

# 점진적 롤 성형공정을 이용한 이중곡률의 금속판재 제작 및 정밀 성형을 위한 형상 예측

윤석준\*, 양동열#

## Manufacture of Doubly Curved Sheet Metals Using the Incremental Roll Forming Process and Prediction of Formed Shapes for Precision Forming

Seok-Joon Yoon\* and Dong-Yol Yang#

### ABSTRACT

A flexible incremental roll forming process has been developed by adopting the advantages of the incremental forming process and the roll forming process: i.e., inherent flexibility of the incremental forming process and continuous bending deformation of the roll forming process. It has an adjustable roll set as a forming tool composed of one upper center roll and two pairs of lower support rolls, which plays a key role during forming process. Through the experiments based on the various combinations of process parameters, it is shown that the incremental roll forming process is so effective as to manufacture various doubly curved sheet metals including concave-convex combination shapes in which there exists a line of inflection. The proposed relationship of the experimental parameters and the radius of curvature of the formed sheet boundary is found to be useful in prediction and control of the final shape.

**Key Words** : Doubly Curved Sheet(이중곡률 판재), Incremental Forming Process(점진적 성형공정), Roll(롤), Bending Deformation(굽힘 변형)

### 기호설명

a = half-distance between a pair of support rolls along the x axis  
b = half-distance between a pair of support rolls along the y axis  
 $d_z$  = forming depth of the center roll  
L = length of a side of a square workpiece  
 $R_b$  = radius of curvature derived from the boundary

of the deformed workpiece  
 $R_c$  = radius of curvature of the center roll  
 $R_s$  = radius of curvature of the support roll  
 $R_x$  = radius of curvature derived from the point data on the x axis of the deformed workpiece  
 $R_y$  = radius of curvature derived from the point data on the y axis of the deformed workpiece  
 $t_w$  = workpiece thickness

접수일: 2004년 2월 11일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

## 1. 서론

자동차, 선박, 항공기 등의 동체는 이중곡률을 갖는 금속판재로 구성되어 있다. 이때 이중곡률이란, 타원면과 같이 면의 위치에 따라  $x$  축과  $y$  축으로 대표되는 평면 상의 두 축 방향으로 곡률이 서로 다르게 생성된 것을 의미한다. 이러한 이중곡률 형태의 금속판재를 성형할 수 있는 공정은 여러 가지가 있지만 간단한 성형공구와 간단한 금형만을 사용하여 비교적 저렴한 비용으로 다양한 형상의 금속판재를 성형할 수 있는 점진적 성형공정에 주목하고자 한다.

점진적 성형공정은 간단한 성형공구를 이용하여 재료에 국부적인 변형을 발생시키고 이러한 국부적인 변형을 시편의 전 영역에 걸쳐 점진적으로 발생시켜 가면서 성형하는 공정이다. 따라서 점진적 성형공정은 간단한 성형공구를 이용하여 원하는 형상을 다양하게 제작할 수 있는 유연적 특성(flexibility)을 큰 장점으로 가지고 있다.<sup>1-6</sup> 그러나 전형적인 점진적 성형공정은 금형을 완전히 배제할 수 없기 때문에 형상에 따라서는 간단한 금형이 필요한 경우도 있고, 다른 한편으로는 주된 성형 원리가 전단 응력에 의해 발생하는 두께 변형이 바탕이 되므로 재료의 두께 변형이 심하게 발생하여 찢어짐(tearing) 등의 문제를 유발할 수 있다.<sup>14</sup>

이러한 배경을 바탕으로 점진적 성형공정의 유연적 특성을 유지하면서 금형이 필요 없고 두께 변형이 거의 일어나지 않도록 새롭게 고안된 공정이 점진적 롤 성형공정이다.<sup>6,7</sup> 본 연구에서는 점진적 롤 성형공정을 이용하여 다양한 이중곡률의 금속판재를 제작해 봄으로써 새로운 공정의 효용성을 살펴보고자 한다. 또한 성형공정의 정밀화를 위해 최종 형상을 제어하고 예측할 수 있는 공정 변수와 성형된 형상의 곡률 반경과의 관계를 제안하였다.

