

유도 가열을 이용한 강판의 곡면 성형 시뮬레이션

유현수¹, 김호경², 고대은^{3*}

¹대우조선해양 중앙연구원, ²성동조선해양, ³동의대학교 조선해양공학과

Simulation of Curved Surface Forming of Steel Plate by Induction Heating

Hyun-Su Ryu¹, Ho-Kyeong Kim², Dae-Eun Ko^{3*}

¹Central Research Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering

²Sungdong Shipbuilding & Marine Engineering

³Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 선체의 외판은 복잡한 곡면 형상이며 대부분의 조선소에서는 이의 제작을 위해 가스 토치를 이용한 선상 가열 방법을 사용하고 있다. 가스 토치를 이용한 전통적인 선상 가열 방법은 입열량의 제어가 어려울 뿐만 아니라 고압의 가스 분출에 따른 소음과 대기 오염 등 열악한 작업 환경의 문제점을 안고 있다. 최근에는 입열량의 제어가 비교적 용이하고 친환경적인 고주파 유도 가열에 주목하여 이를 가열 열원으로 하는 강판의 성형 자동화 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 강판의 곡면 성형을 위한 유도 가열 시뮬레이션 방법을 개발하였으며 유도 가열 실험 결과와 비교하여 그 유효성을 검증하였다. 개발된 유도 가열 시뮬레이션 방법은 효율적인 유도 가열 코일 설계와 최적 성형 조건 산출 등 유도 가열을 이용한 선체 외판의 곡가공 자동화 시스템 개발에 유용한 해석적 툴로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Ship hull is a compound curved shape and most of shipyards have been using gas heating method for the surface forming of steel plate. This traditional forming process have problems such as difficulties in heat input control and poor working conditions due to loud noise and air contamination. Recently, researches on automatic hull forming system have been conducted using high frequency induction heating method which have good control ability and favorable working environment. In this study, the induction heating simulation system for curved surface forming of steel plate was developed and induction heating experiments were performed. Based on the results of this study, efficient induction heating coil design and optimal heating conditions for the automatic hull forming system can be obtained.

Keywords : High frequency induction heating, Simulation, Automatic hull forming system

1. 서론

선체의 외판은 선형에 따른 3차원 곡면 형상이며 이를 제작하기 위한 강판의 곡면 가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이다. 일반적으로 조선소에서는 주된 1차곡을 프레스로 냉간 성형하고 추가적인 2차곡의 성형에는

가스 토치를 이용한 선상 가열 방법을 사용하고 있다. 가스 토치를 이용한 전통적인 선상 가열 방법은 숙련된 기능공의 경험에 전적으로 의존하고 있어 시행착오에 의한 반복 작업이 발생하기 쉽고, 작업자는 가스 분출에 따른 소음과 대기 오염, 화염과 강판 가열에 의한 고열 등 열악한 작업 환경에 노출된다. 또한, 사용하는 가스의 종류

이 논문은 2015학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Dae-Eun Ko(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received March 25, 2015

Revised April 24, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

와 혼합비율, 가스 압력, 팁 형상 및 강판과 팁의 간격 등 변수가 많고 재연성이 떨어져 입열량의 추정 및 제어가 용이하지 않으므로 국가공 자동화 시스템을 위한 가열 열원으로서의 문제점이 많다[1].

최근에는 입열량의 제어가 비교적 용이하고 친환경적인 고주파 유도 가열 방법이 주목받고 있다. 강판의 곡면 성형 관련 유도 가열을 이용한 초기 연구로서 Ueda 등[2]은 고주파 유도 가열 장치에 의한 정지 열원 실험과 열탄소성 해석을 통해 변형을 지배하는 파라미터들을 도출하고 가열조건에 따른 변형 특성을 논하였다. Kang 등[3]은 고주파 유도 가열을 이용한 정지 열원에 대해 변형 해석을 수행하고 가스 가열에 의한 변형 특성과 비교 검토 하였으며, Jang 등[4]은 원형 유도 가열 코일의 2차원 축대칭 모델을 사용하여 전자기장 해석을 수행하고 이 결과를 활용하여 판의 변형 해석을 수행하였다. 또한, Lee 등[5]은 유도 가열 해석을 위한 다분할 해석 방법을 제안하고 장형코일을 이용한 2차곡 성형에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 유도 가열에 의한 강판의 변형을 보다 정확히 예측하기 위해 온도장의 변화를 고려한 전자기장 해석을 포함하여 보완된 다분할 해석 방법을 제안하였다. 또한, 유도 가열에 의한 기초 판 변형 실험을 수행하고 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 비교함으로써 본 연구에서 정립한 시뮬레이션 방법의 유효성을 검증하였다.

