

## 스프링백 특성에 영향을 미치는 수치변수의 분석을 위한 다구치 실험계획법의 응용

# Application of the Taguchi Method to the Analysis of the Numerical Parameters Influencing Springback Characteristics

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

### Abstract

It is desirable but difficult to predict springback quantitatively and accurately for successful tool and process design in sheet stamping operations. The result of springback analysis by the finite element method (FEM) is sensitively influenced by numerical factors such as blank element size, number of integration points, punch velocity, contact algorithm, etc. In the present work, a parametric study by Taguchi method is performed in order to evaluate the influence of numerical factors on the result of springback analysis quantitatively and to obtain the combination of numerical factors which gives the best approximation to experimental data. Since springback is determined by the residual stress after forming process, it is important to evaluate stress distribution accurately. The oscillation in the time history curve of stress obtained by the dynamic-explicit finite element method says that the stress solution at termination time is in very unstable state. Therefore, a variability study is also carried out in this study in order to assess the stability of implicit springback analysis starting from the stress solution by explicit forming simulation. The U-draw bending process, one of the NUMISHEET '93 benchmark problems, is adopted as an application model because it is most popular one for evaluating the springback characteristic.

키워드 : 스프링백, 외연적 유한요소법, 응력변동성, 다구치 법

Keywords : springback, explicit finite element method, stress variability, Taguchi method

### 1. 서론

금속판재의 성형공정에서는 소재가 금형에 의한 강제적인 변형을 겪은 후 금형에서 추출되면서 새로운 정적평형상태를 만족하기 위한 추가적인 변형, 즉 탄성복원(elastic recovery)이 생기며, 특히 굽힘 변형 후에는 스프링백(springback)이라는 대

표적인 탄성복원 현상이 발생한다. 최근 자동차 경량화 추세가 더욱 가속화됨에 따라 여러 가지 새로운 부품 제조기술이 적용되고 있는데, 기존의 연강 대신 고강도강 소재를 사용하여 중량 대 강도비를 낮추는 것도 효과적인 방법의 하나로 인식되고 있다. 그러나 일반적으로 강도가 큰 재료일수록 스프링백에 의한 형상변화가 커지기 때문에 치수정확도를 높이기 위한 부가적인 공정이 필요해지며, 이로 인하여 설계에서 양산까지 많은 시행착오와 시간, 그리고 비용이 소요된다. 또한, 고강도 강판은 일반 강판에 비하여 성형성이 나쁜 것이

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

보통이므로, 변형이 국부적으로 과도하게 되지 않도록 성형공정과 금형을 설계하여야 한다.

이러한 문제점들을 극복하여 성공적으로 부품을 생산하기 위해서는 보다 효율적이고 정확한 설계 방법과 능력이 뒷받침되어야 하며, 특히 판재성형의 경우 가장 널리 사용되고 있는 설계 도구는 동적·외연적 유한요소법(dynamic explicit finite element method)이라 할 수 있다[1-4]. 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[1,5]. 따라서 체계적이고 효율적인 방법에 의한 변수연구(parametric study)를 수행함으로써 궁극적으로 수치해석상의 오류를 극소화할 수 있는 입력변수, 즉 해석인자들의 최적조합을 결정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 Taguchi 실험계획법[6]을 이용하여, U-드로벤딩(U-draw bending) 공정의 유한요소해석에서 스프링백 양의 평가에 유의할 만한 영향을 미치는 해석인자들을 추출하고 이들 각각의 효과를 분석함으로써 실험 결과에 가장 근접한 결과를 주는 최적 인자조합을 도출하고자 하였다. 특히, 동적 유한요소해석에서 얻어지는 응력-시간 곡선에 크고 작은 진동이 나타나는 점에 착안하여 성형공정의 종결시각을 미소하게 변화시켜서 얻은 응력 값으로부터 스프링백 해석을 수행함으로써 인위적인 데이터 변동(variability)을 유도하였다.

2. U-드로벤딩 시험 및 해석

U-드로벤딩 시험은 스프링백 특성의 정량적 분석을 위하여 NUMISHEET '93[7]의 벤치마크 문제로 제시되었던 모델로, 형상에 의한 구속이 없어 매우 큰 탄성복원을 유발하며, 드로잉된 벽면 부위에 감김(side-wall curl) 현상을 나타낸다. Fig. 1은 이 공정의 개념도이다.