## 2. 점진적 롤 성형공정

### 2.1 롤셋(Roll Set)

Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 점진적 롤 성형공정의 개략도로서 성형 원리를 설명하고 있다. 점진적 롤 성형공정은 롤셋(roll set)이라 명명한 성형공구로 금속판재에 굽힘 변형을 발생시킨다. 점

진적 롤 성형공정에서 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 금속판재를 위치시켜 놓고 중심롤로 눌러줌으로써 롤셋에 접촉하는 판재의 국부적인 영역에 굽힘 변형을 발생시킨다. 이때 세점에 의한 굽힘 변형을 두 방향으로 동시에 발생시킴으로써 이중곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있게 된다.

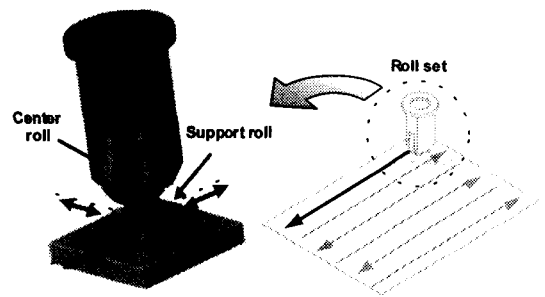


Fig. 1 Schematic diagram of the incremental roll forming process and the roll set

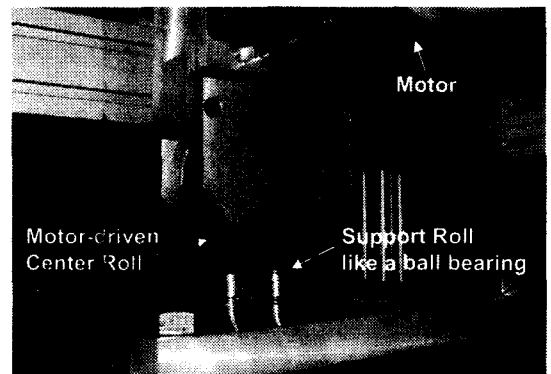


Fig. 2 Experimental setup

Fig. 2 는 롤셋의 실험 장치를 보여주고 있다. 중심롤은 모터에 의해 구동되면서 고정된 축을 기준으로 회전이 가능하게 설계되어 있어 중심롤이 금속판재를 누르고 있는 상태에서 회전하게 되면 판재와의 접촉 부분에서 발생하는 마찰에 의해 재료를 이송하게 된다. 이때, 각각의 받침롤은 볼 베

어령과 같이 방향성 없이 자유롭게 회전하기 때문에 중심롤의 회전에 의해 이송되는 재료의 움직임을 도울 수 있다. 이와 같이 롤셋을 이용하여 성형함으로써 금속판재에 국부적인 굽힘 변형을 두 방향으로 동시에 발생시키고 이를 판재의 전 영역에 걸쳐 연속적으로 발생시켜 이중곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있게 된다. 본 실험 장치는 중심롤과 받침롤의 재료로 각각 탄소강(SM45C)과 스테인레스강(SUS440C)을 사용하여 구성하였다.

### 2.2 특징

점진적 롤 성형공정은 롤셋만을 이용하여 다양한 이중곡률의 금속판재를 성형할 수 있는 유연적 특성을 가지고 있다. 따라서 금형을 제작하기 위한 시간과 비용을 크게 절감하면서 다양한 형상의 금속판재를 제작할 수 있다. 또한 기존의 점진적 성형공정이 반구형 펀치를 이용하여 블랭크 홀더(blank holder)로 고정된 재료에 전단 변형에 의한 스트레칭(stretching)을 주로 발생시키는 반면, 점진적 롤 성형공정에서는 반구형 펀치 대신 구면을 갖는 여러 개의 롤을 이용하여 롤셋을 구성함으로써 굽힘 변형이 주로 발생하도록 설계되었다. 이러한 특징으로 인해 두께 변형율이 매우 작기 때문에 찢어짐과 같은 문제점을 방지하였다. 그리고 블랭크 홀더를 대신하여 중심롤과 받침롤이 홀더 역할을 동시에 수행하므로 블랭크 홀더로 인한 재료 손실을 최소화 하였다.

