

다구치 실험계획법을 이용한 고강도 강판의 스프링백 분석

Springback Analysis of High Strength Steel Using Taguchi Method

전 태 보* 김 형 종**
Jeon, Tae-Bo Kim, Hyung-Jong

* 강원대학교 공과대학 산업공학과
** 강원대학교 공과대학 기계·메카트로닉스 공학부

Abstract

HSS (high strength steel) is widely applied to reduce the weight but improve the strength in automobiles. This research has been performed to secure a methodology to accurately predict the springback of HSS for successful tool and process designs in sheet stamping operations. We first performed U-draw bending test to evaluate the springback characteristic. We then evaluated forming and springback processes using the 1-row model of the finite element method. Based on the performance measure and parameters selected, extensive analyses of the factor effects on the springback have been made using experimental design concepts. We specifically selected Taguchi's orthogonal array, $L_{18}(2^1 \times 3^7)$, and the optimal level combination of the factors have been drawn from the analysis.

Keywords: elastic recovery, springback, orthogonal array, signal-to-noise ratio

1. 서론

최근 자동차 경량화 추세에 따라 여러 새로운 부품 제조기술이 적용되고 있으며, 고강도강(HSS: high strength steel) 소재가 널리 적용되고 있다. 금속판재의 성형시 소재가 금형에 의한 강제적인 변형을 겪은 후 금형에서 추출되면서 새로운 정적평형상태를 만족하기 위한 추가적인 변형인 탄성복원(elastic recovery)이 생기며, 특히 굽힘(bending) 변형 후에는 스프링백(springback)이라는 탄성복원 현상이 발생한다. 일반적으로 재료의 강도가

클수록 스프링백에 의한 형상변화가 커지므로 치수정확도 향상을 위해 추가적인 공정이 필요하다. 동시에, 고강도 강판은 일반 강판에 비하여 성형성이 나쁘므로, 국부적 변형이 과도하게 발생되지 않도록 성형공정과 금형을 설계하여야 한다.

성공적인 부품 생산을 위해서는 효율적이고 정확한 설계 방법과 능력이 뒷받침되어야 하며, 판재성형에 있어 가장 널리 사용되고 있는 설계 도구는 동적·외연적 유한요소법(dynamic explicit finite element method)이라 할 수 있으며, 스프링백 해석 도구는 정적·내연적 유한요소법(static implicit finite element method)이라 할 수 있다[1,2,3]. 그러나 동적·외연적 유한요소법에 의한 성형공정 및 탄성복원 해석에서는 여러 가지 공정변수 또는 수치변수가 스프링백 양의 계산결과에 영향을 미치므로, 이들 변수의 값을 적절하게 조합하여 입력하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 따라서 체계적이고 효율적인 방법에 의한 변수연구(parametric study)를 수행함으로써 궁극적으로 수치해석상의 오류를 극소화할 수 있는 입력변수, 즉 해석인자들의 최적조합을 결정하는 것이 필요하다.

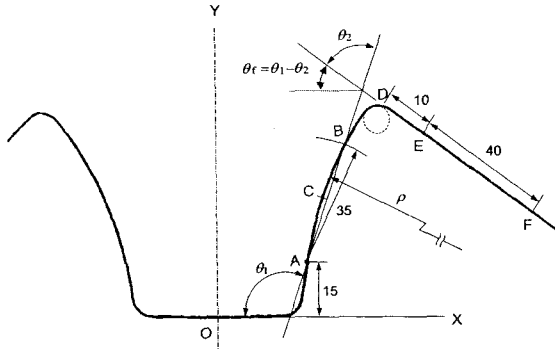
본 연구는 Taguchi 직교배열(orthogonal array)을 중심으로 한 실험계획[4,5]을 통하여 U-draw bending 공정의 유한요소 해석에서 스프링백 양의 평가에 유의한 영향을 미치는 해석인자들을 추출하고 이들 각각의 효과를 분석함으로써 실험 결과에 가장 근접한 결과를 주는 최적 인자조합을 도출하고자 수행되었다.

