

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

윤석준\*·양동열\*

(2003년 10월 22일 접수)

### 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 in 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 direction of one principal 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 principal radius of curvature, does not have an significant effect on the generation of the curvature in that direction. It mainly affects the generation of curvature in its own direction 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 x축과 y축으로 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 곡면

\* 한국과학기술원 기계공학과

도 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 여

러 가지 공정들이 개발되고 있고 현재에도 여러 생산 현장에서 활발히 적용되고 있다.

이러한 이중 곡률 형태의 금속 판재를 성형할 수 있는 공정으로 간단한 편치와 금형만을 사용하여 비교적 저렴한 비용으로 다양한 형상의 금속 판재를 성형할 수 있는 점진적 성형 공정이 있다.<sup>(1~6)</sup> 점진적 성형 공정은 재료의 국부적인 변형을 발생시켜 전체를 성형하는 공정으로 원하는 형상을 비교적 다양하게 제작할 수 있는 유연적 특성을 큰 장점으로 갖고 있는 공정이다.

점진적 성형 공정에 대한 연구를 살펴보면, 반구형 편치로 성형하는 incremental backward bulge forming 장치<sup>(1)</sup>나 축 방향으로 회전하는 반구면 편치로 역시 회전하고 있는 블랭크를 성형하는 incremental stretch expanding 장치<sup>(2)</sup> 등과 같이 전단 성형 원리를 바탕으로 스트레칭을 발생시키는 공정 개발을 통한 연구들이 주로 진행되었다. 또한, 전단 성형 이외의 방법으로 구면의 롤러 등을 사용하여 스트레칭 변형을 발생시키는 공정<sup>(3)</sup>도 개발되어 여러 연구들이 수행되었다. 이러한 연구들은 스트레칭 변형을 주 변형으로 하기 때문에 재료의 두께 변형이 심하게 나타나는 특징이 있다. 이에 따라 성형성을 향상시키기 위한 방법으로 double-pass forming method<sup>(4)</sup>와 같이 두께 변형 분포를 최대한 균일하게 발생시키기 위한 연구도 수행되었다.

하지만 스트레칭을 주 변형으로 하는 공정에서 두께 변형이 발생하는 것은 필연적이기 때문에 찢어짐과 같은 문제를 근본적으로 해결할 수는 없다. 이에 따라 두께 변형이 거의 발생하지 않도록 하는 연구로 굽힘 변형을 주 변형으로 하는 점진적 성형 공정에 대한 연구들이 최근에 수행되고 있다.<sup>(5~6)</sup> 편치셋이라는 성형 공구를 고안하여 다양한 실험적 검증을 수행한 연구<sup>(5)</sup>와 롤셋을 고안하여 이를 수치적 해석을 통해 성형 원리를 검증한 연구<sup>(6)</sup> 등이 대표적이라 할 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로, 본 연구에서는 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 새로운 공정을 이용하여 다양한 곡률의 금속 판재를 성형하였고, 다구찌 기법을 이용한 실험을 통해 공정 변수가 곡률 생성에 미치는 영향을 살펴 보았다.

## 2. 점진적 롤 성형 공정

### 2.1 롤셋(Roll Set)

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

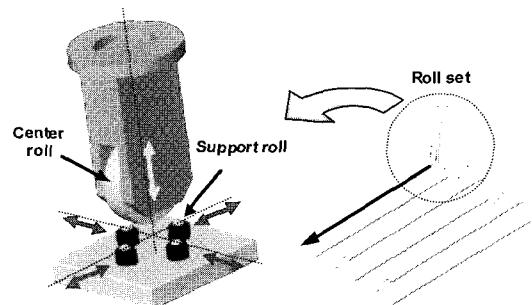


Fig. 1 Schematic diagram of the incremental roll forming process and the roll set

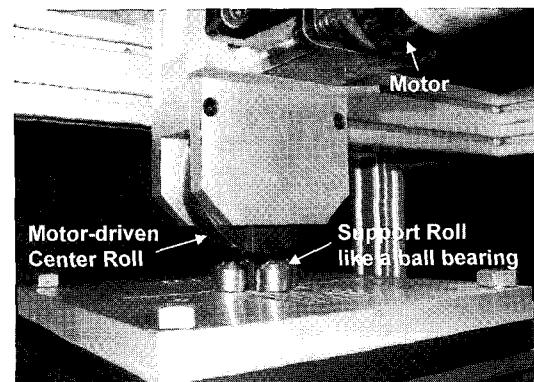


Fig. 2 Experimental set-up

롤셋은 금속 판재에 굽힘 변형을 발생시키는 성형 공구로 Fig. 1과 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 이 중 곡률을 갖는 판재를 성형할 수 있게 된다.

