

티타늄합금 레저보트의 구조강도 평가

염재선
목포대학교 조선해양공학과

Structural Strength Assessment of Titanium Alloy Leisure Boat

Jae-Seon Yum

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

요약 최근 국민 소득 증가로 인해 해양에서의 레저활동에 국민들의 관심이 높아지고 있고 레저선박에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 해양 레저보트에 사용되는 선체 재료로 FRP(Fiber Reinforced Plastic)와 알루미늄합금이 많이 사용되고 있다. 그러나 FRP는 장기간 사용에 따른 흡습성과 재활용의 어려움으로 인한 환경오염 문제가 있고, 알루미늄합금은 높은 열전도도와 고열에 약해 화재에 취약하다는 단점으로 인해 새로운 선체 재료가 요구되고 있다. 이에 높은 비강도와 내식성을 가진 티타늄합금이 기존 재료를 대체할 수 있을지에 대한 검토가 필요하다. 제련과정의 높은 비용 때문에 재료비 단가가 높은 실정이지만 소형 레저보트의 경우 이미 경제성 분석을 통해 경쟁력이 있음을 확인하였으므로, 티타늄합금으로 된 60피트급 중형 레저보트에 대한 구조안전성을 확인하는 것이 필요하다. 동급의 알루미늄합금으로 된 실적선을 모선으로 하여 설계한 구조해석모델에 ISO 12215-5 규정에서의 선저슬래밍 하중을 설계하중으로 적용하였고, 동적효과를 고려한 선형 정적해석으로 구조강도를 평가한 결과 그 안전성을 확인하였다. 티타늄합금을 새로운 선체 재료로 채택할 경우 높은 비강도로 인한 중량절감과 그에 따른 운항비 및 유지비 절감이 기대된다.

Abstract People's interest in leisure activities in the sea is increasing, and research and development on leisure boats are progressing. FRP and aluminum alloy are widely used as hull materials for marine leisure boats. However, FRP has environmental pollution problems, and aluminum alloy has high thermal conductivity and fire susceptibility. Therefore, new hull materials are required. It is necessary to examine whether titanium alloys with high specific strength and corrosion resistance can replace these materials. It has already been confirmed that small titanium leisure boats are competitive through economic analysis. The ISO bottom slamming load was applied as a design load in a structural analysis model. The titanium alloy boat was designed based on an aluminum alloy boat of the same class. The structural strength was evaluated by linear static analysis considering dynamic effects. Its safety was confirmed, and it is expected to reduce weight due to its high specific strength, which will reduce operating and maintenance costs.

Keywords : Aluminum Alloy, FRP, ISO, Slamming Load, Strength Assessment, Titanium Alloy

본 논문은 2021학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

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

email: yummy@mnu.ac.kr

Received February 1, 2023

Accepted March 3, 2023

Revised February 28, 2023

Published March 31, 2023

1. 서론

최근 해양레저에 대한 국민들의 관심이 높아지고 있고, 해외 시장 개척을 위한 레저선박 제조업체들의 설계 및 생산기술에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 레저보트에 사용되는 선체 재료로는 주로 FRP(Fiber Reinforced Plastic)와 알루미늄합금이 많이 사용되고 있다. 그러나 FRP는 장기간 사용으로 인한 흡습성과 재 활용의 어려움으로 인한 환경문제를 유발하고 있고, 알루미늄합금은 높은 열전도도와 고열에 약해 화재에 취약하다는 단점을 가진 재료들이다[1]. 따라서 가볍지만 비강도(specific strength)와 내화성이 우수한 새로운 재료를 적용한 친환경 선박의 개발이 요구되고 있다.

