

실험계획법을 이용한 컵 귀발생의 영향인자 해석

남재복, 정기조

Analysis on the Effect of Material and Forming Conditions on the Cup Earing by Taguchi Method

J.B.Nam, K.J.Jeong

Abstract

Finite element simulation with experimental analysis of Taguchi's orthogonal array was carried out to know the effects of material and forming parameters on the cup earing and skewness. It was revealed that the planar anisotropy was the most influencing factor in the cup ear formation, whereas blank holding force and material properties such as strength and thickness deviation at the coil edge had a relatively high effect on the cup skewness.

Key Words : cup drawing, earing, skewness, ear ratio, thickness deviation, planar anisotropy, finite element method, orthogonal array

1. 서론

금속박판을 이용한 컵 드로잉시 컵의 개구부(開口部)에 형성되는 귀(ear)발생부는 후공정에서의 trim loss에 해당되는 부분으로 가능한 귀발생이 적은 소재가 바람직하다. 귀발생에 영향을 미치는 대표적인 인자는 소재의 평면이방성으로 알려져 있으나 실 생산라인에서의 컵 성형시에는 소재의 두께편차 또는 부위별 재질편차에 의하여 국부적인 귀가 발생하는 경우도 있다. 이와 같이 소재 두께 또는 재질편차에 의하여 귀가 발생하는 경우는 컵의 높이가 균일하지 않고 한쪽 방향으로 기울어지는 형태를 가지게 되어 재드로잉 또는 아이어닝(ironing)등의 2차 성형시 기울어짐의 정도 즉, 경사도(skewness)가 더욱 증가되어 제품화할 수 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 소재 및 가공조건의 변화에 따른 귀발생 및 경사도를 해석하였으며, 직교배열(orthogonal array)을 이용한 Taguchi의 실험계획법^{1,2)}을 적용하여 귀발생 및 경사도에 미치

각 인자들의 영향도를 파악하였다.

2. 공정해석

상용 유한요소 해석 코드인 PAM-STAMP³⁾를 이용하여 컵 드로잉공정에 대한 성형해석을 실시하고, 컵의 귀발생 및 경사도에 미치는 인자들의 영향을 검토하였다.

2.1 금형/소재 형상 모델

금형, 소재의 기하학적 형상 구성 및 요소 생성을 위하여 전처리 프로그램인 HYPER-MESH를 사용하였다. 블랭크의 직경은 134mm이며 드로잉비(draw ratio)는 1.51이다. Fig.1은 소재 블랭크의 1/2 모델을 나타낸다. 코일 가장자리(edge)에서의 두께편차 또는 재질편차에 대한 영향을 고려하기 위하여 요소의 그룹을 zone 1~zone 4로 구분하였으며, 해석 목적에 따라 두께 및 재질특성의 변화된 값을 도입하였다.

2.2 소재특성 모델

소재는 이방성 탄소성 모델을, 금형은 강체 모델을 적용하였으며 소재의 가공경화특성의 표현에는 Swift law를 사용하였다. 인장시험결과 얻어지는 응력-변형률의 data로부터 다음의 식으로 표현되는 응력과 소성변형률 관계식의 강도계

포항제철기술연구소 박관연구그룹
(790-785 경북 포항시 남구 괴동동 1번지)

수 K , 예변형 ε_0 및 가공경화지수 n 을 구하였다.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (1)$$

본 해석에서는 음료용 용기성형에 널리 쓰이는 두께 0.26mm인 저탄소 석도강판(tinplate)의 인장특성값을 도입하였다.

3. 직교배열 실험

3.1 인자(factor)와 수준(level)의 선택

귀발생 및 경사도에 영향을 미치는 평면이방성(ΔR), 두께편차(edge drop, Δt), 재질편차(특히 코일 edge부에서의)등의 소재 인자와, 블랭크 홀더력(BHF)으로 대표되는 가공조건을 해석 인자로 선정하였다.