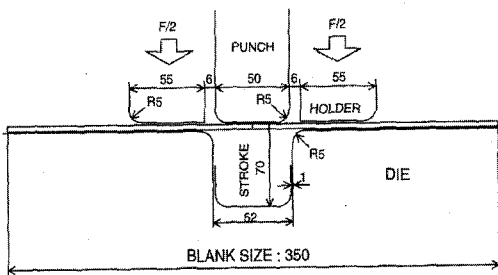


Fig. 1 Schematic diagram of the U-draw bending

2.1 시험

정해진 치수대로 금형을 제작하고 두께 1.4 mm의 고강도강판(HSS-40)을 350×35 mm 크기로 전단하여 시편을 준비한 다음, 무윤활 상태에서 3 ton의 블랭크가압력(blank holding force)을 걸어 U-드로벤딩 시험을 실시하였다.

Fig. 2는 성형된 시편들의 사진으로 스프링백과 감김 현상이 발생한 것을 보여주며, Fig. 3은 스프링백을 정량적으로 정의하기 위한 형상 파라미터들을 표시한다. 스프링백이 전혀 일어나지 않는 경우  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ ,  $\theta_f = 0^\circ$ , 그리고  $\rho = 0$ 가 되며,  $\theta_1$ 과  $\theta_f$ 는 클수록  $\theta_2$ 와  $\rho$ 는 작을수록 스프링백이 크다고 할 수 있다. 이 형상 파라미터들을 정확하고 효율적으로 측정하기 위하여 화상처리법을 이용하였다[8]. 시편의 전·후면 및 좌·우측의 네 군데서 측정한 값을 평균한 결과는 Table 1과 같다.

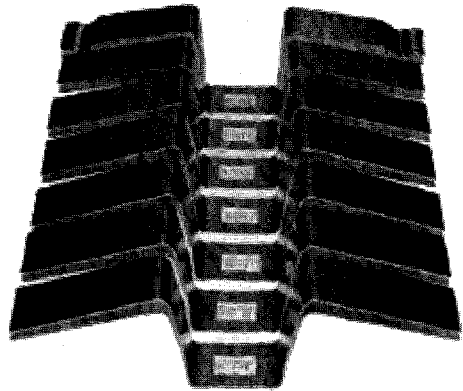


Fig. 2 Photo of the specimens after springback

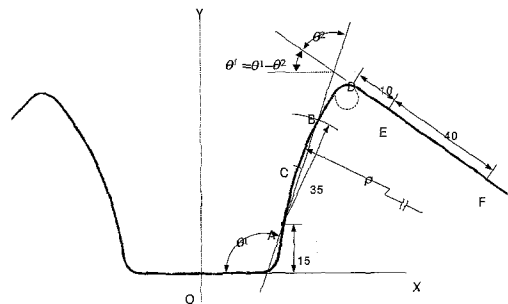


Fig. 3 Definition of the springback parameters

Table 1 Experimental result of springback parameters

Parameter	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_f$	$\rho$
Unit	deg	deg	deg	mm
Value	98.80	82.70	16.10	339.0

2.2 유한요소 모델링

U-드로벤딩 공정의 기하학적 대칭성을 고려하여 전체의 1/4에 대해서 해석을 수행하는 것이 일반적이거나, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 길이방향 중심선을 따라 1열의 요소망으로 구성된 모델에 평면변형을 경계조건을 부여함으로써 1/4 모델을 대신하였다. 이 1열 모델은 1/4 모델에 비하여 1/10 미만의 소요시간으로 거의 같은 결과를 주므로 변수 연구와 같이 반복적인 계산이 요구되는 경우에는 매우 효율적이라 할 수 있다. 상용 코드 PAM-STAMP[9]를 사용하여, 성형공정은 동적·외연적 해석으로, 스프링백은 정적·내연적 해석으로 각각 시뮬레이션 하였다. 접촉처리 알고리즘으로는 벌칙상수법 대신에 Lagrange 승수법(Lagrange multiplier method)을 사용하였다.