2. U-draw bending 시험 및 해석

2.1 U-draw bending 시험

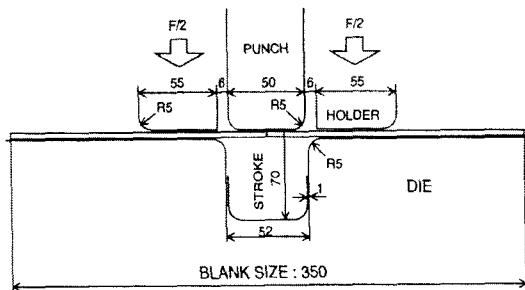
<그림 1>은 스프링백의 기하학적 형상을 정량적으로 대변하는 파라미터들이다. 그림에서

θ_1 은 OX와 AB 사이의 각을 θ_2 는 AB와 EF 사이의 각을 나타내며, θ_f 는 $\theta_1 - \theta_2$ 로 정의된다. ρ 는 A,B,C를 지나는 원의 반경으로 단위는 mm이다. θ_1 과 θ_2 는 클수록 θ_f 와 ρ 는 작을수록 스프링백이 크며, 스프링백이 전혀 발생하지 않는 경우 $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$, $\theta_f = 0^\circ$, 그리고 $\rho = 0(\text{mm})$ 이다.



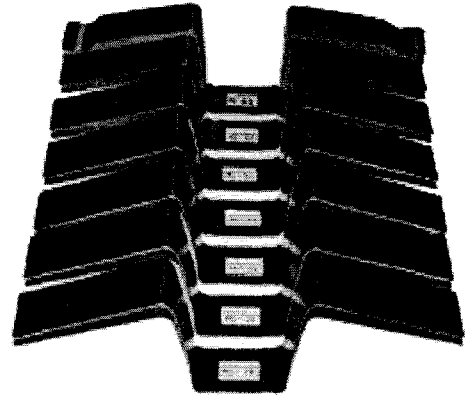
<그림 1> Definition of the springback parameters

U-draw bending 시험은 스프링백에 대한 정량적인 분석을 위하여 NUMISHEET '93[6]에서 벤치마크 문제로 제시되었던 모델이다. <그림 2>는 이 공정의 개념을 도시한다.



<그림 2> Schematic diagram of the U-draw bending

두께 1.4 mm의 고강도강판(HSS-40)을 350×35 mm 크기로 전단하여 시편을 준비한 뒤, 규정상의 치수에 따라 제작된 금형에 의해 3 ton의 블랭크 가압력(blank holding force)으로 U-draw bending 시험을 실시하였다. <그림 3>은 성형된 시편들의 사진이다. 스프링백의 기하학적 파라미터들을 정확하고 효율적으로 측정하기 위하여 화상처리법[7]을 이용하였으며, 시편의 전·후·좌·우측의 네 군데서 측정하였다. <표 1>은 이들의 결과를 도시한다.



<그림 3> Specimens after springback

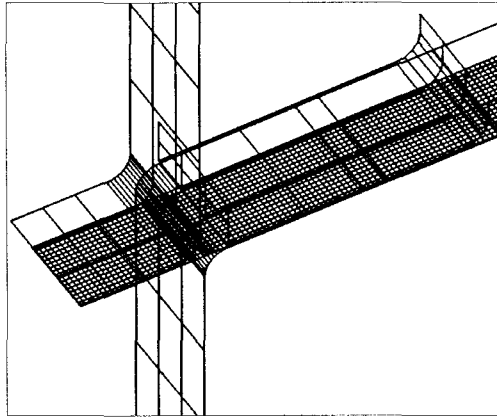
<표 1> Springback measurement results

No	θ_1	θ_2	$\theta_1 - \theta_2$	ρ
1	98.88	82.81	16.07	319.1
2	98.87	82.74	16.13	352.3
3	98.92	82.75	16.17	351.9
4	98.81	82.76	16.05	339.3
5	98.82	82.64	16.18	335.1
6	98.81	82.68	16.13	343.1
7	98.82	82.76	16.06	353.8
8	98.74	82.67	16.07	319.7
9	98.78	82.67	16.11	313.3
10	98.79	82.70	16.09	363.2
Avg.	98.82	82.72	16.11	339.1

