

# 점진적 롤 성형 공정의 선박 곡가공 적용을 위한 공정 변수 분석

심도식<sup>1</sup>, 윤석준<sup>1</sup>, 이석렬<sup>1</sup>, 성대용<sup>1</sup>, 양동열<sup>1#</sup>, 한용섭<sup>2</sup>, 한명수<sup>2</sup>

## Analysis of Process Parameters in the Incremental Roll Forming Process for the Application to Doubly Curved Ship Hull Plate

D. S. Shim, S. J. Yoon, S. R. Lee, D. Y. Seong, D. Y. Yang, Y. S. Han, M. S. Han

### Abstract

In order to make a doubly-curved sheet metal effectively, the sheet metal forming process has been developed by adopting the flexibility of the incremental forming process and the principle of bending deformation which causes slight deformation in thickness. The developed process is an unconstrained forming process without holder. The experimental equipment has been set up with the roll set which consists of two pairs of support rolls and one center roll. In order to analyze process parameters in the incremental roll forming process for the application to doubly curved ship hull plate, the orthogonal array is adopted. From the FEM results, among the process parameters, the distance between supporting rolls in pairs along the direction of one principal radius of curvature as well as the forming depth is shown to influence the generation of curvature in the same direction significantly. That is, the other distance between supporting rolls in pairs which are not located in the same direction of one principal radius of curvature, does not have a significant effect on the generation of the curvature in that direction. Also, the forming load and torque from the FEM simulation are acceptable to the system development of the incremental roll forming process for the forming of ship hull plate.

**Key Words :** Incremental Roll Forming Process, Doubly-Curved Sheet, Ship Hull Plate, Orthogonal Arrays

### 1. 서 론

이중 곡률을 갖는 금속 판재들은 가전 제품이나 자동차, 선박, 비행기 등의 동체나 여러 가지 부품들을 구성하는데 필수적으로 사용되고 있다. 그 중 선박의 선체를 구성하는 강판의 경우 이중 곡률을 가지는 다양한 형상들로 이루어져 있다. 실제 선박용 강판의 곡가공은 선상가열법이라 불리는, 경험자에 의존하는 수작업으로 이루어지고 있으며 작업자의 부족과 은퇴 등으로 인해 경험 지식이 소멸되고 있다. 또한 대부분의 공정이 수작업에 의존하기 때문에 반복 성형 및 정밀 성형등

에 어려움이 있다.

이러한 배경에서 생산 공정의 단순화와 자동화를 위해, 점진적 롤 성형 공정을 제안하였다. 이 공정은 이미 모의 실험 장치를 통해 그 효용성이 입증되었고, 다양한 공정 변수와 성형된 형상의 곡률 반경과의 관계를 규명하여 최종 형상을 예측할 수 있게 되었다[1-4].

본 연구에서는 이중 곡률을 갖는 선박용 강판을 성형하는 점진적 롤 성형 시스템 개발의 선행 연구로서 유한 요소 해석을 실시하여 요인 효과 분석을 통해 실제 성형 시스템 구축에 필요한 제반 정보들을 도출하고, 선박 곡가공에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
2. (주)대우조선해양  
# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 dyyang@kaist.ac.kr

## 2. 점진적 롤 성형 공정

### 2.1 점진적 롤 성형 공정의 기본 개념

Fig. 1 은 본 연구에 앞서 개발된 점진적 롤 성형 장치를 보여주고 있다. 받침롤에 놓여진 금속 판재를 중심롤이 눌러줌으로써 굽힘 변형을 발생시키게 되고, 중심롤이 회전하게 되면 판재와의 접촉부분에서의 마찰에 의해 재료를 이송하게 된다. 이러한 국부적인 굽힘 변형을 일정한 간격으로 전 영역에 걸쳐 발생시켜 이중 곡률을 갖는 판재를 성형하게 된다[5].

