

선형 배열 롤 셋을 이용한 오목형상 강판 성형경로 설계

노형주¹ · 김광희[#] · 심도식² · 양동열² · 정성욱³ · 한명수³

Design of Forming Path for Concave Steel Plate Using the Line Array Roll Set

H. J. Roh, K. H. Kim, D. S. Shim, D. Y. Yang, S. W. Chung, M. S. Han

(Received May 8, 2008)

Abstract

Incremental forming path to manufacture a thick concave steel plate using the line array roll set is designed. To find the optimum forming path, the forming processes are simulated by the finite element method. A general-purpose commercial software, MSC.MARC is used. A modeling with 8-node hexahedral elastic-plastic solid is performed to predict accurate springback and the analysis process was composed of 18 passes. The proposed forming paths are verified through experiments carried out in the prototype line array roll set. It is found that the process can be successfully applied to the fabrication of the dual curvature ship hull plate.

Key Words : Line Array Roll Set, Sheet Metal Forming, Concave, Forming Path

1. 서 론

자동차, 선박, 비행기 등의 외형이나 여러 가지 부품들을 구성하는 판재 중에는 이중곡률을 갖는 판재가 필수적으로 사용되고 있다. 특히 선박의 외판은 다양한 이중 곡률을 가진 곡판으로 형성되어 있으며 초기평판을 이중 곡률을 가진 다양한 형상으로 가공하는 선박 곡 가공 공정은 선박 건조에 있어서 필수적인 공정이라 할 수 있다.

현재 선박용 곡 가공은 가스토치를 열원으로 하는 선상 가열법을 이용하여 판재에 국부적인 가열 후 급속냉각을 시킴으로써 판재를 성형하고 있는데, 이러한 가열 및 냉각을 숙련자의 경험에 의해 반복하면서 목적형상을 제작하고 있다. 이는 작업자의 수작업에 따른 작업환경이 좋지 않아 작업자의 건강에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라

이중 곡률을 가지는 판재의 제작시간 및 비용의 증가의 원인이 된다.

이에 윤석준 등은 열간 가공법 대신 롤 셋이라는 장치를 이용하여 점진적 롤 성형을 이용한 냉간 가공법으로 이중 곡률을 가지는 판재 성형에 대한 연구를 수행하였으며[1~3], 심도식 등은 롤 셋을 발전시킨 선형 배열 롤 셋을 이용하여 이중 곡률을 가지는 판재를 성형하는 공정에 관하여 연구를 하였다.[4~7]

이중곡률을 가지는 판재를 성형하기 위해서는 공정조건 및 성형경로 등이 잘 설계되어 있지 않으면 중간 또는 최종형상에서 치수불량, 주름과 같은 결함이 발생할 수 있으며 또한 선박용 외판의 곡률 중횡비를 감안하여 최종곡면을 생성할 때에 효율적인 가공경로를 설정할 필요가 있다.

본 연구에서는 선형배열 롤 셋을 이용하여 이

1. 부경대학교 기계공학부

2. 한국과학기술원 기계항공시스템학부

3. ㈜대우조선해양

교신저자: 부경대학교 기계공학부, khk@pknu.ac.kr

중곡률을 갖는 형상 중 오목 형상을 제작하는 성형경로를 설계하여 유한요소해석 및 성형실험을 수행하여 검토하였다.

2. 점진적 성형 경로 설계

선형 배열 롤 셋을 이용하여 이중 곡률을 가공하는데 있어서 폭방향 성형과 길이 방향 성형의 우선 순위에 따라 판재의 변형 양상은 폭 방향의 곡률에 대해서는 큰 차이를 보이지 않지만 길이 방향에 대해서는 길이방향의 곡률을 성형한 후 폭 방향의 곡률을 성형하는 경우보다 폭 방향의 곡률을 성형한 후 길이방향의 곡률을 성형한 경우가 동일한 입력곡률에 대해 생성되는 곡률이 더 크게 나타나는 경향을 보이게 되는데[7], 본 논문에서는 현재 조선업계에서 시행하고 있는 가공 방법인 폭 방향을 먼저 가공한 후에 길이방향을 가공하는 방법을 선택하였으며, 폭 방향에 대해 단일 곡을 먼저 생성한 후 길이방향을 곡률을 가공하는 성형 경로를 설계하고 이를 유한요소해석 및 성형실험을 이용하여 성형 검증을 하였다

2.1 성형경로 설계

두께가 8mm 이고 폭 방향 및 길이방향의 곡률이 각각 $2 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 인 오목형상을 가지는 판재를 가공하기 위하여 스프링백(springback)을 고려하여 가공단계를 18 단으로 결정하였다.

