

## 다중곡률형상의 판재성형을 위한 가변롤성형 기술

윤준석<sup>1</sup> · 손소은<sup>1</sup> · 송우진<sup>2</sup> · 김정<sup>1</sup> · 강범수<sup>#</sup>

### Flexible Roll Forming Technology for Multi-Curved Sheet Metal Forming

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

(Received March 28, 2013 / Revised June 10, 2013 / Accepted June 18, 2013)

#### Abstract

The multi-point forming (MPF) process for three-dimensional curved sheet metal has been developed as an alternative to the conventional die forming process since MPF allows the manufacturing of various shapes using one die set and reduce the cost of production. However, the MPF process cannot provide high quality products yet due to defects occurring in the sheet such as dimples and wrinkles. It can also lead to economic loss because of long tool setup time and additional machining required outside of the sheet formed area. In this study, a new sheet metal forming method, called flexible roll forming (FRF), is proposed to solve the problems of existing processes for three-dimensional curved sheet metal. This progressive process utilizes adjusting rods, as well as upper and lower flexible rollers as forming tools. In contrast with the existing processes, FRF can reduce the additional production costs because of the possible blank size for the part longitudinal direction, which is unrestricted. In this research, methods and procedures of the flexible roll forming technology are described. Numerical forming simulations of representative three-dimensional curved sheet products are also carried out to demonstrate the feasibility of this technology.

**Key Words** : Flexible Roll Forming Technology, Flexible Roller, Sheet Metal Forming, 3D Curved Surface, FEM

## 1. 서 론

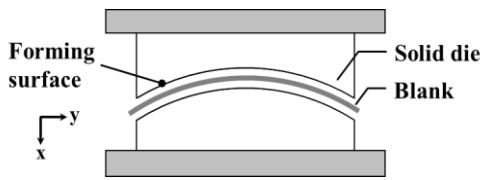
일반적으로 단일 또는 다중곡률을 갖는 판재가공은 Fig. 1(a) 과 같이 목적형상(Objective shape)에 부합하는 금형과 프레스장치에 의해 이루어진다. 하지만, 이러한 전통적인 가공방식은 형상별 소요되는 금형 개발 및 관리 등에 따르는 추가적인 비용으로 인하여 경제성을 만족시키기 어려우며 특히, 항공이나 조선 산업과 같이 다품종 소량생산을 기반으로 하는 부품 가공에는 적합하지 않다. 선체용 곡판 가공은 이러한 이유로 여전히 선상가열법(Line heating

method)[1, 2]과 같은 수작업에 의존하고 있으며, 항공기용 판재가공은 다양한 형상으로 인해 부득이하게 다수의 금형을 제작하여 사용하고 있으나 생산 단가가 높은 실정이다. 최근에는 개발자 및 수요자의 요구에 따라 자동차, 고속열차 및 비정형 건축물(Free-form construction)의 외피 구조물 등에 이르기까지 다양한 형상을 가지는 판재가 생산되고 있다. 하지만 기존 방식으로 인하여 여전히 생산비용이 높은 단점이 있다. 따라서 기존의 곡판 가공 공법을 대체하기 위한 가변금형성형기술(Flexible die forming technology)로서 다점샌드위치 성형법(Multi-point

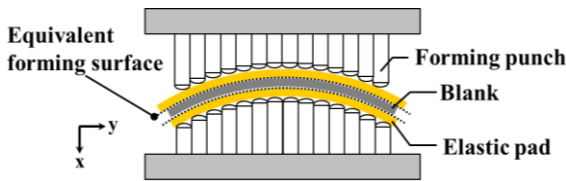
1. 부산대학교 항공우주공학과

2. 부산대학교 부품소재산업협력연구소

# Corresponding Author : ERC/ITAF, Pusan National University, E-mail : bskang@pusan.ac.kr



(a) Conventional die forming process



(b) Multi-point forming process

Fig. 1 Schematic views of conventional die forming and multi-point die forming process

