.33} + (0.9 \times L_{WL} \times k_{DC})$$

P_{BMP} or $P_{BM\ MIN}$ 중 큰 값을 사용한다.

where,

$$P_{BMP\ BASE} = \frac{0.1 m_{LDC}}{L_{WL} \times B_C} \times (1 + k_{DC}^{0.5} \times n_{CC})$$

m_{LDC} : load displacement mass (kg)

L_{WL} : length of the waterline (m)

k_{DC} : design category factor

k_{AR} : area pressure reduction factor

$$= \frac{k_R \times 0.1 \times m_{LDC}^{0.15}}{A_D^{0.3}} \quad (\text{NOT } k_{AR} > 1)$$

k_R : structural component and boat type factor

$$A_D = (l \times b) \times 10^{-6} < 2.5 \times b^2 \times 10^{-6} \quad (m^2)$$

l : longer dimension of panel (mm) = 700

b : shorter dimension of panel (mm) = 220

k_L : longitudinal pressure distribution factor

$$k_L = 1 \quad \text{for } \frac{x}{L_{WL}} > 0.6, \quad \text{otherwise}$$

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

$$n_{CG} = 0.32 \left(\frac{L_{WL}}{10 \times B_C} + 0.084 \right) \times (50 - \beta_{0.4})$$

$$\times \frac{V^2 \times B_C^2}{m_{LDC}} \quad \text{: dynamic load factor}$$

$$\text{if } n_{CG} > 3.0, \quad n_{CG} = \frac{0.5 \times V}{m_{LDC}^{0.17}} \leq 7.0$$

B_C : chine beam (m) = 5.4

$\beta_{0.4}$: deadrise angle at $0.4L_{WL}$ = 13.31

V : maximum speed ($knots$)

3.2 RINA - Pleasure Yachts

p_1 과 p_2 중에서 큰 값을 사용한다. (kN/m^2)

$$p_1 = 0.24L^{0.5} \cdot \left(1 - \frac{h_0}{2T} \right) + 10 \cdot (h_0 + a \cdot L) \geq 10D$$

$$p_2 = 15 \cdot (1 + a_v) \cdot \frac{\Delta}{L \cdot C_s} \cdot g \cdot F_L \cdot F_1 \cdot F_a \quad (2)$$

where, $a_v = k_v \cdot a_{cy} = k_v \cdot S \cdot \frac{V}{L^{0.5}}$: maximum design

value of vertical acceleration (m/s^2)

$$S = 0.65 C_F = 0.65 \times \{ 0.2 + [0.6 / (V/L^{0.5})] \}$$

$$C_F \geq 0.32$$

k_v : longitudinal distribution factor (0.8~2.0)

Δ : displacement (ton)

C_S : support contour defined as the transverse

distance (m). same as $G_S = 5.56$ in LR.

F_L : coefficient as a function of the longitudinal position

$$F_1 = \frac{50 - \beta_X}{50 - \beta_{LCC}} \quad \text{: coefficient function}$$

of the shape and inclination

β_{LCC} : deadrise angle at LCG (degrees) = 15

$$F_a = 0.30 - 0.15 \cdot \log \left(\frac{1.43 \cdot A_1 \cdot T}{\Delta} \right)$$

A_1 : surface of the plating panel (m^2)

3.3 LR - Special Service Craft

$$P_{db} = \frac{f_d \Delta \Phi (1 + a_v)}{L_{WL} G_0} \quad (kN/m^2) \quad (3)$$

where,

f_d : hull form pressure factor = 54 for mono-hull

$\Phi = 0.5$ at L_{WL} from aft end of L_{WL}

= 1.0 at $0.5L_{WL}, 0.75L_{WL}$

from aft end of L_{WL}

= 0.5 at aft end of L_{WL}

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

where, $\theta_B \geq 3^\circ$: running trim angle in degrees.

$$H_1 = \frac{H_{1/3}}{B_W} \geq 0.2 \quad L_1 = \frac{L_{WL} B_c^3}{B_W \Delta}$$

