

LPG 운반선 화물창의 웹 프레임 최소중량설계

박명철¹, 신상훈^{2*}

¹경운대학교 항공전자공학과, ²경운대학교 항공기계공학과

Minimum Weight Design for Web Frames of Cargo Tanks in the LPG Carrier

Myeong-Chul Park¹, Sang-Hoon Shin^{2*}

¹Department of Avionics Engineering, Kyungwoon University

²Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University

요약 일반적으로 LPG 운반선의 화물창은 국제해사기구(IMO)에서 정의한 독립형 탱크 Type A에 해당하며, 탱크의 외부는 폴리우레탄 폼으로 단열하고, 탱크는 영하 50도에서도 견딜 수 있는 값비싼 저온 강으로 제작된다. 따라서, 화물창 재료의 절감은 많은 비용의 절감으로 직결된다. 화물창은 외판, 격벽, 보강재, 웹 프레임 및 스트링거로 구성된다. 그 중에서 외판, 격벽과 보강재는 구조해석 없이 선급 규정에 의해 설계될 수 있어 용이하게 최적 설계를 통해 설계된다. 하지만, 웹 프레임과 스트링거는 구조해석을 통해 설계하고 선급승인을 받아야 하므로, 수없이 많은 구조해석을 포함하는 최적 설계는 사실상 수행하지 못하고, 수 십 번의 구조해석을 통해 설계치수를 결정하는 적정설계만을 수행하는 실정이다. 본 연구에서는 유한요소해석을 위해 2번 화물창을 대표 화물창으로 선정하여 8개의 하중조건을 적용하였고, 각 하중조건에 대한 선박 전체의 변형을 고려하였다. 또한, 탐색시간이 효과적인 미분 기반 최적화 기법을 통해 82,000 m³ LNG 운반선의 웹 프레임을 대상으로 최소중량설계를 수행하였다. 본 연구를 통해 총 48개의 설계변수 치수를 결정하였고, 척 당 약 108 톤의 강재를 절감하였다.

Abstract Generally, the cargo tank of LPG carriers corresponds to an independent tank Type A defined by the International Maritime Organization (IMO). The outside of the tank is insulated by polyurethane foam, and the tank is made of expensive low temperature steel that can withstand temperatures as low as -50°C. The cargo tank is composed of outer shell plates, bulkheads, stiffeners, web frames, and stringers. Among them, the outer shell plates, bulkheads, and stiffeners can be designed without structural analysis by the Classification Rules and are constructed easily through optimal design. On the other hand, optimal design, including numerous structural analysis, is not performed because web frames and stringers should be designed and approved through structural analysis. Only adequate design, which determines the design dimensions through several dozen structural analysis, is performed. In this study, for finite element analysis, eight loading conditions were applied, and the deformation of the entire ship for each loading condition was considered. The minimum weight design was performed for the web frames of cargo tanks in the 82,000 m³ LNG carrier through the gradient-based optimization technique, and the weight was reduced by approximately 108 tons per ship.

Keywords : LPG Carrier, International Maritime Organization, Web Frame, Minimum Weight Design, Gradient-Based Optimization Technique, Design Variables

*Corresponding Author : Sang-Hoon Shin(Kyungwoon Univ.)

email: shshin@ikw.ac.kr

Received February 25, 2020

Accepted June 5, 2020

Revised March 23, 2020

Published June 30, 2020

1. 서론

국제해사기구(IMO)에서 규정하는 독립형 탱크는 Type A, Type B 그리고 Type C로 정의되는데, LPG 운반선의 화물창은 Type A로 분류된다. LPG 운반선은 저온의 액화석유가스를 운반하기 위해 선체와 분리된 저온식 독립 화물탱크를 사용하는 선박이다[1]. 탱크의 외부는 폴리우레탄 폼으로 단열하고, 탱크는 영하 50도에 서도 견딜 수 있는 값비싼 저온 강으로 제작되므로 화물창 강재 절감을 위한 연구가 크게 요구되어진다.

