무금형 다점 펀치를 사용한 선체외판의 분할 성형 가공 정보 계산 시스템 개발

황세윤¹·이장현^{1,†}·류철호²·한명수³·김광호⁴·김광식¹
인하대학교 조선해양공학과¹
인하공업전문대학 조선해양과²
대우조선해양(주) 산업기술연구소³
(주)스틸플라워 기술연구소⁴

Mechanical Bending Process and Application for a Large Curved Shell Plate by Multiple Point Press Machine

Se-Yun Hwang¹·Jang-Hyun Lee^{1,†}·Cheolho Ryu²·Myung-Soo Han³·Kwang-Ho Kim⁴·Kwang-Sik Kim¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Department of Ship and Ocean System, Inha Technical College²
Industrial Application R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. LTD.³
Technical Institute, Steel Flower Co. LTD.⁴

Abstract

As a forming method for curved hull plates more efficient than the flame bending, mechanical bending using multi point press forming and die-less forming is discussed in this paper. The mechanical forming is a flexible manufacturing system for automatically forming of hull parts. It is especially suited to varied curved parts. This paper discusses a multiple point pressing machine composed of a pair of reconfigurable punches in order to achieve the rapid forming of curved hull plates using division forming and presents how forming information is obtained from the given design surface. Although the mechanical forming can be efficient in the metal forming, spring back after pressing is a phenomenon which must be carefully considered when quantifying the process variables. If the spring back is not accurately controlled, the fabricated shell plate cannot meet assembly tolerance.

This paper describes the principles to calculate the proper stroke of each punch at the divided areas. The strokes are determined by an iterative process of sequential pressing and spring back compensation from an unfolded flat shape to its given design surface. FEA(finite element analysis) is used to simulate the spring back of the plate and the IDA(iterative displacement adjustment) method adjusts the offset of pressing punches from the deformation results and the design surface. The shape deviations of two surfaces due to spring back are compensated by integrated system using FEA and IDA method. For the practical application, It is aimed to develop an integrated system that can automatically perform the compensation process and calculate strokes of punches of the double sides' reconfigurable multiple-press machine and some experimental results obtained with mechanical bending are presented.

Keywords : Hull forming(선체 외판 가공), Spring back(탄성 회복), Displacement adjustment(변위 보상), Multi point press forming.(다점 프레스 가공)

1. 서론

선박의 선수 및 선미 부는 저항 성능을 향상시키기 위하여 복잡한 이중 곡면의 형상으로 설계된다. 특히, A-Plate, Fashion Plate, K-Plate 등과 같은 판은 오목형(convex), 안장형(saddle), 비틀림형(twist)의 이중 곡면을 가지고 있다. 이러한 이중 곡면의 성형 가공을 위해서 여전히 가스 열원, 레이저 열원, 고주파 유도

가열 같은 열간 가공 장비를 사용하고 있다. 열간 가공 공정을 자동화하기 위한 연구 개발의 사례는 그간 여러 차례 보고되었으며 상당한 진전을 보이고 있는 것으로 판단된다(Nomoto, et al., 1990; Ueda, et al. 1993; Shin, et al., 1999; Ishiyama, et al., 1999; Kang, et al., 2000; Lee, et al., 2002; Yoo, et al., 2002; Shin, et al., 2003; Park, et al., 2008). 그러나 열탄소성 변형에 따른 가공 후 형상 해석의 어려움과 가열선 결정의 어려움 때문에 열간 가공의 자동화는 여전히 난제로 남아 있다.

한편으로는 선체 곡판 성형에 그간 적용되어온 열간 가공 방법을 대체하기 위한 방법으로 대용량 프레스(press) 또는 롤 성형(roll forming)과 같은 냉간 성형법이 시도되고 있다(Li, et al., 2002; Yoon, et al., 2008). Li, et al. (2002)은 박판 성형을 목적으로 다점 프레스와 가공량 예측이 가능한 시스템을 제시하였으나, 박판이라는 한계 때문에 선박용 후판의 가공에 적절하지에 대한 실제적 증명이 추가적으로 필요하다고 판단된다. 또한 냉간 가공 과정에서 발생하는 탄성 회복(spring back) 현상을 고려한 가공 형상 예측 및 가공 정보 산출은 냉간 가공 시스템을 실현하기 위해서 선행되어야 할 기술로 판단된다. 역학적인 관점에서 보면 선체 외판과 같이 20mm 이상의 두께를 가진 후판을 대상으로 강제 변위에 의한 재료의 탄소성 변형을 정확하게 예측하고, 탄성회복을 보상한 가공 조건 산출 방법을 제시하여야만 원하는 목적형상을 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다.

