

## 반응표면분석법을 이용한 알루미늄 판재 성형공정의 스프링백 저감에 관한 연구

양재봉\* · 전병희\*\* · 오수익\*\*\*

(2000년 4월 18일 접수)

### A Study of the Springback Reduction in Aluminium Sheet Forming Using Response Surface Method

J. B. Yang, B. H. Jeon and S. I. Oh

#### Abstract

Springback simulation is receiving increasing attention throughout the automotive industry and the academic world. The knowledge of the real springback of stamped parts can help the stamping technicians to modify the process parameters or die geometry in order to reduce the shape defect. This paper presents the results of springback simulation after aluminium square cup deep drawing and trimming simulation, and results of springback optimization using response surface method.

**Key Words** : Springback, Optimization, Response Surface Method

#### 1. 서 론

프레스에 의한 판재가공은 국부적 또는 전체적으로 굽힘, 드로잉, 스트레칭 등의 복합적인 변형의 작용과 재료의 성형성, 이방성과 같은 기계적 성질, 금형의 상태, 펀치속도, 블랭크 홀딩력, 마찰력 등과 같은 공정조건에 의하여 많은 성형 불량률이 나타난다. 성형불량의 대표적인 것이 주름, 크랙, 스프링백이다. 스프링백 현상은 판재가 금형에 의하여 강제적으로 변형을 겪은 후 금형으로부터 이탈되었을 때 판재 내부의 응력이 정적 평형상태를 유지하기 위하여 탄성적으로 재편되면서 발생하는

현상이다. 스프링백 현상은 제품의 치수 정밀도를 떨어뜨려 각 부품 사이의 조립 불량률의 원인이 된다.

판재의 스프링백 특성에 관한 연구는 1940년대부터 현재에 이르기까지 많은 학자들에 의하여 행하여져 왔으나, 실험에 관한 한 판재의 단순 굽힘에 대한 경우가 많았다. 1970년대 이후부터 시작된 성형공정분야의 유한요소해석은 산업현장의 여러 분야에서 유용한 정보를 제공하고 있다. 유한요소해석을 이용할 경우 주로 변형형상, 응력 및 변형률 분포, 하중 및 파단과 주름발생 등의 불안정성 등을 예측할 수 있다. 그러나 불량률 없으며 설계사양을 만족하는 제품을 얻기 위해서는 유한요소법을

\* 서울대학교 기계설계학과 대학원  
\*\* 인덕대학교 기계설계학과  
\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

이용한 설계를 하는 경우에도 상당히 많은 시행착오를 거쳐야 적절한 공정변수를 구할 수 있다. 특히 판재 성형공정에서는 상당히 많은 공정변수가 제품의 품질에 영향을 주기 때문에 최적의 공정 변수를 결정하는 것은 매우 어려운 일이며 현재까지도 시행오차에 의한 공정변수 결정이 시도되고 있다.<sup>(1~4)</sup>

본 연구에서는 알루미늄소재의 사각용기 디프드로잉(deep drawing) 공정에서 발생하는 스프링백에 대한 연구를 수행하였다. 여러 설계변수 및 성형인자에 대하여 디프드로잉 해석, 트리밍(trimming) 해석, 스프링백 해석을 수행하였으며, 반응표면분석법(response surface method)과 같은 최적화방법을 이용하여 스프링백을 최소화하는 공정변수를 예측하였다.

