

## 다중곡률 판재성형을 위한 비정형롤판재성형 공정의 형상설계변수에 대한 연구

손소은<sup>1</sup> · 윤준석<sup>1</sup> · 김 정<sup>1</sup> · 강범수<sup>#</sup>

### Effect of Shape Design Variables on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming of Multi-curved Sheet Metal

S. E. Son, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang

(Received November 29, 2013 / Revised December 13, 2013 / Accepted December 17, 2013)

#### Abstract

Flexibly-reconfigurable roll forming (FRRF), which is a sheet forming process for multi-curved sheet metal, may solve both the economic and technical problems incurred in using a conventional die forming process. In the FRRF process, the multi-curved sheet metal is formed by different strain distributions on the sheet metal, and the reconfigurable rollers are used as tools during the forming. Therefore, a thorough investigation focused on the reconfigurable rollers is required for the realization of the FRRF process prior to the fabrication of FRRF machine. In the current study, a series of finite element simulations were conducted to study the load distributions experienced by the reconfigurable roller. In order to verify the shape design variables, the effect of the metal thickness on the curvatures of sheet is also presented.

**Key Words** : Flexibly-Reconfigurable Roll Forming, Reconfigurable Roller, Multi-Curved Shape, FEM

#### 1. 서 론

일반적으로 항공기는 공기역학적 특성으로 인하여 다중곡률형상의 외피구조물을 필요로 한다[1]. 최근 급격한 산업구조의 발달과 시장성 확대로 인하여 군용항공기 뿐만 아니라 민간 항공기의 개발에 대한 관심이 증가하고 있으며, 무인항공기(UAV, Unmanned aerial vehicle), 개인용항공기(PAV, Personal aerial vehicle)등을 비롯하여 다양한 목적과 그에 알맞은 형상의 항공기 개발이 진행되고 있다[2]. 이에 따라 제작자는 물론 수요자의 요구에 따라 다양한 형상의 항공기 제작이 이루어지고 있다. 항공기 외피구조물은 복합재, 알루미늄 및 티타늄 합금 등의 경량성 재료가 주로 사용되며, 복잡잡하고 다양한

형상으로 인하여 다품종 소량생산 기반의 가공방식을 택하고 있다[3]. 전형적인 금속 판재 가공 방법은 Fig. 1과 같은 금형과 프레스(Press)를 이용한 방법이다. 이러한 판재가공방법은 가전제품, 자동차, 일반 자재 등의 대량생산공정에는 적합하나, 항공기, 조선, 비정형건축물 등의 다양한 형상을 요구하는 다품종 소량생산 공정에는 적용하기 부적절하다. 또한, 다양한 형상에 따른 다수의 금형의 관리 및 지속적인 설계변경으로 인하여 경제성이 현저하게 떨어진 다. 따라서 기존의 곡판 가공 공법의 단점을 보완하고자 가변성형기술(Flexible forming technology)이 제안되었다[4~6]. Fig. 2(a)는 가변성형공정의 하나인 다점성형공정(Multi-point forming process)으로서, 다수의 펀치(Punch)를 이용하여 단일금형에 준하는

