

가변스트레치성형 설계변수와 성형오차의 상관관계에 대한 통계적 연구

서영호¹ · 허성찬¹ · 강범수² · 김 정[#]

Statistical Study on Correlation Between Design Variable and Shape Error in Flexible Stretch Forming

Y. H. Seo, S. C. Heo, B. S. Kang, J. Kim

(Received November 17, 2010 / Revised December 15, 2010 / Accepted December 16, 2010)

Abstract

A flexible stretch forming process is useful for small quantity batch production because various shape changes of the flexible die can be achieved conveniently. In this study, the design variables, namely, the punch size, curvature radius and elastic pad thickness, were quantitatively evaluated to understand their influence on sheet formability using statistical methods such as the correlation and regression analyses. Forming simulations were designed and conducted by a three-way factorial design to obtain numerical values of a shape error. Linear relationships between the design variables and the shape error resulted from the Pearson correlation analysis. Subsequently, a regression analysis was also conducted between the design variables and the shape error. A regression equation was derived and used in the flexible die design stage to estimate the shape error.

Key Words : Flexible Stretch Forming, Design Variable, Shape Error, Design of Experiment, Correlation Analysis, Regression Analysis

1. 서 론

항공기 및 철도차량의 외피는 주로 곡률을 가지는 박판으로 구성되며, 큰 곡률 반경을 가지는 곡판의 경우 탄성회복을 억제하기 위하여 스트레치 성형공정을 이용한다[1, 2]. 이는 판재가 받는 변형상태를 소성영역까지 확장하는 공정으로 박판급속을 양 끝단에 인장력을 부여함과 동시에 급형을 밀어올려 성형하는 방법이다. 지금까지의 스트레치 성형공정에서는 급형의 형상이 일정하여 최종제품의 형상에 따라 급형을 제작해야 한다. 이는 생산 비용 및 시간, 노동력의 소모가 요구되므로 기존의 단일급형을 대체하는 가변급형

을 사용한 가변스트레치 성형공정이 제시되었다.

가변급형은 기존의 단일급형을 여러 개의 편치로 분할하여 편치와 판재의 접촉점에 따라 그 높이를 조절함으로써 3차원 곡면을 다양하게 구현할 수 있다[3]. 하지만 가변급형의 특성상 급형과 판재는 불연속적인 국부접촉을 하게 되며, 이는 성형오차 및 소재의 표면에 스크래치를 남기는 성형결함의 근본적인 원인이다. 성형결함을 최소화하는 방안으로 판재와 가변급형 사이에 탄성패드를 삽입하는 방법이 제시되었다[1]. 하지만 탄성패드가 성형오차 및 결함에 미치는 영향성에 대한 정량적인 평가는 아직 연구된 바 없으며, 편치 형상 및 곡면형상에 따른 성형오차에 대한 정량

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원
2. 부산대학교 항공우주공학과
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, greatkj@pusan.ac.kr

적 평가 또한 수행된 바 없으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 가변 스트레치 성형공정의 유한요소해석 결과를 바탕으로 탄성패드를 비롯한 가변스트레치 성형공정에서의 대표적인 설계변수와 성형오차의 관련성을 상관관계 분석을 통하여 정량적으로 평가하고 다중회귀분석을 이용하여 설계변수와 성형오차와의 회귀식을 도출하였다. 회귀식을 통하여 가변금형 설계 시 설계변수에 따른 성형오차를 예측할 수 있다.

2. 설계변수

판재의 성형오차에 영향을 미치는 설계변수를 다음과 같이 선정하였다. 우선적으로 가변금형의 성형면적 및 편치배열과 직접적으로 연관되는 편치의 크기이다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 편치의 크기는 지름(P)으로 정의된다. 다수의 편치로 이루어진 가변금형이 소재와 직접적으로 접촉을 함으로서 불연속적인 성형면에 의한 국부적인 하중 집중으로 표면결함이 발생할 수 있으며, 특히 스트레치 성형공정에서는 주름 및 스크래치의 발생을 유발하여 성형오차 및 결함의 원인이 된다. 두번째 설계변수는 Fig. 1에 도시한 목적곡면의 곡률반경(R)이다. 박판의 스트레치 성형공정에서는 필연적으로 탄성회복이 발생하며, 가변 스트레치 성형공정에서도 피할 수 없는 현상이다. 단순 굽힘공정에서 곡률반경은 탄성 회복량에 영향을 미치게 되는데 가변 스트레치 성형공정을 굽힘공정에 비유할 수 있으므로 목적곡면의 곡률반경을 성형오차에 영향을 미치는 설계변수로 판단하였다. 마지막으로 탄성패드의 두께(T)를 설계변수로 선정하였다. 가변 스트레치 성형공정에서는 편치사이의 공극으로 인한 폭방향으로의 성형결함 및 국부접촉으로 인한 스크래치 결함을 예측할 수 있다. 이를 억제하기 위하여 금형과 판재사이에 탄성패드를 삽입하는 방안이 고려되었으며, 탄성패드의 두께가 성형오차에 미치는 영향을 도출하고자 한다.

