

프로그레시브 전단 공정에서 박판 핀 비틀림 최소화를 위한 스프링 배치 최적화

송호권¹ · 심정길¹ · 김영탁[#]

Optimization of Spring Layout for Minimizing Twist of Sheet Metal Pins in Progressive Shearing

H. K. Song, J. K. Shim, Y. T. Keum

(Received September 23, 2014 / Revised October 14, 2014 / Accepted October 20, 2014)

Abstract

Progressive shearing with blanking dies is commonly employed to produce large quantities of tiny sheet metal electronic parts. Sheet metal pins, which are narrow and long, that are sheared with a progressive die set are often twisted. The twist in the sheet metal pins, which usually occurs in the final shearing operation, generally decreases with increasing blank holding force. The blank holding forces in all shearing operations are not the same because of different shearing positions and areas. In the current study, the optimal layout of the springs in a progressive die set to minimize the twist of the sheet metal pin is proposed. In order to find the holding force acting on the tiny narrow blanks produced with the proposed springs during the shearing process, the equivalent area method is used in the structural analysis. The shearing of the sheet-metal pin was simulated to compute the twist angle associated with the blank holding force. The constraint condition satisfying the pre-set blank holding force from the previous shearing operations was imposed. A design of experiments (DOE) was numerically implemented by analyzing the progressive die structure and by simulating the shearing process. From the meta-model created from the experimental results and by using a quadratic response surface method (PQRSM), the optimal layout of the springs was determined. The twist of sheet metal pin associated with the optimal layout of the springs found in the current study was compared with that of an existing progressive die to obtain a minimal amount of twist.

Key Words : Spring Layout, Blanking Dies, Blank Holding Force, Metamodel, Optimization, Evolutionary Algorithm

1. 서론

초정밀 전자 커넥터는 전자제품의 신호와 전원을 공급하는 금속 단자와 본체를 이루고 있는 플라스틱 절연체로 이루어져 있다. 단자는 박판 핀 형태로 성형되며 박판 핀을 성형하는 프레스 가공은 수 μm 단위의 초정밀 금형을 통해 이루어진다. 최근 제품의 소형화 추세에 힘입어 단자의 두께가 얇아지고,

단자 사이의 간격이 좁아지고 있다. 단자 단면의 종횡비가 1 이하가 되면서 성형 시 비틀림, 편심, 휨 등의 문제점이 야기되고 있으며 이에 대한 대책이 필요하다. 실제 제품의 성형공정을 전산 모사하여 공정 변수를 분석하고, 가장 주요한 변수인 금형의 스프링 배치를 최적화하여 제품 및 금형의 설계에 적용해야 한다. 이를 위하여 정도 높은 구조 및 성형해석이 필요하고, 다양한 변수에 대한 최적 설계

1. 한양대학교 일반대학원

Corresponding Author : Hanyang University, E-mail : ytkeum@hanyang.ac.kr

기법의 도입이 필요하다.

Ko 등[1]이 연성 파괴 기준을 적용하여 제거되는 요소의 강성(stiffness)을 작게 만들어 다른 요소에 영향을 미치지 못하도록 하는 요소제거법을 제안하였다. Yoon 등[2]은 수 mm 직경을 갖는 원통형 소재를 다단계 성형하여 복잡한 형상을 만들어내는 Micro-Former의 성형부를 해석하여 성형 정밀도 향상을 위한 방법을 연구하였다. Choi[3]는 3차원 CAD/CAM 범용 소프트웨어를 사용하여 액정 실드 케이스의 블랭킹 레이아웃의 공정을 최적화하여 재료이용률을 극대화시켰다. Hambli 등[4]은 여러 연성 파괴 조건을 적용한 유한요소 해석과 실험의 비교를 통해 각 조건의 유효성을 검증하였다.

