Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 6 pp. 389-394, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.6.389
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

HCSR 기반 T형 조립부재의 최소중량설계

신상훈[1], 고대은[2*]
[1]경운대학교 항공기계공학과, [2]동의대학교 조선해양공학과

Minimum Weight Design of Built-up T Based on HCSR

Sang-Hoon Shin[1], Dae-Eun Ko[2*]
[1]**Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University**
[2]**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University**

요 약 선체구조의 보강재로서 비대칭 단면재인 L 형강재가 대칭 단면재인 T형 조립부재(built-up T)에 비해 단면 비틀림 현상 등 다소 불리한 강도 특성에도 불구하고 오랜 관습과 자재 구입의 용이성 등으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 근래 선박이 대형화 되어감에 따라 보강재의 형태는 압출 형강재의 사용이 줄고 다양한 설계 치수를 반영하여 용접을 통해 직접 제작하는 조립부재의 적용이 늘어가는 추세이다. 본 연구의 목적은 점차 사용량이 증대되고 있는 조립형 보강재의 효율적인 적용을 위한 최적설계 프로그램을 개발하는데 있다. 최적화 알고리즘으로는 선박 및 해양구조물의 최적설계에 많이 적용되고 있는 진화전략 기법을 선정하였다. 최적설계 결과의 실용성을 위해 부식여유를 고려한 총두께 개념을 설계변수와 목적함수에 도입하였고, 제한조건에는 최근 발효된 통합공통구조규칙(HCSR, Harmonized Common Structural Rules)을 적용하였다. 개발된 최적화 프로그램을 이용하여 최근 수주된 300K VLCC와 158K COT의 실선 설계를 수행한 결과 각각 144톤, 60톤의 중량 절감 효과를 얻었으며 대형 선박일수록 중량 절감 효과가 크게 나타남을 확인하였다.

Abstract In a conventional ship structure, stiffeners with an asymmetric section, such as inverted angles, are used widely despite the disadvantage of strength compared to the stiffeners with a symmetric section, such as a built-up T. On the other hand, T-type built-up members are attracting more attention than L-type inverted angles due to the increased size of ships. The purpose of this study was to develop an optimal design program for a built-up T, and apply an evolution strategy as an optimization technique. In the optimization process, the gross thickness concept was adopted for the design variables and objective function, and the constraints are set up based on HCSR (Harmonized Common Structural Rules). Using the developed program in this study, the optimal stiffener design was carried out for 300K VLCC and 158K COT of which the orders were obtained lately. The optimal results revealed the weight reduction effect of 144 tons and 60 tons, respectively

Keywords : Built-up T, Evolution strategy, HCSR, Minimum weight design, Weight reduction

1. 서론

선급의 규정과 규칙을 만족하면서 가볍고 생산에 유리한 구조를 설계하는 것이 선체구조 설계자의 목표이므로 이들에게 시대의 흐름에 따른 규정과 규칙의 변경은 매우 중요한 사안이 된다. 국제선급협회(IACS)는 2006년에 여러 선급의 규칙을 통합한 규칙인 공통구조규칙(CSR, Common Structural Rules)을 산적화물선과 이중선체유조선에 대해 공표하였고[1][2], 2015년 7월에는 산적화물선과 이중선체유조선에 모두 적용되는 산적화물선과 이중선체유조선의 통합공통구조규칙(HCSR, Harmonized Common Structural Rules)을 공표하였다[3].

Sung 등[4]은 CSR과 HCSR의 비교 분석을 통해 HCSR의 적용으로 선각 중량이 증가하게 되는 이유를

*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)
Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr
Received January 31, 2017 Revised March 8, 2017
Accepted June 9, 2017 Published June 30, 2017

상세하게 검토한 바 있으며, Park 등[5]은 최적설계 관점이 아닌 효율적인 설계 관점에서 HCSR 기반의 보강재 형상 결정 알고리즘을 제안하는 등 HCSR 관련 연구들이 활발히 진행되고 있다.