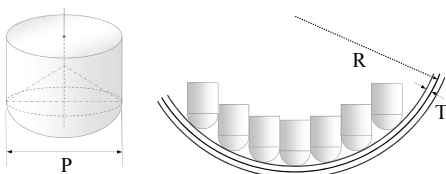


Fig. 1 Schematic view of design variable

3. 실험계획 및 자료분석

3.1 실험계획법

실험을 설계하고 분석하기 위한 통계적 접근법을 효과적으로 사용하기 위해서 연구대상이 무엇인지, 즉 연구목적이 무엇인지 명확히 할 필요가 있다[4]. 연구목적에 따라 분석자료를 어떻게 얻을 것인지 그리고 어떠한 분석방법을 사용할 것인지 결정할 수 있다. 본 연구의 목적은 가변 스트레치 성형공정에서 사용되는 가변금형 설계 시 고려해야 할 설계변수가 성형오차에 미치는 영향성을 유한요소해석을 바탕으로 정량적으로 평가하기 위한 것이다. 각 설계변수가 성형오차와 어떠한 상관관계를 보이는지 분석하고 설계변수와 성형오차와의 관련성을 규명하기 위하여 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 바탕으로 특정 조건에서의 성형오차를 추론하는 것이다.

분석자료를 얻기 위한 실험계획법의 종류는 다양하지만 본 연구에서는 요인배치법을 활용하였다. 요인배치법은 인자의 수에 따라서 일원배치법(one-way factorial design), 이원배치법(two-way factorial design), 다원배치법(multi-way factorial design)으로 나누어진다. 본 연구에서 고려되는 설계변수는 총 3개이므로 다원배치법이 사용되었다. 또한 실험이 아닌 유한요소법을 이용한 해석을 통하여 자료를 획득하게 되므로 반복은 무의미하다. 따라서 반복이 없는 삼원배치 모형을 사용하며, 설계변수에 따른 모형을 Table 1에 제시하였다. 편치크기(P)는 100mm, 50mm, 25mm, 20mm, 10mm의 5수준, 목적곡률반경(R)은 300mm, 350mm, 400mm의 3수준, 탄성패드두께(T)는 0mm, 5mm, 100mm의 3수준으로 결정하였다.

3.2 Pearson 상관관계분석

두 변수의 관계에서 선형관계에 초점을 두고 두 변수가 어느 정도의 선형관계를 갖는지 규명하는 것이 상관관계분석이다. 두 변수의 관계의 전형적인 유형은 Fig. 2와 같이 네 가지 형태로 나타난다[5]. Fig. 2(a)는 x 가 커질수록 y 가 커지는 경향으로 양(positive)의 선형관계이며, Fig. 2(b)는 음(negative)의 선형관계를 가진다. 반면 Fig. 2(c)에는 곡선관계가 도시되어 있으며, Fig. 2(d)의 경우 한 변수의 값의 변화로부터 다른 변수의 값의 변화 방향을 예측할 수 없다. 상관관계의 크기를 나타내는 값은 상관계수이며, 양의 방향으로 크면 +1,

음의 방향으로 크면 -1에 근접한다. 선형적인 관계가 전혀 없으면 상관계수는 0이며, 곡선관계인 경우 상관계수는 의미가 없다.