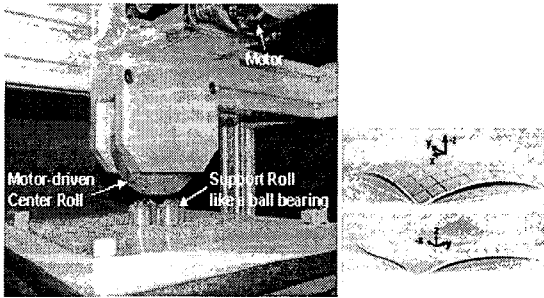


Fig. 1 Experimental setup and deformed workpieces

### 2.2 공정 변수

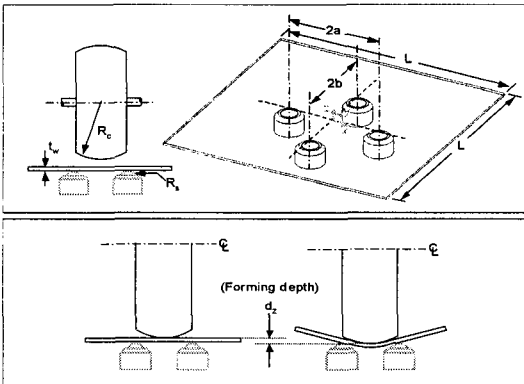


Fig. 2 Definition of process parameters

Fig. 2 는 점진적 롤 성형 공정에서 모의 실험 장치에 대한 개념도 및 요인 효과 분석 대상이 될 다양한 공정변수를 나타내고 있다. 이 중에서 시편의 변형에 영향을 미치는 기본 공정 변수를 선정할 것이며, 시편의 크기는 실제 선박용 곡가 공에 사용되는 직사각형의 강판으로 한다.

## 3. 다구찌 기법을 이용한 공정 변수 분석

### 3.1 기본 공정 변수의 선정

이 장에서는 이중 곡률을 갖는 선박용 강판을 성형하는 점진적 롤 성형 시스템 개발을 위한 전처리 과정으로, 변형에 영향을 미치는 기본 공정 변수를 선정하고 그것들에 대한 유한 요소 해석을 실시하여 시스템 개발에 필요한 공정 변수를 분석하고자 한다.

Fig. 2 에서 언급한 공정 변수 중에서 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 인자로 두 쌍의 받침롤의 간격  $2a$  와  $2b$ , 성형 깊이  $d_z$  그리고 중심롤의 반경  $R_c$  를 선정하였으며, 해석 결과의 분석 대상으로 성형 하중 및 토크 그리고 굽힘 변형에 의해 발생된 소재의 굽힘각( $\theta$ )을 선정하였다.

앞에서 정한 공정 변수에 대한 3 수준을 Table 1 과 같이 설정하였고, 이를 이용하여 Table 2 와 같이 직교 배열표(orthogonal array)를 구성하였다[6].

Table 1 Level of process parameter

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
2a (mm)	500	1000	1500
2b (mm)	500	1000	1500
$d_z$ (mm)	10	15	20
$R_c$ (mm)	250	500	700

Table 2 Experimental conditions:  $L_9(3^4)$  orthogonal array

Exp. No.	2a (mm)	2b (mm)	$d_z$ (mm)	$R_c$ (mm)
1	500	500	10	250
2	500	1000	15	500
3	500	1500	20	700
4	1000	500	15	700
5	1000	1000	20	250
6	1000	1500	10	500
7	1500	500	20	500
8	1500	1000	10	700
9	1500	1500	15	250

### 3.2 다구찌 기법을 이용한 해석 및 결과

공정 변수에 대한 민감도 분석 및 최적 조건 도출을 위하여, 직교 배열표로 구성된 9 가지 경우의 해석 조건으로 ABAQUS 6.5 Implicit 를 이용하여 유한 요소 해석을 실시하였다. 해석에 사용한 선박용 판재는 선형 저감 적분 쉘 요소(linear, reduced-integration shell element, S4R5)를 이용하여 격자 구성하였고, 실제 선박용 강판으로 사용되는 크기인 가로, 세로 각각 3m 를 적용하였으며, 쉘의 두께는 27mm 로 설정하였다. 그리고 해석의 정확도를 높이고 해석 시간을 줄이기 위해 상하부를 셋과 접촉하는 부분에서는 요소 밀도를 증가시켰다.