LPG 운반선의 화물창은 외판, 격벽, 보강재, 웹 프레임 및 스트링거로 구성된다. Fig. 1은 외판(outer shell plates)과 격벽(bulkheads)을 나타내는데, 격벽은 종방향 1개, 횡방향 3개로 구성된다. Fig. 2는 외판과 종방향 중앙 격벽에 수직으로 붙어있는 보강재(stiffeners)의 간격을 나타내는 탱크의 절반 그림이며, Fig. 3은 웹 프레임(web frames)과 스트링거(stringers)를 나타낸다.

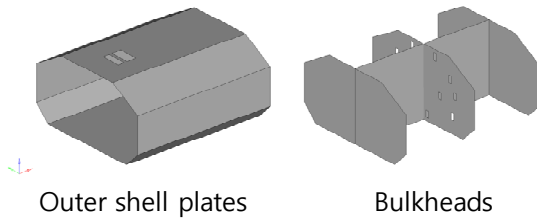


Fig. 1. Outer shell plates and bulkheads in a tank

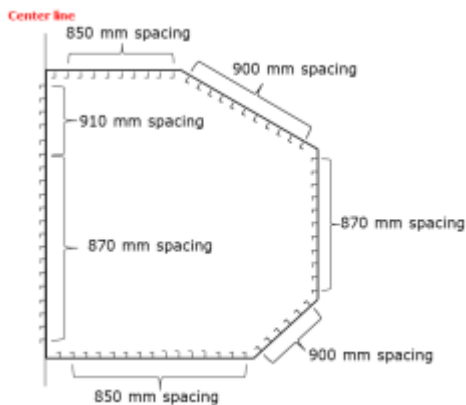


Fig. 2. Stiffeners' arrangement in a tank

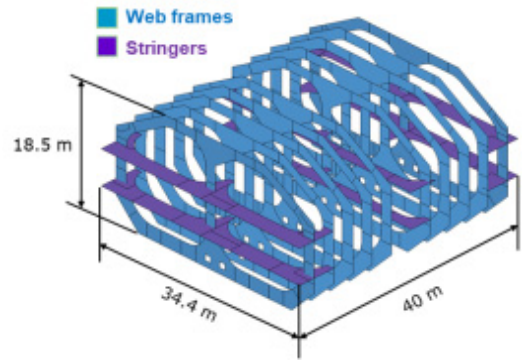


Fig. 3. Web frames and stringers in a tank

LPG 운반선 화물창의 강재절감을 위한 연구로 Shin 등[2]은 전역(global) 최적화 기법인 진화전략(evolution strategy)과 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 통해 5가지의 보강재 간격을 설계변수로 하여 Fig. 1과 Fig. 2에 나타낸 외판, 격벽과 보강재에 대해서 최적설계를 수행한 바 있다. 이 부재들은 구조해석 없이 선급 규정에 의한 설계가 가능하여 많은 경우의 수를 탐색함에 있어 시간 소요가 적기 때문에 무리 없이 전역 최적화 기법을 적용하여 최적 설계를 수행할 수 있다. 하지만, 웹 프레임의 경우는 반드시 구조해석을 수행하여 그 치수를 결정해야 하므로 시간상의 제약에 의해 전역 최적화 기법을 적용하기에는 사실상 큰 무리가 따른다[3]. 아직까지는 트러스, 텐세그리티, 보 등과 같이 비교적 간단한 구조물에 전역 최적화 기법을 적용하는 연구[4-6]가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 전역 최적화 기법으로 결정한 외판, 격벽과 보강재의 두께 및 간격은 고정 값으로 두고 국소(local) 최적화 기법인 미분 기반(gradient-based) 최적화 기법을 적용하여 주요 제원이 Table 1과 같은 82,000 m³ LPG 운반선 화물창 내의 웹 프레임에 대한 최소중량설계를 수행하였다.

Table 1. Principal dimensions of target LPG carrier

LBP(Length B.P.)	Breadth mould	Depth mould
215 m	36.6 m	22 m

구조해석에 소요되는 시간을 최소화하기 위해 선수에 서 2번째 위치한 No.2 Tank를 기준모델로 선정하였으며, 전선 구조해석의 변형 결과를 No.2 Tank의 모든 지지부에 적용하여 구조해석을 수행하였으며, 전선 모델과

부분모델 해석 결과를 비교하여 부분 모델의 적용 방법이 합리적임을 확인하였다.