Table 1 Three-way factorial design

P	R	T		
		T ₁	T ₂	T ₃
P ₁	R ₁	X ₁₁₁	X ₁₁₂	X ₁₁₃
	R ₂	X ₁₂₁	X ₁₂₂	X ₁₂₃
	R ₃	X ₁₃₁	X ₁₃₂	X ₁₃₃
P ₂	R ₁	X ₂₁₁	X ₂₁₂	X ₂₁₃
	R ₂	X ₂₂₁	X ₂₂₂	X ₂₂₃
	R ₃	X ₂₃₁	X ₂₃₂	X ₂₃₃
P ₃	R ₁	X ₃₁₁	X ₃₁₂	X ₃₁₃
	R ₂	X ₃₂₁	X ₃₂₂	X ₃₂₃
	R ₃	X ₃₃₁	X ₃₃₂	X ₃₃₃
P ₄	R ₁	X ₄₁₁	X ₄₁₂	X ₄₁₃
	R ₂	X ₄₂₁	X ₄₂₂	X ₄₂₃
	R ₃	X ₄₃₁	X ₄₃₂	X ₄₃₃
P ₅	R ₁	X ₅₁₁	X ₅₁₂	X ₅₁₃
	R ₂	X ₅₂₁	X ₅₂₂	X ₅₂₃
	R ₃	X ₅₃₁	X ₅₃₂	X ₅₃₃

*1 Punch size(mm): P₁=100, P₂=50, P₃=25, P₄=20, P₅=10
 *2 Objective curvature radius(mm): R₁=300, R₂=350, R₃=400
 *3 Elastic pad thickness(mm): T₁=0, T₂=5, T₃=10

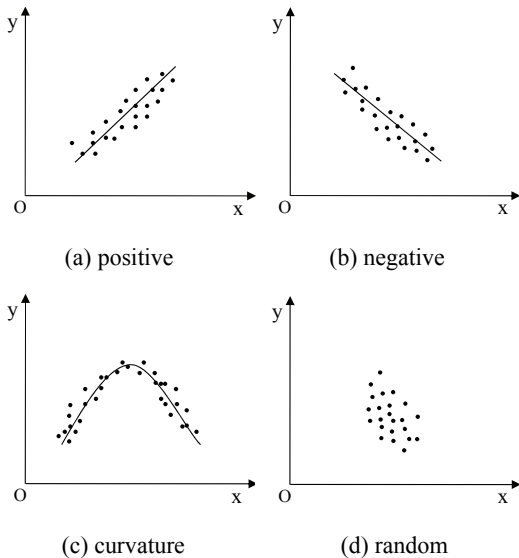


Fig. 2 Scatter diagram with respect to relationship

3.3 회귀분석

회귀분석(regression analysis)이란 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 수학적 모형을 제시하며, 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 관심있는 통계적 추론을 하는 것이다. 회귀분석은 일반적으로 단순회귀분석, 중회귀분석, 곡선회귀분석으로 구분된다. 본 연구에서는 2장에서 언급한 바와 같이 총 세 개의 설계변수를 가정하였으므로 중회귀분석을 사용하였다. 이 모형은 n개의 데이터에 대하여

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

으로 표현된다. $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 등은 미지의 모수(unknown parameter)이며, ε 은 y 를 측정할 때에 발생하는 오차로 $N(0, \sigma^2)$ 의 분포를 따르고 오차항간에는 상호독립이라고 가정한다. 미지의 모수는 최소제곱법에 의한 추정방법을 사용하게 되는데 독립변수의 수가 k 개인 경우에 미지의 모수 최소제곱 추정값은

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'y \quad (2)$$

로부터 얻어지는데 행렬 X 는 다음과 같다.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. 성형오차

4.1 성형해석모델

성형해석에 사용된 모델을 Fig. 3에 도시하였다. 판재의 크기, 성형영역, 탄성패드의 크기는 800mm×200mm, 300mm×200mm, 500mm×200mm로 일정하며, 펀치배열은 펀치크기에 따라 달라진다. Fig. 3

의 경우 펀치크기가 25mm로서 펀치배열은 12×8이다. 펀치의 위치 데이터에 대한 입력 및 출력이 용이한 ANSYS에서 제공하는 프로그래밍 언어(ANSYS parametric design language)를 사용하여 가변금형을 모델링하였다. 판재는 두께가 1mm인 AA 2024-O로 가정하였으며, 이에 따른 소재의 물성 모델로 가공 경화식 $\bar{\sigma} = K\epsilon^n$ ($K = 320.9MPa$, $n = 0.21$)을 사용하였으며[1], Mooney Rivlin모델을 사용하여 Shore A 95 탄성패드의 거동을 묘사하였다. 펀치와 소재간의 마찰계수는 0.1~0.2의 범위내에서 해석결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 0.2로 설정하였다[1,6]. 성형해석에는 외연적 기법(explicit method)을 기반으로 하는 LS-DYNA를 사용하였으며, 내연적 기법(implicit method) 기반의 ANSYS를 이용하여 탄성 회복해석을 수행하였다.

