

이중 곡률을 갖는 판재의 성형 공정의 개발에 대한 실험적 연구

윤석준*, 양동열*

Experimental Study on the Development of a Forming Process for Manufacturing Doubly-curved Sheet Metal

Seok-Joon Yoon*, Dong-Yol Yang*

Abstract

In this study, in order to make 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 punch-set which consists of two pairs of lower support-punches and one upper center-punch. 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 punches in pairs and the forming depth of the center-punch, and the edge-forming method is proposed for forming the sheet metal into the balanced shape. The equation using process variables such as the distance between supporting punches in pairs and the forming depth of the center-punch is proposed for the prediction of the radii of curvatures of the formed shape, and it is corrected by the experimental results and the FEM simulation results about whether springback takes place. It is found that, according to the simulation, there is a certain set of the distance between a pair of supporting punches and the forming depth of the center-punch, which causes a little springback. It is thus shown that the radii of curvatures of the formed sheet metal can be predicted by the corrected equation unless significant springback occurs.

Key Words: Incremental forming process, Sheet metal forming, Doubly-curved sheet, Bending deformation,

1. 서론

자동차, 선박, 항공기 등의 동체는 다양한 곡률을 갖는 금속 판재로 제조된다.

이러한 이중곡률 형태의 금속 판재를 성형하는 현황을 살펴보면, 국내 조선업계의 경우 생산된 판재의 곡률 정확도가 떨어져 수작업을 통해 곡률을 맞추는 정도로 이중곡률을 갖는 판재의 제조법이 발달되지 않았고, 자동차업계의 경우 이러한 판재를 대표적으로 스탬핑(stamping) 공정으로 제작하고 있지만 다양한 제품을 생산하기에는 고가의 금형 비용 등의 문제로 적합하지 않은 상태이다.

한편 최근에 간단한 펀치와 금형만을 사용하여 비교적 저렴한 비용으로 다양한 형상의 금속 판재를 성형할 수 있는 점진적 성형 공정이 대두되고 있는데 원하는 형상을 자유롭게 구현할 수 있는 유연적 공정이라는 장점이 있다. 그러나 금형을 완전히 배제할 수 없기 때문에 형상에 따라 금형을 제작해야 하며, 또 성형 원리가 대부분 전단 응력에 의한 두께 변형이므로 재료의 두께 변형이 심하게 발생하는 문제가 있다.

따라서 이중곡률을 갖는 금속 판재를 성형하는데 있어, 이러한 점진적 성형 공정의 유연적 장점을 살리면서 금형이 필요 없고 두께 변형이 거의 일어나지 않는 새로운 공정을 구상하게 되었다.

2. 성형 원리 및 실험 장치

본 연구에서 제안한 성형 공정의 성형 원리는 두께 변형이 거의 발생하지 않는 굽힘 변형 원리이다. 공정에서 사용되는 가공 도구는 펀치만으로 구성되어 있는데, [그림 1]과 같이 두 쌍의 펀치들로 판재의 받침을 이루고 한 개의 펀치가 두 쌍의 받침 펀치들의 도심 위에서 판재를 눌러줌으로써 굽힘 변형이 일어나도록 하는 것이다. (이때 중심에서 눌러주는 펀치를 중심 펀치라 하자.) 즉, 일정한 성형 경로를 따라 일정한 간격으로 중심 펀치를 눌러줌으로써 이중곡률의 판재를 성형하고자 하는 것이며 [그림 2]는 본 공정의 개략적인 성형 과정을 설명한 것이다.

위에서 제안한 성형 도구로 이중곡률의 판재를 성형할 때 곡률을 결정 짓는 변수는 받침 펀치의 간격과 중심 펀치로 눌러주는 성형 깊이이다. 따라서 각각의 중심 펀치 간격을 $2a$, $2b$ 로, 중심 펀치의 성형 깊이는 [그림 3]과 같이 정의 하였다.