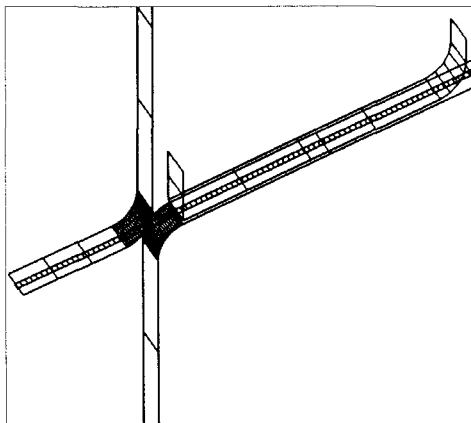
2.2 유한 요소 해석

U-draw bending 공정의 기하학적 대칭성을 고려하여 전체의 1/4에 대해서 해석을 수행하는 것이 일반적이거나, 본 연구에서는 <그림 4>와 같이 길이 방향의 중심선을 따라 1/4의 요소 망으로 구성된 모델에 평면변형률 경계조건을 부여함으로써 1/4 모델을 대신하였다. 이 1/4 모델은 1/4 모델에 비하여 1/10 미만의 소요시간으로 거의 같은 결과를 주므로 변수 연구와 같이 반복적인 계산이 요구되는 경우 매우 효율적이다. 상용 코드 PAM-STAMP[8]를 사용하여, 성형공정은 동적·외연적 해석으로, 스프링백은 정적·내연적 해석으로 각각 시뮬레이션 하였다. 접촉처리 알고리즘으로는 벌칙상수법을 사용하였다.

시뮬레이션 결과가 <표 2>에 도시되었다. 도표 결과에서 보듯이 근접한 결과를 얻을 수 있었으며, 특별히 해석 시간상의 현저한 절감을 알 수 있다.



a) 1/4 model



b) 1-row model

<그림 4> a) 1/4 and b) 1-row models for finite element method

<표 2> Comparison - 1/4 and 1-row models (BES=1.4, NIP=9, PV=5, PP=0.03, CDP=0.1)

F. E. Model	Springback Parameters				CPU Time (sec)
	θ_1	θ_2	$\theta_1 - \theta_2$	ρ	
1-Row Model	95.09	85.66	9.43	365.2	5,135
1/4 Model	Center	95.13	85.83	9.30	53,620
	Side	95.28	85.94	9.34	

3. 실험 설계 및 분석

3.1 특성치 및 인자의 선택

상술한 스프링백 양의 기하학적 측정치들 중 플랜지 경사각 $\theta_f (= \theta_1 - \theta_2)$ 을 수행평가기준으로 선택하였다. θ_f 의 실험치는 <표 1>에서의 평균치인 16.11°로 이 값에 가장 안정적으로 근접하는 해석결과를 주는 인자조합을 찾고자 하였다. 따라서, 특성치 θ_f 는 16.11을 목표치로 하는 망목특성치(nominal the best characteristic)에 해당한다.

다음은 성형공정과 스프링백의 해석 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 해석인자, 즉 공정 및 수치변수의 고려로 다음의 5가지가 선정되었다.

- ① BES - blank element size,
- ② NIP - number of integration points,
- ③ PV - punch velocity,
- ④ PP - penalty parameter, and
- ⑤ CDP - contact damping parameter.

선정된 인자들 각각에 대하여 적절한 범위를 정하고, 범위 내에서 인자별로 3수준을 선정하였으며, 이들을 <표 3>에 정리하였다.

<표 3> Parameters and level settings for the experiments

Factor(unit)	Level 1	Level 2	Level 3
BES(mm)	0.5	1.0	1.5
NIP	5	9	13
PV(mm/ms)	2	5	10
PP	0.01	0.03	0.05
CDP	0.05	0.10	0.20

3.2 실험설계

5 인자를 3 수준씩 고려할 경우 총 243(=3⁵) 실험 조합이 필요하다. 조합의 수와 계산의 시간 절감을 위하여 Taguchi의 L₁₈(2¹×3⁷) 직교배열(orthogonal array)[4,5]을 고려하였다. 고려된 5 인자들 BES, NIP, PP, PV, CDP를 도표의 제 2,3,4,5,7열에 배치하였다.

일반적으로 동일한 조건에서의 실험에도 매회 다른 결과가 얻어진다. 그러나 본 연구에서의 시뮬레이션에서는 입력변수들의 값이 일단 결정되면 해석 결과는 항상 동일하게 얻어진다. 결과 데이터의 변동성을 고려하기 위하여 성형공정의 계산 중결시간을 미소하게 변

화시켜서 얻은 응력 값으로부터 스프링백 해를 구함으로써 데이터 변동을 유도하였다. 여기서는 성형 종결시각 부근의 저주파 진동 주기 $\tau=0.08\text{ms}$ 를 이용하여, 종결시각 t_0 (편치행정 70.0 mm)에서 일단 성형 해석을 끝낸 후 스프링백 해석을 하고, 다시 재시작(restart) 기능을 이용하여 시각 $(t_0 + 1/8\tau)$, $(t_0 + 2/8\tau)$, $(t_0 + 3/8\tau)$, $(t_0 + 4/8\tau)$ 까지의 성형 및 스프링백 해석을 반복하였다. 마지막 해석시각 $(t_0 + 4/8\tau)$ 는 편치행정 70.4 mm에 해당한다. 이 정도 편치행정의 차이는 실제 시험에서도 충분히 발생할 수 있는 수준으로 판단된다.