이상의 4가지 인자에 대한 수준을 설정하기 위하여 용기성형용으로 적용되는 석도강판 20여 코일의 재질 및 두께편차 등을 측정하여 Table 1과 같이 각 인자들의 수준을 결정하였다. 소재의 평면이방성 및 두께편차는 측정 데이터의 최소 및 최고값을 각각 수준 1 및 3으로, 그 평균값을 수준 2로 설정하였다. M1, M2 및 M3로 표시된 코일의 폭방향 재질편차는 각각 코일 중심부, edge에서 약 10mm 지점, edge에서 약 30mm 지점의 대표적인 재질 특성값을 나타내며 Table 2에 각각의 물성치를 정리하였다. 연신율은 $M1 > M2 > M3$ 의 수준이며, 각각의 항복강도는 대략 27, 30, 33kg/mm²이다. 일반적으로 항복강도에 비례하여 설정되는 BHF는 10kN을 중간 수준으로 하였고 본 실험에서 고려된 항복강도의 변화폭인 $\pm 10\%$ 의 변화 값인 9 및 11kN을 각각 저, 고 수준으로 설정하였다.

3.2 직교행렬의 선정과 모사실험의 수행

Taguchi가 제안한 표준 직교배열 표를 참고로 하면 수준의 수가 3인 경우에 사용할 수 있는 직교배열은 L_9, L_{27}, L_{81} 이다. 본 모사실험에서는 실험횟수를 최소화하기 위하여 L_9 모델을 선정하였다.

직교배열 실험은 PAM-STAMP를 이용한 컴퓨터 모사실험의 방법으로 수행하였다. 유한요소 해석결과 얻어진 컵 상부의 각 절점에 대한 3차원 좌표를 취하여 위치별 컵의 높이, 귀발생률 및 경사도를 계산하였다. 본 실험에서의 귀발생률은 해석결과 얻어진 컵의 최대, 최소 높이를 이용하여 다음 식으로 계산하였고, 경사도는 압

연 직각방향의 각도 0° 지점 및 180° 지점에서의 높이차이로부터 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{Ear ratio (\%)} &= \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\min}} \times 100 \\ \text{Skewness (\%)} &= \frac{H_{180^\circ} - H_{0^\circ}}{H_{0^\circ}} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 소재 및 가공조건에의 영향

Fig.2는 평면이방성계수(ΔR)의 변화에 따른 귀발생률의 변화를 나타낸 결과이다. 평면이방성계수가 높을수록 귀발생률은 증가한다는 것은 이미 잘 알려진 사실로 시뮬레이션 결과에서도 그 경향을 잘 나타내고 있다.

Fig.3은 컵의 경사도에 미치는 블랭크 edge에서의 두께 drop량의 영향에 관하여 시뮬레이션한 결과이다. 코일의 가장자리에 해당하는 zone 3 및 zone 4의 두께를 edge drop량 만큼 적절한 구배로 감소시킨 후 계산한 결과로서 두께 drop량이 증가할수록 컵의 경사도가 심해짐을 보이고 있다.

Edge부의 재질특성 변화가 경사도에 미치는 영향을 해석한 결과를 Table 3에 정리하였다. 코일 중심부에 비하여 edge부의 소재강도가 높은 경우에 대한 해석결과로 zone 3 및 zone 4에 M2, M3의 재질특성치를 대입한 경우가 전체 블랭크에서 균일한 재질특성을 가지는 경우에 비하여 경사도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 압연공정의 특성상 코일 edge부는 중심부에 비하여 두께가 얇고 강도가 높은 특성을 보이므로 Fig.3 및 Table 3의 결과로부터 edge부 소재로 성형되는 컵은 코일 중심부 소재로 제조된 컵보다 높은 경사도를 가짐을 추정할 수 있다.

컵 드로잉공정에서 가공상의 중요한 인자인 블랭크 홀더력(BHF)이 귀발생률에 미치는 영향에 대한 해석결과를 Fig.4에 나타내었다. BHF가 증가할수록 귀발생률이 증가하는 경향을 보이고 있지만 그 증가율은 크지 않아 블랭크내의 두께 및 재질편차가 없을 때 귀발생률에 미치는 BHF의 영향은 크지 않다.

