

드로스 부착 특성을 고려한 절단 정반 크리닝 시스템 개발

김호경¹, 고대은^{2*}

¹STX조선해양 기술연구소, ²동의대학교 조선해양공학과

Development of a Cutting Support Cleaning System considering the Dross Adhesion Characteristics

Ho-Kyeong Kim¹, Dae-Eun Ko^{2*}

¹Research Institute of Technology, STX Offshore & Shipbuilding

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 절단 정반에 드로스가 과도하게 부착되면 강판의 수평 레벨에 차이가 발생하게 되어 절단 정도가 저하되며 절단 과정에서 발생하는 비산먼지, 분진, 흙 등의 집진 효율이 저하되어 작업 환경이 악화된다. 또한, 절단 과정에서 발생하는 철 용융물들이 정반 위로 비산되어 장비 및 제품의 손상이 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 절단 정반에 부착되는 드로스의 제어를 통해 절단 정도 향상, 작업 환경 개선, 장비와 제품의 손상 방지, 절단 정반의 잦은 교체 비용 및 인력과 장비의 유휴 시간 절감 등 생산성 향상에 기여하고자 하였다. 연구 방법으로는 우선, 강판 절단 시 발생하는 철 용융물로 인한 드로스가 정반에 부착되는 특성을 파악하기 위해 일련의 절단 실험을 수행하였다. 실험 결과를 토대로 절단 정반에 부착된 드로스를 효과적으로 제거하기 위한 장비의 개념 설계를 수행하고 사전 테스트를 통해 적용 가능성을 검토하였다. 최종적으로, 상세 설계를 통해 드로스 제거 시스템 및 운용 알고리즘을 개발하였으며 대형 플라즈마 아크 절단 장비에 설치 및 장기간의 현장 테스트를 통해 그 유용성을 확인하였다.

Abstract Accumulated dross adhered to the cutting support degrades the cutting accuracy and aggravates the working environment by reducing the efficiency of the dust collector. Furthermore, the cutting machine and product can be damaged by the scattering of molten metal. In this study, an attempt was made to increase the productivity of steel cutting process and improve the working environment by dross control. The dross adhesion characteristics were investigated by a cutting experiment and the design concept for a dross removal machine was devised. Finally, a cutting support cleaning system and its operating algorithm were developed. The applicability of the developed system was examined and verified by a long-term field test after installation of the plasma arc cutting system of a shipyard.

Key Words : Dross adhesion characteristics, Cutting process, Cutting support cleaning system

1. 서론

강재 절단은 선박 건조를 위한 실제적인 첫 공정으로서 그 결과물인 선체 구조 부재의 절단 품질은 후공정의 생산성에 큰 영향을 미친다. 절단 품질은 열원의 특성, 절단 경로, 순서, 속도 등의 절단 조건 뿐 만 아니라 절단 장비의 성능, 작업 환경 등에 따른 다양한 가공 변수의

영향을 받으며, 절단 형상 및 절단면의 불량은 이후 용접을 통한 조립 공정에서 정도를 맞추기 위한 추가적인 시수와 비용을 초래한다.

선박 건조에는 다양한 두께의 강판에 대한 절단 공정을 필요로 하며, 중·대형 조선소의 경우 빠른 작업 속도, 최대 절단 두께, 높은 절단 정도 등의 이유로 Fig. 1과 같은 대형 플라즈마 아크 절단 장비가 사용된다. 대형 플라

이 논문은 2014학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2014AA012).

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

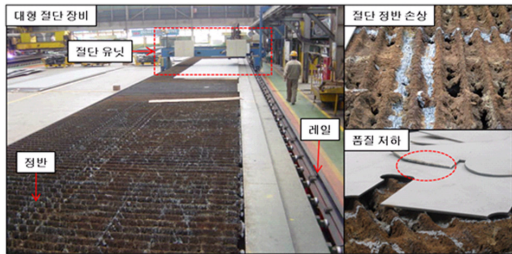
Tel: +82-51-890-2594 email: deko@deu.ac.kr