선체구조의 보강재로서 L 형강(I.A, inverted angle)과 같은 비대칭 단면재는 대칭 단면재에 비해 강도 측면에서 다소 불리함에도 불구하고 오랜 관습과 자재구입의 용이성 등으로 널리 사용되어 왔으나[6], 근래에는 선박의 대형화에 따라 L 형강재의 사용이 줄고 T형 조립부재의 적용이 늘어가는 추세이다. 웨브 깊이가 350mm 이상인 350 I.A부터는 구매 단가의 상승이 급한 편이며, 600 I.A보다 큰 형강은 생산되지 않고 있어 최근 건조된 300K VLCC(very large crude oil carrier)의 경우는 보강재의 대부분을 조립형 부재로 사용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 점차 사용량이 증대되고 있는 T형 조립부재의 경제적인 적용을 위해 최소중량설계 프로그램을 개발하였다. 최신 규정인 HCSR에 기반을 두고 개발함으로써 HCSR 적용에 의한 선각 중량 증가의 최소화 및 선박 경량화 설계 기술의 발전에 일조할 것으로 기대된다. 최적화 알고리즘으로는 전체 최적점(global optimum point) 탐색에 탁월한 다개체 탐색 방법인 진화전략 기법을 선정하였고, 진화 과정의 선택 단계에 부모 개체가 참여하는 플러스 전략을 채택하였으며, 효과적인 탐색 크기의 결정에는 Shin 등[7]의 연구 결과를 참조하였다. 진화전략에 의한 전체 최적점 탐색 결과를 검증하기 위해 경우의 수가 840,788인 조합을 모두 계산한 결과와 비교하였으며, 그 값이 일치함을 확인하였다. 또한, 최적설계 결과의 실용성을 위해 부식여유(corrosion margin)를 고려한 총두께 개념(gross thickness concept)을 설계 변수와 목적함수에 도입하였고, 제한조건은 통합공통구조규칙인 HCSR을 기반으로 적용하였다. 개발된 최적화 프로그램을 이용하여 최근 수주된 300K VLCC 10척과 158K COT 4척의 실선 설계를 수행한 결과 각각 척당 144톤 및 60톤의 중량 절감 효과를 얻었다.

2. 부식 여유

부착판(attached plating)에 부착되는 보강재는 부착판과 함께 순두께(net thickness)와 부식여유를 고려한 총두께를 갖는다. 제한조건의 위배성 검토에 있어서는 순두께 기반으로 계산하지만 최종 부재의 선택은 총두께 기반으로 수행되어야한다. Fig. 1의 좌측은 총두께 개념을, 우측은 순두께 개념을 나타내고 있다.

각 구성 요소의 두께와 플렌지의 폭에 대하여 총두께와 순두께의 관계는 식(1)과 같고, 웨브의 깊이는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. $t_{f,CM}$은 플렌지 두께의 부식여유, $t_{p,CM}$은 부착판 두께의 부식여유이다.

$$gross = net + corrosion\ \ margin \tag{1}$$

$$h_{w,gr} = h_w - 0.5t_{f,CM} - 0.5t_{p,CM} \tag{2}$$

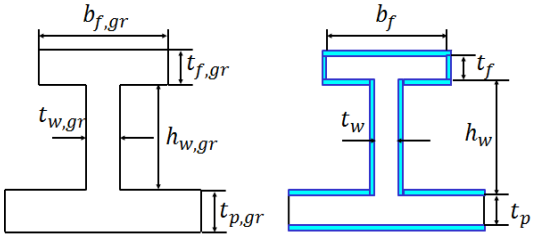

Fig. 1. Definition of gross and net thickness

3. HCSR 보강재 규칙

본 연구에서는 보강재 규칙으로 2015년 7월에 발효된 통합공통구조규칙(HCSR)을 적용하였다. 그 이전의 CSR은 CSR-DHOT와 CSR-BC로 구분되어 존재하였는데 HCSR로 통합되면서 구분이 사라졌다. 보강재 관련 부분은 CSR-DHOT와 유사하며, 특히 HCSR의 보강재 비율(proportions) 요구조건은 CSR-DHOT와 일치한다. 또한, HCSR의 보강재 최소 두께 요구조건의 경우 수밀경계(watertight boundary) 위치에서는 CSR-DHOT와 일치하며, 그 외 구조 위치에서는 CSR-DHOT에 비해 0.5mm 증가하였다.

