

박판재의 스프링백 해석(I)-잔류 변형율에 근거한 해석모델

이재호¹ · 김동우¹ · 손성만² · 이문용² · 문영훈[#]

Analysis of Springback of Sheet Metal(I): Analytical Model Based on the Residual Differential Strain

Jae Ho Lee, Dong Woo Kim, Sung Man Sohn, Mun Yong Lee, Young Hoon Moon

(Received May 17, 2007)

Abstract

As the springback of sheet metal during unloading may cause deviation from a desired shape, accurate prediction of springback is essential for the design of sheet stamping operations. When considering the case of a sheet metal being bent to radius ρ that is such that the maximum stress induced exceed the elastic limit of the material, plastic strain in the outer surface will occur and the material will take a permanent set: but since, on removing the bending moment, the recovery of the material is not uniform across the thickness, springback will occur and the radius ρ will not be maintained. Furthermore, when a tensile load being applied to each end of specimen, the tensile stress due to bending is increased and the compressive stress is decreased or cancelled and eventually the whole specimen may be in varying degree of tension. On the removal of the applied load the specimen loses its elastic strain by contracting around the contour of the block, the radius ρ will be determined by the residual differential strain. Therefore in this study the springback is analytically estimated by the residual differential strains between upper and lower surfaces of greatest radius after elastic recovery, and a springback model based on the bending moment is also analytically derived for comparison purpose.

Key Words : Springback, Analytical Model, Sheet Metal Forming, Residual Differential Strain, Moment Based Model

1. 서론

스프링백(springback)은 프레스 성형 시 탄성 회복으로 인한 부분적 형상변형현상으로서 성형품의 기하학적인 형상변수, 재료변수 및 공정 변수 등에 영향을 받는다[1~3]. 공정변수의 경우에는 경험, 시행착오 및 직관에 의하여 결정되고 있는 경우가 많으며, 형상 및 재료변수의 경우에도 변형 형상, 변형각도, 항복강도, 탄성계수, 재료의 두께 등이 복합적으로 영향을 미치고 있어 정확한 스프링백의 예측에 대한 연구가 지속적으로 이루어

지고 있다[4~6]. 근래 차체경량화 및 연비개선을 위해 적용이 확대되고 있는 고장력강과 알루미늄 합금의 경우에도 연강의 경우보다 상대적으로 큰 스프링백 때문에 엄밀한 공정기술이 요구되고 있다[7~8]. 스프링백의 보정이 없이는 부분적인 형상의 정확성을 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 스프링백의 예측을 위해 변형형상 및 재료 인자 별로 다양한 변형 패턴을 가정한 후, 탄성복원 후 최대변형부와 최소변형부의 잔류변형율 차이를 이용하여 스프링백을 예측해 주는 해석적 모델을 구체화하고자 한다[9]. 이를 위해 탄성 회

1. 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터
2. 성우하이텍(주) 기술연구소
교신지자: 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터, E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

복 후의 두께 및 곡률반경의 변화, 탄성계수, 항복강도 등에 의해 결정되어지는 변형패턴별로 6 개의 스프링백 해석 모델을 만들었다. 본 변형을 해석모델의 특성평가를 위해 기존의 모멘트 평형에 근거한 스프링백 예측모델도 변형패턴별로 구하여 비교 검증하였다[10~11].

2. 변형패턴 구간

스프링백을 예측해 주는 해석적 모델은 성형형상과 재료인자에 의해 결정되어지는 다양한 변형패턴별로 구해야 한다. 박판의 경우 일정한 굽힘모멘트의 적용에 의한 곡률 반경부로의 굽힘을 고려하였을 때 재료의 탄성한계 이내에서 최대응력이 놓이게 되면 그 후 굽힘모멘트를 제거하게 되었을 때 본래의 형상으로 되돌아 가게 될 것이다. 그러나 최대응력이 재료의 탄성한계를 초과하게 되면 두께방향의 중심축을 기준으로 하여 굽힘 외측 표면부분은 소성변형이 일어나게 되고 이때 굽힘 모멘트를 제거하게 된다면 두께방향으로 재료의 회복은 일정하게 일어나지 않을 것이다. Fig. 1 에 보여지는 그림은 길이방향의 두께 t 를 갖는 재료를 곡률반경의 방향으로 굽힘모멘트를 가했을 때의 형상을 보여준다.

