

3차원 곡판 성형을 위한 비정형롤러의 형태에 따른 성형성 평가

손소은¹ · 윤준석¹ · 김형호¹ · 김 정¹ · 강범수[#]

Evaluation of Formability Dependent on Reconfigurable Roller Types for 3D Curved Sheet Forming

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

(Received March 4, 2015 / Revised December 7, 2015 / Accepted December 10, 2015)

Abstract

Press machines and dies are commonly used for 3D curved sheet forming. Using conventional die forming can cause economic problems since various modifications of the die shape are required depending on the product shape. Various types of flexible forming such as multi-point dieless forming (MDF), flexible incremental roll forming have been developed to improve the needed process flexibility. Although MDF can reduce the production cost using reconfigurable dies, it still has significant material loss. Drawbacks such as wrinkling, dimpling, and forming errors can also occur despite continuous investigations to mitigate these defects. A novel sheet forming process for 3D curved surfaces, a flexibly-reconfigurable roll forming (FRRF), has been recently proposed to overcome the economic and technical limitations of current practice. FRRF has no limitation on blank size in the longitudinal direction, and also minimizes or eliminates forming defects such as wrinkling and dimpling. Feasibility studies of FRRF have been conducted using FE simulations for multi-curved shapes and various sheet thicknesses. Therefore, the fabrication of a FRRF apparatus is required for any follow-up studies. In the current study, experiments with reconfigurable rollers were conducted using a simple design pre-FRRF apparatus prior to fabricating the full size FRRF apparatus. There are three candidates for the reconfigurable roller: a bar-type shaft, a flexible shaft, a ground flexible shaft. Among these candidates, the suitable reconfigurable roller for FRRF is determined through various forming tests.

Key Words : Flexibly-Reconfigurable Roll Forming, Reconfigurable Roller, 3D Curved Sheet Forming, Pre-FRRF Apparatus

1. 서론

일반적인 선박과 항공기의 외피구조물은 유체역학적 특성으로 인하여 3차원 곡률 형상의 판재로 이루어져있다. 최근 건축분야에서도 비정형건축물에 대한 수요가 증가하고 있으며, 3차원 곡률 형상의 판재를 필요로 한다. 선박, 항공기, 비정형건축물 등

에 사용되는 3차원 곡률 형상을 가지는 판재의 전통적인 가공방식은 금형과 프레스(press)를 이용하는 방법이다. 이러한 판재가공방법은 자동차, 가전제품 등 하나의 형상을 반복적으로 생산하는 대량생산공정(mass production system)에 적합하다[1]. 그러나 선박, 항공기, 비정형건축물 등은 하나의 완제품을 생산하기 위하여, 다양한 형상의 판재 제작을 요구하

1. 부산대학교 항공우주공학과

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

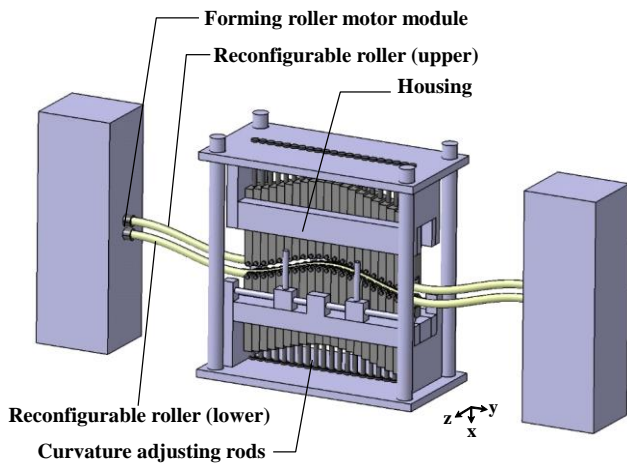


Fig. 1 Schematic diagram of FRRF apparatus

는 다품종소량생산공정(small quantity batch production)이므로, 각각의 형상에 따라 금형을 제작하거나 보수하는 일은 경제적으로 비효율적이다. 이러한 경제적인 문제점을 해결하고, 전통적인 가공방식을 대체하기 위해서 다양한 가변성형공정(flexible forming process)이 개발되었다.

가변성형공정의 대표적인 예로서는, 다점샌드위치공정(multi-point sandwich forming), 다점탄성체성형(fluid or elastomer dieless forming), 점진적롤성형(flexible incremental roll forming), 다점성형공정(multi-point dieless forming process) 등이 있다[2~9]. 특히, 다점성형공정은 다수의 펀치를 배열하여 단일 금형과 같은 효과를 낼 수 있는 기술이다. 따라서 금형 개발에 소요되는 비용 및 시간적 측면에 있어서 경제성이 우수하여 다품종 소량 생산에 적합하다고 볼 수 있다.