지각에 아홉 번째로 많이 함유된 원소인 티타늄의 밀도는 강철의 57%에 불과하지만, 비강도는 알루미늄의 약 2배, 강철의 약 4배이며 열전도도와 열팽창률도 작은 편이다. 그래서 티타늄의 약 60%가 항공우주산업에서 사용되고 있는데, 바닷물에서도 부식되지 않는 뛰어난 내식성(corrosion resistance) 때문에 해수 파이프나 잠수함의 선체 재료로도 사용되고 있다. 하지만 알루미늄합금에 비해 제련과정의 높은 비용 때문에 재료비가 상대적으로 높은 실정인데, 향후 제련 기술 향상으로 재료 단가가 낮아지고 경제성에 대한 우위가 확보된 후 전반적으로 사용될 가능성이 높다.

따라서, 높은 비강도와 내식성을 갖춘 티타늄합금이 새로운 선체 재료로 대체 가능한지에 대한 검토가 필요하다. Fig. 1과 같은 40피트 미만의 소형레저보트의 경우 이미 경제성 분석을 통해 경쟁력이 있음을 확인하였으므로[2], 60피트급 중형레저보트에 대한 경제성 분석을 수행하기 전에 선체재료 변화에 따른 구조 안전성을 확인하기 위해 필수적인 구조강도 평가가 이루어져야 한다.

레저선박의 구조강도평가에 관한 연구는 주로 FRP 재료를 사용한 선박에 대하여 이루어져 왔다. Yum 등[3]은 FRP로 된 20피트급 파워보트의 구조강도 평가 연구에서 각국 선급규정에서 제시하고 있는 설계하중에 대한 비교 검토와 구조강도를 평가하였고, Go[4]는 FRP 복합재료 소재의 샌드위치 판넬을 사용한 8m급 소형 레저보트의 구조강도평가를 수행한 바 있다. 또한 Oh[5] 등은 알루미늄 레저보트 개발을 위해 디지털 목업을 이용하는 연구를 수행하였고, Na 등[2]은 12피트급 티타늄 소형 레저보트 개발 연구를 통해 티타늄합금의 선체재료 사용에 대한 가능성을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 실적선인 알루미늄합금 선박의 선형과

구조배치를 참조하여 티타늄합금을 선체구조부재의 재료로 채택한 60피트급 레저보트 설계안에 대해 국제 표준 규정인 ISO 12215-5[6]에서의 설계하중을 적용하여 구조안전성을 검토하였다.



Fig. 1. Titanium alloy boat

2. 파워보트의 구조강도평가

일반적으로 유한요소법에 의한 선체구조해석은 새로운 형식의 선박에 대한 구조강도평가나 국부적인 상세해석이 필요한 경우 등 전선해석이나 화물창부 일부에 대한 해석으로 진행된다. 파워보트와 같은 고속경구조선의 경우 전체 강도해석이 수행되는데, 선박의 길이 $L < 50m$, 그리고 $L/D < 12$ 인 선박으로서 고속경구조선 및 일반 경구조선에 대하여는 국부강도를 만족하면 종굽힘, 전단 및 축하중을 만족하는 것으로 간주할 수 있다[3]. 따라서 30노트 이상의 고속의 레저보트의 경우 선저에 작용하는 충격하중인 슬래밍하중(slamming load)이 다른 하중보다 지배적이므로 이에 대한 설계하중을 산정하여 구조강도를 평가할 필요가 있다.

2.1 재료물성치

기존 선체 재료로 사용되는 알루미늄합금, FRP, 연강과 비교한 티타늄합금의 재료물성치는 Table 1과 같고, 범용구조해석도구인 ANSYS Workbench (ver. 2022R2)[7]에 정의된 정보를 사용하였다. 티타늄합금은 다른 재료들에 비해 비강도가 2배 이상 높으며 재료 단가도 그에 따라 높은 실정이다. 세계 최대 온라인 플랫폼인 Alibaba에서의 가격을 비교해보면 티타늄합금 판재의 가격은 알루미늄합금 판재에 비해 6배 이상 높은 가격이다. 하지만 티타늄합금의 가격은 지속적으로 하락하고 있는 추세이므로 이의 적용 가능성을 적극 검토할 필요가 있다.