3.3 결과분석

각 실험 조합당 5가지씩 스프링백 해석을 수행하였으며, 스프링백 파라미터들에 대한 상세한 결과는 <표 4>에 정리하였다. 여기서 'S/N 비(signal-to-noise ratio)'는 데이터의 평균에 대한 상대적 변동성을 나타내는 값이며, 'Sm'은 목적치(target value)를 위한 실험의 민감도(sensitiveness)를 측정하는 값이다. 각각에 대한 정의는 다음 식과 같고, 그 단위는 모두 'db (decibels)'이다.

$$S/N = -10 \log_{10} \left| \frac{1}{n} \frac{(S_m - S^2)}{S^2} \right|$$

$$S_m = 10 \log \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \right]$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

이들 식에서 n은 데이터 개수, y_i 는 5개의 θ_f 관측치들을 나타낸다.

한 가지 문제는 실험조합 11에 대한 결과가 없다는 점이다. 이에 대한 명확한 이유는 밝혀지지 않았으며 따라서 적절한 방법에 의해 추정값이 필요하다. 본 연구에서는 결측치(missing value) 추정을 위해 특정 조건을 만족할 때 까지 반복적으로 S/N and Sm을 추정하고 개선해가는 방법을 적용하였다.

즉, 수렴을 위한 조건으로 2 연속된 반복 단계에서 다음의 상대오차(relative error)가

$$\left| \frac{y(k) - y(k+1)}{y(k)} \right| \times 100 < 1 (\%)$$

을 S/N과 Sm 모두에 대하여 만족하면 반복을 멈추며 현 단계의 추정 값($y(k)$)이 최적이다. 그렇지 않을 경우 새로 값들을 추정하고 다음 반복으로 수행한다. 위 식에서 $y(k)$ 는 반복 k에서 추정한 S/N 또는 Sm을 나타낸다. 이 식에 설정한 1%는 임의로 설정한 값이다.

<표 4> Experimental Results of S/N and Sm

Run	BES	NIP	PP	PV	CDP	1	2	3	4	5	Avg.	S/N	Sm
1	1	1	1	1	1	11.54	11.50	11.80	11.74	11.72	11.66	38.93	28.32
2	1	2	2	2	2	18.60	18.67	18.75	18.72	18.75	18.70	49.34	32.43
3	1	3	3	3	3	18.87	18.95	18.93	18.98	19.01	18.95	51.05	32.54
4	2	1	1	2	3	19.40	19.52	19.48	19.52	19.56	19.50	50.14	32.79
5	2	2	2	3	1	17.90	18.00	17.89	17.89	17.88	17.91	51.14	32.05
6	2	3	3	1	2	18.40	18.45	18.57	18.55	18.54	18.50	48.04	32.33
7	3	1	2	1	2	15.43	15.15	15.21	15.30	14.44	15.11	31.83	30.57
8	3	2	3	2	3	16.35	16.29	16.20	16.28	16.24	16.27	49.22	31.22
9	3	3	1	3	1	16.39	16.46	16.62	16.63	16.48	16.52	43.93	31.35
10	1	1	3	3	2	20.31	20.32	20.35	20.36	20.38	20.34	56.98	33.16
11	1	2	1	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-
12	1	3	2	2	1	19.01	19.09	19.15	19.15	19.17	19.11	49.31	32.62
13	2	1	2	3	3	18.97	19.00	19.03	18.99	18.93	18.98	54.17	32.56
14	2	2	3	1	1	18.32	18.43	18.52	18.52	18.46	18.45	46.99	32.31
15	2	3	1	2	2	14.68	16.77	14.74	14.78	14.73	15.14	24.40	30.59
16	3	1	3	2	1	14.63	14.67	12.87	14.72	14.78	14.33	24.84	30.12
17	3	2	1	3	2	16.16	16.30	16.40	16.40	16.27	16.31	44.21	31.24
18	3	3	2	1	3	16.34	16.39	16.63	16.86	16.89	16.62	36.25	31.40

