

유한요소법을 이용한 사각단면 금형스프링의 초기 설계변수 예측

이형욱[#]

Prediction of Initial Design Parameter of Rectangular Shaped Mold Spring Using Finite Element Method

H. W. Lee

(Received July 19, 2011 / Revised August 8, 2011 / Accepted August 10, 2011)

Abstract

This paper presents an inverse design methodology for the cross section geometry of mold spring with a rectangular cross section as the starting material for a coiling process. The cross-sections of mold springs are universally rectangular, as the parallel sides minimize the possibility of failure under high service loads. Pre-coiled wires are initially designed to have a trapezoidal cross section, which becomes a rectangle by the coiling process. This study demonstrates a numerical exercise to predict changes in the sectional geometry in spring manufacture and to obtain the initial cross section which becomes the exact rectangle desired from the manufacturing process. Finite element analysis was carried out to calculate the sectional changes for various mold springs. Geometrical parameters were the widths at inner and outer radii, the inner and the outer corner radii, and the height. A partial least square regression analysis was carried out to find the main contributing factors for deciding initial design values. The height and the width mainly affected various initial parameters. The initial width at the inner radius was mostly affected by various specification parameters.

Key Words : Rectangular Shaped Mould Spring, Finite Element Analysis, Partial Least Square Method, Anticlastic Curvature

1. 서 론

금형스프링은 금형의 체결 및 작동 구조에 사용되는 스프링으로 프레스 장비에 필수적으로 사용되는 스프링이다. 일반적인 금형스프링의 규격으로는 외경, 내경, 자유장, 직각도, 밀착고와 하중이며, 밀착될 때까지 사용되는 작동시의 특성으로 인하여 단면의 상부면과 상부 권(Turn)에 있는 하부면이 평행을 이루도록 직각도를 유지하여야 한다[1].

금형스프링은 대부분의 다른 스프링과는 달리 직사각형의 단면을 중요시하는데 이는 스프링의 압축 시 둥근 모서리보다는 직사각형의 단면을 사용하는 것이 공간을 극대화하여 사용할 수 있기 때문이다. 또한 직사각형의 단면은 높은 강도의 응력을 감당할 수 있도록 하며, 사용 시 견고한 압축으로 인한 강한 잔류응력으로부터 높은 응력의 부담을 덜어주고 훨씬 더 긴 수명을 부여할 수 있기 때문이다[2].

금형스프링의 성형은 Fig. 2 와 같이 동일한 단

[#] 교신저자: 충주대학교 에너지시스템공학과,
E-mail: hwlee@cjnu.ac.kr

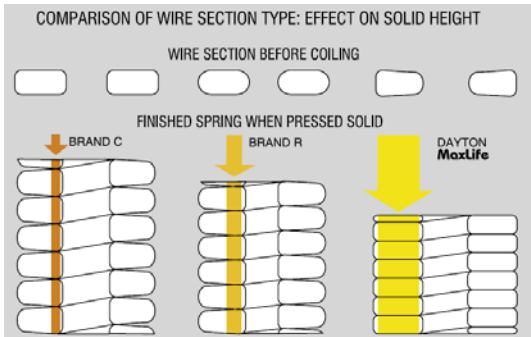


Fig. 1 Shape characteristics of mould springs[2]

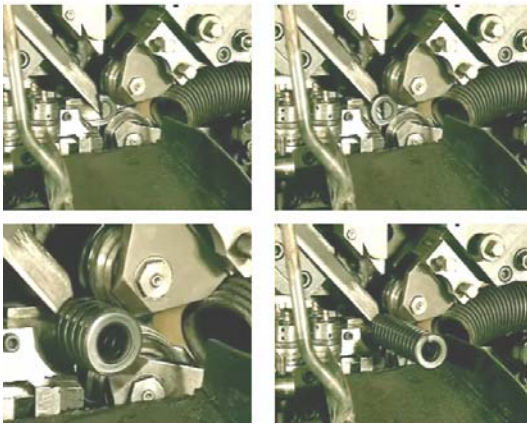


Fig. 2 Photos of coiling process

면을 가진 소재를 코일링 장비에 통과시켜 상하의 롤러와 심금을 통과하여 굽힘 성형과정을 거치게 된다. 소재의 단면이 원형일 경우는 코일링 후에도 원형을 유지하지만, 사각형 단면의 경우, 내측에서는 단면이 늘어나고, 외측에서는 단면이 줄어드는 굽힘을 받게 되어 단면이 변형을 하게 된다. 따라서 초기의 단면형상과 성형 후의 단면형상이 달라진다. 초기 소재의 단면형상을 잘못 설계할 경우, 소재 비용 및 금형 비용을 낭비하게 되어 경제적, 시간적 손실이 크다.

