

PSPC 적용을 위한 모서리 밀링 자동화 시스템 개발

유현수¹, 박일환*, 고대은³, 김호경⁴

¹창원대학교 산업조선해양공학부, ²창원대학교 기계공학부, ³동의대학교 조선해양공학과, ⁴목포대학교 조선해양공학과

Development of Edge Milling Automation System for PSPC Application

Hyun-Su Ryu¹, Il-Hwan Park*, Dae-Eun Ko³, Ho-Kyeong Kim⁴

¹Dept. School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon University

²Dept. of Mechanical Engineering, Changwon University

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

⁴Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

요약 국제 해사 기구의 선체 보호 도장 기준이 의무화됨에 따라 조선소에서는 칼라 플레이트의 모서리 부분에 대해 2R 또는 3-pass 밀링 가공을 수행해야 한다. 그러나 기존 수작업 방식에 의존하고 있는 상황에서 2R 또는 3-pass 밀링 가공을 수행한다면 작업 환경 및 생산성 측면에서 많은 문제점이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 규정을 만족할 수 있는 모서리 밀링 자동화 시스템을 개발하여 이러한 문제점을 해결할 필요가 있다. 본 연구에서는 표준 칼라 플레이트를 대상으로 모서리 밀링 자동화 시스템 기본 설계를 수행하였고, 형상 인식 및 가공 경로 생성 알고리즘을 적용하여 가공 프로세스를 정립하였다. 또한, 운영 소프트웨어를 구축하고, 전용 가공 툴을 제작하여 밀링 테스트를 수행한 결과를 토대로 적합한 밀링 가공 조건을 도출하였다. 향후, 본 연구를 통해 개발된 모서리 밀링 자동화 시스템을 조선소에 도입하여 현장 테스트를 수행하고, 그 결과를 토대로 상용화 연구를 진행한다면 선체 보호 도장 기준을 충족할 수 있는 자동화 시스템을 구축함과 동시에 생산성 향상을 기대할 수 있다.

Abstract The International Maritime Organization has enacted mandatory performance standards for protective coatings (PSPC), and as a result, shipyards must perform 2R or 3-pass milling on the edges of color plates. However, manual milling could result in many problems in terms of work environment and productivity. Therefore, it is necessary to develop an edge milling automation system that can satisfy the regulations. In this study, a basic design for an edge milling automation system was developed for standard color plates, and the machining process was established by applying shape recognition and a machining path generation algorithm. In addition, operating software was developed, and suitable milling conditions were derived based on the results of a milling test. The results could be used to build an automation system that meets the PSPC requirements and improve productivity.

Keywords : Automation, Edge milling, Hough transformation, PSPC, Standard collar plate

1. 서론

국제 해사 기구(IMO, International Maritime

Organization)는 선체 부식을 최소화하여 구조 안전성을 향상시키기 위한 목적으로 선체 보호 도장 기준(PSPC, Performance Standards for Protective Coatings)을 의무

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

*Corresponding Author : Il-Hwan Park(Changwon Univ.)

Tel: +82-55-213-3682 email: hanahwan@gmail.com

Received February 21, 2018

Revised (1st March 8, 2018, 2nd March 15, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

화하였다. PSPC는 500GT 이상의 새롭게 건조되는 모든 선박의 평형수 탱크(Water Ballast Tank)와 선박 전체 길이가 150m 이상인 벌크 화물선(Bulk Carrier)의 이중 선체(Double Hull) 구조에 적용된다. 그런데, PSPC 적용을 위해서는 선체 표면 전처리, 도료 선정, 도장 공정, 도장 검사 등 관련 분야의 여러 기술적 이슈를 효과적으로 해결해야만 한다[1]. 특히, 선체 표면 전처리 분야의 경우, Fig. 1과 같이 평형수 탱크 내부에 설치되는 표준 칼라 플레이트(Standard Collar Plate)의 날카로운 모서리 부분을 최소 반경 2mm(2R)의 둥근 형상으로 만들거나, 모서리에 대해 3-pass 밀링(Milling) 가공을 실시해야만 하는 기술적 이슈가 있다[2].