본 연구에서는 초정밀 전자 커넥터를 구성하는 금속 단자의 전단 비틀림이 최소화되는 프로그레시브 전단 금형의 최적 스프링 레이아웃을 선정한다. 스트리퍼의 누름 압력에 따른 전단 비틀림 현상을 재현하기 위해 실제 공정조건을 적용하여 전산 모사하고 전단 해석 파라미터를 도출하여 스트리퍼의 누름 압력이 증가할수록 비틀림이 감소하는 것을 확인하였다. 금형 구조해석을 통하여 스트리퍼의 스프링 배치에 따른 스트리퍼 하중을 분석하였다. 스프링의 위치와 강성을 변수로 실험계획법으로 메타 모델을 생성하고, 최적화 알고리즘을 통해 스프링의 최적 배치를 선정하였다.

2. 프로그레시브 금형

프로그레시브 금형이란 프레스의 행정 및 하강속도에 맞추어 순차이송 장치가 박판을 일정한 간격으로 이송함으로써 다단 블랭킹 공정을 수행하여 제품을 생산할 수 있는 금형이다. Fig. 1은 프로그레시브 공정들 즉, OP10~OP50공정에서 각 전단공정 후 박판의 성형 형상을 나열한 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 금속 단자의 주요 부분은 OP30~OP50공정에서 가공된다.

핀의 주요 형상인 H자 부위에서는 비틀림이 거의 발생하지 않지만 핀의 우측 끝단에 위치한 작은 돌기 형상에서는 비틀림이 크게 발생한다(Fig. 1 참조). 핀 비틀림이 발생하는 Surface Mount Technology(SMT)부는 제품이 솔더링을 통해 PCB기판에 고정되는 위치이다.

박판 핀은 두께가 0.15mm인 인청동 소재로 성형

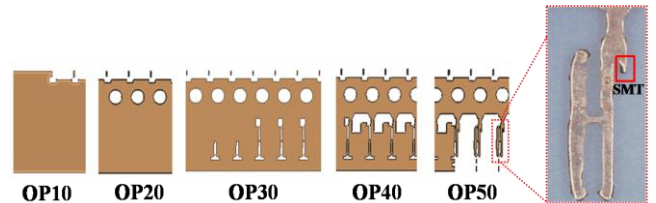


Fig. 1 Blank shapes in the progressive processes for sheet metal pin

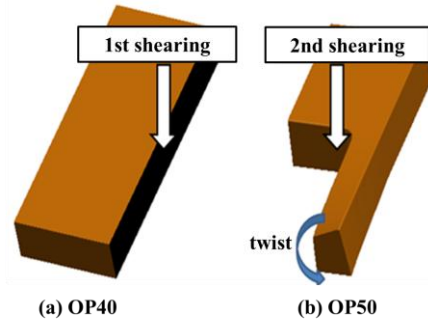


Fig. 2 Shearing processes and twist of sheet metal pin

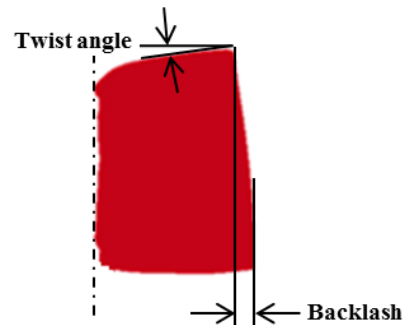


Fig. 3 Section shape of sheet metal pin showing twist angle and backlash after shearing

되며, 비틀림이 발생하는 SMT부의 폭은 0.09mm이다. 이 부위의 전단가공을 위해 먼저 OP40공정에서 Fig. 2(a)와 같이 우측면이 전단되고 이어서 OP50공정에서 Fig. 2(b)와 같이 좌측면이 전단된다. 돌기 형상이 시작되는 몸체부에서는 비틀림이 발생하지 않지만 돌기 형상의 끝단부로 갈수록 비틀림이 심해진다. 비틀림이 일어난 돌기 형상의 단면은 Fig. 3에 나타내었다.

