

금속 마이크로 와이어의 단조-굽힘 성형에서 스프링백에 관한 해석적 연구

강정진[#] · 홍석관¹ · 전병희² · 표창률²

Finite Element Analysis on the Springback in the Forging-Bending of Metal Micro-Wire

J. J. Kang, S. K. Hong, B. H. Jeon, C. R. Pyo

(Received November 3, 2008)

Abstract

Springback is one of factors affecting precision in metal forming. Its effect is particularly prominent in bending process. In this study, bending and forging process are used in order to manufacture a micro spring with two bending region from 60 μ m diameter wire. Springback in the process lowers the precision of the micro spring. Overbending for springback compensation has wide usage in a general way. However, this method requires repeated modifications of press dies until the tolerance is allowable, which causes that production cost and time increase. In this paper, we analyzed the mechanism of springback in the forming process of the micro spring using finite element method. In addition, a simple method to control springback without modifying dies was proposed by performing numerical analysis with various parameters.

Key Words : Micro Spring, Micro Wire, Springback, Metal Forming, Finite Element Analysis

1. 서론

정보기술(IT), 나노기술(NT), 바이오기술(BT) 분야에서 각종 소자의 초소형화와 함께 고집적화에 대한 필요성이 점차 커지면서, 관련 분야에서 기계 부품의 하나로서 마이크로 스프링에 대한 수요가 증가하고 있다. 마이크로 스프링은 용도에 따라 그 형태가 다양하며, 여러가지 가공방식으로 제작되고 있다[1~4].

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 금속 소재의 마이크로 스프링을 제작하는 데 있어 프레스 금형기반의 소성가공을 이용한다. 일반적으로 프레스가공기술은 생산성이 가장 좋은 공정

중의 하나이지만, 금속 소재를 성형하는 경우 스프링백(또는 탄성회복)이라는 근본적인 문제를 갖고 있다[5]. 금속 프레스가공에서 스프링백이란 재료가 금형에 의해 강제적으로 변형을 겪은 후 재료가 금형으로부터 추출되면서 새로운 정적 평형 상태를 만족하기 위해 변형하는 현상을 말한다. 이와 같은 스프링백은 특히, 박판 프레스 성형에서 치수불량의 주요인이 되고 있으며, 이를 해결하려는 연구가 많이 진행되어 왔다[6~9]. 스프링백은 유독 판재의 프레스 가공에서뿐만 아니라 관재 또는 봉재의 벤딩 가공에서도 발생하는데, 본 연구에서는 직경이 마이크로 크기인 와이어를 원하는 형태로 가공하기 위해서 벤딩과 단조 공정

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2. 인덕대학 기계설계전공

교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀.

E-mail: doublej@kitech.re.kr

을 이용한다. 이때 발생하는 스프링백은 마이크로 크기 제품의 정밀도를 저하시킨다.

일반적으로 스프링백을 보정하기 위해 과도굽힘법이 널리 사용된다[10~12]. 이와 같은 방법은 제품의 요구 치수를 만족할 때까지 금형의 반복적인 수정작업이 필요하며, 이로 인해 금형의 제작 비용과 개발기간이 증가하는 단점이 있다[13~15].

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 마이크로 와이어의 성형 시 발생하는 스프링백의 메커니즘을 분석하고 스프링백에 영향을 미치는 인자들을 고찰한다. 아울러 반복적인 금형의 수정작업 없이 스프링백을 제어할 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

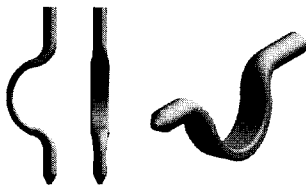


Fig. 1 Micro spring manufactured by press forming

2. 초기 프레스금형에 대한 스프링백 분석

2.1 초기 프레스금형 설계

초기에 마이크로 스프링을 성형할 때 순수하게 발생하는 스프링백량을 알아보기 위해 스프링백 보정이 없는 금형을 제작하였다. 금형은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 펀치, 다이, 홀더를 포함하는 일반적인 프레스 금형의 형태를 갖는다. 성형공정을 살펴보면, 원소재인 60 μm 직경의 와이어가 이송되어 다이 상에 위치하면, 홀더로 고정시키면서 펀치로 원소재의 두께가 30 μm 이 될 때까지 성형하게 된다. 이때 성형된 마이크로 스프링은 2개의 굽힘부를 갖게 되는데, Fig. 2에서와 같이 굽힘부 1(bending-1)과 굽힘부 2(bending-2)에서 굽힘과 단조 가공이 동시에 적용된다.