예비실험 및 예비 성형해석 결과로부터 발견된 오목형상의 경우 길이방향의 곡률 증가 시 폭 방향의 곡률이 감소되는 현상이 발생함을 고려하여 먼저 폭 방향 곡률만을 목표곡률보다 크게 가공한 후, 길이방향으로의 곡률을 추가하여 최종 원하는 곡률을 가진 제품으로 성형하는 경로를 선택하였다.

Fig. 1 에서처럼, 먼저 가공 후 최종 스프링백된 후의 폭 방향 곡률이 목표 곡률($2 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$)의 2 배인 $4 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 에 근접할 것으로 추정되는 최종 폭 방향 곡률을 각각 $7 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$, $7.5 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$, $8 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 인 3 가지 경우에 대하여 총 6 단에 성형하는 경로를 모델링 하여 폭 방향 단일 곡 성형에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 이 중 $7.5 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 인 경우가 폭 방향 목표 곡률에 제일 근사한 곡률 생성 결과를 확인하였고, 이를 (폭 방향 단일 곡이 형성된 형상) 전체 12 단에 걸쳐 길이방향 곡률을 추가하는 해석을 실시하였다. 이 때 폭 방향 곡률을 목표곡률 $2 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 보다

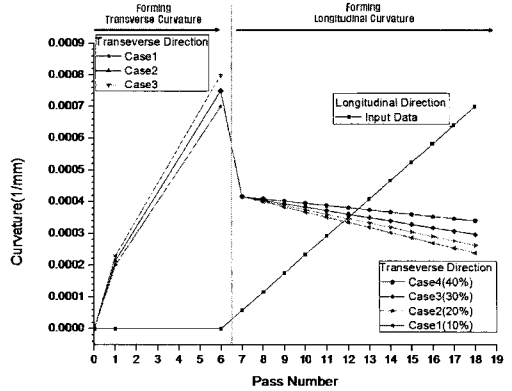


Fig. 1 Forming paths

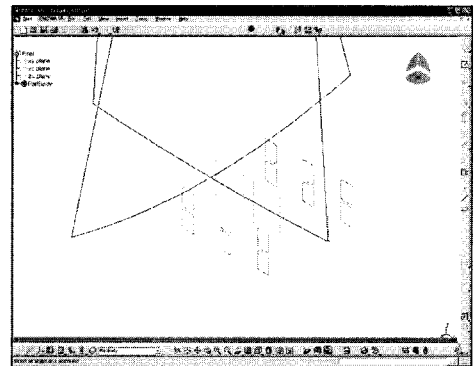


Fig. 2 Determination of roll position by CATIA

각각 10%, 20%, 30%, 40% 큰 곡률이 되도록 폭 방향의 곡률을 점진적으로 감소시켜 가면서 길이방향의 곡률을 추가하였다

Fig. 1 과 같이 설계된 각 단계에 대한 성형경로에 대하여 상용 CAD 프로그램인 CATIA 를 이용하여 선형 배열 롤 셋의 각 롤들의 위치를 Fig. 2 와 같이 생성하였다.

2.2 유한요소해석

해석 프로그램은 MARC 를 사용하였으며, 선형 배열 롤 셋의 각 롤들과 초기 소재에 대하여 Fig. 3 과 같이 모델링 하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 각 롤들은 강체의 곡면으로 모델링 하였고 소재는 8 절점 육면체 체적요소로 모델링 하였으며 요소 수를 줄이기 위하여 폭 방향에 대해서는 좌우 대칭인 점을 고려하여 1/2 만 모델링 하였고, 두께방향으로는 3 층의 요소가 배치되도록 하고, 폭 방향 및 길이방향으로는 요소 길이가 12.5mm 가 되도록 하여 총 요소 수가 9,600 개가 되도록 해석하였다.