굽힘각은 θ , 단위폭당 적용되는 모멘트는 M , 장력은 T 로 나타내었다. 두께 방향 중앙에 중심축이 놓여지고 중심축을 기준으로 위쪽 상부 두께부분을 굽힘 외측 표면부분이라 하며 인장응력이 가해질 것이고, 아래쪽은 반대로 압축응력이 가해질 것이다. 순수 굽힘공정에서 최대 변형은 외측 표면부분에 적용되어지고, 이 부분에서의 탄성-소성 관계는 탄성계수와 항복강도와 같은 재료변수나 굽힘형상에 의해 결정되어 질 것이다. 항복점에서의 변형률 ϵ_0 는 식(1)에 나타내었고 외측 표면부분에 적용 되어진 굽힘에 의해 발생되어진 굽힘 최대 변형률 ϵ_{max} 는 식(2)에 나타내었다. ϵ_{max} 가 ϵ_0 보다 크다면 굽힘 외측 표면부분에는 소성 응력-변형률 상태를 가질 것이고, 이와 반대의 경우에는 탄성 응력-변형률 상태에 놓일 것이다. 이와 같이 굽힘후의 박판재의 스프링백은 변형된 판재의 변형을 위해 가해진 응력-변형률에 크게 의존한다.

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \quad (1)$$

$$\epsilon_{max} = \frac{t}{2\rho} \quad (2)$$

(σ_0 : 항복응력, E : 탄성계수, ρ : 굽힘반경)

식(1)과 식(2)의 관계에서 스프링백 인자인 S_p 를 식(3)과 같이 정의하였다. S_p 가 1 보다 큰 경우 굽힘 외측 표면부분에는 소성 응력-변형률 상태를 S_p 가 1 보다 작은 경우 탄성 응력-변형률 상태에 놓일 것이다.

$$S_p = \frac{Et}{2\rho\sigma_0} \quad (3)$$

Fig. 2 에는 스프링백 인자의 의미를 도식적으로 나타내었다. 또한 S_p 가 1 보다 작을 때의 3 개의 다른 변형양상과 S_p 가 1 보다 클 때의 3 개의 다른 변형양상을 각각 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

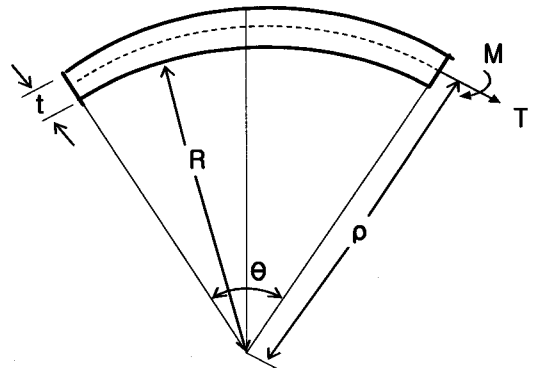


Fig. 1 A unit length of a continuous strip bent along a line

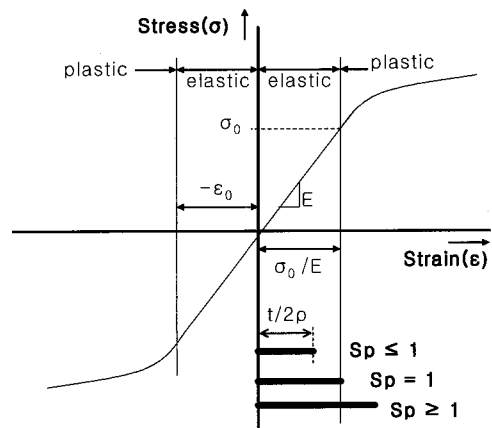


Fig. 2 Classification of springback parameter(S_p)

Table 1 Three possible deformation patterns for

$$S_p \leq 1 \left(\frac{\sigma_0}{E_L} \geq \frac{t}{2\rho} \right)$$

Valid Range	Stress State		ID
	Inner surface	Outer surface	
$0 \leq \varepsilon_a \leq \frac{\sigma_0}{E_L} - \frac{t}{2\rho}$	elastic	elastic	SA
$\frac{\sigma_0}{E_L} - \frac{t}{2\rho} \leq \varepsilon_a \leq \frac{\sigma_0}{E_L} + \frac{t}{2\rho}$	elastic	plastic	SB
$\varepsilon_a \geq \frac{\sigma_0}{E_L} + \frac{t}{2\rho}$	plastic	plastic	SC