1. 부산대학교 항공우주공학과

# Corresponding Author: Dept. of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

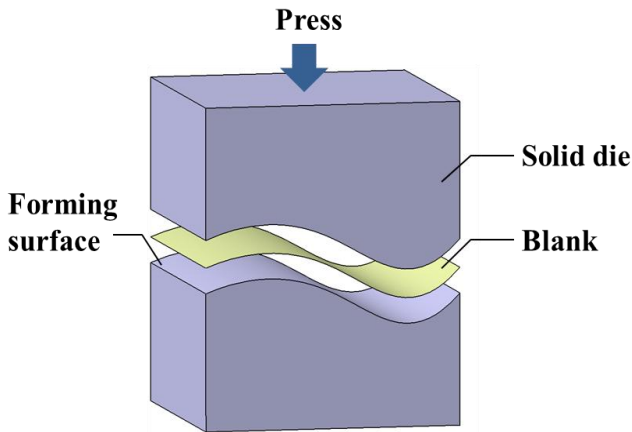


Fig. 1 Schematic diagram of conventional die forming process

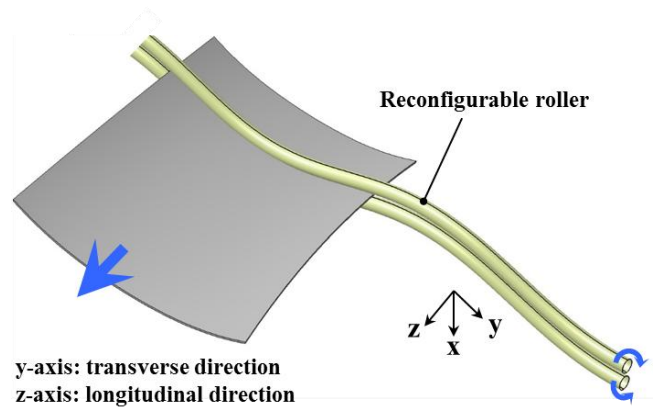


Fig. 3 Schematic diagram of flexibly-reconfigurable roll forming concept



(a) Adjusted flexible die for multi-point forming



(b) Multi-point forming process using urethane pad  
 Fig. 2 Picture of multi-point forming machine

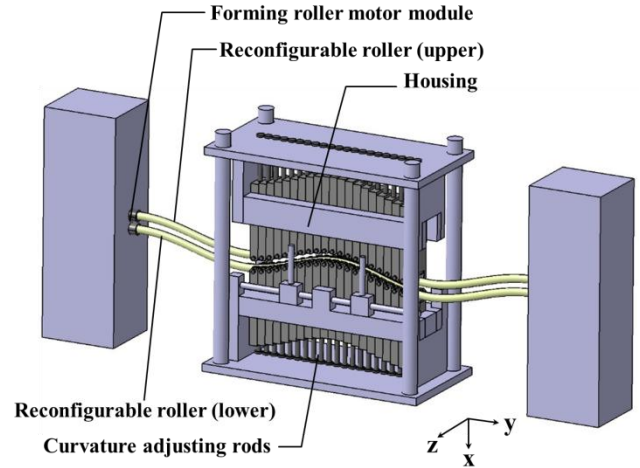


Fig. 4 Schematic diagram of machine for flexibly-reconfigurable roll forming

성형면을 구현함으로써 단일금형과 같은 효과를 낼 수 있다.

다점성형공정은 조선 분야에서 이용되고 있는 선상가열법(Line heating method)과 같은 수작업을 대체할 수 있는 가변성형법으로서 가용성이 확인 되었

다[7]. 그러나 다점성형공정은 펀치로 구성된 연속적이지 않은 성형면으로 인해 발생하는 딴플(Dimple)과, 곡판의 형태와 곡률, 판재 두께에 따라 생기는 성형오차로 인해 정밀성이 떨어진다. 또한, 성형공정 후 가장자리를 레이저커팅 등을 통하여 절단함으로써 재료손실로 인한 경제적 손실이 크다. 딴플 등의 성형오차를 줄이기 위해서 Fig. 2(b)와 같이 판재와 펀치사이에 우레탄패드(Urethane pad)를 삽입하거나 펀치의 크기를 줄이는 등 후속연구가 진행되고 있으나 정밀도나 재료손실로 인하여 여전히 보완해야 할 점이 과제로 남아있다[8, 9].

최근 다중곡률형상의 판재성형을 위한 신개념의 성형방법인 비정형롤판재성형(FRRF, Flexibly-reconfigurable roll forming)기술이 제안되었다[10, 11].

비정형롤판재성형 기술은 Fig. 3 에 도시한 바와 같이 유연하게 휘어지는 비정형롤러(Reconfigurable roller)를 상하로 배치하여, 롤러 사이에 판재를 끼워 상하 롤러를 회전시켜 판재를 밀어내어 성형하는 새로운 개념의 기술이다. 이는 Fig. 4 에 나타난 장비의 곡률조정막대(Curvature adjusting rod)로 비정형롤러의 곡률을 조정하여 판재의 종방향 변형률 분포를 제어함으로써 원하는 곡률의 다중곡률형상의 판재성형이 가능하도록 한다.

앞서 언급한 다점성형공정은 금형의 크기에 따라 성형할 수 있는 판재의 크기가 제한적인 반면, 비정형롤판재성형 기술은 일반적인 롤성형공정 방법과 같이 종방향 즉 출구방향에 대하여 길이의 제한 없이 연속적으로 성형할 수 있는 것이 가장 큰 장점이다. 뿐만 아니라 이 공정은 다점성형공정에서와 같이 가장자리의 추가적인 절단가공을 필요로 하는 면적이 확연히 감소하며 편치배열에 의한 불연속적 성형면 때문에 생기는 덩플 현상도 해결할 수 있다. 따라서 비정형롤판재성형에 관한 지속적인 연구가 필요하며, 실제 실험을 위한 Fig. 4 와 같은 장비 제작이 요구된다.