3.1 보강재 비율 요구조건

보강재의 좌굴 방지 등을 위해 웨브의 두께와 깊이의 비율, 플렌지의 두께와 폭의 비율, 플렌지 폭과 웨브 깊이의 비율을 제한한 조건이며, 순두께 기반으로 계산해야한다.

식(3)은 웨브의 두께와 깊이의 비율을 제한한 규정으로 R_{eH}는 재료의 항복응력(연강의 경우 235MPa)을 의미한다. C_w는 웨브의 세장(slenderness) 계수로서 T형의 경우는 75이다.

$$t_w \geq \frac{h_w}{C_w}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}} \tag{3}$$

식(4)는 플렌지의 두께와 폭의 비율을 제한한 규정으로 b_{f-out}은 b_f의 절반 값을 의미하며, C_f는 플렌지의 세장 계수로서 T형의 경우는 12이다.

$$t_f \geq \frac{b_{f-out}}{C_f}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}} \tag{4}$$

식(5)는 플렌지 폭과 웨브 깊이의 비율을 제한한 규정이다.

$$b_f \geq 0.25\, h_w \tag{5}$$

3.2 보강재 최소 두께 요구조건

보강재의 웨브와 플렌지 두께의 최소값을 규정한 조건으로 선박의 선급규칙길이(L_2, rule length)와 부착판의 두께(t_p)로 나타내었다.

식(6)은 수밀 경계 위치에서의 웨브와 플렌지 두께의 최소값을 나타내며, 식(7)은 그 외 구조 위치에서의 최소값을 나타낸다. 특히, 웨브의 두께는 식(8)의 조건도 만족해야한다.

$$t_{\min,wb} = 3.5 + 0.015\, L_2 \tag{6}$$

$$t_{\min,os} = 3.0 + 0.015\, L_2 \tag{7}$$

$$2.0\, t_p \geq t_w \geq 0.4\, t_p \tag{8}$$

3.3 순 탄성전단면적 계산

HCSR에서 순 탄성전단면적은 식(9)와 같이 보강재의 유효 전단 깊이(d_{shr})와 웨브의 순두께(t_w)의 곱으로 정의하고 단위는 cm^2으로 나타낸다.

$$A_{shr} = d_{shr}\; t_w\, 10^{-2} \tag{9}$$

보강재의 유효 전단 깊이는 보강재의 깊이와 부착판의 순두께(t_p)의 합을 의미하며, 보강재의 깊이는 Fig. 1의 좌측 그림에 나타낸 웨브의 총깊이($h_{w,gr}$)와 플렌지의 총두께($t_{f,gr}$)의 합을 의미한다. 따라서 식(9)는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{shr} = (h_{w,gr} + t_{f,gr} + t_p)\;\; t_w\, 10^{-2} \tag{10}$$

3.4 유효 순 소성단면계수 계산

유효 순 소성단면계수의 계산식은 식(11)과 같이 두 항의 합으로 정의된다. 두 번째 항의 h_{f-ctr}을 제외하면 모두 웨브와 플렌지의 순두께 기반의 값으로 구성되며, h_{f-ctr}은 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{pl} = \frac{0.75\, h_w^2\, t_w}{2000} + \frac{b_f t_f\, h_{f-ctr}}{1000} \tag{11}$$

$$h_{f-ctr} = h_{w,gr} + t_{f,gr} - 0.5 t_f \tag{12}$$

4. 보강재 최적화

4.1 최적화 기법

본 연구에 적용한 최적화 기법은 다개체 탐색법인 진화전략 기법[8]으로 유전자 알고리즘[9]과 함께 선박 구조물의 최적설계에 많이 적용되고 있다. 진화전략은 플러스(plus) 전략과 코마(comma) 전략으로 구분되는데, 본 연구에서는 선택 단계에 부모 개체가 참여하는 플러스 전략을 사용하였으며, Shin 등[7]의 연구에서 가장 효과적인 탐색 크기로 선정된 ES(20+150)을 적용하였다.

