

점진적 롤 성형 공정에서 공정 변수가 박판 금속의 곡률 생성에 미치는 영향

윤석준* · 양동열*

An Effect of Process Parameters on the Generation of Sheet Metal Curvatures in the Incremental Roll Forming Process

S. J. Yoon and D. Y. Yang

Abstract

In order to make a doubly curved sheet metal effectively, a 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 to thickness. The developed process is an unconstrained forming process with no holder. For this study, the experimental equipment is set up with the roll set which consists of two pairs of support rolls and one center roll. In the experiments using aluminum sheets, it is found that the curvature of the formed sheet metal is determined by controlling the distance between supporting rolls in pairs and the forming depth of the center roll and it also depends on the thickness of the sheet metal. In order to check the effect of process parameters on the generation of sheet metal curvatures in this process, the orthogonal array is adopted. From the experimental results, among the process parameters, the distance between supporting rolls in pairs along the same direction of one principle radius of curvature as well as the forming depth and the thickness of the material 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 principle radius of curvature, does not have an significant effect on the generation of the curvature in that direction. It just affects the generation of curvature in its own direction mainly with the forming depth and the thickness of the material.

Key Words : Sheet Metal Forming, Incremental Forming Process, Doubly Curved Sheet, Bending Deformation

1. 서 론

이중 곡률이란, 타원면과 같이 면의 위치에 따라 x 축과 y 축으로 대표되는 평면 상의 두 축 방향으로 곡률이 서로 다르게 생성된 것을 의미한다. 넓은 의미로는 구면도 이중 곡률의 면으로 생각할 수 있으며 나아가서 아주 복잡한 자유 곡면도 이중 곡률을 갖는 면이라 할 수 있다.

이러한 이중 곡률을 갖는 금속 판재들은 가전 제품이나 자동차, 선박, 비행기 등의 동체나 여러 가지 부품들을 구성하는데 필수적으로 사용되고 있으며 금속 판재를 이용한 모든 분야에 아주 다양하게 사용되고 있다. 따라서 다양한 이중 곡률의 금속 판재를 생산할 수 있도록 용도에 맞는 여러 가지 공정들이 개발되고 있고 현재에도 여러 생산 현장에서 활발히 적용되고 있다.

이러한 이중곡률 형태의 금속 판재를 성형할 수 있는 공정으로 간단한 펀치와 금형만을 사용하여 비교적 저렴한 비용으로 다양한 형상의 금속 판재를 성형할 수 있는 점진적 성형 공정이 있다. 점진적 성형 공정은 재료의 국부적인 변형을 발생시켜 전체를 성형하는 공정으로 원하는 형상을 비교적 다양하게 제작할 수 있는 유연적 특징이 있다. 그러나 금형을 완전히 배제할 수 없기 때문에 형상에 따라 간단한 금형을 제작해야 하며, 또 성형 원리가 대부분 전단 응력에 의한 두께 변형이므로 재료의 두께 변형이 심하게 발생하는 문제가 있다. 이러한 배경을 바탕으로, 이중 곡률을 갖는 금속 판재를 성형하는데 있어 점진적 성형 공정의 유연적 장점을 살리면서 금형이 필요 없고 두께 변형이 거의 일어나지 않는 새로운 박판 성형 공정인 점진적 롤 성형 공정을 제안하였다. 또한 다구찌 기법을 이용한 실험을 통해 공정 변수가 곡률 생성에 미치는 영향을 살펴 보았다.

* 한국과학기술원 기계공학과

2. 점진적 롤 성형 공정 (Incremental Roll Forming Process)

2.1 롤셋 (Roll Set)

Fig. 1 은 점진적 롤 성형 공정의 개략도와 공정의 핵심이 되는 롤셋(roll set)을 나타내고 있다.

롤셋은 금속 판재에 굽힘 변형을 발생시키는 성형 공구로 Fig. 1 과 같이 두 쌍의 받침롤(support roll)과 한 개의 중심롤(center roll)로 구성되어 있다. 중심롤은 모터에 의해 구동되면서 고정된 축을 기준으로 회전이 가능하게 설계되어 있어 중심롤이 금속 판재를 누르고 있는 상태에서 회전하게 되면 판재와의 접촉 부분에서 발생하는 마찰에 의해 재료를 이송하게 된다. 이때, 각각의 받침롤은 볼 베어링과 같이 방향성 없이 자유롭게 회전하기 때문에 중심롤의 회전에 의해 이송되는 재료의 움직임을 도울 수 있다. 이와 같이 롤셋을 이용하여 성형함으로써 금속 판재에 국부적인 굽힘 변형을 두 방향으로 동시에 발생시키고 이를 판재의 전 영역에 걸쳐 연속적으로 발생시켜 이중 곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있게 된다.