B_c : breadth of hull between the chines at LCG

B_W : waterline breadth of hull at LCG = 5.54

θ_D : deadrise angle at LCG. $\leq 30^\circ = 15.33$

$$\Gamma = \frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \quad \text{: Taylor Quotient}$$

L_{WL} : waterline length (m)

G_0 : support girth or girth distance (m)

between tangential points or chines at LCG

3.4 KR - 고속경구조선규칙

$$P_{sl} = 1.3 k_l \left(\frac{\Delta}{nA} \right)^{0.3} d_o^{0.7} \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cy}} a_{cy} \quad (kN/m^2) \quad (4)$$

$$\text{if } \frac{V}{\sqrt{L}} \geq 3.0$$

where, k_l : longitudinal slamming pressure

distribution factor (0.5~1.0)

n : No. of hull. 1 for mono, 2 for catamaran

A : surface area of design pressure (m^2)
 $\geq 0.002\Delta/d$

(1) plate : $A < 2.5S^2$

(2) stiffener or girder : $A = Sl$

S : transverse stiffener spacing (m)

l : span of stiffener or girder (m)

d_o : draft at midship (m)

β_x : deadrise angle at x position

$$10^\circ \leq \beta_x \leq 30^\circ$$

β_{cg} : deadrise angle at LCG

(i) if $\frac{V}{\sqrt{L}} < 3.0$

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

(ii) if $\frac{V}{\sqrt{L}} \geq 3.0$

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

where, k_h : form factor. 1 for mono

H_s : significant wave height (m)

B_{WL} : waterline breadth at midship (m)

3.5 설계하중 추정식 비교

Table 1과 같은 주요치수를 갖는 레저보트에 대해 4 가지 규정에서의 설계하중을 산출하였다.

또한 Fig. 2에는 선미에서 선수방향으로 선체 길이방향의 위치(x) 에 대한 수선길이(LWL)와의 비율을 가로축에 나타내었고, Eq. (1)~(4)에 의한 선저슬래밍하중의 크기를 세로축에 나타내었다.

Table 1. Principal dimensions

Length Overall (LOA)	19.85 m
Length Between Perpendicular (LBP)	17.19 m
Length of Waterline (LWL)	17.19 m
Moulded Breadth (Bmax)	6.05 m
Moulded Depth (D)	2.67 m
Moulded Draft (T)	0.90 m
Design Speed (Vs)	32 knots
Displacement Volume	41.46 m ³
Displacement (1.025 ton/m ³)	42.50 ton

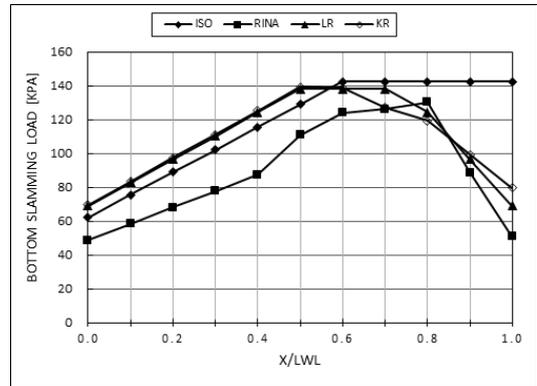


Fig. 2. Design pressures for 4 different regulations

선저슬래밍하중의 최대값의 크기는 ISO, KR, LR, RINA의 순서인데 그 차이는 최대 8.4%로 나타났다. 선저슬래밍압력은 일반적으로 선수부에 작용하는 충격하중이므로, 주로 선체 길이방향의 0.6~0.8L 사이에서 가장 큰 값을 갖게 되고, 선수방향으로 가면서 선저기울기(deadrise)는 커지고 선저 충격은 줄어들어 작용하는 하중의 크기는 최고값에서부터 줄어들게 된다.

RINA의 설계하중은 0.8L 이후에 선체길이방향계수(F_L)의 영향으로 급격하게 감소하지만, ISO의 경우에는 다른 규정들과는 달리 선수쪽에서의 계수에 의한 조정이 없기 때문에, 0.6L에서부터 선수까지 같은 값을 유지하고 있어 보다 보수적인 경향이 나타나고 있다.