2. 최적화 방안

2.1 최적화 기법

본 연구에 적용한 국소 최적화 기법인 미분 기반 (gradient-based) 최적화 기법은 식 (1)과 같이 n 개의 설계변수로 구성된 목적함수에 대하여 식 (2)와 같은 경사도 벡터 (gradient vector)로 탐색 방향을 설정하여 최대 및 최소의 목적함수를 구하는 방법이다.

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\vec{c} = \nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right] \quad (2)$$

여기서, f : Objective function
 x_i : Design variable
 \vec{c} : Gradient vector

경사도 벡터 \vec{c} 는 목적함수 f 가 가장 크게 증가하는 방향[7]이므로 목적함수 최대화를 구하는 문제에서는 경사도 벡터 방향으로 탐색하지만, 목적함수 최소화를 구하는 문제에서는 반대 방향으로 탐색한다.

이 최적화 기법은 빠른 탐색이 장점이지만, 초기 탐색점에 상당히 민감하다는 단점을 갖고 있다. 초기치가 전체 최적점에 가깝다면 전체 최적점을 빠르게 찾아주지만 전체 최적점에서 멀리 떨어져 있다면 그 주변의 국소 최적점을 탐색해준다. 오랜 시간 동안 설계해 온 실적선의 치수가 전체 최적점에 가깝다고 가정한다면 매우 유용한 방법이 될 수 있다.

2.2 설계변수

Fig. 3에서 보는 바와 같이 한 개의 화물창 안에 웹 프레임은 총 10개로 구성되며, 하나의 웹 프레임은 Fig. 4에 나타낸 외판과 종방향 격벽(longitudinal bulkhead)에 수직으로 붙어 있는 웹(web)과 평강(flat bar)으로 구성된다.

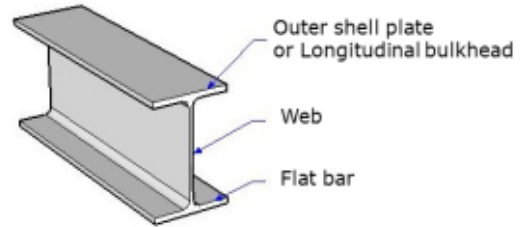


Fig. 4. Partial shape of web frames

웹과 평강에 대해 조선분야에서는 일반적으로 모두 셸 요소(shell element)로 모델링 하지 않고, Fig. 5와 같이 웹만 셸 요소로 모델링하고, 평강은 단면적을 특성치(property)로 하는 로드 요소(rod element)로 모델링한다. 따라서, 평강 부분은 설계변수가 폭과 두께가 아닌 단면적이 되어 설계변수의 수가 줄어들게 된다.

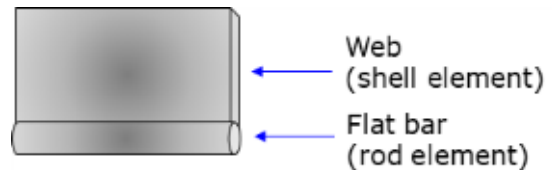


Fig. 5. Modeling of web and flat bar

처음과 끝에 있는 웹 프레임(end section, ES)은 두께와 형상이 모두 같고, 그 사이에 존재하는 8개의 웹 프레임(typical section, TS)도 모두 같은 두께와 형상을 하고 있다. TS 웹브는 13개의 판으로, 평강은 10개의 판으로 구성되며, ES 웹브는 15개의 판으로, 평강은 10개의 판으로 구성되어 총 48개의 설계변수가 발생한다. Fig. 6는 TS의 설계변수 23개를 나타내고 있으며, Fig. 7은 ES의 설계변수 25개를 나타내고 있다. TS의 중량은 식 (3)과 같고, ES의 중량은 식 (4)와 같으므로 총 48개의 설계변수로 구성된 목적함수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 웹브의 높이를 고정하였다.