Received May 8, 2014

Revised June 17, 2014

Accepted October 10, 2014

즈마 아크 절단 장비는 강판을 지지하는 긴 정반, 정반 양쪽으로 배치된 레일, 그 레일을 타고 긴 정반을 오가며 절단 작업을 수행하는 절단 유닛부, 그리고 설계 정보를 받아 절단 유닛을 제어하는 제어부로 구성된다. 절단 작업이 반복적으로 진행됨에 따라 절단 장비의 정반은 강판 세팅 시 발생하는 충격, 절단 열, 철 용융물로 인한 드로스 부착 등으로 인해 손상이 누적되고 작업 환경이 악화된다. 이에 따라 제품의 정도와 절단면 품질이 나빠지고 결국에는 절단 작업을 더 이상 수행할 수 없는 상태가 되어 정반의 교체가 필요하게 되는데, 잦은 정반 교체는 자체의 교체 비용 뿐 만 아니라 절단 장비 및 운용 인력의 유희 시간을 과다하게 발생시켜 생산성 저하의 원인이 된다.



[Fig. 1] Plasma arc cutting machine

가스 절단 방법이 개발된 이래로 플라즈마 아크, 레이저 등 다양한 열원을 이용한 절단 방법이 개발되었고 이에 대해 절단 품질의 확보를 위한 많은 연구가 이루어져 왔으나, 대부분의 연구는 절단 조건의 변화에 따른 절단 현상을 파악하고 양질의 절단면을 얻기 위한 조건을 구하는데 초점이 맞추어져 있다[1-3].

본 연구에서는 절단 품질에 영향을 주는 환경적 요인으로 절단 정반의 상태가 매우 중요하다고 판단하고, 정반 손상의 주 원인인 드로스의 부착 현상에 주목하였다. 드로스의 부착량은 절단 속도 등 절단 조건에 따라 달라지지만 근본적으로 그 발생을 방지하는 것은 불가능하다[1]. 절단 정반에 드로스가 부착되면 피 가공물의 수평 레벨에 차이가 발생하게 되어 절단 정도가 저하되며 절단 과정에서 발생하는 비산먼지, 분진, 흙 등의 집진 효율이 저하되어 작업 환경이 악화된다. 또한, 절단 과정에서 발생하는 철 용융물들이 정반 위로 비산되어 장비 및 제품의 손상이 발생할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 절단 정반에 부착되는 드로스의 제어를 통해 절단 정도 향상,

작업 환경 개선, 장비와 제품의 손상 방지, 절단 정반의 잦은 교체 비용 및 인력과 장비의 유희 시간 절감 등 생산성 향상에 기여하고자 하였다.

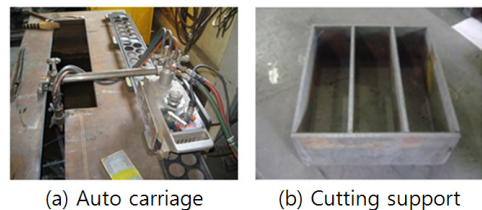
연구 내용으로는 우선, 강판 절단 시 발생하는 철 용융물로 인한 드로스가 정반에 부착되는 특성을 파악하기 위해 일련의 절단 실험을 수행하였다. 실험 결과를 토대로 절단 정반에 부착된 드로스를 효과적으로 제거하기 위한 장비의 개념 설계를 수행하고 사전 테스트를 통해 적용 가능성을 검토하였다. 또한, 상세 설계를 통해 드로스 제거 시스템 및 운용 알고리즘을 개발하였으며 대형 플라즈마 아크 절단 장비에 설치 및 장기간의 현장 테스트를 통해 그 유용성을 확인하였다.

2. 절단 정반의 드로스 부착 특성

2.1 드로스 부착 실험

절단 작업이 반복됨에 따라 정반에 누적되어 부착하는 드로스의 특성을 파악하기 위하여 일련의 절단 실험을 수행하였다. 실험에 대형 플라즈마 아크 절단 장비를 장기간 사용하는 것은 현실적으로 많은 제약이 따르므로 대신 산소-LPG 가스 절단 방법을 이용하였다. 절단 열원의 종류에 따라 드로스의 부착량, 부착 강도 등 그 특성이 다소 차이가 있을 수 있지만 본 실험에서는 그러한 차이보다는 드로스가 정반에 누적 성장하여 부착되는 양상을 파악하는데 중점을 두었다.