3. 스프링 배치 최적화

3.1 최적화 과정

금속 단자의 핀 비틀림을 최소화 하기 위하여 먼저 프로그레시브 금형이 박판에 가하는 하중을 해

석하였다. 즉, 금형 전체를 모델링하여 스프링의 배치에 따라 스트리퍼가 박판에 가하는 누름압력 분포를 계산하였다. 이를 통해 스프링의 배치와 스프링의 강성이 OP30~OP50공정에서 누름압력에 주는 영향을 파악하였다. 이 과정에서 박판의 실제 형상이 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 너무 작고 복잡하여 모델링하기 어렵고 해석시간이 오래 걸릴 것으로 예상되어 본 연구에서는 등가면적의 박판 모델을 사용하였다. (Fig. 4 참조)

구조해석을 통해 박판에 작용되는 누름압력이 돌기 형상의 비틀림과 높은 상관관계를 갖고 있음을 밝히고, OP30~OP50공정을 성형해석 하여 누름압력에 의한 비틀림을 예측하였다. 이 때 누름압력은 스프링 상수의 증감을 통해 변화시키고 이에 따른 비틀림각을 각 경우의 해석결과를 통해 계산하였다. 스프링 상수와 비틀림각 사이의 상관관계는 2개의 보간식을 통해 정립하였다.

실제의 금형에서는 각각의 블랭킹 공정마다 스프링이 일정하게 위치하지 않는다. 스프링의 배치에 따라 각 공정에서 박판에 작용되는 누름 압력은 다르다. 따라서 스트리퍼 스프링의 배치를 최적화하여 OP30~OP50공정의 누름압력을 제어하고 박판 핀의 비틀림을 최소화한다.

스프링 개수와 스프링 배치의 전체적인 최적화 과정은 Fig. 5와 같다. 누름압력에 영향을 주는 설계 변수를 선정하고, 실험계획법으로 전산실험을 실시하였다. 그리고 최적화를 위하여 상용 최적화 프로그램을 사용하였다.