## 3. 기본적인 이중곡률의 금속판재 제작

### 3.1 성형 단계 및 성형 경로

본 연구에서 사용한 공정은 점진적 성형공정 원리를 바탕으로 하고 있으므로 다단계 성형 과정을 통해 형상을 만들게 된다. 각 성형 단계(forming stage)는 Fig. 4에서 정의하고 있는 중심롤의 성형 깊이(forming depth)가 0.2 mm 씩 증가하면서 결정되며 각 단계에서 시편 전체에 걸쳐 국부적인 변형을 발생시키면 다음 단계의 성형으로 진행된다.

Fig. 3은 각 성형 단계에서 진행되는 성형 경로(forming paths)를 나타내고 있다. 형상을 제작하는 과정은 우선 초기 블랭크 또는 이전 성형 단계를 거친 시편의 중심선을 따라 성형한다. 그리고 나서 중심 영역에서 가장자리 부분으로 성형 경로를

를 진행시킨 후 마지막으로 중심선을 따라 다시 한번 성형해 줌으로써 단계의 성형을 마무리한다. 이때 성형 단계가 진행되면 성형 경로의 방향을 90도씩 회전시켜 주어 대칭 형상을 유도하고 변형률 분포가 보다 균일할 수 있도록 해 준다.

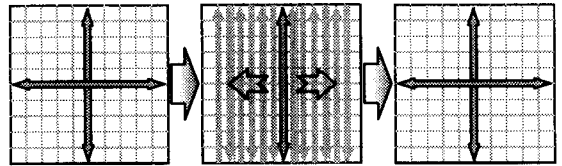


Fig. 3 Forming paths for each forming stage

### 3.2 성형 실험 조건

Fig. 4는 실험에 사용한 공정 변수들의 정의를 나타내고 있으며 Table 1은 공정 변수 중에 롤셋과 시편 치수 등의 고정된 값을 정리한 것이다.

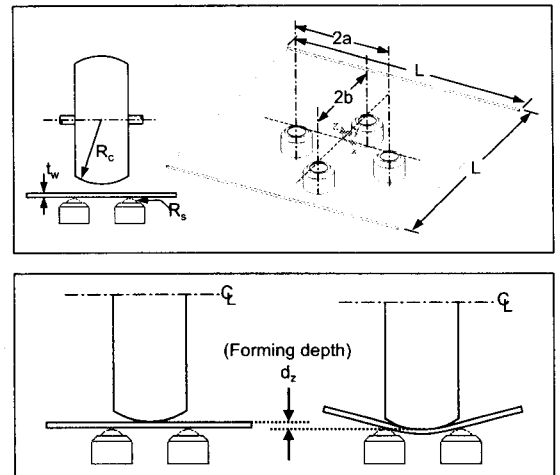


Fig. 4 Definition of the experimental parameters

Table 1 Fixed values of the experimental setup

Roll set		Initial blank	
$R_c$	50 mm	L	100 mm
$R_s$	7.8 mm	$t_w$	2 mm

이때, 롤셋을 구성하는 중심롤은 받침롤과 같은 구(ball)의 일부로 설계하였기 때문에 회전하는 방향과 회전하는 방향을 가로지르는 방향의 곡률 반경은 모두  $R_c$  로 표시될 수 있다. 또한 받침롤과의 간섭 문제를 방지하고자 중심롤의 폭은 26 mm 로 설계하였고 실험 조건도 이를 고려하여 Table 2 와 같이 설정하였다.