본 연구에서는 400°C 에서 3 시간 동안 풀림 처리한 사각형 모양의 알루미늄 시편을 이용하여 실험하였는데, 시편의 가장 자리 영역을 성형함에 있어 별도의 성형법을 제안하였다. 다시 말해서 두 쌍의 받침 펀치 중 한 개의 펀치가 시편을 받쳐줄 수 없는 상태가 되었을 때 [그림 4]와 같은 에지 성형법을 구상하여 도입하였다. 에지 성형법은 세 개의 받침 펀치로 시편을 받치기 때문에 중심 펀치의 위치도 그 세 개의 펀치들이 이

* 한국과학기술원 기계공학과

루는 삼각형의 도심에 위치한다는 것으로 눌러주는 깊이는 다른 영역에서의 성형 깊이의 2/3로 결정하였다.

본 공정은 두께 변형을 최소화하는 목적을 갖고 있기 때문에 원하는 성형 깊이를 몇 단계로 구분하여 성형하였고, 각 단계의 성형 경로는 예지 성형법을 포함하여 [그림 5]와 같이 나타낼 수 있으며 성형 간격 d 값은 5mm이다. 한편, [그림 6]은 실험을 위한 성형 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

3. 성형 실험 및 결과

먼저 받침 펀치 간격이 $2a$ 인 방향을 x 축, $2b$ 인 방향을 y 축으로 설정하여 시편 상의 축을 정의하자. 실험 변수 $2a$, $2b$, Δz 의 값을 [표 1]과 같이 설정하고 실험하였으며 [그림 7]은 실험 4의 결과이다. [그림 8]은 실험 4의 조건으로 성형된 시편의 각 축상에서의 측정값과 최소자승법을 이용한 curve fitting의 profile, 그리고 curve fitting 값을 기준으로 측정값이 벗어난 정도를 오차로 나타내고 있다. 이때의 측정 결과는 3차원 측정기를 이용하여 곡면의 바깥쪽 면을 측정하였다.

각 조건으로 얻어진 이중곡률 판재의 곡률을 최소자승법을 이용하여 곡률 반경으로 나타내면 [표 2]와 같다.

4. 고찰

4.1 곡률 반경의 수학적 계산

앞의 성형 실험 결과를 통해 $2a$, $2b$, Δz 는 곡률 반경에 영향을 미치는 공정 변수들이임을 알 수 있다. 따라서 변수들을 어떻게 설정해야 원하는 곡률 반경을 얻을 수 있는지를 안내해줄 지표가 필요하다. 이러한 필요성을 바탕으로 변수들과 곡률 반경의 관계식을 도출하였다. 이때 관계식은 시편의 종류에 상관없이 일정한 받침 펀치 간격에서 일정한 깊이로 중심 펀치를 눌러주는 공정의 특성상 소재의 성형 전후의 상태를 기하학적으로 이용하여 도출한 것이다. [그림 9]와 같이 단순화한 모델과 정의된 변수들을 이용하여 관계식을 유도하였으며, 모델을 단순화하는 과정에서 재료의 변형이나 스프링백 등의 역학적인 기작은 고려하지 않았다.

부채꼴 abc 에서,

$$r_w \theta = a, \quad \theta = \frac{a}{r_w} \quad (1)$$

이등변 삼각형 abc 에서,

$$\beta = \frac{\pi - \theta}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{a}{2r_w} \quad (2)$$

직각 삼각형 cde 에서,

$$\alpha + \beta = \tan^{-1} \frac{\Delta z}{a} + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{a}{2r_w} \right) = \frac{\pi}{2}, \quad \tan^{-1} \frac{\Delta z}{a} = \frac{a}{2r_w}$$

$$\frac{\Delta z}{a} = \tan \frac{a}{2r_w} \cong \frac{a}{2r_w} \quad (\because \frac{a}{2r_w} < 1) \quad (3)$$

따라서 곡률 반경 r_w 을 실험 변수 a 와 Δz 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore r_w \cong \frac{a^2}{2\Delta z} \quad (4)$$

이상의 관계식을 이용하여 얻어진 곡률 반경과 실험 결과를 [표 3]과 같이 비교하였는데, 이때의 실험 결과는 해당 조건의 모든 곡률반경 결과를 평균하여 이용하였다. [표 3]에서 알 수 있듯이 case 1을 제외하고는 예상치에 대한 실험 결과와 모두 일정 비율 1.70 정도로 계산되었다. 이에 대한 원인은 모델을 단순화한데서 찾을 수 있지만 그 비율이 재료에 따라 일정하다면 (4)식도 유용한 관계식이 될 것이다.