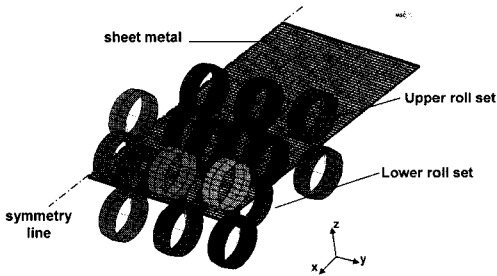


Fig. 3 Finite element analysis model of the incremental dual curvature bending

각 단계의 성형 종료 후 물들의 위치를 다음 단계의 위치로 변경하고 롤의 회전방향이 반대방향이 되도록 해석하였다

소재는 Grade-A mild steel 이며, 롤들 중 구동 롤인 중간 열의 롤들은 쿨롱(Coulomb)마찰계수 0.3으로 설정하고, 나머지의 롤들은 유유히로서 무마찰 조건으로 모델링하여 각 롤들의 중심에 대하여 일정한 회전속도로 회전하도록 하였다.

2.3 오목형상 제작을 위한 성형실험

Fig. 4 는 제안된 성형경로의 실험적 연구를 위해 제작된 선형 배열 롤 셋 장치의 프로토타입(prototype)이다. 이 장치를 이용하여 폭 1000mm, 길이 1000mm, 두께 8mm 의 크기인 평평한 소재로부터 폭방향 및 길이방향의 곡률이 모두 $2 \times 10^{-4} \text{mm}^{-1}$ 인 오목한 형상을 제작하는 실험을 수행하였고, 최종 성형된 형상을 레이저 변위 센서 인 LK-501 을 이용하여 곡률을 측정하였다.

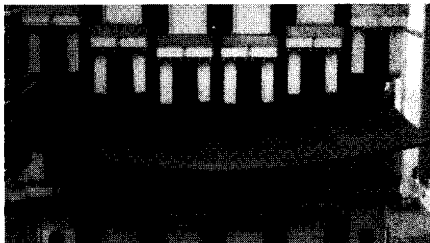


Fig. 4 The prototype of the line array roll set

3. 해석 및 실험결과

해석은 HP XW6400 공학용 워크스테이션에서 수행하였으며, 각 경우의 해석시간은 CPU 기준으로 3 주의 시간이 소요되었다.

Fig. 5~8 은 Fig. 1 에 나타난 4 가지 성형경로를 따라 유한요소해석을 수행하여 폭 방향(사각형) 및 길이방향(삼각형)에 대하여 스프링백 전(점선)과 후(실선)의 곡률을 도시한 것이다. 현재까지 제작된 선형배열 장치에서는 판재의 선단 및 후미부분이 3 개 열의 롤을 모두 통과하게 되면 반대방향으로 다시 진입할 수 없으므로 이 부분에 미성형구간이 발생한다. 따라서 길이방향의 곡률을 측정할 때 이 미성형구간을 제외하고 측정하였다.

Fig. 5~8 로부터 4 가지 성형경로 모두 15 단계에서 길이방향의 곡률이 목적곡률까지 성형되어짐을 볼 수 있으나 폭 방향의 곡률은 목적 곡률보다 약간 크게 성형되어짐을 알 수 있다. 그 중 최종 곡률을 목적곡률보다 10% 크게 한 경우가 폭 방향 목적곡률에 가장 근사하게 성형되었으며 이 성형경로를 채택하여 선형배열 롤 셋 장치에서 실험을 실시하였고, 성형실험 중에는 곡률측정이 곤란하므로 최종곡률만을 측정하여 Fig.5 에 도시하였다.