그러나 다점성형공정은 불연속적인 성형면을 가짐으로 인해 성형공정 후 가장자리를 절단해야 하며, 소재물성, 펀치의 크기, 곡면의 형태와 곡률, 판재두께 등에 따라 압흔(dimple), 주름(wrinkle)등이 발생한다. 이는 판재와 펀치 사이의 불규칙한 공간에 의한 것으로 이를 보완하기 위하여 우레탄패드(urethane pad)를 사용하고 펀치의 크기를 줄이는 등 성형오차를 줄이기 위한 연구가 계속되고 있으나 여전히 보완이 필요한 실정이다[10,11].

비정형롤판재성형(flexibly-reconfigurable roll forming, FRRF) 공정은 새로운 개념의 가변성형공정으로서, Fig. 1에서 나타난 장비 개념도에서 볼 수 있듯이 유연하게 휘어지는 비정형롤러(reconfigurable roller)를

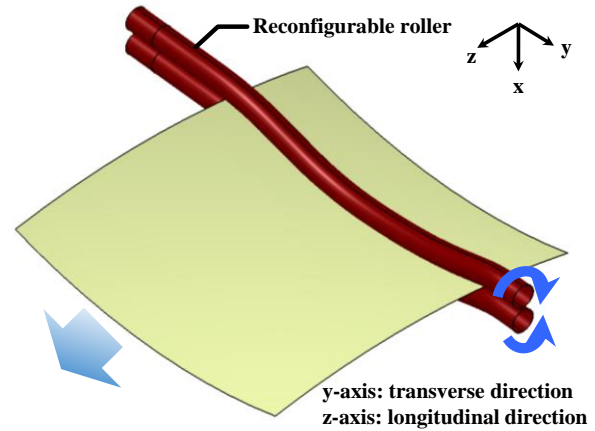


Fig. 2 3D curved sheet forming using FRRF process

상하로 배치한 장비를 사용하며, Fig. 2에서 도시한 바와 같이 그 사이로 판재를 통과시켜 3차원 곡판을 성형하는 공정이다[12, 13]. 롤러를 사용하여 연속적인 성형면을 가지므로, 앞서 언급한 다점성형공정에서의 압흔 및 주름을 해결할 수 있는 공정이다. 다점성형공정의 경우에는 펀치가 배열되어 있는 부분만 성형이 가능하기 때문에 성형 공정 후 가장자리 부분의 가공을 필요로 한다. 하지만 비정형롤판재성형 공정의 경우에는 성형공정 진행방향인 종방향(longitudinal direction)으로 길이 제한이 없어 원하는 만큼 길이 조정이 가능하므로 비교적 경제적이다.

본 연구에서는 비정형롤판재성형 공정의 장비 제작에 앞서 비정형롤러의 구현을 알아보기 위하여 실제장비를 간소화 하여 예비장비(pre-FRRF apparatus)를 제작하였다. 또한 예비장비를 이용한 실험을 통해 유연하게 휘어지며 판재에 압흔을 남기지 않는 비정형롤러를 선정하기 위하여 세가지 종류의 롤러를 후보로 두었고, 성형결과물의 표면을 비교하였다.

2. 비정형롤판재성형 공정

비정형롤판재성형 공정은 상하로 배치된 두 비정형롤러 사이로 판재를 통과시키면서 3차원 곡판을 제작할 수 있다. 이 공정은 다점성형공정과 같이 펀치를 사용하는 것이 아니라 롤러를 사용하므로 연속적인 성형면을 가진다. 비정형롤러는 일반적인 롤성형 공정에서의 롤러와는 다르게 유연하게 휘어져서 판재의 가장자리와 중심부에 압축률