한편 case 1은 1.70보다 큰 2.18 정도로 비율이 계산되었는데 이는 다른 조건에는 적용되지 않은 요인이 작용했기 때문으로 예상되며, 유한요소해석을 통해 스프링백 현상의 영향 여부를 살펴볼 필요가 있다.

4.2 스프링백의 유한요소해석

[그림 10]은 실험 1과 실험 2의 조건에 대해 스프링백을 수치적으로 계산한 결과이다. 여기서 유한요소해석은 윤정환[7]이 탄소성 재료에 대해 셸 요소(shell element)를 이용하여 내연적으로 수치화한 프로그램을 이용하였다. 이때의 결과는 시편의 중심을 중심 펀치로 한번 성형했을 때 이 성형 영역을 포함하는 10mm 크기의 정사각형 영역에 대해서만 도시한 것이며, 실험 3, 실험 4의 조건에 대해서도 실험 2의 조건과 같은 결과가 도출되었다. 이상의 결과에서 case 1에 한해 스프링백이 발생하여 다른 조건보다 큰 k 값이 얻어졌음을 알 수 있고, 스프링백이 발생하지 않는 범위에 한하여 (4)식을 다음과 같이 보정하여 이용할 수 있다.

$$\therefore r_w \cong k \frac{a^2}{2\Delta z} \quad \text{where } k=1.7 \text{ for aluminum} \quad (5)$$

5. 결론

이상의 실험적 연구를 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 펀치만을 이용한 가공 도구를 고안하여 이중곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있는 새로운 공정을 개발하였고, 시편의 가장자리 영

역을 성형하기 위한 에지 성형법을 제안하여 형상의 전체적인 균형을 도모하였다.

- 2) 시편의 성형 전후 형상을 기하학적으로 단순화하여 성형 후의 곡률 반경을 예측할 수 있는 수학적 계산식을 공정 변수 $2a$, $2b$, Δz 가 포함된 식으로 제안하였고, 실험 결과와 스프링백에 대한 유한요소해석 결과를 바탕으로 그 보정식을 제안하였다.
- 3) 본 공정을 이용하여 성형하는 대부분의 경우에는 스프링백이 발생하지 않으나 스프링백이 발생하여 곡률의 생성에 영향을 미칠 수 있는 조건이 존재함을 유한요소해석을 통해 알 수 있었다. 이러한 조건은 받침 편치 간격 $2a$ 와 $2b$ 가 좁고 성형 깊이 Δz 가 얇은 일부의 경우라고 추측할 수 있으며 본 실험에서 사용한 두께가 2mm 인 알루미늄의 경우, $2a=2b=30\text{mm}$ 일때 $\Delta z=1.0\text{mm}$ 이하의 조건에서 스프링백이 나타났다.

Reference

- [1] S. Matsubara, "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool," Journal of the JSTP, 1994 vol. 35 no. 406, pp. 1311 - 1316
- [2] M. Matsubara, S. Tanaka and T. Nakamura, "Forming process of spherical surface by incremental press forming system," Journal of the JSTP, 1994 vol. 35 no. 406, pp. 1330 - 1335
- [3] K. Kitazawa, A. Wakabayashi, K. Murata and J. Seino, "A CNC incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp corners," Journal of the JSTP, 1994 vol. 35 no. 406, pp. 1348 - 1353
- [4] K. Kitazawa, "Incremental sheet metal stretch-expanding with CNC machine tools," Advanced Technology of Plasticity - Proceeding of the fourth international conference, 1993, pp. 1899 - 1904
- [5] 조철훈, "박판 성형을 위한 새로운 수치제어식 시작 방법의 개발," 한국과학기술원 석사논문, 1997
- [6] 김태정, "박판의 점진적 성형 공정의 성형성 향상에 대한 연구," 한국과학기술원 석사논문, 1998
- [7] 윤정환, "변형증분이론을 이용한 평면 이방성 재료의 박판 성형 유한요소 수식화," 한국과학기술원 박사논문, 1997