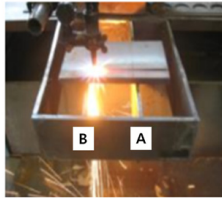
절단 장치로는 Fig. 2(a)와 같이 레일 위를 주행하는 이동식 대차를 이용하여 절단 속도 등 절단 조건을 일정하게 유지할 수 있도록 하였고, 현장에서 사용하는 정반의 날 두께(8mm)와 날 사이의 간격(120mm)을 반영하여 392mm×416mm 크기의 실험용 정반을 Fig. 2(b)와 같이 따로 제작하였다. 실험용 정반의 제작에는 AH36 조선용 강재를 사용하였고 별도의 도장이나 방청 처리는 하지 않았다.



[Fig. 2] Devices for cutting experiment

절단 조건으로는 우선, 절단 속도는 2.5mm/sec로 하였고 절단 토치의 팁과 모재 사이의 간격은 1.0~1.7 mm의 범위 내에서 양질의 절단면을 얻을 수 있도록 조정하였으며 산소-LPG 가스의 압은 6.5bar로 일정하게 유지하였다.

절단 작업이 반복됨에 따라 정반의 인접한 두 날 사이에서 드로스가 부착하여 성장하는 과정을 분석하기 위하여, Fig. 3에 보인 바와 같이 절단 모재를 정반 위에 특별한 구속 없이 올려놓고 동일 지점에서 총 100회의 절단을 실시하였다. 이 때, 1~50회까지는 18mm 두께의 AH36 강판을 절단 모재로 사용하였고 51~100회까지는 26mm 두께의 AH36 강판을 사용하였으며 절단 모재의 길이 즉, 1회당 절단 길이는 300mm이다.



[Fig. 3] Cutting experiment

Fig. 3의 정반 날 A, B에 부착되는 드로스의 길이를 버니어캘리퍼스를 사용하여 절단 10회 마다 측정하였으며 그 결과를 Table 1에 정리하여 보였다. 실험 초기에 중력에 의한 부분적인 드로스 박리 현상이 발생하기도 하였으나 결과적으로는 절단 횟수의 증가에 따라 드로스가 계속 성장하였고 80회 이후로는 부착된 드로스에 의해 두 정반 날이 연결되었다. 참고로, 10회, 50회, 100회 절단 후의 드로스 부착 상태를 Fig. 4에 보였다. 실험 과정에서 모재의 절단면을 확인한 결과, 초기에는 양호한 품질을 보였으나 드로스가 누적하여 두 정반 날 사이를 메운 후에는 절단면의 아래 부분에 불량이 발생하였다. 또한, 100회의 반복 절단을 마친 후 드로스를 제거하고 정반 날의 상태를 확인한 결과 부분적인 절단에 의한 좁고 깊은 홈이 발견되었다.

[Table 1] Length of dross after n times cutting [mm]

n	10	20	30	40	50	60	70	80
A	24	42	26	63	81	106	118	230
B	34	21	41	113	110	132	160	230

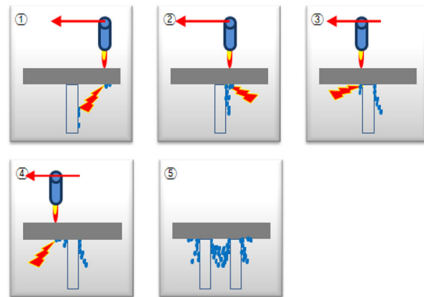


[Fig. 4] Cutting support after repeated cutting

2.2 드로스의 부착 특성

앞 절의 드로스 부착 실험을 통하여 초기의 깨끗한 절단 정반의 상태에서부터 모재의 절단 품질에 지장을 줄 정도까지 어떤 과정을 거쳐 손상이 누적되는지 확인할 수 있었으며, 이러한 절단 정반의 드로스 부착 과정을 Fig. 5에 알기 쉽게 표현하였다. 그림에서 위쪽의 검은 사각형은 절단모재, 아래의 빈 사각형은 정반 날, 번개 모양은 불꽃이 튀는 방향을 나타내며 각 단계를 설명하면 다음과 같다.

