

# 도그피스를 고려한 선체 블록 조인트의 용접변형 시뮬레이션

김호경<sup>1</sup>, 고대은<sup>2\*</sup>, 조용진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>STX조선해양 기술연구소, <sup>2</sup>동의대학교 조선해양공학과

## Simulation of Welding Deformation of Hull Block Joint considering Dog-Pieces

Ho-Kyeong Kim<sup>1</sup>, Dae-Eun Ko<sup>2\*</sup>, Yong-Jin Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Technology, STX Offshore & Shipbuilding

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

**요약** 조선소에서는 블록 조인트의 용접 작업 시 단차 조정 및 변형 방지의 목적으로 도그피스(Dog-Piece)를 사용하고 있는데, 조선소마다 그 규모에 따라 연간 수십만 개의 도그피스를 사용하고 있으며 설치, 제거 및 사상 작업에 투입되는 생산 시수도 연간 수십만 시수에 이르고 있어 생산성 향상의 저해 요인이 되고 있다. 본 연구는 선체 블록의 정도 품질을 확보하면서 도그피스의 사용량 절감 방안을 마련하기 위한 목적으로 수행되었다. 연구 내용으로는 우선 일련의 용접실험을 통해 도그피스가 맞대기 용접시의 변형에 미치는 구속 효과를 정량적으로 검토하였고, 실험 결과를 토대로 도그피스가 부착된 맞대기 용접시의 변형을 계산하는 유효요소 해석 방법을 정립하였다. 또한, 제안된 해석 방법을 이용하여 도그피스를 고려한 선체 블록 조인트의 용접변형을 시뮬레이션하고 결과를 검토하였다. 제안된 해석 방법은 향후 도그피스 배치도면 작성 및 설치 가이드 작성 등의 실질적인 도그피스 절감 방안을 마련하기 위한 해석 도구로 폭넓게 활용될 수 있다.

**Abstract** In shipyards, a large number of dog-pieces are used to align welding joints and prevent welding deformation in the block assembly stage. The huge working man-hours consumed in the working process of dog-pieces impedes the productivity growth of shipyards. In this study, an analysis method based on the experimental results was proposed to simulate the welding deformation of butt joints with a dog-piece setting. The simulation of welding deformation of a hull block joint was performed using the proposed analysis method. Finally, the proposed analysis method can be used to establish guidelines for the proper use of dog-pieces in the block assembly stage.

**Key Words** : Dog-piece, Block assembly stage, Simulation of welding deformation

### 1. 서론

선체 블록 조인트의 용접 작업 시 단차 조정 및 변형 방지의 목적으로 통상적으로 도그피스(Dog-Piece)라 칭하는 플레이트 지그(Plate Jig)를 사용하고 있다. 도그피스가 일정 크기 이상이 되면 변형 방지 효과는 정체되고 자체 중량만 증가되므로[1] 각 조선소는 기능성과 경제성을 고려하여 표준화된 형태와 크기의 도그피스를 사용하고 있다. Fig. 1은 블록 조립 및 탑재 공정에서의 도그

피스 작업 영역을 보여 주고 있으며, Fig. 2는 대표적으로 사용되는 표준화된 도그피스들을 보여준다.

조선소마다 그 규모에 따라 연간 수십만 개의 도그피스를 사용하고 있으며 설치, 제거 및 사상 작업에 투입되는 생산시수도 연간 수십만 시수에 이르고 있다. 참고로, 조사 결과에 따르면 50K Tanker 1척 기준으로 약 38,000 개의 도그피스가 사용되는 것으로 파악되었다[2]. 선체 블록의 조립 및 탑재 공정에서의 생산성 향상을 위해서

이 논문은 2014학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2014AA008).