4.2 성형오차산출

가변금형을 이용한 박판의 스트레치 성형공정에서는 탄성회복에 의한 성형오차가 필연적으로 발생하게 되며, 성형오차는 가변스트레치 성형공정변수에 의해 영향을 받을 것이라는 예측할 수 있다. 따라서 성형공정변수에 따른 성형오차의 정량화 및 비교분석을 통한 가변금형의 설계가 필요하다. 스트레치 성형공정을 통하여 생산되는 박판 구조물은 주로 인장방향으로의 단일곡물을 가지므로 인장방향의 곡물을 정량화된 성형오차로 활용할 수 있다. 하지만 3-point 측정법에 의한 곡률측정 시 사용되는 임의의 point에 따라 곡물의 편차는 크게 나타나므로 정량화된 성형오차의 대표값으로 사용하기에는 적절하지 않다. 따라서 인장방향으로의 각 점에서의 오차값을 이용하여 정량화된 성형오차의 대표값을 산출한다.

일반적으로 통계학에서 사용되는 오차는 평균값에서 어떠한 특정값이 어느 정도 떨어져 있는지를 측정하기 위한 값이지만 본 연구에서는 목

적곡면과 성형곡면의 높이차이를 측정하는 값으로 정의한다. 이 때 성형곡면 임의의 점에서의 높이는 측정의 기준으로 삼는 목적곡면의 높이보다 크거나 혹은 작는데, 그 차이값을 더하게 되면 서로 상쇄되어 오차값이 실제보다 작아진다. 그러므로 각 값들을 제공한 값을 더하여 샘플링 포인트의 수만큼 나누어준 값을 인장방향으로의 정량화된 성형오차 측정의 도구로 사용한다.

$$Error_{tensile} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{s,i} - Z_{o,i})^2}{n}} \quad (4)$$

여기서 $Z_{s,i}$ 는 샘플링 포인트에서의 성형높이 즉, Z축 좌표를 의미하며, $Z_{o,i}$ 는 같은 점에서 원래 성형되어져야 하는 높이, 목적곡면의 Z축 좌표를 의미한다. n 은 표본의 크기, 성형오차 산출 시 고려되는 샘플의 수이다.

단일곡물 박판성형공정에서는 인장방향으로만 곡물을 가지므로 폭 방향으로 곡물은 0으로 높이는 일정해야 한다. 하지만 인장방향으로 소재의 인장이 발생하는 반면 폭 방향에 대해서는 소재의 수축이 발생하는 스트레치 성형공정의 특성과 소재와 불연속적으로 접촉하는 가변금형의 특성을 고려하면 소재의 국부적인 수축거동과 펀치사이의 공극에 의한 폭 방향으로의 성형결함을 예측할 수 있다[1]. 따라서 폭 방향에서의 정량화된 성형오차 측정도구가 필요하다. 폭 방향의 곡물은 0이므로 모든 포인트에서의 높이는 일정해야 하지만, 성형결함이 발생하게 되면 높이는 편차를 보이게 된다. 즉 성형결함을 나타내는 측정도구로서 평균값에서 분산된 정도를 나타내는 표준편차(standard deviation)를 이용하여 성형오차를 정량화 할 수 있다.

$$Error_{width} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n}} \quad (5)$$

여기서 Z_i 는 폭 방향으로의 Z축 좌표이며, \bar{Z} 는 Z_i 의 평균이다. 폭 방향으로의 성형오차가 적을수록 표준편차는 0에 근접하며 성형오차가 커질수록 표준편차는 성형오차에 비례하여 증가한다.