Table 2 Conditions of the experiments

	2a (mm)	2b (mm)	$d_z$ (mm)
Exp. 1A	40	40	1.0
Exp. 1B	40	40	1.2
Exp. 1C	40	40	1.4
Exp. 2A	45	40	1.0
Exp. 2B	45	40	1.2
Exp. 2C	45	40	1.4

Table 2 는 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 공정 변수로 선정한 a, b,  $d_z$  에 따라 구분한 실험 조건들이다. Table 2 에서 Exp. 1 은 a 와 b 를 같게 설정하여 재료의 x 축과 y 축 상의 곡률 반경이 일치하는 형상을 만들려고 하였고, Exp. 2 는 a 와 b 를 다르게 설정하여 x 축과 y 축 상의 곡률 반경이 다르게 나타나는 형상을 만들려고 하였다. 이때 Table 2 에서 성형 깊이 값은 최종 성형 단계에서의 값을 의미하며, 최대 성형 깊이 값이 받침롤의 곡률 반경  $R_c$  에 비해 무척 작기 때문에 성형 도중 중심롤과 받침롤과의 간섭은 발생하지 않는다.

한편, 재료는 두께가 2mm 인 알루미늄 합금 (A6061-T6)을 풀림 처리하여 사용하였다.

### 3.3 성형 실험 결과

점진적 롤 성형공정으로 성형된 실험 결과는 Fig. 5 와 같다. Fig. 6 은 성형된 시편의 x 축과 y 축을 따라 삼차원 측정기로 측정된 점 데이터들을 도시한 것이다. 이러한 점 데이터를 이용하여 x 축과 y 축 상의 곡률 반경인  $R_x$  와  $R_y$  를 최소자승법으로 구한 결과는 Table 3 과 같다.

Table 3 의 결과를 살펴보면, 두 쌍의 받침롤의 간격을 같게 설정한 Exp. 1 에서  $R_x$  와  $R_y$  의 비가 거의 1 에 가깝고 두 쌍의 받침롤의 간격을 다르게 설정한 Exp. 2 에서  $R_x$  와  $R_y$  의 비가 Exp. 1 의

경우보다는 큰 차이가 나고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 결과들은 공정 변수 a, b,  $d_z$  를 조절하여 다양한 형상의 이중곡률 판재를 성형할 수 있음을 보여주고 있다.

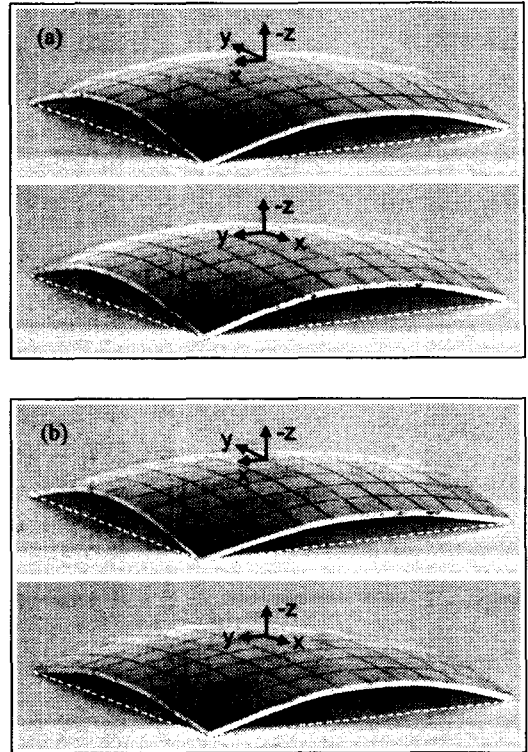


Fig. 5 Formed workpieces; (a) Exp. 1B and (b) Exp. 2B

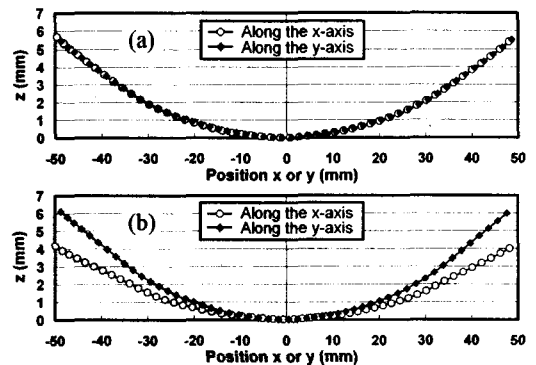


Fig. 6 Measured profiles of the workpieces along the x-axis and the y-axis; (a) Exp. 1B and (b) Exp. 2B