본 연구에서는 판재성형장비를 제작하기 위한 선행 연구로서, 유한요소해석을 통하여 성형공정 시 롤러에 가해지는 하중에 대하여 알아보았다. 대표적인 다중곡률형상인 볼록형(Convex-type), 안장형(Saddle-type), 비틀린 형상(Twist-type)에 대하여 하중 해석을 수행하였고, 가장 큰 하중이 발생하는 볼록형 형상에 대하여 판재 두께 변화에 따른 하중에 대하여 알아보았다. 또한, 판재 두께를 매개변수(Parameter)로 설정하여 두께에 따른 다른 곡률분포를 알아보았다.

## 2. 비정형롤판재성형 공정 모델링 및 해석

일반적으로 굽힘가공을 요하는 다중곡률형상의 판재를 성형하기 위해서는 3 개 이상의 롤러를 적절히 배치하고 그 사이로 성형하고자 하는 판재를 통과시켜 성형한다[12]. 이와 달리 비정형롤판재성형은 롤러를 상하로 대응되게 배치하여 그 사이로 판재를 통과시켜 성형한다. 비정형롤러는 곡률조정막대로 상하롤러 사이의 간격을 조절하여 원하는 곡률을 형성하며, 이는 다중곡률형상으로 성형 하는데 있어서 핵심적인 기술이다. Fig. 5 는 판재의 중립축과

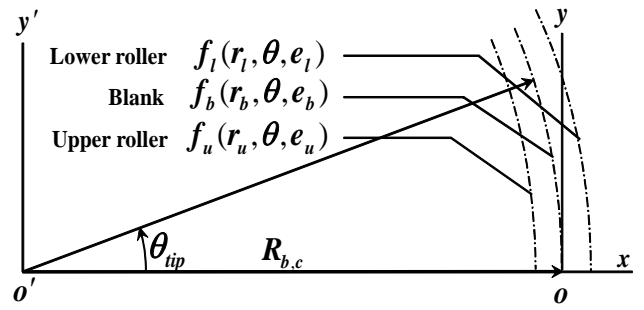


Fig. 5 Geometrical design variables in flexibly-reconfigurable roll forming process

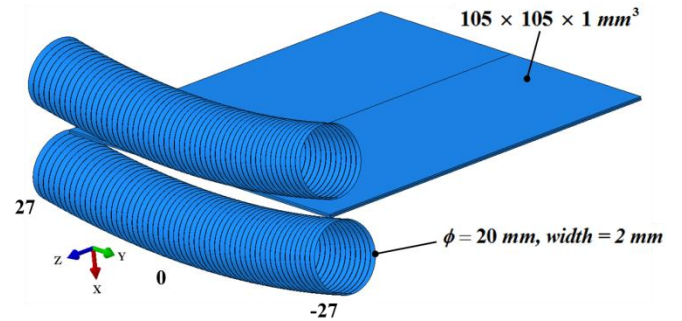


Fig. 6 FEM model to simulate flexibly-reconfigurable roll forming

상하롤러의 회전축을 도시하였으며, 형상설계변수(Shape design variable)를 도시하였다. 여기서 아래첨자  $b, u, l$  은 각각 판재, 상부롤러, 하부롤러를 의미한다. 본 연구에서는 성형하고자 하는 목적곡면(Objective surface)의 형상에 따라 바뀌는 설계 변수가 3 개이다. 이는 Fig. 5 에 도시한 바와 같이 판재의 중심부에서의 곡률반경  $R_{b,c}$ , 판재의 중심부와 끝점까지의 사잇각  $\theta_{tip}$ , 판재 중심축의 이심률  $e_b$  등이다. 여기서 곡률반경과 사잇각은 목적곡면의 횡방향에 관한 곡률과 형태를 결정하며, 성형롤러의 간격은 종방향 즉 성형진행방향 곡률에 영향을 미친다. 형상설계변수 중 하나인 이심률은 판재의 중심부에서 거리가 멀어질수록 곡률이 변하는 판재를 성형하기 위한 것으로서 원호로 이루어지지 않은 형상의 곡판 가공시 그 값에 따라 다양한 형태의 곡판 성형이 가능하도록 한다.