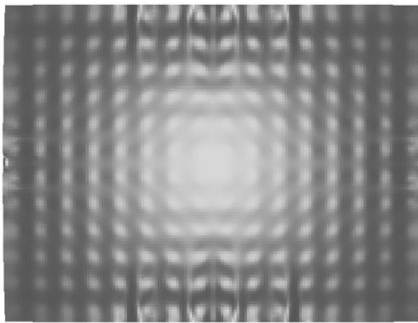
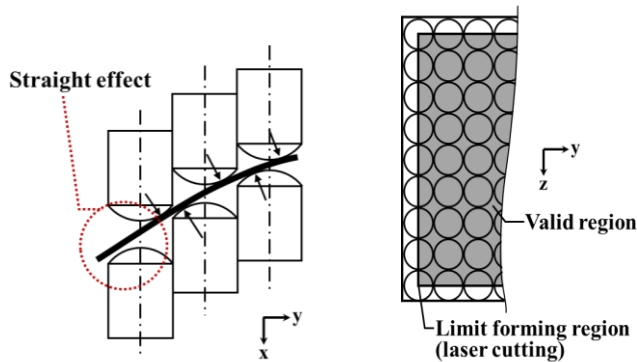


Fig. 2 Sheet metal with dimples and wrinkles



(a) Straight effect (b) Limit forming region

Fig. 3 Forming error at a edge of the blank

sandwich forming), 점진적 롤 성형법(Incremental roll forming) 등 여러 가지 연구가 진행되고 있다[3~5]. 특히 가변성형기술의 하나인 다점성형공정(Multi-point forming process)은 Fig 1(b) 와 같이 다수의 펀치(Punch)를 배열하여 단일금형에 준하는 등가성형면

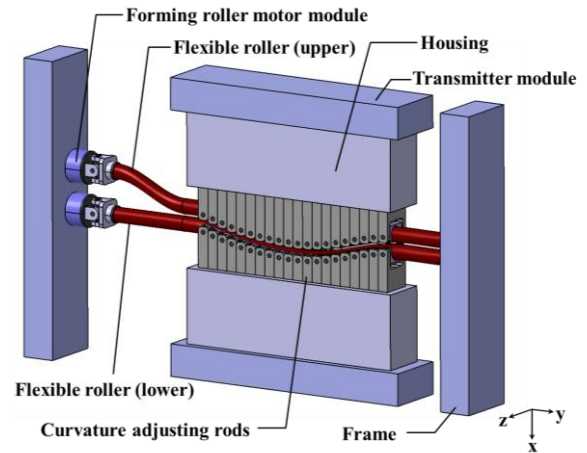


Fig. 4 Schematic diagram of flexible roll forming apparatus(Patent pending: No. 10-2013-0024711)

(Equivalent forming surface)을 구현함으로써 단일금형과 같은 효과를 낼 수 있는 기술이다. 따라서 금형 개발에 소요되는 비용 및 시간적 측면에 있어서 경제성이 우수하다고 할 수 있으므로 다품종 소량생산에 적합한 가공방식이라 할 수 있다. 하지만 판재와 펀치의 소재물성(Material property), 펀치의 크기, 곡판의 형태와 곡률, 판재의 두께 등에 따라 Fig. 2 와 같이 덤플(Dimple), 주름(Wrinkle) 등의 성형오차가 발생하고 있다[6]. 이러한 성형오차는 근본적으로 펀치간 높이 차이로 인해 발생하는 판재와 다점금형 사이의 불규칙한 공간에서 기인하며, 이를 보완하기 위한 방법으로 탄성패드의 사용, 펀치의 크기 축소, 분할성형, 과도 굽힘법, 탄성회복 보정 등에 대한 연구가 진행되고 있으나 아직까지 만족할 만한 정밀도와 생산성을 가지지 못하고 있는 실정이다[7~9]. 또한 Fig. 3 과 같이 불연속적인 성형면으로 인하여 성형공정 후 가장자리를 레이저커팅(Laser cutting) 등을 통하여 절단하여야 하며, 이에 따라 재료손실(Material loss)로 인한 경제성 문제가 대두되고 있다[10].

본 연구에서는 다중곡률형상의 판재성형을 위한 신개념의 성형방법을 제안한다. 가변롤성형(FRF, Flexible roll forming) 기술은 Fig. 4 에 도시한 바와 같이, 다수의 곡률조정펀치(Curvature adjusting punch)와 휘어질 수 있는 성형롤러(Flexible roller) 등을 이용하여 판재를 성형한다. 이 밖에 모터(Motor) 등으로 구성된 곡률조정펀치 길이조절장치와 성형롤러에 토크를 제공할 수 있는 구동장치로 이루어져 있다. 전술