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

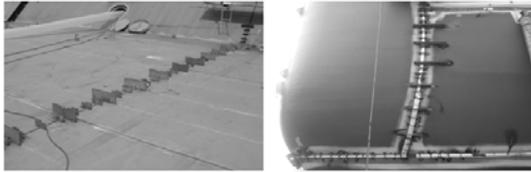
Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received May 8, 2014

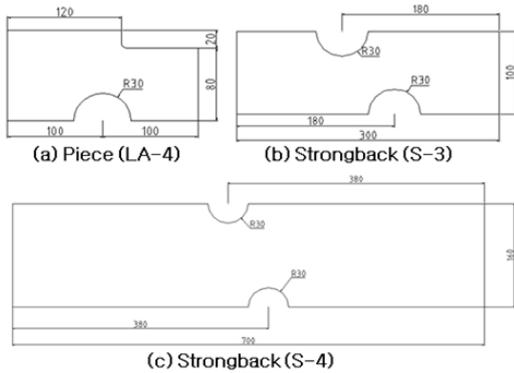
Revised June 17, 2014

Accepted August 7, 2014

는 용접 변형의 제어를 통한 블록의 정도관리가 우선적으로 매우 중요하며 도그피스의 사용량을 줄이기 위한 노력도 반드시 필요하다고 할 수 있다.



[Fig. 1] Dog-pieces in block assembly and erection stage



[Fig. 2] Types of standard dog-pieces

맞대기 용접에 대해서는 과거로부터 많은 해석적·실험적 연구가 있어왔다. 최근에는 전산기의 발전에 힘입어 유한요소 해석을 이용하여 용접부의 변형과 잔류응력을 정도 있게 평가하기 위한 연구들이 있으나, 대부분의 연구는 단순한 시험편 수준의 범위로 제한되어 수행되었다[3,4]. 선체 블록과 같은 대형 구조물의 용접변형에 대해서 유한요소 해석에 의한 시뮬레이션 방법은 재료의 비선형성을 고려하는데 따르는 많은 계산시간에도 불구하고 변형의 관점에서 실험 결과와 많은 차이를 보인다는 것이 문제점으로 지적된다[5]. 해의 정확도는 고온에 의한 용융 영역의 적절한 고려에 크게 의존한다는 것이 알려져 있다[6]. Jang과 Lee[7]는 고유변형도 이론에 기초한 등가하중법과 유한요소 해석을 결합하여 선체 보강판의 조립순서에 따른 용접변형을 시뮬레이션하였는데, 고유변형도 이론을 이용하여 복잡한 열탄소성 과정을 간략화 함으로써 계산시간 측면에서는 장점이 있으나, 고유변형도의 크기와 분포 영역을 결정하는데 어려움이 있고 외적 구속 상태가 변화하는 경우 매번 구속도를 새로

구해야 하는 번거로움이 따른다. 본 연구에서는 용접변형 해석 방법으로 유한요소법에 기초한 열탄소성 해석법을 이용하였고 해의 정확도를 담보하기 위하여 실험 결과를 토대로 해석을 위한 파라메타들을 결정하였다.

본 연구는 선체 블록의 정도 품질을 확보하면서 도그피스의 사용량 절감 방안을 마련하기 위한 목적으로 수행되었다. 연구 내용으로는 우선 일련의 용접실험을 통해 도그피스가 맞대기 용접시의 변형에 미치는 구속 효과를 정성적·정량적으로 검토하였다. 또한, 유한요소법에 기초한 열탄소성 해석법을 이용하여 도그피스가 부착된 맞대기 용접시의 변형을 계산하는 방법을 정립하고 실험 결과와 비교·검증하였다. 마지막으로, 검증된 해석 방법을 이용하여 도그피스를 고려한 선체 블록 조인트의 용접변형을 시뮬레이션하고 결과를 검토하였다. 이러한 해석 결과를 토대로 도그피스를 적재적소에 배치함으로써, 선체 블록의 정도 품질 확보와 도그피스의 사용량 절감이라는 두 가지 목표를 동시에 달성하고자 하였다.

## 2. 용접변형 실험

맞대기 용접에서 도그피스 설치 개수에 따른 용접 변형량을 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 3에 보인 세 가지 용접 시험편에 대하여 용접실험을 실시하였다. 용접 시험편들의 상세는 Table 1에 보인 바와 같으며 도그피스 설치 개수 이외의 조건은 동일하다. 사용한 용접법은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)이며 세부 용접 조건은 Table 2에 정리하여 보였다.