본 성형에서 단조공정의 펀치행정이 30 μm 으로 극히 적기 때문에 스톱퍼(stopper)를 이용하였다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 펀치의 최하단부에 돌기를 형성시켜 스톱퍼 역할을 하도록 하였다. 또한, 홀더의 하단부에서도 스톱퍼를 사용하여 마이크로 와이어를 홀딩시킬 때 원소재가 홀딩력에 의해 변형되는 것을 방지하도록 하였다.

Fig. 3에 테스트용으로 제작된 초기 프레스금형을 볼 수 있다.

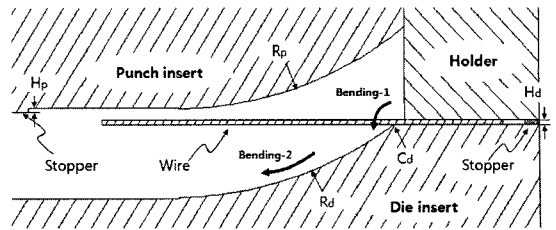


Fig. 2 Schematics of press die for micro spring

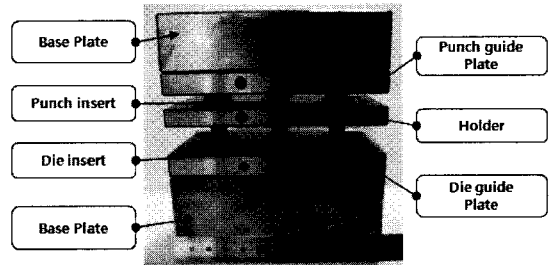


Fig. 3 Press die set

2.2 성형조건 및 스프링백 측정

프레스 성형공정에 사용되는 원소재인 마이크로 와이어는 팔라듐(Palladium)계열의 합금으로 Table 1과 같은 물성을 갖는다. 이를 바탕으로 해석 시 재료물성을 입력하였으며, 재료 비선형을 고려하기 위해서 등방성 가공경화 법칙(bilinear isotropic hardening)을 적용하였다.

Table 1 Material properties of micro wire

Properties	Value	Unit
Modulus of Elasticity	117	GPa
Yield tensile strength	618	MPa
Ultimate tensile strength	823	MPa

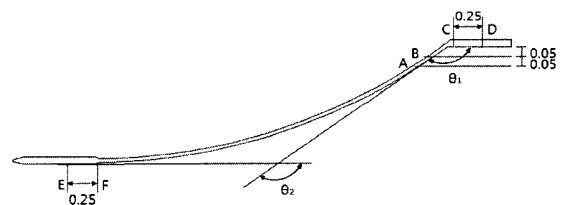


Fig. 4 Springback measurement criterion

성형 후 마이크로 스프링의 스프링백량은 비접촉 광학 측정기로부터 2차원 외곽선을 추출한 다음 CAD 프로그램에서 측정하였다. 스프링백의 측정 위치를 Fig. 4에 나타내었다. 스프링백량은 굽

힘부 1의 각도인 θ_1 과 굽힘부 2의 각도인 θ_2 를 기준으로 측정하였다. 마이크로 와이어의 성형 후 스프링백 측정결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 스프링백 후 θ_1 은 스프링백 전 대비 최대 4.1°, 최소 2.5°의 편차를 보였으며, θ_2 는 스프링백 전 대비 최대 2.0°, 최소 1.2°의 편차를 보였다. 또한, 오프셋(offset) 거리는 스프링백 전 대비 약 0.1mm 편차를 보여 1mm기준으로 약 10% 벗어났음을 Fig. 5(b)에서 볼 수 있다.