Yoon, et al.(2008)과 Hwang, et al.(2010)은 편면 다점 프레스 장비(Fig. 1)에 적용하기 위한 선박 외판 가공 정보 시스템을 제시하였다. 두 연구는 모두 편면 다점 프레스 장비를 이용한 성형 가공을 대상으로 Spring back 양을 유한요소법으로 계산하고, 이를 보상한 가공 조건을 계산하기 위한 가공 반복적 변위보상법(IDA: Iterative Displacement Adjustment)을 적용하였다. 또한 DA 방법과 유한요소해석 과정을 통합하기 위한 방법을 제시하였다. 이를 통해 박판 성형에 사용되고 있는 MPF(Multi Point Forming) 방법이 조선용 곡판과 같은 후판 성형에도 적용이 가능함을 제시하였다. 본 연구는 상기 두 연구에서 도출된 방법론을 바탕으로 수행된 후속 연구의 일부분이다.

특히 본 연구에서는 기존에 시도하였던 편면 다점 프레스가 아닌 양면 다점 프레스(MPDF: Multiple Press-Dieless Forming)와 같은 가변성형 장치(Flexible Forming System)를 대상으로 성형 정보를 산출하기 위한 일련의 과정과 방법을 제시하고자 한다. Fig. 2은 가변성형 장치를 보인 것으로 상부 및 하부에 대응하는 다점 프레스를 가지고 있으며, 대용량의 유압 프레스에 장착되어 성형에 필요한 하중을 부여할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 냉간 가공 방법은 열간 가공 방법과 비교하여 좀 더 용이하게 목적 형상을 제어할 수 있다. 그러나 실제로 생산 공정에서 요구하는 모든 크기의 외판을 성형하기 위해서는 대용량 프레스가 필요한 단점이 있다. 또한 대용량 프레스를 구비하기 위해서는 많은 비용이 필요로 하는 현실적인 문제가 있다. 본 연구는 이러한 현실적인 제약 조건을 극복할 방안으로 분할 성형 방법을 가정하였다. 즉, 성형 장비가 가공 할 수 있는 최대 면적을 감안하여 가공될 판의 영역을 분할하고 이를 순차적으로 이동하여 성형하는 방법을 적용하였다.

일련의 과정을 통하여 분할 가공 시 발생하는 재료의 탄성 회복을 계산하기 위한 유한요소해석 모델, 탄성 회복된 변형을 고려한 IDA 방법 그리고 유한요소해석방법과 IDA의 통합된 모델을 제시하였다. 또한 제시한 성형 가공 정보 시스템을 이용하여 실제 선체 외판의 성형 가공 정보를 계산하고 실험을 통하여 그 유용성과 적용 가능성을 제시하고자 한다.

Fig. 1 Schematic configuration of one-side multi press machine (Hwang, et al., 2010)

Fig. 2 Multi point press machine

2. 분할 성형을 위한 가공정보 산출

다점 프레스 장치의 각 펀치 모듈의 가공변위 산출을 위해서는 우선 3차원 CAD 정보로부터 추출된 선체 외판의 목적 곡면의 형상과 전개(unfolding)된 형상의 정합이 필요하다(Fig 3). 목적 곡면과 전개 형상은 서로 다른 좌표 값에서 표현되기 때문에 이 두 형상을 정합(registration)하는 절차가 필요하다. 두 형상 정보의 정합을 거쳐 두 형상간의 차이를 비교할 필요가 있다. 그리고 분할 성형 과정에서 발생하는 탄성회복 현상과 변형 형상의 해석이 반복적으로 수행되고, 목적 곡면과 예상되는 변형 형상과 차이를 고려한 IDA 방법의 반복적인 적용이 필요하다. 이와 동시에 프레스 펀치 모듈의 형상으로 인해 예상되는 접촉점의 변화도 고려한 가공 정보(stroke)의 수정이 필요하다.

이러한 과정을 요약하면 네 단계로 나눌 수 있다. (1) 목적 곡면으로부터 외판 전개(unfolding) 형상 추출, (2) 목적 곡면과 전개 형상과 정합(registration), (3) 유한요소해석(FEA)과 IDA 방법의 반복 적용, 그리고 (4) 각 프레스의 가공정보(stroke) 계산 과정으로 나눌 수 있다. 각 단계를 정리하면 다음과 같다.