이제 반복 추정 과정을 소개한다. 먼저, 도표상의 17개 S/N과 Sm들의 평균값을 초기 추정치로 삼는다. 즉,

$$\begin{aligned} \widehat{S/N}_{11}(0) &= \frac{38.93 + 49.34 + 51.05 + \dots + 36.25}{17} \\ &= 44.16 \\ \widehat{Sm}_{11}(0) &= \frac{28.32 + 32.43 + 32.54 + \dots + 31.40}{17} \\ &= 31.62 \end{aligned}$$

이 값들을 조합 11에 대한 실험 결과치로 삼는다. 이제, 이들을 포함한 총 18개 값으로 S/N과 Sm을 조합 11의 인자 수준들을 기준으로 다음과 같이 다시 추정한다.

$$\begin{aligned} S/N_{11}(1) &= \widehat{BES}_1 + \widehat{NIP}_2 + \widehat{PV}_1 + \widehat{PP}_1 + \widehat{CDP}_3 \\ &\quad - 4 \times \frac{\sum_{i=1}^{18} S/N_i}{18} \\ &= 48.30 + 47.51 + 41.04 + 40.96 + 47.50 \\ &\quad - 4 \times 44.16 \\ &= 48.65 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sm_{11}(1) &= 31.78 + 31.81 + 31.09 + 30.99 + 32.02 \\ &\quad - 4 \times 31.62 \\ &= 31.20 \end{aligned}$$

이 식에서 추정치 \widehat{BES}_1 , \widehat{NIP}_2 등은 해당 인자 수준에서의 평균값이다. 앞 단계와 현 단계에서 구한 S/N과 Sm에 대한 상대오차는 다음과 같다.

$$\left| \frac{44.16 - 48.65}{44.16} \right| \times 100 = 10.16\%$$

$$\left| \frac{31.62 - 31.20}{31.62} \right| \times 100 = 1.33\%$$

결과에서 보듯이 양자 모두 설정한 한 수렴조건 보다 커 반복을 계속한다. 최종적으로 반복 5에서 조건을 만족하였으며 <표 5>는 이에 대한 세부 내용을 도시한다. 최종적인 S/N과 Sm의 추정치는 각각 54.71과 30.63으로 주어졌다.

이제 S/N과 Sm에 대한 ANOVA를 수행하며 결과는 <표 6>과 같다.

<표 5> Intermediate estimates of S/N and Sm

k	S/N		Sm	
	S/N(k)	ER(k)	Sm(k)	ER(k)
0	44.16	-	31.62	-
1	48.65	10.16	31.20	1.33
2	51.39	5.63	30.94	0.83
3	53.06	3.26	30.79	0.51
4	54.09	1.93	30.69	0.31
5	54.71	1.16	30.63	0.19
6	55.10	0.70	30.59	0.12

<표 6> ANOVA's for S/N and Sm

a) S/N

Source	SS	df	MS	F
BES	418.89	2	209.45	2.91
NIP	185.08	2	92.54	1.29
PV	279.41	2	139.70	1.94
PP	39.19	2	19.60	0.27
CDP	182.86	2	91.43	1.27
Error	503.64	7	71.95	
Total	1609.08	17		

b) Sm

Source	SS	df	MS	F
BES	3.80	2	1.90	1.51
NIP	0.97	2	0.49	0.39
PV	4.50	2	2.25	1.79
PP	5.04	2	2.52	2.00
CDP	1.80	2	0.90	0.72
Error	8.80	7	1.26	
Total	24.91	17		

ANOVA 결과로부터 인자들의 S/N과 Sm에 대한 상대적인 영향의 크기는 각각 큰 순서별로 BES→PV→NIP/CDP→PP와 PP/PV→BES→CDP→NIP으로 나열된다. S/N에 있어 BES가 다른 인자들보다 월등히 큰 영향을 가지며, PV, NIP, CDP도 역시 다소 강한 영향을 가진다. PP는 S/N에 미미한 영향을 미친다. 비슷하게 Sm에 있어 PP, PV, BES 등이 상대적으로 큰 영향을 미치며, CDP와 NIP는 영향이 아주 작다는 판단이다. <표 7>은 S/N과 Sm에 대한 인자 수준별 평균 반응 결과를 도시한다.

