

점진적 롤 성형 공정을 이용한 이중 곡률을 갖는 일반적인 사각형 시편의 성형 방법

윤석준*(KAIST 대학원, 기계공학과), 양동열(KAIST, 기계공학과)

Forming Method to Manufacture a Doubly Curved General Quadrilateral Sheet Metal Using the Incremental Roll Forming Process

S. J. Yoon*(Mechanical Eng. Dept., KAIST), D. Y. Yang(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

In order to manufacture a doubly curved sheet metal effectively, a flexible incremental roll forming process has been developed by adopting the advantages of the incremental forming process and the roll forming process by combining inherent flexibility of the incremental forming process and continuous deformation of the roll forming process. The forming method has been further enhanced to form general quadrilateral blanks (including a square, a rectangle, a symmetrical trapezoid and an asymmetrical trapezoid, etc.) into doubly curved shapes by controlling the forming paths developed by various experiments.

Key Words : Doubly Curved Sheet(이중 곡률 판재), Incremental Forming Process(점진적 성형 공정), Roll(롤), Bending Deformation(굽힘 변형)

1. 서론

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 판재들을 성형할 수 있는 공정으로 간단한 펀치와 금형만을 사용하여 비교적 저렴한 비용으로 다양한 형상의 금속 판재를 성형할 수 있는 점진적 성형 공정이 있다⁽¹⁻⁴⁾.

점진적 성형 공정은 재료를 국부적으로 성형하고 이러한 국부적인 변형을 전 영역에 걸쳐 발생시킴으로써 전체를 성형하는 공정으로 원하는 형상을 비교적 다양하게 제작할 수 있는 유연적 특징을 가지고 있다. 그러나 전형적인 점진적 성형 공정은 금형을 완전히 배제할 수 없기 때문에 형상에 따라 간단한 금형을 제작해야 하며, 또 성형 원리가 대부분 전단 응력에 의한 두께 변형이므로 재료의 두

께 변형이 심하게 발생하여 찢어짐(tearing) 등의 문제가 발생할 수 있다⁽¹⁻³⁾.

이러한 배경을 바탕으로, 이중 곡률을 갖는 금속 판재를 성형하는데 있어 점진적 성형 공정의 유연적 장점을 살리면서 금형이 필요 없고 두께 변형이 거의 일어나지 않도록 하는 점진적 롤 성형 공정이 제안되었다^(5, 6). 본 연구는 점진적 롤 성형 공정을 이용하여 다양한 형태의 초기 시편을 성형하는 방법에 대해 알아보하고자 한다. 즉, 정사각형이나 직사각형 형태가 아닌, 빗변을 갖는 일반적인 사각형에 대해서 성형경로의 설계를 통해 곡률이 보다 균일하게 분포할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 점진적 롤 성형 공정 및 실험 조건

2.1 점진적 롤 성형 공정

Fig. 1 은 점진적 롤 성형 공정의 개략도로서 성형 원리를 설명하고 있다. 점진적 롤 성형 공정은 롤셋(roll set)이라 명명한 성형 공구로 금속 판재에 굽힘 변형을 발생시킨다. 점진적 롤 성형 공정에서

가장 핵심적인 부분인 롤셋은 Fig. 1 과 같이 한 개의 중심롤(center roll)과 두 쌍의 받침롤(support roll)로 구성되어 있으며, 받침롤과 중심롤 사이에 금속 판재를 위치시켜 놓고 중심롤로 눌러줌으로써 롤셋에 접촉하는 판재의 국부적인 영역에 굽힘 변형을 발생시킨다. 이때 세 점에 의한 굽힘 변형을 두 방향으로 동시에 발생시킴으로써 이중 곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있게 된다.

실제 실험 장비에서 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. 2 는 생성된 성형 경로에 따라 시편의 움직임을 제어할 수 있는 그리퍼 시스템이 추가된 점진적 롤 성형공정의 개략도이다.

