[논문] 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 6 호, 2007
Transactions of Materials Processing, Vol.16, No.6, 2007

박판성형시 컬 예측모델 개발(I)-해석적 모델

주병돈[1] · 박현규[1] · 김동우[1] · 문영훈[#]

Development of Prediction Model for Sidewall Curl in Sheet Metal Forming(I)-Analytical Model

B. D. Joo, H. K. Park, D.W. Kim, Y. H. Moon
(Received April 19, 2007)

Abstract

Sidewall curl is the curvature that results from non-uniform through-thickness strain present in the sheet stamping process which involves material flow over a die radius. In order to understand and control sidewall curl for tight fit-up tolerances, an analytical model that can provide a reliable measure for the amount of curl would be very helpful. In this study, a model is developed based on the moment-curvature relationship during bending-under-tension operations. The analytical model includes the variables of applied tensile force, the yield strength, the elastic modulus, the bending radius, and the sheet thickness, which are the primary factors affecting sidewall curl during sheet stamping operations. For the accuracy of analytical model, six possible deformation patterns are proposed on the basis of material properties and bending geometries.

Key Words : Sidewall Curl, Curl Curvature, Analytical Model, Moment-Curvature, Springback Parameter

1. 서 론

측벽부 컬(sidewall curl)은 스프링백의 한 현상으로, 판재의 드로잉 및 굽힘성형후 주로 발생한다[1~2]. 컬이 심하게 발생하면 가공 후 부품조립에 문제를 일으키게 되므로, 금형 설계 및 가공조건과 소재 선정시 고려되어야 하는 중요한 특성이다. 컬을 정확하게 제어하기 위해서는 컬의 발생에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 면밀한 이해가 요구되며 이에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다[3~6]. 이중에서도 이론적인 해석모델을 이용한 연구는 컬 발생에 대한 이론적인 이해도를 높여줄 뿐만 아니라, 실험적 방법으로 설명할 수 없는 공정인자의 해석에도 매우 유용하다[7~8]. 따라서 본 논문에서는 인장-굽힘응력(bending under stretching)하에서 모멘트-곡률(moment-curvature) 관계에 근거한 이론적 해석모델을 개발하고자 하며, 본 논문의 후반부[9]에서는 실험을 통해 얻어진 측벽부 컬 값과의 비교를 통해 이론 해석 모델의 예측정밀도를 검증해 보고자 한다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공 연구소, E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

2. 컬 예측을 위한 해석모델

Fig. 1에 판재를 곡률반경의 방향으로 굽힘모멘트를 가했을 때의 굽힘형상을 나타내었다. 두께 방향 중앙부에 중립축이 놓여지고 중립축을 기준으로 위쪽 상부 두께 부분은 인장응력이 가해질 것이고, 아래 쪽은 반대로 압축응력이 가해질 것이다. 순수 굽힘시 외측 표면부분에 최대 인장응력이 걸리게 되는데, 이 부분에서의 탄성-소성변형은 판재의 재료물성과 굽힘형상에 의해 결정된다.

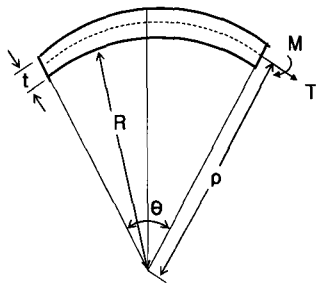

Fig. 1 A unit length of a continuous strip bent along a line

항복점에서의 변형률 ε_0 는 식 (1)에 나타 내었고 외측 표면에 적용된 최대 변형률 ε_{max} 는 식 (2)에 나타내었다.

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{t}{2\rho} \tag{2}$$

여기서 σ_0 는 항복응력, E 는 탄성계수, ρ 는 굽힘반경을 나타낸다.