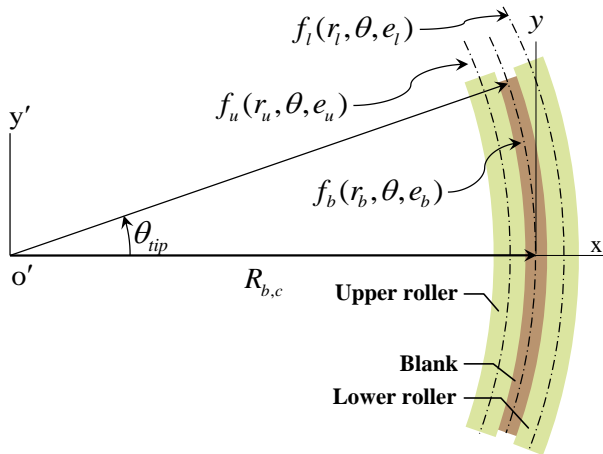
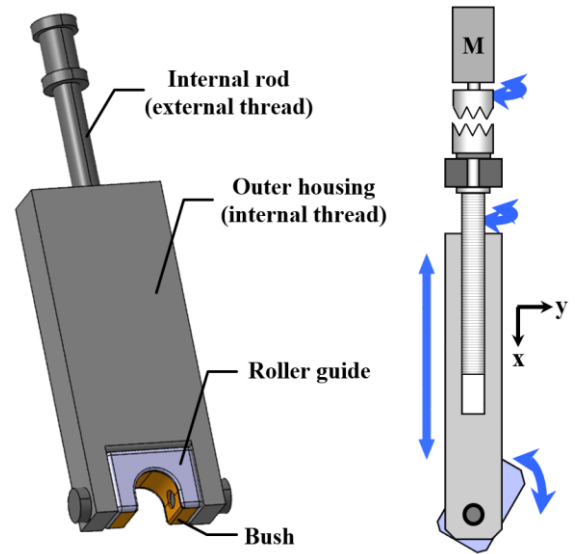
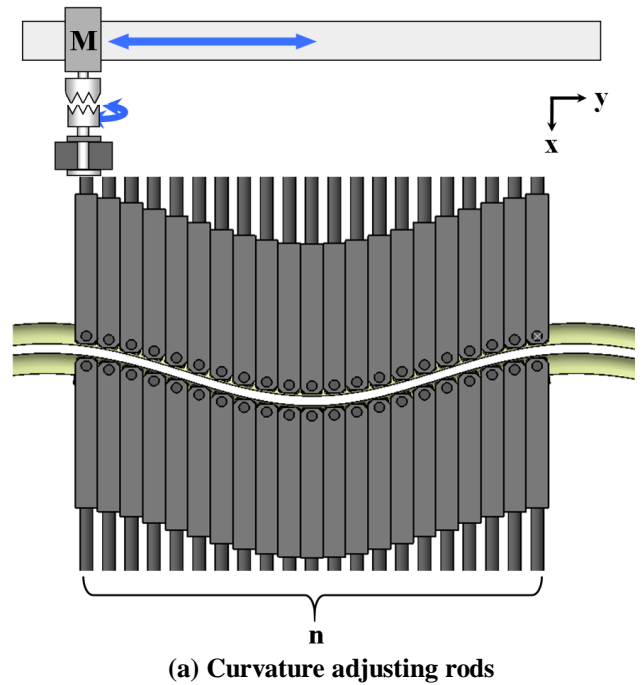


Fig. 3 Geometrical modeling for FRRF using quadratic curves

(compression ratio)을 다르게 가할 수 있으며, 이를 통해 원하는 3차원 곡판 형상으로 성형이 가능하다.

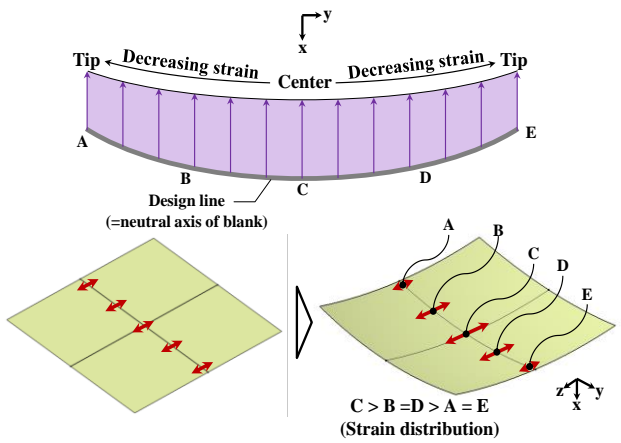
비정형롤판재성형 공정의 원리를 기하학적으로 표현하면 판재와 비정형롤러는 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다. 상하로 놓인 롤러의 회전축과 판재의 횡방향(transverse direction) 중심축을 이차곡선으로 표현하였으며 b, u, l 은 각각 판재, 상부 비정형롤러, 하부 비정형롤러를 의미한다. 판재의 횡방향 중심축은 곡률반경(r), 판재중심과 가장자리 사이의 사잇각(θ), 이심율(e)에 따라 도시할 수 있으며, 이를 바탕으로 상부롤러, 하부롤러의 회전축은 곡면의 형상에 따라 결정된다. 가공하고자 하는 판재의 형상에 따라서 곡률반경과 이심율이 결정되며, 판재크기에 따라서 사잇각이 결정된다. 원하는 곡면의 크기와 형상을 정하면, 그에 따라 상부롤러와 하부롤러의 변수의 값이 결정된다.

횡방향 곡률은 Fig. 4(a)에 도시한 바와 같이 곡률조정막대(curvature adjusting rod)의 배열에 의해 조절이 가능하며, 각각의 곡률조정막대는 Fig. 4(b)와 같이 구성되어 있다. 반면에 종방향의 곡률은 횡방향으로 달리 적용되는 두께방향변형률(through-thickness strains)의 차이에 의해 결정되며, 두께방향변형률의 차이는 상하 롤러 사이의 간격(gap)의 차이에서 기인한다. 비정형롤러의 곡률은 횡방향 곡률 제어와 함께 Fig. 4(a)와 같이 모터로 구동되는 곡률조정막대의 배열에 따라 조절이 가능하다. 비정형롤판재성형 공정에서 종방향의 곡률과 횡방향의 곡률에 따라 성형할 수 있는 다양한 3차원 곡판 형상 중 대표적인 형상은 볼록형(convex-type) 형상, 안장