Table 2 Three possible deformation patterns for

$$S_p \geq 1 \left(\frac{t}{2\rho} \geq \frac{\sigma_0}{E_L} \right)$$

Valid Range	Stress State		ID
	Inner surface	Outer surface	
$0 \leq \varepsilon_a \leq \frac{t}{2\rho} - \frac{\sigma_0}{E_L}$	plastic	plastic	LA
$\frac{t}{2\rho} - \frac{\sigma_0}{E_L} \leq \varepsilon_a \leq \frac{t}{2\rho} + \frac{\sigma_0}{E_L}$	elastic	plastic	LB
$\varepsilon_a \geq \frac{t}{2\rho} + \frac{\sigma_0}{E_L}$	plastic	plastic	LC

3. 스프링백 예측모델

3.1 변형율 모델

각각의 변형 패턴 하에서의 스프링백은 탄성회복이후 최대변형량과 최소변형량의 잔류변형율차에 의해 정의되어진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} \times 100 \quad (4)$$

여기서, ε_l : loading 시의 (인장+굽힘)변형률

ε_u : unloading 이후의 (인장+굽힘)변형률

Fig.3 은 'SA' 패턴에서의 굽힘내측표면과 굽힘외측표면의 응력상태를 나타낸다.

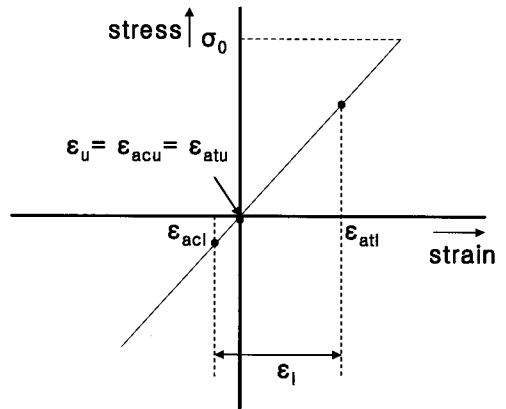


Fig. 3 Stress-strain distribution for deformation pattern 'SA'

Fig. 3 에서,

- ε_{atu} : unloading 시의 최대(인장+굽힘)변형률
- ε_{acu} : unloading 시의 최대(압축+굽힘)변형률
- ε_{atl} : loading 시의 최대(인장+굽힘)변형률
- ε_{acl} : loading 시의 최대(압축+굽힘)변형률

'SA'에 적용될 경우 굽힘내측표면과 굽힘외측표면이 모두 탄성영역에 위치하므로 스프링백 값은 식(5)에 의해서 구해진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_l - 0}{\varepsilon_l} = 100(\%) \quad (5)$$

Fig. 4 는 'SB' 패턴에서의 굽힘내측표면과 굽힘외측표면의 응력상태를 나타낸다.

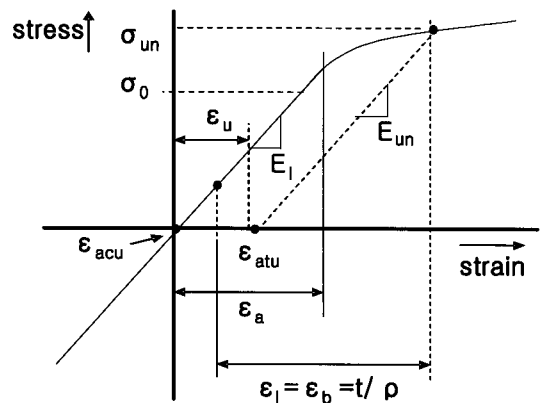


Fig. 4 Stress-strain distribution for deformation pattern 'SB'

Fig. 4 에서,

$$\sigma_{un}: \text{unloading 시의 응력}, \sigma_{un} = K(t/2\rho + \varepsilon_a)^n$$