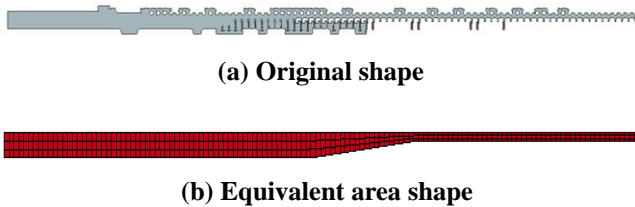


Fig. 4 Equivalent area model of the sheet

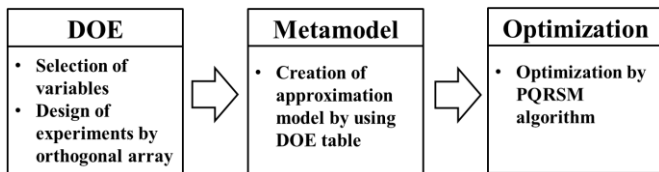


Fig. 5 Optimization procedure for spring layout

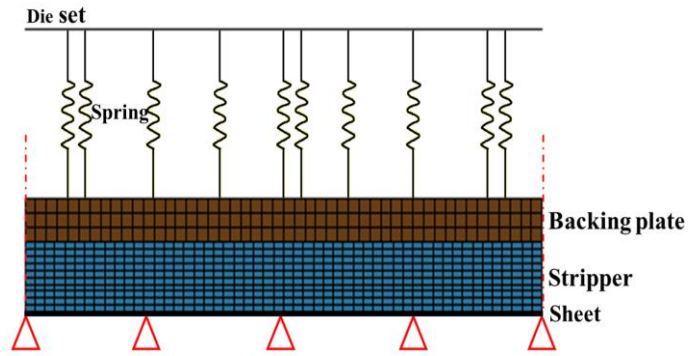


Fig. 6 FE model for analyzing blank holding pressure of the sheet

Table 1 Holding pressures in shearing processes

	Entrance	OP10	OP20	OP30
Holding pressure [MPa]	5.23	7.06	7.91	9.06

3.2 누름압력 해석

박판에 스트리퍼에 의한 압력이 작용되는 과정을 전산모사하여 금형에 배치된 스프링의 위치 및 강성에 의한 스트리퍼 누름압력의 분포를 구하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 박판은 각 변이 2.0mm인 3차원 8절점 요소로 모델링되었다. 그리고 스트리퍼와 백킹플레이트는 탄성체로, 기타 금형 부분은 강체로 모델링되었다. 바닥은 고정 경계조건으로 설정하였고, 각 코너부는 Z방향으로만 움직이도록 구속조건을 적용하였다.

구조해석 결과를 Table 1에 나타내었다. 실제로 OP50공정부를 제외한 공정들에서는 비틀림이 발생하지 않는다. 이는, OP40이하의 공정부들 중 진입부 응력을 기준으로 볼 때 5.23MPa보다 큰 누름압력이 작용되면 OP40이하의 공정부들에서는 비틀림의 문제가 없다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 누름압력의 최소량으로 5.5MPa로 설정하고 최적화의 구속조건으로 사용하였다.

3.3 비틀림각 해석

돌기 형상의 비틀림을 해석하기 위해, 전단공정의 전산 모사가 필요하다. 전단 공정은 Cockcroft-Latham의 연성 파괴조건[5]을 적용한 요소제거 기법을 적용하였다. Cockcroft-Latham의 조건에 의해 인장

응력이 없다면 $\sigma^*=0$ 이 되므로 파괴가 발생하지 않게 된다. 여기서 σ^* 는 최대 주응력이다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_1} \sigma^* d\bar{\epsilon} = c_1 \quad (1)$$

전단가공 공정 동안 최대 주응력의 최대치가 일정하게 유지 된다고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_1} d\bar{\epsilon} \approx c_2 \quad (2)$$

유한요소 해석에서 위 식 (2)는 증분개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

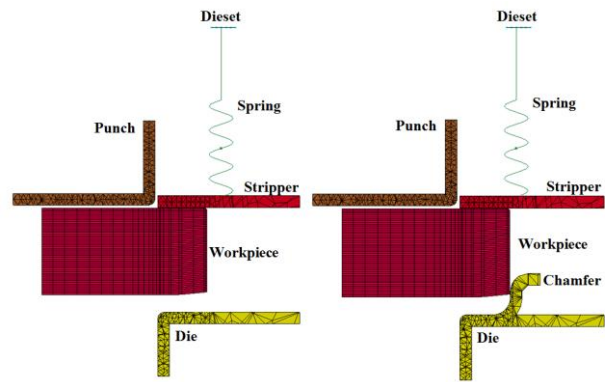
$$\sum_{i=1}^n (\Delta \bar{\epsilon}_e)_i = c_2' \quad (3)$$

여기서 n은 스텝 수, $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 요소의 유효 변형률 증분이다.

박판의 물성은 탄성계수 108.5GPa, 포아슨 비 0.316, 항복응력 943MPa이다. Fig. 7과 같이 박판은 57,232개의 3차원 8절점 강소성 요소로 모델링하였고 다이세트, 펀치, 스트리퍼, 다이는 강체 Shell요소로 모델링하였다. 챔퍼(chamfer)가 있는 다이는 상하 방향으로만 운동을 부여하였고, 챔퍼가 없는 다이는 모든 방향의 운동을 구속하였다. 또한, 특정 요소의 유효 변형률($c_2'=2.0$)이 파괴기준에 도달하면 이 요소의 강성 값에 reduction factor를 곱해 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 않도록 하는 요소제거법을 도입하였다.