Table 1. Mechanical properties

Material	Ti-6Al-4V	AL5083-O	FRP	Mild Steel
Density (ton/m ³)	4.62	2.77	1.51	7.85
Tensile yield strength(Mpa)	930	280	N/A	250
Tensile ultimate strength(Mpa)	1070	310	120	460
Young's modulus(Gpa)	96	71	8.20	200
Poisson's ratio	0.36	0.33	0.25	0.30
Specific strength	231.60	111.91	79.47	58.60

2.2 구조해석모델

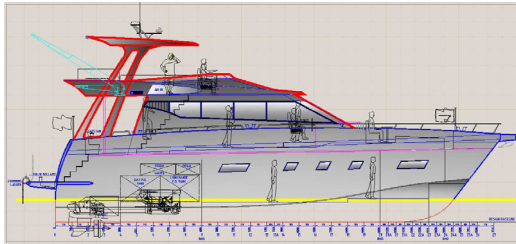


Fig. 2. General arrangement of 60 feet power boat

알루미늄합금으로 된 파워보트의 일반배치도(Fig. 2)와 각 프레임 위치에서의 단면도를 참조하여 Fig. 3와 같은 기하학적 모델을 생성하였는데, 선형 및 구조부재에 대한 모델링을 위해 형상모델링 도구인 Rhino[8]를 이용하였다. ANSYS에서 그 모델링 결과를 import하여 데이터 에러가 없도록 수정하였고, 구조부재들이 적절히 반영되었는지 확인하고 횡부재에 있는 slot, hole 등을 생략 또는 단순화 등의 방법을 통해 구조해석모델을 생성하였다.

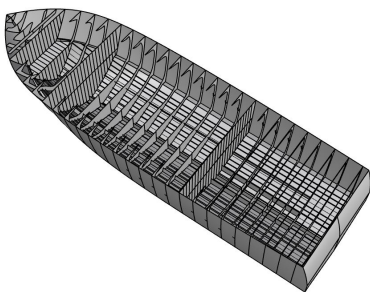


Fig. 3. Geometric model in Rhino 7

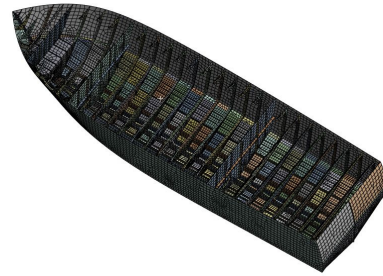


Fig. 4. Finite element model in ANSYS

선체 횡보강재 간격인 220mm를 유한요소 기본 크기로 하고 곡률이 많은 선저판은 그 절반의 크기로 설정하여 유한요소 mesh를 Fig. 4와 같이 생성하였고, 절점의 수는 25,600개, 유한요소는 27,267개가 작성되었다.

Table 2. Principal dimensions of aluminum boat

Length Overall (LOA)	19.85 m
Length Between Perpendicular (LBP)	17.19 m
Length of Waterline (LWL)	17.19 m
Moulded Breadth (B _{max})	6.05 m
Moulded Depth (D)	2.67 m
Moulded Draft (T)	0.90 m
Design Speed (V _d)	32 knots
Displacement Volume	41.46 m ³
Displacement (1.025 ton/m ³)	42.50 ton

선박의 주요치수는 Table 2에 나타난 바와 같고, 티타늄합금 선박의 최소 판 두께는 ISO 규정에서 제시하는 Eq. (1)을 통해 2.22mm로 추정되었다.

$$t = b \times k_c \times \sqrt{\frac{P \times k_{2b}}{1000 \times \sigma_d}} \quad (mm) \quad (1)$$

여기서,

b: short unsupported dimension of a panel

k_c: curvature correction factor for plating

σ_d: design stress for plate

선급 규정에는 새로운 재료인 티타늄합금을 사용한 선체에 대한 두께 규정이 아직 제정되어 있지 않지만, 강재나 알루미늄합금과 같은 금속재료의 경우 서로 유사한 식을 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 티타늄합금에 대해서도 알루미늄합금에 적용된 추정식을 이용하는 것이 무리가 없으리라 판단하였다.