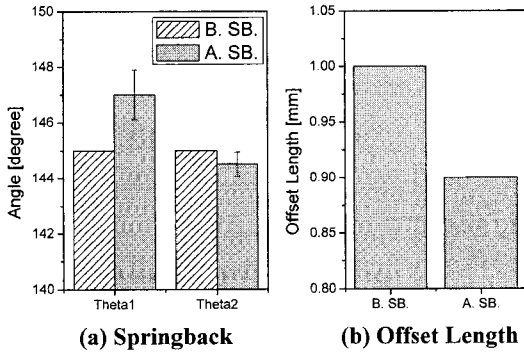


Fig. 5 Measurement results of experiment(B. SB. : Before springback, A. SB. : After springback)

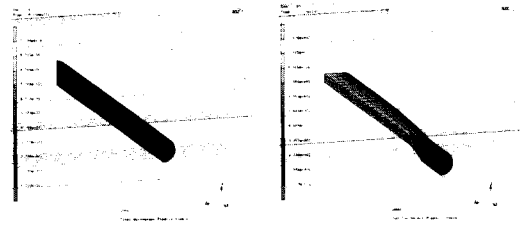
3. 스프링백 인자의 해석적 분석

3.1 초기금형에 대한 유한요소해석

스프링백 인자들의 영향을 살펴보기 앞서 초기 금형에 대한 수치해석을 수행하여 해석모델의 타당성을 검토하였다. 따라서 해석모델의 치수는 Table 2에 나타난 바와 같이 초기금형의 설계 치수와 동일하게 적용하였다. 해석모델은 계산시간의 효율성을 고려하여 1/2 대칭 모델을 사용하였으며, 모든 요소는 육면체로 구성하였다. 과도한 변형에 의한 요소 뒤틀림은 없기 때문에 요소망 재구성(remeshing)은 고려하지 않았다. 성형 및 스프링백 해석에는 상용소프트웨어인 MSC.Marc를 사용하였다.

마이크로 와이어의 성형 해석 시 적정한 마찰 상수를 결정하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 마이크로 와이어에 대한 단조 시뮬레이션을 수행하였다. 본 해석에는 마찰 모델로서 일반적으로 많이 사용되는 일정 전단 마찰(constant shear friction) 모델을 적용하였다. 각 마찰 모델에 기초한 단조 시뮬레이션에 의해서 예측된 변위-하중 곡선을 Fig. 7에서 실험 결과와 함께 보여주고 있다. 실제 실험

Parameters	Value	Comment
R_p [mm]	4.985	Radius of curvature(punch)
R_d [mm]	5.015	Radius of curvature(die)
C_d [mm]	0.03	Corner radius(die)
H_d [mm]	0.06	Height of stopper(die)
H_p [mm]	0.06	Height of stopper(punch)



(a) Initial shape (b) Deformed shape
Fig. 6 Forging process simulation of micro-wire

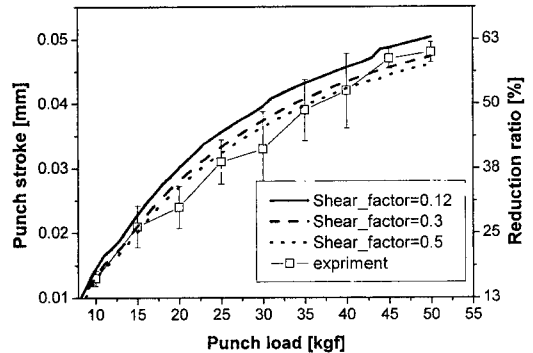
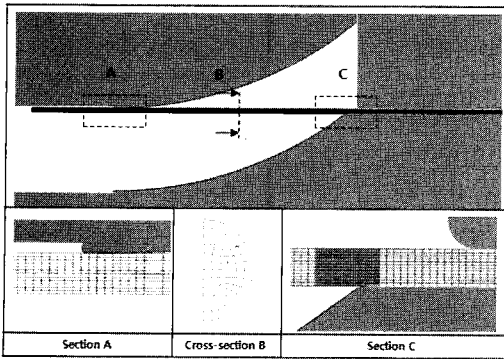


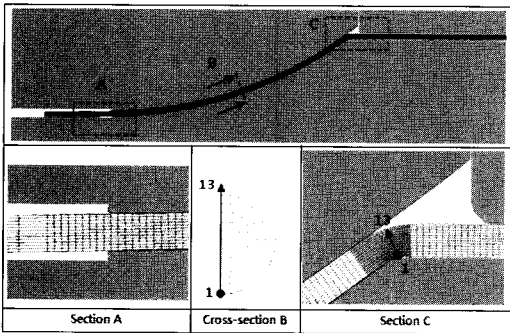
Fig. 7 Stroke-load curves for constant shear friction

힘은 유효를 하지 않은 상태에서 수행되었으며, 성형 하중을 5kgf 단위로 증가시키면서 각 하중에서의 펀치 스트로크를 측정하였다. 성형 하중에 대한 펀치 스트로크 예측값이 마찰 인자의 변화에 따라 큰 편차를 보이는 것으로 예측되었다. 마찰 인자(friction factor, m)가 0.3~0.5 일 때 실험과 유사한 결과를 보이는 것으로 예측되었으며, 이를 근거로 초기해석 시 마찰인자를 0.3으로 적용하였다.