4.2 설계 변수

보강재의 최소중량 계산을 위해 Fig. 1의 좌측에 나타낸 총두께 기반의 웨브의 깊이($h_{w,gr}$)와 두께($t_{w,gr}$), 플렌지의 폭($b_{f,gr}$)과 두께($t_{f,gr}$)를 설계 변수로 선정하였다.

플렌지의 경우는 보호도장 성능기준 (PSPC, Performance Standards for Protective Coatings)에 의거하여 모서리 부위를 각이 지지 않도록 둥글게 가공해야 한다. 조선소에서는 직접 가공을 수행하거나 미리 가공

된 판재를 구입해야하는데, 가공된 판재를 구입할 경우에는 TOPY Industries LTD.의 Universal Mill Plate의 크기를 반영하여 폭과 두께의 총 조합이 121가지인 경우에서 선택하도록 하였다.

본 연구에서 개발한 최적화 프로그램은 직접 가공과 가공 판재 구입을 모두 고려할 수 있도록 구성하였다. 웨브와 모서리의 직접 가공을 요하는 플렌지의 경우는 두께를 0.5mm 간격의 이산 변수로 취급하였고, 높이와 폭은 설계자가 5 또는 25mm 간격 중 하나를 선택할 수 있도록 하였다.

4.3 제한조건

제한조건에는 3장에서 설명한 HCSR 보강재 규칙이 모두 포함되며, 단면계수(Z), 단면이차모멘트(I), 순 탄성전단면적(A_{shr}), 유효 순 소성단면계수(Z_p)의 최소 요구치는 설계자가 입력할 수 있도록 하였다. 보강재의 깊이($h_{w,gr}+t_{f,gr}$)를 제외하면 네 가지 모두 순 두께 기반으로 계산되며 설계자가 입력한 값보다 작은 값이 되는 치수들의 조합은 도태되어 생존 경쟁에서 배제된다.

4.4 목적함수

부착판의 폭(b_p)에는 부식여유의 개념이 존재하지 않으므로 본 연구에서 사용한 목적함수(f_{obj})는 식(13)과 같다.

$$f_{obj}=h_{w,gr}\times t_{w,gr}+b_{f,gr}\times t_{f,gr}+b_p\times t_{p,gr} \qquad (13)$$

목적함수 값에는 페널티 함수를 도입하여 제한조건을 위배하게 되면 페널티 값이 추가되어 생존 경쟁에서 도태되도록 하였다.

4.5 데이터 입력

최적화 결과를 도출하기 위한 데이터의 입력은 크게 다음과 같이 다섯 가지로 구성된다.

- 보강재 위치 및 선급규칙길이
- 재료의 항복응력, 부착판의 폭 및 두께
- 각각의 부식여유
- 설계변수의 상하한 및 간격
- 단면계수, 단면이차모멘트, 탄성전단면적, 소성단면계수의 최소 요구치

보강재 위치는 수밀 경계와 그 외 구조 중 설계자가 선택하도록 하였고, 선급규칙길이는 HCSR에 따라 300m 보다 큰 값은 300m로 입력해야 한다.

재료의 항복응력 입력값은 사용 재료의 최소 요구 항복응력으로 하며, 부착판의 두께는 순두께로 입력해야 한다.

부식 여유는 웨브의 두께, 플렌지의 폭 및 두께, 부착판의 두께 총 4개의 값을 입력해야 한다.