### 2. 스프링백 메카니즘

스프링백은 드로잉된 벽면부에서 주로 발생하며 전형적으로 바깥 젓힘 형태로 발생하고, 조건에 따라서 안쪽 젓힘도 발생한다. 스프링백에 영향을 주는 인자로는 다이 코너 반지름(die corner radius), 펀치와 다이 클리어런스(clearance), 판재의 인장강도, 성형방법 등이 있다. 특히 다이 코너 반지름은 재료가 펀치 코너부에서 굽힘을 받을 때의 굽힘지점으로서 작용한다. 따라서 다이 코너 반지름이 커지면 굽힘지점 거리가 넓어지고 굽힘 과정에서 펀치 코너부의 굽힘 변형 영역이 넓어지므로 스프링백에 주는 영향이 현저하기 때문에 다이 코너 반지름을 충분히 작게 함으로써 스프링백을 줄일 수 있다. 펀치와 다이 클리어런스의 영향은 복잡하게 나타나기 때문에 클리어런스와 판 두께 비를 잘 조절함으로써 스프링백을 감소시킬 수 있다. 블랭크 홀딩력 증가 역시 스프링백을 감소시킬 수 있다. 그러나 과도한 홀딩력은 판재의 성형성을 저하시키므로 홀딩력의 증가에는 한계가 있다. 판 두께의 영향은 펀치 코너 반지름의 크기에 따라서 그 경향이 크게 달라지지만 어떤 경우라도 판 두께가 두꺼울수록 스프링백이 작아진다. 항복점의 영향으로는 항복점이 높은 재료일수록 스프링백이 증가한다. 스프링백을 줄이기 위한 방법으로 성형공정에서 리스트라이크(restrike) 공정을 추가하는 경우가 있다. 리스트라이크 공정에서는 굽힘 반지름을 성형공정의 굽힘 반지름보다 작게 함으로써 스프링백을 감소시킨다.<sup>(5)</sup>

### 3. 최적화이론

설계변수에 대한 최적화 과정은 다음과 같은 목적함

수의 최소화로 표현된다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(\mathbf{p}) && \mathbf{p} \in H && (1) \\ &\text{subject to} && g_i(\mathbf{p}) \leq 0 && i=1,2,\dots,m \end{aligned}$$

여기서  $f(\mathbf{p})$  최소화될 목적함수이며,  $\mathbf{p}$  는 설계변수이며,  $H$  는 설계변수의 한계를 결정하는 설계공간이며,  $g_i(\mathbf{p})$  제한조건이다.

최적화 절차는 설계변수의 초기치  $\mathbf{p}_0$  로 부터 반복적인 방법에 의하여 설계변수를 갱신하여 수행되며 설계변수의 갱신은 다음 식에 따른다.

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \alpha_k \mathbf{S}_k \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 반복횟수,  $\mathbf{S}_k$  는 탐색방향 벡터,  $\alpha_k$  는 탐색거리이다. 따라서 최적화 절차는 두 단계에 걸쳐 수행되는데 첫 단계에서는 탐색방향 벡터를 구하고 다음 단계에서는 탐색방향으로 목적함수가 최소가 되도록  $\alpha_k$  를 구한다. 제한 최소화 문제를 풀기 위한 방법으로는 여러 가지가 있지만 대부분의 방법은 설계변수에 대한 목적함수의 민감도(sensitivity) 계산을 바탕으로 하는 방식을 사용하고 있다.

본 연구에서는 반응표면분석법을 최적화도구로 이용하였다. 반응표면분석법은 목적함수  $f(\mathbf{p})$ 를 몇 개의 해석 결과로부터 다음과 같이 근사화된  $f_a(\mathbf{p})$ 로 대체하는 방법이다.(6-9)

$$f_a(\mathbf{p}) = \mathbf{c}_f^T \mathbf{y} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{y}$  : vector of monomials evaluated in  $\mathbf{p}$   
usually  $\{1, p_1, \dots, p_n\}$  for linear model and  
 $\{1, p_1, \dots, p_n, p_1^2, p_1 p_2, \dots, p_1 p_n, \dots, p_n^2\}$   
for quadratic model  
 $\mathbf{c}_f$  : coefficients vector

$\mathbf{c}_f$  는 다음 식과 같은 목적함수 값과 근사값의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 값으로 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n [f(p_i) - f_a(p_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [f(p_i) - \mathbf{c}_f^T \mathbf{y}]^2 \quad (4)$$

$$c_f = (Y^T Y)^{-1} Y^T f \quad (5)$$

여기서  $L$  : number of test points

$f$  : column vector of  $f(p_i)$

$Y$  : matrix formed by  $y(p_i)$

이 반응표면분석법을 이용함으로써 많은 해석시간을 요하는 설계변수의 민감도를 간단하게 구할 수 있으며, 초기에 넓은 영역의 설계변수를 탐색할 수 있다.