[표 1] 공정변수($2a$, $2b$, Δz)에 따른 실험구분

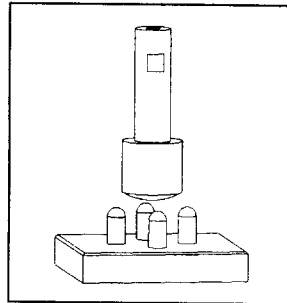
	2a	2b	Δz
실험 1	30	30	1.0
실험 2	30	30	1.2
실험 3	40	30	1.0
실험 4	40	30	1.2

[표 2] 최소자승법을 이용한 곡률 반경

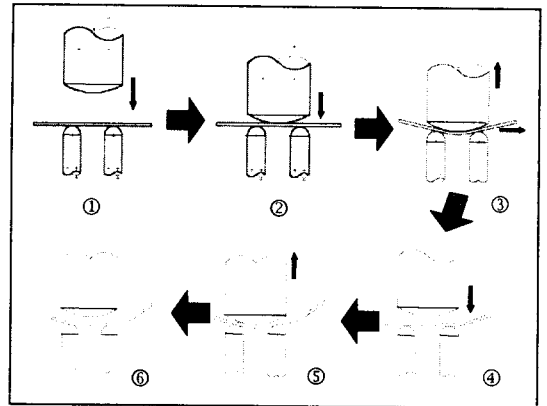
	r_w (mm)	
	On the x-axis	On the y-axis
실험 1	257.5	247.4
실험 2	162.0	181.0
실험 3	339.3	235.9
실험 4	284.3	140.0

[표 3] 곡률반경에 대한 실험치와 예상치의 비교

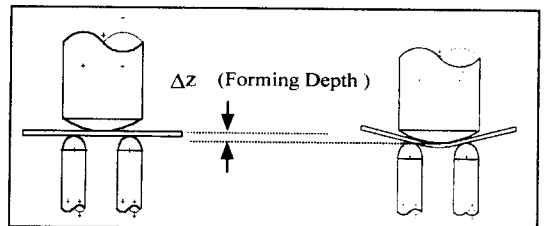
	2a (mm)	2b (mm)	$(r_w)_{exp}$ (mm)	$(r_w)_{exp}$ (mm)	$k = \frac{(r_w)_{exp}}{(r_w)_{pre}}$
case 1	30	1.0	246.9	113.5	2.18
case 2	30	1.2	161.0	94.8	1.70
case 3	40	1.0	339.3	201.0	1.69
case 4	40	1.2	284.3	167.7	1.70



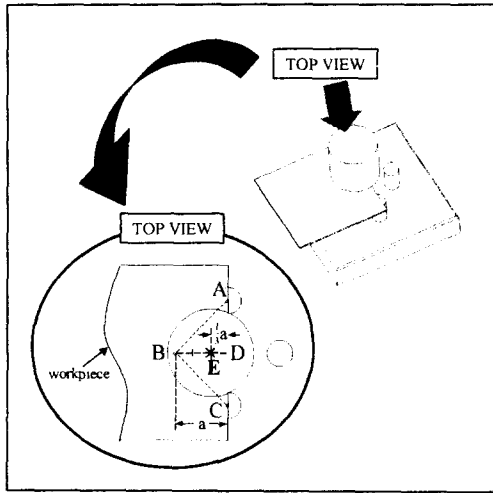
[그림 1] 가공 도구 (punch-set)