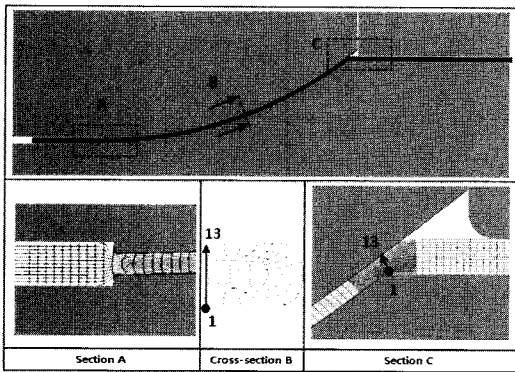
앞서 정의된 금형의 형상 및 마찰인자를 바탕으로 마이크로 와이어의 성형 해석 및 스프링백 해석을 수행하였다. Fig. 8에 성형의 각 단계별 해석 결과를 나타내었다. Fig. 8(a)에 지름 60 μ m의 마이크로 와이어가 성형 전에 정 위치된 상태를 볼 수 있으며, 단면-B에서 두께 방향으로 12개의 요



(a) Initial stage



(b) End of bending stage



(c) End of forging stage

Fig. 8 Finite element model

소가 분할된 것을 확인 할 수 있다. 또한, 굽힘부에 대응되는 요소 수는 굽힘부 1(section C)에 해당되는 다이반경 0.03mm에 10개의 요소가, 굽힘부 2(section A-C)에 해당되는 곡률반경 5mm에 100개의 요소가 걸치도록 모델링하였다.

Fig. 8(b)는 편치가 하강하기 시작하여 마이크로 와이어가 굽힘성형을 완료하였을 때 변형된 형상을 나타내고 있다. 본 단계는 순수 굽힘 상태이기

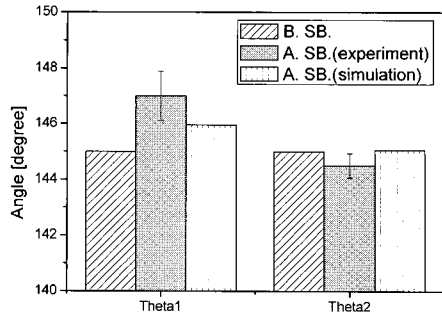
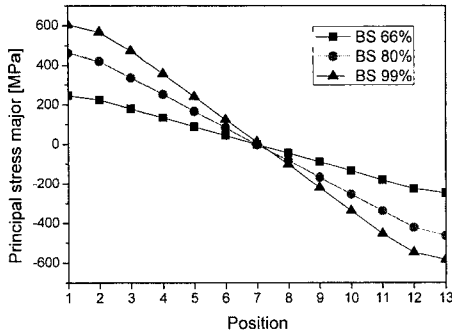


Fig. 9 Comparison between springback results

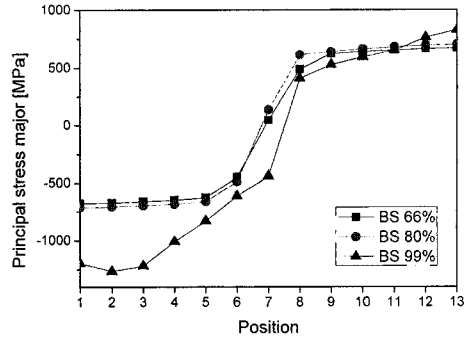
때문에 와이어의 직경변화는 거의 없다. 이어서 편치가 계속 하강하면서 단조성형이 시작되고 편치의 스톱퍼에 의해 편치가 정지하게 되면 마이크로 스프링의 두께가 30 μ m이 된다. Fig. 8(c)에 성형공정이 완료된 상태에서 마이크로 와이어의 변형 형상을 볼 수 있는데 굽힘부 1, 2 모두 두께가 감소된 것을 알 수 있다.