Fig. 1. Standard collar plates

대부분의 조선소에서는 칼라 플레이트의 모서리 밀링 작업을 일반 그라인더를 사용하는 수작업에 의존하고 있고, 대부분 1-pass 작업만 수행하고 있는 실정이다. 때문에 기존 방식으로 PSPC의 2R 또는 3-pass 규정을 만족하기 위해서는 작업 강도가 현저히 증가하여 작업자의 근골격계 질환 발생이 우려되고, 이로 인해 전처리 품질도 저하될 가능성이 높다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 수작업 방식이 아닌 완전 자동화 또는 부분 자동화 방식의 모서리 밀링 시스템을 개발하여 적용해야 한다. 한편, 밀링 가공 자동화 관련 연구는 크게 밀링 툴(Tool) 자체의 절삭력 및 절삭 조건과 관련된 분야와 가공 경로 생성 및 최적화 관련 분야로 구분할 수 있다. 주정훈 등[3]은 정면 밀링 가공에서의 절삭력 예측을 위한 수학적 모델을 정립하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 절삭 실험을 수행하였다. 그 결과, 다양한 조건에서의 정면 밀링 절삭력을 예측할 수 있음을 확인하였다. 김용선 등[4]은 기존 공작 기계를 사용하는 밀링 가공 공정에서 복합 실험 계획법을 이용해 최적 절삭 조건을 결정하기도 하

였다. 가공 경로 생성 및 최적화 관련 연구로는 왕명하이 등[5]이 수행한 절삭 경로 기반 가공 시뮬레이션 및 실험 연구 등이 있다. 이 연구에서는 항공기 블레이드 박판 부품을 대상으로 다양한 밀링 가공 절삭 경로에 대한 시뮬레이션 및 밀링 실험을 통해 부품들의 응력 분포와 변형 형상을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 선행 연구들은 상용 밀링 공작 기계 또는 기존 실험 장치를 기반으로 하고 있으며 가공 툴의 절삭력, 절삭 조건, 절삭 경로와 같은 심화 연구 주제에 중점을 두고 있다. 따라서 칼라 플레이트와 같은 다양한 형상의 모서리 밀링 작업을 자동화하고 PSPC 규정을 만족하기 위해서는 새로운 형태의 밀링 자동화 시스템 개발이 시급히 요구된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 표준 칼라 플레이트를 대상으로 모서리 밀링 자동화 시스템 기본 설계를 수행하였고, 형상 인식 및 가공 경로 생성 알고리즘을 적용하여 가공 프로세스를 정립하였다. 또한, 운영 소프트웨어를 개발하여 자동화 시스템의 조건을 갖추었으며, 전용 가공 툴을 사용하여 밀링 테스트를 수행한 결과를 토대로 적합한 밀링 가공 조건을 도출하였다.

2. 본론

2.1 모서리 밀링 자동화 시스템 설계

2.1.1 가공 대상 및 가공 기준

본 연구의 밀링 가공 대상인 표준 칼라 플레이트의 크기는 길이 100~500mm, 폭 100~400mm, 두께 7~25mm의 범위를 갖는다. 대표적인 표준 칼라 플레이트의 형상은 Fig. 2와 같고, Fig. 3은 가공 기준이 되는 2R 또는 3-pass 규정을 도식화한 것이다.

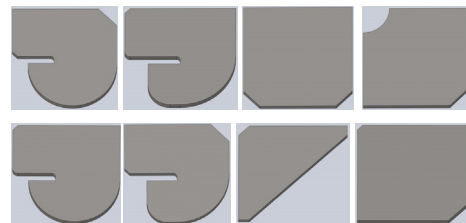


Fig. 2. Shapes of standard collar plate

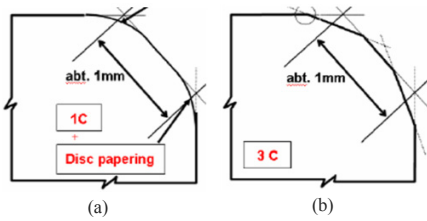


Fig. 3. Grinding criteria of standard collar plates (a)2R criteria (b)3-pass criteria

2.1.2 기구부 설계

칼라 플레이트 모서리의 2R 또는 3-pass 규정을 만족하기 위한 밀링 자동화 시스템의 기구부는 크게 칼라 플레이트를 고정할 수 있는 클램핑(Clamping) 모듈, 가공을 위한 고속 스핀들(Spindle) 모듈, 가공 경로를 따라 고속 스핀들을 이동시킬 수 있는 구동 모듈로 구분할 수 있다. 클램핑 모듈은 다양한 두께의 칼라 플레이트를 고정할 수 있도록 상부 지그(Jig)와 하부 지그로 나누어 구성되어 칼라 플레이트를 배치시킬 수 있다. 상부 지그는 유압실린더를 이용하여 가압시키고 하부 지그에는 전자석을 이용하여 고정함으로써 안정적으로 칼라 플레이트를 고정할 수 있다. 고속 스핀들 모듈은 가공 툴을 직접 회전시키는 모듈이며, 회전 속도 n 이 1,000~10,000[rpm]의 범위에서 작동할 수 있도록 구성하였다. 이 때, 절삭 속도 v_c 와 이송 속도 v_f 는 다음 식(1)과 식(2)와 같이 각각 구할 수 있다.