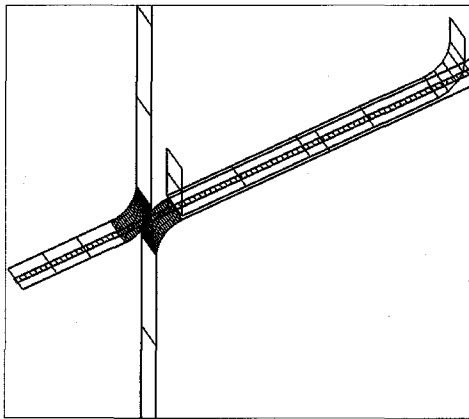


Fig. 4 1-row finite element model

3. 실험 설계

3.1 특성치 및 인자의 선택

Fig. 3에서 정의한 기하학적 파라미터들은 모두 스프링백 양을 정량적으로 나타내는 값이지만 이들 중에서 형상을 가장 크게 지배하는 것은 플랜지 경사각  $\theta_f (= \theta_1 - \theta_2)$ 이며, 이를 지배특성치로

선택하였다.  $\theta_f$ 의 실험치는  $16.10^\circ$  로 이 값에 가장 안정적으로 근접하는 해석결과를 주는 인자조합을 찾고자 하였다.

같은 유한요소 모델이라도 접촉처리 방법에 따라 입력변수와 해석 결과가 달라지나, 본 연구에서는 Lagrange 승수법을 접촉 알고리즘으로 선택함으로써 벌칙상수들의 입력 값에 따른 영향을 배제하였다. 그러면 성형공정과 스프링백의 해석 결과에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 해석인자, 즉 공정변수와 수치변수는 다음의 3 가지 정도로 압축된다.

- ① 소재 요소 크기 (blank element size; BES)
- ② 적분점 수 (number of integration points; NIP)
- ③ 펀치속도 (punch velocity; PV)

소재와 금형 면을 모델링 하기 위한 요소의 크기와 개수는 이산화(discretization)에 따른 오차와 해석 소요시간에 직접적인 영향을 주게된다. 그러나 금형 모서리 반경부 요소수(number of corner elements; NCE)는 많을수록 금형 면을 매끄럽게 잘 묘사할 수 있어 해석 결과가 더 정확할 것은 당연한 사실이며, 알려진 바와 같이 해석 소요시간에는 크게 영향을 미치지 않는 점을 고려하여 제어인자 선택 과정에서 제외하였다. 본 연구에서는 NCE를 18 개로 하여 금형 모서리를 충분히 매끄럽게 표현하였다. NCE를 너무 크게 하면, 즉 지나치게 세밀한 요소망을 사용하면 스프링백을 과도하게 평가하는 원인이 될 수 있으므로 주의를 요한다[1].

스프링백은 특히 굽힘변형을 받은 소재의 응력상태가 두께방향으로 불균일한 분포를 가지기 때문에 탄성회복 후 새로운 응력 평형상태를 유지하기 위한 변형을 일으키는 현상이므로, 스프링백을 정확하게 예측하기 위해서는 성형 직후의 응력분포를 정확하게 평가해야 한다. 유한요소법에서 응력 계산은 적분점에서 이루어지므로, 두께방향 적분점 수(NIP)가 스프링백 해석 결과에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 판단하였다.

동적·외연적 유한요소법에서는 시간증분이 매우 작아 판재성형과 같은 준정적(pseudo-static) 공정을 실제의 시간적으로도 시뮬레이션 하면 계산 시간이 과도하게 소요되므로 금형의 작동속도를 실제보다 훨씬 크게(10~1000 배 정도) 설정하는 것이 보통이다. 그러나 금형 속도가 크면 판성력도 커져서 소재가 다이 반경부를 지날 때 불연속적 거동과 이로 인한 굽힘과의 크기도 증가한다. 따라서 준정적 과정인 판재성형을 신뢰성 있게 해석하기 위해서는 적절한 금형 속도를 설정해야 하며, 이러한 이유로 펀치속도(PV)를 해석인자로 선택하였다.