초기 형상의 예측은 이론적으로 연구된 바가 없으며 시행착오법으로 개발을 해왔다. 초기 형상의 설계는 간단한 실험식으로는 단면의 변화를 예측하기 힘들기 때문에 유한요소법과 같은 해석적 기법을 이용하는 것이 정확성 및 신속성에서 유용하다 할 수 있다. 그러나 해석적 기법을 동원하더라도 역해석(Inverse analysis)의 접근이 아닐 경우 역시 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 몇 가지의 형상을 기준으로 형상설계의 기준을

제시하고, 성형 전후의 형상설계인자의 관계를 분석하는 연구가 필요하다. 마이크로 스프링의 경우 유한요소해석을 이용한 역설계 연구[3]가 있었으나, 코일형 금형스프링 성형에 대한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 금형 스프링의 성형 전 초기 형상을 설계하기 위한 형상 설계변수를 분석하여 성형 전후의 설계변수 간 관계를 찾고, 설계 시 기준을 제시하는 것을 목표로 한다.

이를 위하여 다양한 외경 및 내경을 가지는 금형스프링 제품의 초기 단면설계를 유한요소법을 통하여 수행하고, 사각단면 금형스프링의 초기 소재의 형상설계 시 필요한 주요 변수의 영향을 분석하여 설계 시 요구사항을 파악하도록 하였다. 유한요소해석기법의 정확성 및 효율성을 검토하기 위하여, 기존에 초기 형상을 알고 있는 금형스프링 모델을 기준으로 유한요소해석을 수행하여 최종단면을 실험치와 비교하였다. 검증된 해석기법을 토대로 대상 제품의 성형 전 단면 설계 시 초기 결정치는 탄성이론을 바탕으로 단면의 기울기로 설정하고, 소성변형에서의 체적불변 성질을 이용하여 1차 형상을 결정하였다. 이후 내경부 및 외경부의 라운드의 반경을 시행착오법으로 결정하였다. 최종적으로 다양한 해석에서 나타난 초기 단면설계 변수의 변화를 토대로 회귀분석을 통하여 설계변수간 영향도를 추정하여 초기 예측치를 보다 빠르게 선정할 수 있도록 하였다.

2. 해석기법 정립

2.1 사각단면 굽힘의 이론적 검토

금형스프링의 성형에서 문제가 되는 단면의 측면 기울기의 변화량은 탄성 순수 굽힘이론에서 볼 때, 앤티클라스틱 곡률(Anticlastic curvature)의 변화량을 의미한다. Fig. 3에서와 같은 형상에서 곡률반경 ρ 는 중립면까지의 거리로 금형스프링의 반경에 상당할 수 있으며, 앤티클라스틱 곡률반경 ρ' 은 단면에서의 중립면까지의 거리로 금형스프링의 단면의 직각도의 기울기를 결정하는 변수가 된다. 직각도의 기울기(A)는 최종단면의 폭 W_f 와 높이 H_f 로 나타낼 수 있으므로, 금형스프링의 외경치수 Do 와 푸와송비 ν 와의 관계는 다음과 같다.

$$A = \frac{\nu W_f}{(Do - H_f)/2} \quad (1)$$

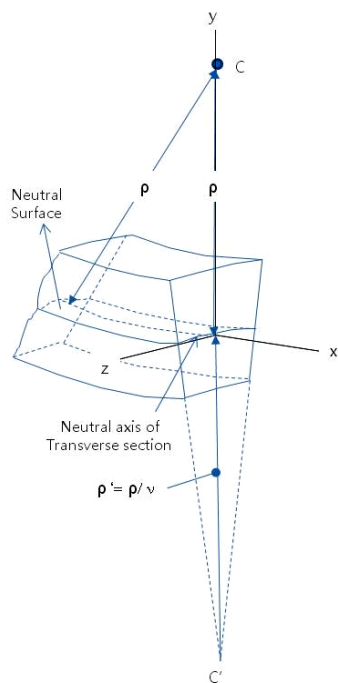


Fig. 3 Schematic diagram of the anticlastic curvature in a bending[4]