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1,000} \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

$$v_f = f_z \times n \times z \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

여기서 공구 직경 $D=20[\text{mm}]$, 날당 이송량 $f_z=20[\text{mm/teeth}]$, 날의 개수 $z=4[\text{teeth}]$ 이고, 스핀들의 회전 속도 범위 내에서 식(1)과 식(2)를 사용하여 주어진 회전 속도 n 에 따른 가공 툴의 절삭 속도 및 이송 속도를 계산할 수 있다. 구동 모듈은 칼라 플레이트의 모서리를 가공하기 위해 Fig. 4와 같이 X축, Y1축, Y2축, Z1축, Z2축으로 구성된다. Y1과 Y2는 갠트리(Gantry) 동기 구동 구조로 되어 있으며, Z1축은 가공 툴의 높이 조절, Z2축은 형상 인식용 카메라의 자동 초점 조절을 위해 구성된다. 카메라는 칼라 플레이트의 형상을 측정하기 위한 용

도로 사용되며 2,400×2,050[pixel]의 고해상도를 가지고 더 높은 정도를 얻기 위해 백라이트 조명을 사용할 수 있도록 설계되었다.

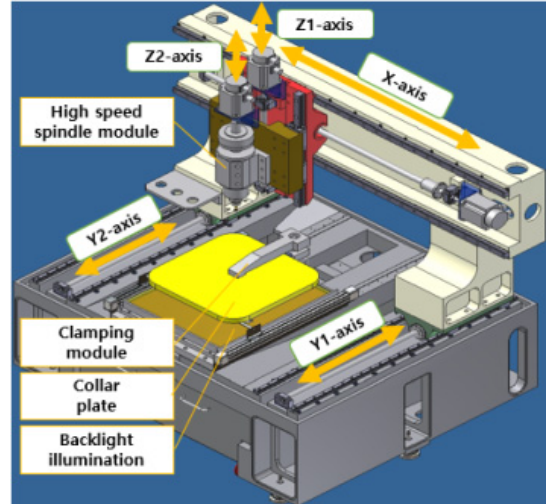


Fig. 4. Concept of automatic edge milling system

2.1.3 제어부 설계

컴퓨터 기반 모션 제어기는 크게 CPU 및 모터에 지령을 주거나 피드백을 받는 서보 IC(Servo Integrated Circuit)로 구성된다. CPU는 와치독 타이머(Watchdog Timer)를 이용하여 제어 루틴의 이상 동작으로 인한 무한 루프를 복구하고, 오버 트래블 리미트 스위치(Over Travel Limit Switch)를 이용하여 장비 구동 중에 시스템이 동작 리미트(Operating Limit)를 초과할 경우 전원을 차단시켜 하드웨어를 안정적으로 보호함으로써 전체 시스템이 최상의 상태를 유지할 수 있도록 한다. 서보 IC는 2개로 구성되고 각 서보 IC는 총 4개의 축을 제어할 수 있는데, 서보 IC로부터 아날로그 지령을 각 축의 DC 서보 드라이브로 전송하여 구동시킬 수 있다. 또한, 정밀 동작을 위해 모터의 회전량을 검출하는 엔코더(Encoder)의 피드백 신호를 활용하여 폐루프 제어(Closed Loop Control)를 구현하였다. 기존 제어 시스템에서는 구동 동기화를 위해 제어 방식을 직렬(i.e. Master-slaved Motion Control) 또는 병렬(i.e. Main-main Motion Control) 방식으로 설정한다[6]. 그러나 이와 같은 제어 방식은 동기 오차(Synchronous Error)가 발생할 수 있기 때문에 고정밀도 및 고속화가 요구되는 갠트리 시스템에는 적용하기가 어려운 상황이다. 따라서

모서리 밀링 자동화 시스템의 Y1축과 Y2축의 동기 구동을 위해 교차 커플링 제어(Cross-coupling Control) 방식[7]을 사용하여 양쪽 제어 루프의 피드백 정보를 서로 공유할 수 있도록 Fig. 5의 블록 다이어그램과 같이 교차 커플링 제어 방식을 적용하였다.