스프링의 압축력에 의한 스트리퍼에 가해지는 누름압력을 조사하기 위해 스프링요소를 사용하였다. 금형에 스프링을 조립할 때 8.0mm의 초기 눌림이 작용하고, 1.0mm의 추가 눌림 후 전단되므로, 해석 모델의 스프링 offset량 초기치를 -9.0mm로 설정하였다. 공정 초기 조건의 약한 누름압력을 구현하기 위하여 스프링 상수는 $k=0.67N/mm$ 를, 최종 조건의 강한 누름압력을 구현하기 위하여 스프링 상수는 $k=2.5N/mm$ 를 적용하였다.

돌기 형상의 끝단으로부터 0.05mm위치한 단면에서 비틀림각을 Table 2에 나타내었다. 약한 누름 압력에서는 강한 누름압력에서 보다 더 많은 성형변형이 생겨 과도한 비틀림이 발생하는 것을 알 수 있다. ($\alpha=9.17^\circ$) 이는 강한 누름압력 조건에서는 다이



(a) Weak pressure (k=0.67N/mm) (b) Strong pressure (k=2.5N/mm)

Fig. 7 FE models for simulating shearing processes

Table 2 Comparison of twist angle after shearing process between simulation and experiment

	Simulation	Experiment
Weak pressure (k=0.67N/mm)	9.17°	9.2°
Strong pressure (k=2.5N/mm)	2.1°	2.3°

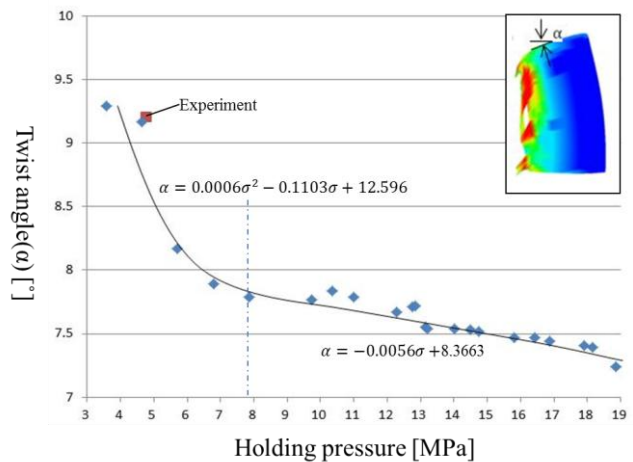


Fig. 8 Twist angles associated with various holding pressures

면에 챔퍼 형상을 적용해 박판이 뒤로 밀리는 것이 효과적으로 방지되어 상단 면에서 비틀림이 거의 발생하지($\alpha=2.1^\circ$) 않기 때문이다.

누름 압력과 편 상단 비틀림각의 관계를 알아보기 위하여, Fig. 7(a)를 해석모델로 하고 스프링 상수를 변화시키며 LS-DYNA를 이용하여 전단 성형 해석하였

다. Fig. 8은 돌기 형상의 끝단으로부터 0.05mm 위치 한 단면에서 누름 압력에 따른 비틀림각을 보여 준다. 약한 누름 압력에서는 비틀림각이 크지만, 큰 누름 압력에서는 비틀림각이 작아져 $\alpha=7.3^\circ$ 까지 비틀림각이 감소한다.

누름압력이 증가하면 비틀림각이 감소하므로 강한 누름압력은 전단 비틀림각을 감소시키는 절대적인 요인임을 알 수 있다. 비틀림각(α)과 누름압력(σ) 간의 관계는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\alpha = 0.0006\sigma^2 - 0.1103\sigma + 12.596 \quad (\sigma \leq 7.8) \quad (4)$$