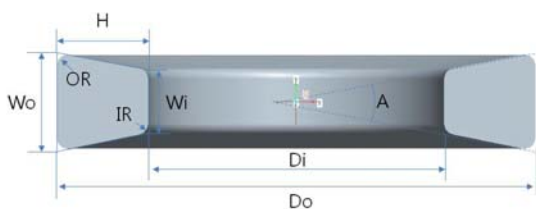


Fig. 4 Schematic diagram of geometrical design variables of mould spring

엔티클라스트 곡률반경과 중립면과의 곡률반경의 관계를 고려하면, 단면의 측면 기울기는 초기형상의 기울기에 비례하여 동일한 비율로 커지는 것을 알 수 있다. 초기의 기울기를 결정하면, 최종 기울기를 예측할 수 있다. 이러한 사실은 탄성에서 우선 적용 가능한 부분이지만, 본 금형스프링의 설계에 일차적으로 적용할 수 있는 초기 예측식으로 사용할 수 있다. 물론 상기의 식 (1)에서의 가정은 재료는 탄성변형을 따르고 있으며, 굽힘 시 중립면이 중심에 위치하고 있다는 가정이 포함되어 있어 실제의 예측과는 오차가 많이 발생할 수 있다. Fig. 4에 금형스프링의 단면 및 내외경에 대한 변수를 정리하여 도시하였다.

2.2 유한요소해석 기법 정립

금형스프링의 소재는 높은 인장강도를 요구하므로 크롬 실리콘 합금인 SWOSC-V(Spring Wire Oil Silicon Chromium-Valve)이다. 소성구간에서의 유동응력을 구하기 위하여 소재의 인장시험을 수행하였다. 재료의 시험은 직경 3.47mm, 4.97mm 소재를 사용하였고, 시험편의 길이는 120mm, 상하의 그립부는 각각 40mm로 하여 시험부의 길이를 40mm로 설정하였다. 시험 시 인장속도는 0.005mm/sec, 신율계의 변형률 측정 게이지 길이는 25mm를 사용하였다. 시험결과에 대한 진 응력-진 변형률 곡선은 Fig. 5와 같다. 여기서, D3.47은 직경 3.47mm, D4.97은 직경 4.97mm 시험편을 각각 의미한다. 시험결과로부터 탄성계수 212GPa, 항복응력 1.785GPa, 최대 인장강도 2.05GPa임을 알 수 있다[5].

기존의 모델의 검증을 통하여 유한요소해석 가능성을 확인하고 해석기법을 정립하였다. 유한요소 해석은 3차원 외연적 비선형 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 코일링 과정을 모사한 후, 최종 단면의 형상을 실험치와 비교하였다. 유한요소 모델링을 Fig. 6에 도시하였다. 가이드 롤러를 상하부에 설치하고, 내경부에 심금을 설치하여 코일링 장비를 최대한 모사하였으며, 소재가 정렬을 유지하도록 피더(Feeder)를 소재 상하부에 설치하였다. 소재의 투입을 위해서 소재의 끝단을 변위경계조건으로 가이드 방향으로 밀어주었다. 코일링 부위에서 가이드 롤러를 따라서 성형이 될 수 있도록 초기에 가이드 롤러 사이에 부수적인 소재를 모델링 하였다. 최종 측정부위는 외부에 있던 소재가 상부 가이드를 통과한 후 탄성복원이 일어난 후의 위치를 선택하여 연속공정을 가정할 수 있도록 하였다.