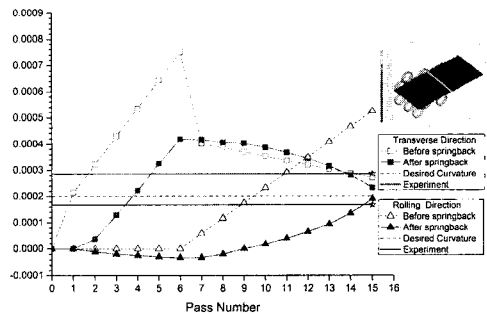


Fig. 5 Curvature of the analysis and experiment for the forming path (Case 1)

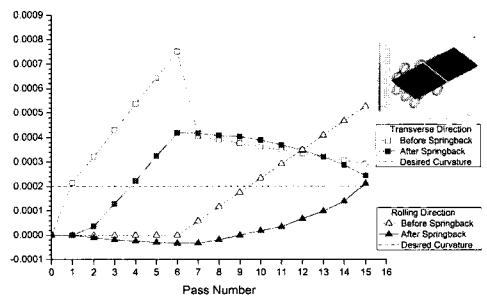


Fig. 6 Curvature of the analysis for the forming path (Case2)

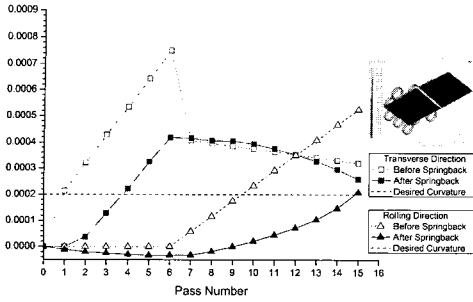


Fig. 7 Curvature of the analysis for the forming path (Case 3)

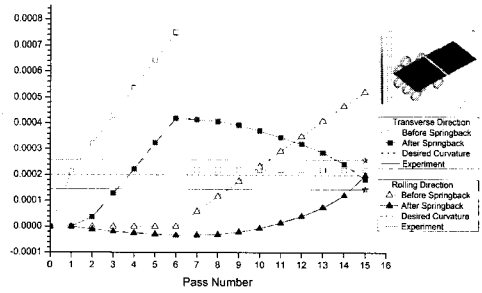


Fig. 9 Curvature of the analysis and experiment for the forming path (Case 5)

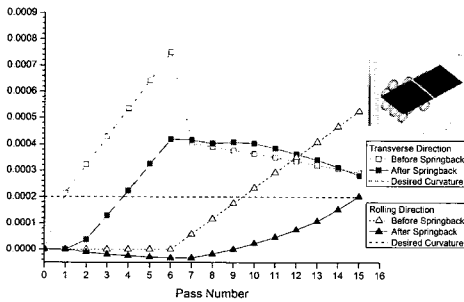
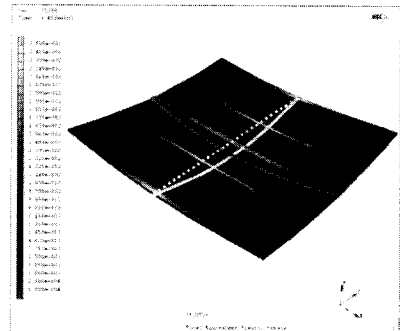
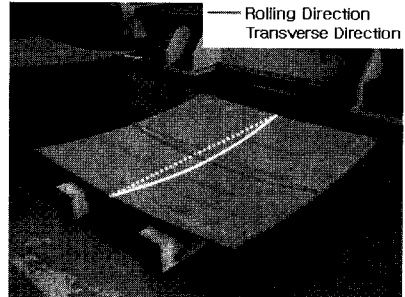


Fig. 8 Curvature of the analysis for the forming path (Case 4)