K : 강도계수, n : 가공경화지수

ε_a : loading 시의 인장변형률

ε_b : loading 시의 굽힘변형률

‘SB’에 적용될 경우 굽힘 내측표면부는 탄성영역, 굽힘 외측표면부는 소성영역을 나타내고 스프링백 값은 식(6)에 의해 구해진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_l - (\varepsilon_a + t/2\rho - \sigma_{un}/E_{un})}{\varepsilon_l}$$

$$\varepsilon_l = \varepsilon_b = t/\rho \text{ 이므로}$$

$$SB(\%) = \frac{t + 2\rho(\sigma_{un}/E_{un} - \varepsilon_a)}{2t} \quad (6)$$

Fig. 5 는 ‘SC’ 패턴에서의 굽힘내측표면과 굽힘 외측표면의 응력상태를 나타낸다.

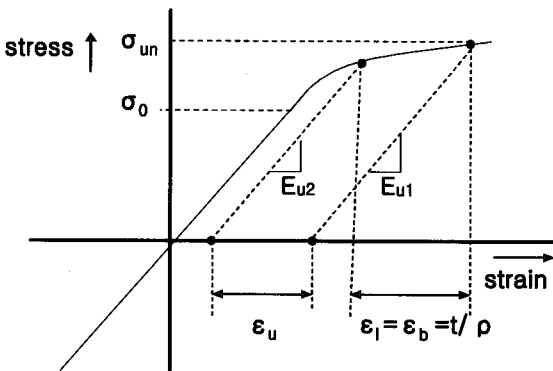


Fig. 5 Stress-strain distribution for deformation pattern ‘SC’

‘SC’에 적용될 경우 굽힘내측표면과 굽힘외측표면부 모두 소성영역에 놓여지고 스프링백 값은 식(7)에 의해 구해진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} = \frac{K\rho[(\varepsilon_a + t/2\rho)^n / E_{u1} - (\varepsilon_a - t/2\rho)^n / E_{u2}]}{t} \quad (7)$$

Fig. 6 은 ‘LA’ 패턴에서의 굽힘 내측표면과 굽힘 외측표면의 응력상태를 나타낸다.

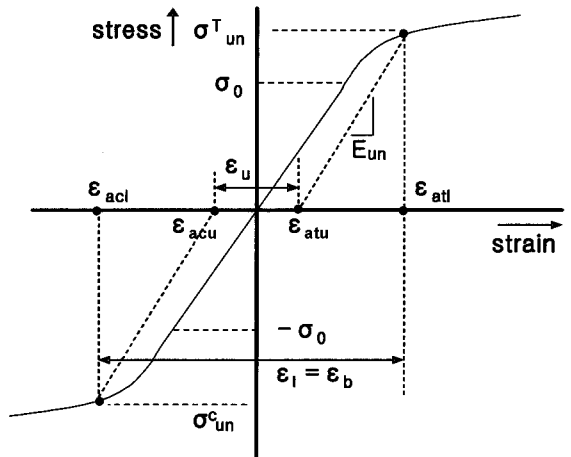


Fig. 6 Stress-strain distribution for deformation pattern ‘LA’

Fig. 6 에서,

$$\sigma^T_{un} = K(t/2\rho + \varepsilon_a)^n, \sigma^C_{un} = -K(t/2\rho + \varepsilon_a)^n$$

σ^T_{un} : unloading 시의 인장응력

σ^C_{un} : unloading 시의 압축응력

‘LA’에 적용될 경우 굽힘내측표면과 굽힘외측표면이 모두 소성영역에 위치하므로 스프링백 값은 식(8)에 의해서 구해진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} = \frac{\sigma^T_{un}/E_{un} - \sigma^C_{un}/E_{un}}{\varepsilon_l} = \frac{K\rho[(t/2\rho + \varepsilon_a)^n + K(t/2\rho - \varepsilon_a)^n]}{tE_{un}} \quad (8)$$

Fig. 7 은 ‘LB’ 패턴에서의 굽힘 내측표면과 굽힘 외측표면의 응력상태를 나타낸다.