성형 후 스프링백 해석을 수행하여 Fig. 9에 예측된 스프링백량을 도시하였다. 해석으로부터 예측된 굽힘부 1의 θ_1 은 약 1°의 스프링백이 발생한 반면, 굽힘부 2의 θ_2 는 스프링백 전과 후의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 이와 같이 해석으로부터 예측된 각 굽힘부간의 상대적인 스프링백 발생 경향은 실험결과와 유사하게 예측되었지만, 스프링백량의 크기는 다소 차이를 보였다. 이와 같은 이유는 해석에서 사용한 재료거동모델이 인장실험을 바탕으로 모델링되어서 실제 단조공정에서 발생하는 압축응력과 차이와 금형의 가공 오차와 윤활 및 금형 표면 거칠기 상태에 따른 마찰력 등의 차이로 인해 해석결과와 차이를 보이는 것으로 판단된다. 여기서 주목할 점은 굽힘부 2에서는 거의 스프링백이 발생하지 않는 것이다. 이와 같은 원인을 살펴보면 다음과 같다. 굽힘부 2의 굽힘성형 단계에서는 Fig. 10(a)에서와 같이 주응력이 0인 지점(중립면)을 기준으로 절곡부 바깥쪽으로는 인장응력(+), 안쪽으로는 압축응력(-)이 발생하여 재료 내부에 굽힘모멘트가 작용하다가 Fig. 10(b)와 같이 단조 단계를 거치면서 내부의 잔류응력이 모두 압축응력을 받게 된다. 또한, 스프링백 직전의 응력상태가 두께 방향으로 균일하게 형성한 것을 볼 수 있는데, 이로부터 굽힘모멘트가 적게 발생하였고 결과적으로 스프링백도 거의 발생하지 않았다.

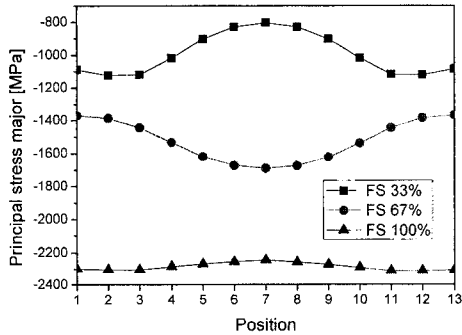
굽힘부 1에서는 굽힘부 2와 반대방향으로 절곡



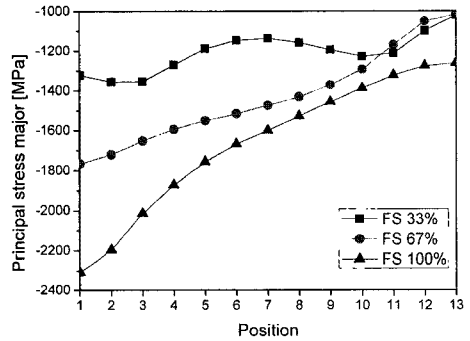
(a) During bending stage (BS : Bending stroke)



(a) During bending stage (BS : Bending stroke)



(b) During forging stage (FS : Forging stroke)



(b) During forging stage (FS : Forging stroke)

Fig.10 Principal stress at bending-1 : Measurement path 1 ~ 13 on cross-section B in the Fig. 9

Fig.11 Principal stress at bending-2 : Measurement path 1~13 on section C in the Fig. 9

함으로 Fig. 11(a)에 보이는 바와 같이 굽힘응력도 반대방향으로 발생한다. 단조 단계에서는 펀치가 아래방향으로 진행하면서 소재의 양 끝단의 응력차가 심해지는 것을 Fig. 11(b)에서 볼 수 있다. 이와 같은 두께방향의 잔류응력 차가 스프링백을 발생시키는 것으로 판단된다.

3.2 스프링백 인자 분석

스프링백에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위해 요인 분석을 수행하였다. Table 3에 고정인자와 제어인자를 명시하였다. 이때 다이반경에 대한 인자분석 시에는 마찰인자를 0.3으로, 마찰인자에 대한 인자분석 시에는 다이반경을 0.03mm로 고정하여 서로 독립적인 영향도를 분석하였다.