(a) FEM analysis



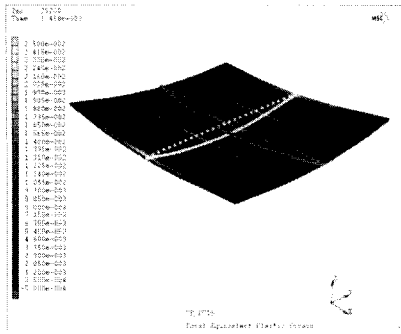
(b) Experiment

Fig.10 Final shape of the analysis and experiment for the forming path 1

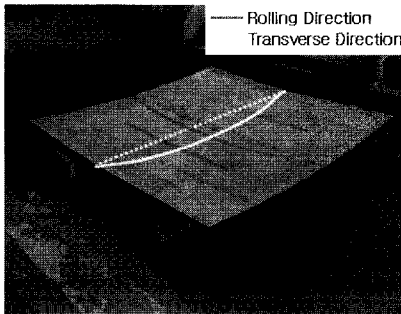
Fig. 5~8 에서의 결과를 고려하여, 폭 방향의 곡률을 성형한 후 폭 방향의 곡률 값을 목적곡률보다 10% 큰 값으로 일정하게 유지하면서 총 9 단에 걸쳐서 길이방향 곡률을 성형하는 보다 단순화된 성형경로인 Case 5 를 설계하여 해석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이 성형경로 역시 폭 방향 및 길이방향에 대한 스프링백 후의 곡률이 목적곡률 값으로 근사하게 성형되어짐을 알 수 있다.

Fig. 5 와 9 의 두가지 성형경로에 대한 해석 및 실험결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있고, 따라서 이 두 성형경로가 오목형상을 성형하기 위한 효과적인 성형경로가 될 수 있음을 알 수 있다. 폭방향의 곡률은 유한요소해석 결과가 실제 실험결과보다 약간 작게 예측되었으며 길이방향 곡률은 유한요소해석 결과가 실제 실험결과값보다 약간 크게 예측되었다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 요소의 폭방향 및 길이방향 크기를 줄여서 해석할 필요가 있으나 현재는 컴퓨터용량 및 계산시간 제약으로 수행하지 못하고 있다.

Fig. 10 은 Fig. 5 에서 스프링백 전의 값을 따라 유한요소해석 및 성형실험을 수행하여 얻은 최종형상이며, Fig. 11 은 Fig. 9 의 스프링백 전의 값을 따라 유한요소해석 및 성형실험을 수행하여 얻은 최종형상이다. 2 개의 성형경로에 대해 성형되어진 최종형상은 Fig.5 와 9 에서와 같이 소재의 중심부에서 생성되어진 곡률에서도 볼 수 있듯이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) FEM analysis



(b) Experiment

Fig.11 Final shape of the analysis and experiment for the forming path 5

4. 결론

본 연구에서는 선형 배열 롤셋을 이용하여 오목형상을 제작할 수 있는 성형 경로를 제안하고, 유한요소해석 및 선형 배열 롤 셋의 프로토타입을 이용한 성형실험을 수행하여 검증하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선형배열 롤 셋을 이용하여 이중곡률을 가지는 오목형상을 제작하기 위해 제안된 성형경로의 검증을 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 성형 실험한 결과와 비교적 잘 일치하였다.

(2) 본 연구에서 제안된 성형경로를 이용하여 원하는 오목형상을 제작할 수 있음을 확인하였으

며, 따라서 제안된 성형경로를 선박외판의 오목형상 제작에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 경상남도 지역산업 중점기술개발 사업인 “장방향 대형 후곡판용 점진적 롤 성형 시스템 개발”의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2004, An Effect of Process Parameters on the Generation of Sheet Metal Curvatures in the Roll forming Process, KSTP, Vol.13, pp.122~128.
- [2] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2004, Manufacture of Doubly Curved sheet Metals Using the Incremental Roll Forming Process and Prediction of Formed Shapes for Precision Forming, KSPE, Sem., pp. 95~102.
- [3] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2005, An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheet Blanks with Enhanced Process Features, Annals of CIRP, Vol. 54, No.1, pp.221~224.
- [4] D. S. Shim, C. G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, Y. S. Han, M. S. Han, 2006, A Study on the Line Array Roll Set Process for the Cold Fabrication of a Doubly Curved Metal Plate, KSTP, Oct., pp. 292~295.
- [5] D. S. Shim, C. G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, M. S. Han, S. W. Chung, 2008, An Experimental Study on Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Ship Hull Plates, KSTP, Vol. 17, pp. 27~34.
- [6] K. H. Kim, 1999. Design of Forming Rolls using Finite Element Analysis, J. of Ocean Eng. Tech., Vol.13, pp.75~81.
- [7] Society of Manufacturing Engineers, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed., Vol. 2, Chapter 8, p.16, 1984.