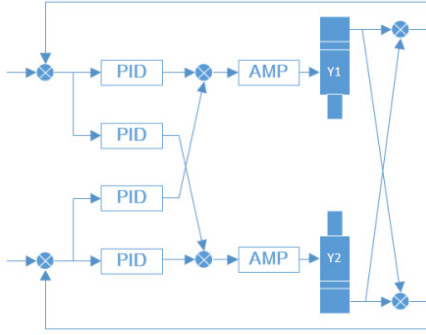


Fig. 5. Block diagram of cross-coupling control

2.2 모서리 밀링 가공 알고리즘

2.2.1 가공 프로세스

모서리 밀링 가공 자동화 시스템의 가공 프로세스는 Fig. 6과 같이 구성된다.

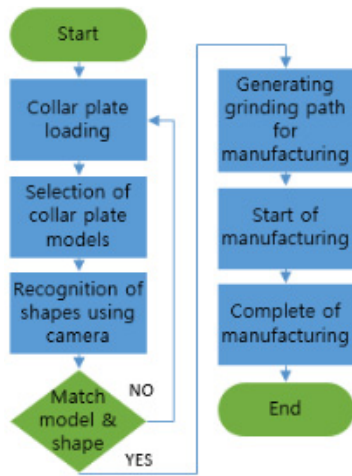


Fig. 6. Manufacturing process

먼저, 칼라 플레이트를 클램핑 모듈에 로딩 후 데이터베이스에서 칼라 플레이트 모델을 선택한다. 선택된 칼라 플레이트 정보는 카메라로 인식된 칼라 플레이트 정보와 비교하여 형상 일치 여부를 판단하는데, 형상 일치 여부는 칼라 플레이트의 길이, 폭, 두께 정보를 토대로 판단할 수 있다. 이와 같이 형상 일치 여부를 사전

에 판단해야 하는 이유는 칼라 플레이트 모서리 중 밀링 가공이 반드시 필요한 도장 구간과 밀링 가공이 필요하지 않은 용접 구간을 구분하여 최종 밀링 가공 경로를 생성하기 위해서 해당 칼라 플레이트의 도장 및 용접 설계 정보를 정확히 선택하여 가공 경로에 반영해야 하기 때문이다. 칼라 플레이트 형상이 일치되었다고 판단되면 도장 구간과 용접 구간이 반영된 가공 경로를 자동으로 생성하여 밀링 가공이 시작된다. 끝으로 밀링 가공이 완료된 후에는 가공 툴을 원점으로 복귀시키고 작업을 종료한다.

2.2.2 형상 인식 및 가공 경로 생성 알고리즘

칼라 플레이트의 형상을 인식하기 위해서는 먼저 카메라로 촬영된 이미지를 8비트의 흑백(Gray Scale) 이미지로 변환해야 한다. 그리고 칼라 플레이트의 모서리를 검출하기 위해서 일반적으로 활용되는 소벨 연산자(Sobel Operator)[8]를 사용하였다. 소벨 연산자는 Fig. 7에 보인 바와 같이 3×3 정방 행렬의 소벨 마스크(Sobel Mask)를 통해 연산하는데, 중심 픽셀을 기준으로 x축과 y축 방향의 변화량을 감안하여 모서리를 검출하는 방식이다.

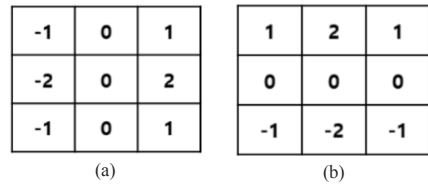


Fig. 7. Sobel masks (3×3) (a)X filter (b)Y filter

Fig. 8은 카메라로 촬영한 칼라 플레이트의 이미지를 흑백으로 변환한 이미지와 흑백 이미지를 토대로 소벨 연산자를 사용해 모서리를 검출한 결과를 보여주고 있다.