#### 4. 스프링백 해석

##### 4.1 알루미늄 소재의 재질시험

시험에 사용된 알루미늄 판재의 응력-변형률 관계는 인장시험을 통하여 구하였다. 인장시험은 시편의 폭이 12.5mm 인 JIS 13호 시편을 사용하였으며, 인장속도는 10mm/min 이었다. 두께 1.2mm 시편을 4회의 인장시험을 행한 후 평균을 통해 구한 소재의 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 520.45 (0.00214 + \bar{\epsilon})^{0.22789} \text{ MPa} \quad (6)$$

##### 4.2 드로 비드 해석

성형해석을 위하여 드로 비드(draw bead) 해석을 먼저 수행하였다. 지름 5mm의 원형 비드에 대하여 비드 높이가 2mm, 3mm, 4mm, 5mm 인 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 구한 비드의 단위 길이당 유입방향 저항력 및 수직방향 저항력을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Calibrated draw bead force

Bead height	Tangential restraining force	Normal Up-lift force
2.0 mm	0.20 KN/mm	0.15 KN/mm
3.0 mm	0.25 KN/mm	0.22 KN/mm
4.0 mm	0.32 KN/mm	0.30 KN/mm
5.0 mm	0.38 KN/mm	0.35 KN/mm

##### 4.3 스프링백 해석

제품의 스프링백을 구하기 위하여 PAM-STAMP 를 이용하여 디프드로잉 해석, 트리밍 해석, 스프링백 해석을 차례로 수행하였다. Fig. 1에 디프드로잉 공정의 해석 모델을 나타내었다. 대칭을 고려하여 전체 모델의 1/4을 해석하였으며, 비드는 바(bar)요소를 이용하여 나타내었다. Fig. 2는 디프드로잉 성형해석 후 판재의 변형형상을 나타낸 것이다. 트리밍 공정 해석과 스프링백 해석을 완료한 후 스프링백 전후의 판재 변형형상을 Fig. 3에 나타내었다. 스프링백은 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 A, B, C 3점에서 구하였다. 비드가 없는 경우 A, B, C 3점에서의 z방향 스프링백은 각각 -5.46mm, -1.81mm, -2.31mm 이었다.