ε_{max} 가 ε_0 보다 크다면 외측 표면은 소성응력-변형 상태에 놓이게 되고, 반대의 경우에는 탄성응력-변형상태에 놓인다. 따라서 굽힘 후의 박판재의 스프링백은 가해진 응력에 의해 판재에 부여된 최대변형율에 크게 의존한다. 식 (1)과 식 (2)의 관계에서 스프링백 인자(springback parameter)인 S_p 를 식 (3)과 같이 정의하면 외측 표면은 S_p 가 1 보다 큰 경우 소성응력-변형 상태하에 놓이고 S_p 가 1 보다 작은 경우 탄성응력-변형 상태에 놓이게 된다.

$$S_p = \frac{Et}{2\rho\sigma_0} \tag{3}$$

Fig. 2에 스프링백 인자의 의미를 도식적으로 나타내었다. 또한 S_p 가 1보다 클 때 가능한 세가지 변형양상과 S_p 가 1보다 작을 때의 세가지 변형양상을 각각 Table 1과 Table 2 에 나타내었다.

Fig. 3에 박판재의 드로잉시 측면부 휨을 설명할 수 있는 모멘트와 곡률의 관계를 도식적으로 나타내었다. 박판재가 블랭크 상태에서 다이어깨 반경부를 지날 때의 상태를 나타내는 굽힘-신장(bending-stretching)단계와 측면부에 진입하여 편평해지는 펴짐-신장(unbending-stretching)의 과정에서

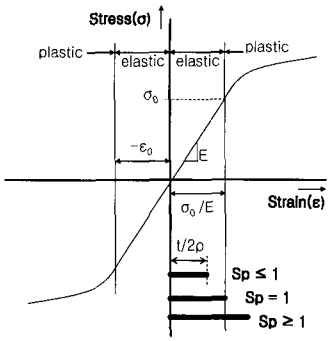

Fig. 2 Classification of springback parameter(S_p)

Table 1 Three possible deformation patterns: $S_P \geq 1$

valid range	ID	stress state	
		inner	outer
$0 \leq \varepsilon_a \leq \frac{t}{2\rho} - \frac{\sigma_0}{E_L}$	LA	plastic	plastic
$\frac{t}{2\rho} - \frac{\sigma_0}{E_L} \leq \varepsilon_a \leq \frac{t}{2\rho} + \frac{\sigma_0}{E_L}$	LB	elastic	plastic
$\varepsilon_a \geq \frac{t}{2\rho} + \frac{\sigma_0}{E_L}$	LC	plastic	plastic

Table 2 Three possible deformation patterns: $S_P \leq 1$

valid range	ID	stress state	
		inner	outer
$0 \leq \varepsilon_a \leq \frac{\sigma_0}{E_L} - \frac{t}{2\rho}$	SA	elastic	elastic
$\frac{\sigma_0}{E_L} - \frac{t}{2\rho} \leq \varepsilon_a \leq \frac{\sigma_0}{E_L} + \frac{t}{2\rho}$	SB	elastic	plastic
$\varepsilon_a \geq \frac{\sigma_0}{E_L} + \frac{t}{2\rho}$	SC	plastic	plastic

발생되는 과정을 모멘트와 곡률의 관계를 이용하여 도식적으로 나타내었으며, 최종적으로 금형 취출시 모멘트가 소멸됨에 따른 탄성회복 곡률이 컬임을 나타내고 있다.

Fig. 4는 굽힘, 펴짐(회복), 제하 과정동안의 모멘트와 곡률의 관계로부터 컬을 도식적으로 나타내었다. 여기에서 아래 첨자 f 는 굽힘-신장 과정을 나타내고, 아래 첨자 s 는 펴짐-신장(회복) 과정