4.2 직교배열 모사실험 결과

Table 1 및 L_9 직교배열 조건으로 유한요소 시뮬레이션에 의한 행렬실험을 수행한 결과를 Table 4 및 Table 5에 정리하였다. 본 행렬실험은 귀발생률 또는 경사도가 최소가 되는 즉, 최소값이 목표치(the lower, the better)인 문제로

해석할 수 있다. 본 결과에서는 다음과 같은 식으로 각 조건에서의 실험결과에 대한 통계 데이터를 정리한다.

$$\eta_i = -\log_{10}(\text{square of ear ratio or skewness at } i \text{ th test})$$

귀발생을 또는 경사도를 제일 적게 하려는 목적은 결국 S/N 비(signal to noise ratio) η 를 최대화하는 문제가 된다.

Table 6 및 Table 7은 귀발생을 및 경사도에 대한 평균해석(Analysis of Means, ANOM)을 정리한 것으로 다른 인자들의 영향에 비하여 평면이방성이 귀발생물에 큰 영향을 미치고 있으나 경사도에 미치는 영향은 오히려 가장 낮은 것으로 나타나고 있다.

본 실험에서의 인자들은 귀발생물에 서로 다른 정도의 영향을 미친다. 인자들의 상대적 영향도를 파악하기 위하여 분산해석(Analysis of Variance, ANOVA)을 실시한 결과를 Table 8 및 Table 9에 나타내었다. 소재의 귀발생물은 예측된 바와 같이 평면이방성의 영향이 절대적이며 소재의 두께 및 재질편차, BHF의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 그러나 경사도에 미치는 인자들의 영향은 귀발생물과는 다른 결과를 보이고 있다. 즉, 평면이방성보다는 소재의 두께차이, edge의 재질특성 및 BHF의 영향이 거의 비슷한 수준으로 경사도에 영향을 미치고 있음을 보여준다.

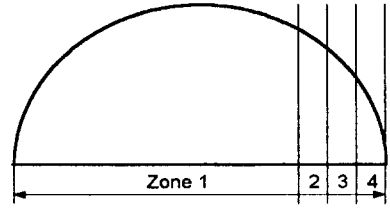
5. 결론

(1) 컵 드로잉 성형시의 귀발생물 및 경사도에 미치는 소재 및 가공인자의 영향을 컴퓨터 시뮬레이션 해석한 결과 소재의 평면이방성, 드로잉 비, 블랭크 홀더력이 증가할수록 ear발생물이 증가하는 경향을 보였다.

(2) 직교배열 실험법을 이용한 컴퓨터 해석결과 컵의 귀발생물에 지배적인 영향을 미치는 인자는 소재의 평면이방성이나, 컵의 경사도에는 소재의 두께 편차 및 블랭크 홀더력, 코일 edge부 강도상승의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

<참고문헌>

- 1) Phillip Rose, "Taguchi Technique for Quality Engineering", McGraw-Hill(1988)
- 2) M. S. Phadke, "Quality Engineering using Robust Design", Prentice-Hall Int. Eds.(1989), pp285-319
- 3) PAM-STAMP user manual, version(1996)



- Blank diameter : 134mm
- Blank thickness : 0.26mm
- Distance btw. zone 2, 3 & 4 : 10mm

Fig.1 Blank shape for introducing different edge properties

Table 1 Factors and their levels simulated

Factor	A	B	C	D
Level	ΔR	Δt (μm)	Material Properties	BHF(kN)
1	0	3	Zone 1~4 (M1)	9
2	-0.1	6	Z1(M1), Z2~Z4(M2)	10
3	-0.2	9	Z1(M1), Z2~Z4(M3)	11

Table 2 Material properties in the simulation

	K	ϵ_o	n
M1	0.651	0.0141	0.172
M2	0.652	0.0151	0.163
M3	0.655	0.0170	0.165

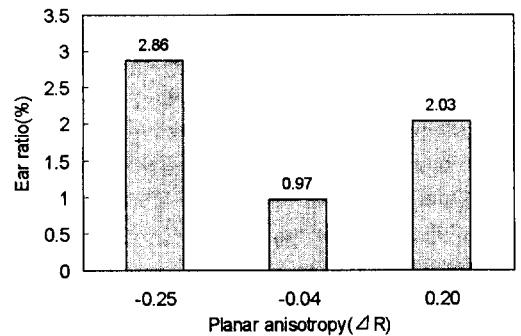


Fig.2 Effect of planar anisotropy on cup earing

Table 3 Simulated effect of mechanical properties at blank edge on the skewness

	Mechanical Property				Δt (μm)	Skew. (%)
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4		
1	M1				1	0.024
2	M1	M2	M3		1	0.346