Fig. 3 은 시편의 중심선을 따라 한 줄 (one-path)의 성형 경로로 성형하는 과정을 보여 주고 있다.

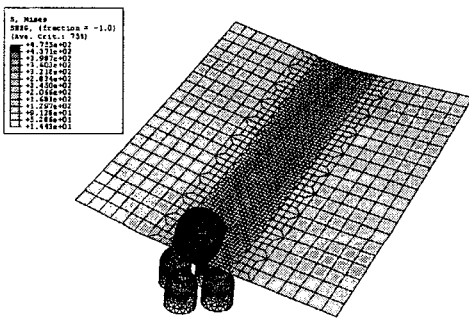


Fig. 3 Simulated result of one-path forming (Exp. No. 3)

Table 3 characteristic values

Exp. No.	Load (ton)	Torque (kN*m)	$\theta$ , Angle of deformation( $^{\circ}$ ) ( $\theta_1 / \theta_2$ )
1	64.1	24	172.41/179.51
2	60	80	168.71/179.60
3	80	170	169.22/179.49
4	90	240	178.47/167.98
5	52.5	37	176.74/175.64
6	35.3	25.2	175.15/179.67
7	64.5	45.3	172.58/179.53
8	22	21	177.64/179.69
9	28.8	7.88	177.9/178.9

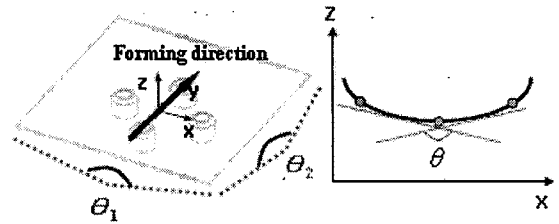


Fig. 4 Definition of deformation angle

Table 3 에는 해석 결과 분석 대상에 대한 특성 값들을 정리하였다. 실제 선박 곡가공을 모사한 유한 요소 해석 결과, 9 가지 모든 해석에 대해서 더욱 큰 곡률을 위해 성형 깊이를 증가시킨다 하더라도, 굽힘에 필요한 하중과 중심롤의 회전을 위한 토크는 선박 곡가공을 위한 성형 방법으로서의 점진적 롤 성형 공정의 적용 가능성을 보여 준다.

각각의 공정 변수 조합에 대한 굽힘각을 비교해 보면, 2b 의 값이 변하더라도 진행 방향으로의 굽힘각에는 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 이는 성형 경로에 따라 생성되는 주곡률 방향이 존재한다는 의미로 해석된다. 다시 말해 진행 방향의 수직 방향으로 판재의 주곡률이 형성된다는 것을 감안한다면 원하는 형상을 성형함에 있어서 주곡률 방향의 받침롤의 간격을 조절하면서 동일 방향의 굽힘각을 관찰해 나가면서 성형을 해나가야 할 것으로 풀이된다.

Fig. 5 는 각각의 분석 대상에 대하여 공정 변수의 수준별 평균 SN 비를 나타낸다. 전체적으로 성형 하중과 토크의 경우 비슷한 양상을 보이나 변형 각도의 경우, 이들과는 반대의 양상을 보인다.  $R_c$  의 경우 Table 3 의 결과와 SN 비를 살펴볼 때 성형하중이나 소재의 변형에는 큰 영향을 주지 않으나, 그것의 값이 클수록 토크의 값은 증가한다. 이는 이론적으로도 예상이 가능한 만큼 시스템의 설계 시 가용 토크를 고려해 결정된다면 성형 계획을 위한 주요 공정 변수에서는 제외될 수 있음을 의미한다.

따라서 특성치 분석 결과와 위의 결과를 종합해볼 때, 성형을 위한 주요 공정 변수는 성형 경로 수직 방향의 받침롤 간격 ( $2a$ )과 성형 깊이 ( $d_z$ )임을 알 수 있다.