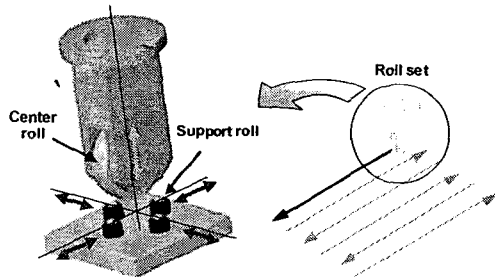


Fig. 1 Schematic diagram of the incremental roll forming process and the roll set

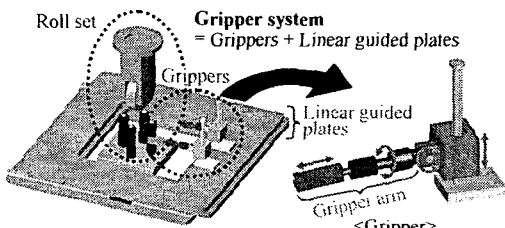


Fig. 2 Modified Incremental Roll Forming Process

Table 1 Fixed values of the experimental setup

Roll set		Process parameters	
R_c	50 mm	$2a, 2b$	40 mm
R_s	7.8 mm	d_z	1.2 mm

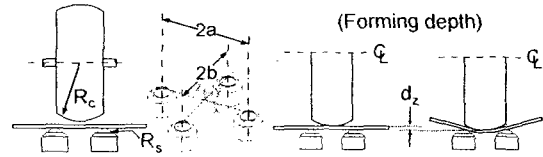


Fig. 3 Definition of the experimental parameters

2.2 공정변수 설정

Fig. 3 은 점진적 롤 성형 공정에서 사용되고 있는 공정변수들을 정의하고 있다. 이전의 연구^(5, 6)를 통해, 이들 공정변수를 다양하게 조합함으로써 다양한 이중 곡률을 갖는 판재를 제작할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이들 공정변수의 다양화를 통한 다양한 곡률의 형상 제작보다는 일반적인 사각형 시편의 형상에 따른 성형경로 설계에 초점을 맞추기 위해 Table 1 과 같이 Fig. 3 에 정의된 공정변수들의 값을 고정하여 실험을 수행하였다.

3. 형상 적응형 성형경로 구성

3.1 사각시편의 종류

Fig. 4 는 본 연구에서 사용한 초기 사각형 시편의 종류를 보여주고 있다. 직사각형을 포함하여 대칭형 사다리꼴, 비대칭형 사다리꼴 등으로 분류하였고 동일한 너비를 갖는 직사각형 시편은 빗변을 갖는 다른 시편의 성형 패턴을 비교하는 기준으로 삼을 예정이다. Table 2 는 Fig. 4 의 각 종류 별 사각형 시편의 규격을 정의하고 있다.

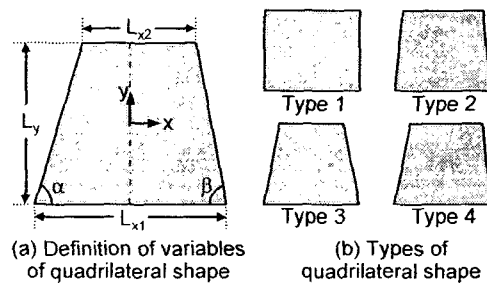


Fig. 4 Various quadrilateral blanks

Table 2 Definition of various quadrilateral sheet blanks

	L_x (mm)		L_y (mm)	α (rad)	β (rad)
	L_{x1}	L_{x2}			
Type 1	120	120	100	$\pi/2$	$\pi/2$
Type 2	100	120	100	$\tan^{-1}(10)$	$\tan^{-1}(10)$
Type 3	80	120	100	$\tan^{-1}(5)$	$\tan^{-1}(5)$
Type 4	90	120	100	$\tan^{-1}(5)$	$\tan^{-1}(10)$

3.2 IEC 성형경로 (Inclined Edge-Conforming Forming Paths)

빗변을 갖는 등의 일반적인 사각형 시편의 초기 형상 정보를 반영한 IEC 성형경로 (Inclined Edge-Conforming Forming Paths)를 구성하는 방법을 제안하였다. 즉, 빗변을 갖는 사각형의 형상 적응형 성형경로 구성법으로서, Fig. 5 와 같이 마주보고 있는 변들의 길이를 등분한 후 대응하는 점들을 연결하여 전체 성형경로를 구성하는 방법이다. 이와 같은 형상 적응형 성형경로를 구성함으로써 시편 형상에 관계없이 시편 전영역에 곱힘변형을 발생시킬 수 특징이 있다.