설계변수의 상하한 및 변수 간격 입력은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 두 가지 경우에서 입력 및 선택하도록 하였다. Fig. 2의 위 그림은 플렌지의 모서리 부위 가공을 조선소에서 직접 수행하는 경우이고, 아래 그림은 가공된 판재를 구입하는 경우를 나타내고 있다. 가공 판재를 구입하는 경우 판재의 폭과 두께를 정해진 값에서 선택하도록 하였다. 또한, 단면의 최소 요구치에 대한 입력은 설계자의 판단으로 불필요한 경우 Fig. 3과 같이 "0" 값을 입력하면 제한조건에서 무시하고 최적설계를 수행하도록 구성하였다.

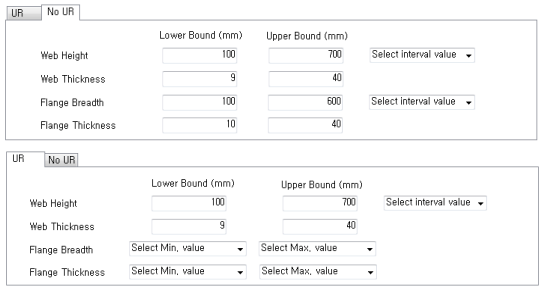

Fig. 2. Input for design variables

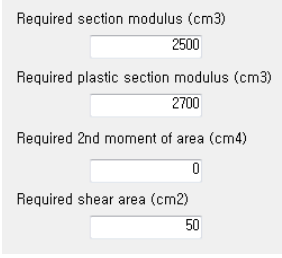

Fig. 3. Input for minimum requirements of section properties

4.6 최적화 결과 검증

진화전략 기법의 최적화 결과를 검증하기 위해 설계변수의 총 조합 즉 모든 경우의 수에 대해 직접 계산한 전체 최적점과 비교하였다. 지나친 계산 소요시간을 방지하기 위해 경우의 수가 1,000,000을 넘지 않도록 설계변수의 상하한 값 및 변수 간격을 조절하였다.

Fig. 4는 최적화 결과를 검증하기 위한 예제에 대한 입력값을 보여주고 있다. 선박의 길이가 300m 이상인 VLCC에서 수밀 경계 위치의 T형 보강재 최적 형상을 계산하기 위한 예제이다.

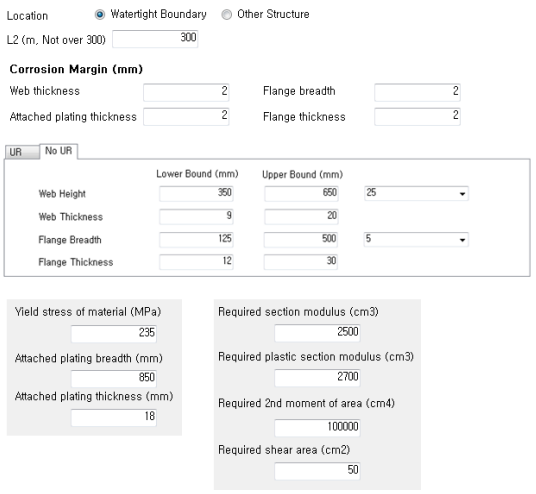

Fig. 4. Input for verification of optimum results

Fig. 5는 진화전략 기법을 이용한 최적화 프로그램에 의해 탐색된 결과이다.

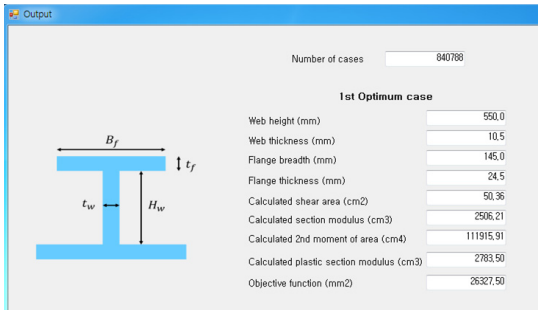

Fig. 5. Optimum results by evolution strategy

설계변수의 상하한과 변수 간격에 의해 총 경우의 수 (N_{case})는 식(14)와 같다.

$$N_{case} = 13 \times 23 \times 76 \times 37 = 840,788 \quad (14)$$

진화전략 기법에 의한 최적화 결과를 검증하기 위해 840,788가지의 총 경우의 수를 직접 계산하였고, 840,788가지 중 가장 우수한 값을 Fig. 6에 보였다. 계산결과 Fig. 5와 일치하는 값을 얻을 수 있었으며, 직접 계산 결과와의 비교를 통해 진화전략 기법에 의한 탐색 결과가 매우 정확함을 확인하였다.