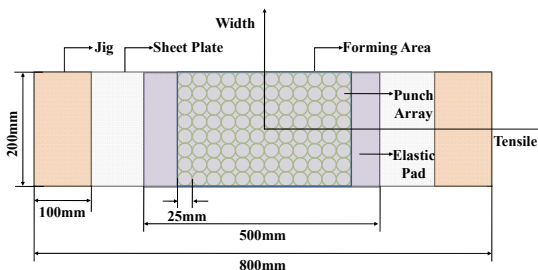


Fig. 3 Simulation model for punch size of 25mm

4.3 성형오차수준

성형오차의 수준을 결정하기 위하여 탄성회복을 고려하지 않은 기존의 단일금형(solid die)을 이용한 성형해석을 목적곡률반경 300, 350, 400mm에 대하여 수행하고 성형오차를 산출하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 탄성회복을 고려하지 않았으므로 성형곡면은 목적곡면과 거의 일치하며, 성형오차는 0에 근접해야 한다. Table 2에 따르면 목적곡률반경이 350, 400mm인 해석모델의 성형오차는 0에 가깝다. 하지만 목적곡률반경이 300mm인 해석모델의 인장방향 성형오차는 0.412를 나타내고 있는데 이는 동일 스트로크를 가하였을 때 곡률반경이 300mm인 경우 소재연신의 한계로 인해 인장방향으로의 가장자리에서 금형과 소재가 접촉하지 않아 발생하는 성형오차이다. 이는 Fig. 3과 같은 가변스트레치 성형장치 설계시 최종형상의 한계곡률반경은 300mm이상이 되어야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 목적곡률반경이 300mm인 모델에 대한 인장방향의 성형오차 기준은 0.412로 설정하며, 나머지 성형오차 기준은 모두 0으로 설정한다. 또한 Table 2에서 알 수 있듯이 성형오차가 정확히 0이 아닌 0.001로 산출되었으므로 이에 영향을 받지 않도록 성형오차는 10^{-2} 수준에서 확인하였다.

4.4 성형오차산출결과

삼원 배치법에 따라 성형해석 수행 후 탄성회복 해석을 수행하였으며, 성형오차 산출결과를 Table 3에 폭 방향, 인장 방향 순으로 도시하였다. 펀치크기가 작아짐에 따라 목적곡률반경이 300mm인 성형모델의 인장방향 성형오차는 0.412에 수렴하며, 350, 400mm의 성형모델에 대해서는 성형오차가 0으로 수렴한다. 하지만 탄성회복에 의하여 성형곡면이 목적곡면과 완전히 일치하지 않음을 알 수 있다. 성형오차는 본 연구의 회귀식 도출뿐만 아니라 탄성 회복량 예측 및 탄성회복 보정설계에도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 2 Error of simulation model using solid die

Curvature Radius [mm]	Error	
	Width-dir.	Tensile-dir.
300	0.000	0.412
350	0.001	0.001
400	0.001	0.000

Table 3 Error data by three-way factorial design

P	R	T		
		T ₁	T ₂	T ₃
P ₁	R ₁	3.72/11.56	3.38/11.43	2.64 / 5.63
	R ₂	3.74 / 6.56	3.38 / 6.24	2.60 / 6.20
	R ₃	3.75 / 3.69	3.40 / 3.46	2.51 / 3.03
P ₂	R ₁	1.63 / 5.63	1.09 / 4.55	0.32 / 3.57
	R ₂	1.63 / 2.13	1.03 / 1.89	0.23 / 1.58
	R ₃	1.62 / 1.13	1.01 / 0.91	0.29 / 0.85
P ₃	R ₁	0.42 / 2.72	0.24 / 1.69	0.07 / 1.31
	R ₂	0.40 / 0.86	0.17 / 0.32	0.16 / 0.29
	R ₃	0.38 / 0.50	0.26 / 0.12	0.18 / 0.11
P ₄	R ₁	0.23 / 1.96	0.05 / 1.24	0.06 / 1.08
	R ₂	0.21 / 0.59	0.05 / 0.16	0.05 / 0.17
	R ₃	0.20 / 0.47	0.05 / 0.07	0.04 / 0.07
P ₅	R ₁	0.04 / 1.30	0.02 / 0.54	0.02 / 0.51
	R ₂	0.04 / 0.51	0.01 / 0.08	0.02 / 0.07
	R ₃	0.04 / 0.42	0.01 / 0.02	0.02 / 0.02

Width-dir. shape error / Tensile-dir. shape error

5. 상관관계분석

Table 3을 활용하여 상관관계분석을 수행하였다. 가변스트레치 성형공정에서 성형오차(Y)가 어떠한 독립(설계)변수들에 의하여 크게 영향을 받는지를 규명하기 위한 분석이다. 독립변수는