설계 변수의 값은 성형하고자 하는 다중곡률형상의 종류에 따라 달라진다. 본 연구에서는 볼록형과 안장형의 경우  $R_{b,c} = 300mm$ ,  $\theta_{tip} = 10^\circ$ ,  $e_b = 0$  로 설정하였고, 비틀린 형상의 경우에는  $R_{b,c} = 600mm$  로 설정하고 이에 따라 사잇각도 조정하였다.



유한요소해석은 상용해석 프로그램인 ABAQUS 의 Abaqus/Explicit solver 를 이용하였다. 성형공정은 둘로 나누어 질 수 있으며 판재를 롤러 사이에 물리게 하는 과정과 판재를 밀어내기 위하여 롤러가 회전하는 과정으로 이루어진다. Fig. 6 은 볼록형 판재 성형을 위한 해석 모델을 나타낸 것으로 유연하게 휘어지는 성형롤러는 분할하여 연속적으로 배열된 고리 형태로 모델링 하였다. 본 연구에서는 고리의 지름은 20mm, 폭 2mm 로 설정하였다. 모든 분할된 고리의 위치 산출은 판재를 롤러 사이에 맞물리는 과정에서 이루어지며 회전축에 관한 2 차 곡선의 접선방향을 따라 배열된다. 유한요소해석 시 모든 회전운동과 병진운동에 대한 경계조건은 분할된 고리의 중심을 원점으로 하는 국부좌표계를 따른다. 고리의 개수는 판재의 횡방향 길이에 따라 정해지며 롤러의 회전수는 판재의 종방향 길이에 따라 정의된다.

판재는 Al 2024-T4 의 물성을 적용하였으며, 물성 모델로는 가공경화식 (소성강도 계수  $K = 690MPa$ , 가공경화지수  $n = 0.16$ , 최대인장강도  $UTS = 430MPa$ ) 을 사용하였다. 판재의 방향별 길이와 두께는, 앞서 설정한 곡률반경과 사잇각을 고려하여  $105 \times 105 \times 1mm^3$  로 Solid element 를 사용하여 모델링 하였다.

### 3. 다중곡률형상에 따른 하중

대표적인 다중곡률형상인 볼록형, 안장형, 비틀린형상의 성형공정에 대한 유한요소해석을 수행하였고, Fig. 7 은 해석결과를 나타내었다. 해석결과로부터 롤러하중을 예측하기 위해 고리의 국부좌표계의 원점에서 발생하는 반력을 알아보았다. Fig. 6 에 나타낸 바와 같이, y 축 좌표가 0 인 중앙에 놓여있는 고리는 0 번으로 설정하였고, 0 번 고리로부터 y 축의 양의방향에 놓여있는 고리의 번호는 양수로 음의방향에 놓여있는 고리의 번호에는 음수로 표기하였다. 굽힘(Bending)하중으로 인하여 상부롤러보다 하부롤러에서 받는 하중이 더 크고 Fig. 6 에 도시한 바와 같이 z-x 면에 대칭이므로 y 축의 양의 방향으로 놓여 있는 고리들의 하중만 알아보아도 무관하다. 반면에 비틀린형상의 경우는 설정한 형상설계변수의 값이 면대칭으로 주어지지 않으므로 하부롤러 전체의 반력값을 알아 보았다.

