

## U 드로오 벤딩에서의 스프링백 예측을 위한 이론적 단순화

장성호\*·허영무\*\*·서대교\*\*\*

### A Simplified Approach for Predicting Springback in U-Draw Bending of Sheet Metals

S.H. Chang, Y.M. Heo, and D.G. Seo

#### Abstract

The U-draw bending operation is known as a representative test method for springback evaluation of sheet metals since the sheet in U-draw bending operation undergoes stretching, bending and unbending deformations occurred at read stamping process. In this study, a simplified approach was proposed for predicting springback and side-wall curls in U-draw bending operations, using moment-curvature relationships derived for sheets undergoing stretching, bending and unbending deformation.

**Key Words** : U-draw bending, side-wall curl, springback

#### 1. 서론

박판금속 성형에서 U-드로오 벤딩은 스프링백의 평가를 평가하는 대표적인 공정으로 알려져 있다. 스프링백(springback)은 재료가 금형에 의하여 강제 변형이 일어난 후 금형에서 추출되면서 구속이 사라지게 되어 새로운 정적 평형 상태를 만족하기 위하여 일부 탄성변형이 복원되어 일어나는 현상이다. 이러한 스프링백의 양에 영향을 미치는 인자로는 성형품의 기하학적인 형상변수와 재료 변수와 공정 변수 등이 있다. 공정변수의 경우에는 현재까지도 숙련된 기능공과 엔지니어의 경험, 시행착오 및 직관에 의하여 결정되고 있는 실정이다. 그리고, 재료변수의 경우에는 항복강도, 탄성계수, 재료의 두

께 등과 같은 것으로 복합적으로 박판의 스프링백의 양에 영향을 미치고 있어 스프링백을 예측하는 것은 쉽지 않다고 할 수 있다. 이러한 스프링백의 양을 정확하게 예측하기 위한 노력이 여러 학연과 생산현장에서 행해지고 있다.

본 연구실에서도 박판 금속의 스프링백 특성에 대한 연구를 위해 실험과 FEM 해석을 수행한 바 있으며, 그러한 연구의 연계로 U-드로오 벤딩에서 박판 금속의 스프링백량을 예측할 수 있는 이론적 단순화된 접근식의 필요성을 가지고 본 연구를 수행하였다. 이를 통해 스프링백 발생 원인과 특성을 역학적으로 해석하고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 스프링백에 영향을 미치는 여러 재료 변수들과 공정 변수에 대해 고찰하였다.

\* 성균관대 기계공학부 대학원

\*\* 한국 생산 기술 연구원

\*\*\* 성균관대 기계공학부, 책임저자

## 2. 이론적 수식화

### 2.1 스프링백

스프링백의 원리는 재료의 인장 시험에서 얻을 수 있는 응력-변형률선도에서 쉽게 설명될 수 있다. 성형 시 재료에 항복 강도 이상의 외력이 작용하여 Fig. 1에서 항복점 A를 지나 B점까지 변형시킬 경우 전체 변형률은 OD가 된다. 여기서 소성 변형률은 OC, 탄성에 의해 복원된 변형률은 CD이다. 이 복원된 탄성 변형률의 크기는 B점에서의 응력 $\sigma_B$ 와 재료의 탄성계수 E의 비로서 나타낼 수 있다.

Fig. 2는 단순 굽힘에서 스프링백을 나타내는 것으로 실선으로 나타낸 것이 성형 후 형상이며 이 때의 굽힘각을  $\theta_1$ , 곡률 반경을  $\rho_1$ , 호 끝단의 높이를 H라 하고, 점선으로 나타낸 것이 스프링백 이후의 형상으로 굽힘각이  $\theta_2$ , 곡률 반경이  $\rho_2$ , 호 끝단의 높이가 h로 변한다. 이때의 스프링백의 정도를 곡률 반경, 굽힘각, 끝단의 높이의 3가지 방법으로 측정하여  $K_S$ 와 %S. B.로 나타내며 이를 다음과 같이 구한다.<sup>(8)</sup>

$$K_S = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

$$\%S.B. = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \times 100 = \frac{\Delta\theta}{\theta_1} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{or } \%S.B. = \frac{H-h}{H} \times 100 = \frac{\Delta H}{H} \times 100$$