$$\alpha = -0.0056\sigma + 8.3663 \quad (7.8 \leq \sigma \leq 18.9) \quad (5)$$

3.4 스프링 배치 최적화

스트리퍼가 박판에 가해주는 누름 압력과 박판 핀의 비틀림에 영향을 주는 주요 인자들, 즉 스프링의 위치와 강성을 설계변수로 결정하였다. 이 들을 구체적으로 기술하면 중앙부 4개 스프링의 배치 거리(X_1), 외곽부 4개 스프링의 가로 방향 배치거리(X_2), 중앙부 5개 스프링의 스프링 상수(X_3) 그리고 외곽부 6개 스프링의 스프링 상수(X_4)이다(Fig. 9 참조). 그리고 최적화의 목적함수는 비틀림각(α)의 최소화이다. 또한 구속조건은 OP10~OP30공정에서의 최소 누름압력 5.5MPa이다. 이들을 총합하여 정식화하면 식(6)과 같다.

Find $X_i, i=1,2,3,4$
 to minimize α
 subject to $(X_i)_{lower\ limit} \leq X_i \leq (X_i)_{upper\ limit} \quad (6)$
 $(\sigma_j)_{min} \leq \sigma_j, j=Entrance, OP10, OP20, OP30$

선정된 4개 변수에 대하여 각각 3개의 수준을 Table 3과 같이 선정하였다. 4인자, 3수준의 설계변수를 대상으로 $L_{18}(3^7)$ 직교배열표로부터 18개의 실험 점들을 생성하였고, 그 실험 결과를 Table 4에 수록하였다.

설계변수의 최적값을 구하기 위하여 실험계획법(DOE)에 따라 구한 누름압력들과 비틀림각으로 메타모델을 생성하였다. 그리고 Kriging알고리즘[7]으로 각 실험점들을 보간하여 근사함수를 생성하였다. 이로서 근사함수, 즉 메타모델로부터 실험하지 않은 조건들에서의 누름압력과 비틀림각을 구할 수 있고 설계변수의 최적값을 선정할 수 있었다. 메타모델

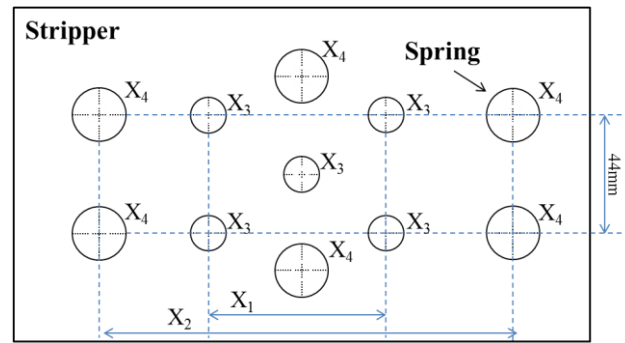


Fig. 9 Design variables of progressive die

Table 3 Design variables and levels

Design variable	X_1	X_2	X_3	X_4	
Level	1	48	188	280	250
	2	72	204	330	300
	3	96	220	380	350

Table 4 Orthogonal array and simulation results

Exp No.	Design Variable				Holding Pressure				Twist angle [°]
	X_1	X_2	X_3	X_4	Entrance [MPa]	OP10 [MPa]	OP20 [MPa]	OP30 [MPa]	
1	48	188	280	250	3.0	6.1	5.9	9.7	7.53
2	72	204	330	300	5.97	7.1	7.6	11.6	7.54
3	96	220	380	350	9.8	8.5	9.9	12.0	7.54
4	48	188	330	350	4.3	8.4	7.8	12.1	7.41
5	72	204	380	250	4.8	6.4	7.7	12.4	7.52
6	96	220	280	300	8.5	6.9	7.7	9.3	7.84
7	48	204	280	350	7.1	7.0	5.4	10.4	7.47
8	72	220	330	250	6.7	5.3	6.4	10.8	7.55
9	96	188	380	300	4.0	9.9	11.3	12.3	7.72
10	48	220	380	250	6.4	4.3	5.0	11.5	7.40
11	72	188	280	300	3.8	7.9	7.9	10.8	7.71
12	96	204	330	350	7.4	9.3	9.9	11.3	7.67
13	48	204	380	300	5.7	6.4	6.5	12.3	7.24
14	72	220	280	350	9.7	6.5	6.5	10.4	7.56
15	96	188	330	250	3.3	8.4	9.7	10.6	7.79
16	48	220	330	300	8.0	4.8	4.6	10.7	7.44
17	72	188	380	350	4.4	9.4	10.0	13.9	7.47
18	96	204	280	250	5.2	7.1	7.9	9.1	7.77