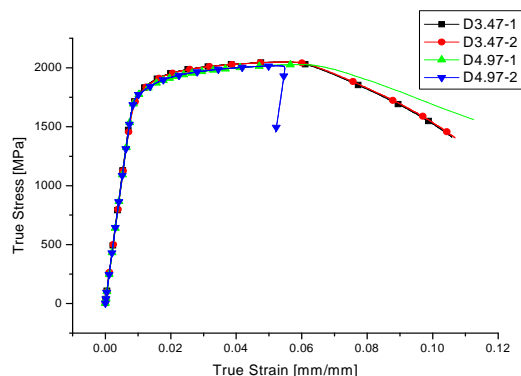


Fig. 5 True stress-strain curve for SWOSC-V



Fig. 6 Finite element model for coiling analysis



Fig. 7 Effective plastic strain distribution of the R39 coiling result

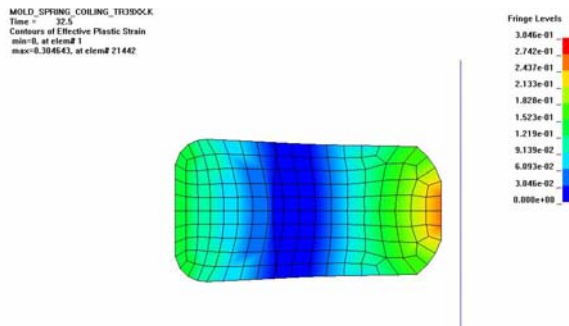


Fig. 8 Effective plastic strain distribution of the R39 Model in cross section

초기와 최종형상을 알고 있는 외경 39인 모델에 대한 유한요소 해석결과를 유효소성변형률 분포로 하여 Fig. 7에 도시하였고, 단면에서의 유효소성변형률 분포를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에서 우측이 코일스프링의 중심부이다. 이 단면을 초기 설계치와 실험결과와 비교하여 Fig. 9에 도시하였다. 실험결과와 유한요소해석결과와 성형 후 단면형상은 거의 동일하며, 이를 통하여 해석의 기법과 해석가능성을 확인 및 검증할 수 있다.

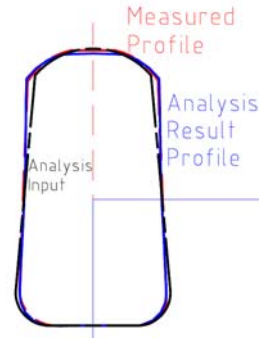


Fig. 9 Comparison of the cross sectional dimension between simulation result and experimental one(Continuous & Blue: analysis result, Hidden & Red: experimental result, Center & Black: input profile)

3. 성형 전 초기단면 설계

3.1 설계 대상 모델

설계대상 모델은 외경기준으로 35, 39, 40, 50mm 인 모델로 최종 기울기 0도를 목표로 식(1)을 초기 설계치로 하여 시행오차법으로 수행하였다. 외경 40mm인 모델을 기준으로 회전각의 중심을 상부면, 하부면, 중심면으로 나누어 해석하고, 최종적으로 중심면을 기준으로 변수를 설정하였다. 타 모델의 경우, 단면의 중심부를 기준으로 회전각도를 잡고 유한요소 해석을 수행하여 정상상태에서의 각 변수의 측정치를 CAD 파일로 옮겨 값을 추정하였다.

유한요소 해석을 통하여 얻은 데이터를 Table 1에 도시하였다. 주요 출력인자인 각도의 변화는 약 5도에서 7도 사이임을 알 수 있고, 외경부 및 내경부의 치수의 변화에 따라서 각 인자의 변화가 수반된다. 식 (1)을 이용한 초기 각도의 예측치는 외경 30모델은 3.9도, 35모델은 3.6도, 40모델은 4.9도, 50모델은 4.5도로 실제 수행한 결과와 약 2배의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있어 탄성이론에 근거한 설계 예측식으로는 보다 정확한 결과를 낼 수 없음을 알 수 있다. 따라서 본 해석결과를 이용하여 초기 예측식을 만들어 내는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

제품의 목표치에 나타나는 변수는 단면각을 거의 0도를 목표로 할 때, 최종 폭, 최종 높이, 외경 치수가 되며, 이를 위한 초기 예측변수는 내측부의 폭, 외측부의 폭, 높이가 된다. 비록 단면각을

0도를 목표로 하지만 기본적으로 최종 내측폭과 최종 외측폭을 최종 변수로 두는 것이 설계 시 여유를 두기에 더 좋은 면이 있어 본 연구에서는 이 변수를 각각 두었다.