Fig. 8 은 곡률형상에 따라 가장 큰 반력을 받는

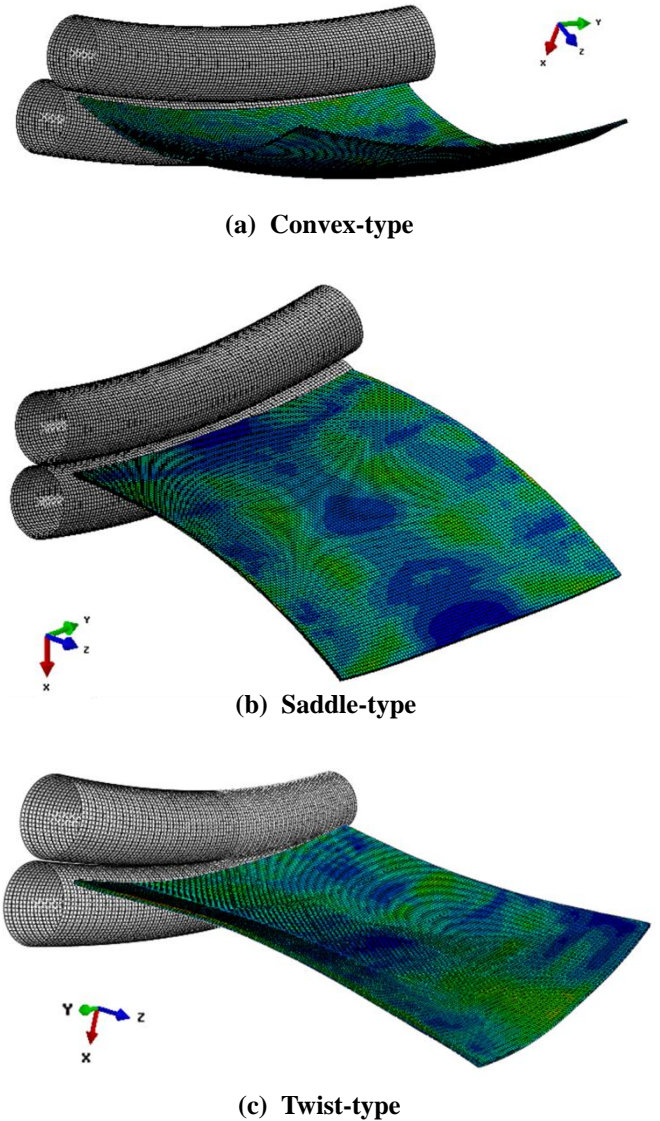


Fig. 7 Numerical results of representative multi-curved shape

롤러가 어느 위치에 있는지를 명시하였고 성형공정 중 최대반력을 받게 되는 순간의 하중분포를 나타내었다. 판재를 볼록형으로 성형시 롤러의 반력분포는 중앙고리인 0 번 고리가 최대 반력을 받고 있고 판재의 가장자리로 갈수록 반력의 크기가 줄어드는 양상을 보이고 있다. 이와는 반대로 안장형 형상 성형시 발생하는 반력은 가장자리로 갈수록 크기가 증가한다. 볼록형과 안장형 형상의 반력분포는 0 번 고리를 중심으로 대칭을 이루는 반면, 비틀린형상은 대칭을 이루지 않으며 한쪽으로 치우치는 경향이 있다. 세형상의 반력을 비교해 본 결과, 가장 큰 하중을 요하는 형상은 볼록형 형상임을 알 수 있다.