먼저, 마찰인자에 대한 해석 결과를 살펴보면, Fig. 12에 보듯이 굽힘부 2는 스프링백이 거의 발생하지 않았고, 굽힘부 1은 마찰인자의 변화에 민감한 응답을 보인 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유를 살펴보기 위해 Fig. 13에 굽힘부 1의 잔류응

Table 3 Various conditions for parametric study

Condition	Parameters	Value	Factor
Simulation condition	Friction model	shear friction law	F*
	Finite strain	multiplicative decomposition	F
	Time step	0.001 [s]	F
	No. of elements	18,000	F
Design condition	Corner radius of die	0.01 ~ 0.07 [mm]	C**
	Radius of curvature(punch)	4.985 [mm]	F
	Radius of curvature(die)	5.015 [mm]	F
Process condition	Friction factor	0.1 ~ 0.7	C
	Punch velocity	1 [mm/s] (static)	F

* F : Fixed factor, **C : Controllable factor

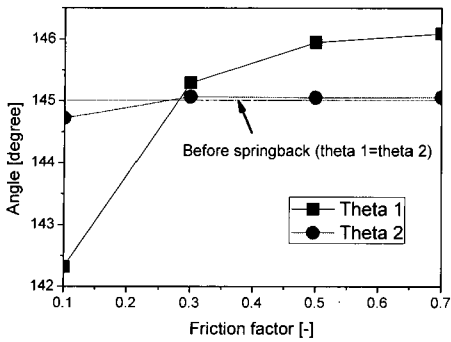


Fig.12 Springback predictions with the variation of friction factor (corner radius of die : 0.03mm)

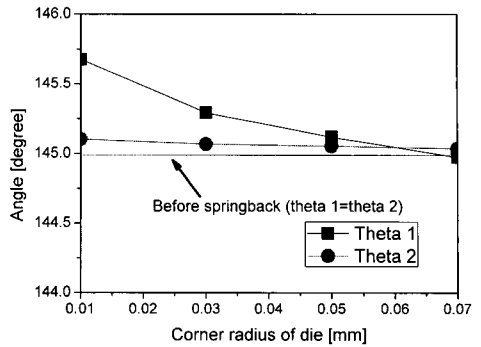
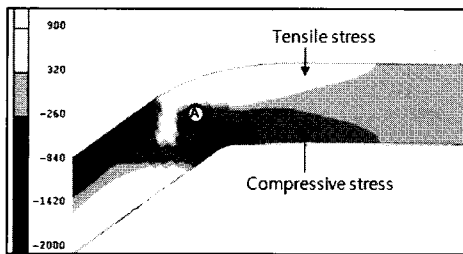
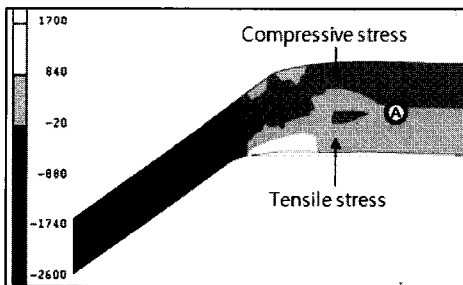


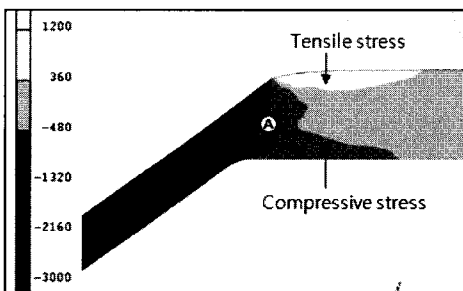
Fig.14 Springback predictions with the variation of corner radius of die (friction factor : 0.3)



(a) End of bending stage



(b) End of forging stage (m=0.7)



(c) End of forging stage (m=0.1)

Fig.13 Simulated stress distributions

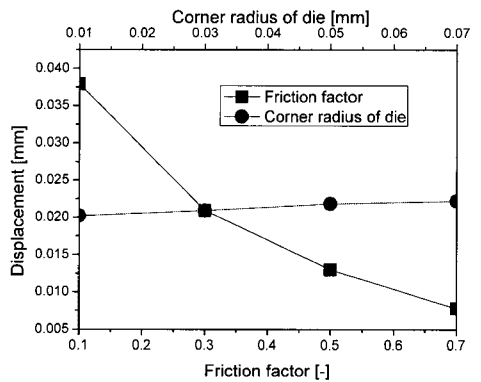


Fig. 15 Displacement predictions with the variation of friction factor and corner radius of die