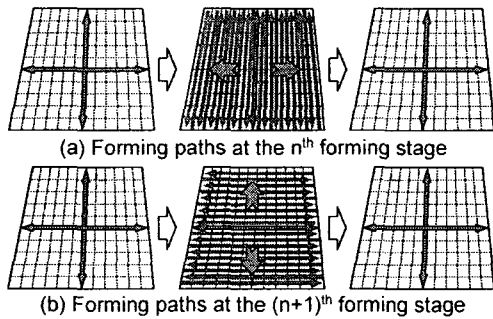


Fig. 5 Inclined edge-conforming forming paths

3.3 IEC 성형경로에 의한 성형 결과

IEC 성형경로를 이용하여 성형한 시편은 Fig. 6 과 같다. 이때 x 축 방향으로 평행한 변을 가지고 있는 시편의 특징을 바탕으로 각 시편의 x 축 방향과 이와 평행한 윗변과 아래변을 따라 3 차원 측정기로 프로파일링을 측정하였다. 직사각형 시편인 Type 1 의 프로파일링을 비교 대상으로 그 프로파일링을 나타낸 것이 Fig. 7 이다. Fig. 7 에서의 보여주고 있는 측정 데이터를 바탕으로 최소자승법으로 구한 곡률반경값들은 Table 3 과 같다. 이때, R_x , R_{x1} , R_{x2} 는 각각 x 축 방향의 곡률반경, x 축과 평행한 윗변의 곡률반경, x 축과 평행한 아래변의 곡률반경을 의미한다.

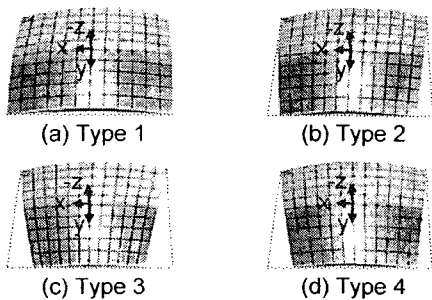
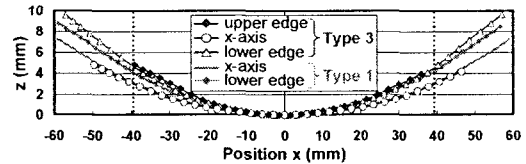
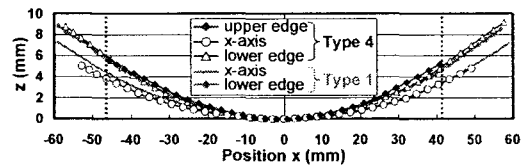


Fig. 6 Experimental results formed according to the IEC forming paths

Fig. 7 을 살펴보면, 각 종류의 시편들이 위치별로 직사각형의 프로파일과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Table 3 을 살펴보면 길이가 짧은 윗변에서의 곡률반경이 값이 직사각형의 곡률반경과 비교하여 작게 나타나고 있는데 이는 길이 차이에 의한 기하학적 구속력 차이로 보여진다.



(a) Type 3: IEC forming paths



(b) Type 4: IEC forming paths

Fig. 7 Measured profiles of the workpieces along the x-axis, the upper edge and the lower edge

Table 3 Radii of curvature of the workpiece formed according to the IEC forming paths

	R_{x1} (mm)	R_x (mm)	R_{x2} (mm)	$\frac{R_{x1}}{R_{x1}^{ref}}$	$\frac{R_x}{R_x^{ref}}$	$\frac{R_{x2}}{R_{x2}^{ref}}$
Type 1	182.3	244.1	182.4	1.00	1.00	1.00
Type 2	173.4	261.2	176.1	0.95	1.07	0.97
Type 3	158.8	259.1	171.1	0.87	1.06	0.94
Type 4	173.6	266.9	183.8	0.95	1.09	1.01

3.4 성형경로에 따른 성형결과 비교

Fig. 8 은 IEC 성형경로 이전에 가장 쉽게 구성할 수 있는 RCP 성형경로 (Regular Checkerboard-Patterned Forming Paths)를 보여주고 있다. 이와 같은 RCP 성형경로로 비대칭 사다리꼴인 Type 4 를 성형한 결과와 IEC 성형경로로 성형한 실험 결과를 비교하면 Fig. 9 과 같다. 즉, 각각의 성형 시편들의 측정 데이터를 바탕으로 구성한 NURBS 곡면⁽⁷⁾을 이용하여 곡률분포를 도시한 것이다.