Table 5 Optimal values of design variables

Design variable	Initial value	Lower value	Upper value	Optimal value
X ₁ [mm]	96	48	96	48.03
X ₂ [mm]	204	188	220	204.07
X ₃ [N/mm]	280	280	380	379.41
X ₄ [N/mm]	250	250	350	300.31

형태는 각 공정의 R²값을 평가하여 선정하였다. 잔차 값은 진입부가 0.992, OP10이 0.901, OP20이 0.904, OP50이 0.991로 반응표면의 유효성을 검증할 수 있다.

Table 5는 메타모델을 기초로 상용 최적화 프로그램의 진화 알고리즘으로 최적화한 결과이다. 최적화 결과를 검증하기 위하여 최적 설계변수 조건으로 구조해석 및 성형해석을 수행한 결과, 비틀림각은 거의 완전히 일치하였고, 각 공정별 누름압력은 1% 이내의 오차를 보여 정확한 최적 설계 모델임을 알았다.

4. 요약 / 결론

본 연구에서는 프로그레시브 공정의 금형에 대한 구조해석과 박판 핀의 전단 공정에 대한 성형해석을 통하여 박판 핀의 비틀림을 규명하고, 박판 핀의 전단 비틀림이 최소화하도록 스트리퍼 스프링의 레이아웃을 최적설계하였다. 이러한 일련의 연구는 다음과 같이 요약된다.

(1) 전단공정을 전산모사 하여 실제 비틀림 형상을 구현하고 스프링의 레이아웃에 따른 누름압력과 비틀림각의 상관관계를 규명하였다.

(2) 전단 비틀림각을 최소화하기 위하여 스프링의 위치와 강성을 변수로 실험계획법을 실시하고 이들을 최적화하여 초기 비틀림각을 17.7°에서 12°로 감소시켰다.

(3) 비틀림각을 최소화할 수 있는 스프링 레이아웃의 최적설계를 제안하였다.

REFERENCES

- [1] D. C. Ko, C. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, 1996, Simulation of Sheet Metal Blanking Process for using Mesh Elimination, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 13, pp. 114~123.
- [2] J. H. Yoon, H. Huh, S. S. Kim, G. H. Na, H. J. Park, T. H. Choi, 2004, Multi-Stage Forming Analysis of a Milli-Component for Improvement of Forming Accuracy, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 5, pp. 430~434.
- [3] K. H. Choi, 2007, Study on The Strip Layout Design of LCD Shield Case Using 3D CAD/CAM, J. Kor. Acad.-Ind. Cooperation Soc., Vol. 8, No. 5, pp. 979~983.
- [4] R. Hambli, M. REXZKA, 2002, Fracture Criteria Identification using an Inverse Technique Method and Blanking Experiment, Int J. Mech. Sci., Vol. 44, No. 7, pp. 1349~1361.
- [5] M. G. Cockcroft, D. J. Latham 1968, Ductility and the Workability of Metals, J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.
- [6] PIDOTECH Inc., PIAAnO user's manual version3.3.
- [7] D. G. Krige, 1951, A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems of the Witwatersrand, J. Chem. Metall. Min. Soc. Af., Vol. 52, pp. 119~139.
- [8] K. J. Hong, D. H. Choi, M. S. Kim, 2000, Progressive Quadratic Approximation Method for Effective Constructing the Second-order Response Surface Models in the Large Scaled System Design, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 24, No. 12, pp. 3040~3052.