다음은 최종 인자 수준 결정 과정이다. 목표인 우리의 $\theta_1 - \theta_2$ 에 대한 안정적인 결과를

위하여 먼저 BES₁, NIP₂, 그리고 CDP₃를 선정하였다. 이들은 S/N에 대하여는 큰 영향을 가지며, 반대로 Sm에 있어서는 영향이 다소 작음을 보인다. PV와 PP에 대한 최적 수준의 선정은 쉽지 않다. PV는 S/N과 Sm 양자에 대하여 강한 영향을 가지며, PP는 Sm에만 강한 인자이므로 조정인자(adjustment factor)로 분류된다. 이는 다른 인자들을 고정한 뒤 자신의 수준을 변경해가며 최적의 수준을 결정하는 인자를 말한다. PV와 PP의 수준 조합을 변화시켜가며 결과를 조사하였으며 고려 영역에 있어 PV₂와 PP₁이 가장 좋다는 결론이다. 따라서, 최적의 인자들 수준 조합은 BES₁, NIP₂, PV₂, PP₁, CDP₃으로 결론되었다.

<표 7> Average response tables for
a) S/N and b) Sm

a) S/N

Level	BES	NIP	PV	PP	CDP
1	50.05	42.81	42.79	42.72	42.52
2	45.81	49.27	41.21	45.34	42.47
3	38.38	42.17	50.25	46.19	49.26

b) Sm

Level	BES	NIP	PV	PP	CDP
1	31.62	31.25	30.93	30.82	31.13
2	32.11	31.65	31.63	31.94	31.72
3	30.98	31.81	32.15	31.95	31.86

마지막 임무는 도출한 최적 수준에서 예상되는 결과를 추정하는 것이며 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{S/N} &= \widehat{BES}_1 + \widehat{NIP}_2 + \widehat{PV}_2 + \widehat{PP}_1 + \widehat{CDP}_3 - 4\widehat{\mu}_{\theta_f} \\ &= 50.05 + 49.27 + 41.21 + 42.72 + 49.26 - 4(44.75) \\ &= 53.51 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \widehat{Sm} &= 31.62 + 31.65 + 31.63 + 30.82 + 31.86 - 4(31.57) \\ &= 31.30 \end{aligned}$$

최종적으로, θ_f 의 평균에 대한 추정치는 다음의 관계식을 통하여 추정된다. 즉,

$$\widehat{\mu}_{\theta_f} = \sqrt{\frac{10^{Sm/10}}{n}} = 16.42$$

이는 우리의 목적치 16.11 보다 다소 큰 값이나 0.1 정도의 차이이므로 근접하며 우수한 추정치라 할 수 있다. 이 결과에 대한 검정을 위하여 추가적인 실험을 수행하였으며 이들의

결과치가 목표치에 근접한 우수한 결과가 얻어졌다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 고장도 강판의 스프링백 특성에 대한 심도있는 분석을 수행하였다. 우리의 주목적은 체계적인 분석을 통한 최적인자 조합의 도출이며, 하였다. U-draw bending test를 통하여 스프링백의 기하학적 파라미터들을 추정하였다. 그리고는, 성형분석을 위한 동적외연 유한요소해석법과 스프링백 해석을 위한 정적내연 유한요소해석법을 적용하였다. 결과에 영향을 미치는 5가지 공정변수와 수치변수들을 제어인자(control factor)로 선택하여 직교배열을 통하여 각 인자들의 효과를 체계적으로 분석하고 실험 결과에 가장 가까운 결과를 주는 최적인자 조합을 도출하였다. 본 연구는 스프링백에 대한 적절한 추정치 도출 방법 뿐 아니라 성형 및 스프링백에 대한 파라미터의 설정이나 영향 분석을 위한 방법론으로서 기틀을 제공한다.

참고 문헌

- [1] 정완진, 조진우, "박판금속 성형공정 해석 시스템 개발", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 29-37, 1999.
- [2] He, N. and Wagoner, R. H., "Springback Simulation in Sheet Metal Forming", *Proc. of the NUMISHEET '96*, pp. 308-315, 1996.
- [3] Lee, S. W. and Yang, D. Y., "An Assessment of Numerical Parameters Influencing Springback in Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process", *J. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 80-81, pp. 60-67, 1998.
- [4] 박성현, 현대 실험 계획법, 민영사, 2003.
- [5] Peace, G. S., *Taguchi Methods, A Hands-on Approach*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1993.
- [6] Makinouchi, A., Nakamachi, E. Onate, E. and Wagoner, R. H., *Proc. of the 2nd Int. Conf. NUMISHEET '93*, pp. 398-405, 1993.
- [7] 한상준, 김영수, 김형중, 오수익, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발", 한국소성가공학회논문집, 제7권 제6호, pp. 575~585, 1998.
- [8] Pam System International S. A., *PAM-STAMP™ User's Guide*, Version 1998, 1998.