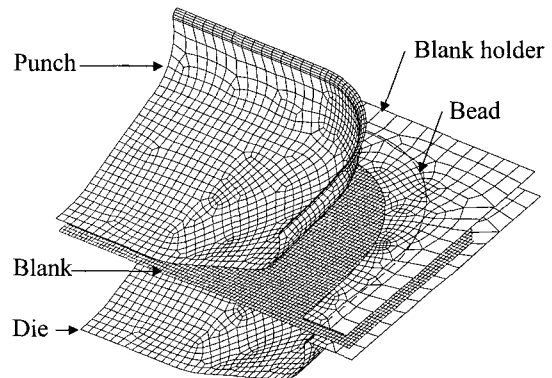


Fig. 1 FE model for deep drawing analysis

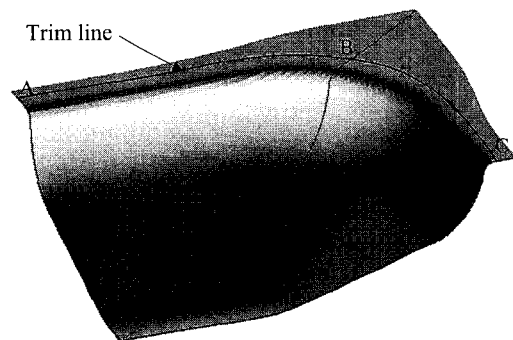


Fig. 2 Deformed shape after deep drawing process

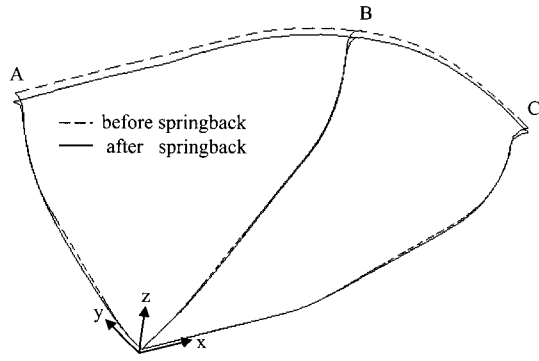


Fig. 3 Deformed shape before and after springback

#### 4.4 성형인자 연구

스프링백에 영향을 주는 성형인자에는 비드의 높이와 위치, 다이 코너 반지름, 블랭크 형상, 블랭크 홀딩력 등이 있다. 이러한 성형인자의 영향을 알기 위하여 Table 2에 나타낸 바와 같은 성형해석을 수행하였다. Fig. 4에 해석에 사용된 블랭크와 금형의 형상과 위치를 나타내었다. 해석결과로서 A, B, C 3점에서의 z방향의 스프링백을 Table 2에 나타내었다.

비드가 없는 경우(case1) A점에서의 스프링백이 -5.46mm임을 볼 수 있으며, Fig. 4에 나타낸 바와 같은 1, 2번 두 개의 비드를 추가한 경우(case2) 비드 높이가 2mm에서 5mm로 증가함에 따라 A점에서의 스프링백이 -4.10mm에서 -0.36mm로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 비

드 높이가 증가할수록 A, B 점에서의 스프링백은 줄어들었으며, C점에서의 스프링백은 비드 높이가 3mm이상에서 다시 조금 커짐을 볼 수 있다.

다이 코너 반지름을 5mm에서 3mm로 변경할 경우(case 3) A점에서의 스프링백이 -2.05mm에서 -0.64mm로 약 1.4mm 줄어들었으나, C점에서의 스프링백은 -0.93mm에서 -1.34mm로 약 0.4mm 커짐을 볼 수 있다.

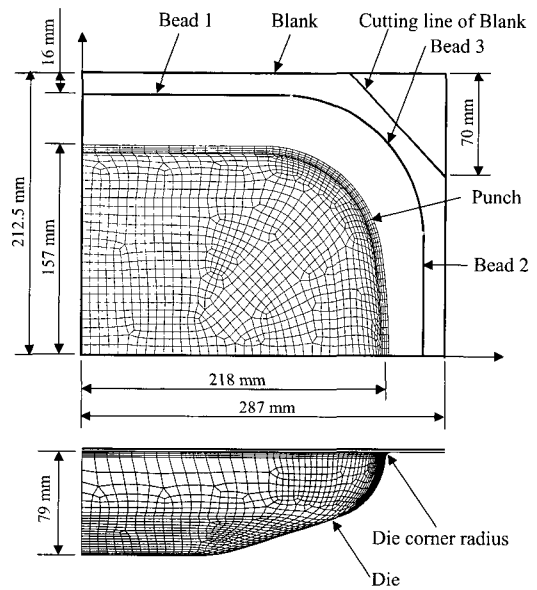


Fig. 4 Schematic diagram of tool and blank

Table 2 Parametric study of springback simulation

	Bead 1 height (mm)	Bead 2 height (mm)	Bead 3 height (mm)	BHF (KN)	Die corner radius (mm)	Blank corner cutting	Bead position	Point A springback (mm)	Point B springback (mm)	Point C springback (mm)
case 1	-	-	-	10	5	no	-	-5.46	-1.81	-2.31
case 2	2	2	-	40	5	no	-	-4.10	-1.47	-1.51
	3	3	-	50	5	no	-	-2.05	-0.84	-0.93
	5	5	-	50	5	no	-	-0.36	-0.18	-1.10
case 3	3	3	-	50	3	no	-	-0.64	-0.71	-1.34
case 4	3	3	3	70	5	no	-	0.15	-0.77	-0.29
case 5	2	2	2	70	5	yes	-	-2.95	-1.28	-0.84
	3	3	3	70	5	yes	-	0.11	-0.78	-0.19
case 6	3	3	3	50	5	yes	8mm shift	-3.17	-2.18	-1.24
	3	3	3	70	5	yes	8mm shift	0.30	-1.25	-0.91
	3	3	3	90	5	yes	8mm shift	0.39	-1.07	-1.11