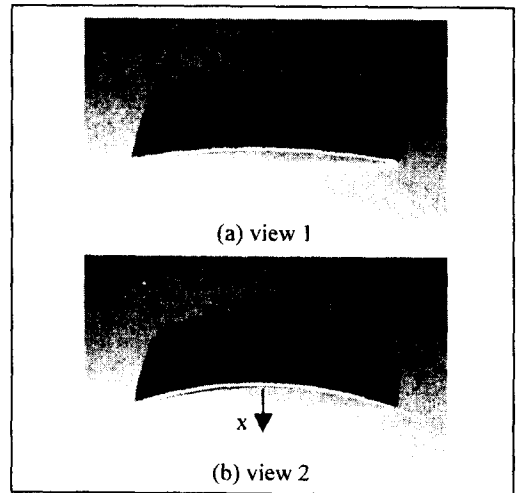
[그림 2] 성형 과정의 개략도



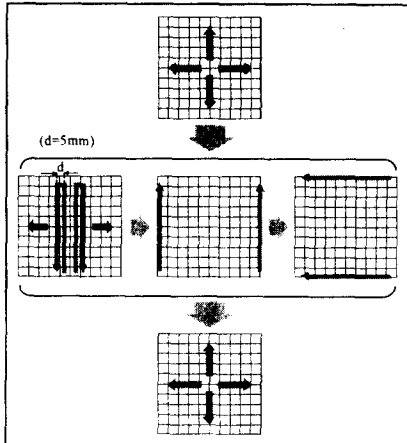
[그림 3] 성형 깊이의 정의



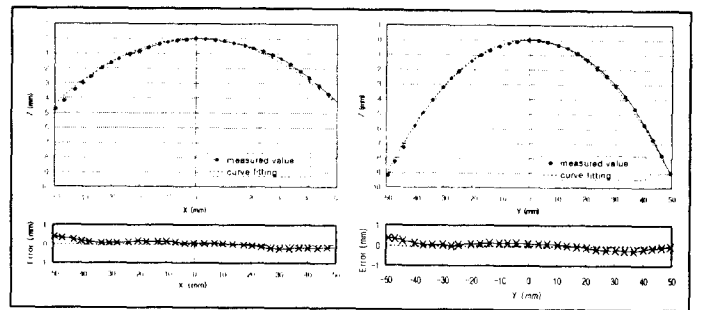
[그림 4] 에지(edge) 성형법



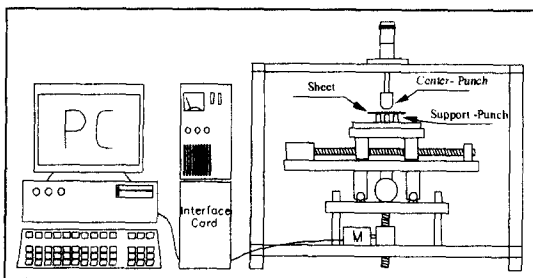
[그림 7] 실험 4의 성형된 시편



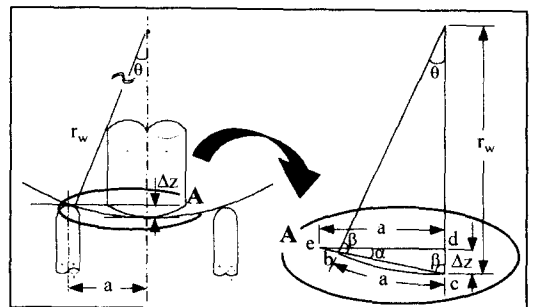
[그림 5] 각 단계에서의 성형경로



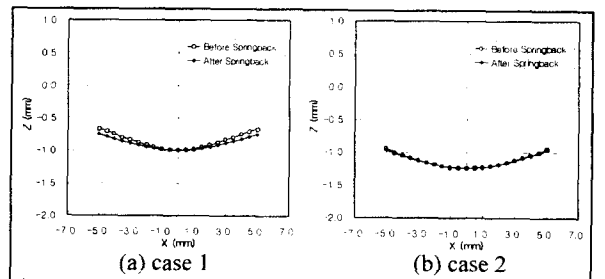
[그림 8] 실험 4의 profile 및 error



[그림 6] 실험 장치 개략도



[그림 9] 가공 도구의 단순화된 모델



[그림 10] 스프링백의 유한요소해석