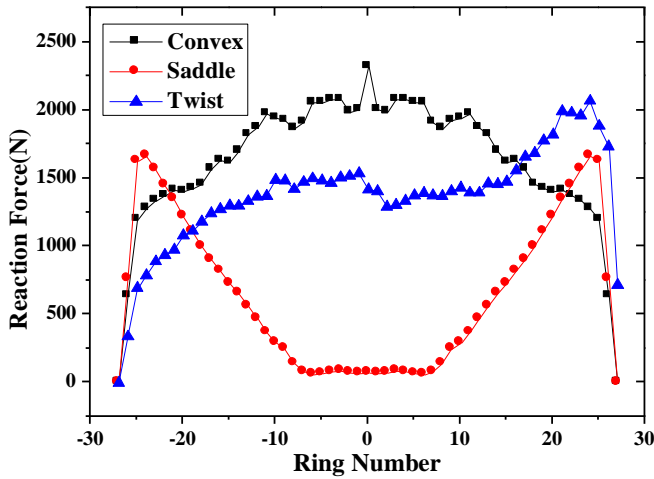


Fig. 8 Magnitude of reaction forces according to shape type at maximum load

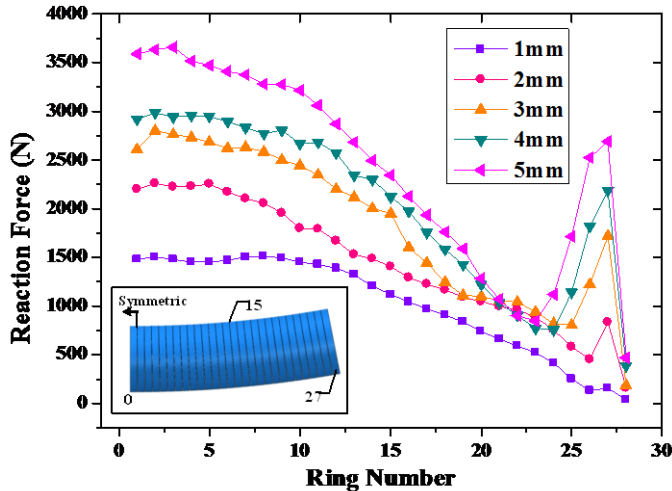


Fig. 9 Magnitude of reaction force according to blank thickness

#### 4. 판재 두께에 따른 하중

장비제작을 위한 선행연구로서 대표적인 다중곡률형상인 볼록형, 안장형, 비틀린 형상에 대한 하중 분포를 유한요소 해석을 통해 알아본 결과 볼록형 형상이 가장 큰 하중을 필요로 하는 것을 알 수 있었다. 성형장비를 제작할 경우 판재 두께의 변화도 고려하여야 하므로 두께에 따른 하중을 파악하였으며, 가장 큰 하중을 요하는 볼록형 형상에 대하여 두께에 따른 하중 분포를 분석하였다.

해석 조건은  $R_{b,c} = 300mm$ ,  $\theta_{ip} = 10.12^\circ$ ,  $e_b = 0$  이며 마찰계수는 0.1을 적용하였으며 중간부분 압축률은 8% 이고 가장자리 압축률은 0.5% 이다. 유한요소

해석결과로 Fig. 9는 판재 두께가 1~5mm 일 경우의 반력을 나타내고 있다. 볼록형 형상의 경우, 도시한 바와 같이 음수번호대의 고리들과 대칭을 이루므로 0번 고리부터 27번 고리까지의 결과값만을 나타내었다. 판재 두께가 두꺼울수록 전체적으로 큰 반력 값을 가지고 중심부에서 하중이 집중되고 가장자리로 갈수록 감소하다가 가장자리에 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는 0번 고리에 가장 많은 압축이 진행되며 판재가 두꺼워 질수록 더 큰 압축량을 위해 하중이 집중되기 때문이다. 또한, 가장자리에서 하중이 증가 하는 현상은 볼록형으로 배치된 비정형롤러의 곡률로 인해 중앙부분을 압축하면서 양쪽 방향으로 발생하는 굽힘하중으로 인해 판재와 롤러가 맞닿을 때 가장자리에도 하중이 다소 상승하는 것으로 판단되며 판재가 두꺼워 질수록 이러한 현상이 뚜렷하다.

#### 5. 성형성 비교

목적곡면의 곡률반경과 이심율, 그리고 판재의 중심부와 가장자리까지의 사잇각을 모두 같은 조건으로 설정하며 판재 두께에만 변화를 주었을 때 중방향 곡률 분포를 알아보았다. 중심선은 Fig. 10에 도시하였고 판재 두께에 따른 곡률변화를 알아보기 위하여 모든 공정이 끝난 후 중심선의 좌표값을 추출하였다. 중심선의 x, z 의 좌표만으로 곡률을 알아 보며 추출한 데이터의 초기값은 시작점이 동일하지 않기 때문에 모두 (0, 0)으로 일치시킨 후 원점을 중심으로 회전변환을 하여 시작점과 끝점을 이은 축을 일치시켰으며, 이를 Fig. 11에 도시하였다.

최소 판재 두께인 1mm의 경우에 변형률이 가장 크므로, 가장 큰 곡률을 가질 것이라 예상하였다. 그러나, Fig. 11을 통해 곡률비교를 해 보면 판재의 두께가 2mm일 때 가장 큰 곡률을 형성한다. 판재 두께 2~5mm의 경우에는 두께가 얇을수록 곡률이 더 크기 때문에 판재 두께와 곡률반경은 비례하나 1mm의 경우에는 곡률반경이 2mm보다 더 큰 값을 가져, 판재 두께 2~5mm에서 나타난 판재 두께와 곡률반경의 관계에서 벗어난다.