LR의 경우 running trim angle(θ_B)이 최소 3° 이상이 되도록 하고 있는데, 수직가속도가 이 값에 비례하고 충격하중은 가속도에 비례하므로 트림이 증가하면 할수록 충격하중은 커지게 된다.

그리고 레저보트의 항해구역에 대한 설계하중의 적용을 위해 ISO는 k_{DC} (design category factor), LR과 KR은 유의파고 높이를 고려한 수직가속도를 사용하고 있지만 RINA는 고려하지 않고 있다.

4. 두께 추정

티타늄합금과 알루미늄합금, 연강의 기계적 성질은 Table 2[9]와 같고, 각 규정에서 요구하는 판 두께 추정을 위해 설계하중, 설계응력 등이 사용되었다.

Table 2. Mechanical properties

Material	Ti-6Al-4V	AL5083-O	Mild Steel
density(ton/m ³)	4.50	2.66	7.85
Tensile yield strength(Mpa)	830	125	250
Tensile ultimate strength(Mpa)	895	260	460
Young's modulus(Gpa)	116	71	200
Poisson's ratio	0.34	0.33	0.30
Specific strength	198.89	97.74	58.60

4.1 ISO 12215-5

$$t = b \times k_c \times \sqrt{\frac{P \times k_2}{1000 \times \sigma_d}} \quad (mm) \quad (5)$$

where, b : short dimension of the panel (mm)

k_c : curvature correction factor

P : design pressure (kN/m^2)

k_2 : panel aspect ratio factor

σ_d : design stress (N/mm^2),
 $\min(0.6\sigma_{uw}, 0.9\sigma_{yw})$

◦ Minimum thickness

$$t_{\min} = k_5 \times (A + k_7 \times V + k_8 \times m_{LDC}^{0.33}) \quad (mm) \quad (6)$$

4.2 RINA

아래 t_1, t_2 중 큰 값을 택한다.

$$t_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_a \cdot s \cdot (p \cdot K)^{0.5} \quad (mm) \quad (7)$$

$$t_2 = 11 \cdot s \cdot (T \cdot K)^{0.5} \quad (mm) \quad (8)$$

where, $k_1 = 0.15$ (if $p = p_1$)
 $= 0.10$ (if $p = p_2$)

k_2 : curvature correction factor

k_a : coefficient as a function of the ratio S/s

s : transverse stiffener spacing (m)

p : scantling pressure (kN/m^2)

$$K = \frac{110}{\eta \cdot R_{p0.2}} \quad \text{: material factor}$$

$R_{p0.2}$: minimum guaranteed yield stress

◦ Minimum thickness

$$t_1 = 1.75 \times L^{1/3} \times K^{0.5} \quad (mm) \quad (9)$$

4.3 LR

$$t_p = 22.4 s \gamma \beta \sqrt{\frac{P}{f_\sigma \sigma_a}} \times 10^{-3} \quad (mm) \quad (10)$$

where, s : stiffener spacing (mm)

γ : convex curvature correction factor

β : panel aspect ratio correction factor

P : design pressure (kN/m^2)

f_σ : limiting bending stress coefficient=0.85

σ_a : min (guaranteed min. 0.2% proof stress,
 70% of the ultimate strength) (N/mm^2)

◦ Minimum thickness

$$t = \omega \sqrt{k_m} (0.7 \sqrt{L_R} + 1.0) \geq 4.0\omega \quad (11)$$

4.4 KR

$$t = \frac{S \sqrt{CP}}{\sqrt{\sigma}} \quad (mm) \quad (12)$$

where, C : correction factor according to boundary condition and aspect ratio

S : stiffener spacing (m)

P : design load (kN/m^2)

σ : allowable stress = $200/K$

◦ Minimum thickness

$$t = (t_0 + kL) \sqrt{K} \frac{S}{S_R} \quad (mm) \quad (13)$$

4.5 두께 추정치 비교

티타늄합금으로 된 판의 두께 크기는 Eq. (5)~(13)에 의해 ISO, KR, LR, RINA의 순서로, 최소두께 크기는 KR, ISO, LR, RINA의 순서로 추정되었다.