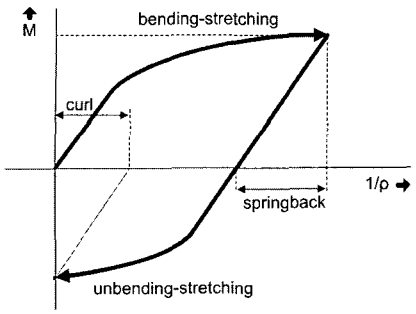

Fig. 3 Moment-curvature diagram for loading and unloading

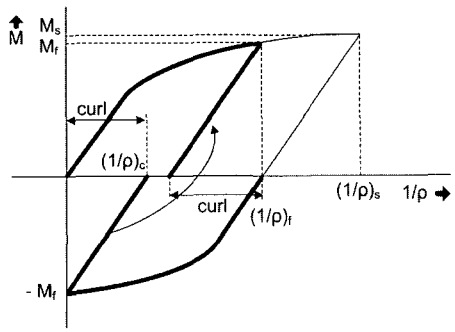

Fig. 4 Curl in moment-curvature diagram

을 나타낸다. 인장과 굽힘시의 모멘트-곡률 관계가 동일하다는 가정을 하면 펴짐-신장(unbending-stretching) 과정의 모멘트-곡률 곡선을 굽힘-신장(bending-stretching) 과정의 곡선과 동일시하여 중첩하여 나타낼 수 있다. 즉, 펴짐-신장(unbending-stretching) 곡선에서 컬은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_c = \left(\frac{1}{\rho}\right)_f - \frac{12 \cdot M_f}{E \cdot t^3} \tag{4}$$

굽힘-신장(bending-stretching) 과정에서 컬은 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$Curl = \left(\frac{1}{\rho}\right)_s - \frac{12 \cdot M_s}{E \cdot t^3} - \left(\frac{1}{\rho}\right)_c \tag{5}$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 최종적으로 식 (6)의 컬 예측식을 얻을 수 있다.

$$Curl = \left(\frac{1}{\rho}\right)_s - \left(\frac{1}{\rho}\right)_f - \frac{12 \cdot (M_s - M_f)}{E \cdot t^3} \tag{6}$$

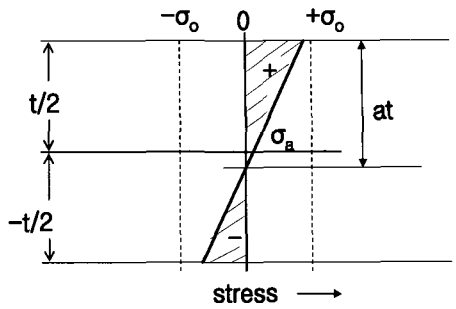

Fig. 5 Stress distribution for deformation pattern 'SA'

M_s 와 M_f 는 6 가지의 변형양상에 대한 모멘트-곡률 관계식을 이용하여 해당 곡률반경 및 변수 값 들을 대입하여 구하고 이를 식 (6)에 대입하여 컬을 계산한다.

모멘트(M)와 장력(T)의 값은 Table 1 과 Table 2 에 나타내어진 각각의 변형양상에 따라 응력요소를 적분함으로써 구해진다.

Fig. 5 는 내부와 외부 표면 모두 탄성일 때의 변형패턴(SA)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \left[\frac{E}{\rho}\left(\frac{2a-1}{2}\right) \cdot t + \frac{E}{\rho} \cdot y \right] \cdot dy = \frac{E(2a-1) \cdot t^2}{2\rho} \tag{7}$$

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \left[\frac{E}{\rho}\left(\frac{2a-1}{2}\right) \cdot t + \frac{E}{\rho} \cdot y \right] \cdot y \cdot dy = \frac{E}{3\rho}\left[\frac{t^3}{8} - \left(-\frac{t^3}{8}\right)\right] = \frac{E \cdot t^3}{12\rho} \tag{8}$$

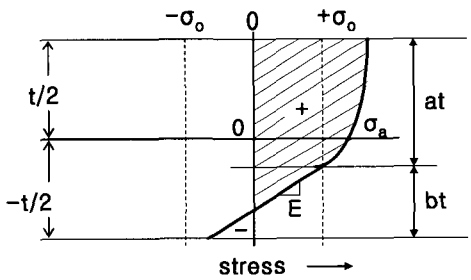

Fig. 6 Stress distribution for deformation pattern 'SB'