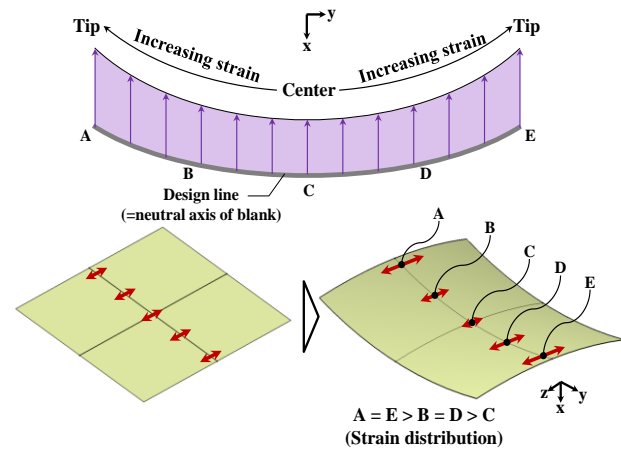


(b) Composition of a curvature adjusting rod
Fig. 4 Components of FRRF apparatus

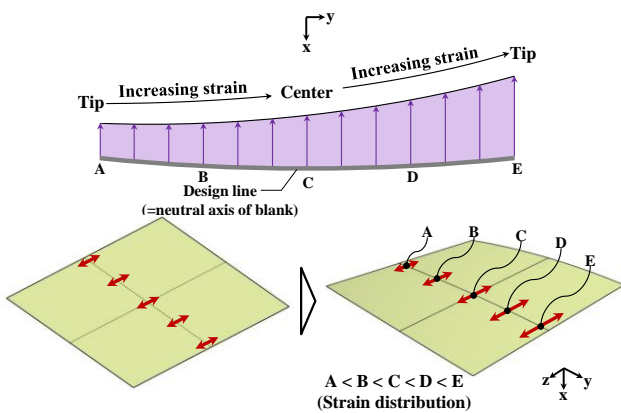
형(saddle-type) 형상, 비틀린(twist-type) 형상 등 여러 가지 형상이 있다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 앞서 언급한 대표적인 3차원 곡판 형상의 판재를 예들 들면, 볼록형 형상은 판재의 횡방향으로 양쪽 가장자리보다 판재 중앙에 두께방향변형률을 더 가함으로써 성형된다. 반면에 중앙보다 양쪽 가장자리에 변형률을 더 가함으로써 안장형 형상의 판재를 성형할 수 있다. 비틀린 형상의 경우, 한쪽 가장자리는



(a) Convex-type

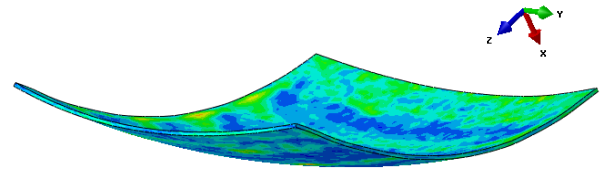


(b) Saddle-type

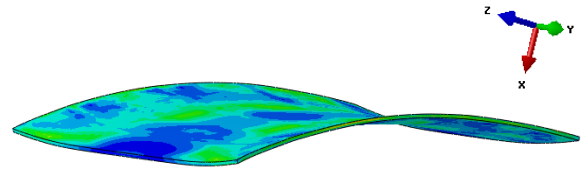


(c) Twist-type

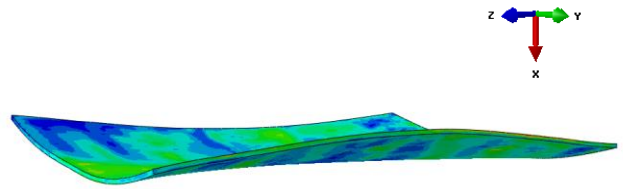
Fig. 5 Configurations of reconfigurable rollers for representative 3D curved sheet metal



(a) Convex-type



(b) Saddle-type



(c) Twist-type

Fig. 6 Results of FE simulations using FRRF process

변형률을 더 가하고 반대편 가장자리로 갈수록 변형률을 줄임으로써 성형 할 수 있다.

비정형롤판재성형 공정의 성형장비를 개발하기에 앞서서 유한요소해석을 통해 비정형롤판재성형 공정의 가용성과 구동에 대해 예측하였다. Fig. 6은 비정형롤판재성형 공정의 기초 연구로서 상하 롤러 사이의 간격을 조정하여 대표적인 3차원 곡판인 볼록형 형상, 안장형 형상, 비틀린 형상의 성형 결과를 예측하였으며, 이를 통해서 비정형롤판재성형 공정의 실행가능성을 해석적으로 확인할 수 있었다 [14]. 이 밖에도 두께가 매개변수로서 공정에 어떤 영향을 미치는지 해석적으로 연구하였으며, 계속해서 형상설계변수에 관한 해석적 연구와 이론 정립에 관한 연구가 진행되고 있다[15].