Table 3 Radii of curvature of the formed workpieces

	$R_x$ (mm)	$R_y$ (mm)	$R_x / R_y$
Exp. 1A	254.5	253.3	1.00
Exp. 1B	220.1	218.2	1.01
Exp. 1C	197.5	188.7	1.05
Exp. 2A	338.2	222.1	1.52
Exp. 2B	280.7	193.4	1.45
Exp. 2C	241.7	171.7	1.41

4. 곡률의 방향이 바뀌는 형상 제작

4.1 성형 방법 및 수정된 성형 경로

앞선 성형 실험에서는 성형하고자 하는 시편의 상부에 중심롤이 위치하고 하부에 받침롤이 위치하여 중심롤이 시편의 윗면을 위에서 아래로 눌러주면서 발생하는 굽힘 변형에 의해 오목한 (concave) 형태의 형상을 제작하였다. 따라서 앞의 성형 실험 과정으로 시편의 반을 성형하고, 중심롤과 접촉하는 시편의 면을 아래면으로 바꾸어준 후 다시 성형 과정을 진행한다면 오목한 형상과 볼록한(convex) 형상이 연결된, 즉 곡률의 방향이 바뀌는 형상을 제작할 수 있을 것이다.

오목한 형상과 볼록한 형상의 조합으로 이루어진 제품을 만들기 위해 Fig. 7 과 같이 수정된 성형 경로를 구성하였다.

오목한 방향과 볼록한 방향의 경계 부분인 변곡선(line of inflection)을 시편의 y 축 중심선에 효과적으로 생성시키기 위해 Fig. 7 처럼 시편의 가장 자리에서 성형 경로를 따라 먼저 성형을 하고 차츰 중심 부분으로 옮겨 가면서 성형하고자 하였다. 앞선 실험에서와 같이 시편의 윗면에 중심롤이 접촉하는 영역은 밝은 색 영역, 시편의 아래면에 중심롤이 접촉하는 영역은 어두운 색 영역으로 구분되어 있다.

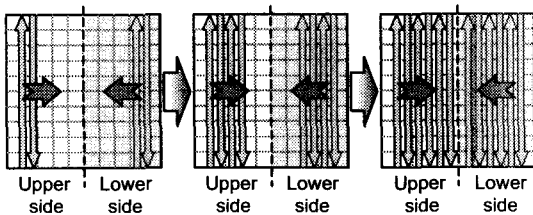


Fig. 7 Modified forming paths

곡률의 방향이 바뀌는 형상을 제작하기 위한 실험 조건은 Table 4 와 같다.

Table 4 Experimental conditions using the modified forming paths

	2a (mm)	2b (mm)	$d_z$ (mm)
Exp. 3A	40	40	1.0
Exp. 3B	40	40	1.2
Exp. 3C	40	40	1.4

4.2 성형 실험 결과

변곡선을 가지고 있는 성형 형상은 Fig. 8 에서 보여주고 있다. 또한 Exp. 3 의 세 가지 실험 결과에서 x 축을 따라 표면 데이터를 측정하고 이를 도시한 그래프는 Fig. 9 에 나타나고 있다.