‘LB’에 적용될 경우 굽힘 내측표면부는 탄성영역, 굽힘 외측표면부는 소성영역을 나타내고 스프링백 값은 식(9)에 의해 구해진다.

$$SB(\%) = \frac{\varepsilon_l - \varepsilon_u}{\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_l - (\varepsilon_a + t/2\rho - \sigma_{un}/E_{un})}{\varepsilon_l}$$

$$\varepsilon_l = \varepsilon_b = t/\rho \text{ 이므로}$$

$$SB(\%) = \frac{t + 2\rho(\sigma_{un}/E_{un} - \varepsilon_a)}{2t} \quad (9)$$

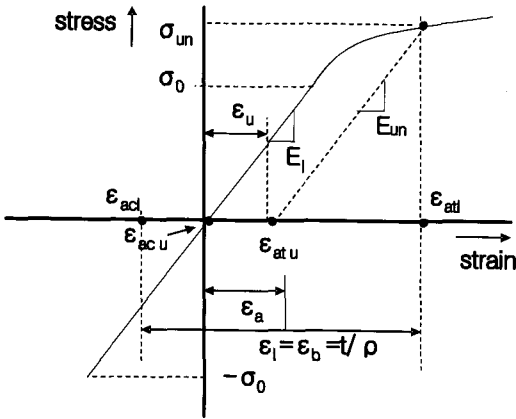


Fig. 7 Stress-strain distribution for deformation pattern 'LB'

'LC' 패턴에서의 굽힘 내측표면과 굽힘 외측표면의 응력상태는 'SC'와 동일하므로 스프링백 값은 식(7)에 의해 구해진다

3.2 모멘트 모델

모멘트모델을 이용한 스프링백은 박판재의 단위폭당 응력분포를 고려했을 때, 장력 T와 모멘트 M의 응력요소의 적분으로 나타나고 장력 T와 모멘트 M으로 스프링백값을 구할 수 있다. 이렇게 계산되어진 모멘트 M 값을 식(15)에 대입함으로써 스프링백 값을 얻어낼 수 있다.

하중제거 전의 모멘트는 식(10)으로 나타낸다.

$$M_s = I \cdot E \cdot (1/\rho) \quad (10)$$

여기서 's'는 하중제거의 시작을 의미한다.

굽힘반경(\rho)의 변화에 따른 모멘트 변화는 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta M = I \cdot E \cdot \Delta(1/\rho) \quad (11)$$

하중 제거 시 평형상태에서 모멘트가 소멸하므로 $M_f = 0$ 가 된다. 여기서 'f'는 하중제거의 끝을 의미한다. 그러므로 하중이 제거되는 동안의 모멘트 값은 식(12)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta M = M_f - M_s = 0 - M_s = -M_s \quad (12)$$

굽힘반경의 변화에 따른 곡률변화와 굽힘각도 사이에는 식(13)의 관계가 성립한다.

$$\Delta(1/\rho) = (1/\rho)_f - (1/\rho)_s = \frac{\Delta M}{I \cdot E} = -\frac{M_s}{I \cdot E} = \Delta\theta \quad (13)$$

단위 폭당 관성모멘트가 $W=1$ 일 때,

$$I = W \cdot \frac{t^3}{12} = \frac{t^3}{12} \quad (14)$$

그러므로, 모멘트를 이용한 스프링백은 식(15)를 이용하여 구할 수 있다.

$$SB(\%) = \frac{(1/\rho)_s - (1/\rho)_f}{(1/\rho)_s} = \frac{12M}{(1/\rho)_s Et^3} \quad (15)$$

모멘트 M와 장력 T의 값은 Table 1과 Table 2에 나타내어진 6가지 변형패턴별로 구하였다.

'SA'에 적용될 경우,

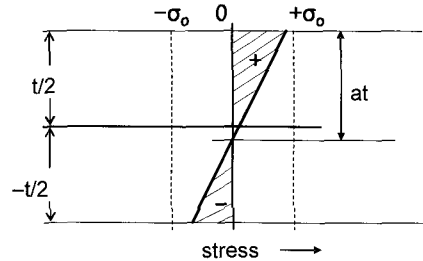


Fig. 8 Stress distribution for deformation pattern 'SA'

Fig. 8로부터 장력 T와 모멘트 M을 구하면,

$$T = \int_{-t/2}^{t/2} \left[\frac{E}{\rho} \left(\frac{2a-1}{2} \right) \cdot t + \frac{E}{\rho} \cdot y \right] \cdot dy \quad (16)$$