한 다점성형공정 등은 금형의 크기에 따라 성형할 수 있는 판재의 크기가 제한적인 반면, 가변롤성형 기술은 일반적인 롤성형공정(Roll forming process)방법과 같이 종방향(Longitudinal direction)에 대하여 길이의 제한이 없는 것이 가장 큰 특징이다. 또한 성형 공정 후 추가적인 절단가공을 크게 요하지 않으므로 경제성이 탁월하다고 할 수 있으며, 성형면이 비교적 연속적이므로 앞서 언급한 성형오차를 현저히 줄일 수 있다. 이 밖에도 가변롤성형은 다른 성형공정과 달리 장치의 구성이 간단하며 이에 따라 설치공간간의 확보가 용이하다. 본 연구는 이러한 획기적인 판재 성형 장치의 개발을 위한 타당성연구(Feasibility study)로서 가변롤성형 장치의 구성과 성형방법을 제시하였으며, 대표적인 다중곡률형상인 볼록형(Convex-type), 안장형(Saddle-type), 비틀린 형상(Twist-type) 등에 대한 수치적 연구를 수행하였다.

## 2. 가변롤성형기술의 구성과 방법

가변롤성형기술은 일반적인 롤성형장비와 달리 휘어지는 성형롤러를 이용하며, 상하로 대응되게 배열된 성형롤러 사이에 판재를 맞물린 채 성형롤러들의 회전에 의해 밀려나오면서 성형이 이루어진다. 이때 판재의 성형 형상은 두 개의 성형 롤러의 형상 및 그 사이의 간격에 의해 결정되며 이중 또는 다중곡률의 판재를 성형하게 된다.

상하로 대응되게 배치된 성형롤러의 곡률은 Fig. 5와 같이 연속적으로 배열된 다수의 곡률조정핀치들의 길이에 의해 결정된다. 이때 길이를 조정하는 모터는 곡률조정핀치와 동일한 개수로 구성하여 동시에 제어하거나 별도의 이송장치를 설치하여 한 개 이상의 모터로 구성될 수 있다. 곡률조정핀치는 Fig. 6에 도시한 바와 같이 내부나사산을 가진 중공형 외부부재와 외부부재에 삽입 체결될 수 있는 외부나사산을 가진 내부부재로 구성된다. 외부부재와 체결되지 않는 나머지 끝 부분은 앞서 언급한 모터와 연결되어 모터 회전수에 따라 곡률조정핀치의 길이가 결정된다. 성형롤러와 직접 접촉하는 반대쪽 부분은 롤러가이드(Roller guide)를 부착하여 곡률에 따라 성형롤러가 자연스럽게 휘어질 수 있도록 한다.

상하로 대응되게 배치된 성형롤러는 양단에 충분한 토크를 제공할 수 있는 롤러 구동 모터를 연결하여 구동되도록 한다. 이 밖에도 성형롤러, 곡률조

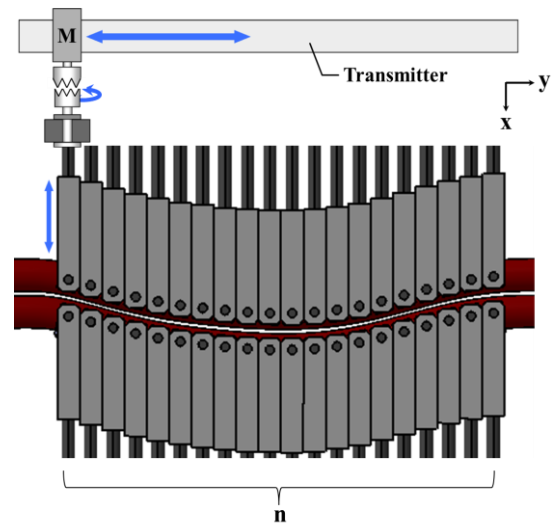


Fig. 5 Schematic diagram of flexible multi-punch array (Patent pending: No. 10-2013-0024711)

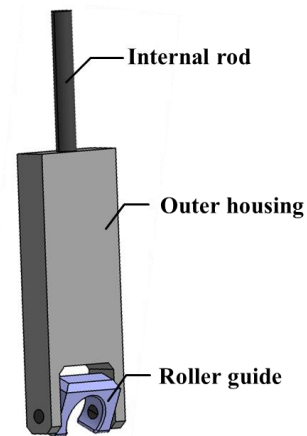


Fig. 6 Punch assembly and its mechanism (Patent pending: No. 10-2013-0024711)