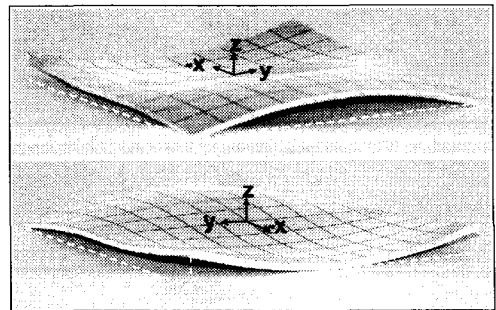


Fig. 8 Formed shape of Exp. 3B

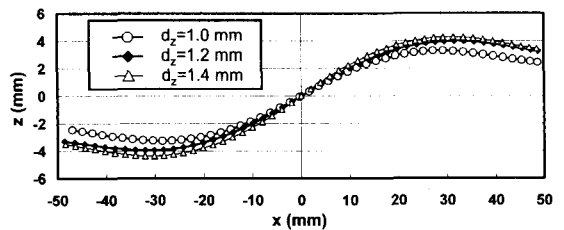


Fig. 9 Measured profiles of Exp. 3 along the x-axis

성형된 시편을 살펴보면 y 축을 따라 변곡선이 존재함을 알 수 있다. 그러나 yz 평면 상에서 변곡면(plane of inflection)을 발견하기가 쉽지 않다. 이는 사용한 시편의 두께가 2mm 정도로 윗면과 아래면의 변형 정도가 일치하지 않기 때문이다.

Fig. 10 은 Exp. 3B 의 조건으로 성형한 시편의 곡률 분포를 NURBS 곡면<sup>8</sup>을 이용하여 나타내고 있다. y 축을 기점으로 곡률의 방향이 정확하게 바뀌지는 않았지만 y 축을 경계로 해서 곡률의 방향이 나뉘고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과는 시편의 양면을 번갈아 가면서 중심률과 접촉하여 굽힘 변형을 유발시킴으로써 곡률의 방향이 변곡선을 기준으로 바뀌는 이중곡률 형상을 만들 수 있고, 이러한 형상은 성형 경로의 수정을 통해 제작할 수 있음을 보여 주고 있다.

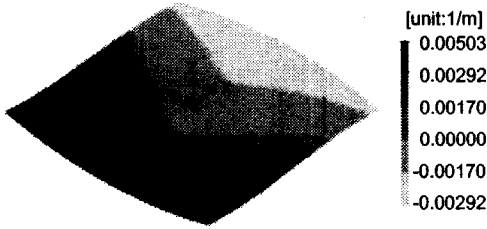


Fig. 10 Distribution of the curvature of Exp. 3B

### 5. 성형 형상의 예측

#### 5.1 기하학적 수식화

점진적 롤 성형공정으로 원하는 이중곡률의 금속판재를 제작하기 위해 형상 경계에서의 곡률 반경과 공정 변수들 사이의 관계식을 구하면 최종 성형 형상을 예측할 수 있다. 즉, 네 개의 경계 곡선으로 쿤스 패치(Coons patch)<sup>8</sup>를 구성할 수 있다는 점을 이용하여 시편 경계에서의 곡률 반경을 공정 변수로 나타내고자 한다.

Fig. 11 은 시편의 경계 부분이 중심률에 의해 성형 깊이  $d_z$  만큼 변형된 상태를 묘사한 것이다. 이때 변형된 상태의 시편 경계 부분은 원호의 일부이고 점  $(x^*, z^*)$ 에서 받침률과 접하고 있다고 가정한다. 한편 기존의 연구<sup>5</sup>를 참고하면, 이러한 성형 모델에서 스프링백 효과는 아주 무시할 만한 수준이기 때문에 스프링백 효과를 제외하여 계산식을 단순화하고자 한다.  $R_b$  를 시편 경계의 곡률 반경이라고 한다면 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

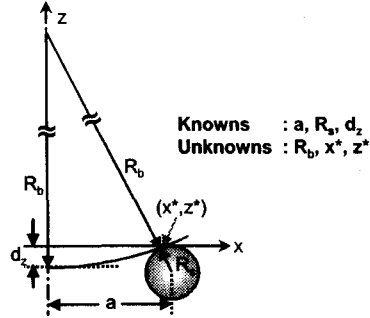


Fig. 11 Model for computing the radius of curvature,  $R_b$

Fig. 11 에서 받침률의 상반 프로파일과 중심률에 의해  $d_z$  만큼 굽힘 변형이 발생한 시편 경계 부분의 프로파일은 (1)식과 (2)식에 의해 각각 나타낼 수 있다. 점  $(x^*, z^*)$ 에서 (1)식과 (2)식이 접한다는 사실을 이용하면 (3)식을 얻을 수 있고, (3)식의 해인  $x^*$ 를 (4)식에 대입하면 경계 곡률 반경  $R_b$  를 구할 수 있다. 이때, 중심률은 가정에 의해 점  $(0, -d_z)$ 에서 접하고 있으므로 중심률의 곡률 반경  $R_c$  는  $R_b$  를 구하는 식에 포함되지 않았다.