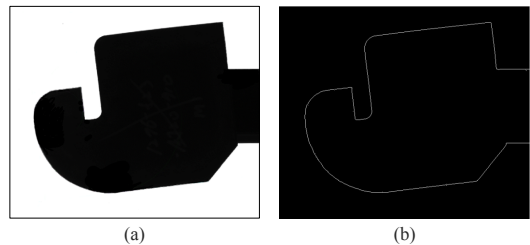


Fig. 8. Edge detection result from gray scale image (a)Gray scale image (b)Edge detection image

한편, Fig. 8(b)와 같이 검출된 칼라 플레이트의 모서리 이미지를 바탕으로 허프 변환(Hough Transformation)[9]을 통해 직선 또는 원 정보를 추출하여 최종 가공 경로를 생성할 수 있다. 직선 정보의 경우, 검출된 한 개의 점을 지나는 무수히 많은 직선에 대해 다음 식(3)과 같이 각 직선(기울기 a , y절편 b)이 x 축과 이루는 각도 θ 와 원점에서 직선까지의 최단 거리 r 로 표현되는 함수로 변환하여 허프 공간(Hough Space)에 표시한다.

$$y = ax + b \rightarrow r = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (3)$$

허프 공간(r, θ)에 표시된 곡선들 중 교차하는 곡선들을 찾으면 그 곡선들에 해당하는 점들은 하나의 직선 위에 놓여 있음을 알 수 있고, 이 직선은 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 검출되어 칼라 플레이트 이미지와의 비교를 통해 모서리 가공 경로 생성에 필요한 직선인지의 여부를 판단할 수 있다. 원 정보의 경우, 식(4)와 같이 주어진 범위 내의 반경(R)과 모서리 이미지에서 검출된 점 좌표(x, y)를 중심점으로 하는 원들을 생성할 수 있는데, 생성된 원들의 교차 빈도수가 높은 좌표(a, b)를 찾아 이 점을 모서리 원 형상의 중심점으로 설정함으로써 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 유효한 원 정보를 추출할 수 있다.

$$x = a + R \cos(\theta), \quad y = b + R \sin(\theta) \quad (4)$$

허프 변환을 통해 추출된 직선과 원은 각각의 교차점을 생성하게 되며, 각 구간은 선택된 표준 칼라 플레이트의 정보를 바탕으로 Fig. 10과 같이 도장이 이루어지는 밀링 가공 구간과 용접이 이루어지는 비가공 구간으로 정의되어 밀링 가공 구간에 해당하는 점 좌표를 1차 가공 좌표로 생성한다. 이 후 직선과 직선이 교차하는 지점에는 2R 가공이 수행될 수 있도록 가공 좌표가 추가되며, 직선과 원이 교차하는 지점에는 한 점에서 교차하는 경우와 두 점에서 교차하는 경우를 구분하여 추가적으로 가공 좌표가 생성되도록 구현하였다. 또한, 원의 크기에 따라 원을 2개 또는 3개로 균등 분할하여 가공 좌표를 추가로 생성함으로써 가공 정도를 향상시킬 수 있다.

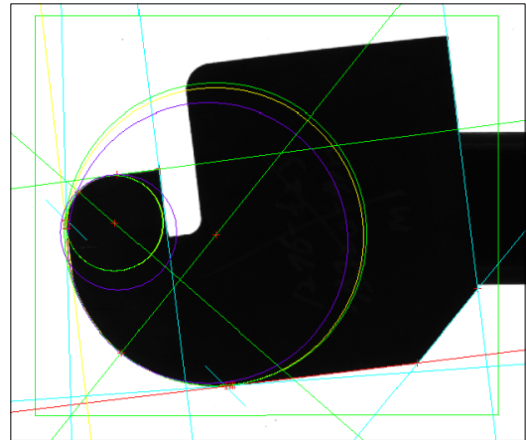


Fig. 9. Line and circle detection

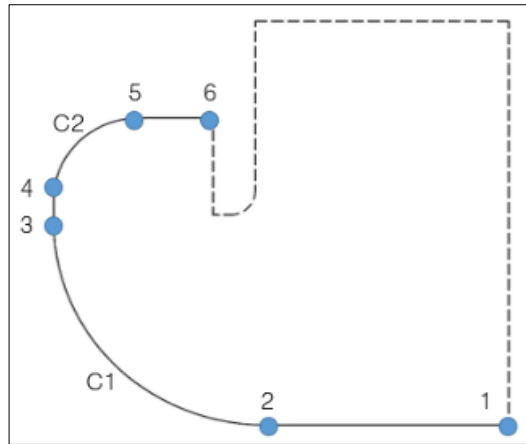


Fig. 10. Extraction of manufacturing coordinates

본 연구에서 개발한 형상 인식 및 가공 경로 생성 알고리즘을 정리하면 다음 Fig. 11과 같다. 본 알고리즘은 고해상도 카메라를 이용하여 칼라 플레이트의 형상을 인식하고 인식된 형상을 토대로 허프 변환 및 밀링 가공 경로를 단계적으로 생성함으로써 개별 칼라 플레이트의 특징을 고려한 밀링 가공을 구현할 수 있다. 아울러 절단 가공이 완료된 칼라 플레이트 형상 정보를 직접 사용하기 때문에 절단 가공 시 발생할 수 있는 가공 오차를 모서리 밀링 가공 시 자동으로 해결할 수 있다는 장점을 지닌다.