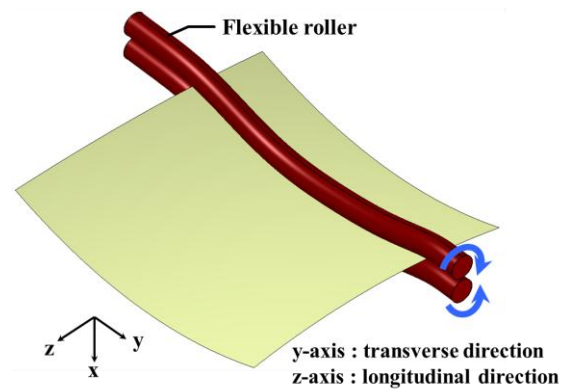


Fig. 7 Graphical explanation of the concept of flexible roll forming

정장치, 이송장치 등을 고정시키기 위한 외부지지 프레임(Frame)과 하우징(Housing) 등으로 구성된다.

블록형, 안장형 등의 다중곡률을 가진 판재의 성형은 Fig. 7과 같이 크게 종방향(z-axis)의 곡률과 횡방향(Transverse direction, y-axis)의 곡률에 따라 여러 가지 형태로 이루어질 수 있다. 횡방향의 곡률은 연속된 곡률조정편치의 길이 차이에 의해 결정된다. 반면에 종방향의 곡률은 횡방향으로 달리 적용되는 변형률의 차이로 인해 발생하며, 이러한 변형률의 차이는 횡방향으로의 롤러 사이의 간격의 크기 차이에서 기인한다.

### 3. 기하학적 모델링 및 해석

가변률성형에서 판재의 성형이 이루어지는 부분은 유입되는 판재와 상하로 대응되게 배치된 휘어지는 성형 롤러 등으로 도시할 수 있으며, 각각의 기하학적 형상은 Fig. 8과 같이 판재의 중립축(Neutral axis)과 상하로 이루어진 성형롤러의 회전축에 관한 2차곡선으로 나타낼 수 있다. 여기서 2차곡선 함수의 아래 첨자  $b, u, l$  은 각각 판재, 상부롤러, 하부롤러를 의미한다. 본 연구에서는 성형하고자 하는 판재의 형상에 관한 3개의 설계 파라미터(Parameter)를 설정하였으며, 각각의 파라미터의 값에 따라 다양한 곡률을 가진 판재를 성형할 수 있다. 각각의 파라미터는 Fig. 8 에 도시한 바와 같이 판재의 중심부에서의 곡률반경  $R_{b,c}$ , 판재의 중심부(Center)와 끝점(Tip)의 사잇각  $\theta_{tip}$ , 판재의 중립축에 관한 곡선의 이심률  $e_b$  등이다. 여기서 곡률반경과 사잇각은 성형하고자 하는 판재의 횡방향(y-axis)에 관한 곡률과 형태를 결정하며, 2차곡선의 형태에 따른 성형롤러의 간격은 종방향(z-axis) 곡률에 영향을 미친다. 설계 파라미터 중 하나인 이심률은 판재의 중심부에서 거리가 멀어질수록 곡률이 변하는 판재를 성형하기 위한 것으로써 원호로 이루어지지 않은 형상의 곡판 가공시 그 값에 따라 다양한 형태의 곡판의 성형이 가능하도록 할 수 있다.

대표적인 다중곡률형상인 블록형, 안장형, 비틀린 형상의 판재 성형은 각각의 형태에 따라 설계 파라미터의 값이 다르게 적용된다. 본 연구에서는 블록형과 안장형의 경우 횡방향의 곡률반경  $R_b = 300\text{mm}$ , 이심률  $e_b = 0$ , 사잇각  $\theta_{tip} = 10^\circ$  로 설정하였다. 비틀린 형상은 횡방향의 곡률반경에 관한 설계변수를