[Fig. 3] Welding specimens

[Table 1] Specimen data

	Size (mm)	Number of Dog-Pieces (EA)	Type of Dog-Pieces
Case 1	940 × 1100 × 15	0	LA-4
Case 2	940 × 1100 × 15	3	LA-4
Case 3	940 × 1100 × 15	5	LA-4

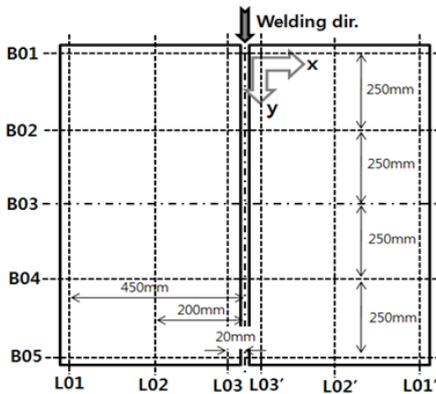
[Table 2] Butt welding conditions

Item	Value	Unit
Current	210 - 270	A
Voltage	27 - 31	V
Speed	15	cm / min
V-groove angle	35	degree
Root gap	8	mm

용접실험은 각 case 별로 Fig. 4에 보인 바와 같이 맞대기 용접, 도그피스 제거, 변형 계측의 순서로 진행하였고, 용접 조건 모니터링 결과와 용접 비드의 외관 검사 결과 모두 양호함을 확인하였다.



[Fig. 4] Procedure of experiments



[Fig. 5] Position of lines for comparison of welding deformation

도그피스 제거 후 3차원 접촉식 계측기를 사용하여 각 시험편 마다 판 전체에 50mm 간격(용접선 부근은 폭 방향 20mm 간격)으로 미리 표시해 둔 총 504개의 계측점에서 변형량을 계측하였다. 용접 변형량의 비교를 위하여 Fig. 5와 같이 비교 라인들을 설정하고, 횡방향과 종방향의 비교 라인들에 대하여 각 case의 최대 변위값들을 Table 3과 Table 4에 정리하였다. 이 때, 최대 변위값들은 각 라인별로 양쪽 끝단의 변위를 기준값 0으로 하여 산출한 것이다.

[Table 3] Comparison of max. displacements in x-direction [mm]

	B01	B02	B03	B04	B05
Case 1	12.8	12.1	12.4	12.8	13.2
Case 2	7.5	8.0	8.0	7.8	7.7
Case 3	3.7	3.2	3.7	2.9	3.2

[Table 4] Comparison of max. displacements in y-direction [mm]

	L01	L02	L03	L03'	L02'	L01'
Case 1	8.6	9.0	8.6	8.3	8.2	7.6
Case 2	5.2	5.5	5.0	5.9	6.3	6.1
Case 3	4.0	4.1	4.4	5.0	5.4	5.8

Table 3으로부터 도그피스 설치 개수에 따른 용접 각 변형의 크기 변화를 알 수 있고, Table 4로부터는 용접 종굽힘변형의 크기 변화를 알 수 있다. 도그피스의 설치 개수가 증가함에 따라 즉, 도그피스의 설치 간격이 감소함에 따라 용접 각변형은 확연한 차이를 두고 줄어드는 것을 볼 수 있으나 용접 종굽힘은 도그피스의 설치 유무에 따라 큰 차이를 보였고 설치 개수에 따른 차이는 각 변형의 경우와 비교하여 미미하였다.

이상의 용접실험 결과, 도그피스 설치에 따른 용접 변형 방지 효과에 대한 정성적 분석과 함께 정량적 데이터를 확보하였고 이는 용접변형 해석 방법 정립을 위한 비교·검증 데이터로 활용할 것이다.