티타늄합금 레저보트의 초기 스캔틀링을 위해 알루미늄합금으로 된 실적선을 모선(mother ship)으로 이용하였다. 선체 형상 및 구조배치는 그대로 유지하였지만 티타늄과 알루미늄 두 재료의 비강도 비율은 2.07배이므로, 약 2배의 비율을 적용하여 티타늄합금 선박의 구조부재 두께를 알루미늄합금 선박의 1/2로 설정하였다. 또한 두께 변화에 따른 배수톤수의 변화가 있지만 그 값은 유지하여 구조해석을 수행한 후, 알루미늄선박 실적선의 인장강도 대비 최대응력의 비율인 56% 수준과 비슷할 때까지 티타늄합금 선박의 판재 크기를 반복 조절하여 치수를 결정하였다.

1차적으로 알루미늄합금 선박 판재크기의 1/2로 설정하고 해석한 결과 최대응력이 543MPa로 계산되었고, 응력의 여유가 있는 상황에서 가장 중요한 응력 영역인 선저판의 두께를 3.0mm에서 2.9mm로 줄이고 나머지 부재의 치수를 모두 최소두께인 2.22 mm로 설정한 2차 시뮬레이션 결과 최대응력 718 MPa로 계산되었다. 위 두 번의 결과를 참조하여 응력비율 56%가 되도록 선저판의 두께를 2.95mm로 조정된 Table 3과 같은 3차 시뮬레이션 결과 최대응력 599.6 MPa의 결과를 얻었다.

Table 3. Member thicknesses

thickness (mm)	AL-ship	Ti-ship (1st)	Ti-ship (2nd)	Ti-ship (3rd)
bottom plate	6.0	3.0	2.90	2.95
chine	8.0	4.0	2.22	2.22
side shell	5.0	2.5	2.22	2.22
deck	4.0	2.0	2.22	2.22
keel plate	8.0	4.0	2.22	2.22
bottom girder	10.0	5.0	2.22	2.22
bottom longitudinal	8.0	4.0	2.22	2.22
trans. members	5.0	2.5	2.22	2.22

2.3 하중조건

선저슬래밍(bottom slamming)과 같은 충격하중은 하중의 크기나 방향이 시간에 따라 변화하는 동적하중으로 동적응답해석을 수행해야 하지만, 일반적으로 시간과 경계성의 이점을 위해 동적효과를 고려한 등가의 정하중으로 치환한 선형 정적해석을 수행하였다.

ISO12215-5 국제표준 규정에서는 동적효과를 고려한 선저, 선측, 그리고 갑판에서의 하중을 산정하여 설계하중으로 제시하고 있다. 하지만 30노트 이상의 선속을 갖는 보트의 경우 선저 슬래밍하중이 다른 하중보다 지배적이므로, 본 연구에서는 선체 길이방향의 선저 슬래

밍하중만을 설계하중으로 선택하여 구조안전성을 검토하였다.

활주 상태(planing mode)에서 선저에 작용하는 슬래밍하중은 ISO에서 제시한 다음 Eq. (2)와 같다[1].

$$P_{BMP} = \max(P_{BMP\ BASE} \times k_{AR} \times k_L; P_{BMMIN}) \quad (2)$$

where,

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

k_{AR} : area pressure reduction factor

k_L : longitudinal pressure distribution factor

m_{LDC} : mass in maximum load condition

L_{WL} : length of waterline

$P_{BMMIN} = \max$

$$[(0.45m_{LDC}^{0.33} + 0.9L_{WL} \times k_{DC}) \times k_L; 10 T_C; 7]$$

수식에 사용된 기타 기호는 이전 연구[3]에 설명된 바와 같다.