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \left[\frac{E}{\rho} \left(\frac{2a-1}{2} \right) \cdot t + \frac{E}{\rho} \cdot y \right] \cdot y \cdot dy \quad (17)$$

'SB'에 적용될 경우,

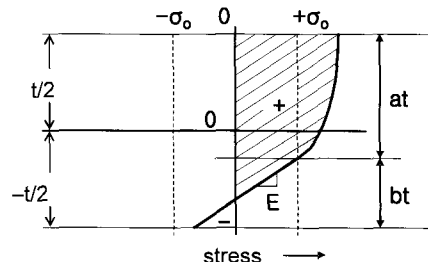


Fig. 9 Stress distribution for deformation pattern 'SB'

Fig. 9로부터 장력 T와 모멘트 M을 구하면,

$$T = \quad (18)$$

$$\int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy + \frac{1}{2} \cdot \sigma_0^2 \cdot \frac{\rho}{E} + \frac{1}{2} \left(\sigma_0 - \frac{E \cdot b \cdot t}{\rho} \right) \cdot \left(bt - \frac{\sigma_0 \cdot \rho}{E} \right)$$

$$M = \int_{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot y \cdot dy + \int_{-\frac{t}{2}}^{\left(\frac{1}{2}-a\right)t} \left\{ \frac{E}{\rho} \cdot y + \sigma_0 - \left(\frac{2b-1}{2} \right) \cdot \frac{t \cdot E}{\rho} \right\} \cdot y \cdot dy \quad (19)$$

‘SC’에 적용될 경우,

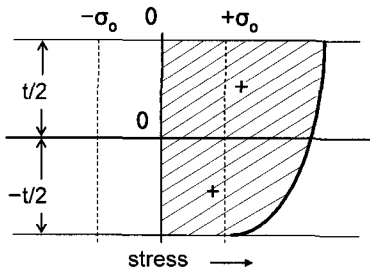


Fig. 10 Stress distribution for deformation pattern ‘SC’ and ‘LC’

Fig. 10 으로부터 장력 T와 모멘트 M을 구하면,

$$T = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} K \cdot \left(\frac{y}{\rho} + \varepsilon_a \right)^n \cdot dy \quad (20)$$

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot y \cdot dy = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} K \cdot \left(\frac{y}{\rho} + \varepsilon_a \right)^n \cdot y \cdot dy \quad (21)$$

‘LA’에 적용될 경우,

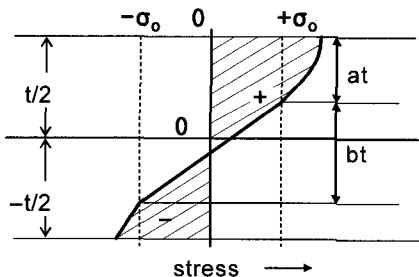


Fig. 11 Stress distribution for deformation pattern ‘LA’

Fig. 11로부터 장력 T와 모멘트 M을 구하면,

$$T = \int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy - \int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy \quad (22)$$

$$M = \int_{\left(\frac{1-2a}{2}\right)t}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot y \cdot dy + \int_{\left(\frac{1-2a-2b}{2}\right)t}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot y \cdot dy + \int_{\left(\frac{1-2a}{2}\right)t}^{\left(\frac{1-2a-2b}{2}\right)t} \left[\frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot y}{b \cdot t} + \sigma_0 \left(\frac{b+2a-1}{b} \right) \right] \cdot y \cdot dy \quad (23)$$

‘LB’에 적용될 경우,

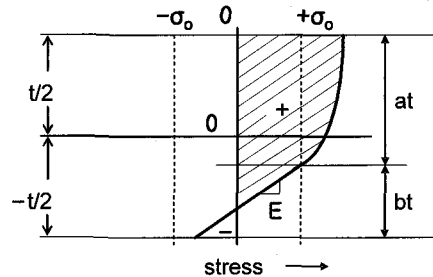


Fig. 12 Stress distribution for deformation pattern ‘LB’