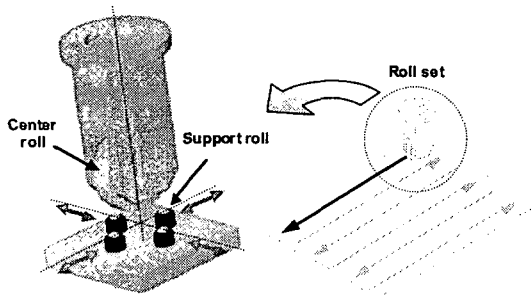


Fig. 1 Schematic diagram of the incremental roll forming process and the roll set

2.2 특징

본 공정은 점진적 성형 공정이 갖는 대표적인 특징인 유연적 특징(flexibility)을 가지고 있다. 즉, 스탬핑 공정과 같이 원하는 형상에 따라 펀치와 다이틀을 새롭게 설계 및 제작하여 성형할 필요 없이 앞에서 설명한 롤셋만을 이용하여 다양한 이중 곡률의 금속 판재를 성형할 수 있다. 이로써 금형을 제작하기 위한 시간과 비용을 크게 절감하면서 다양한 형상의 금속 판재를 제작할 수 있다.

한편 기존의 점진적 성형 공정과 비교해 보면, 기존의 대부분의 점진적 성형 공정은 반구형 펀치를 이용하여 블랭크 홀더로 고정된 재료에 전단 변형에 의한 스트레칭(stretching)을 주로 발생시키는 특징을 가지고 있다. 그러나 본 공정에서는 반구형 펀치 대신 구면을 갖는 여러 개의 롤을 이용하여 롤셋을 구성함으로써 굽힘 변형이 주로 발생하도록 설계되었다. 따라서 기존의 점진적 성형 공정이 과도한 스트레칭으로 인한 찢어짐(tearing) 문제점이

주로 발생하는 반면, 굽힘 변형을 주로 발생시키는 본 공정은 두께 변형율이 매우 작기 때문에 찢어짐과 같은 문제점을 방지하였다.

또한 기존의 점진적 성형 공정이 블랭크 홀더를 이용하여 재료를 성형함으로써 홀더 부위의 재료 손실을 유발하는 반면, 본 공정은 중심롤과 받침롤이 홀더 역할을 동시에 수행하므로 블랭크 홀더로 인한 재료 손실을 최소화 하였다.

3. 공정 변수와 실험 방법

3.1 공정 변수

Fig. 2 는 이중 곡률의 판재를 성형하는 롤셋과 재료의 규격에 대한 변수 정의를 나타내고 있다. 중심롤과 받침롤 표면의 곡률 반경 R_c 와 R_s , 두 쌍의 받침롤의 간격 $2a$ 와 $2b$, 중심롤로 눌러주는 성형 깊이 d_z , 정사각형 시편의 크기와 두께를 나타내는 L 과 t_w 등이다.

롤셋의 치수와 재료의 크기가 각각 $R_c=50$ mm, $R_s=7.8$ mm, $L=100$ mm 로 고정된 상태에서 재료의 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 공정 변수로 시편의 두께, 두 쌍의 받침롤의 간격 $2a$ 와 $2b$, 중심롤이 시편을 눌러주는 성형 깊이(forming depth) d_z 를 생각할 수 있다.

이들 공정 변수를 다양하게 설정하고 실험을 수행함으로써 다양한 이중 곡률의 판재를 성형하고 공정 변수가 곡률 생성에 미치는 영향을 파악하도록 한다.