2. 유도 가열의 원리

유도 가열은 가열 코일에 흐르는 높은 주파수의 교류에 의해 발생하는 교번 자계 중에 놓인 도전성 피가열체의 자기 발열을 이용한 가열 방식으로 그 발열 기구는 와전류 손실(eddy current loss)과 히스테리시스 손실(hysteresis loss)로 설명된다. 교류 전류가 흐르는 코일 속에 위치한 금속체에는 내부의 기전력 발생으로 인해 유도 전류가 흐르게 되는데, 이렇게 유도된 와전류가 금속의 고유 특성인 비저항으로 인해 금속체 내부에 열을 발생시키고 이러한 발열은 유도가열의 주요 발열원이 된다. 금속체의 비저항은 온도 의존성 특성값으로서 온도의 증가에 따라 함께 증가하는 경향을 보인다. 한편, 실제 문제의 경우 피가열체가 폐자로를 형성하는 경우는

거의 없고 히스테리시스 계수도 매우 작으므로 히스테리시스 손실에 의한 발열량은 와전류 손실에 의한 발열량과 비교하여 매우 적은 편이다. 또한 자성체가 큐리온도(선급강종 mild A 기준 770℃) 이상이 되면 자성을 잃어 히스테리시스 손실은 ‘0’이 된다. 본 연구에서는 히스테리시스 손실에 의한 발열은 무시하였다.

3. 유도 가열 시뮬레이션

3.1 전자기장 해석

전자기장 해석은 가열 코일, 코어, 피가열체 및 공기로 구성되는 복잡한 해석 영역을 대상으로 한다. 본 연구에서는 전자기장 해석을 위해 Fig. 1에 보인 바와 같이 가열 길이 방향으로의 연속성을 고려하여 2차원 단면 모델을 작성하였고 이때 가열부의 좌우 대칭성을 고려하여 반쪽만을 모델링 하였다. 도체에 유도되는 와전류는 주파수가 높을수록 더욱 도체의 표면으로부터 얇은 깊이까지만 존재하게 되는데 이러한 표면 효과(skin effect)로 인해 발생 줄열의 크기도 강판의 두께 방향으로 급격하게 감소하는 경향이 있다. 이를 고려하여 가열부의 강판 두께 방향 요소망을 조밀하게 모델링 하였다. 강판과 코일 사이의 얇은 공기층 간격은 줄열(Joule's heat) 발생량에 큰 영향을 미치므로 정확한 값으로 모델링 되어야 하고, 코일 덮개의 유무에 따라 발생하는 줄열 계산값이 많은 차이를 보인다.

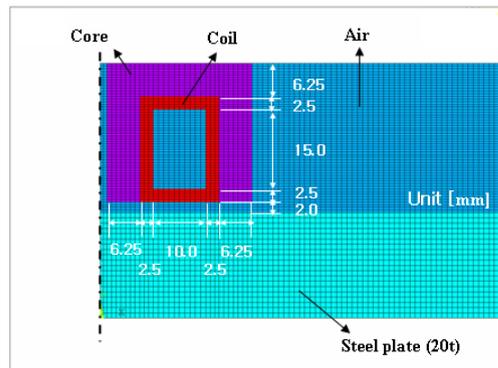


Fig. 1. FE model for electro-magnetic analysis

전자기장 해석에 사용되는 강판의 재료 특성치로는 비투자율과 비저항을 들 수 있으며, 해석을 위한 입력값

으로는 주파수, 전류 밀도, 입력 효율이 있다. 비투자율과 비저항은 강판의 온도 의존 특성값을 사용해야 정확한 해석 결과를 기대할 수 있으며 입력값은 전력 공급부와 코일의 특성에 따라 결정되는 값이다. 본 연구의 전자기장 해석에 사용한 재료 특성치와 입력값들을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Material property and input values for electro-magnetic analysis