X₁: 펀치크기[mm] (100, 50, 25, 20, 10 의 5 수준)

X₂: 목적곡률반경 [mm] (300, 350, 400 의 3 수준)

X₃: 탄성패드두께 [mm] (0, 5, 10의 3수준)

이다. 독립변수의 값은 반복이 없는 삼원 배치법의 형태로 실험계획에 의하여 정해 주었으며, 언급된 독립변수 이외의 다른 독립변수(스트로크, 소재의 물성치 등) 또한 있을 수 있으나 유한요소법을 이용한 성형해석의 특성상 그것들은 모두 일정하게 유지되었다.

상관관계분석에는 SPSS 14.0을 사용하였으며 결과는 Table 4에 도시하였다. 상관관계분석에서 유의확률은 큰 의미를 가지지 않지만 참고사항으로 표기하였다. 폭 방향의 성형오차(Y₁)와 펀치크기의 상관계수는 0.949로 강한 양의 선형상관관계를 가지며 0.000의 유의확률로 지지된다. 반면 탄성패

Table 4 Result for correlation analysis

		X ₁	X ₂	X ₃
Y ₁	Correlation Coefficient	0.949*	-0.005	-0.200
	P-value	0.000	0.975	0.187
Y ₂	Correlation Coefficient	0.815*	-0.416*	-0.093
	P-value	0.000	0.005	0.542

*. Correlation is significant at the 0.05 level

드두께와의 상관계수는 -0.200으로 약한 상관관계를 가진다. 목적곡률반경과는 상관계수가 거의 0으로 나타났는데 일반적으로 통계학에서는 성형오차와 상관성이 없는 것이 아니라 선형적인 관계를 가지지 않는 것으로 해석한다. 하지만 Table 3의 결과에서 볼 수 있듯이 목적곡률반경의 변화에 따른 폭 방향의 성형오차는 10²수준에서도 크게 변하지 않으므로 상관성이 없을 것으로 예측할 수 있다. 인장방향 성형오차(Y₂)와 펀치크기의 상관계수는 0.815로 양의 상관관계를 가지며 매우 유의할 것으로 예측된다. 목적곡률반경과의 상관계수는 -0.416으로 약한 음의 상관관계를 가지며 유의한 결과이다. 반면 탄성패드두께와는 매우 약한 음의 선형관계를 나타내고 있다. 펀치크기는 폭 방향 및 인장방향 성형오차와 선형적인 상관관계를 가지며, 펀치크기가 줄어들수록 폭 방향 및 인장방향의 성형오차는 줄어들 것으로 판단된다. 목적곡률반경은 폭 방향 성형오차와는 관련성이 적으며, 인장방향 성형오차와는 약한 음의 상관관계를 가진다. 큰 곡률반경을 가진 곡면성형시 인장방향의 성형오차는 작아진다는 의미로 해석할 수 있다. 마지막으로 탄성패드의 두께는 성형오차에 크게 영향을 미치지 않으며, 소재와 국부접촉을 하는 가변금형의 특성에 따른 소재 표면의 결함을 억제할 것으로 판단된다.

6. 회귀분석

상관관계분석은 두 변수간의 선형관계를 규명하는 반면 회귀분석은 한 변수를 종속변수로 그리고 다른 변수를 독립변수로 설정하여 이들 간의 관계를 분석한다. 독립변수가 한 개인 경우 단순회귀분석이 사용되며, 두 개 이상인 경우 다중회귀분석을 사용한다. 본 연구의 독립변수는 세

개 이므로 다중회귀분석을 수행하였다. SPSS 14.0에서 지원하는 다중회귀분석을 추정하는 방식은 동시입력방식과 단계입력방식이 있으며[5], 본 연구에서는 종속변수에 영향력이 있는 변수들만을 회귀식에 포함시키는 방식인 단계입력방식을 사용하였다. 설명력이 높은 변수의 순으로 회귀식에 포함되며, 종속변수를 설명하는 데 있어서 설명력이 어느 정도 이상 되는 변수들로만 구성된 회귀식을 도출한다.