또한, 스프링백의 양에 대한 이론 식을 도출을 위하여 먼저 재료의 응력-변형률선도를 수식 화할 필요가 있다. 본 연구에서는 재료를 가공경화를 단순화하여 탄-선형경화소성재료로 가정하였으며, 항복점 이후의 가공경화에 의한 기울기를 P라 하면 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_y)$$

$$\sigma = Y + P(\varepsilon - \varepsilon_y) \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_y, \varepsilon_y = Y/E) \quad (2)$$

### 2.2 U-드로오 벤딩에서의 스프링백

U-드로오 벤딩 가공은 박판 금속을 강체 다이 블록(rigid die block, 이하 다이)과 블랭크 홀더(blank holder) 사이에 위치시키고 적당한 압력을 가해 고정시킨 후 펀치(punch)로 가압하여 바닥이 있는 성형품을 생

산해 내는 과정이다. Fig. 3에 나타낸 것이 드로잉 공정이며 이 공정을 2차원 상에서 구현하여 형상에 의한 구속을 제거하여 2차원적인 U-드로오 벤딩으로 가정하였다. 드로오 벤딩에서의 스프링백을 역학적으로 해석하기 위하여 블랭크의 두께가 곡률 반경에 비하여 상대적으로 작은 경우 다음과 같은 가정을 사용할 수 있다.

- 1) 블랭크의 횡단면의 치수, 형상이 드로오 벤딩 공정에 의하여 변하지 않는다.
- 2) 블랭크의 횡단면은 중립 축에 대하여 직각을 유지한다. 중립 축은 이동하지 않는다.
- 3) 블랭크의 길이 방향의 요소들은 같은 곡률을 가지는 호를 따라 굽힘 변형된다.
- 4) 블랭크의 길이 방향의 응력만 발생하고, 두께 방향과 폭 방향의 응력은 발생하지 않는다.
- 5) 블랭크의 인장과 압축에서의 응력-변형률 선도는 일치한다.
- 6) 블랭크는 von Mises 항복조건을 따른다.
- 7) 블랭크는 탄-선형경화소성의 거동을 한다.

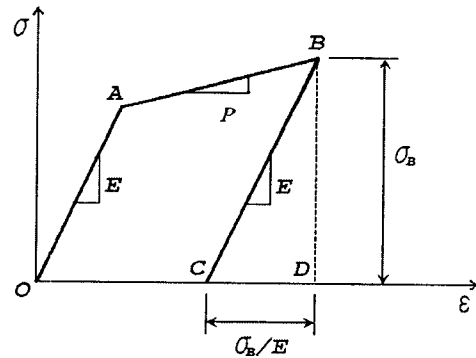


Fig. 1 Springback in  $\sigma$ - $\varepsilon$  curve for elastic-linear hardening plastic material

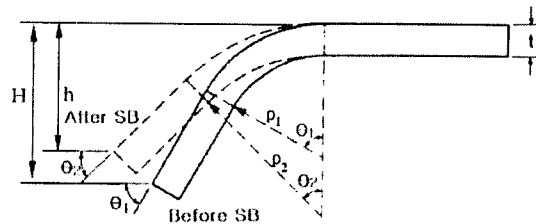


Fig. 2 Schematic diagram for springback of sheet

2차원 U-드로오 벤딩의 경우, Fig. 4와 같이 여러 구간으로 나누어 생각할 수 있으며, Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 블랭크의 각 구간은 다른 외력 상태에 놓이게 되어 다른 응력 상태를 가지게 된다. 따라서 U-드로오 벤딩에서의 박판 금속의 스프링백을 고찰하기 위하여 먼저 각 구간에서의 응력 상태를 규명할 필요가 있다. 우선 펀치 형상 반경 부의 마찰은 실제로 이 부분에서의 재료의 유동은 거의 일어나지 않으므로 무시할 수 있다. 그러나 다이 어깨 반경 부는 재료의 유입이 일어나는 부위이다. 따라서 마찰의 효과를 무시할 수 없다. 그러나 결과적으로 재료의 변형과 형상 반경 부의 마찰에 의하여 블랭크에 작용하는 장력은 블랭크 가압 부의 가압력에 의한 마찰로서 작용하는 마찰력과 평형을 이룬다고 볼 수 있다. 따라서 블랭크 폭이  $w$ 일 때, 블랭크 전반에 작용하는 단위 폭당 인장력( $T$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \mu \times \frac{2 \cdot B.H.F.}{w} \quad (3)$$

또한 성형 중  $T$ 는 변하지 않는다고 가정한다.