Item	Value
Frequency	4.5 [kHz]
Relative permeability	Fig. 2 (Temperature dependant)
Specific resistance	Fig. 3 (Temperature dependant)
Current density	3.0e7 [A/m ²]
Efficiency	0.75

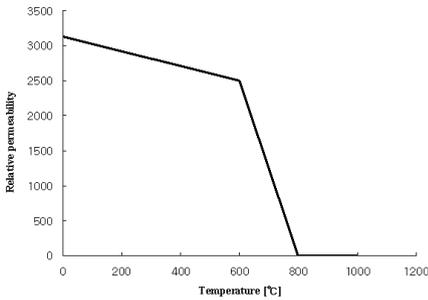


Fig. 2. Relative permeability of steel

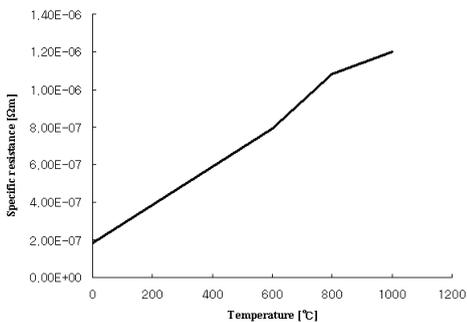


Fig. 3. Specific resistance of steel

3.2 열전달 해석

열전달 해석에서는 Fig. 4와 같이 전자기장 해석 결과로 얻은 발생 줄열 분포를 입력 조건으로 사용한다. 전자기장 해석에 사용한 모델에서 코일과 코어 부분을 공기로 치환하여 전체적으로 강판과 공기로 구성된 유한요소

모델을 사용하였다. Fig.5와 같이 전자기장 해석에 사용한 강판 단면의 요소망 형태를 그대로 유지함으로써 입력 조건인 발생 줄열 분포가 정확하게 적용되도록 하였다. 열전달 해석의 목적은 유도 가열에 의한 가열 및 냉각 과정에서의 온도 분포 계산을 통해 강판의 변형 해석을 위한 열하중을 구하는 것으로 각 단계 별 발생 줄열의 수렴 여부를 고려하여 열전달 해석의 단계별 해석 시간을 결정하였다. 열전달 해석을 위한 온도 의존성 재료 특성치로는 Patel[6]의 자료를 사용하였다.

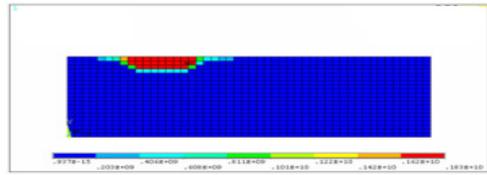


Fig. 4. Induced Joule's heat distribution

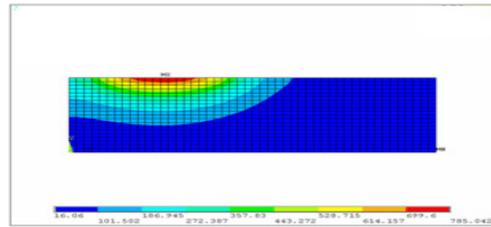


Fig. 5. Temperature distribution

3.3 열탄소성 해석

본 연구에서는 열탄소성 해석에서 온도 의존성 물성치와 Newton-Raphson approach를 사용하여 재료의 비선형성 및 기하학적 비선형성을 모두 고려하였다. 강판의 두께 방향으로의 발생 줄열 변화를 고려하기 위해 layered shell 요소를 사용하였으며 Fig. 6에 4-node finite strain shell 요소를 사용한 강판의 열탄소성 해석 모델을 보였다. 해석의 정확도를 높이기 위해 입열부 부위를 조밀하게 요소분할 하였고 대칭성을 고려하여 반쪽만을 모델링 하였다. 온도 의존성 물성치로는 Tekriwal[7]의 모델을 사용하였다.