다이 모서리 부에 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 3번 비드를 추가할 경우(case 4) A점에서의 스프링백이 -2.05mm에서 0.15mm로 약 2.2mm 줄어들었으며, C점에서의 스프링백은 -0.93mm에서 -0.29mm로 약 0.64mm 줄어드는 것을 볼 수 있다.

판재의 모서리를 70mm 절단한 경우(case 5) case4의 결과와 비교하여 A, C점에서의 스프링백은 줄어들었으며 B점에서는 변화가 없었다.

비드의 위치를 편치방향으로 8mm 이동한 경우(case 6) case5의 결과와 비교하여 A점에서의 스프링백은 0.2mm 증가하였으며, B점에서는 0.5mm 증가하였고, C점에서는 0.7mm 증가하였다. Fig. 5에 블랭크 홀딩력에 따른 A, B, C 3점에서의 스프링백을 나타내었다. 블랭크 홀딩력을 50KN에서 90KN으로 증가하는 경우 A, B점에서의 스프링백은 크게 줄어들었으며 C점에서는 큰 변화가 없었다.

Fig. 6에 case6의 경우에 대하여, 비드 높이에 따른 A, B, C 3점에서의 스프링백을 나타내었다. 비드 높이가 2mm에서 3mm로 증가함에 따라 A점에서의 스프링백이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 비드 높이가 3mm이상 증가함에 따라서는 스프링백이 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. B점에서의 스프링백은 0.5mm정도 줄어드는 것을 볼 수 있으며, C점에서는 0.5mm정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로서 스프링백을 줄이기 위하여, 비드의 높이 증가, 다이 코너 반지름 감소, 다이 모서리 부에 비드 추가, 판재 모서리 절단, 블랭크 홀딩력 증가 등을 하여야 함을 알 수 있다.

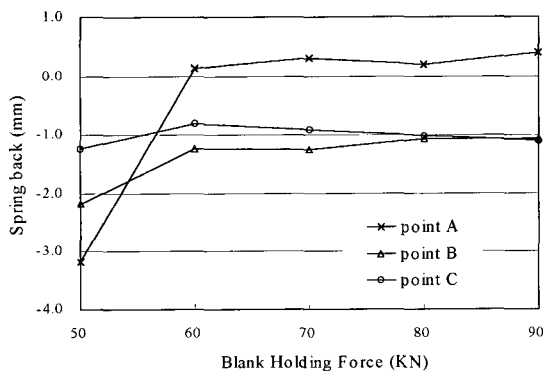


Fig. 5 Springback according to the BHF ( case 6 : bead height 3mm )

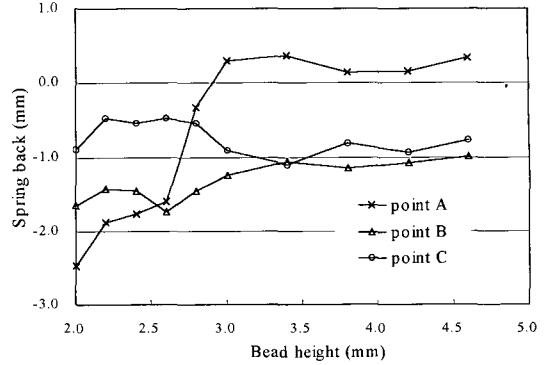


Fig. 6 Springback according to the bead height ( case 6 : BHF 70KN )

### 5. 최적화

이상의 성형인자에 대한 연구를 수행함으로써 다이 코너 반지름 감소, 다이 모서리 부에 비드 추가, 판재 모서리 절단, 블랭크 홀딩력 증가 등을 통하여 스프링백을 줄일 수 있었으나 그 값은 A, B, C 3점에서 모두 0.5mm 이하로 감소하지는 않았다. 따라서 3개의 비드를 좀더 세분하여 비드의 높이를 조절함으로써 스프링백을 A, B, C 3점에서 모두 0.5mm 이하로 감소시키고자 하였다.