6.1 폭 방향 성형오차 회귀식

단계입력방식을 적용한 다중회귀분석을 이용하여 폭 방향 성형오차에 대한 결과를 Table 5에 나타내었다. 종속변수는 성형오차이고 모델개발을 위한 독립변수 투입 방식은 단계선택방식으로서 1단계에서는 펀치크기만이 독립변수로서 투입되었고, 2단계에서는 탄성패드 두께가 추가적인 독립변수로 투입되었다. 펀치크기가 먼저 투입된 것은 성형오차와의 상관관계가 세 개의 독립변수들 중 가장 높기 때문이다. 모형 요약 결과에 따르면 R²은 1단계에서 0.900으로 나타났으며, 2단계에서는 0.940으로 0.040만큼 증가하였다. R²은 다중회귀분석의 결정계수(coefficient of determination)로서 종속변수의 분산 중 독립변수들에 의해 설명되는 비율을 나타낸다. 즉 2단계 회귀모형은 종속변수인 폭 방향 성형오차를 94% 설명하고 있다. 일반적으로 R²는 회귀식에 독립변수가 추가됨에 따라 점차 커지는데 이를 약간 증가시키기 위해 독립변수가 추가되는 것은 여러 측면에서 낭비이다. R²_{adj}는 이러한 점을 고려한 것으로 새로 추가되는 변수의 추가적 설명력이 매우 작은 경우에는 R²이 증가하더라도 R²_{adj}는 오히려 감소한다. 따라서 R²_{adj}를 사용하여 모형의 적절성을 판단하는 것이 더 효율적이다. Table 5에 따르면 R²_{adj} 또한 0.898에서 0.937로 증가하였다. 분산분석 결과는 회귀모형 1과 2 모두 유의확률은 0.000으로 유의적이다. 최종 회귀모형은 다음과 같다.

$$Y_1 = -0.287 + 0.037X_1 - 0.061X_3 \quad (6)$$

표준화된 회귀계수의 절대값을 비교해보면 펀치크기의 영향력이 가장 크며, 공선성 분석 결과 공차한계 값은 0.1보다 크며, 분산팽창요인은 10보다 훨씬 작으므로 독립변수들은 서로 독립적이다.

6.2 인장 방향 성형오차 회귀식

인장방향 성형오차에 대한 결과를 Table 6에 나타내었다. 1단계에서는 펀치크기만이 독립변수로서 투입되었고, 2단계에서는 목적곡률반경이 추가적인 독립변수로 투입되었다. 모형 요약결과에 따르면 R^2 은 1단계에서 0.665로 나타났으며, 2단계에서는 0.838로 0.173만큼 증가하였다. R^2_{adj} 또한 0.657에서 0.830으로 증가하였다. 분산분석 결과는

회귀모형 1과 2 모두 유의적인 것을 나타내고 있다. 독립변수들을 입력한 결과 얻어진 최종 회귀 모형은 다음과 같다.

$$Y_2 = 10.119 + 0.077X_1 - 0.031X_2 \quad (7)$$

각 계수값은 모두 유의적이며, 공선성 통계량 역시 독립변수들이 서로 독립적임을 증명하고 있다.

Table 5 Regression analysis result for width-dir. shape error using stepwise method

Model	Variables Entered	Model Summary		ANOVA				
					Sum of Squares	DOF	F-value	P-value
1	X ₁	R ²	0.900	Regression	62.854	1	387.256	0.000
		R ² _{adj}	0.898	Residual	6.979	43		
2	X ₃	R ²	0.940	Regression	65.650	2	329.644	0.000
		R ² _{adj}	0.937	Residual	4.182	42		
Model	Variables	Unstandardized Coefficient		Standardized Coefficient		Collinearity Statics		
		B		Beta		Tolerance	VIF	
1	(Constant)	-0.593						
	Punch Size	0.037		0.949		1.000		
2	(Constant)	-0.287						
	Punch Size	0.037		0.949		1.000		
	Elastic Pad Thickness	-0.061		-0.200		1.000		

Table 6 Regression analysis result for tensile-dir. shape error using stepwise method