열탄소성 해석은 전자기장 및 열전달 해석 결과인 온도 분포를 열하중으로 설정하여 3차원 열전달 해석과 탄소성 해석의 순으로 수행된다. Fig.7은 전자기장 및 열전달 해석의 결과인 각 요소별 발생 줄열 결과를 3차원 열전달 해석을 수행하기 위해 해당 요소에 열하중으로 입

력한 모습이다. Fig.8은 Fig.7에서 보인 열하중 분포에 의한 열전달 해석 결과 중 가열이 끝난 시점에서의 온도 분포 결과이다. Fig.9는 가열과 냉각 과정의 모든 단계별 탄소성 해석을 수행한 최종 변형 결과의 예를 보여 주고 있다.

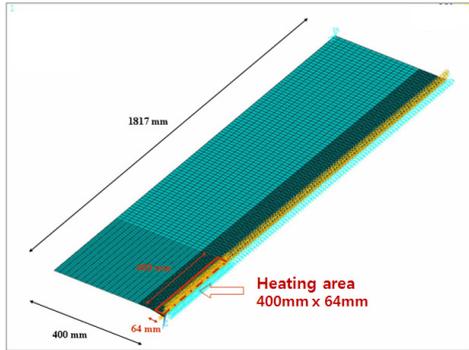


Fig. 6. Thermal elasto-plastic analysis FE model and boundary conditions

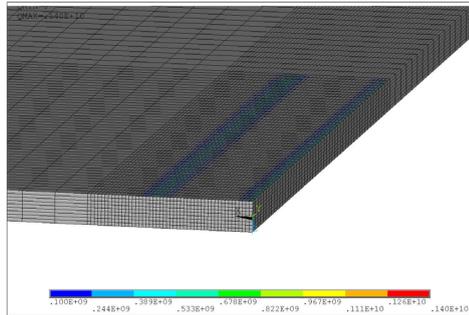


Fig. 7. Induced Joule's heat input

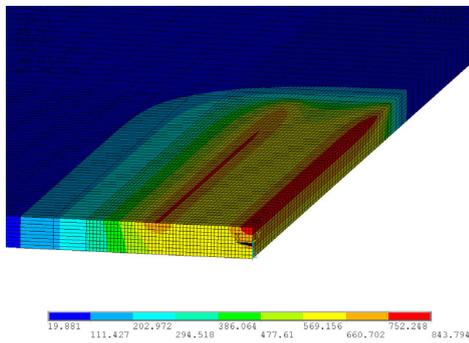


Fig. 8. Temperature distribution

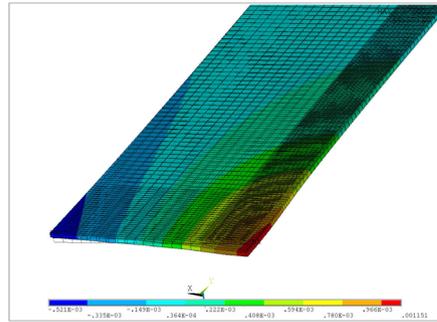


Fig. 9. Thermal elasto-plastic analysis result

3.4 유도 가열에 의한 판의 변형 시뮬레이션

유도 가열에 의한 광판 변형의 시뮬레이션은 전자기장 해석, 열전달 해석, 열탄소성 해석으로 이루어지며 초기에 각 해석에 적용되는 온도 의존성 물성치 자료가 입력된다. 먼저 전자기장 및 열전달 해석에 사용될 유한 요소 모델이 구성되면 온도 의존성 물성치 자료를 입력하고 주어진 경계 조건과 하중 조건에 의한 전자기장 해석을 수행하여 발생 줄열을 계산한다. 이렇게 전자기장 해석이 종료되면 발생 줄열 정보가 열전달 해석의 열하중 조건으로 적용되며 첫 번째 열전달 해석을 수행하여 온도 분포를 계산한다. 다음으로 첫 번째 열전달 해석의 결과인 온도 분포를 두 번째 전자기장 해석의 온도 경계 조건으로 설정하고 전자기장 해석을 수행하여 발생 줄열 분포를 계산한다. 이 결과를 다시 두 번째 열전달 해석의 하중 조건으로 설정하고 분할된 두 번째 가열 시간을 고려하여 온도 분포를 계산한다. 이와 같은 연성 해석을 분할된 해석 단계 및 해석 시간이 종료할 때까지 반복 수행한다. 전자기장과 열전달 해석을 통해 계산된 각 단계별 발생 줄열 분포는 열탄소성 해석에서의 열하중 조건으로 적용되어 최종 변형을 계산한다. 다음 Fig.10에 유