### 3. 용접변형 해석 방법

본 연구에서는 용접변형 해석 방법으로 유한요소법에 기초한 열탄소성 해석법을 이용하였다. 용접에 의한 열탄소성 과정의 시뮬레이션은 문제의 비선형성과 고온 영역을 적절히 고려해야 하는 어려움 때문에 많은 계산시간을 요구하면서도 변형의 측면에서는 다소 부정확한 결과를 주는 것이 알려져 있으므로[5] 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 앞 절의 실험 결과를 토대로 해석을 위한 파라메타들을 결정하였다. 해석을 위한 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.

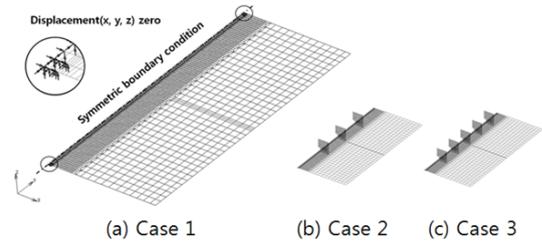
- (1) 해석 코드로는 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC MARC를 사용하였고, 유한요소로는 판 두께 방향의 온도 구배를 표현할 수 있도록 9개의

- 적분점을 갖는 셀요소를 사용하였다.
- (2) Fig. 6과 같이 용접선을 기준으로 반쪽 모델을 생성하고 대칭 경계 조건과 함께 시편 고정용 태그 용접 부위의 절점에 강제 운동을 방지하기 위한 경계 조건을 적용하였다.
  - (3) 재료 물성치로는 Shin 등[3]의 연구를 참조하여 온도 의존성 물성치들을 적용하였고, 해석 용접 조건은 Table 2를 참고로 전류 248(A), 전압 26(V), 용접 속도 15(cm/min)로 설정하였다.
  - (4) 용접변형의 3차원 효과를 모사하기 위해 이동 열원을 사용하였으며 고온의 용접 비드가 시간에 따라 집진적으로 생성되는 모델링 기법을 적용하였다.
  - (5) 실험의 변형 결과와 부합하는 입열 조건을 찾기 위해 열속 반경(heat flux radius)을 변화시키면서 반복 해석하고 실험 결과와의 유사도를 확인하였다. 이때 실험 결과는 도그피스가 적용되지 않은 Case 1의 실험 결과를 기준으로 하였다. Table 5는 Case 1의 실험 결과에 대하여 열속 반경의 변화에 따른 해석 결과와의 유사도를 보여준다. 유사도는 수직 변위 차이가 허용 오차 2mm 이내인 계측점들의 개수를 전체 계측점의 개수로 나누어 백분율로 나타낸 것이며, 각변형과 종굽힘변형 모두 열속 반경이 135mm인 경우에 가장 좋은 유사도를 나타냈다.

이상과 같이 정립된 해석 방법을 이용하여 도그피스가 고려된 Case 2와 Case 3에 대해서도 Fig. 6의 (b), (c)와 같이 해석 모델을 생성하고 열속 반경이 135mm인 해석 조건으로 용접변형 해석을 수행하였다. 각 case에 대한 실험 결과와 해석 결과와의 유사도를 구하여 Table 6에 정리하였으며, Fig. 5의 비교 라인 B05, L02에 대한 변형 결과를 비교하여 Fig. 7과 Fig. 8에 예시하였다.

Table 6에서 볼 수 있듯이 각변형은 모든 case에서 실험 결과와 해석 결과가 매우 잘 일치하였고, 종굽힘변형도 Case 1과 Case 2에 대해서는 상당히 근사하였으나 Case 3의 경우에는 유사도 56%로 무시할 수 없는 차이를 보였다. 그 원인으로는 우선 열탄소성 해석 과정에서 열 하중을 야기하는 온도분포가 고온영역을 벗어나면서 냉각조건 등의 차이로 실제와는 차이가 나기 때문이고, 이와 관련하여 실험의 변형 결과와 부합하는 입열 조건을 찾는 과정에서 횡방향 구속이 없는 경우에 가장 잘 부합하는 열속 반경을 해석조건으로 했기 때문으로 생각된다.