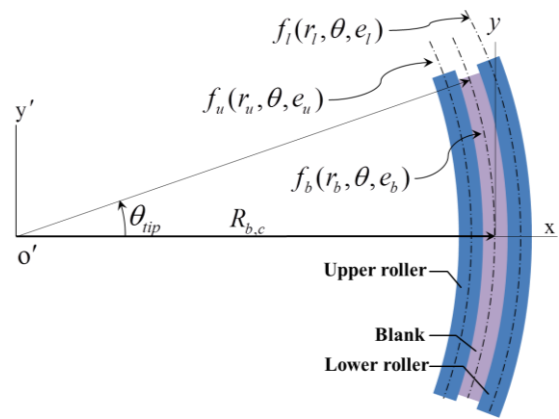


Fig. 8 Geometrical relation of blank and flexible rollers

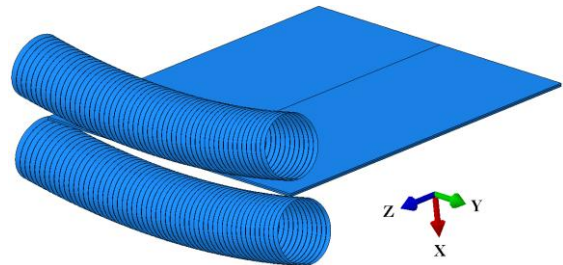


Fig. 9 An example of FEM models using flexible roll forming process

600mm로 설정하여 해석을 수행 하였으며, 이에 따라 판재의 폭을 동일하게 하기 위하여 사잇각을 조정하였다.

유한요소해석은 상용해석 프로그램인 ABAQUS 이용하였으며, 판재를 롤러 사이에 맞물리는 과정과 판재를 밀어내기 위해서 롤러가 회전하는 과정 등의 두 가지 절차에 의해 이루어진다. Fig. 9 은 블록형 판재 성형을 위한 해석 모델을 도시한 것으로 상하로 배치된 성형롤러는 분할하여, 연속적으로 배열된 고리(Ring) 형태로 모델링 하였다. 본 연구에서는 Ring의 지름 20mm, 폭 2mm로 설정하였다. 모든 Ring의 위치결정은 판재를 롤러 사이에 맞물리는 과정을 통해서 이루어지며 롤러의 회전축에 관한 2차곡선을 따라 접선방향으로 배열된다. 따라서 성형해석에 필요한 Ring의 총 개수는 설계 파라미터의 값에 따라 결정된다. 유한요소해석 수행간 모든 Ring의 병진운동과 회전운동은 Ring의 중심을 원점으로 하는 국부좌표계(Local coordinate)를 따르도록 하였다. 즉, 모든 Ring의 국부좌표계 원점은 성형롤러를 회전축인 2차곡선 상에 놓이게 된다. 아울러, 판재를

밀어내기 위한 상하 롤러의 회전수는 판재의 종방향 길이에 따라 정의된다.

판재는 Al 2024-T4의 물성을 적용하였으며, 물성 모델로는 가공경화식  $\sigma = K\varepsilon^n$  (소성장도 계수  $K = 690\text{MPa}$ , 가공경화지수  $n = 0.16$ , 최대인장강도  $\text{UTS} = 430\text{MPa}$ )을 사용하였다. 판재의 크기는 앞서 설정한 곡률반경과 사잇각의 값을 고려하여  $105 \times 105 \times 1\text{mm}^3$ 로 모델링 하였으며, 솔리드 요소(Solid element)를 사용하였다. 상하 롤러는 Ring 형태로 분할함으로써, 판재와 개별적으로 접촉하는 모든 Ring은 판재의 변형에 비하여 변형이 작으므로 강체(Rigid body)로 가정하여 쉘 요소(Shell element)로 모델링 하였다. 또한 판재와 롤러 사이의 마찰계수는 0.1로 정의하여 해석을 수행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 10 에는 블록형, 안장형, 비틀린 형태의 대표적인 다중곡률형상에 대한 유한요소해석의 결과를 도시하였다. 판재를 롤러 사이에 맞물리는 과정 중에 롤러를 구성하는 모든 Ring은 앞서 언급된 각각의 2차곡선을 따라 배열된 후, 회전운동을 통해서 성형 해석이 이루어진 결과이다. 블록형과 안장형의 형상은 성형롤러 사이의 간격에 관한 경계조건만을 달리한 결과이며, 나머지 모든 경계조건들은 동일하며 판재의 크기, 롤러를 구성하는 Ring의 크기와 개수 또한 동일하다. Fig. 10(c)의 비틀린 형상은 종방향의 곡률을 부각시키고 횡방향의 곡률을 최소화하기 위해서 곡률반경에 대한 설계변수를 달리하여 적용한 결과이다. 이는 곡률반경이나 이심률에 대한 설계변수를 증가시키면 횡방향의 곡률은 감소하여 판재의 양쪽은 직선에 가까운 형상을 가지게 되는 것을 의미한다. 반면에 곡률 반경이나 이심률을 감소시키면 판재의 모든 모서리는 다른 곡률을 가진 곡선을 가지게 됨으로써 두 가지 이상의 곡률을 가진 형상을 성형할 수 있다.