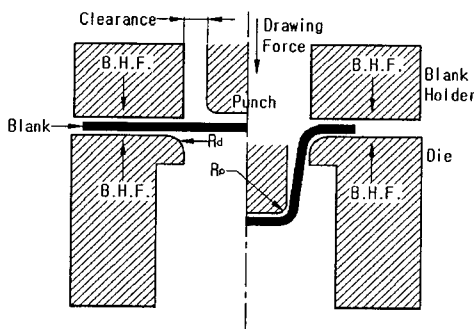


Fig. 3 Illustration of the U-draw bending process

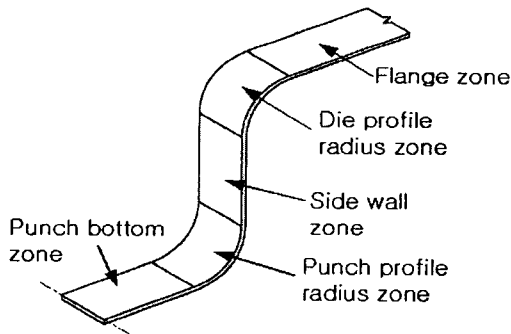


Fig. 4 Several zones of the blank for theoretical analysis

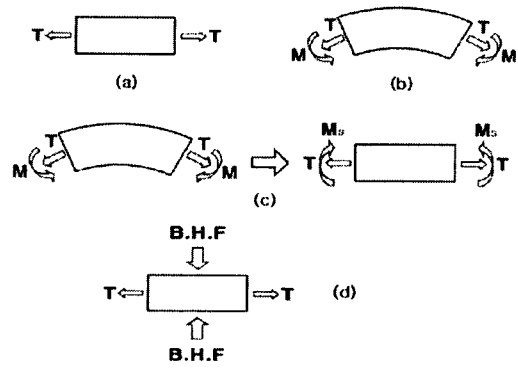


Fig. 5 Freebody diagram for the blank zones  
(a) Punch bottom zone  
(b) Punch & die profile radius zone  
(c) Sidewall zone  
(d) Flange zone

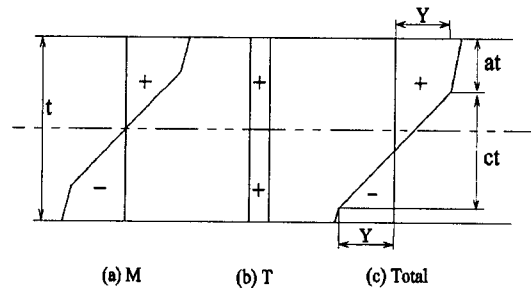


Fig. 6 Stress distribution through the thickness of the sheet metal under the plastic stretch-bend process ( $R \ll R_e$ )

(1) 펀치 바닥부

이 부분의 블랭크는 Fig. 5 (a)와 같이 단지 장력( $T$ )을 받으며 영구 변형을 일으키지 않는다고 볼 수 있으므로 강체로 가정한다.

(2) 펀치 형상 반경부 및 다이 어깨 반경부

펀치 형상 반경 부의 블랭크의 경우에는 Fig. 5 (b)에 서처럼 장력( $T$ )과 굽힘 모멘트( $M$ )에 의하여 굽힘 반경( $R$ )이 변형되는 구간이다. 이때,  $R$ 은 다음과 같다.

$$R = R_i + t/2 \quad (4)$$

여기서,  $R_i$ 는 공구의 반경을 의미한다. 또한 다이 어깨 반경부도 펀치 형상 반경 부와 같은 외력을 받으며 변형하게 된다. 따라서, 스프링백에 의하여 곡률 반경의 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

공구 반경 부의 응력 분포는 Fig. 6에 나타낸 바와 같

이 (a) 굽힘 모멘트(M)에 의한 응력과 (b) 장력(T)에 의한 응력에 의하여 (c)와 같이 응력 분포를 나타내게 된다.

이와 같은 경우 (c)에서의 응력 분포를 나타내는 함수를  $f$ 라 하여 나타내면

$$\sigma = f(Y, a, t, E, R, P) \quad (5)$$

라 할 수 있다.