력상태를 나타내었다. Figure 13(a)는 굽힘 가공 후 잔류응력상태를 보여주고 있는데 절곡부 바깥쪽에는 인장응력이 안쪽으로는 압축응력이 발생한 것을 볼 수 있다. 이때 응력값은 순수 굽힘 가공이기 때문에 마찰인자의 변화에 거의 영향을 받지 않는다. 그러나 단조 단계가 시작되면서 내부 응력은 마찰인자에 따라 달라지게 되는데, 이는 마찰인자가 소재의 유동에 영향을 미치기 때문이다. 즉, Fig. 13(b)에서처럼 마찰인자가 작을 때에는 소재 유동이 많이 되고(A 위치), 소재가 다이 모서리를 지나면서 두께 방향의 응력상태가 굽힘 후 응력상태와 반대로 변환된다. 반대로 마찰인자가 클 때에는 소재 유동이 적게 되고 굽힘 후 응력상태가 유지된다. 따라서, 마찰인자가 적을수록 스프링고(Spring-go)가 발생하고, 클수록 스프링백이 발생하는 것이다.

다음으로, 굽힘부 1에서 다이반경의 변화에 대한 해석결과를 Fig. 14에 나타내었는데, 다이 반경

이 작을수록 스프링백이 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 역시 소재의 유동량과 관련이 있는데 Fig. 15에 마찰인자에 따른 유동량과 다이반경에 따른 유동량이 반대의 기울기를 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 스프링백도 반대의 경향을 보이게 됨을 알 수 있다.

4. 스프링백 제어

4.1 스프링백 제어를 위한 금형설계안

지금까지 결과를 종합해보면, 굽힘부 2는 마찰에 대한 변화에 강건함을 보인 반면, 굽힘부 1은 마찰과 다이반경의 변화에 민감하게 반응하였다. 따라서 마이크로 스프링을 성공적으로 제작하기 위해서는 다이 및 펀치면의 표면 거칠기, 윤활의 엄격한 관리, 다이반경의 가공오차에 대한 반복적인 수정 작업이 필요하며, 비유측면에서 부담이 커지게 된다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 상기와 같은 여러 인자들의 변동에 따라 스프링백을 제어할 수 있는 방법을 제안하였다.

즉, 홀더의 위치를 변화시키는 방법으로 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 초기 설계 치수를 기준으로 홀더가 다이반경으로부터 멀어질수록(+방향) 스프링고각, 가까워질수록(-방향) 스프링백이 발생하는 것으로 예측되었다.

이는 홀더의 위치에 따라 굽힘 가공 후 소재가 다이면으로부터 들리는 양이 다르기 때문이다. Fig. 17(c)에서처럼 홀더가 다이반경에서 멀어지면 굽힘 단계 후 소재가 다이면으로부터 들리게 되고, 이때의 잔류응력이 단조가 진행됨에 따라 들려있던 소재가 눌리면서 Fig. 17(d)와 같이 반대로 역전이 된다. 한편, 홀더의 위치가 다이반경과 가까

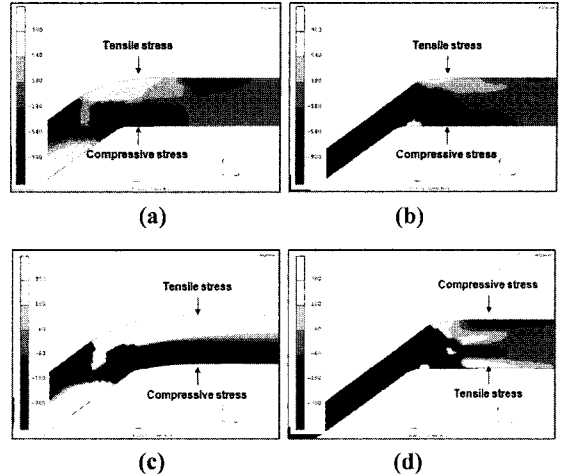


Fig.17 Simulated stress distributions with the variation of position of holder. End of (a) bending and (b) forging stage at holder position -0.1, End of (c) bending and (d) forging stage at holder position +0.3

워지게 되면 소재가 들리는 양이 적어지고, 잔류응력도 굽힘 후 응력을 유지하게 된다. 따라서 Fig. 16과 같은 스프링백 경향이 나타나며, 스프링백 크기가 스프링백 전 크기와 같아지는 홀더의 위치를 예측할 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 홀더의 위치를 가변할 수 있는 금형을 제작하면, 스프링백 보정을 위한 금형의 반복적인 수정 작업 없이 홀더의 위치를 조정하는 것으로 허용정밀도를 만족하는 마이크로 스프링을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