Fig. 6 은 내부표면이 탄성, 외부표면이 소성일때의 변형패턴(SB)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T=\int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot dy+\frac{1}{2}\cdot\sigma_0^2\cdot\frac{\rho}{E}+\frac{1}{2}\left(\sigma_0-\frac{E\cdot b\cdot t}{\rho}\right)\cdot\left(bt-\frac{\sigma_0\cdot\rho}{E}\right)$$
$$=\frac{\rho\cdot K}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}-\frac{E\cdot b^2\cdot t^2}{2\rho}+\sigma_0\cdot b\cdot t \quad (9)$$

$$M=\int_{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot y\cdot dy+\int_{\frac{t}{2}}^{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}\left\{\frac{E}{\rho}\cdot y+\sigma_0-\left(\frac{2b-1}{2}\right)\cdot\frac{t\cdot E}{\rho}\right\}\cdot y\cdot dy$$
$$=\frac{K\cdot\rho^2}{n+2}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+2}\right\}$$
$$-\frac{K\cdot\rho^2\cdot\varepsilon_a}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}$$
$$+\frac{E}{3\rho}\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^3\cdot t^3+\frac{t^3}{8}\right]+\frac{\sigma_0}{2}\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^2\cdot t^2-\frac{t^2}{4}\right]$$
$$-\left(\frac{2b-1}{4}\right)\cdot\frac{E\cdot t}{\rho}\cdot\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^2\cdot t^2-\frac{t^2}{4}\right] \quad (10)$$

(단, K : 강도계수, n : 가공경화지수이다.)

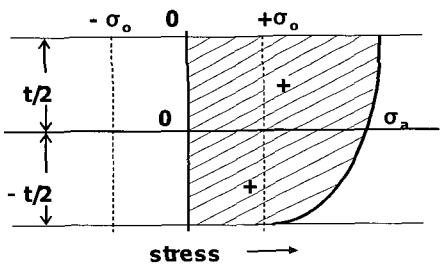

Fig. 7 Stress distribution for deformation pattern 'SC'

Fig. 7 은 내부와 외부 표면 모두 소성일때의 변형패턴(SC)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T=\int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot dy=\int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}}K\cdot\left(\frac{y}{\rho}+\varepsilon_a\right)^n\cdot dy$$
$$=\frac{\rho\cdot K}{n+1}\cdot\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}\right] \quad (11)$$

$$M=\int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot y\cdot dy=\int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}}K\cdot\left(\frac{y}{\rho}+\varepsilon_a\right)^n\cdot y\cdot dy$$
$$=\frac{\rho^2\cdot K}{n+2}\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2}-\left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2}\right]$$
$$-\frac{\rho^2\cdot K}{n+1}\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}\right] \quad (12)$$

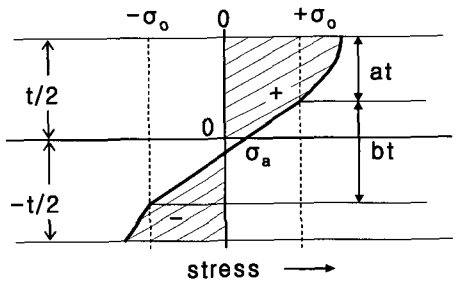

Fig. 8 Stress distribution for deformation pattern 'LA'

Fig. 8 은 내부와 외부 표면 모두 탄성일때의 변형패턴(LA)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T=\int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot dy+\frac{1}{4}\cdot\sigma_0\cdot b\cdot t-\frac{1}{4}\cdot\sigma_0\cdot b\cdot t-\int_{\frac{2a+2b-1}{2}t}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot dy$$
$$=\frac{\rho\cdot K}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}$$
$$-\frac{\rho\cdot K}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}-\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(2a+2b-1)\cdot t}{2\rho}-\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\} \quad (13)$$