3.2 회귀분석

최종 변수와 초기변수와의 관계를 회귀식의 계수항의 정규화 크기로부터 도식하여 Fig. 10에 도시하였다. 최종 형상변수가 초기 입력변수에 미치는 영향을 보면, 최종 외경값은 초기 내측폭과 높이 값에 영향을 주며, 최종 내측폭 및 외측폭은 거의 동일한 값을 가지기는 하지만 각각 초기 내측폭과 외측폭에 영향을 주는 것으로 나타났다. 최종 높이 값은 초기 내측폭과 초기 높이에 영향을 주는 것으로 나타났다. 소재의 외측부는 가이드 금형을 통과하게 되므로 초기치와 변형 후의 값이 거의 동일하도록 설계되어 영향변수가 작고, 내측부의 폭에 의하여 높이 및 최종 내측부의 폭이 결정되게 되므로 초기 내측부의 폭에 영향을 주는 변수가 가장 많게 되는 것을 알 수 있다.

Table 1 Change of each variable for 4 models

Outer Diameter	Change of variables			
	Inner Width	Outer Width	Height	Angle
Do_f	dWi	dWo	dH	dA
39	0.35	-0.25	-0.04	-5.77
40	0.51	-0.36	-0.08	-7.66
40	0.50	-0.35	-0.08	-7.43
40	0.47	-0.33	-0.08	-7.07
40	0.48	-0.34	-0.08	-7.30
40	0.48	-0.35	-0.08	-7.32
40	0.48	-0.35	-0.08	-7.37
40	0.47	-0.35	-0.07	-7.26
30	0.48	-0.25	-0.14	-6.29
30	0.47	-0.25	-0.15	-6.39
35	0.45	-0.28	-0.14	-5.73
35	0.47	-0.26	-0.14	-5.78
50	0.64	-0.44	-0.13	-7.40
50	0.65	-0.42	-0.12	-7.27

MiniTab을 이용하여 최종변수와 입력변수 간의 행렬도를 작성하여 Fig. 11에 도시하였다. 주요 변수들 간에 선형관계가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 회귀식의 계수값을 표준화하여 Table 2에 요약하였다. 여기서 최종 변수인 외경, 내경부 폭, 외경부 폭, 높이가 입력변수가 되고 이에 따라 초기 내경부 폭, 외경부 폭, 초기 높이가 회귀식으로 결정된다. 각 입력변수의 계수 값의 크기가 회귀식에 기여하는 정도가 되며, 각 변수에서 폭과 높이는 직접적인 대응이 되고, 최종 외경 치수는 높이변수에 가장 크게 영향을 주고 있다.

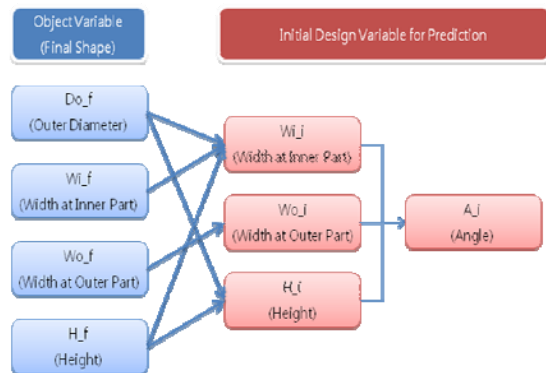


Fig.10 Co-relation diagram of design variables

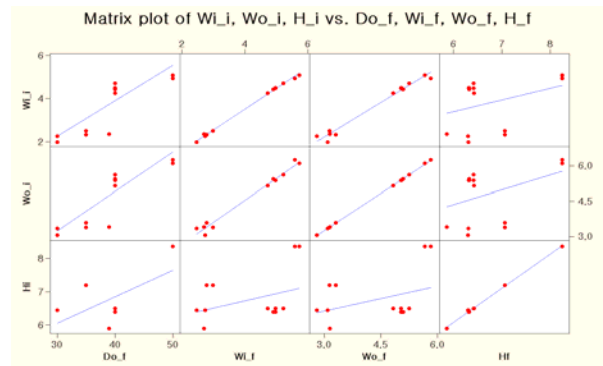


Fig.11 Matrix plot between initial and final variables

Table 2 Aliased regression coefficient by partial least square method

	Do_f	Wi_f	Wo_f	H_f
Wi_i	0.0364	1.0071	-0.0159	-0.0605
Wo_i	0.0032	0.0139	0.9778	0.0143
Hi	-0.0623	0.0174	-0.0052	1.0353

Table 3 Error of design variables comparison with experimental and predicted ones of proposed and elastic theory of Eq. (1)