$$f_T = \sum_{k=1}^{13} T_k \times TH_k \times L_{wk} + \sum_{k=1}^{10} TR_k \times L_{fk} \quad (3)$$

$$f_E = \sum_{k=1}^{15} E_k \times EH_k \times L_{wk} + \sum_{k=1}^{10} ER_k \times L_{fk} \quad (4)$$

$$f = 8f_T + 2f_E \quad (5)$$

- 여기서, f_T : Weight of typical section
- f_E : Weight of end section
- f : Objective function
- T_k : Thickness of web in typical section
- TH_k : Height of web in typical section
- TR_k : Area of flat bar in typical section
- E_k : Thickness of web in end section
- TH_k : Height of web in end section
- ER_k : Area of flat bar in end section
- L_{wk} : Length of web in all section
- L_{fk} : Length of flat bar in all section

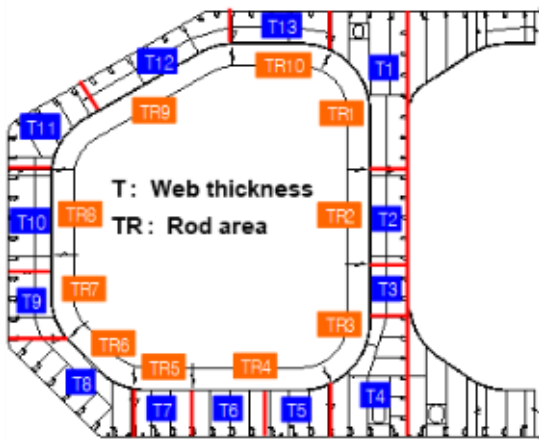


Fig. 6. Design variables at typical section of web frame

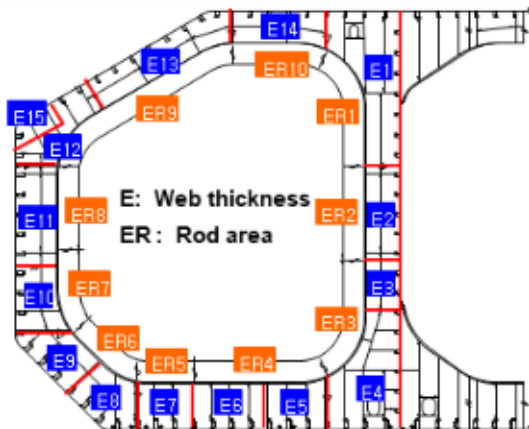


Fig. 7. Design variables at end section of web frame

3. 구조해석

3.1 전선 모델 및 부분 모델

최적설계를 수행하는 과정에 설계변수가 변할 때마다 모든 하중조건에 대해 전선해석을 수행한다면 상당히 많은 시간이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하중 조건의 수를 줄였고, 부분모델 구조해석을 수행하였다. 하중조건은 설계변수에 가장 큰 영향을 줄 것으로 판단 되는 8가지를 선정하였으며, Table 2에 나타내었다. 부분모델로는 선수에서 2번째 위치한 No.2 Tank를 선정 하였다.

구조해석을 위한 모델링은 범용 pre-processor인 Hypermesh를 사용하였고, 구조해석용 solver는 Nastran을 사용하였다.

Table 2. Loading conditions

No. of LC	Description	Tank load	Sea load
1	Homogeneous	Static	Static
2	Homogeneous	Dynamic	Static
3	No.2 tank full	Dynamic	Static
4	No.1 & 3 tank full	Dynamic	Static
5	No.2 & 4 tank full	Dynamic	Static
6	Heeled	Dynamic	Heeled
7	Harbor	Static	Static
8	Tank floating	Static tank floating	-

Fig. 8은 본 연구에서 적용한 구조해석 방법으로 8가지 하중조건에 대한 전선 구조해석의 변형 결과를 No.2 Tank의 모든 지지부에 가하고 탱크하중을 추가로 적용 하였다. 다시 말해서 경계조건은 Tank의 모든 지지부에 가한 6자유도 변위로서 구조해석 시 부분 모델에 rigid body motion이 발생하지 않는다.