- ① 절단 토치 진행 방향의 앞쪽으로 철 용융물이 날리게 되며, 작은 물방울 형태로 정반 날에 달라붙는다.
- ② 절단 토치가 정반 날 바로 위로 진입할 때 철 용융물은 뒤쪽으로 날리며 정반 날을 따라 흘러내리다 응고한다.
- ③ 절단 토치가 정반 날을 통과하면서 모재와 함께 정반 날도 부분적으로 절단되며 이 때 정반 날의 뒷부분으로 약간의 철 용융물이 흐른다.
- ④ 절단 토치가 정반 날을 통과하고 나면 다시 절단 토치의 진행 방향 앞쪽으로 철 용융물이 날린다.
- ⑤ 절단이 완료되면 철 용융물이 냉각되면서 정반 날과 강한 결합을 하게 되며, 절단 작업이 반복 될수록 드로스는 더욱 성장하여 결국에는 정반 날과 날 사이를 메우게 된다.



[Fig. 5] Formation of dross by cutting process

절단 작업에 의한 철 용융물의 발생량은 1회의 절단 작업마다 일정량이 발생하는 것으로 생각할 수 있으나, 이와는 달리 드로스의 성장은 일정 크기 이상에서 급속도로 진행되는 특징이 있음을 확인하였다. 이로부터 절단 정반의 교체 없이 모재의 절단 품질 수준을 유지하기 위해서는 드로스가 급격히 성장하기 전에 제거하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3. 절단 정반 크리닝 시스템

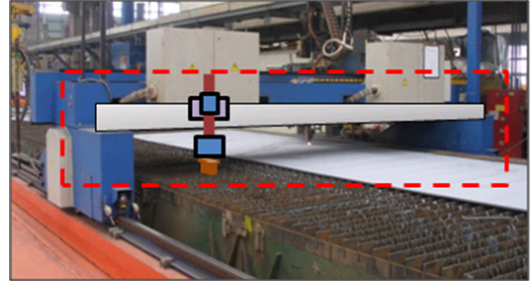
3.1 개념 설계

조선소에서 사용하는 대형 절단 장비의 정반은 Fig. 1에 보인 바와 같이 크기가 크고 촘촘하게 배치된 많은 수의 정반 날로 구성되어 있기 때문에 정반 날 사이사이에 부착된 드로스를 작업자가 인력으로 제거하는 것은 매우 힘들고 어려우며 근골격계 질환 및 각종 안전사고의 위험이 따른다.

이러한 문제를 극복하기 위해서는 안전하고 효과적으로 드로스 제거 작업이 가능한 절단 정반 크리닝 시스템이 필요하며 시스템이 갖추어야 할 기본 조건으로 다음 사항들을 고려하였다. 우선, 드로스 제거 장비는 정반 전체 범위에서 작동해야하므로 절단 유닛부처럼 정반 양쪽으로 배치된 레일을 타고 이동 가능해야 하며 절단 유닛부의 절단 작업과 간섭이 일어나지 않도록 설치 및 작동하여야 한다. 또한, 정반 날에 추가적인 손상을 주지 않으면서 정반 날 사이사이의 드로스를 효과적으로 제거할 수 있는 툴을 장착해야 한다. 마지막으로, 사용자의 설정을 통해 원하는 횟수 또는 범위만큼 자동으로 작업을 수행할 수 있는 운영 알고리즘을 갖추어야 한다.

상기의 기본 요구 조건들을 만족하도록 드로스 제거 자동화 시스템의 개념 설계를 수행하고 그 구상도를 Fig. 6에 보였다. 절단 유닛부 뒤편의 별도 공간에 설치되어 절단 작업에 방해가 되지 않으면서 정반의 종방향으로 이동이 가능하고, 정반 날과 평행하게 정반의 횡방향으로 이동 가능한 드로스 제거 툴을 장착하고 있다. 정반 날에 충격을 가하거나 직접 접촉하여 슬라이딩하는 치구를 이용하여 드로스를 제거하는 방식의 경우 정반 날에 추가적인 손상 뿐 아니라 안전상의 위험도 발생할 수 있으므로[4] 본 연구에서는 회전 모터에 의해 구동되는 브러시를 드로스 제거 툴로 채택하였다. 회전체의 폭을 조

절함으로써 정반 날의 추가적인 손상 없이 정반 날 사이 두 면의 드로스를 동시에 제거하는 것이 가능하다.