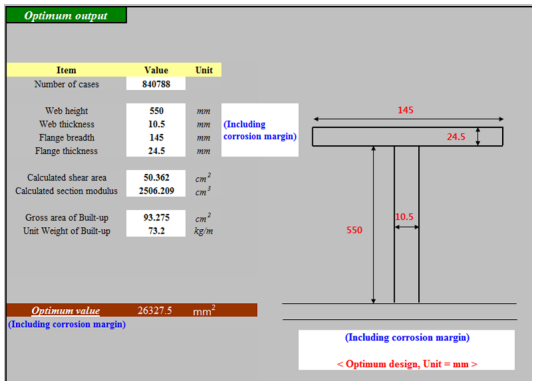

Fig. 6. Optimum results by direct calculation

5. 유형 효과

개발된 프로그램을 최근 수주한 10척의 시리즈 호선인 300K VLCC에 적용하여 척당 절감된 중량을 Table 1에 보였다. 척당 약 144톤으로 총 1,440 톤의 상당히 큰 중량 절감 효과를 기대할 수 있다. 마찬가지로 최근 수주한 4척의 시리즈 호선인 수에즈막스급 158K COT에 적용한 결과 척당 약 60톤, 총 240 톤의 중량 절감 효과를 얻었다. 선박이 크면 클수록 절감 효과가 급격하게 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Table 1. Weight reduction by developed program

Position	Reduction weight (ton)
Longi. BHD	24.5
Side shell	27.9
Hopper	22.5
Trans. BHD	69.5
Total	144.4

6. 결론

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 선박의 대형화에 따라 사용량이 증대되고 있는 T형 조립부재의 경제적인 적용을 위해 HCSR 기반의 T형 조립부재 최소중량설계 프로그램을 개발하였다.
2) 진화전략 기법을 적용하여 개발한 최적화 프로그램의 정확성을 검증하기 위해 모든 경우의 수를 실제 계산하여 비교한 결과 상호 일치하는 값임을 확인하였다.
3) 실제 선박 설계에 적용한 결과 300K VLCC의 경우 척당 약 144톤, 158K COT의 경우 척당 약 60톤의 중량 절감 효과를 얻었다.

References

[1] International Association of Classification Societies (IACS), Common Structural Rules for Bulk carriers, 2012.

[2] International Association of Classification Societies (IACS), Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2012.

[3] International Association of Classification Societies (IACS), Common Structural Rules for Bulk Carrier and Oil Tankers, 2015.

[4] C. H. Sung and S. K. Lee, "Comparison Analysis on Requirement of Structural Members by Application of Harmonized Common Structural Rules", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 52, no. 3, pp. 265-274, 2015.
DOI: https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.3.265

[5] C. I. Park, S. Jeong, H. C. Song, S. S. Na, M. C. Park, S. H. Shin and J. Y. Lee, "Development of an Automated Design Algorithm for the Longitudinal Members of Oil Tankers based on H-CSR", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 53, no. 6, pp. 503-513, 2015.

[6] S. J. Yim, Y. S. Yang and J. S. Lee, "On the Strength Analysis of the Stiffener with Asymmetric Cross Section", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 17, no. 1, pp. 11-18, 1980.

[7] 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

[8] H. P. Schwefel, Numerical Optimization of Computer Models, Wiley, Chichester, 1981.

[9] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning, Addison Wesley, 1989.

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

고 대 은(Dae-Eun Ko) **[정회원]**

- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>
선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계