Fig. 12로부터 장력 T와 모멘트 M을 구하면,

$$T = \int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy + \frac{1}{2} \cdot \sigma_0^2 \cdot \frac{\rho}{E} + \frac{1}{2} \left(\sigma_0 - \frac{E \cdot b \cdot t}{\rho} \right) \cdot \left(bt - \frac{\sigma_0 \cdot \rho}{E} \right) \quad (24)$$

$$M = \int_{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot y \cdot dy + \int_{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}^{\left(\frac{1}{2}-a\right)t} \left\{ \frac{E}{\rho} \cdot y + \sigma_0 - \left(\frac{2b-1}{2} \right) \cdot \frac{t \cdot E}{\rho} \right\} \cdot y \cdot dy \quad (25)$$

‘LC’에 적용될 경우, 장력 T와 모멘트 M은 ‘SC’와 동일하다.

굽힘 모멘트를 기초로 한 모멘트모델에서 장력 T와 모멘트 M에 나타난 임의의 독립변수인 a, b

의 값은 장력 T에 의해서 구하여져 굽힘모멘트의 계산에 적용된다. 변형률값이 탄성범위일 때 장력 T는 식(26), 소성범위일 때 장력 T는 식(27)에 나타난다.

$$T = t\sigma_a = tE\varepsilon_a \quad (26)$$

$$T = t\sigma_a = tK(\varepsilon_a)^n \quad (27)$$

스프링백량을 계산하기 위해서는 먼저 박판재료와 굽힘형상 인자로부터 변형패턴을 결정한 후 재료물성치, 조업변수값 및 응력에 따른 실제 변형률(ε_a)을 대입하여 각각의 해석모델별 스프링백값을 구한다. 변형율에 근거한 해석모델은 모멘트 모델에 의한 해석모델과 U-bending 시험을 통해 본 논문의 후반부에서 비교, 검증하였다[10].

4. 결론

본 연구에서는 탄성복원 후 최대변형부와 최소 변형부의 잔류변형율 차이를 이용하여 스프링백량을 예측해 주는 해석적 모델을 개발하였으며, 성형박판의 응력-변형상태별로 두께 및 곡률반경의 변화, 탄성계수, 항복강도 등에 의해 결정되어지는 6가지 변형패턴별을 가정하여 각각의 스프링백 해석 모델을 제시하였고 비교검증을 위해 모멘트 평형을 이용한 스프링백 예측모델도 각각의 변형패턴별로 구하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 부산대학교 국가핵심연구센터의 연구비 일부지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] 장성호, 허영부, 서대교, 2003, U 드로오 벤딩에서의 스프링백 예측을 위한 이론적 단순화, 소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 125~131.

[2] H. M. Huang, S. D. Liu, S. Jiang, 2001, Stress and strain histories of multiple bending-unbending springback process, Trans. of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology Vol. 123 pp. 384~390.

[3] D. G. Seo, S. H. Chang, S. M. Lee, 2003, Springback characteristics of steel sheets for warm U-draw bending, Metals and Materials International Vol. 9 pp. 497~501.

[4] W. D. Carden, L. M. Geng, D. K. Matlock, R. H. Wagnor, 2002, Measurement of springback, International Journal of Mechanical Sciences Vol. 44, pp. 79~101.

[5] Luc Papeleux, Jean-Philippe Ponthot, 2002, Finite element simulation of springback in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126 pp. 785~791.

[6] F. Pourboghra, E. Chu, 1995, Prediction of springback and side-wall curl in 2-D draw bending, Journal of Materials Processing Technology, Vol.50 pp. 361~374.

[7] D. T. Michael, A. Henrik, 2002, ULSAB-Advanced Vehicle Concepts-Overview and Design, SAE 2002-01-0036.

[8] G. S. Paul, 2002, ULSAB-Advanced Vehicle Concepts-Manufacturing and Processes, SAE 2002-01-0039.

[9] G. G. Thomas, 1970, Production Technology, Oxford University Press, London, England, pp. 99~103.

[10] W. F. Hosford, 1983, Metal Forming: mechanics and metallurgy, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 250~262.

[11] Z. Marciniak, J. L. Duncan, 1992, The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold, London, pp. 68~99.

[12] 이재호, 김동우, 손성만, 이문용, 문영훈, 2007, 박판재의 스프링백 해석(II)-해석모델의 실험적 검증, 한국소성학회지 제 16 권 제 7 호, pp. 516-520