### 3.2 인자 수준의 결정

고려된 해석인자들을 각각에 대하여 경험적 또는 직관적 판단으로 적절한 범위를 정하고, 예비 실험(해석)을 통하여 설정한 수준의 타당성을 검토하였다. 이 과정에서 인자별로 3수준을 선정하였으며, 수준 값들은 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Level settings

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A : BES (mm)	0.5	1.0	1.5
B : NIP	5	9	13
C : PV (mm/ms)	2	5	10

접촉처리 방법으로 Lagrange 승수법을 사용하는 경우에는 3인자에 3수준씩 모두 3<sup>3</sup> 가지의 실험이 필요하다. 또한, 경험에 의하면 인자들 상호간의 교호작용(interaction)은 미미하며, 따라서 Taguchi의 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 직교배열표(orthogonal array)가 본 분석에 적절한 것으로 판단되었다. Table 3은 Taguchi 직교배열표에 인자들을 배치한 것이다.

실험을 반복할 때는 동일한 조건에서 실시한다고 하더라도 사실상 제어할 수 없는 미소한 실험조건의 차이로 실험결과에 약간의 편차가 생기게 마련이지만, 본 실험과 같은 컴퓨터 시뮬레이션의 경우에는 입력변수들의 값이 일단 결정되면 해석결과는 항상 동일하게 얻어진다. 따라서 본 연구에서는 데이터의 변동성(variability)을 고려하기 위하여 성형공정의 계산 종결시간을 미소하게 변화시켜서 얻은 응력값으로부터 스프링백 해를 구함으로써 데이터 변동을 유도하였다.

Table 3 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) Orthogonal array

No.	1 BES	2 NIP	3	4 PV
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fig. 5는 시간에 따른 응력의 변화를 나타낸 곡선으로, 성형 종결시간( $t_0$ ) 부근의 저주파 진동 주기가  $\tau = 0.08$  ms 정도임을 알 수 있다. 진동의 1/2 파장 내에 응력의 최대값과 최소값이 존재하는 것을 감안하여 종결시간  $t_0$ (편치행정 70.0 mm)에서 일단 성형 해석을 끝낸 후 스프링백 해석을 하고, 다시 재시작(restart) 기능을 이용하여 시간 ( $t_0 + 1/8 \tau$ ), ( $t_0 + 2/8 \tau$ ), ( $t_0 + 3/8 \tau$ ), ( $t_0 + 4/8 \tau$ )까지의 성형 및 스프링백 해석을 반복하였다. 마지막 해석시간( $t_0 + 4/8 \tau$ )은 편치행정 70.4 mm에 해당한다. 이 정도 편치행정의 차이는 실제 시험에서도 충분히 발생할 수 있는 수준으로 판단된다.

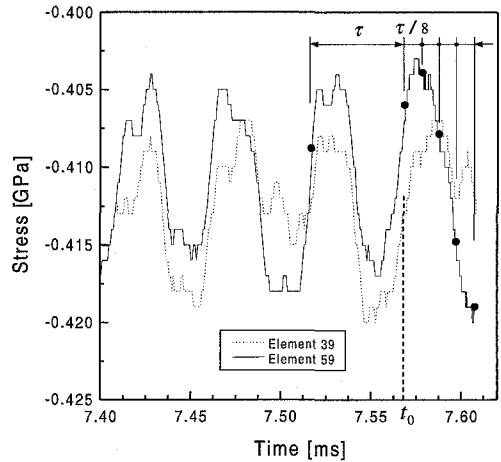


Fig. 5 Variation of the principal stress with time

### 4. 실험결과 및 분석

직교배열표의 9가지 경우에 대하여 각각 5가지씩 편치행정을 주어 성형 해석과 스프링백 해석을 수행하였다. Fig. 6은 편치행정 70.0 mm에 대한, 9가지 경우의 스프링백 후 형상을 함께 비교한 그림이다. 정량적 분석은 어려우나 입력변수의 조합에 따라 스프링백 후의 형상에 상당한 차이를 나타낼 수 있다.