Fig. 2는 실험 장치로 제작된 롤셋의 모습을 보여주고 있다.

## 2.2 특징

본 공정은 점진적 성형 공정이 갖는 대표적인 특징인 유연적 특성(flexibility)을 가지고 있다. 즉, 스템핑 공정과 같이 원하는 형상에 따라 편치와 다이를 새롭게 설계 및 제작하여 성형할 필요 없이 앞에서 설명한 롤셋만을 이용하여 다양한 이 중 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 편치를 이용하여 블랭크 홀더로 고정된 재료에 전단 변형에 의한 스트레칭(stretching)을 주로 발생시키는 특징을 가지고 있다. 그러나 본 공정에서는 반구형 편치 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. 3은 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.

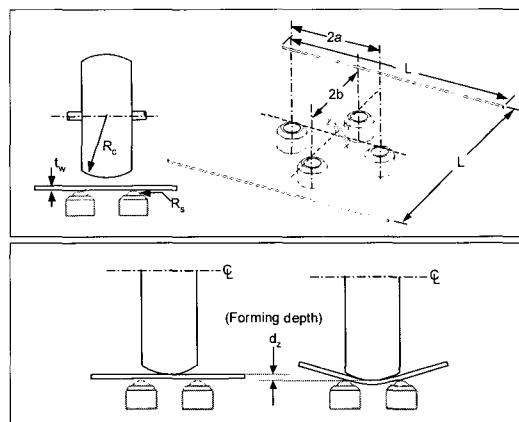


Fig. 3 Definition of process parameters

롤셋의 치수와 재료의 크기가 각각  $R_c=50$  mm,  $R_s=7.8$  mm,  $L=100$  mm로 고정된 상태에서 재료의 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 공정 변수로 시편의 두께  $t_w$ , 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.

### 3.2 성형 단계 및 성형 경로

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

Table 1 Definition of forming stages

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

한편 성형 경로(forming path)는 중심롤의 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. 4와 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 90도씩 회전시켜 주었다.

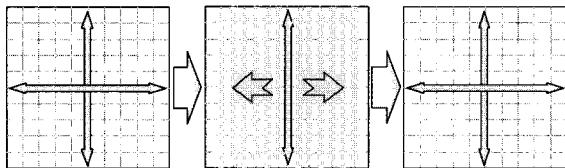


Fig. 4 Forming paths at each forming stage

#### 4. 다양한 곡률의 금속 판재 제작

##### 4.1 기본 형상 실험 조건

본 연구에서 제안한 점진적 롤 성형 공정을 이용하여 다양한 곡률의 금속 판재를 제작해 보고자 한다. 앞서 언급한 주요 공정 변수 중에서 두 쌍의 받침롤의 간격  $2a$ 와  $2b$ , 그리고 중심롤의 성형 깊이  $d_z$ 를 이용하여 Table 2와 같이 실험 조건을 설정하였다. 이때 재료는 두께가 2mm인 Al6061-T6를 풀림 처리하여 사용하였다.