Process A : 외판 전개(Unfolding)

선체 CAD 시스템에서 정의한 외판의 목적 형상은 네스팅(Nesting) 및 곡면 가공을 고려하여 2차원 형상으로 전개된다. 본 연구에서 사용된 선체 외판의 목적 곡면 정보는 TRIBON Mx 시스템으로부터 추출된 것을 이용하였으며, 외판 전개 형상은

TRIBON Mx에서 냉간 성형에 사용하기 위해서 Stretching option 이 적용된 정보를 사용하였다. 각각 추출된 형상의 정보는 XML(eXtended Mark-up Language) Data로 저장되어 있으며 흠어진 점의 (x, y, z) 좌표 값으로 표현되어 있다.

Process B: 곡면 정합(Registration)

목적 곡면 정보와 전개 형상 정보는 3차원의 공간상에서 각기 다른 위치에서 정의되어 있기 때문에, 두 정보가 최소의 변위차이를 가질 수 있도록 일치시키는 정합(registration)과정을 거쳐야 한다. 정합 과정을 거친 후에 목적 곡면과 전개 형상의 차이를 비교하여 초기 가공변위를 산출한다. 곡면 정합에는 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘을 사용하였다(Lee, et al., 2009).

Process C: 유한요소해석 및 IDA 수행

선체 외판 분할 가공 시 발생하는 탄성회복을 시뮬레이션 하기 위해 재료 가공 경화 특성 및 분할된 성형 순서를 반영할 수 있는 유한요소해석이 필요하다. 유한요소해석과 병행하여 예측된 변형 형상을 목적 형상의 차이를 보상할 수 있도록 IDA 방법을 적용하였다. IDA를 통하여 탄성회복을 미리 보정한 새로운 가공 조건을 결정하도록 하였다(Yoon, et al., 2008).

Process D: Press Stroke Calculation

다점 프레스의 펀치 모듈의 상부는 압흔과 같은 국부적인 변형을 방지하기 위해서 반구형 헤드의 형상을 가지도록 설계되었다. 이러한 이유로 실제 가공 과정에서 프레스 펀치 모듈의 상부와 판의 접촉 부위가 변하게 된다. 따라서 가공 판의 접촉 부 변화를 예측하고 프레스 stroke를 수정함으로써 최종적인 가공 정보를 계산하였다.

Fig. 3 Process for plate forming system

2.1 선체 외판의 곡면 표현

TRIBON Mx CAD 시스템으로부터 추출된 목적 곡면은 점 좌표로 표현되어 있기 때문에 매개 변수를 이용한 곡면 방정식으로 표현하는 과정이 필요하다. 매개 변수를 이용한 곡면의 표현 방법은 B-spline, Bezier, NURBS 등이 있으나, 본 연구에서는 3차원 근사 다항식(polynomial) 으로 목적 곡면을 표현하였다. 다항식 표현을 이용하면 임의의 지점에서 $z_i = f(x_i, y_i)$ 를 구할 수 있기 때문에

두 곡면의 차를 쉽게 비교할 수 있다. 다항식 곡면 방정식 $f(x, y)$ 는 식 (1)에서와 같이 (x, y) 의 변수로서 표현될 수 있으며, 본 연구에서는 3차원 다항식을 이용하였다(Hwang, et al., 2010).

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

여기서, i 와 j 는 다항식의 차수로서 $0 \leq i \leq n$, $0 \leq j \leq n$, $i+j \leq n$ 의 조건을 만족한다. a_{ij} 는 식 (2)에서와 설명한 것과 같이 다항식의 계수이다. 최소제곱법(least square) 방법을 사용하면 식 (3)과 같은 계산 과정을 거쳐 a_{ij} 값을 구할 수 있다.

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}^T \quad (2)$$

$$(N^T N)a = N^T q \quad (3)$$

여기서 행렬 N 은 식 (4)에 설명한 것과 같이 선박의 CAD 정보로부터 추출된 목적 곡면을 표현하는 m 개의 (x_i, y_i) 좌표 데이터이고, 행렬 q 는 식 (5)와 같이 m 개의 (z_i) 좌표 데이터를 의미한다.

$$N = \begin{bmatrix} x_1 & x_1 y_1 & x_1^2 y_1 & \dots & 1 \\ x_2 & x_2 y_2 & x_2^2 y_2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & x_m y_m & x_m^2 y_m & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$q = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}^T \quad (5)$$