스프링백을 최소화하는 비드의 높이를 예측하기 위하여 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 3개의 비드를 10개의 작은 비드로 나누어서 이를 최적화의 변수로 선정하였다. 목적함수는 다음과 같이 A, B, C 3점에서 스프링백의 제곱의 합으로 정의하였다.

$$f(d) = S_A^2 + S_B^2 + S_C^2 \quad (7)$$

여기서  $S_A, S_B, S_C$ 는 각각 A, B, C 3점에서의 스프링백을 나타낸다.

설계변수의 개수가 n인 문제에서 반응표면분석을 위한 초기 1차 반응곡면을 구축하기 위해서는 2n+1번의 해석이 필요하다. 본 해석에서는 설계변수의 개수가 10이므로, 초기 반응곡면의 구축을 위해서 21번의 해석을 수행하였다. 초기 해석의 조건으로는 전체 10개의 비드 높이를 2.0mm로 하고 ±0.5mm의 편차를 부가하여 각각의 해석을 수행하였다. 21번의 해석된 스프링백 값을 이용하여 반응곡면을 구하였으며 이 곡면에 대하여 스프링백을 최소화하는 비드의 높이를 구하였다. 이러한 과정

을 A, B, C 3점에서 스프링백이 모두 0.5mm 이하로 감소할 때까지 반복하였다.

총 6회의 반복계산을 수행하여 최적해를 얻었으며, 목적함수값은 11.94에서 0.15로 감소하였다. Fig. 8에 최적화 과정에서의 목적함수값을 나타내었으며, Fig. 9에는 A, B, C 3점에서의 스프링백을 나타내었다. 초기의 A, B, C 3점에서의 스프링백은 각각 -3.10mm, -1.40mm, -0.59mm 이었으며, 최적화된 경우는 각각 -0.12mm, -0.35mm, -0.07mm 이었다.

Fig. 10에는 초기 및 최적화된 경우의 비드 높이를 나타내었다. 최적화된 경우의 비드 높이는 3번, 5번 비드의 높이는 각각 2mm, 2.15mm이며, 8번 비드의 높이는 2.9mm이며, 나머지는 3.8mm-4.7mm 사이의 값으로 계산되었다.