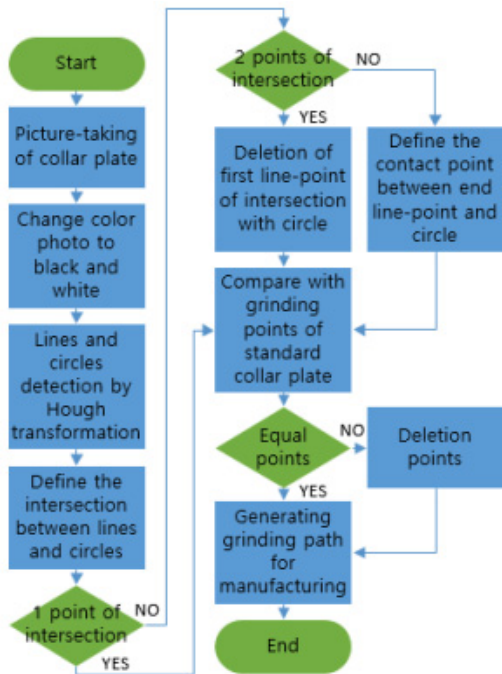
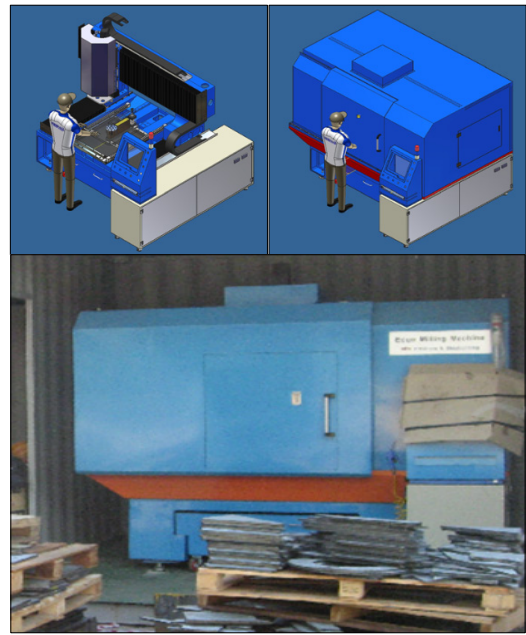


Fig. 11. Algorithm of shape detection and milling path generation for collar plates

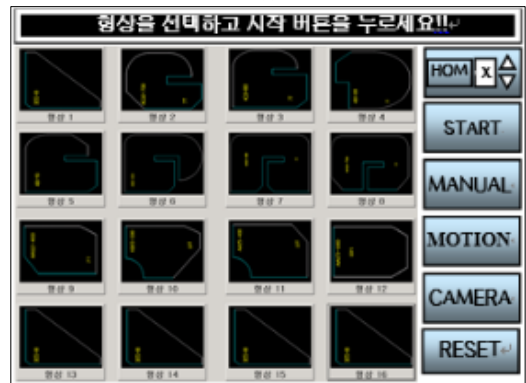
2.3 운영 소프트웨어 개발 및 밀링 테스트

2.3.1 운영 소프트웨어 개발

칼라 플레이트 모서리 밀링 자동화 시스템은 크게 스펀들 제어를 위한 제어 프로그램과 가공 정보를 생성하는 비전 프로그램으로 구분할 수 있다. 먼저, 제어 프로그램은 비전 프로그램에서 생성된 가공 데이터를 바탕으로 모션 프로그램을 생성하고 각종 입출력의 시퀀스와 원점 복귀(Homing)를 처리하는 PLC 프로그램과 교차커플링 제어 프로그램으로 구성된다. 한편, 비전 프로그램은 칼라 플레이트의 형상을 인식하고 생성된 가공 좌표와 선택된 표준 칼라 플레이트 정보를 서로 비교하여 각각의 거리 정보를 추출하고 이동 궤적을 계산함으로써 최종 가공 데이터를 생성한다. Fig. 12는 실제 현장에 설치된 모서리 밀링 가공 자동화 시스템과 HMI(Human Machine Interface)를 보여주며, 작업자는 본 연구를 통해 개발된 모서리 밀링 자동화 시스템과 운영 소프트웨어를 통해 직관적으로 손쉽게 칼라 플레이트의 모서리 가공 작업을 수행할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 12. Automatic edge milling system and HMI