Fig. 4는 CAD 시스템으로부터 추출한 곡면의 점 좌표를 이용하여 표현한 목적 곡면과 다항식으로 변환한 목적 곡면의 형상을 비교한 예이다. 예제로 보인 실제 목적 곡면과 다항식 곡면과의 차이는 Table 1에서와 같이 1mm 이내인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4 Polynomial surface approximation

Table 1 Max. error between object and polynomial surface

Surface	Max. Deviation
Case 1	0.26 mm
Case 2	0.76 mm
Case 3	0.34 mm

2.2 곡면 정합

선박의 3차원 CAD 정보로부터 추출된 목적곡면 형상과 이를 기준으로 전개된 전개형상의 정보는 서로 다른 위치에서 정의되고 있다. 따라서 이 두 형상을 동일한 위치로 일치시키는 정합 과정이 필요하다. Fig. 5에 보인 것과 같이 곡면 정합 과정은 곡면의 강체 회전 및 평행 이동 값을 계산하는 과정이다. 곡면 정합을 위해서는 ICP(iterative closest points)알고리즘을 이용하였다. ICP 알고리즘은 Horn(1987)에 의해서 제시된 두 좌표계 정합 문제에 단위 쿼터니온(unit quaternion)을 이용한 정합 방법으로, Besl & McKay (1992)가 제안한 방법으로 곡면 정합에 유용한 것으로 이미 증명되어 있다. ICP알고리즘 과정은 Fig. 6에서 보인 것과 같이 전개형상을 기준으로 목적 곡면 정보에 두 집합간의 변환행렬(transformation matrix)을 적용하여 하나의 데이터 집합을 가질 수 있도록, 각 대응점들에 대해서 데이터 집합으로부터 표현된 매개변수를 찾아서 각 기준점에서 최소거리를 가지는 최근점(closest point)을 찾는 방법으로 구현하였다. 본 연구에 적용한 ICP 알고리즘은 Hwang et al.(2011)의 연구 결과에 상세하게 설명되어 있다.

정합 과정을 거친 목적곡면과 전개형상의 변위 차이로부터 식 (6)에 보인 것과 같이 각 프레스 모듈의 상하 stroke 정보를 구할 수 있다. 가공위치(i)에서의 목적 곡면의 곡면 깊이(r_i)와 전개형상의 깊이(u_i)를 비교하여 최초 가공정보 (c_i)를 계산하였다. Fig. 6은 곡면 정합 후 각 프레스 위치에서 초기 가공변위를 산출한 예제를 보여주고 있다.

$$c_i = r_i - u_i \quad (6)$$

Fig. 5 Rotation and translation of the points for the registration(Lee et al., 2009)

Fig. 6 Initial press stroke calculation at press punch position

2.3 분할 성형 시 변형 및 탄성 회복 해석

다점 프레스를 이용한 분할성형 과정은 탄소성 접촉 변형 문제로 정식화 할 수 있다. 즉, 판 또는 3차원 연속체의 탄소성 변형 및 판과 프레스 사이의 3차원 접촉 문제로 가정할 수 있다. 또한 탄성 회복을 예측하기 위해서는 탄소성 재료 구성 방정식을 반영하여야 하며, 강체 회전을 방지하기 위한 구속 조건을 지정하여야 한다. 본 연구에서는 분할 가공된 선체 외판의 변형 형상을 예측하기 위해서 유한요소 해석법을 적용하였다. 변형 성형 과정을 후판의 탄소성 변형으로 문제를 가정하고, 프레스의 위치에 따른 가공량은 접촉되는 절점(node)에서 강체 변위로 적용하였다. 또한, 판의 강성에 영향을 미치는 앓을 정도로 작은 강성을 가지는 스프링 요소를 이용하여 강체 운동을 방지하였다. 그리고 접촉 요소를 사용할 때 발생하는 계산시간 증가의 문제를 회피하기 위하여 접촉 요소를 사용하지 않고 예상되는 접촉점의 변화를 기하학적으로 추정하는 방법을 이용하였다.

Material property

실험에 사용된 판재는 조선용 강재인 AH32이며, 재료의 특성은 Table 2에 정리하였다. 또한 재료의 탄소성 특성은 Fig. 7에서와 같이 비우싱거 효과 (Bauschinger effect)를 고려한 Kinematic Hardening 모델로 가정하였다. 재료의 항복 특성은 Von-Mises 항복조건을 따른다고 가정하였다.