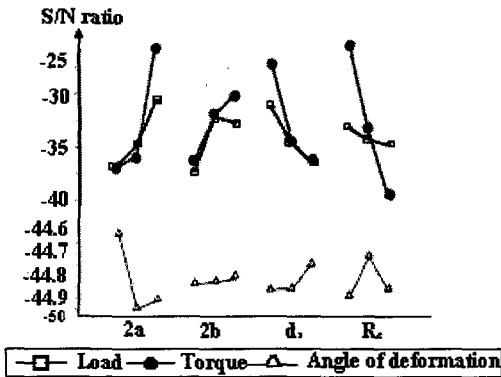


Fig.5 SN ratio of parameter level

이 두 가지의 주요 공정 변수에 대한 분석 대상의 특성을 살펴보면, 2a 값이 2, 3 수준으로 증가하게 되면 판재의 변형각도에 대한 기여도는 크게 증가하지 않으나 성형 하중에 대한 기여도는 크게 증가한다. 하지만 1 수준으로 작아진다면 변형각도에 대한 기여도는 크게 증가하기 때문에, 성형 하중을 수용할 수 있는 범위 내에서 받침틀의 간격을 낮은 수준에서 조절한다면 판재의 굽힘 변형을 좀 더 효율적으로 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

성형 깊이 ( $d_2$ )의 경우, 2a 와 유사한 관점에서, 3 수준으로 성형 깊이를 증가하게 되면 변형 각도에 대한 기여도가 증가하게 되어 판재의 변형 정도를 높은 범위에서 유지함으로써 최종 형상으로의 성형을 위한 성형 경로 수를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

요컨대, 선박용 강판의 곡가공을 위한 점진적 롤 성형 시스템 개발과 그 적용 가능성의 관점에서 볼 때, 주요 공정 변수로 판단되는 주변형 방향의 받침틀 간격 2a 와 성형 깊이  $d_2$  의 적절한 조합을 통해 가용 하중 범위 내에서 성형 크기와 경로 수에서의 효율성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

선박용 강판의 곡가공을 위한 점진적 롤 성형 공정의 시스템 개발을 위한 선행 연구로서 본 공정의 적용 가능성 판단을 위해 다구찌 기법을 기반으로 유한 요소 해석을 통해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 다구찌 기법을 통한 유한 요소 해석의 결과, 분석 대상으로 설정한 성형 하중과 토크의 특성을 분석해 봄으로서 실제 장비 시스템 운용 차원에서 충분히 수용 가능할 만한 범위의 성형 하중과 토크임을 확인하였다.

(2) 설계 변수로 본문에서 정한 4 가지의 공정 변수에 대한 SN 비를 분석한 결과, 주요 공정 변수는 성형 경로의 수직 방향의 받침틀 2a 와 성형 깊이  $d_2$  임을 확인하였고, 2a 값을 조절하여 판재의 주곡률을 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 마지막으로 굽힘 정도와 성형 경로의 수에 있어서 효율성을 높이기 위해서는 주요 공정 변수인 2a 와  $d_2$  의 적절한 조합만으로도, 성형을 실시하여 허용 하중 범위 내에서 원하는 최종 형상을 만드는데 있어서 효율성을 피할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] S., Matsubara, 1994, Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool, J.JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1311~1316.
- [2] H., Iseki, 1994, Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers, J. JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1336~1341.
- [3] K., Kitazawa, S. Nakamura, Tanaka, T., 1994, A CNC incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp corners, J.JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1348~1353.
- [4] T. J., Kim, D. Y., Yang, 2000, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, Int. J. Mech. Sci. Vol. 42, pp. 1271~1286
- [5] S. J., Yoon, D. Y., Yang, 2001, Investigation into a new incremental forming process using an adjustable punch set for the manufacture of a doubly curved sheet metal, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 215, Part B, pp. 991~1004.
- [6] G., Taguchi, S., Konishi, 1987, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, ASI press