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

Table 4 Experimental results for S/N and Sm

RUN	$\theta_f$					$\bar{y}$	$V_e$	S/N	Sm
	Rst_0	Rst_1	Rst_2	Rst_3	Rst_4				
1	20.37	20.31	20.31	20.30	20.27	20.31	0.001	-55.08	33.14
2	18.78	18.69	18.83	18.84	18.91	18.81	0.007	-47.28	32.48
3	18.92	18.96	18.94	18.99	19.01	18.96	0.001	-54.38	32.55
4	18.91	19.04	19.18	19.23	19.34	19.14	0.028	-41.14	32.63
5	17.56	17.64	17.81	18.10	18.02	17.83	0.055	-37.64	32.01
6	17.79	17.86	17.91	17.90	17.92	17.88	0.003	-50.52	32.04
7	13.30	11.64	11.53	11.43	11.46	11.87	0.644	-23.40	28.48
8	14.69	14.65	14.57	14.37	14.33	14.52	0.027	-38.97	30.23
9	15.19	14.97	14.91	15.16	15.43	15.13	0.042	-37.35	30.59
Mean						17.16			

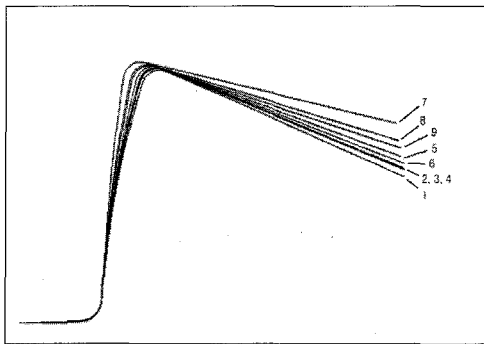


Fig. 6 Deformed shapes after springback

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

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

$$V_e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (4)$$

이들 식에서  $n$ 은 데이터 개수,  $y_i$ 는 5개의  $\theta_f$  관측치들을 나타낸다.

본 연구에서 고려하는 특성치  $\theta_f$ 는 16.10을 목표치로 하는 명목특성치(nominal the best characteristic)에 해당한다. Table 5와 Fig. 7은 각각 실험결과들을 바탕으로 계산된 S/N과 Sm에 대한 인자수준별 평균반응도표(average response

table)와 이를 그림으로 도시한 평균반응그래프(average response graph)이다. 이 도표 마지막 행의 Difference는 수준 변화에 따른 결과의 변화가 큰 인자의 순서로 번호를 매긴 것이다. 이들을 바탕으로 인자들이 스프링백 결과에 미치는 상대적인 영향을 비교하여 그 영향이 큰 인자부터 차례로 표시하면, S/N(변동성) 측면에서는 BES→NIP→PV 이고, Sm(민감도) 측면에서는 BES→PV→NIP임을 알 수 있다. 각 도표의 마지막 행의 'Difference'가 이들의 순위를 반영한다. 즉, BES는  $\theta_f$  값과 변동성 모두에 가장 큰 영향을 미치며, NIP는 값 자체에는 별 영향을 미치지 않고 다만 변동성에만 약간 영향을 미친다. PV는 NIP와 반대 성향을 나타낸다.

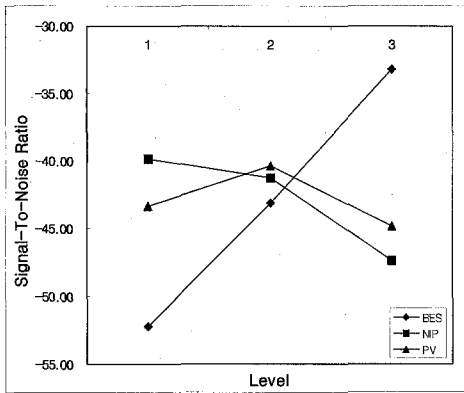
Table 5 Average response table

(a) S/N

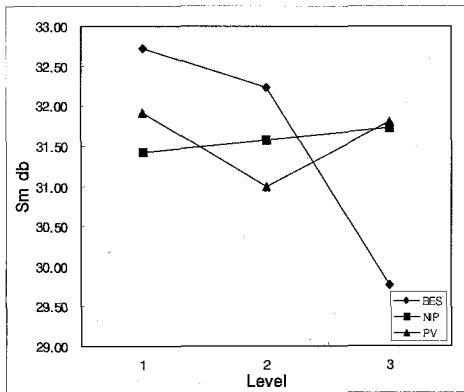
Level	BES	NIP	PV
1	-52.25	-39.87	-43.36
2	-43.10	-43.30	-40.40
3	-33.24	-47.42	-44.83
Difference	1	2	3

(b) Sm

Level	BES	NIP	PV
1	32.72	31.42	31.91
2	32.23	31.57	31.00
3	29.77	31.73	31.80
Difference	1	3	2



(a) S/N



(b) Sm

Fig. 7 Average response graph

Table 6은 S/N 및 Sm에 대한 분산분석표 (analysis of variance; ANOVA)이다. S/N 및 Sm 양자에 있어 앞의 인자별 평균반응결과에서와 동일하게 BES가 다른 인자들에 비하여 지배적인 영향을 미치는 반면, NIP와 PV는 엄밀한 의미에서 큰 영향을 미치지 못할을 알 수 있다.