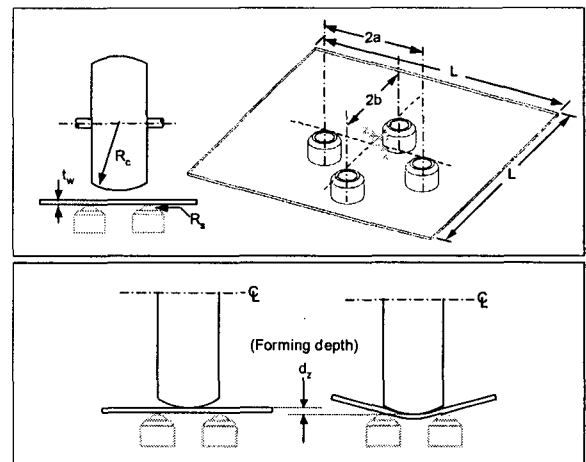


Fig. 2 Definition of process parameters

3.2 성형 단계(forming stage) 및 성형 경로(forming path)

점진적 성형 공정의 원리를 확대 적용하여 다단계 성형(multistage forming)으로 실험을 수행하고자 한다. 즉, 중심롤이 최종적으로 눌러주는 깊이에 이르기까지 한번에 눌러서 성형하는 것이 아니라 초

기 평면에서부터 각 성형 단계(forming stage) 별로 특정한 성형 깊이(forming depth) 상태에서 전체 성형을 한 후, 계속해서 다음 성형 단계에 해당하는 성형 깊이만큼 눌러주고 성형을 재개하는 것을 의미한다. 이에 따라 다단계 성형의 성형 단계는 중심틀이 초기 위치에서 눌러주는 성형 깊이에 의해 결정되며, Table 1 과 같이 0.2mm 간격으로 성형 단계를 결정하였다.

한편 성형 경로(forming path)는 중심틀의 회전에 의해 재료가 이송되는 경로를 의미하는 것으로 성형 경로를 따라 재료에 국부적인 굽힘 변형이 발생하게 된다. 이러한 성형 경로를 재료의 전 범위에 걸쳐 여러 개 생성 시킴으로써 각 성형 단계에서의 성형이 이루어지게 된다. 본 실험에서 구성한 각 성형 단계에서의 성형 경로는 Fig. 3 과 같으며, 이웃하고 있는 성형 경로는 5mm 간격으로 구성되어 있다. 특히 성형 단계의 시작과 끝에서 시편의 중심선을 따라 추가 성형을 해주는 특징이 있는데 이는 시편의 중심 부분을 강조하여 성형함으로써 전체적으로 균형 잡힌 형상을 제작하기 위함이다. 또한, 이중 곡률이 재료의 전 영역에 균등하게 생성될 수 있도록 성형 단계가 진행됨에 따라 성형 경로의 진행 방향을 90 도씩 회전시켜 주었다.

한 개의 성형 경로를 따라 성형을 마친 후, 다음의 성형 경로로 이동하는 과정은 현재까지는 수동으로 조작하여 주었다. 이러한 점은 재료 이송의 자동화를 통해 향후 보완하고자 한다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Forming Stage	I	II	III	IV	V	VI	VII
d_z (mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	...

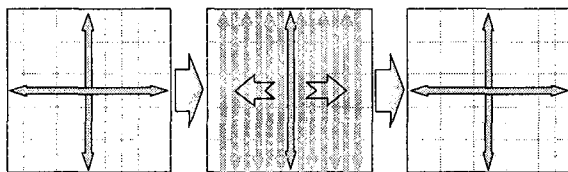


Fig. 3 Forming paths at each forming stage

3.3 다구찌 기법을 이용한 성형 실험 조건

점진적 롤 성형 공정에서 공정 변수가 금속 판재의 곡률 생성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다구찌 기법을 적용하여 실험 조건을 설정하였다. Fig. 2 에서 정의한 공정 변수 중에 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 인자로 시편의 두께(t_w), 두 쌍의 받침틀의 간격 $2a$ 와 $2b$, 중심틀이 시편을 눌러주는 성형 깊이 d_z 등과 같은 네 개의 공정 변수를 선택하여 Table 2 와 같이 공정 변수의 수준(level of parameters)을 설정하였고 이를 이용하여 Table 3 과

같이 $L_9(3^4)$ 의 직교 배열표(orthogonal array)로 실험 조건을 결정하였다.