Table 2 Material property of AH32

Material property	Value
Elastic modulus	218.5 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Yield Stress	354.6 MPa

Fig. 7 Stress-strain curves and kinematic hardening condition

Finite element analysis model

가공될 판은 판(shell)요소를 이용하여 유한요소 모델을 작성하였으며, 각 프레스 위치에 존재하는 절점에 가공량에 해당하는 강제 변위를 가하는 방법을 사용하였다. 따라서 각 프레스의 위치와 동일한 곳에 절점을 생성하였다. 해석에 사용된 요소는 Fig. 8에 보인 것과 같이 4-Node 판이며, finite strain을 반영하고 있으며, 대변형 회전 등에 적절하다. 적분 방법은 완전 적분(full integration) 방법을 선택하였다

Fig. 8 Configuration of shell 181 (ANSYS, 2007)

Boundary condition

성형과정은 (1) 강제 변위를 가하는 과정과 (2) 강제 변위가 제거되는 단계로 나눌 수 있다. 유한요소 해석 과정에서는 이러한 강제 변위의 부하/제하 과정에서 발생할 수 있는 강제 운동(rigid body motion)을 방지하도록 하여야 한다. 따라서 Fig. 9에 보인 바와 같이 하중을 부여하고 제거하는 단계에서 4개의 꼭지점에 스프링 요소를 추가하였다. 또한 하중을 제거하는 단계에서는 판 중앙부에 위치한 절점에 강제 구속 조건을 부여하였다.

Fig. 9 Boundary condition at loading stage of division forming

Division forming (분할 성형)

앞서 언급한 바와 같이 판의 크기가 가공 장비의 가공 영역보다 클 경우에는 영역을 분할하여 성형하는 방법을 취하였다. Fig. 10은 판의 영역을 세 개로 나누고 중앙부 영역, 좌우 영역, 그리고 중앙부 영역을 가공하는 네 단계의 성형 과정을 설명한 그림이다. Fig. 11은 외판의 분할 성형을 해석하기 위해서 강제 변위를 가하는 Loading 단계와 변위가 제거되고 탄성회복이 일어나는 Unloading 단계로 나누어서 해석을 진행하고 그 결과를 보여 준다.

Fig. 10 Division forming condition

Fig. 11 FEA procedure of continuous division forming

2.4 탄성 회복 보상 방법

냉간 가공을 거친 판은 탄소성 재료 특성 때문에 Fig. 12와 같이 탄성 회복이 발생한다. 따라서 탄성 회복에 따른 최종 변형형상과 목적형상을 비교하여 가공 stroke를 다시 결정하여야 한다. 이 과정에서 IDA 방법을 적용하였다. IDA 알고리즘은 유한요소해석으로 예측한 변형 형상과 실제 목적곡면의 유사도가 요구되는 기준을 만족 할 때 까지 반복적으로 가공변위를 보상하여 최종 가공 변위를 산출하는 방법이다. 이때 유한요소해석과 IDA는 반복적으로 수행되기 때문에 유한요소해석 입력 파일은 판의 형상 및 가공 조건 등을 반영하여 자동으로 생성시키도록 하였다.

Fig. 12 Spring back phenomena

IDA(Iterative Displacement Adjustment) method

Spring back이 발생하기 전과 후의 변위와 목적형상의 변위는 Fig. 13에서와 같이 목적형상의 변위($\vec{r}_i$), 강제변위가 주어진 상태에서 발생한 변위($\vec{c}_i$), spring back이 발생 이후 형상의 변위($\vec{s}_i$)로 나타낼 수 있다. 따라서 $\vec{r}_i - \vec{s}_i$ 를 통해서 목적형상과 spring back이 발생한 후의 형상차이에 의한 변위차를 계산하여 식 (7)에서와 같이 각 프레스의 위치(i)에서의 다음 단계의 가공 변위($\vec{c}_i^{t+1}$)를 보상하여 다시 선체 외판 분할 성형 유한요소 해석을 수행하였다. 각 계산 과정은 Hwang, et al.(2010)에 상세히 설명되어 있다.

이와 같은 유한요소해석과 변위보상 과정을 반복적으로 수행하여 목적곡면과 변형형상간의 변위 차이(ε)의 절대값이 식 (8)에서와 같이 미리 정의한 오차 범위를 만족하도록 반복하여 가공변위를 산출하였다.

$$\vec{c}_i^{t+1} = \vec{c}_i^t + a_i^t(\vec{r}_i - \vec{s}_i) \quad (7)$$

$$|\vec{r}_i - \vec{s}_i| \leq \varepsilon \quad (8)$$

식 (7)에서 사용된 a_i^t 는 spring back 보상계수로서 식 (9)에서와 같이 각 성형단계에서 발생한 spring back이 발생한 후의 형상과 목적곡면과 차이의 최대 편차(shape deviation field)에서 각 점의 형상편차를 나누어서 계산한다.