IEC 성형경로를 따라 성형한 시편에서 곡률분포가 보다 균일하게 나타남을 알 수 있다. 이로써, 성형경로를 어떻게 구성하느냐에 따라 전체 시편의 곡률분포를 다양하게 할 수 있고, 최종 형상에도 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한 초기 시편의 형상 적응형 성형경로인 IEC 성형경로를 따라 성형을 하면, 형상 전체에 곱힘변형을 골고루 발생시킬 수 있기 때문에 곡률이 보다 균일하게 분포하는 형상을 제작할 수 있음을 알 수 있다.

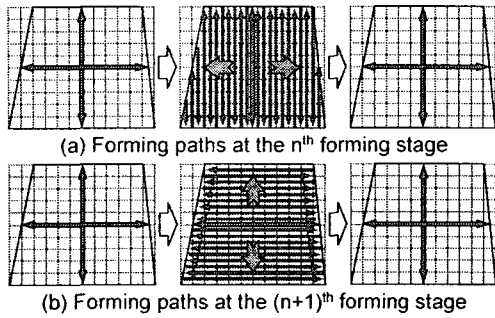


Fig. 8 Regular checkerboard-patterned forming paths

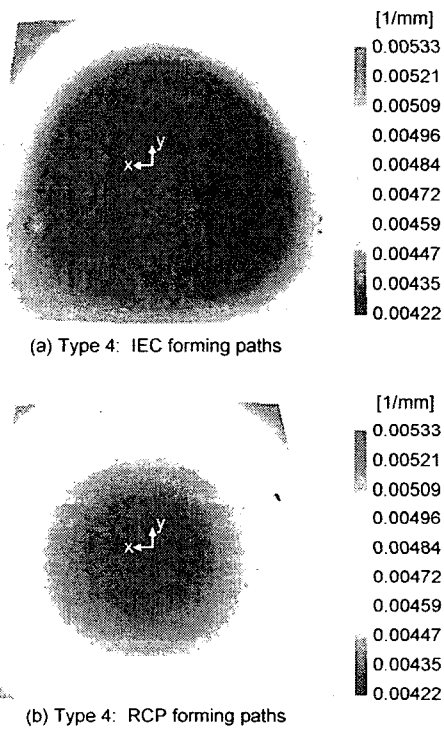


Fig. 9 Comparison of the distributions of the curvature

5. 결론

점진적 롤 성형공정을 이용하여 일반적인 사각형 시편을 이중 곡률의 판재로 성형하는 방법을 성형경로 설계를 통해 제안하였다. 즉, 형상 적응형 성형경로인 IEC 성형경로 (Inclined Edge-Conforming Forming Paths)를 구성하는 방법을 제안하여 다양한 초기 사각형 시편을 성형하였다.

빋변이 있는 사각형 시편을 성형할 때, 제안된 IEC 성형경로는 기존의 빋변이 없는 직사각형을 성형할 때 적용했던 RCP 성형경로 (Regular Checkerboard-Patterned Forming Paths)로 성형하는 경우보다 보다 균일한 곡률분포를 갖는 형상으로 제작할 수 있었다.

이로써 성형경로의 설계를 통해 다양한 곡률분포를 갖는 형상을 제작할 수 있으며, 이는 최종 형상에 영향을 미치지 때문에 성형경로를 설계하는 단계는 원하는 형상을 제작하기 위해 중요한 단계임을 알 수 있다.

참고문헌

1. Matsubara, S., "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool," Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1311-1316, 1994.
2. Iseki, H. and Kumon, H., "Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers," Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1336-1341, 1994.
3. Kim, T. J. and Yang, D. Y., "Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process," Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, pp. 1271-1286, 2000.
4. Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "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, pp. 991-1004, 2001.
5. Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "Development of a Highly Flexible Incremental Roll Forming Process for the Manufacture of a Doubly Curved Sheet Metal," Annals of the CIRP, Vol. 52, pp. 201 - 204, 2003.
6. 윤석준, 양동열, "점진적 롤 성형공정을 이용한 이중곡률의 금속판재 제작 및 정밀성형을 위한 형상 예측," 한국 정밀공학회지, 제 21 권, 제 9 호, pp. 95-102, 2004.
7. Piegal, L. and Tiller, W., "The NURBS Book," Springer, 1995.