Fig. 12는 1~5mm의 유한요소 해석 결과로서 응력 수준을 도시한 것으로서, 2mm가 응력수준이 가장 낮고 5mm까지 점차 증가한다. 그러나 1mm의 경우, 앞서 알아본 판재두께와 곡률의 관계와 흡사하게 판재

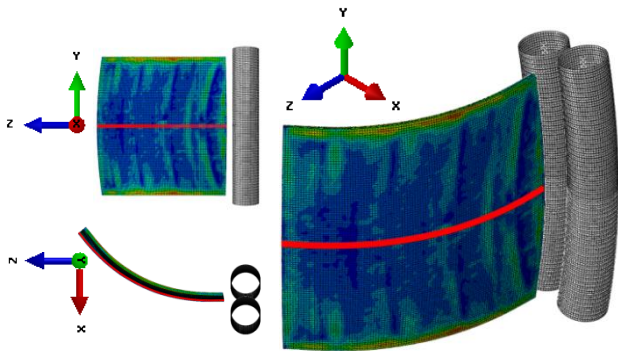


Fig.10 Center-line of blank to analyze longitudinal curvature

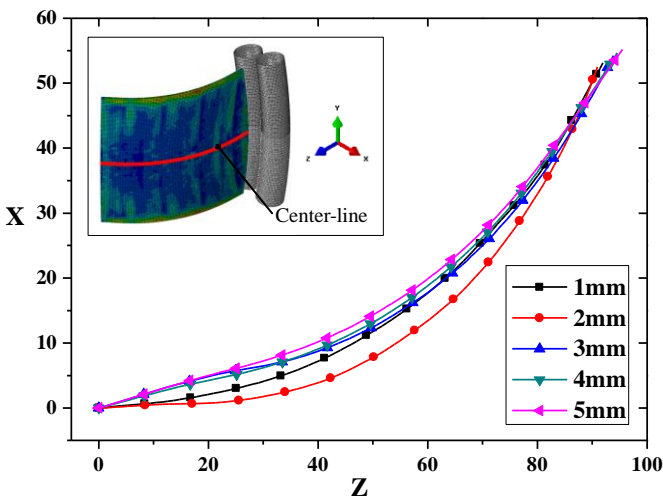


Fig.11 Formability comparison through transformed coordinate

두께가 2mm일 때보다 높은 응력수준을 보이고 있다. 이는 판재 두께가 1mm일때, 박판금속의 경우가 적용되어, Coining 효과로 인하여 보다 더 작은 곡률을 가지는 결과가 나온 것임을 예상할 수 있다[13]. 따라서 형상설계변수 도출 시에 Coining 효과를 고려하여 매개변수로 두께를 설정해야 하며, 후판과 박판일 경우를 고려하여야 한다.

### 6. 결 론

본 연구에서는, 성형장비 설계를 위한 선행연구로서 비정형롤판재성형 공정을 활용하여 대표적인 다중곡률형상의 해석적 연구를 통하여 각각의 고리가 받게 되는 하중을 알아보았으며, 매개변수 정립을 위하여 판재 두께에 따른 성형성에 대하여 고찰 하였다.

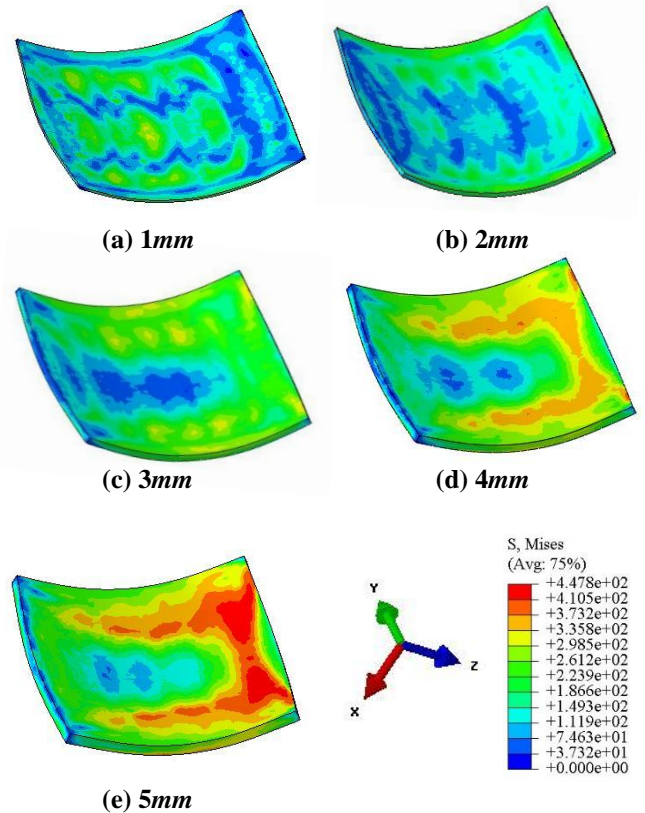


Fig.12 Results of FE simulation depending on the thickness of plate using flexibly-reconfigurable roll forming process

유한요소해석을 위해 목적곡면의 횡방향 이심률과 곡률반경 판재의 중심부와 끝점까지의 사잇각을 형상설계변수로 두어 블록형과 안장형 그리고 비틀린 형상을 모델링 하였고 해석 수행 결과를 통해 블록형이 가장 큰 하중이 필요함을 알 수 있었으며, 안장형이 가장 적은 하중을 요하는 것을 알 수 있었다.