Fig. 11 은 성형해석 전 과정에 대한 응력분포를 도시한 것으로, 블록형 형상의 판재는 다른 형상과 달리 최대인장강도에 근접한 값을 가진다. 이는 판재의 중심부분에서 종방향과 횡방향의 곡률이 동일한 방향으로 중첩된 결과이다. 반면에 안장형 형상은 종방향과 횡방향의 곡률 방향이 역부호이기 때문에 블록형 형상과 달리 성형하중의 집중이 덜 발

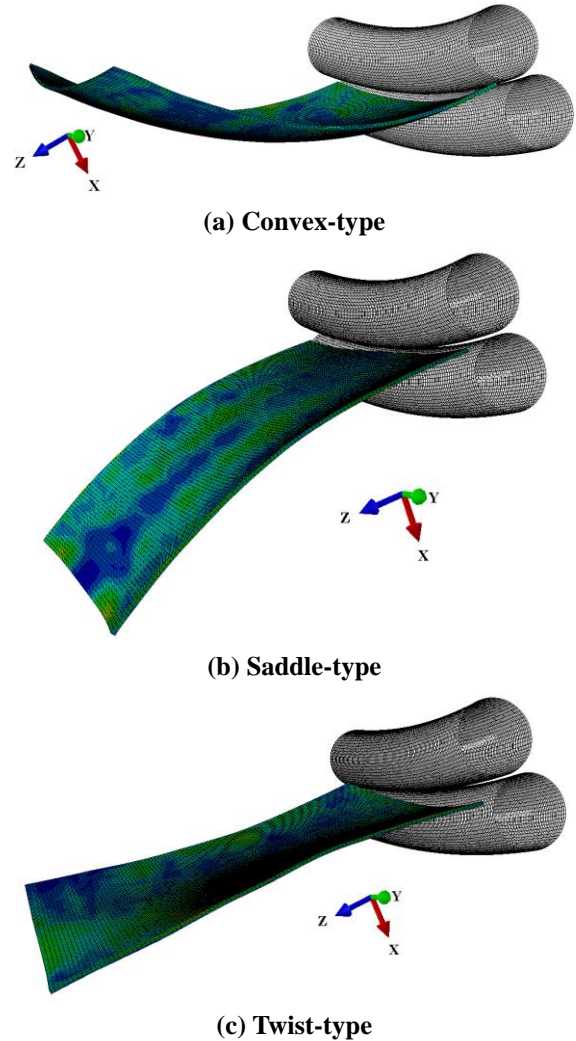
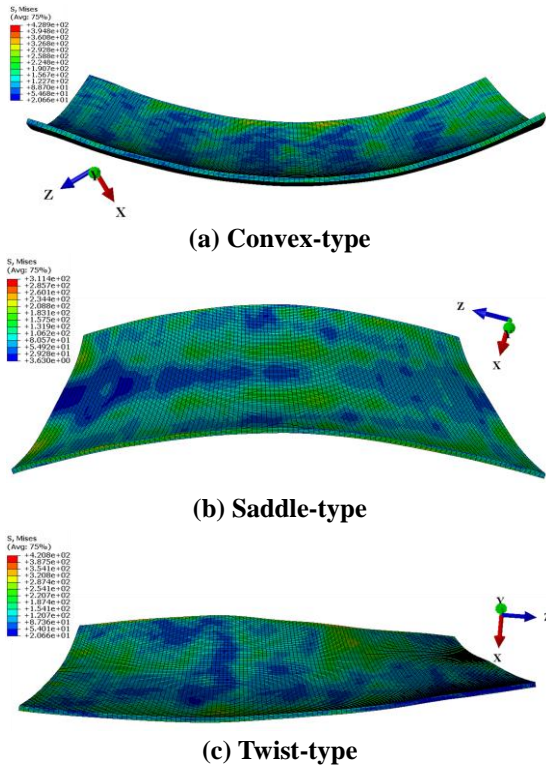


Fig.10 Finite element models using flexible roll forming for representative models of three-dimensional curved sheet

생하였다. 비틀린 형상의 판재는 성형이 이루어지는 성형롤러의 출구부 근처에서 가장 큰 응력분포를 보였으며, 이는 판재의 두께 방향의 변형률 차이로 인한 굽힘뿐만 아니라 횡방향의 변형률 차이로 인한 비틀림도 발생하였기 때문이다.