Table 3은 8가지 하중조건에 대해 전선 구조해석과 부분모델 구조해석으로 전체 웹 프레임에 발생한 최대 응력 값을 구한 결과이다. 오차율이 최대 3%를 넘지 않고 있어 부분모델 적용 방안이 합리적이라고 판단된다.

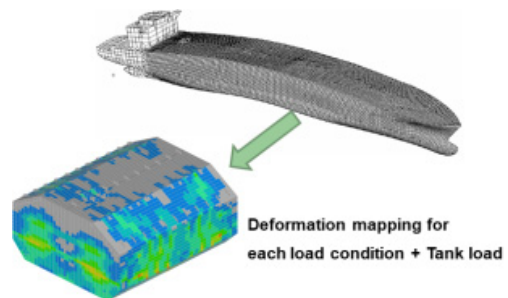


Fig. 8. Strategy for structural analysis

마지막으로 최적해가 구해지면 최적해에 이산화된 값을 적용하고 모든 하중조건에 대해 부분모델이 아닌 전선 구조해석을 수행하여 두께 및 단면 특성치의 증가가 필요한 곳에 추가적으로 보강하였다.

Table 3. Comparison of maximum stresses

No. of LC	Combined stress (MPa)		Shear stress (MPa)		Normal stress (MPa)	
	G*	P**	G	P	G	P
1	168	167	91	91	172	172
2	240	240	126	127	288	288
3	273	275	157	158	314	314
4	103	103	59	59	85	86
5	253	253	130	130	299	300
6	241	235	125	123	273	273
7	180	176	97	96	156	156
8	250	246	83	81	275	271

*Global model, **Partial model

4. 최적설계 결과

4.1 실적선과의 비교

최적화를 수행한 후 이산화 설계변수를 적용하여 모든 하중조건에 대한 전선 구조해석을 통해 추가적인 보강을 완료한 결과와 실적선의 값을 비교하였다. Table 4는 typical section(TS)에서의 값을 비교한 것이고, Table 5는 end section(ES)에서의 값을 비교한 것이다. 전반적으로 최적화 결과가 실적선보다 값이 작음을 알 수 있다.

Table 4. Comparison of optimum value and existing ship in typical section

Design Variables	Exist. ship (mm)	Opt. value (mm)	Design Variables	Exist. ship (mm ²)	Opt. value (mm ²)
T1	12	10	TR1	3,200	3,000
T2	12	10	TR2	3,200	3,500
T3	12	10	TR3	5,000	3,000
T4	12	11	TR4	5,000	3,500
T5	12	13	TR5	9,000	8,750
T6	12	10	TR6	9,000	8,750
T7	12	11	TR7	5,000	4,000
T8	14	12	TR8	3,200	3,000
T9	14	12	TR9	3,200	3,000
T10	11	11	TR10	3,200	3,000
T11	12	13	-	-	-
T12	10	9	-	-	-
T13	12	10	-	-	-

TS에서는 23개의 설계변수 중 최적화 결과가 실적선의 값 이상인 것은 4개이며, 19개가 미만이였다.

ES에서는 25개의 설계변수 중 최적화 결과가 실적선의 값 이상인 것은 11개이며, 14개가 미만이였으며, 탱크 하부에 설치되는 평강의 크기는 실적선이 더 작다는 것이 특징이다.

Table 5. Comparison of optimum value and existing ship in end section

Design Variables	Exist. ship (mm)	Opt. value (mm)	Design Variables	Exist. ship (mm ²)	Opt. value (mm ²)
E1	12	10	ER1	3,200	3,000
E2	14	12	ER2	3,200	3,000
E3	18	16	ER3	13,760	16,000
E4	25	24	ER4	10,500	13,600
E5	32	33	ER5	10,500	13,600
E6	18	16	ER6	10,500	13,600
E7	28	26	ER7	10,500	13,600
E8	28	28	ER8	5,000	5,500
E9	18	16	ER9	3,200	3,000
E10	18	19	ER10	3,200	3,500
E11	14	13	-	-	-
E12	20	20	-	-	-
E13	10	9	-	-	-
E14	12	10	-	-	-
E15	25	23	-	-	-