3. Pre-FRRF 장비

비정형롤판재성형 공정에 대한 방법론 연구와 해석적인 연구가 진행되고 있으며 공정 개발을 위해 장비제작이 필요한 단계이다. 실제장비에 대한 개략도는 Fig. 1에 도시되어 있으며 앞서 구동원리에 대

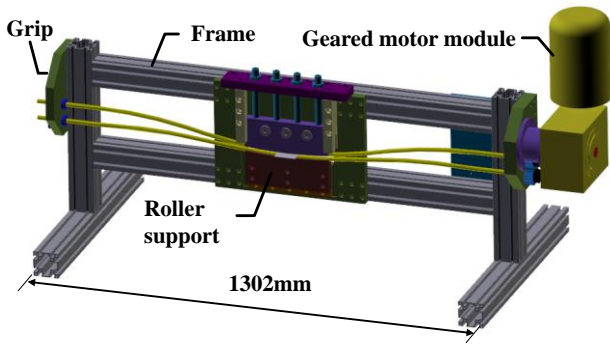
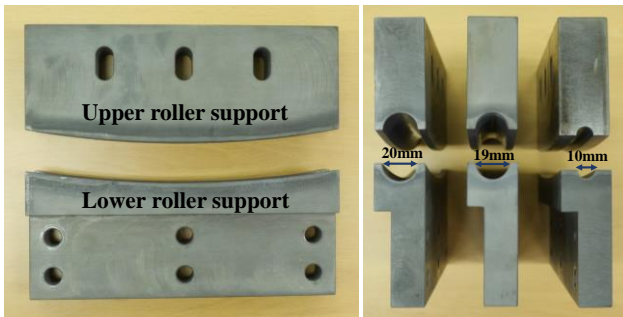


Fig. 7 Schematic diagram of pre-FRRF apparatus



(a) Front view (b) Side view

Fig. 8 Roller supports of pre-FRRF apparatus

하여 설명하였다. 그러나 장비 제작에 앞서 유한 요소 해석이 아닌 실제 공정의 구동에 대하여 실험적으로 실현가능성을 입증하기 위해 고려해야 할 사항들이 있다. 따라서 경제성을 고려하여 실제 장비제작에 앞서 장비를 간소화 하여 예비장비를 제작하였고 비정형롤판재성형 공정의 구동에 대한 확인과 본 공정에 적합한 롤러 형태를 알아보았다.

예비장비의 구성은 크게 두 개의 롤러지지대(roller support), 비정형롤러(reconfigurable roller), 기어 드모터모듈(g geared motor module), 프레임(frame)으로 이루어지며 Fig. 7에 예비장비의 구성도를 도시하였다. 실제 비정형롤러의 곡률을 제어하는 부분은 Fig. 4(a)와 같이 다수의 곡률조정막대로 이루어져 형상에 따라 곡률조정막대의 높이를 조절할 수 있다. 그러나 이 장비는 실제장비 개념과 다르게 비정형롤러를 시험하고 구동여부를 확인하기 위하여 제작되었다. 따라서 경제성을 고려하여 최소한의 비용으로 제작하기 위하여 Fig. 8(a)에 도시한 롤러지지대의 사진에서 볼 수 있듯이 형상을 바꿀 수 없는 일체

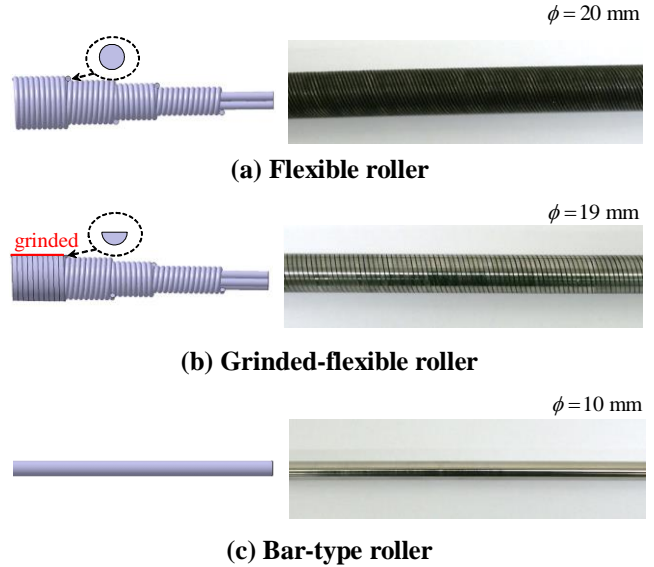


Fig. 9 Candidates of reconfigurable roller

Table 1 Geometry of reconfigurable roller and roller support

Roller type	Flexible	Grinded-flexible	Bar-type
Radius of upper roller support(mm)	600	600	1000
Radius of lower roller support(mm)	648	647	1088
Sectional diameter of reconfigurable roller(mm)	20	19	10

형이며 곡면을 가진다. 예비장비의 롤러지지대와 비정형롤러 사이의 마찰면은 저마찰 코팅(low friction coating) 및 고주파 열처리(high-frequency induction hardening)를 통하여 마찰력을 저하시키고 높은 경도를 가지도록 하였다.