성형장비 설계 시, 다양한 두께의 판재를 성형할 경우도 고려하여야 하므로 판재 두께에 따라 하중 분포가 어떻게 달라지는지 변화양상을 알아보기 위한 해석을 수행하였다. 전체적으로 하중이 롤러의 중앙부분에 집중하며 두께가 두꺼울수록 더 높은 하중분포를 보이고 롤러 가장자리 부분의 하중집중이 약간 증가한다는 것을 알 수 있었다.

형상설계변수의 정확성 확인과 매개변수 설정을 위해 같은 조건일 때 판재 두께에 따른 종방향 곡률을 확인하였다. 해석을 통해 1~5mm의 성형 후 곡률을 확인해 본 결과, 2~5mm의 곡률반경은 판재 두

계와 비례하나 1mm의 곡률반경은 2mm의 경우보다 크며, 2~5mm에서 알 수 있었던 두께와 곡률반경의 관계에서 벗어나는 경향을 보인다. 이는 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 응력수준을 통해 Coining 효과에 의한 현상임을 추측할 수 있으므로 매개변수로써 두께를 설정할 때 Coining효과를 고려하여야 함을 알 수 있었다. 또한 이를 바탕으로 비정형롤판재성형 형상설계변수에 대한 후속 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012 R1A5A1048294)과 한국에너지기술평가원(No. 20124030 200020)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] Z. Y. Cai, S. H. Wang, X. D. Xu, M. Z. Li, 2009, Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal, J. Mater. Process. Technol. Vol. 209, No. 1, pp. 396~407.
- [2] T. H. Yi, K. T. Kim, S. M. Ahn, D. S. Lee, 2011, Technical Development Trend and Analysis of Futuristic Personal Air Vehicle, Current Industrial and Technological Trend in Aerospace, Vol. 9, No. 1, pp. 64~76.
- [3] J. Y. Hwang, S. M. Choi, S. H. Jeong, 2003, Strategies for Building Up Capabilities in the Korean Aircraft Sub-System Industry, J. Kor. Technol. Innovation Society, Special Volume, pp. 551~568.
- [4] D. S. Shim, D. Y. Yang, K. H. Kim, S. W. Chung, M. S. Han, 2010, Investigation into Forming Sequence for the Incremental Forming of Doubly Curved Plates Using the Line Array Roll Set (LARS) Process, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 50, No. 2, pp. 214~218.
- [5] F. X. Tan, M. Z. Li, Z. Y. Cai, 2007, Research on the Process of Multi-Point Forming for the Customized Titanium Alloy Cranial Prosthesis, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 187-188, pp. 453~457.
- [6] J. W. Park, Y. S. Hong, S. H. Lim, 2000, Dieless Forming Apparatus, US Patent: 6151938.
- [7] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui, Q. G. Yan, 2002, Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 129, No. 1, pp. 333~338.
- [8] S.C. Heo, Y. H. Seo, H. G. Noh, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, Numerical Study on Effect of Using Elastic Pads in Flexible Forming Process, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 34, No. 5, pp. 549~556.
- [9] S. C. Heo, Y. H. Seo, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2009, Study on Application of Flexible Die to Sheet Metal Forming Process, Trans. Mater. Process, Vol. 18, No. 7, pp. 556~564.
- [10] J. S. Yoon, S. E. Son, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2013, Flexible Roll Forming Technology for Multi-Curved Sheet Metal Forming, Trans. Mater. Process, Vol. 22, No.5, pp.243~249.
- [11] B. S. Kang, J. S. Yoon, 2013, Sheet Forming Apparatus with Flexible Rollers, KR Patent: 10-1309228.
- [12] S. H. Lee, G. H. Song, S. J. Lee, B. M. Kim, 2013, Prediction of Three-Dimensional Strip Profile for 6-High Mill in Thin-Strip Rolling, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 35, No. 8, pp. 855~861.
- [13] W F. Hosford, R, M. Caddell, 2011, Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Cambridge University, New York, p. 101.