$$z = -R_s + \sqrt{R_s^2 - (x-a)^2} \tag{1}$$

$$z = R_b - d_z - \sqrt{R_b^2 - x^2} \tag{2}$$

$$[R_s^2 + a^2 - (R_s - d_z)^2](x-a) = 2a(R_s - d_z)\sqrt{R_s^2 - (x-a)^2} - 2aR_s^2 \tag{3}$$

$$R_b = \frac{a}{a-x^*} \sqrt{R_s^2 - (x^*-a)^2} - R_s + d_z \tag{4}$$

#### 5.2 $R_b$ 의 계산값과 실험값의 비교

Table 5 는  $R_b$  의 실험값과 계산값을 비교하고 있다. 두 값이 거의 비슷하지만 실제로 실험값이 약간씩 작게 얻어졌다. 이는 실제 성형 과정은 점진적 성형 원리를 바탕으로 성형 깊이를 점차적으로 증가시키면서 여러 번 성형을 수행하는 반면, Fig. 11 과 같이 한번에 성형하는 경우로 단순화한 모델은 이러한 점진적 성형 원리가 반영되지 않았기 때문이다. 따라서 한번의 성형에 의한 것보다 실제로는 굽힘 변형이 더욱 많이 발생했기 때문에 실험값과 계산값의 차이가 발생하는 것으로 생각된다.

공정 변수에 따른 실험값과 계산값의 차이를 살펴보면, 2a(또는 2b)가 큰 경우가 작은 경우보다, 혹은  $d_z$  가 커질수록 실험값이 계산값에 근접하고 있음을 알 수 있다. 이는 계산식이 시편의 경계가 원호의 일부라고 가정하고 구해진 식임을 고려하면 점차 원호에 가까워지고 있음을 의미한다. 즉, 본 공정은 점진적 성형 원리에 의해 굽힘 변형이 국부적으로 발생하고 또한 성형 경로의 특성 상 국부적인 굽힘 변형이 시편의 경계를 따라서는 단속적으로 발생되기 때문에 시편의 경계 부분에서 부분적으로 직선에 가까운 프로파일을 보이는 영역이 존재한다. 이러한 영역들이 원호로 가정하여 얻어낸 계산값과 실제 실험값과의 차이를 나타내는 원인으로 분석되는데, 받침롤의 간격이 넓을수록, 혹은 중심롤의 눌러주는 깊이가 깊어 성형 단계가 증가할수록 성형되는 범위가 넓어지고 같은 영역의 반복 성형 횟수가 늘어나면서 이러한 영역이 상대적으로 줄어들게 되어 원호에 가까운 경계 프로파일이 생성된다고 보여진다.

한편, 경계 곡률 반경의 실험값과 계산값의 오차에도 불구하고 (4)식은 성형된 시편 경계에서의 곡률 반경을 근사하는데 유용하게 사용될 수 있다.

Table 5 Results from Equation 4

2a or 2b (mm)	$d_z$ (mm)	$R_b$ (mm)		
		$(R_b)_{Exp}$	$(R_b)_{Cal}$	$(R_b)_{Exp} / (R_b)_{Cal}$
40	1.0	166.0	192.7	0.86
45	1.0	228.6	245.8	0.93
40	1.2	142.4	159.5	0.89
45	1.2	191.8	203.7	0.94
40	1.4	125.4	135.8	0.92
45	1.4	167.0	173.7	0.96

### 5.3 예측된 형상과 실험 결과의 비교

앞서 구한 Table 5 의 경계 곡률 반경  $R_b$  를 이용하여 네 개의 경계 곡선을 구하고 쿤스 패치를 적용시킨 결과는 Fig. 12 와 같다. 두 쌍의 받침롤 간격이 다르게 설정된 Exp. 2B 의 실험 조건을 적용하여 나타내었고 쿤스 패치로 구해진 시편 내부의 점 데이터는 NURBS 곡면을 이용하여 근사하였다.