최적 인자조합을 찾기 위하여 먼저 변동성을 고려하면, BES의 경우 제3 수준, 즉 BES<sub>3</sub>가 가장 안정적(robust)이나 목표치 16.10에 비하여 너무 작은 값으로 유도하므로 (Table 7에서 13.84) BES<sub>2</sub>를 적합한 것으로 판단하였다. 이로 인하여 다소 안정적이지 못한 결과가 예측된다. 다음으로, NIP는 변동성에만 다소의 영향을 미치므로 NIP<sub>1</sub>을, PV는 그 반대로 수준만 고려하여 PV<sub>2</sub>를 각각 선택하였다.

Table 6 ANOVA table

(a) S/N

Source	SS	DF	MS	F
BES	542.14	2	271.07	3.7238
NIP	96.38	2	48.19	0.6620
PV	30.54	2	15.27	0.2098
Error	145.59	2	72.79	-
Total	814.64	8	-	-

(b) Sm

Source	SS	DF	MS	F
BES	15.04	2	7.52	10.60
NIP	0.15	2	0.07	0.10
PV	1.49	2	0.75	1.05
Error	1.42	2	0.71	-
Total	18.10	8	-	-

Table 7 Average response of  $\bar{y}$

Level	BES	NIP	PV
1	19.36	17.11	17.76
2	18.28	17.05	16.19
3	13.84	17.32	17.54

이상의 고려에 의해 최적수준은 BES<sub>2</sub>, NIP<sub>1</sub>, PV<sub>2</sub>로 결정되었으며 이들 수준조합에서 기대되는  $\theta_f$ 에 대한 예측치의 도출이 가능하며 이는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 (\theta_f)_{\text{predict}} &= \widehat{\text{BES}}_2 + \widehat{\text{NIP}}_1 + \widehat{\text{PV}}_2 - 2\hat{\mu} \\
 &= 18.28 + 17.11 + 16.19 - 2(17.16) \\
 &= 17.26
 \end{aligned}$$

즉,  $\theta_f$ 의 예측치는 목표치(16.10) 보다 1.1° 정도 큰 것으로 나타났다.

다음으로, 최적 인자조합의 타당성을 확인하기 위하여 이들 인자조합에 대한 추가적인 해석을 수행하고 그 결과를 예측치와 비교하였다. 확인 해석의 결과는 Table 8에서 보는 바와 같이 18.06으로 예측치보다 오히려 크게 계산되었으며, 목표치와는 1.96°에 달하는 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 부분적으로 BES 인자가 변동성과 민감도 양쪽

에 지배적인 영향을 미치고 있어 데이터의 안정성과 정확성을 동시에 만족시키는 인자조합을 구하기 어렵기 때문인 것으로 분석된다.

또 한가지 중요한 사항은 앞의 Table 6(a) ANOVA 표에서 나타난 바와 같이 전체변동 814.64 중 순수오차로 인한 변동이 145.59로 큰 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 부분적으로 고려된 인자들간의 교호작용을 고려해야 할 필요가 있거나, 고려하지 않은 다른 중요한 인자가 있을 수 있음을 반영한다.