(a) Automatic edge milling system (b) HMI

2.3.2 모서리 밀링 전용 툴 테스트

모서리 밀링 자동화 시스템에 탑재되는 밀링 전용 툴의 개략적인 형상 및 가공 순서는 Fig. 13과 같다. 전용 툴은 초경으로 특수 제작되었으며, 칼라 플레이트의 하부 모서리를 먼저 가공한 후 칼라 플레이트의 두께만큼 Z축으로 툴을 상승시켜 상부 모서리를 가공한다. 한편, 전용 툴은 상부 가공 날 방향과 하부 가공 날 방향을 서로 반대로 형성하여 툴의 회전 방향을 변경할 필요 없이 상부와 하부 모서리를 손쉽게 가공할 수 있도록 설계되었다.

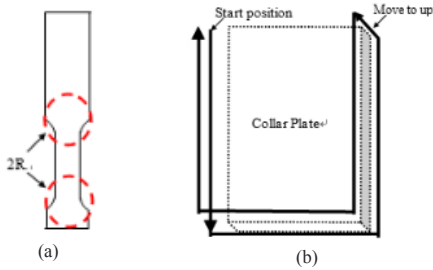


Fig. 13. Milling tool shape and milling sequence
(a)Milling tool shape (b)Edge milling sequence

이와 같은 전용 툴과 가공 경로를 바탕으로 칼라 플레이트 모서리의 우수한 가공 품질을 얻기 위해 가공 툴의 회전 속도(n)와 이송 속도(v_f)를 가공 인자로 선정하여 밀링 테스트를 수행하였다. 테스트는 건식 절삭 방법으로 진행되었고 결과는 Table 1과 같다. 육안 검사를 통해 Case 4, 5, 6에서 밀링 가공 품질이 상대적으로 우수함을 확인하였고 툴의 진동 상태 역시 비교적 양호한 것으로 평가되었다. 따라서 자동화 시스템에 탑재되는 가공 툴의 효과적인 회전 속도와 이송 속도의 범위를 각각 4,800~6,400[rpm]과 3,600~4,800[mm/min]로 도출하였다.

Table 1. Test results according to milling parameters

Case no.	Rotating speed[rpm]	Feed rate [mm/min]	Result
1	1,600	1,200	
2	3,200	1,200	
3	6,000	2,400	
4	4,800	3,600	
5	6,400	3,600	
6	6,400	4,800	
7	8,000	4,800	
8	10,000	6,000	

3. 결론

본 연구에서는 국제 해사 기구의 선체 보호 도장 기준이 의무화됨에 따라 강화된 모서리 밀링 기준을 효과적으로 충족하기 위해 표준 칼라 플레이트를 대상으로 모서리 밀링 자동화 시스템을 개발하였다. 모서리 밀링 작업을 자동으로 수행할 수 있는 기구부를 설계하고 기구부를 제어하기 위한 제어부를 구성하였으며, 형상 인식 및 가공 경로 생성 알고리즘을 토대로 모서리 밀링 가공 프로세스를 정립하였다. 아울러 작업자가 자동화 시스템을 손쉽게 사용할 수 있도록 운영 소프트웨어를 개발하였고, 밀링 툴 테스트를 수행하여 우수한 가공 품질을 획득할 수 있는 가공 조건을 도출하였다. 아울러 모서리 밀링 자동화 시스템 개발 과정에서 도출한 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 표준 칼라 플레이트의 다양한 형상과 2R 또는 3-pass 규정 검토 결과를 바탕으로 모서리 자동 밀링 작업을 효과적으로 수행할 수 있는 5축 동기 구동 기구부를 설계하였다. 가공 툴의 회전 및 이송을 위한 기구부와 함께 칼라 플레이트의 형상을 정확히 인식하기 위한 카메라 위치 조절 기구부를 통합 구동 장치에 상호 간섭 없이 배치하여 구동 장치의 효율을 향상시켰다.
- (2) 동기 구동 오차 발생을 방지하기 위해 교차 커플링 제어 방식을 적용하여 자동화 시스템의 정밀도를 향상시키고 가공 툴의 고속 회전이 가능한 갠트리 시스템을 구축하였다.
- (3) 일반 소재의 모서리 가공과는 다르게 도장 구간과 용접 구간을 구분하여 가공해야 하는 칼라 플레이트의 특징을 고려하기 위해 형상 인식 정보와 설계 정보를 동시에 활용한 모서리 밀링 가공 프로세스를 새롭게 정립하였다.
- (4) 보다 정확한 가공 경로 생성을 위해 고해상도의 이미지 촬영 및 이미지 변환 알고리즘을 적용하였으며 허프 변환, 교차점 생성, 비가공 구간 정의, 2R 또는 3-pass 가공 좌표 생성으로 구성되는 단계 별 가공 경로 생성 알고리즘을 개발하여 수작업 대비 가공 정도를 향상시켰다.
- (5) 모서리 밀링 자동화 시스템에 적합한 전용 툴 및 가공 순서를 제안하고, 가공 툴에 대한 밀링 테스트