$$a_i^t = \frac{|\vec{r}_i^t - \vec{s}_i^t|}{\max |\vec{r}_i^t - \vec{s}_i^t|} \quad (9)$$

Fig. 13 Concept of spring back(Hwang, et al., 2010)

2.6 프레스 펀치의 접촉 반영

프레스 상부의 형상은 반구 형태로 구성되었기 때문에 가공 과정에서 접촉점이 변화한다. 접촉점의 변화를 엄밀하게 반영하기 위해서는 프레스의 3차원 형상을 반영한 접촉 요소를 이용하여야 하지만, 유한요소해석 모델의 자동 생성의 어려움 및 계산 시간의 증가라는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 예상되는 접촉점의 변화를 기하학적으로 추정하여 반영하였다.

Fig. 14에서와 같이 상하부의 각 프레스 펀치와 가공형상의 곡률에 따라서 상하부 프레스 펀치 모듈의 수직거리는 달라지는데 이러한 경향은 가공형상의 곡률이 클 경우 더 커진다. Fig. 15 및 식(10)에 설명한 것과 같이 프레스 펀치와 외판의 접촉점에서 normal vector(n)를 계산하여 상, 하부 프레스 펀치 모듈의 위치를 계산하였다(Li, et al., 2002).

$$n = \frac{f_x(x, y) \times f_y(x, y)}{|f_x(x, y) \times f_y(x, y)|} \quad (10)$$

여기서 $f_x(x, y)$ 와 $f_y(x, y)$ 는 식 (1)에서 제시한 다항식의 편미분 값으로서 $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$ 와 $\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$ 에 의해서 각각 계산하였다.

Fig. 14 Contact point translation of press head

Fig. 15 Contact point of press head

2.7 가공정보 계산 프로그램

가공 정보 계산을 위해서는 곡면 형상의 정합, 가공 순서를 반영한 유한요소해석, 그리고 IDA 알고리즘의 적용이 필요하다. 목적곡면과 전개형상 정보를 입력 한 후에 두 곡면의 정합과 초기 가공정보 계산, 그리고 유한요소방법을 통한 분할 성형 시 변형 예측, 탄성 회복 보상을 순차적으로 수행 한 후에 최적의 가공변위를 산출하여야 한다. Fig. 16은 이러한 일련의 과정을 표현한 것이다.

이러한 일련의 과정 즉, 유한요소해석, IDA 알고리즘을 자동으로 수행하기 위하여 통합 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 17는 본 연구에서 개발한 가공정보 계산 프로그램의 UI(user interface)를 보여주고 있다. 본 프로그램은 목적곡면 정보와 전개형상 정보를 입력하고, 계산과정 중 필요한 변수를 정의하면 자동으로 유한요소 해석과 탄성 회복 보상을 수행함으로써 최종적으로 가공변위를 계산하도록 구성되었다. 이때, 유한요소 프로그램은 자동 수행(Batch run) 명령어를 이용하여 본 UI에서 생성한 입력파일을 자동으로 읽어서 해석을 수행함으로써, 해석에는 사용자의 유한요소 모델링 작업이 필요하지 않도록 하였다.

Fig. 16 Process of Press Stroke Calculation

Fig. 17 GUI of press stroke calculation system

3. 적용 결과 및 실험 결과

3.1 적용 곡면의 특징

본 연구에서는 10,000TEU(twenty foot equivalent unit)급 컨테이너 운반선의 선형 데이터를 기반으로 추출된 곡판 형상에 대해서 가공 정보를 예측하고, 실험을 실시하였다. 각 곡면의 크기는 Table 3에 설명하였다. 각 곡면의 형상은 Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20에 도시하였다.

Table 3 Sample plates for calculation and experiments

	Case 1	Case 2	Case 3
Name	H4135-H139	H4135-H78	H4135-T98
Type	Concave	Saddle	Twist
Width	880 mm	940 mm	940 mm
Height	1,940 mm	1,940 mm	1,940 mm
Thickness	24 mm	16 mm	20 mm

Fig. 18 Configuration of H4135-H139 plate

Fig. 19 Configuration of H4135-H78 plate

Fig. 20 Configuration of H4135-T98 plate

3.2 분할 성형 가공 범위 계산

각 대상 곡면의 가공 범위 계산을 위해서 분할성형해석을 수행하였고, 탄성 회복을 보상하도록 IDA알고리즘에 적용하여 요구되는 오차범위를 만족할 때까지 반복 계산을 하였다. IDA 방법의 수렴 오차는 가공 위치에서 구한 형상 편차의 평균 오차가 7mm 이내인 절점이 90% 이상일 때 수렴되도록 가정하였다.

Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23은 H139 판의 성형 과정에 따른 변형 형상 및 응력 분포를 설명한 것이다. Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26과 Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29는 Case 2 모델인 H78 곡판과 Case 3 모델인 T98의 변형형상과 응력 분포를 보인 것이다.

Fig. 21 FEA of continuous division forming for H139

Fig. 22 Displacement of deformed shape for H139

Fig. 23 Equivalent stress of deformed shape for H139

Fig. 24 FEA of continuous division forming for H78

Fig. 25 Displacement of deformed shape for H78

Fig. 26 Equivalent stress of deformed shape for H78

Fig. 27 FEA of continuous division forming for T98

Fig. 28 Displacement of deformed shape for T98

Fig. 29 Equivalent stress of deformed shape for T98

Case 1, Case 2, Case3 판 모두 2회의 IDA 및 유한요소 해석을 통해서 가공변위가 계산되었다. Table 3은 두 실험 대상 판의 최종 예측 결과를 정리한 것이다. IDA 방법에 의해서 예측된 탄성 회복 양은 Table 5에 정리한 것과 같이 Case 1, Case 2, Case 3 각각 약 62%, 약 56%, 약 45%가 보상됨을 확인할 수 있다.

Table 4 Similarity of DA calculation

	Iteration	Case 1	Case 2	Case 3
Similarity	1	44.89 %	62.96 %	64.3 %
	2	100 %	100 %	100 %

Table 5 Spring back rate of continuous division forming

	Iteration	Case 1	Case 2	Case 3
Max. stroke	1	108.71 mm	55.17 mm	54.15 mm
	2	183.76 mm	96.96 mm	118.98 mm
Increased rate of stroke		62 %	56 %	45 %

3.3 분할 성형 실험

제안한 선체외판 분할 가공정보 계산 시스템의 타당성을 검토하기 위해서 실제 외판 성형에 적용하여 목적곡면의 정확성을 검토하였다. 앞 절에서 계산된 가공변위를 사용하여 대상곡면의 분할 성형 실험을 수행하였다. Fig. 30, Fig. 31, Fig. 32는 각각 Case의 절단된 전개 평판과 분할 성형 후 변형된 곡판을 보여주고 있다. 목적곡면과 가공곡면의 차이를 비교하기 위해서 두 곡면을 정합시킨 후 형상 오차를 비교하였다.

Case1의 경우 가공곡면이 목적곡면보다 더 가공되는 over bending되는 특성을 가지며 최고 변위차가 약 20mm 정도 발생하고 표준편차는 약 15mm가 발생하였다. Fig. 33에 보인 것과 같이 H1, H2, H3, H4 선에 대해서 변위차이를 비교했을 때, Fig. 34과 같이 곡면의 중심부에서는 두 곡면의 변위차이가 5mm 이내이고, 곡면의 외곽에서 약 10mm 정도의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. Case 2와 Case 3의 경우는 under bending되는 특성을 가지며 변위차는 최대 약 10mm 그리고 평균 약 4~5mm의 차이가 발생하였다. Fig. 35, Fig. 36에 보인 것과 같이 약 10mm 이내의 오차를 보이고 있다. Table 5는 가공된 두 곡면의 유사도를 정리한 것이다. Case 1은 약 60%, Case 2는 약 76% Case 3는 약 72%의 유사도로 평가되었다. 이 때 곡면의 허용 편차를 7mm로 가정하고, 허용 편차를 만족하는 점의 비율을 유사도로 정의하였다. 실제 가공된 곡면의 유사도는 약 60~76% 정도로 파악되었다. 그러나 절대적인 변위 차이는 약 10mm 이내라는 점을 감안하면 본 연구에서 제시한 가공정보 산출 방법이 어느 정도 타당성이 있는 것으로 판단된다.