Table 2에서, Exp. 1의 실험 조건은 두 쌍의 받침롤의 간격을 같게 설정해 놓음으로써 재료의 중심으로부터 중심축을 따라 정의되는 x축과 y축 상의 곡률 반경이 거의 같은 제품을 성형하기 위해 설정한 것이고, Exp. 2의 실험 조건은 두 쌍의 받침롤의 간격을 다르게 설정해 놓음으로써 두 개의 중심축 상의 곡률 반경이 서로 다른 제품을 성형하기 위해 설정한 것이다. 이때, 두 경우의 조건에서 각각 최종 성형 깊이가 다른 Exp. A, B,

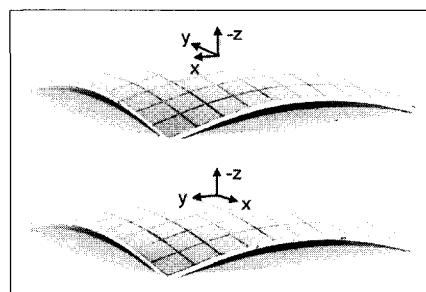
C를 수행함으로써 성형 깊이가 변화하면서 이중 곡률의 생성이 어떻게 영향을 받는지도 확인하고자 한다.

Table 2 Experimental conditions for basic shapes

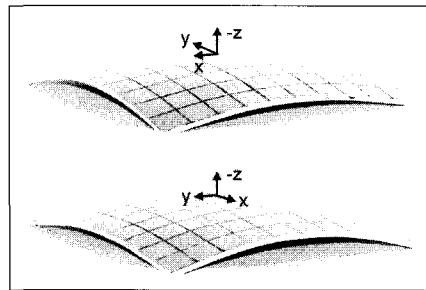
	$2a$ (mm)	$2b$ (mm)	$d_z$ (mm)
Exp. 1A	40	40	1.0
Exp. 1B	40	40	1.2
Exp. 1C	40	40	1.4
Exp. 2A	45	40	1.0
Exp. 2B	45	40	1.2
Exp. 2C	45	40	1.4

#### 4.2 성형된 시편

롤셋이 장착된 점진적 롤 성형 공정을 이용하여 Table 2와 같은 실험 조건을 따라 성형한 결과는 Fig. 5와 같다. 두 쌍의 받침롤의 간격을 같게 설정한 Exp. 1과 다르게 설정한 Exp. 2의 실험 중에서 1.2mm의 성형 깊이까지 성형해 준 Exp. 1B와 Exp. 2B의 실험 결과를 비교하고 있다.



(a) Exp. 1B



(b) Exp. 2B

Fig. 5 Formed workpiece

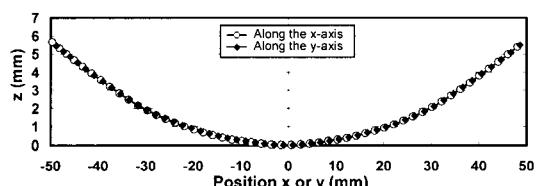
카메라의 시점을 고정시키고 성형된 시편을 90도 회전시키기 전후의 모습을 비교하고 있는데 경계 부분의 형상을 육안으로 확인 해 봄으로써 곡률 생성 경향을 예상할 수 있다. 즉, 두 쌍의 반침률 간격이 같게 설정된 조건에서는 시편 경계 부분의 프로파일이 방향에 관계 없이 거의 같게 나타나고 있고, 두 쌍의 반침률 간격이 다르게 설정된 조건에서는 시편 경계 부분의 프로파일이 차이를 보이고 있다. 이를 좀 더 정량적으로 살펴보기 위해 3차원 측정기를 이용하여 성형된 시편을 측정한 결과는 다음과 같다.

#### 4.3 중심선의 프로파일 및 곡률 반경

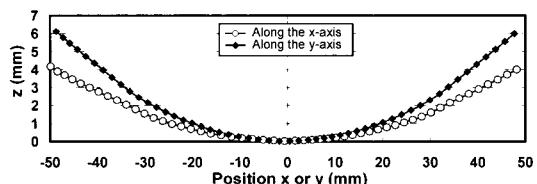
3차원 측정기를 이용하여 성형된 재료의 x축과 y축을 따라 측정한 데이터를 나타내고 있는 프로파일을 성형 깊이에 따라 구별해서 살펴보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6을 통해 x축과 y축 상의 프로파일이 반침률의 간격이 같게 설정된 조건에서는 거의 일치하고 반침률의 간격이 다른 조건에서는 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

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 3 과 같다.