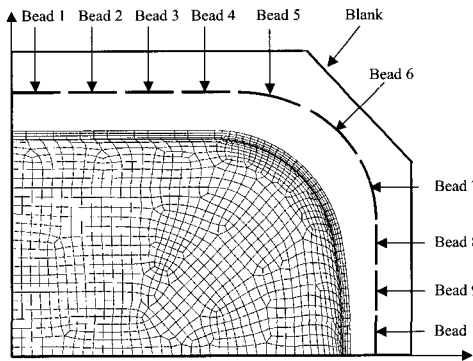


Fig. 7 Schematic diagram of the bead for optimization

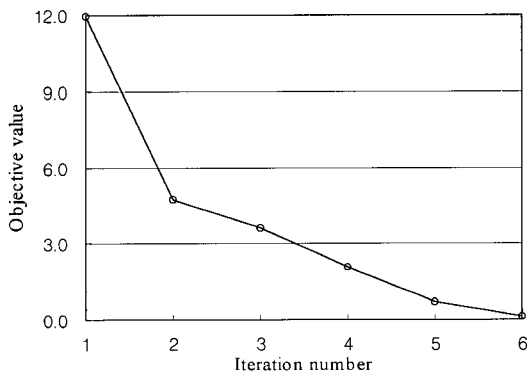


Fig. 8 History of the objective function value

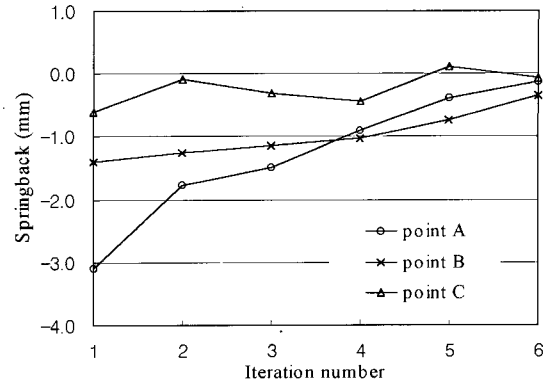


Fig. 9 History of the springback at point A, B, C

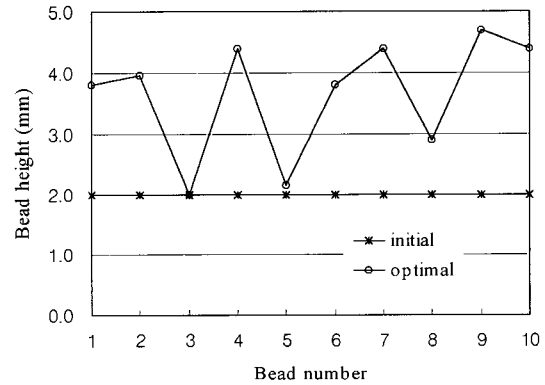


Fig. 10 Initial and optimal bead height

## 6. 결론

본 연구에서는 알루미늄소재의 사각용기 디프드로잉 공정에서 발생하는 스프링백에 대한 연구를 수행하였다. 여러 설계변수 및 성형인자에 대하여 디프드로잉 해석, 트리밍 해석, 스프링백 해석을 수행하였다. 블랭크 형상, 다이 형상, 비드 높이, 그리고 블랭크 홀딩력과 같은 성형인자에 대한 연구를 통하여 비드의 높이를 증가하고, 다이 코너 반지름을 감소하고, 다이 모서리 부에 비드를 추가하고, 판재 모서리를 절단하고, 블랭크 홀딩력을 증가시킴으로써 스프링백을 줄일 수 있었다.

비드의 높이를 설계변수로 하여 반응표면분석법을 이용한 최적화방법을 적용함으로써 스프링백을 최소화하였다. 3개의 비드를 10개로 세분하여 비드의 높이를 조절함으로써 스프링백은 A, B, C 3점에서 모두 0.5mm 이하로 감소하였다.

참 고 문 헌

- (1) F. Valente, D. Traversa, 1999, "Springback calculation of sheet metal parts after trimming and flanging", NUMISHEET '99, pp.59~64.
- (2) N. He, R. H. Wagoner, 1996, "Spring back simulation in sheet metal forming", NUMISHEET '96, pp.308~315.
- (3) F. Pourboghra, E. Chu, 1995, "Prediction of spring back and side wall curl in 2D draw bending", J. Mater. Process. Technol., Vol. 50, pp.361~374.
- (4) 김현영, 신용승, 이종문, 이용익, 1999, "자동차 리어사이드 프레임에 대한 스프링백 특성연구", 한국소성가공학회 '99춘계학술대회논문집, pp.57~61.
- (5) 박강관성형기술연구회, 1991, "프레스 성형난이 핸드북", 기전연구소.
- (6) W. J. Roux, N. Stander, R. T. Haftka, 1998, "Response surface approximations for structural optimization", Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 42, pp.517~534.
- (7) G. Venter, R. T. Haftka, 1998, "Construction of response surface approximations for design optimization", AIAA Journal, Vol. 36, No.12, pp.2242~2249.
- (8) S. Kodiyalam, J. S. Lin, B. A. Wujek, 1998, "Design of experiments based response surface models for design optimization", AIAA Paper No. 98-2030.
- (9) S. Kok, N. Stander, 1998, "Optimization of a sheet metal forming process using successive multipoint approximations", AIAA Paper No. 98-2031.