Fig. 10과 11에 도시한 성형 후의 형상과 같이, 앞서 언급한 다점성형공정에서 박판을 이용하거나 탄성패드의 부적절한 사용으로 인하여 나타나는 주름 및 딥플 등의 성형오차는 발생하지 않았다. 따라서 가변롤성형 기술은 박판에 대한 판재 성형에도 적합하며, 판재 가장자리에 대한 절단 등의 기계적 가공을 크게 요하지 않으므로 경제성 측면에서 우수하다고 할 수 있다.



**Fig.11 Stress distribution of finite element models using flexible roll forming for representative models of three-dimensional curved sheet**

## 5. 결론

본 연구에서는 다중곡률형상의 판재 성형을 위한 가변롤성형 기술의 타당성 연구를 위하여 가변롤성형 공정에 대한 장치의 구성과 성형방법을 제시하였다. 또한 대표적인 다중곡률형상인 볼록형, 안장형, 비틀린 형상에 대한 해석적 연구를 통하여 각각의 형상을 구현하였다.

가변롤성형 기술은 상하 두 개의 성형롤러의 형태 및 그 사이의 간격의 조절을 통해 판재를 성형하므로, 구성이 간단하고 설치공간이 비교적 작다. 따라서 금형 제작비, 보관 및 유지보수 비용을 크게 절감할 수 있다. 또한 기존의 다점성형공정 등에 비하여 성형공정 전반에 걸쳐 주름 및 덩플 등의 성형오차가 발생하지 않으므로 추가적인 기계적 가공을 요하지 않는다. 이러한 가변롤성형 기술은 자동차, 고속열차 및 비정형 건물의 외피 구조물 등의 다품종 소량 생산 기반의 판재 가공 분야에서 폭넓게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 성형롤러 및 장치에 대한 지속적인 연구를 통해서 보다

정밀한 성형구조물을 요하는 항공기 제작 분야에도 적용가능 할 것으로 기대된다.

향후에는 상기 연구결과를 토대로 성형롤러의 미소변형을 고려하여 이에 따른 탄소성 거동을 예측하고, 가변롤성형 기술을 이용한 비정형 형상에 대하여 연구할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)과 지역혁신인력양성사업(No. 2012H1B8A2026095)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] H. C. Kuo, L. J. Wu, 2002, Automation of Heat Bending in Shipbuilding, *Comput. Ind.*, Vol. 48, No. 2, pp. 127~142.
- [2] D. E. Ko, C. D. Jang, S. I. Seo, H. W. Lee, 1999, Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System, *J. Soc. Naval Architects. Kor.*, Vol. 36, No. 4, pp. 116~127.
- [3] M. Z. Li, Y. H. Liu, S. Z. Su, G. Q. Li, 1999, Multipoint Forming: a Flexible Manufacturing Method for a 3-D Surface Sheet, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 87, No. 1-3, pp. 277~280.
- [4] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui, Q. G. Yan, 2002, Multipoint Forming Technology for Sheet Metal, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 333~338.
- [5] D. S. Shim, D. Y. Yang, K. H. Kim, M. S. Han, S. W. Chung, 2009, Numerical and Experimental Investigation into Cold Incremental Rolling of Doubly Curved Plates for Process Design of a New LARS(line array roll set) Rolling Process, *CIRP Annals-Manuf. Technol.*, Vol. 58, No. 1, pp. 239~ 242.
- [6] 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.
- [7] S. C. Heo, Y. H. Seo, B. S. Kang, J. Kim, 2012,

- Numerical and Experimental Study for Improvement of Formability in Flexible Forming Process, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 7, pp. 433~440.
- [8] Y. H. Seo, B. S. Kang, J. Kim, 2012, Compensation for Elastic Recovery in a Flexible Forming Process Using Predictive Models for Shape Error, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 8, pp. 479~484.
- [9] S. C. Heo, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2010, Study on Flexible Forming Process Involving the Use of Sectional Flexible Die for Sheet Material, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., A, Vol. 34, No. 3, pp. 299~305.
- [10] S. C. Heo, Y. H. Seo, J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2010, Application of Flexible Forming Process to Hull Structure Forming, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 24, No. 1, pp. 137~140.