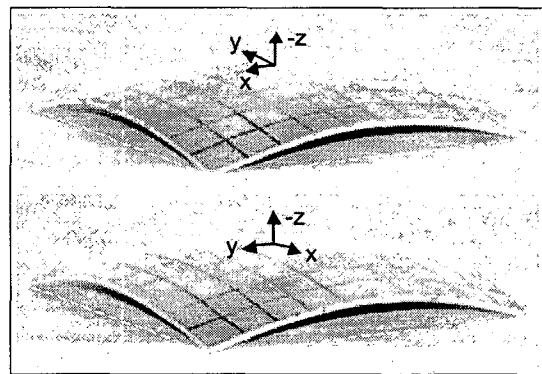
Table 2 Level of process parameter

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
t_w (mm)	2	3	4
$2a$ (mm)	40	45	50
$2b$ (mm)	40	45	50
d_z (mm)	1.0	1.2	1.4

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

Exp. No.	t_w (mm)	$2a$ (mm)	$2b$ (mm)	d_z (mm)
1	2	40	40	1.0
2	2	45	45	1.2
3	2	50	50	1.4
4	3	40	45	1.4
5	3	45	50	1.0
6	3	50	40	1.2
7	4	40	50	1.2
8	4	45	40	1.4
9	4	50	45	1.0

Fig. 4 Formed workpiece: Exp. No. 1



4. 이중 곡률을 갖는 판재의 성형 실험 결과

4.1 성형된 시편

Fig. 4 는 롤셋이 장착된 점진적 롤 성형 공정을 이용하여 성형한 결과의 한 예를 보여주고 있다. 카메라의 시점을 고정시키고 성형된 시편을 90 도 회전시키기 전후의 모습을 비교하고 있으며 경계 부분의 형상을 육안으로 확인 해 봄으로써 곡률 생성 경향을 예상할 수 있다. 즉, 두 쌍의 받침틀 간격이

같이 설정된 조건에서는 시편 경계 부분의 프로파일 방향에 관계 없이 비슷하게 나타나고, 두 쌍의 받침롤 간격이 다르게 설정된 조건에서는 시편 경계 부분의 프로파일이 차이를 보이고 있다. 이를 좀더 정확하게 살펴보기 위해 3차원 측정기를 이용하여 성형된 시편을 측정해 보기로 하자.

4.2 중심선의 프로파일 및 곡률 반경

3차원 측정기를 이용하여 성형된 재료의 x 축과 y 축을 따라 측정된 데이터를 나타내고 있는 프로파일을 Exp. No. 1 과 Exp. No. 6 에 대해서 Fig. 5 와 같이 나타내었다. Fig. 5 를 통해 x 축과 y 축 상의 프로파일이 받침롤의 간격이 같게 설정된 조건에서는 거의 일치하고 받침롤의 간격이 다른 조건에서는 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

측정 데이터를 바탕으로 최소자승법(least square method)을 이용하여 얻어진 x 축과 y 축 상의 곡률 반경 R_x 와 R_y 를 정리하면 Table 4 와 같다. 이상의 결과를 바탕으로 두 쌍의 받침롤 간격 2a 와 2b 를 같게 설정하거나 다르게 설정하여 다양한 이중 곡률의 판재를 성형할 수 있음을 알 수 있다.

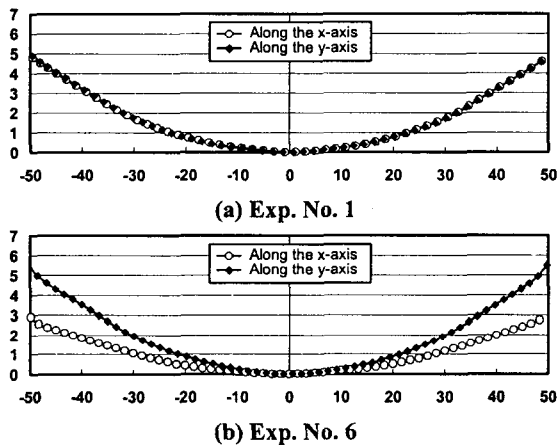


Fig. 5 Profiles along the x-axis and the y-axis of the formed workpiece

Table 4 Radii of curvature along the x-axis and the y-axis

Exp. No.	R_x (mm)	R_y (mm)	R_x / R_y
1	254.5	253.3	1.00
2	274.8	275.4	1.00
3	272.0	271.4	1.00
4	226.2	291.8	0.78
5	346.8	415.0	0.84
6	431.1	234.3	1.84
7	362.0	498.8	0.73
8	374.0	285.5	1.31
9	715.4	528.1	1.35