$$M=\int_{\left(\frac{1-2a}{2}\right)t}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot y\cdot dy+\int_{\left(\frac{1-2a-2b}{2}\right)t}^{\frac{t}{2}}\sigma\cdot y\cdot dy$$
$$+\int_{\left(\frac{1-2a-2b}{2}\right)t}^{\left(\frac{1-2a}{2}\right)t}\left[\frac{2\cdot\sigma_0\cdot y}{b\cdot t}+\sigma_0\left(\frac{b+2a-1}{b}\right)\right]\cdot y\cdot dy$$
$$=\frac{\rho^2\cdot K}{n+2}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+2}\right\}$$
$$-\frac{K\cdot\rho^2\cdot\varepsilon_a}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}$$
$$+\frac{2\cdot\sigma_0}{3\cdot b\cdot t}\left(\frac{1}{2}-a\right)^3\cdot t^3+\frac{\sigma_0\cdot(b+2a-1)}{2b}\cdot\left(\frac{1-2a}{2}\right)^2\cdot t^2$$
$$-\frac{2\cdot\sigma_0}{3\cdot b\cdot t}\left(\frac{1}{2}-a-b\right)^3\cdot t^3-\frac{\sigma_0(b+2a+1)}{2b}\cdot\left(\frac{1-2a-2b}{2}\right)^2\cdot t^2$$
$$+\frac{\rho^2\cdot K}{n+2}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}-\varepsilon_a\right)^{n+2}-\left[\frac{(2a+2b-1)\cdot t}{2\rho}-\varepsilon_a\right]^{n+2}\right\}$$
$$-\frac{K\cdot\rho^2\cdot\varepsilon_a}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}-\varepsilon_a\right)^{n+1}-\left[\frac{(2a+2b-1)\cdot t}{2\rho}-\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\} \quad (14)$$

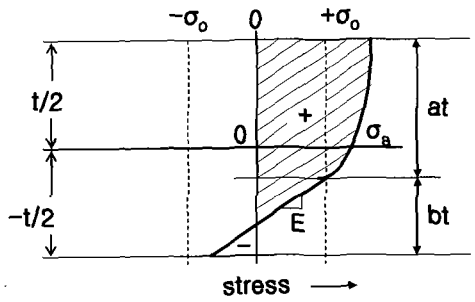

Fig. 9 Stress distribution for deformation pattern 'LB'

Fig. 9 는 내부표면이 탄성, 외부표면이 소성일때의 변형패턴(LB)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T = \int_{\frac{t}{2}-at}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot dy + \frac{1}{2}\cdot\sigma_0^2\cdot\frac{\rho}{E} + \frac{1}{2}\left(\sigma_0 - \frac{E\cdot b\cdot t}{\rho}\right)\cdot\left(bt - \frac{\sigma_0\cdot\rho}{E}\right)$$
$$= \frac{\rho\cdot K}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1} - \left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}$$
$$-\frac{E\cdot b^2\cdot t^2}{2\rho} + \sigma_0\cdot b\cdot t \qquad (15)$$

$$M = \int_{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}^{\frac{t}{2}} \sigma\cdot y\cdot dy$$
$$+ \int_{\frac{t}{2}}^{\left(\frac{1}{2}-a\right)t}\left\{\frac{E}{\rho}\cdot y + \sigma_0 - \left(\frac{2b-1}{2}\right)\cdot\frac{t\cdot E}{\rho}\right\}\cdot y\cdot dy$$
$$= \frac{K\cdot\rho^2}{n+2}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2} - \left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+2}\right\}$$
$$-\frac{K\cdot\rho^2\cdot\varepsilon_a}{n+1}\left\{\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1} - \left[\frac{(1-2a)\cdot t}{2\rho}+\varepsilon_a\right]^{n+1}\right\}$$
$$+\frac{E}{3\rho}\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^3\cdot t^3 + \frac{t^3}{8}\right] + \frac{\sigma_0}{2}\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^2\cdot t^2 - \frac{t^2}{4}\right]$$
$$-\left(\frac{2b-1}{4}\right)\cdot\frac{E\cdot t}{\rho}\cdot\left[\left(\frac{1-2a}{2}\right)^2\cdot t^2 - \frac{t^2}{4}\right] \qquad (16)$$

Fig. 10은 내부와 외부 표면 모두 소성일때의 변형패턴(SC)을 나타내며, 이러한 변형패턴 하에서의 장력(T)과 모멘트(M)는 다음과 같다.