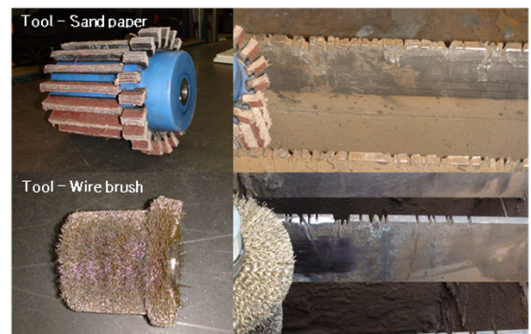


[Fig. 6] Concept of dross cleaning system

드로스 제거 장비 제작을 위한 상세 설계에 앞서 개념 설계의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 7과 같이 사전 테스트를 실시하였다. 툴 구동 모터의 용량 및 회전수는 각각 1150W, 6800rpm으로 하였으며 브러시 타입은 샌드페이퍼와 와이어브러시 두 가지에 대해 테스트하였다. 테스트 결과, Fig. 8에 보인 바와 같이 브러시의 재질에 따라 다소 경향의 차이는 있지만 1회의 주행으로 절단 정반에 부착된 드로스의 90% 이상이 제거되었으며 이로써 장비 개념 설계의 타당성을 확인하였다.



[Fig. 7] Pre-test



[Fig. 8] Result of pre-test

3.2 자동화 시스템 구현

사전 테스트 결과를 바탕으로 상세 설계와 3D 모델링 검토를 수행하여 Fig. 9와 같이 드로스 제거 장비를 제작하였다. 드로스 제거 장비는 절단 정반에 부착된 드로스를 직접적으로 제거하는 톨 구동부와 톨 구동부의 이송을 담당하는 이송 모듈 그리고 사용자의 설정에 따라 장비를 제어하는 제어부로 구성되며, 톨 구동부의 상하 이동 1축, 톨 구동부의 좌우 이동 1축, 톨 회전 1축으로 도합 주행 2축과 회전 1축으로 구성하여 톨의 상하좌우 이동과 회전이 가능하도록 하였다. 드로스 제거 장비의 정반 길이 방향 이동은 특별히 제작한 인터페이스 보드를 통해 기존의 절단 장비 주행 모터를 이용하도록 하였다. 또, 드로스 제거 장비의 전자동 구동을 위해 센서를 사용하여 절단 정반을 인식하도록 하였으며, 절단 정반의 변형에 대응하고 톨의 사용 효율을 높이기 위해 에어 실린더를 사용하여 톨이 작업 지점에 정확히 밀착하도록 기구부를 구성하였다.

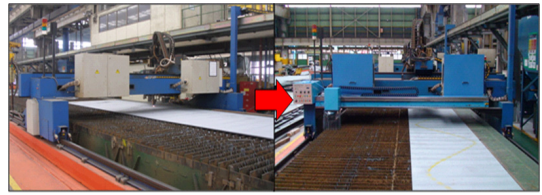


[Fig. 9] Dross cleaning system

드로스 제거 장비는 사용자가 초기 위치와 작업 범위를 설정하면 전자동으로 드로스 제거 작업을 수행하도록 다음과 같은 알고리즘으로 운영 프로그램을 작성하였다. 사용자가 드로스 제거 작업을 수행하고자 하는 작업 지점에서 버튼 조작을 통해 장비 초기 위치 설정 명령을 하면 드로스 제거 장비는 센서를 이용하여 절단 정반을 인식하고 작업 시작 지점을 설정한다. 작업 시작 지점이 완료되면 사용자가 입력한 작업 범위만큼 회전하는 톨이 절단 정반을 따라 주행하면서 드로스 제거 작업을 수행하며, 이 과정에서 절단 정반의 중부재와 같은 장애물이 센서에 걸릴되면 톨이 상승-주행-하강하여 장애물을 회피하면서 드로스 제거 작업을 수행한다.