산정된 설계하중의 크기는 Eq. (3), Table 4와 같다. 선저에 작용하는 하중분포는 선미에서 선수방향으로 $0 \leq x/L_{WL} \leq 0.6$ 구간에서는 직선적으로 분포하고, 이후에는 즉 선수까지는 일정한 값을 갖는다.

$$P_{BMP} = 128.88 \left(\frac{x}{L_{WL}} + 0.4 \right) \quad \left(\text{for } \frac{x}{L_{WL}} \leq 0.6 \right) \quad (3)$$

Table 4. Design pressure for bottom slamming

x/L_{WL}	$P_{BMP} (kPa)$ -Ti	$P_{BMP} (kPa)$ -Al
0.0	51.55	58.59
0.2	77.33	87.88
0.4	103.10	117.18
0.6	128.88	146.47
0.8	128.88	146.47
1.0	128.88	146.47

2.4 경계조건

일반적으로 선박에 대한 전선구조해석을 위해서는 구조 모델링된 정보에 자유도에 대한 구속여부를 지정하고 외부에서 가해지는 하중을 적용한다. 선저슬래밍 하중에 의한 선체구조의 거동을 파악하고 안전성을 확

인하기 위한 과정으로, 선체 구조가 슬래밍압력을 직접적으로 감당하기 위해 갑판 고정조건을 경계조건으로 적용하였다.

3. 구조강도평가 결과 및 고찰

티타늄합금을 선체 구조부재로 사용한 레저보트에 대하여 구조해석을 수행하였다. 전처리(pre-processing) 단계에서 준비한 해석모델을 이용하여 ISO 규정의 설계하중을 적용하고 강체운동을 하지 않도록 경계조건을 적용하였으며, ANSYS solver를 이용하여 수행한 해석 결과는 다음과 같다.

기존 재료와의 비교를 위해 동일한 형상 및 구조배치를 가진 알루미늄합금을 사용한 선체에 대한 구조해석을 먼저 수행하였다. 알루미늄합금 선박의 경우 ISO 규정에서 제시하는 판두께 추정식을 이용하면 최소 두께는 4.37mm이고, Table 3의 치수를 사용할 경우 Fig. 5와 같이 선수부 선저판에서 등가응력(von Mises stress)의 최대값은 174.27MPa로 나타났다.

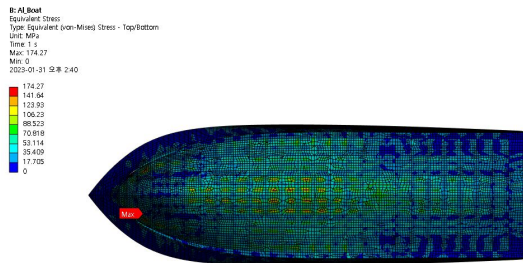


Fig. 5. Stress results for bottom plate of an aluminum boat

설계된 티타늄합금 선박에 대한 해석모델의 등가응력(von Mises stress) 분포는 Fig. 6, 7과 같다. 선체중심선이 있는 선저판에서 최대응력 599.64MPa이 발생하였고, 전체 평균 응력수준은 69.85MPa로 나와 티타늄합금의 항복응력인 930MPa과 비교하여 상당히 여유가 있음을 알 수 있다.

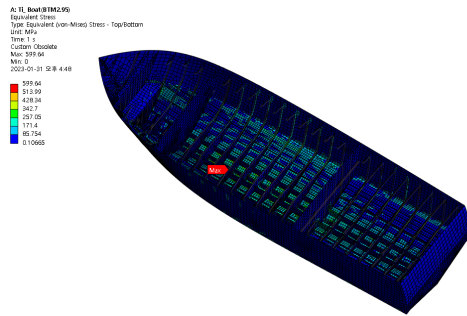


Fig. 6. Isovview of equivalent stress in titanium boat

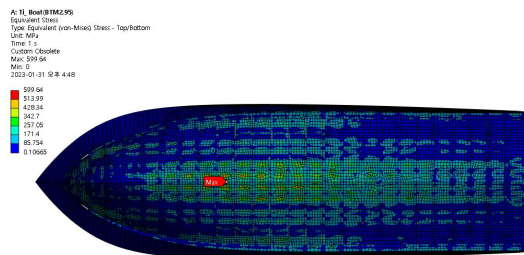


Fig. 7. Stress results for bottom plate of a titanium boat

설계하중에 대한 해석모델의 변형은 Fig. 8, 9과 같다. 최대변위는 선체중앙단면 부근 트랜스웍 플랜지 부근에서 65.95mm로 발생했고, 평균 변형량은 7.24 mm이다.