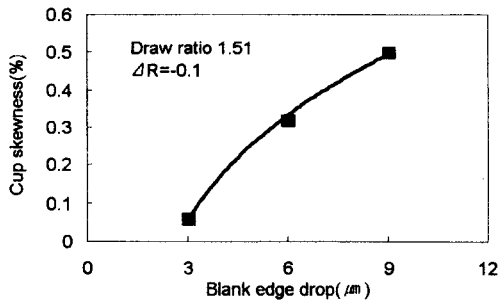


Fig.3 Simulation result showing the effect of blank edge drop on the cup skewness

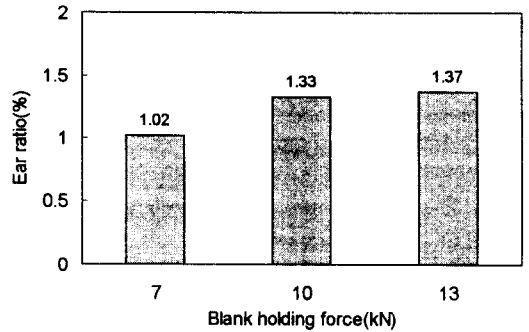


Fig.4 Effect of BHF on the cup ear ratio

Table 4 Results of matrix experiment(ear ratio)

No.	Column No. & Factor Assigned				Ear Ratio	
	A (ΔR)	B (Δt)	C (Mat.)	D (BHF)	Ratio (%)	η (db)
1	0	3	M1	9	2.55	-0.813
2	0	6	M1, M2	10	2.96	-0.943
3	0	9	M1, M3	11	3.33	-1.045
4	-0.1	3	M1, M2	11	3.03	-0.963
5	-0.1	6	M1, M3	9	3.11	-0.986
6	-0.1	9	M1	10	3.20	-1.010
7	-0.2	3	M1, M3	10	4.07	-1.219
8	-0.2	6	M1	11	3.98	-1.200
9	-0.2	9	M1, M2	9	3.99	-1.202

Table 7 Average η by factor levels(skewness)

Factor	Level		
	1	2	3
A. Planar Anisotropy	0.972	0.676	0.209
B. Blank Edge Drop	1.153	0.470	0.233
C. Properties of Edge	1.142	0.462	0.253
D. BHF	1.191	0.425	0.240

Table 5 Results of matrix experiment(skewness)

No.	Column No. & Factor Assigned				Skewness	
	A (ΔR)	B (Δt)	C (Mat.)	D (BHF)	Skew (%)	η (db)
1	0	3	M1	9	0.05	2.602
2	0	6	M1, M2	10	0.58	0.473
3	0	9	M1, M3	11	1.20	-0.158
4	-0.1	3	M1, M2	11	0.46	0.674
5	-0.1	6	M1, M3	9	0.43	0.733
6	-0.1	9	M1	10	0.49	0.620
7	-0.2	3	M1, M3	10	0.81	0.183
8	-0.2	6	M1	11	0.79	0.205
9	-0.2	9	M1, M2	9	0.76	0.238

Table 8 ANOVA table for η (ear ratio)

Factor/Source	DOF	Sum of squares	Influence to earing (%)
A.Planar anisotropy	2	0.1260	81.55
B.Edge Drop	2	0.0116	7.51
C.Properties of blank edge	2	0.0088	5.70
D.BHF	2	0.0081	5.24
Total	8	0.1545	100

Table 6 Average η by factor levels(ear ratio)

Factor	Level		
	1	2	3
A. Planar Anisotropy	-0.934	-0.986	-1.207
B. Blank Edge Drop	-0.998	-1.043	-1.086
C. Properties of Edge	-1.008	-1.036	-1.082
D. BHF	-1.00	-1.057	-1.069

Table 9 ANOVA table for η (skewness)

Factor/Source	DOF	Sum of squares	Influence to skewness (%)
A.Planar anisotropy	2	0.888	17.48
B.Edge drop	2	1.369	26.95
C.Properties of blank edge	2	1.298	25.55
D.BHF	2	1.525	30.02
Total	8	5.08	100