Table 5 Results for experiments

	Case 1	Case 2	Case 3
Max deviation	19.8 mm	10.5 mm	16.1 mm
RMS deviation	11.0 mm	4.9 mm	5.3 mm
Similarity	60 %	76 %	72 %
Deviation Tolerance	7 mm		
Discussions	Over Bending	Under Bending	Under Bending

Fig. 30 Unfold plate and deformed plate of H139

Fig. 31 Unfold plate and deformed plate of H78

Fig. 32 Unfold plate and deformed plate of T98

Fig. 33 Comparison of simulation and experiment for H139

Fig. 34 Displacement comparison of simulation and experiment result for H139

Fig. 35 Displacement comparison of simulation and experiment result for H78

Fig. 36 Displacement comparison of simulation and experiment result for T98

5. 결론

본 연구에서는 이중 곡면을 가진 선체 외판의 성형 방법으로서 다점 프레스를 선택하여 성형에 필요한 가공 정보를 계산하기 위한 방법과 시스템을 제시하였다. 이를 위해 곡면 형상을 정합 시키고 가공정보를 산출하는 과정, 가공 시 발생하는 탄성 회복 양을 계산하기 위한 유한요소해석 절차, 탄성 회복을 보상하여 최적의 프레스 stroke를 산출하기 위한 IDA 적용 방법을 제시하였다. 그리고 모든 계산과정이 자동으로 수행되는 가공 정보 계산용 통합 시스템을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검토하기 위해서 실제 선박의 외판 가공에 적용하고 이를 목적곡면과 비교하여 각각 60%와 76%의 유사도를 가지는 것을 확인하였다.

제시된 시스템의 가공 정보 계산의 오차를 줄이기 위해서는 좀 더 많은 실험을 실시하고, 계산된 가공 정보의 오류 특성을 파악하는 것이 필요하다. 또한 예측 정확성을 좀 더 향상시킬 수 있는 유한요소해석 기술의 보완이 필요하며, IDA 방법의 개선도 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 대우조선해양(주)과 (주)스틸플라워의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- ANSYS, *Theory Manual*, 2007. ANSYS Co. Ltd.,
- Besl, P.J. & McKay, N.D., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14(2), pp.239-256.
- Horn, B.K.P., 1987. Closed-form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions. *Journal of Optical Society of America*, 4(4), pp.629-642.
- Hwang, S.Y., Lee, J.H., Yang, Y.S. & Yoo, M.J., 2010. Springback adjustment for multi-point forming of thick plates in shipbuilding. *Journal of Computer-Aided Design* 42(11), pp.1001-1012.
- Hwang, S.Y., Ryu, C.H., & Lee, J.H., 2011. Localization between Curved Shell Plate and Its Unfolded Shape in Different Coordinate Systems for Ship-Hull Plate Forming. *Journal of Mathematical Problems in Engineering* doi:10.1155/2011/257804.
- Ishiyama, M., Tango, Y., & Shirai, M., 1999. An automatic system for line heating bending processing method utilizing FEM application. *Proceedings of 10th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 2, June 7-11, Cambridge, MA, pp.419-435.
- Kang, J.G., Lee, J.H. & Shin, J.G., 2000. 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.
- Lee, J.H. & Shin, J.G., 2002. Relations between Input Parameters and Residual Deformation in Line Heating process using Finite Element Analysis and Multi-Variate Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(2), pp.75-80.
- Li, M.Z., Cai, Z.Y., Sui, Z. & Yan, Q.G., 2002. Multi-point forming technology for sheet metal. *Journal of Material Processing Technology*, 129(1), pp.333-338.
- Nomoto, T. et al, 1990. Development of simulator for plate bending by line-heating. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 168(2), pp.527-535.
- Park, J.S. et al., 2008. Plate Flattening Analysis in the Line Heating Process using Bending Strains. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(4), pp.417-425.
- Shin, J.G., Ryu, C.H., Choe, S.W., & Kim, W.D., 1999. An object oriented control system for an automated line heating process. *Proceedings of 10th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 2, June 7-11, Cambridge, pp.399-408.
- Shin, J.G., Ryu, C., Lee, J.H. & Kim, W.D., 2003. User-friendly, advanced line heating automation for accurate plate forming. *Journal of Ship Production*, 19(1), pp.8-15.
- Ueda, Y. et al., 1993. Development of computer aided process for plate bending by line-heating (3rd report) relation between heating condition and deformations. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 173, pp.409-418.
- Yoo, H.S., Byun, G.G., Lee, B.I. and Kim, H.G., 2002. "A Study on Automation of Steel Plate Forming by Heating Method", *Journal of The Society of Naval Architects of Korea*, 39(2), pp.34-44.
- Yoon, J.S., et al., 2008. Application of IDA Method for Hull plate Forming by Multi-Point Press Forming. *Journal of Korean Society of Ocean Engineers*, 22(6), pp.75-82.

황 세 윤

이 장 현

유 철 호

김 광 호

한 명 수

김 광 식