4. 현장 적용 테스트 및 결과

드로스 제거 장비의 제작 후 각종 테스트를 통해 기구부의 내구성, 센서의 신뢰성, 프로그램의 신뢰도를 확인하였다. 다음 단계로 장비의 현장 적용성을 검증하기 위해 Fig. 10에 보인 바와 같이 실제로 조선소의 대형 플라즈마 아크 절단 장비에 설치하여 6개월간 현장 테스트를 진행하였다. 드로스 제거 장비를 설치한 대형 플라즈마 아크 절단 장비는 400A 용량으로 최대 절단 두께가 50mm이고 최고 절단 속도는 35m/min인 장비이다. 절단 정반은 현장 테스트 시작 시점에 새로 교체 되었으며 종방향 길이는 72m, 횡방향 길이는 3.8m이고 절단 정반을 구성하는 날의 두께는 10mm, 날과 날 사이의 간격은 115mm이다.



[Fig. 10] Installed dross cleaning system

절단되는 강판은 조선용 강재로 생산일정에 따라 월 평균 약 400장이 절단되고 있었다. 드로스 제거 장비의 현장 테스트는 동종의 절단 장비 2대가 운용되는 절단 정반에서 각각의 절단 장비가 운용되는 영역을 구역 A, B로 구분하여 6개월 동안 구역 A에서는 절단 작업만 수행하고 구역 B에서는 절단 작업과 함께 2주마다 드로스 제거 장비를 운용하여 드로스 제거 작업을 수행하는 방식으로 진행하였다.

현장 테스트를 수행한 결과, 시일이 경과하면서 드로스 제거 장비의 운용 여부에 따라 드로스 부착 양상의 차이가 확연하게 나타났다. Fig. 11은 현장 테스트를 종료한 시점에서 A, B 두 구역의 절단 정반 상태이다. 절단 작업만 수행된 구역 A에서는 절단 작업이 반복됨에 따라 절단 정반 전체 영역에 걸쳐 드로스가 과도하게 부착되는 현상이 발생하였다. 정반 날 사이가 드로스로서 완전히 메워진 부분에서 절단 잔재가 정반 아래로 떨어지지 못해 절단 장비가 손상된 경우도 발생하였으며 철 용융물의 비산으로 인한 강재 손상과 절단 정도 불량 및 집진 불량이 발생하였다. 반면, 드로스 제거 장비가 적용된 구

역 B에서는 절단 정반이 비교적 깨끗한 상태로 유지되어 작업 환경이 악화되거나 절단 정도 불량 및 집진 불량이 발생하지 않았다.



[Fig. 11] Result of field test for 6 months

5. 결론

본 연구는 절단 공정에서 정반 손상의 주 원인이 되는 드로스의 부착 현상을 파악하고 이의 제어를 통한 절단 품질의 확보 및 생산성 향상을 목적으로 수행하였으며 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일련의 절단 실험을 통하여 광판 절단 시 발생하는 드로스의 생성 과정 및 부착 특성을 파악하였다. 정반 날에 부착하는 드로스는 초기에는 일정하게 성장하였으나 일정 크기 이상이 되면 인접한 날에 부착된 드로스와 서로 연결되면서 급속도로 성장하는 특징을 보였다.
- 2) 절단 정반에 부착된 드로스는 급격히 성장하기 전에 제거하는 것이 효과적이며 이를 위한 장비의 개념 설계를 수행하고 사전 테스트를 통해 타당성을 검토하였다.
- 3) 사전 테스트 결과를 토대로 절단 정반 크리닝 시스템 및 운용 알고리즘을 개발하였으며 대형 플라즈마 아크 절단 장비에 설치 및 장기간의 현장 테스트를 통해 그 유용성을 확인하였다.

References

- [1] K. W. Um, D. J. Kim, "A Study on the Plasma Arc Cutting Phenomena of Plate Materials", Journal of the Korean Welding Society, 9(4), pp.69-74, 1991.
- [2] I. C. Kim, S. I. Kim, "A Study on the Cutting Characteristics of AH36 Steel Plate Under Various Cutting Conditions", Journal of the Korean Welding Society, 21(2), pp.133-138, 2003.
- [3] M. H. Kim, S. I. Kim, "A Study on the Cutting Surfaces in Plasma Cutting of Ship Thick Plate", Proceeding of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp.573-574, April, 2011.
- [4] Y. C. Woo, H. J. Kim, "A Study on the Evaluation Method for Slag Detachability", Journal of the Korean Welding Society, 5(1), pp.57-63, 1987.

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