본 연구에서 사용되는 비정형롤러의 유형은 flexible roller, grinded-flexible roller, bar-type roller이다. Flexible roller는 고강도탄소강(high strength carbon steel)을 소재로 하며, Fig. 9에 도시한 바와 같이 중앙 부분의 얇은 강선을 여러 번 감아 제작되었다.

Table 2 Material used in experiments

Properties (Al 1050)		Value
Elastic modulus (GPa)		69
Yield strength (MPa)		125
Ultimate strength (MPa)		135
Poisson's ratio, ν		0.33
Density (kg/mm ³)		2.71×10^{-6}
$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$	Strength coefficient, K (MPa)	141.38
	Work-hardening exponent, n	0.013

Flexible roller는 큰 곡률로 유연하게 휘어지므로 보다 다양한 곡면 제작을 목적으로 하여 본 실험의 후보로 선정하였다. Grinded-flexible roller는 flexible roller의 가장자리 부분을 가공한 것으로 flexible roller와 같은 물성을 가진다. Bar-type roller는 AISI 440 stainless steel의 물성을 가지며 탄성계수는 200GPa, 항복응력은 1.28GPa 이다. 롤러들은 가공에 적합한 탄성거동을 위해 열처리 과정을 거쳤다.

Fig. 8(b)는 좌측부터 각각 flexible roller, grinded-flexible roller, bar-type roller를 위한 롤러지지대의 측면을 나타낸다. Table 1은 각각의 롤러정보와 그에 부합하는 롤러지지대의 횡방향 곡률을 나타내었다.

각각의 형상에 따라 지름이 다르기 때문에 원하는 만큼 압축을 주기 위해 Table. 1과 같이 곡률반경을 다르게 제작 하였다. 따라서 상부지지대와 하부지지대는 각각 다른 곡률로 비정형롤러를 지지하며, 모두 볼록형 형상을 성형하기 위해 설계되었다.

예비장비를 구성하는 모터모듈(motor module)은 롤러에 충분한 토크를 전달하기 위해 전동기와 감속기어 장치를 하나로 조합한 기어드모터(g geared motor)를 사용하여 롤러를 구동시킨다. 본 실험에 쓰이는 판재는 AL1050의 물성을 가지며, Table 2에 물성치를 나타내었다. 실험은 판재를 물리는 단계와 롤러를 회전시켜 판재를 밀어내는 롤링 단계로 이루어진다.

4. 실험결과

비정형롤판재성형 공정의 예비장비를 제작하여 모터모듈과 롤러의 구동을 확인하였으며, 수동으로 이루어진 압축과정과 모터로 구동되는 롤링과정이 제대로 구동 되었음을 알 수 있었다. Fig. 10은 실제로 제작된 예비장비와 성형공정의 진행과정을 보여준다.

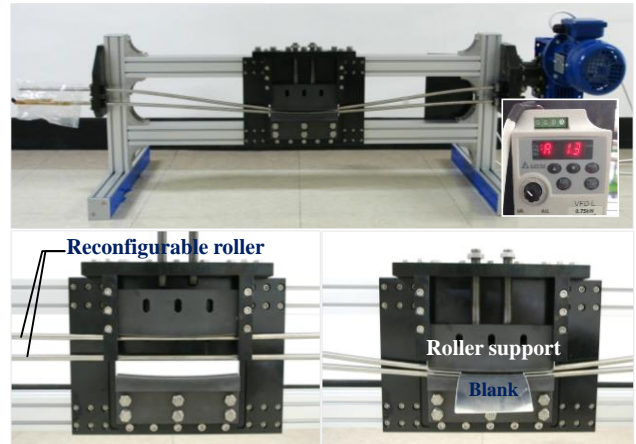
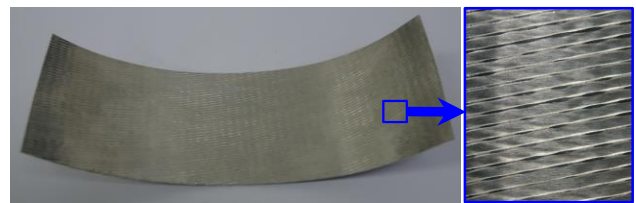
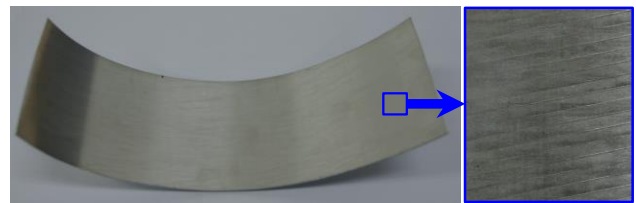