트를 수행하여 가공 면 검사를 통해 우수한 가공 품질을 얻을 수 있는 가공 인자 값을 도출하였다.

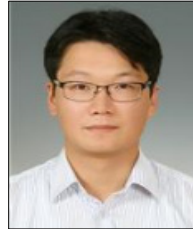
향후, 본 연구를 통해 개발된 모서리 밀링 자동화 시스템을 조선소 작업장에 도입하여 현장 테스트를 수행하고, 그 결과를 토대로 자동화 시스템의 운영 측면에서의 미비 점을 보완하는 상용화 연구를 진행한다면 선체 보호 도장 기준을 충족할 수 있는 모서리 밀링 자동화 시스템을 완성하여 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Kwang-Ki Baek, "Prospect on IMO's Performance Standards for Protective Coatings (PSPC) Regulation for Ship's Water Ballast Tanks", *Corrosion Science and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 219-223, 2008.
- [2] Naoki Osawa, Akira Furujo, Masayuki Nagahori, Toshitake Onishi, Hiroyuki Yajima, Takeshi Miyamoto, "Development of Edge-Preparing Plasma Arc Cutting (EPPAC) System", *Proc. of NACE International Corrosion 2011*, NCAE-11422, 2011.
- [3] Jung-Hoon Joo, Kug-Weon Kim, "Modeling of the Specific Cutting Pressure to Predict the Cutting Force in Face Milling", *Proc. of the Korea Academia- Industrial Cooperation Society*, pp. 306-308, 2008.
- [4] Yong-Sun Kim, Won-Tae Kwon, "Determination of Optimal Cutting Conditions in Milling Process using Multiple Design of Experiments Technique", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 20, no. 3, pp. 232-238, 2011.
- [5] Minghai Wang, Yue Sun, Guoqiang Sun, "Simulation and Experiment for Twisted Thin-Walled Part Milling Based on Machining Path", *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, vol. 45, no. 3, pp. 373-379, 2013.
- [6] R.D. Lorenz, P.B. Schmidt, "Synchronized Motion Control for Process Automation", *Proc. of the 1989 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, pp. 1693-1698, 1989.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1989.96869>
- [7] Yoram Koren, "Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, pp. 265-272, 1980.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3149612>
- [8] I. Sobel, *An Isotropic 3x3 Gradient Operator in Machine Vision for Three-Dimensional Scenes*, pp. 376-379, Academic Press, 1990.
- [9] Richard O. Duda and Peter E. Hart, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", *Graphics and Image Processing*, vol. 15, no. 1, pp. 11-15, 1972.
DOI: <https://doi.org/10.1145/361237.361242>

유 현 수(Hyun-Su Ryu)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2013년 1월 : STX조선해양 기술연구소
- 2013년 3월 ~ 2015년 8월 : 대우조선해양(주) 중앙연구원
- 2015년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 산업조선해양공학부 교수

<관심분야>

선박 생산 자동화, 열전달 및 열변형, 극저온 공학

박 일 환(II-Hwan Park)

[정회원]



- 2007년 2월 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (공학석사)
- 2017년 8월 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (박사수료)
- 2007년 6월 ~ 2016년 8월 : STX조선해양 근무
- 2017년 5월 ~ 현재 : 창원대학교 산학협력단 교수

<관심분야>

인공지능, 휴머노이드

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

김 호 경(Ho-Kyeong Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 (공학박사)
- 2003년 8월 ~ 2015년 3월 : STX조선해양 기술연구소
- 2016년 3월 ~ 현재 : 목포대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 생산 자동화, 선박 건조 기술