다. 본 연구의 목적과 관련하여서는 실제 현장에서의 도그피스 설치 간격이 보통 300mm 이상이므로 180mm 간격인 Case 3의 경우는 관심영역에서 먼 경우이다.



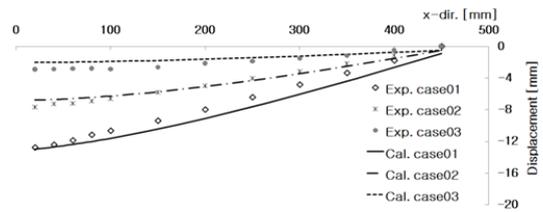
[Fig. 6] Finite element analysis models and boundary conditions

[Table 5] Similarity between experiment(Case 1) and analysis results according to heat flux radius

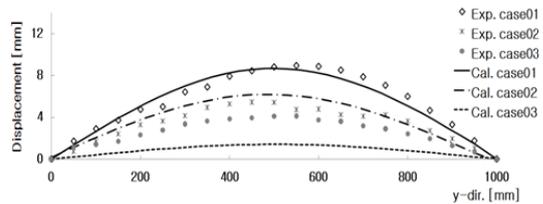
	R100	R125	R135	R150
Angular deformations	52%	95%	100%	18%
Longitudinal deformations	87%	92%	98%	52%

[Table 6] Similarity between experiments and analysis results with heat flux radius R135

	Case 1	Case 2	Case 3
Angular deformations	100%	100%	100%
Longitudinal deformations	98%	95%	56%



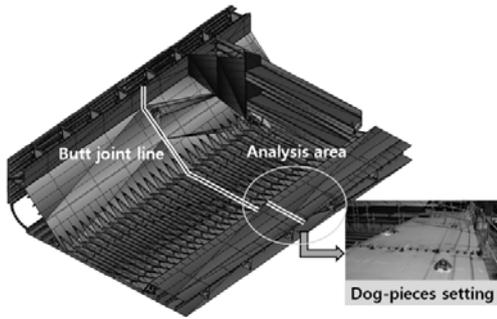
[Fig. 7] Comparison of welding deformations in x-direction (B04)



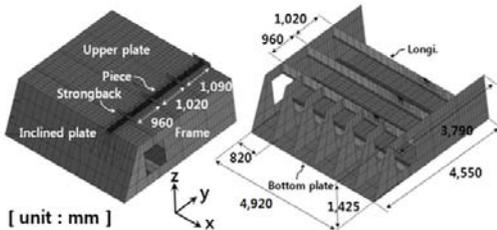
[Fig. 8] Comparison of welding deformations in y-direction (L02)

#### 4. 선체 블록 조인트의 용접변형 해석

3장에서 기술한 용접변형 해석 방법을 이용하여 도그피스를 고려한 선체 블록 조인트의 용접변형을 시뮬레이션하였다. 선체블록(Bottom Block)의 블록 조인트를 해석 대상으로 하였고, 해석 영역에 대하여 실제 현장 작업 시 설치된 도그피스 사진과 함께 Fig. 9에 보였다. Fig. 10은 해석 영역에 대한 유한요소 해석 모델을 보인 것으로, 상판(Upper Plate)의 블록 조인트에 실제 설치된 17개의 도그피스(S-4 type 4개, LA-4 type 13개)도 함께 모델링 하였다.



[Fig. 9] Analysis area and dog-pieces setting in block assembly stage

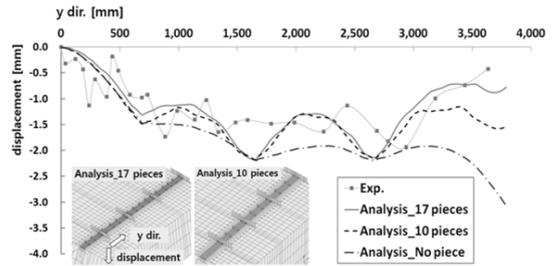


[Fig. 10] Finite element analysis model

해석 결과의 검증을 위하여 실제의 용접변형을 3차원 접촉식 계측기로 계측하였으며, 해석 결과와 함께 Fig. 11에 보였다. 해석 결과(Analysis\_17 pieces)와 계측 결과(Exp.)는 전반적으로 잘 부합하였다. 계측 포인트의 제한된 수와 계측 오차를 감안하면 일부 구간에서 최대 0.5mm 정도의 차이를 보이는 것은 정량적으로 잘 일치하는 것으로 판단된다.