마이크로 스프링을 정밀하게 제작하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서의 마이크로 스프링은 2개의 굽힘 부를 갖고 있으며, 이를 형성하기 위해 단조가 가미된 굽힘 성형을 통해 제작된다.
- (2) 초기 금형으로부터 제작된 마이크로 스프링은 굽힘부 2에서는 스프링백 발생이 적었으며, 굽힘부 1에서 상대적으로 스프링백이 크게 발생하였다.
- (3) 굽힘부 1에서의 스프링백은 마찰인자와 다이반경에 민감하게 변동함을 해석으로부터 예측되었다. 이와 같은 이유는 단조 가공 시 소재의

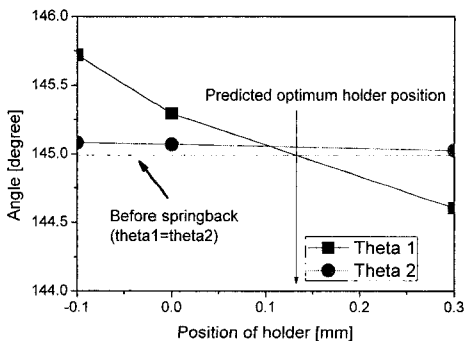


Fig.16 Springback predictions with the variation of position of holder

유동과 관련이 있는 것으로 판단된다.

(4) 홀더의 위치 조절을 통해 마이크로 스프링의 굽힘부 1의 스프링백을 보정할 수 있음을 해석적으로 확인하였으며, 이를 이용하여 금형을 제작하면 정밀한 마이크로 제작에 도움을 줄 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 해당 사업을 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. H. Kim, S. J. Park, K. Chun, 2004, A fine pitch MEMS probe unit for flat panel display as manufacturing MEMS application, Sensors and Actuators. A, Physical, Vol. 115, pp. 46~52.
- [2] C. H. Min, 2007, Development of 121 pins/mm² high density probe card using micro-spring architecture, Journal of the Korean Institute of Electronic Material Engineers, Vol. 20, pp.749~755.
- [3] M. Rosamond, D. Wood, 2007, Substrate independent fabrication of a non-planar probe card, Microelectronic Engineering, Vol. 84, pp. 1207~1210.
- [4] C. R. Pyo, S. H. Kang, B. H. Jeon, 2002, Development of System based on Digital Image Processing for Precision Measurement of Micro Spring, The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 11, pp. 620~627.
- [5] F. Knap, J. W. Pilarczyk, 2000, Springback of wire and residual stresses during unloading after plastic deformation, Wire and Cable Technical Symposium (WCTS)2000, pp. 1~4.
- [6] T. Meinders, I. A. Burchitz, M. H. A. Bonte, 2008, Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 499~514.
- [7] J. Dan, W. Lancheng, 2006, Direct generation of die surfaces from measured data points based on springback compensation, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, pp. 574~579.
- [8] A. Rosochowski, 2001, Die compensation procedure to negate die deflection and component springback, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, pp. 187~191.
- [9] G. Shen, P. Hu, X. Zhang, 2005, Springback Simulation and Tool Surface Compensation Algorithm for Sheet Metal Forming, AIP Conference Proceedings, Vol. 778, pp. 334~339.
- [10] J. Weiher, B. Rietman, K. Kose, 2004, Controlling Springback with Compensation Strategies, AIP Conference Proceedings, Vol. 712, pp. 1011~1015.
- [11] F. Valente, X. P. Li, A. Messina, 1997, Springback prediction for stamping tools compensation by numerical simulation, Computational Plasticity: Fundamentals and Applications, pp. 1431~1438.
- [12] A. Accotto, G. Anedda, M. Sperati, 2005, On the Optimization of the Punch-Die Shape: An Application of New Concepts of Tools Geometry Alteration for Springback Compensation, European LS-DYNA Users' Conference, pp. 6d~48.
- [13] K. Roll, T. Lemke, K. Wiegand, 2005, Possibilities and Strategies for Simulations and Compensation for Springback, AIP Conference Proceedings, Vol. 778, pp. 295~302.
- [14] Y. Ledoux, E. Pairel, R. Arrieux, 2007, An Improved Process Optimisation for Springback Compensation using FEM Simulation and Experimental Design, International Journal of Forming Processes : Computational and Physical Methods, Vol. 10, pp. 219~234.
- [15] A. Tang, W. Lee, J. He, 2005, Die Face Engineering Based Springback Compensation Strategy and Implementation, Numerical simulation of 3D sheet metal forming processes; Numisheet 2005, pp. 314~321.