Fig.10 Pre-FRRF apparatus and forming step



(a) Result from flexible roller



(b) Result from grinded-flexible roller



(c) Result from bar-type roller

Fig.11 Results of experiment using three candidates of reconfigurable roller

Fig. 11은 롤러의 유형에 따른 실험 결과를 나타내며 세 가지 롤러 유형 모두 대표적인 3차원 곡면 중 하나인 볼록형 형상을 정확히 성형할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 실험 결과물의 표면을 비교해보면, flexible roller를 사용한 실험결과물의 표면은 요철이 뚜렷하게 나타난다. 그리고, flexible roller보다 덜

하지만 grinded-flexible roller를 사용한 실험결과도 롤러의 흔적이 남아있다. 이와는 다르게, bar-type roller를 사용한 결과에는 표면에 롤러의 흔적을 볼 수 없어 실제장비에 적용하기에 적합한 비정형롤러라고 판단할 수 있다.

모터모듈에는 인버터(inverter)가 장착되어 있으며 전류 값을 관찰 할 수 있으며, 전류 값의 크기에 따라 토크를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 성형롤러에 가해지는 비틀림 응력을 계산하여 복합응력(combined stress)을 추정하기 위해, 다음과 같이 계산하였다. 보수적인 조건에서 굽힘응력을 알아보기 위해서 대표적인 형상 중 가장 큰 하중을 요구하는 볼록형 형상을 성형성 비교 및 하중분석 형상으로 선정하였고, 계산에 적용된 수치는 실험값이다[13].

$$\frac{1}{R_{u,c}} = \frac{M}{EI}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{My}{I} = \frac{EI'}{R_{u,c}} \frac{y}{I'} = \frac{\text{radius of section of roller}}{R_{u,c}} E$$

$$= \frac{5 \times 10^{-3} m}{1m} (200 \times 10^9 Pa) = 1 \times 10^9 Pa$$

여기서 M , $R_{u,c}$, I , E 은 각각 모멘트, 하부 롤러의 곡률, 관성모멘트, 탄성계수를 의미한다. 예비 실험장비에 장착되어 있는 인버터를 통해서 전류 값을 관찰 할 수 있으며, 전류 값에 따라 간단하게 토크를 계산할 수 있다.

$$T = 1.3A \times 0.93 Nm / A \times 100 \times 0.5 \times \frac{1}{2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{TR}{J} = \frac{30.2 Nm \times 0.005 m}{0.98 \times 10^{-9} m^4} = 10^9 Pa$$

위 계산에서 T , R , J 는 각각 비틀림모멘트, 롤러의 반지름, 극관성모멘트를 의미한다. 0.93, 100, 0.5는 각각 토크 계수, 기어감속비, 감속기 효율을 의미하며 하나의 모터로 두 개의 롤러를 구동하는 것을 고려하였다. 계산된 토크 값을 통해서 다음과 같이 비틀림 응력을 계산하였다.

$$\sigma_{\text{combined}} = (\sigma_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2)^{1/2} \approx 1GPa$$

위 계산을 통해서, 복합응력은 Bar-type roller의 항복응력인 1.28GPa을 넘지 않는 것을 알 수 있으며,

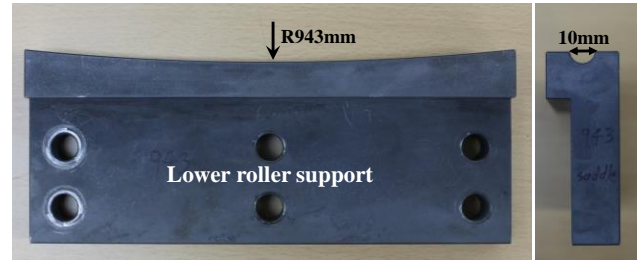
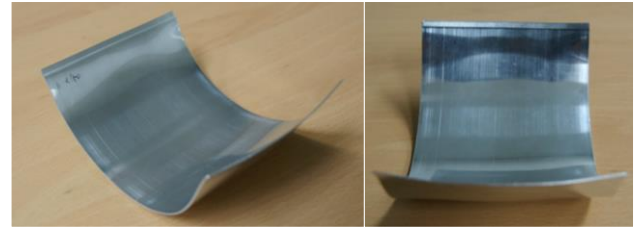


Fig.12 Roller support for saddle-type surface



(a) Convex-type



(b) Saddle-type

Fig.13 Result of experiment using bar-type roller for 3D curved sheet forming

bar-type roller가 탄성 영역 안에서 거동한다고 가정할 수 있다.

또한, 비정형롤판재성형 공정의 다양한 3차원 곡판 형상의 성형가능성을 확인하기 위하여 안장형 형상 제작을 위해서 Fig. 12와 같은 롤러지지대를 제작하여, 실험을 추가적으로 수행하였다. 제작비용을 줄이기 위해서 볼록형 형상의 상부롤러지지대를 사용하였으며, 이에 맞게 안장형 하부롤러지지대를 추가적으로 제작하였고 곡률반경은 943mm로 제작하였다. 실험 결과는 Fig. 13에 나타내었고, 볼록형 형상과 안장형 형상을 비교 하였다.