한편, 도그피스 설치량을 실제 설치된 17개에서 10개로 줄인 경우(Analysis\_10 pieces)와 도그피스를 설치하

지 않은 경우(Analysis\_No piece)의 변형 해석을 추가로 실시하고 그 결과를 Fig. 11에 함께 도시하였다. 도그피스의 개수를 17개에서 10개로 총 7개를 줄인 경우, 자유단에서의 변형을 제외하면 17개의 도그피스를 사용한 경우와 유사한 변형 결과를 나타냈다. 그러나 도그피스를 전혀 설치하지 않은 경우에는 자유단에서는 물론 론지(Longi)와 론지 사이에서도 용접 변형이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 해석 결과들은 도그피스를 적재적소에 배치함으로써 선체 블록의 정도 품질을 확보하면서도 도그피스의 사용량을 절감할 수 있는 가능성을 보여준다.



[Fig. 11] Comparison of welding deformations

#### 5. 결론

본 연구는 선체 블록의 조인트 용접 시 블록의 정도 품질을 확보하면서 도그피스의 사용량 절감 방안을 마련하기 위한 목적으로 수행되었으며 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일련의 용접 실험을 통하여 도그피스 설치에 따른 용접변형 방지 효과에 대한 정성적 분석과 함께 정량적 데이터를 확보하였다.
- 2) 실험 결과를 토대로 유한요소법에 기초한 열탄소성 해석법을 이용하여 도그피스가 부착된 맞대기 용접 시의 변형 계산 방법을 정립하였다.
- 3) 실험 결과와 비교·검증된 해석 방법을 이용하여 도그피스를 고려한 대형 선체 블록 조인트의 용접변형을 시뮬레이션하였다.
- 4) 제안된 해석 방법은 향후 도그피스 배치도면 작성 및 설치 가이드 작성 등의 실질적인 도그피스 절감 방안을 마련하기 위한 해석 도구로 폭넓게 활용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] J. U. Park, "Prevention and Correction of Welding Deformation", Journal of the Korean Welding Society, 23(4), pp.12-16, 2005.
- [2] H. W. Noh, K. J. Kim, R. S. Leem and H. K. Kim, "A Study on a Development of the Grinding Robot to Remove Welding-bid of Working Pieces", Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp.136-143, 2008.
- [3] D. H. Shin, S. B. Shin and J. S. Lee, "A Study on the Prediction of Welding Distortion and Residual Stress for Channel I Butt SA Weldment Using FE Analysis", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 44(6), pp.598-604, 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2007.44.6.598>
- [4] S. B. Shin, D. J. Lee and D. H. Park, "A Study on the Evaluation of Transverse Residual Stress at the Multi-pass FCA Butt Weldment using FEA", Journal of the Korean Welding and Joining Society, 28(4), pp.380-386, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.4.026>
- [5] 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.
- [6] Koichi Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.
- [7] C. D. Jang, C. H. Lee, "A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 37(2), pp.127-136, 2000.

### 김 호 경(Ho-Kyeong Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2002년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 8월 ~ 2003년 7월 : 서울대학교 조선해양공학과 박사후연구원
- 2003년 8월 ~ 현재 : STX조선해양 기술연구소

<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 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계

### 조 용 진(Yong-Jin Cho)

[정회원]



- 1990년 2월 : 인하대학교 공과대학 선박공학과(공학석사)
- 2005년 8월 : 충남대학교 공과대학 선박해양공학과(공학박사)
- 1994년 7월 ~ 2007년 8월 : 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 선임연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

함정 및 특수선 시스템설계, 설계 최적화, 복사열전달