한편 쿤스 패치로 얻어진 곡면 결과와 실제

실험 결과를 비교하기 위하여 Fig. 13 과 같이 오차를 도시하였다. 그림에 나타난 오차는 쿤스 패치로 얻어진 z 좌표와 측정된 z 좌표의 차이를 보여주고 있다. 이때 좌표계는 시편의 중심을 원점으로 일치시켜 오차를 나타내었다.

Fig. 13 의 결과에서 중심 부분의 영역에서는 거의 일치하다가 시편의 경계면에 가까워질수록 쿤스 패치에 의한 z 값이 더 큰 결과를 보여주고 있다. 이는 앞에서 언급했듯이 성형 깊이를 증가시키면서 다단계 성형을 통해 최종 성형 깊이에 이르는 실제 공정의 특징이 수식화 과정에서 한번의 과정으로 단순화 되었기 때문이다.

향후에는 이러한 가정의 보완과 더불어 점진적 롤 성형 원리가 충분히 반영된 모델을 FE 해석 등을 수행함으로써 스프링백 효과를 계산식에 반영할 수 있을 것이다. 이를 통해 더욱 정확한 성형 형상을 예측할 수 있으며, 더욱 정밀하게 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

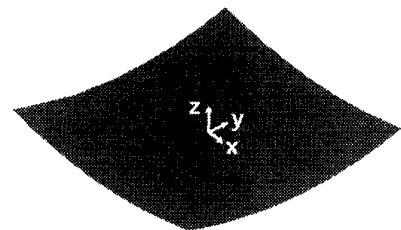


Fig. 12 Predicted shape of Exp. 2B

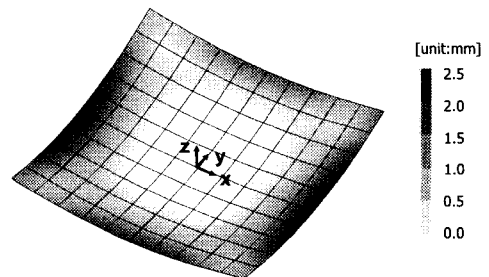


Fig. 13 Error map between the experimental shape and the predicted shape based on the condition of Exp. 2B

## 6. 결론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 새롭게 고안된 점진적 롤 성형공정을 이용하여 이중곡률을 갖는 다양한 금속판재를 제작해 봄으로써 공정의 유연적 특성 및 그 효용성을 확인하였다.
- 2) 오목한 형상으로 곡률을 갖는 기본적인 이중곡률의 금속판재 제작을 통해, 여러 공정 변수 가운데 두 쌍의 받침롤의 간격  $a$  와  $b$  그리고 중심롤의 눌러주는 최종 성형 깊이  $d_z$  가 곡률 생성에 영향을 미치는 중요 공정 변수임을 확인하였다.
- 3) 성형 경로의 수정을 통해 오목한 형상뿐만 아니라 곡률 방향이 바뀌는 형상도 제작하였다. 따라서 곡률 생성에 영향을 미치는 공정 변수들의 여러 가지 조합과 성형 경로의 변화를 통해 다양한 이중곡률의 판재를 성형할 수 있다.
- 4) 원하는 곡률을 갖는 형상을 만들기 위해 공정 변수와 시편의 경계 곡률 반경과의 관계식을 유도하여 성형될 형상을 예측할 수 있었으며, 점진적 성형 원리를 고려하여 이를 실험과 해석을 통해 더욱 보완하면 원하는 최종 형상을 더욱 정밀하게 제어하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 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. Kitazawa, K., Tanaka, S. and Nakamura, T., "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, 1994.
4. 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.

5. 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.
6. Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "Finite element simulation of an incremental forming process using a roll set for the manufacture of a doubly curved sheet," *Proc. of the 5<sup>th</sup> NUMISHEET*, pp. 423-428, 2002.
7. 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.
8. Piegal, L. and Tiller, W., "The NURBS Book," Springer, 1995.