Table 3을 참고로 하면, 두 쌍의 반침률 간격이 같게 설정된 Exp. 1의 조건에서는  $R_x$  와  $R_y$  의 비가 거의 1.0에 가깝게 나타나고, 다르게 설정된 Exp. 2의 조건에서는 그 비가 약 1.5 정도로 나타나고



(a) Exp. 1B



(b) Exp. 2B

Fig. 6 Profiles along the x-axis and the y-axis of the formed workpiece

Table 3 Radii of curvature along the x-axis and the y-axis

	$R_x$ (mm)	$R_y$ (mm)	$R_x / R_y$
Exp. 1A	257.0	254.3	1.01
Exp. 1B	217.5	218.3	1.00
Exp. 1C	201.5	195.8	1.03
Exp. 2A	343.0	222.1	1.54
Exp. 2B	292.5	192.5	1.52
Exp. 2C	257.2	170.6	1.51

있어 두 쌍의 반침률의 간격을 조절함으로써 중심선 상의 곡률을 같게도 또는 다르게도 생성시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

또한 Exp. A, B, C 의 결과를 비교하면 성형 깊이가 깊어질수록 곡률 반경의 값이 작아지며, 성형 깊이의 증가분에 따른 곡률 반경의 감소 비율은 성형 깊이가 깊어질수록 작아짐을 알 수 있다. 이는 성형 깊이가 깊어질수록 시편의 기하학적 구속력이 증가하여 굽힘 변형이 발생하기가 더욱 어려워지기 때문으로 사료된다.

이상의 결과를 바탕으로 두 쌍의 반침률 간격 2a와 2b를 같은 설정하거나 다르게 설정하고 성형 깊이를 조절함으로써 다양한 이중 곡률의 판재를 성형할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 이들 변수들은 판재의 곡률 생성에 영향을 미치는 주된 변수임을 알 수 있다.

#### 5. 다구찌 기법을 이용한 공정 변수의 영향성 분석

##### 5.1 다구찌 기법을 이용한 성형 실험 조건

4장에서는 다양하게 설정된 공정 변수의 조건으로부터 다양한 곡률이 생성되는 결과를 확인하여 본 연구에서 제안한 점진적 률 성형 공정의 유용성을 검증하였다.

한편, 점진적 률 성형 공정에서 주요 공정 변수들이 금속 판재의 곡률 생성에 미치는 영향성을 분석하기 위해 다구찌 기법을 기반으로 한 실험을 수행하고자 한다.

Fig. 3에서 정의한 공정 변수 중에 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 인자로 시편의 두께  $t_w$ , 두 쌍의 반침률의 간격 2a와 2b, 중심률이 시편을 눌러주는 성형 깊이  $d_z$  등과 같은 네 개의 공정 변수를 선택하여 Table 4와 같이 공정 변수의 수준 (level of parameters)을 설정하였고 이를 이용하여

Table 4 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 5 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

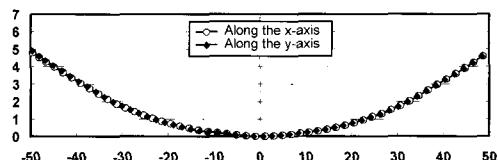
Table 5와 같이  $L_9(3^4)$ 의 직교 배열표(orthogonal array)로 실험 조건을 결정하였다.

### 5.2 다구찌 기법을 이용한 실험 결과

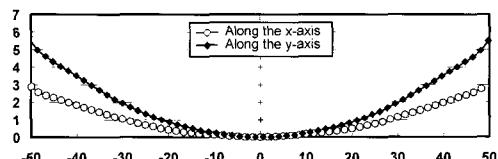
3차원 측정기를 이용하여 성형된 재료의 x축과 y축을 따라 측정한 데이터를 나타내고 있는 프로파일을 Exp. No. 1과 Exp. No. 6에 대해서 Fig. 7과 같이 나타내었다.

Fig. 7의 결과는 Fig. 6의 결과와 마찬가지로 x축과 y축 상의 프로파일이 받침롤의 간격이 같게 설정된 조건에서는 거의 일치하고 받침롤의 간격이 다른 조건에서는 그에 상응하는 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

측정 데이터를 바탕으로 최소자승법을 이용하여 얻어진 x축과 y축 상의 곡률 반경  $R_x$ 와  $R_y$ 를 정리하면 Table 6과 같다. 앞선 실험 결과와 마찬가지로 공정 변수 2a, 2b,  $d_z$ 를 조절하여 다양한 이중 곡률의 관계를 성형할 수 있음을 알 수 있다. 한편 시편의 두께도 공정 변수로 고려된 실험이므로 각 공정 변수 별로 곡률 생성에 미치는 영향성을 분석해 보면 다음과 같다.