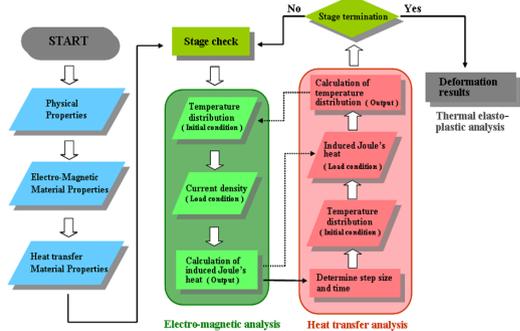


Fig. 10. Flow chart of induction heating simulation

도 가열에 의한 판 변형 시뮬레이션의 전체 흐름도를 보았다.

4. 유도 가열 실험 및 변형 해석 결과

유도 가열 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위해 Fig.11과 같이 제작된 유도 가열 장치를 이용하여 평판에 대한 유도 가열 실험을 수행하였다. 시편의 크기, 재료 물성치 및 유도 가열 실험 조건은 Table 2와 같으며 가열 영역의 위치와 계측점들의 위치를 Fig.12에 보였다. 치짐량은 다이얼 게이지를 사용하여 계측점에서의 수직 변형값을 계측하였고 전체 25개 지점에서의 최종 변형 계측 값을 Fig.13에 정리하여 보였다.



Fig. 11. Arrangement of induction heating machine for experiment

Table 2. Specimen size, property and heating condition

Item	Value
Specimen size	1,817mm x 800mm x 18mm
Steel Property (Tensile Test Results)	Yield Point : 315 [N/mm ²] Tensile Strength : 452 [N/mm ²] Elongation Length : 27 [%]
Frequency	2.4 [kHz]
Power	120 [kW]
Gap	2 [mm]
Heating Time	150 [sec]
Cooling Time	50 [min]

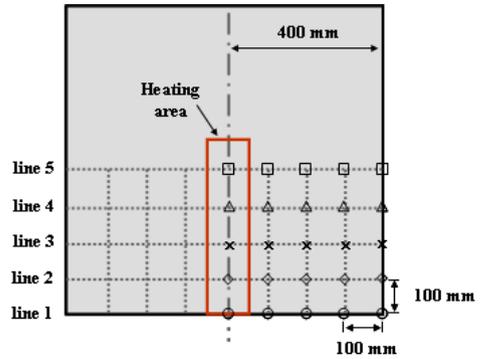


Fig. 12. Heating area and measuring points

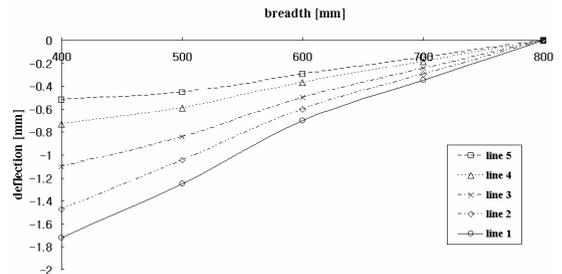


Fig. 13. Induction heating experimental results

Fig.13의 변형 결과에서 볼 수 있듯이 자유단부의 line1에서 최대 치짐이 발생하였고, 판 중앙부로 갈수록 각 line에서의 최대 치짐량은 점차 감소하였다. 한편, 결과 비교를 위해 실험과 동일한 조건으로 유도 가열에 의한 변형 시뮬레이션을 수행하였다. 이 과정에서 입력 효율을 변화시켜가며 변형 해석 결과와 실험 결과를 비교하였으며, 유도 가열의 입력 효율을 0.85로 했을 때 Fig.14에 보인 바와 같이 실험 결과와 매우 잘 부합하는 변형 결과를 얻을 수 있었다.