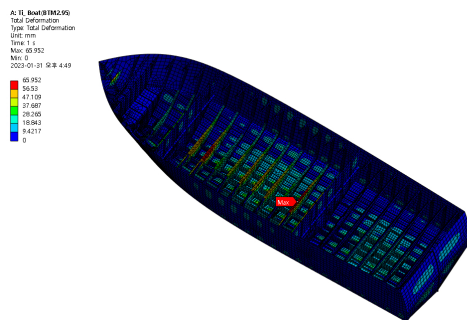


Fig. 8. Isovview of deformation in titanium boat

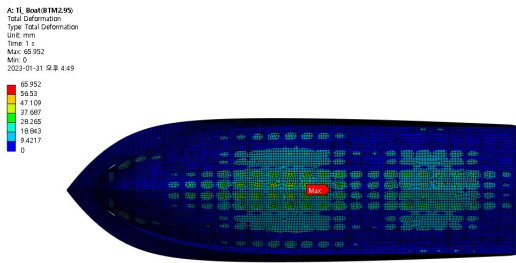


Fig. 9. Deformation for bottom plate of a titanium boat

의장품, 소모품 등을 제외한 선체 주요 구조부재의 중량은 티타늄합금을 사용할 경우 6,025.2kg, 알루미늄합금을 사용할 경우는 7,200.0kg으로 16.3% 정도의 중량을 줄일 수 있었다.

또한 티타늄합금 선박은 선체 부식이나 표면처리를 위한 도장처리가 불필요하고 티타늄의 화학적 특성으로 인해 해양생물이 선체표면에 붙지 않아 선박의 사용기간 동안의 유지비를 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 티타늄합금을 레저보트의 선체재료로 적용했을 때의 구조안전성을 검토하기 위해 구조강도평가를 실시하였고, 기존 알루미늄합금 재료와 비교를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 동급 알루미늄합금 선박을 기반으로 결정한 티타늄합금 선박의 제원과 ISO12215-5 국제표준 규정에서의 선저슬래밍 설계하중에 대한 구조안전성을 검토한 결과 구조부재 모두가 충분한 구조 강도를 갖는 것을 확인하였다.
- 2) 높은 내식성과 비강도를 가진 티타늄합금을 선체재료로 사용한 경우 알루미늄합금에 비해 16.3%의 중량 절감이 가능하다.
- 3) FRP 또는 알루미늄합금 재료에 대한 선급 최소치수 요구값은 제정되어 있으나 티타늄합금의 경우 아직 미정인 상태이므로, 구조강도 평가를 통한 최소 치수에 대한 가이드라인을 제공할 수 있다.
- 4) 새로운 선체재료인 티타늄합금의 국내 적용 가능성 검토를 통해 레저보트 건조업체의 사업 확장성에 대한 정보제공이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] J. S. Yum, "Comparative Study of Design Loads for the Structural Design of Titanium Leisure Boat", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.22, No.2, pp.733-738, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.733>
- [2] S. S. Na, S. H. Lee, M. C. Park, C. S. Na, K. H. Lee, & J. H. Choi, 2020. Development of 12ft Class Small Leisure Boat Using Titanium. Proceedings of the Annual Autumn Conference, SNAK, Changwon, 5-6 November, 2020. pp.352-356.
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] D. K. Oh, K. W. Lee & C. W. Lee, "Basic Design of 40ft Class Pleasure Boat based on Digital Mock-up", J. of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol.17, No.3, pp. 283-289, 2011.
- [6] International Standard, ISO 12215-5 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination, Geneva, 2019.
- [7] Ansys, "<http://ansys.com>"
- [8] Rhino, "<http://rhino3d.com>"

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