(a) Exp. No. 1



(b) Exp. No. 6

Fig. 7 Profiles along the x-axis and the y-axis of the formed workpiece

Table 6 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

### 5.3 공정 변수의 요인 효과 분석

다구찌 기법으로 분류된 실험 결과들을 이용하여  $R_x$ 와  $R_y$ 를 평가한 결과는 Fig. 8과 같다.

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

마찬가지로 y축 상의 곡률 반경  $R_y$ 에 대해서도 재료의 두께  $t_w$ 와 y축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2b 그리고 성형 깊이  $d_z$ 가 영향을 크게 미치는 반면 x축 상에 놓여 있는 받침롤의 간격 2a의 영향은 적다는 것을 살펴볼 수 있다.

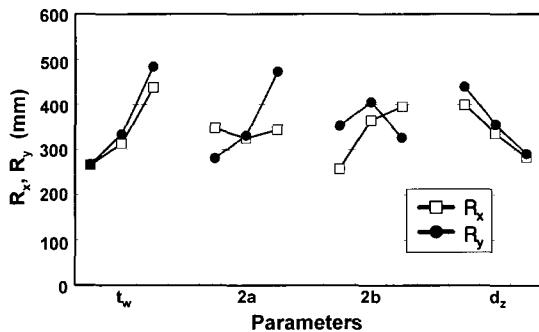


Fig. 8 Effect of process parameter

이상의 결과를 바탕으로 주 곡률 반경  $R_x$ 와  $R_y$ 는 동일한 방향에 위치하고 있는 받침률의 간격에 많은 영향을 받고 있으나 다른 쌍의 받침률 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 받침률 간격만을 따로 생각할 수 있고, 이러한 결과를 바탕으로 주 곡률 반경을 예측하여 성형된 형상을 예측하고자 할 때 두 쌍의 받침률 간격 2a와 2b의 공정 변수를 독립적으로 고려하여 예상식을 단순화할 수 있을 것으로 예상된다.

## 6. 결 론

본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 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, 더블어 스트레칭 변형이 아닌 굽힘 변형을 유발시킴으로써 두께 감소로 야기되는 문제점들을 해소하였다.

(2) 이중 곡률의 금속 판재를 제작하는 실험에서 재료의 두께( $t_w$ )와 두 쌍의 받침률 간격(2a, 2b), 그리고 중심률의 성형 깊이( $d_z$ )가 곡률 생성에 영향을 미치는 주요 공정 변수임을 확인하였고 이러한 공정 변수들의 조건을 다양하게 조절함으로

써 여러 가지 이중 곡률의 형상으로 성형할 수 있었다.

(3) 다구찌 기법의 요인 효과 분석을 통해 공정 변수들이 곡률 생성에 미치는 영향을 정성적으로 파악하여 주 곡률 반경 방향과 같은 방향에 있지 않는 받침률의 간격은 곡률 생성에 큰 영향을 미치지 않으며, 주 곡률 반경과 같은 방향의 받침률 간격과 눌러주는 성형 깊이, 그리고 재료의 두께가 곡률 생성에 큰 영향을 미치는 공정 변수임을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) S. Matsubara, 1994, "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool," Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1311 ~ 1316.
- (2) K. Kitazawa, S. Tanaka and T. Nakamura, 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.
- (3) H. Iseki, 1994, "Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers," Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 406, pp. 1336 ~ 1341.
- (4) T. J. Kim and D. Y. Yang, 2000, "Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process," Int. J. Mech. Sci. Vol. 42, pp. 1271 ~ 1286.
- (5) S. J. Yoon and D. Y. Yang, 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.
- (6) S. J. Yoon and D. Y. Yang, 2002, "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.
- (7) G. Taguchi and S. Konishi, 1987, "Orthogonal Arrays and Linear Graphs," ASI press.