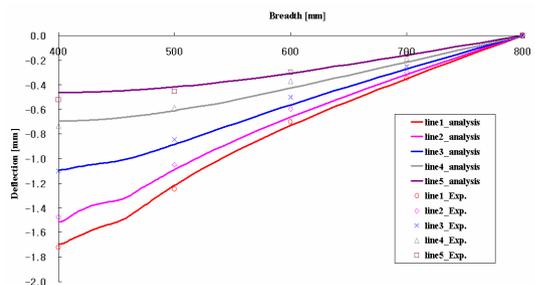


Fig. 14. Experimental and simulation results with efficiency 0.85 for induction heating

5. 결론

본 연구에서는 유도 가열에 의한 강판의 변형 해석 방법을 제안하고 시뮬레이션 절차를 구축하였으며 기초 판 변형 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 유도 가열에 의한 전자기장 및 열전달 해석 시 다분할 해석 방법을 이용한 연성 해석을 수행함으로써 가열 코일의 진행에 따른 온도장 변화를 발생 줄열 계산에 반영하였다.
- 2) 전자기장 및 열전달 해석 결과인 각 단계별 발생 줄열 분포를 열하중으로 하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 최종 강판의 변형을 계산할 수 있는 유도 가열에 의한 강판 변형의 시뮬레이션 방법을 구축하였다.
- 3) 평판에 대한 유도 가열 실험을 수행하고 실험과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 비교한 결과 유도 가열의 입력 효율을 0.85로 했을 때 실험 결과와 매우 잘 부합하는 변형 결과를 얻었으며 이로써 본 연구에서 정립한 시뮬레이션 방법의 유용성을 검증하였다.

본 연구에서 구축한 유도 가열 시뮬레이션 방법은 효율적인 코일 설계와 최적 성형 조건 산출 등 향후 유도 가열을 이용한 선체 외관의 곡가공 자동화 시스템 개발에 유용한 해석적 틀로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] D. E. Ko, C. D. Jang, S. I. Seo and H. W. Lee, "Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 34(4), pp.116-127, 1999.
- [2] Y. Ueda, H. Murakawa, A. M. Rashwan, I. Neki, R. Kamichika, M. Ishiyama and J. Ogawa, "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line- Heating (Report III): Relation between Heating Condition and Deformation", Transaction of JWRI, 22(1), pp.145-156, 1993.
- [3] J. G. Kang, J. H. Lee and J. G. Shin, "Numerical analysis of induction heating for the application of line heating", Journal of the Society of Naval Architects of

Korea, 37(3), pp.110-121, 2000.

- [4] C. D. Jang, H. K. Kim and Y. S. Ha, "Prediction of Plate Bending by High Frequency Induction Heating", Journal of Ship Production, 18(4), pp.226-236, 2002.
- [5] Y. H. Lee and C. D. Jang, "A Study of Bending Using Long Type Coil by Discrete Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(3), pp.303-308, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2008.45.3.303>
- [6] Balvant Patel, "Thermo-Elasto-Plastic Finite Element Formulation for Deformation and Residual Stresses Due to Welds", Ph.D. Thesis, Carleton Univ., Ottawa, Ontario, Canada, 1985.
- [7] Tekriwal, Prabhat Kumar, "Three-dimensional transient thermo-elasto-plastic modeling of gas metal arc welding using the finite element method", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 1989.

유 현 수(Hyun-Su Ryu)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2013년 1월 : STX 조선해양 기술연구소
- 2013년 3월 ~ 현재 : 대우조선해양(주) 중앙연구원

<관심분야>

선박 생산 자동화, 열전달 및 열변형, 극저온 공학

김 호 경(Ho-Kyeong Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2002년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2003년 8월 ~ 2014년 4월 : STX 조선해양 기술연구소
- 2014년 4월 ~ 현재 : 성동조선해양 혁신기술팀

<관심분야>

선박 생산 자동화, 선박 건조 기술

고 대 은(Dae-Eun Ko)

[정회원]



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

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계