Table 8 Result of the confirmation run

Optimum Combination	BES	1.0
	NIP	5
	PV	5
$\theta_f$	목표치	16.10
	Predicted	17.26
	Calculated	18.06

5. 결론

U-드로벤딩 성형공정과 스프링백 공정의 유한요소해석 결과에 영향을 미치는 여러 가지 공정변수와 수치변수들을 제어인자로 선택하여 Taguchi 실험계획법을 통하여 각 인자들의 효과를 체계적으로 분석하고 실험 결과에 가장 가까운 결과를 주는 최적인자 조합을 도출하였다. 특히, 편치행정에 인위적으로 미소한 변화를 주어 데이터 변동을 유도함으로써 각 인자들의 안정성과 민감도를 분석하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 접촉처리 알고리즘으로는 Lagrange 승수법을 사용하였으며, 소재 유한요소의 크기(BES), 두께방향 적분점 개수(NIP) 및 편치속도(PV) 등 3가지의 기본적인 입력변수를 제어인자로 선택하였다. 특성치로는 스프링백 양을 나타내는 여러 가지 기하학적 인자들 중 형상에 가장 지배적인 영향을 미치는 플랜지 각( $\theta_f$ )을 선택하였다.
- (2) 동적 유한요소법으로 구해진 응력-시간 곡선에는 크고 작은 진동이 많이 나타나는데, 이러한 응력분포를 가지고 정적 스프링백 해석을 할 때 그 결과의 안정성과 신뢰성에 의문의 여지가 있다. 따라서 성형공정의 계산 종결시간을 미소하게 변화시켜서 얻은 여러 개의 응력값으로부터 스프링백 해를 구함으로써 데

이터의 변동성(variability)을 분석하였다.

- (3) Lagrange 승수법을 사용할 때 결과에 큰 영향을 미치는 인자부터 차례로 표시하면 S/N(변동성 측면)에서는 BES→NIP→PV 이고, Sm(민감도 측면)에서는 BES→PV→NIP가 된다. BES는 결과 값과 변동성 모두에 가장 큰 영향을 미친다.
- (4) 분산분석표와 평균반응표를 바탕으로  $\theta_f$ 의 실험치(16.1°)에 가장 안정적으로 근접하는 해석결과를 주는 인자조합을 찾고, 그 조합에 대한 해석결과와의 예측치를 산출하였다. 예측치는 실험치, 즉 목표치보다 1.1° 정도 큰 것으로 나타났다.
- (5) 최적 인자조합에 대한 확인 해석의 결과는 예측치보다 오히려 크게 계산되었으며, 목표치와는 1.96°에 달하는 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 부분적으로 BES 인자가 변동성과 민감도 양쪽에 지배적인 영향을 미치고 있어 데이터의 안정성과 정확성을 동시에 만족시키는 인자조합을 구하기 어렵기 때문인 것으로 분석된다.
- (6) 금형 모서리 요소 수(NCE)는 계산 소요시간에 별로 영향을 미치지 않으므로 충분히 많이 취하는 것이 좋다는 판단에서 제어인자의 선택에서 제외하였다. 그러나 지나치게 세밀한 요소망을 사용하면 스프링백을 과도하게 평가하는 원인이 될 수 있으므로 주의를 요한다. 성형 해석이나 스프링백 해석에서 정확한 해를 구하기 위해서는 BES와 NCE, 즉 서로 접촉하는 두 재료의 상대적인 요소 크기의 적절한 조합이 필요하며 이에 대한 체계적인 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] He, N. and Wagoner, R. H., "Springback Simulation in Sheet Metal Forming", *Proc. of the NUMISHEET '96*, pp. 308-315, 1996.
- [3] Chung, W. J., Cho, J. W. and Belytschko, T., "A Study on Dynamic Effects of Dynamic Explicit FEM in Sheet Metal Forming Analysis", *Proceedings of NUMISHEET '96*, pp. 414-420, 1996.

- [4] 정완진, 조진우, “박판금속 성형공정 해석시스템 개발”, 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 29-37, 1999.
- [5] Stein, Jared J., “The Effect of Process Variables on Sheet Metal Springback”, *Society of Automotive Engineering*, 982299, pp. 65-73, 1998.
- [6] Peace, G. S., *Taguchi Methods*, A Hands-on Approach, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1993.
- [7] Makinouchi, A., Nakamachi, E. Onate, E. and Wagoner, R. H., *Proc. of the 2nd Int. Conf. NUMISHEET '93*, pp. 398-405, 1993.
- [8] 한상준, 김영수, 김형중, 오수익, “화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발”, 한국소성가공학회논문집, 제7권 제6호, pp. 575~585, 1998.
- [9] Pam System International S.A., *PAM-STAMP<sup>TM</sup> User's Guide*, Version 1998, 1998.