본 실험을 수행하면서, 형상과 장비 조작에 따라서 비정형롤러에 두 개의 변곡점(inflexion point)이 발생하는 것을 알 수 있었다. 변곡점이 많아짐에 따라 필요토크를 증가시키는 결과를 초래하기 때문에 성형하고자 하는 형상으로 롤러에 굽힘을 가하였을

때 비정형롤러의 길이방향으로 그립(grip)부분을 제어할 수 있도록 부수적인 장치를 추가하여야 할 것으로 보인다[16].

5. 결론

비정형롤판재성형 공정의 방법론이 제안된 후 형상설계변수에 관한 해석적인 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구에서는 해석적인 연구뿐만 아니라, 비용적인 측면에서 효과적인 연구를 하기 위해 실제 장비를 제작하기에 앞서 예비 실험장비를 제작하였다.

예비 실험장비를 이용해 비정형롤판재성형 공정을 실제로 구현해 보고, 실제 장비 제작 시 적용될 비정형롤러를 알아보기 위해 flexible roller, grinded-flexible roller, bar-type roller 등의 세가지 종류의 roller를 이용한 실험을 하였다. 실험 결과, 형상과 표면 비교를 통해 bar-type roller를 사용했을 때 다른 성형 공정에서 발생하는 압흔 및 주름이 발생되지 않는 실험결과를 얻을 수 있으므로, 실제 장비 제작에 적합하다고 판단하였다. 예비장비에 발생하는 복합응력과 항복응력을 비교하여 비정형롤러가 탄성거동을 하는 것을 확인할 수 있었으며, 후속연구로 bar-type roller의 재료에 따른 강성과 피로특성에 관한 지속적인 분석이 필수적이라고 판단된다.

더 나아가 가장 적절한 bar-type roller로 안장형 형상도 제작함으로써, 3차원 곡판 성형을 위한 비정형롤판재성형 방법론의 실현가능성을 실험적으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 비정형롤판재성형 공정의 실제장비를 제작하고, 형상설계변수와 이론에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] 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 Soc., Special Volume, pp. 551~568.
- [2] N. Nakajima, 1969, A Newly Developed Technique to Fabricate Complicated Dies and Electrodes with Wires, Bull. Jpn. Soc. Manuf. Eng., Vol. 12, No. 54, pp. 1546~1554.
- [3] Q. Zhang, T. A. Dean, Z. R. Wang, 2006, Numerical Simulation of Deformation in Multi-point Sandwich Forming, Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol. 46, Issues 7-8, pp. 699~707.
- [4] Q. Zhang, Z. R. Wang, T. A. Dean, 2007, Multi-point Sandwich Forming of a Spherical Sector with Tool-Shape Compensation, J. Mater. Process. Technol., Vol. 194, No. 1, pp. 74~80.
- [5] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2005, An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheets Forming General Quadrilateral Sheet Blanks with Enhanced Process, CIRP. Ann-Manuf. Technol., Vol. 54, Issue 1, pp. 221~224.
- [6] 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. Tool. Manuf., Vol. 50, No. 2, pp. 214~218.
- [7] J. W. Park, 2004, Multi-Point Sheet Forming Using Elastomer, Trans. Mater. Process., Vol.13, No. 2, pp. 129~136.
- [8] M. Li, Y. Liu, S. Su, G. Li, 1999, Multi-point Forming: a Flexible Manufacturing Method for a 3-d Surface Sheet, J. Mater. Process. Technol., Vol. 87, No. 1, pp. 277~280.
- [9] 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.
- [10] S. C. Heo, Y. H. Seo, J. S. Yoon, W. J. Song, B. S. Kang, 2012, Effect of Design Variables on Forming Accuracy in Thick Plate Flexible Forming Process, Steel Res. Int, Special Edition, pp.1403~1406.
- [11] G. Z. Quan, T. W. Ku, B. S. Kang, 2011, Improvement of Formability for Multi-point Bending Process of AZ31B Sheet Material using Elastic Cushion, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 12, No. 6, pp. 1023~1030.

[1] 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 Soc.,

- [12] B. S. Kang, J. S. Yoon, 2013, Sheet Forming Apparatus with Flexible Rollers, KR Patent: 10-1309228.
- [13] B. S. Kang, J. S. Yoon, 2014, Dieless Sheet Metal Forming Apparatus with Flexible Rollers, US Patent Pending: 14/361674.
- [14] 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.
- [15] S. E. Son, J. S. Yoon, J. Kim, B. S. Kang, 2014, Effect of Shape Design Variables on Flexibly-Reconfigurable Roll Forming of Multi-curved Sheet Metal, Trans. Mater. Process., Vol. 23, No. 2, pp. 103~109.
- [16] B. S. Kang, J. S. Yoon, H. H. Kim, 2015, Sheet Forming Apparatus using Reconfigurable Forming Rollers, KR Patent Pending: 10-2015-0039236.