4.2 경제성 효과

최적화 수행 결과 1개의 탱크 당 약 27톤(척 당 약 108톤)의 강제 절감 효과를 얻을 수 있었다. Shin 등[2]의 연구에서 적용한 톤당 1,050 \$을 적용하면 11만 \$ 이상의 경제성 효과이다. 대한민국이 세계 제1의 LPG 운반선 수출국임을 고려하면 그 효과가 상당할 것으로 유추된다. 본 연구에서는 웹 프레임의 높이를 실적선의 값을 그대로 적용하였는데, 이를 설계변수로 한 형상 최적화(shape optimization)를 병행하여 수행하게 된다면 더 큰 경제성 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 미분 기반 최적화 기법을 이용하여 82,000 m³ LPG 운반선 화물창 내의 웹 프레임에 대해 최소중량설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 많은 시간이 소요되는 최적화 문제에는 미분 기반 최적화 기법이 효율적이며, 특히 오랜 기간 동안 설계해온 실적선의 값을 초기치로 적용한다면 미분 기반 최적화 기법의 결과는 전체 최적점과 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.
- (2) 최적화 과정 중에 발생하는 반복적인 구조해석 시간을 줄이기 위해 전선 구조해석의 변형 결과를 부분 모델인 No.2 Tank의 모든 지지부에 가하고 탱크하중을 추가로 적용한 결과, 오차율이 최대 3%를 넘지 않고 있어 부분모델 적용 방안이 합리적이라고 판단된다.
- (3) 최적화 수행 결과 1척 당 약 108톤의 강재 절감 효과를 얻을 수 있었으며, 웹 프레임의 높이를 설계변수로 한 형상 최적화(shape optimization)을 추가로 수행한다면 그 이상의 경제성 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] K. Y. Lee, P. D. C. Yang and C. M. Park, "A Study on the Modeling of Relative Motion for the Cargo Tank Support Structure of Type A LPG Carrier", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 46, no. 2, pp. 148-154, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2009.46.2.148>
- [2] S. H. Shin S. B. Hwang and D. E. Ko, "A Study on the Optimum Design of Cargo Tank for the LPG Carriers Considering Fabrication Cost", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 48, no. 2, pp. 178-182, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2011.48.2.178>
- [3] H. G. Kwak and J. Kim, "An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of RC frames", Computer-Aided Design, vol. 41, no. 7, pp. 490-500, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.03.005>
- [4] B. I. Kim, "Optimum Design of Steel Structures Using Genetic Algorithms", Journal of Korean Society of Steel Construction, vol. 24, no. 6, pp. 701-710, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.6.701>
- [5] S. Lee and J. Lee, "A Comparison of the Form-Finding Method of Tensegrity Structures", Journal of the computational structural engineering institute of Korea, vol. 27, no. 4, pp. 313-320, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2014.27.4.313>
- [6] S. H. Shin and D. E. Ko, "A study on minimum weight design of vertical corrugated bulkheads for chemical tankers", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 180-187, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iinaoe.2017.06.005>

- [7] J. S. Arora, Introduction to Optimum design, Translated by HongReung Publishing Co, pp. 98-100, 2011.
ISBN: [9780120641550](https://doi.org/10.1016/j.iinaoe.2017.06.005)

박 명 철(Myeong-Chul Park)

[정회원]



- 2002년 8월 : 경상대학교 소프트웨어학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 경상대학교 컴퓨터과학과(공학박사)
- 2007년 7월 ~ 2017년 2월 : 송호대학교 보건의료전자과 교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공전자공학과 교수

<관심분야>

시각화, 시뮬레이션, IoT 콘텐츠, 병렬 프로그래밍

신 상 훈(Sang-Hoon Shin)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2017년 2월 : 현대중공업(주) 선박연구소
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공기계공학과 교수

<관심분야>

구조물의 설계/강도평가, 최적화기법 연구 및 최적설계