Model	Dia-meter (mm)	Error (%)				
		Wi	Wo	H	Angle	Angle Eq.(1)
T46	46	-1.4	-0.2	0.9	2.4	67.8
T39	39	-0.5	-0.1	0.0	0.9	71.1
T32	32	-2.5	1.2	0.9	10.4	63.2
T26	26	-4.7	0.3	1.8	12.2	63.0
T21	21	-8.2	-2.8	4.2	3.6	71.8

Table 2에 있는 회귀식은 데이터의 세트가 14개 이기는 하지만, 실제로 그룹화를 하였을 때, 5개이기 때문에 변수의 숫자 대비 데이터의 관측치가 작기 때문에 부분최소제곱(Partial Least Square) 방법을 이용하였다. 최대 성분개수를 조절하여 최적치가 나올 때를 기준으로 회귀식을 작성하였다. Table 2에서 첨자 i는 초기 설계변수임을 의미하고, 첨자 f는 최종 형상에서의 변수임을 의미한다.

만들어진 회귀식의 정확성을 검토하기 위하여 기존에 생산하였던 제품을 대입하여 초기 형상변수에 대한 오차를 분석하였다. 주어진 외경을 기준으로 한 모델에 대하여 최종 형상에 대한 값을 입력하고, 예측된 입력치와 실험에서 나타난 초기 형상의 치수 값을 비교하여 오차값으로 Table 3에 도시하였다. 각도는 높이와 폭을 기준으로 환산하여 오차를 계산하였고, 최종 열에 있는 값은 탄성 예측식인 Eq. (1)을 이용하여 계산된 값과 실험값의 오차를 나타낸다.

결과를 보면 본 모델에서 회귀에 사용된 외경 값의 범위가 30~50mm이므로 T32에서 T46까지의 모델에 대해서는 폭 변수와 높이 변수가 2.5% 이내에서 잘 맞고 있음을 알 수 있으며, 경계를 벗어난 모델인 T21과 T26의 경우 외삽을 하더라도 10% 이내에서 예측이 가능함을 알 수 있다. 단면각의 경우 높이와 폭의 비율로 결정되기 때문에 오차가 최대 10% 내외로 나는 것을 알 수 있다. 그러나 Table 3의 'Error of Angle Eq. (1)'의 결과인 일반적인 탄성이론을 통하여 예측한 값이 60% 이상의 오차를 보이는 것을 볼 때, 본 실험식이 초기 예측에서 보다 유용함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사각단면을 가지는 금형스프링의 초기 단면에 대한 설계변수를 예측하기 위해서 유한요소법을 이용하여 데이터 세트를 구성하고, 회귀분석을 통하여 주요 설계변수에 대한 실험식을 도출하였다.

유한요소법의 방법론을 검증하기 위하여 이미 알고 있는 형상에 대하여 초기형상을 입력하고 최종 단면형상의 외곽선을 비교하였다. 검증된 방법론을 통하여 다양한 형태의 사각단면 스프링에 대한 데이터를 확보하였다. 대상 변수의 수에 비하여 데이터 세트가 부족한 점을 고려하여 부분최소제곱 방법을 통하여 회귀식을 만들고, 주요 인자에 대한 회귀식을 구하였다.

만들어진 회귀식은 기존에 알고 있던 데이터를 통하여 형상변수를 잘 묘사함을 보였다. 이를 통하여 일반적인 탄성 변형에 입각한 예측치보다 정확하며 일차적으로 사용할 수 있는 예측식을 구현하였다. 회귀식의 계수를 고려하면 초기 내측폭이 가장 많은 변수의 영향을 받기 때문에 초기 내측폭의 결정이 가장 중요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 대원강업 기술연구소의 연구비 지원을 받았습니니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Lee, H. R. Choi, 2011, Shape design of initial section for non-circular shaped mold spring, J. Institute of Convergence Technology in Chungju National University, Vol. 1, pp. 24~28.
- [2] DAYTON MasLife die springs, <http://www.clarkandosborne.com>
- [3] J. J. Kang, S. K. Hong, B. H. Jeon C. R. Pyo, 2008, Finite Element Analysis on the Springback in the Forging-Bending of Metal Micro-Wire, Trans. Mater. Process, Vol.17, pp. 649~656.
- [4] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., 1985, Mechanics of Materials, McGraw-Hill, p. 161.
- [5] H. R. Choi, 2010, MS. Thesis, Chungju National University, Chungju.