4.3 공정 변수의 요인 효과 분석

다구저 기법으로 분류된 실험 결과들을 이용하여 R_x 와 R_y 를 평가한 결과는 Fig. 6 과 같다.

x 축 상의 곡률 반경 R_x 에 대하여 재료의 두께 t_w 와 x 축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2a 그리고 성형 깊이 d_z 가 영향을 크게 미치는 반면 y 축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2b 의 영향은 적다는 것을 알 수 있다. 두께와 받침롤의 간격은 그 값이 커질수록, 성형 깊이는 그 값이 작을수록 곡률 반경의 값을 증가하는 경향을 보이고 있다.

마찬가지로 y 축 상의 곡률 반경 R_y 에 대해서도 재료의 두께 t_w 와 y 축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2b 그리고 성형 깊이 d_z 가 영향을 크게 미치는 반면 x 축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2a 의 영향은 적다는 것을 살펴볼 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 주 곡률 반경 R_x 와 R_y 는 동일한 방향에 위치하고 있는 받침롤의 간격에 많은 영향을 받고 있으나 다른 쌍의 받침롤 간격에 의한 영향은 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 주 곡률 반경에 영향을 미치는 주요 공정 변수는 재료의 두께와 눌러주는 성형 깊이 이외에 원하는 방향으로 놓여 있는 한 쌍의 받침롤 간격만을 따로 생각할 수 있으며 주 곡률 반경을 예측하여 성형된 형상을 예측하고자 할 때 두 쌍의 받침롤 간격 2a 와 2b 의 공정 변수를 독립적으로 고려하여 예상식을 단순화할 수 있을 것으로 예상된다.

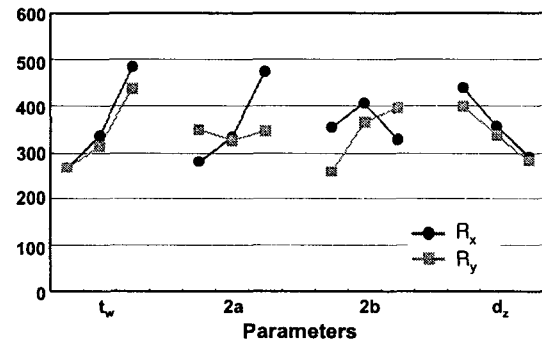


Fig. 6 Effect of process parameter

5. 결론

이중 곡률을 갖는 금속 판재를 성형할 수 있는 점진적 롤 성형 공정을 제안하였다. 제안된 공정은 일반적인 점진적 성형 공정과 같이 유연성(flexibility)의 장점을 지니고 있고, 더불어 스트레칭 변형이 아닌 굽힘 변형을 유발시킴으로써 두께 감소로 야기되는 문제점들을 해소하였다.

이중 곡률의 금속 판재를 제작하는 실험에서 재료의 두께(t_w)와 두 쌍의 받침롤 간격(2a, 2b), 그리고 중심롤의 성형 깊이(d_z)가 곡률 생성에 영향을 미치

는 중요 공정 변수임을 확인하였고 이러한 공정 변수들의 조건을 다양하게 조절함으로써 여러 가지 이종 곡률의 형상으로 성형할 수 있었다. 한편 다구찌 기법의 요인 효과 분석을 통해 공정 변수들이 곡률 생성에 미치는 영향을 정성적으로 파악하여 주 곡률 반경 방향과 같은 방향에 있지 않는 받침롤의 간격은 곡률 생성에 큰 영향을 미치지 않으며, 주 곡률 반경과 같은 방향의 받침롤 간격과 눌러주는 성형 깊이, 그리고 재료의 두께가 곡률 생성에 큰 영향을 미치는 공정 변수임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Matsubara, S., 1994, "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head too," *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 406, pp. 1311 ~ 1316.
- (2) Iseki, H., 1994, "Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers," *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 406, pp. 1336 ~ 1341.
- (3) Kitazawa, K., Tanaka, S. Nakamura, T., 1994, "A CNC incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp corners," *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 406, pp. 1348 ~ 1353.
- (4) Yoon, S. J., Yang, D. Y., 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.
- (5) Taguchi, G, Konishi, S., 1987, "Orthogonal Arrays and Linear Graphs," ASI press