$$T = \int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma\cdot dy = \int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} K\cdot\left(\frac{y}{\rho}+\varepsilon_a\right)^n\cdot dy$$
$$= \frac{\rho\cdot K}{n+1}\cdot\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1} - \left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}\right] \qquad (17)$$

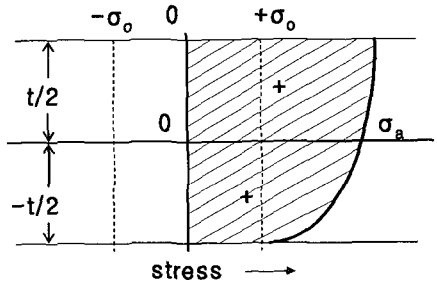

Fig.10 Stress distribution for deformation pattern 'LC'

$$M = \int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma\cdot y\cdot dy = \int_{\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} K\cdot\left(\frac{y}{\rho}+\varepsilon_a\right)^n\cdot y\cdot dy$$
$$= \frac{\rho^2\cdot K}{n+2}\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2} - \left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+2}\right]$$
$$-\frac{\rho^2\cdot K}{n+1}\left[\left(\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1} - \left(-\frac{t}{2\rho}+\varepsilon_a\right)^{n+1}\right] \qquad (18)$$

굽힘 모멘트를 기초로 한 모멘트모델에서 장력 T 와 모멘트 M 에 나타난 임의의 독립변수인 a, b 의 값은 장력 T 에 의해서 구하여져 굽힘모멘트의 계산에 적용된다. 변형률값이 탄성범위일 때 장력 T 는 식 (19)로, 소성범위일때 장력 T 는 식 (20)으로 나타내어진다.

$$T = t\sigma_a = tE\varepsilon_a \qquad (19)$$

$$T = t\sigma_a = tK(\varepsilon_a)^n \qquad (20)$$

3. 결 론

모멘트-곡률 관계를 기초로 한 컬 예측 모델을 6 개의 다른 변형양상을 가정하여 구한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 재료물성과 굽힘형상에 의해 결정되는 스프링백 인자를 정의하고 스프링백 인자별로 6 가지의 가능한 변형패턴을 제시하였다.

(2) 제시된 변형패턴별로 모멘트-곡률관계를 기초로 컬 예측 모델을 개발하였다.

(3) 컬 예측모델은 인장-굽힘변형시 가해진 응력 및 항복강도, 탄성계수, 굽힘반경, 굽힘 각, 판재 두께 등이 컬 발생에 영향을 미침을 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 부산대학교 국가핵심연구센터의 연구비 일부지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] H. Ryutaro, G. Yoshihiro, Y. Fusahito, 2003, Springback of sheet metal laminates in draw-bending, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 341~347.

[2] R. G. Davies, 1984, Sidewall curl in high strength steels, Journal of Applied Metalworking, Vol. 3, pp. 120~126.

[3] 장성호, 허영무, 서대교, 2003, U 드로오 벤딩에서의스프링백 예측을 위한 이론적 단순화, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 125~131.

[4] Z. T. Zhang, D. Lee, 1995, Effects of process variables and material properties on the springback behavior of 2D-draw bending parts, SAE Technical Paper 950692.

[5] Y. C. Liu, 1988, The effect of restraining force on shape deviations in flanged channels, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 389~394.

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

[7] T. B. Hilditch, D. K. Matlock, B. S. Levy, J. F. Siekirk, 2004, Experimental evaluation of curl and tensile properties of advanced high strength sheet steels, SAE Technical Paper 2004-01-1045.

[8] Z. T. Zhang, D. Lee, 1995, Development of a new model for plane strain bending and springback analysis, J. of Materials Engineering and Performance, Vol. 14, pp. 291~300.

[9] 주병돈, 박현규, 김동우, 문영훈, 2007, 박판성형시 컬 예측모델 개발(II)-실험적 검증, 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 6 호, pp. 438~442.