Model	Variables Entered	Model Summary		ANOVA				
					Sum of Squares	DOF	F-value	P-value
1	X ₁	R ²	0.665	Regression	278.606	1	85.323	0.000
		R ² _{adj}	0.657	Residual	140.407	43		
2	X ₃	R ²	0.838	Regression	351.054	2	108.477	0.000
		R ² _{adj}	0.830	Residual	67.960	42		
Model	Variables	Unstandardized Coefficient		Standardized Coefficient		Collinearity Statics		
		B		Beta		Tolerance	VIF	
1	(Constant)	-0.759						
	Punch Size	0.077		0.815		1.000		
2	(Constant)	10.119						
	Punch Size	0.077		0.815		1.000		
	Curvature Radius	-0.031		-0.416		1.000		

6.3 고찰

폭 방향의 성형오차는 펀치크기와 탄성패드두께에 의해 설명되고 인장 방향의 성형오차는 펀치크기와 목적곡률반경에 의해 설명된다. 또한 펀치크기가 증가함에 따라 성형오차는 모두 증가하며, 목적곡률반경 및 탄성패드두께가 증가함에 따라 성형오차는 감소함을 알 수 있다. 추정된 회귀식을 바탕으로 설계변수의 조율을 통하여 성형공정의 특성에 맞는 가변금형을 설계할 수 있다.

7. 결론

소계와 불연속적인 국부접촉을 하는 가변금형의 특성으로 인하여 가변 스트레칭 성형공정에서는 성형오차가 발생한다. 본 연구에서는 펀치크기, 목적곡률반경, 탄성패드두께를 성형오차에 영향을 미치는 설계변수로 설정하였으며, 각 설계변수가 성형오차와 어떠한 상관관계를 가지는지 평가하고 다중회귀분석을 통한 설계변수와 성형오차간의 회귀식을 도출하여 변수간의 관련성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

상관관계분석 및 다중회귀분석을 위하여 요인 배치법에 의한 해석계획을 수립하였으며, 각 해석 케이스에 따른 성형오차를 계산하였다. 성형오차와 설계변수간의 상관관계에 대한 정량적인 평가를 위하여 상관관계분석을 수행하였다. 그 결과 폭 방향의 성형오차와 펀치크기의 선형적인 상관계수는 0.949로 매우 강하게 나타났으며, 탄성패드두께와의 상관계수는 -0.200으로 약하게 나타났다. 또한 목적곡률반경과의 상관계수는 -0.005로서 무관할 것으로 예측되었다. 인장방향으로의 성형오차와 펀치크기의 상관계수는 0.815로 강한 선형상관을 보였으며, 목적곡률반경과는 -0.416으로 약한 선형상관을 나타내었다. 탄성패드두께는 성형오차와의 상관계수가 -0.093으로 매우 약한 상관관계를 보였다.

마지막으로 다중회귀분석을 통하여 회귀식을 도출하였다. 낮은 상관관계를 보이는 인자는 배제하는 단계입력방식을 사용하였으며, 그 결과 목적곡률반경이 제거되어 펀치크기와 탄성패드두께의 함수로서 폭 방향의 성형오차에 대한 회귀식을 도출하였다. 인장 방향의 성형오차의 경우 탄성패

드두께가 배제된 회귀식을 얻을 수 있었다. 각각의 경우에 대하여 결정계수는 0.940과 0.838로 폭 방향 성형오차의 회귀식은 종속변수 분산의 94%를 설명할 수 있으며, 인장 방향 성형오차의 회귀식은 83.8%의 종속변수 분산의 설명이 가능하다. 이를 통하여 설계변수에 따른 성형오차를 추정하여 수요자의 요구에 맞는 가변금형의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. H. Seo, S. C. Heo, J. W. Park, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2010, Development of Stretch Forming Apparatus using Flexible Die, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 1, pp. 17~24.
- [2] B. S. Kang, J. Y. Lim, J. Y. Bae, 1997, Process sequence design of the inner skin of landing gear using stretch forming process, Trans. Mater. Process., Vol. 6, No. 4, pp. 291~299.
- [3] S. C. Heo, Y. H. Seo, J. W. Park, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2008, Numerical and experimental study on plate forming process using flexible die, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 8, pp. 570~578.
- [4] S. H. Park, J. W. Kim, 2010, Modern design of experiments using MINITAB, Min-young, Seoul, pp. 9~26.
- [5] H. S. Lee, J. H. Lim, 2008, Statistical package for the social sciences SPSS 14.0 manual, Bobmunsa, Paju, pp. 258~315.
- [6] Z. Y. Cai, S. H. Wang, X. D. Xu, M. Z. Li, 2009, Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, pp. 396~407.