Table 3. Comparison of thickness for titanium alloy and aluminum alloy (unit:mm)

Rule		ISO	RINA	LR	KR
Plate thickness	Ti-6Al-4V	2.53	2.05	2.18	2.21
	AL 5083	5.54	5.28	5.62	5.69
Min. thickness	Ti-6Al-4V	1.94	1.64	1.84	2.28
	AL 5083	5.01	4.24	3.90	5.87

알루미늄합금으로 된 판은 KR, LR, ISO, RINA의 순서로 두께가 추정되었고, 최소두께 크기는 KR, ISO,

RINA, LR의 순서로 추정되었다. 하지만 Table 3에 보인 바와 같이 각 규정별 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 두 재료 모두 RINA 규정에 의한 설계가 가장 경제성이 있는 것으로 나타났다.

각 선급 규정에는 새로운 재료인 티타늄합금을 사용한 선체에 대한 두께 규정이 아직 제정되어 있지 않지만, 강재나 알루미늄의 경우 서로 유사한 식을 사용하고 있으므로 티타늄에 대해서도 알루미늄에 적용된 추정식을 이용하는 것이 무리가 없으리라 판단하였고, 추후 각 선급 규정에서 요구되는 판 두께 추정식이 제정되리라 기대한다.

5. 결론

본 연구에서는 새로운 선체 재료를 사용한 티타늄합금 레저보트의 구조설계를 위해 4가지 선급 규정(ISO, RINA, LR, KR)을 비교 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 활주하는 선체에 작용하는 가장 큰 충격하중인 선저슬래밍하중을 추정한 결과, 최대값의 크기는 유사하게 나왔지만 선체 길이방향 위치에 따른 크기 변화는 규정별로 다름에 유의해야 한다.
- 2) 선저슬래밍하중에 견딜 수 있는 선저외판 두께를 추정한 결과, 티타늄합금의 경우 하중의 크기 순서와 같이 ISO, KR, LR, RINA의 순서로 나왔지만, 알루미늄합금의 경우 KR, LR, ISO, RINA의 순서로 나타났고, 그 차이는 크지 않았다. 그리고 두 재료 모두 RINA 규정에 의한 설계가 가장 경제성이 있는 것으로 나타났다.
- 3) 티타늄합금을 사용할 경우 알루미늄합금에 비해 비강도가 2배 정도 크기 때문에, 예상할 수 있는 바와 같이 요구되는 두께를 약 절반 이상으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

티타늄합금을 레저보트의 소재로 적용했을 때의 4가지 국제규정에 대한 비교 분석을 통해 사용자의 이해를 높여 선박설계기술 향상과 승인절차에 도움이 되리라 기대한다.

References

[1] International Standard, ISO 12215-5 Small craft - Hull

construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination, Geneva, 2008.

- [2] RINA(Registro Italiano Navale), Rules for the Classification of Pleasure Yacht, Part B Hull and Stability. Imago Media, Italy, 2020.
- [3] LR(Lloyd's Register), Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft, Vol. 3 Part 5 Design and Load Criteria, Llyod's Register Group Limited, London, 2020.
- [4] KR(Korean Register), Rules for the classification of high speed light craft, Daejeon, 2020.
- [5] S. S. Cho, "Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No.12, pp.1551-1561, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1551>
- [6] D. K. Oh, D. K. Lee, G. M. Kang, C. H. Ryu, J. 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.
DOI: <https://doi.org/10.5574/KSOE.2014.28.1.077>
- [7] 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://doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.2.108>
- [8] 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.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.418>
- [9] Product brochure, "<http://www.posco.com>", (c)POSCO

염 재 선(Jae-Seon Yum)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학박사)
- 1995년 9월 ~ 1999년 8월 : 한국해양연구원 선임연구원
- 1999년 9월 ~ 현재 : 목포대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 구조해석, 설계자동화