또한 T와 M을  $\sigma$ 를 이용하여 나타내면

$$T = \int_{-t/2}^{t/2} f \cdot dy \quad (6)$$

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} f \cdot y \cdot dy \quad (7)$$

Fig. 6 (c)의 응력분포에서 인장력(T)을 구해보면

$$\begin{aligned} T &= Y \cdot a \cdot t + \frac{1}{2} \cdot P \cdot a^2 \cdot t^2 + \frac{1}{4} \cdot Y \cdot c \cdot t \\ &\quad - \frac{1}{4} \cdot Y \cdot c \cdot t - Y \cdot (1-a-c) \cdot t \\ &\quad - \frac{1}{2} \cdot P \cdot (1-a-c)^2 \cdot t^2 \\ &= (2a+c-1)[Y \cdot t + \frac{1}{2} \cdot P \cdot t^2 \cdot (1-c)] \end{aligned} \quad (8)$$

또한, 이때 M을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M &= Y \cdot a \cdot t \cdot (\frac{1}{2} - \frac{1}{2}a) \cdot t \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot P \cdot a^2 \cdot t^2 \cdot (\frac{1}{2} - \frac{a}{3}) \cdot t \\ &\quad + (a + \frac{1}{2}c - \frac{1}{2}) \cdot t \cdot \frac{2Y}{ct} \cdot \frac{(\frac{1}{2} - a)^2 \cdot t^2}{2} \\ &\quad + [Y - (a + \frac{1}{2}c - \frac{1}{2}) \cdot t \cdot \frac{2Y}{ct}] \cdot \frac{(\frac{1}{2} - a)^2 \cdot t^2}{3} \\ &\quad - (a + \frac{1}{2}c - \frac{1}{2}) \cdot t \cdot \frac{2Y}{ct} \cdot \frac{(a + \frac{1}{2}c - \frac{1}{2})^2 \cdot t^2}{6} \\ &\quad + Y \cdot \frac{1}{4}c \cdot t \cdot (a + \frac{1}{2}c - \frac{1}{2} + \frac{1}{3}c) \cdot t \\ &\quad + Y \cdot (1-a-c) \cdot t \cdot (\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}a + \frac{1}{2}c) \cdot t \\ &\quad + \frac{P}{2} \cdot t^2 \cdot (1-a-c)^2 \cdot (\frac{a}{3} + \frac{c}{3} + \frac{1}{6}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서  $c$ 는 초기 조건과 기하학적 형상에 의하여 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$c = \frac{2 \cdot Y \cdot R}{E \cdot t} \quad (10)$$

또, 식(10)을 식(8)식에 대입하고 미지수  $a$ 에 대하여 다시 정리하여 다음과 같이 구한다.

$$a = \frac{T + (1 - \frac{2YR}{Et}) \cdot [Yt + \frac{1}{2}Pt^2 \cdot (1 - \frac{2YR}{Et})]}{2 \cdot [Yt + \frac{1}{2}Pt^2 \cdot (1 - \frac{2YR}{Et})]} \quad (11)$$

결국, T의 인장력이 작용하는 블랭크를 R의 곡률 반경

으로 굽혔을 경우 작용하는 굽힘 모멘트는 식((10),(11)을 최종적으로 식(9)에 대입하여 구할 수 있다.

다음으로 R의 곡률 반경으로 굽혀진 블랭크에 외력(M, T)을 제거하게 되면 스프링백이 발생하게 되는데 이는 재료의 탄성 거동에 의하여 발생한다. 따라서 굽힘 모멘트(M)와 곡률 반경의 관계를 식(12)과 같이 탄성 영역에서의 적용 식으로 생각할 수 있다.

$$M = \frac{I \cdot E}{R} \quad (12)$$

이 식에서 M의 변화에 따른 R의 변화는

$$\Delta M = E \cdot I \cdot \Delta(\frac{1}{R}) \quad (13)$$

이고, 굽힘 후 금형을 제거하는 것은 최초에 가해진 M이 제거된다고 생각할 수 있으므로

$$\Delta M = 0 - M = -M \quad (14)$$

와 같다. 따라서, 곡률 반경의 변화는

$$\Delta(\frac{1}{R}) = -\frac{1}{E \cdot I} \cdot M \quad (15)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 블랭크의 단위 폭에 해당하는 단면 2차 관성모멘트 I는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I = \frac{w \cdot t^3}{12} = \frac{t^3}{12} \quad (16)$$

결국, 식(15)은

$$\Delta(\frac{1}{R}) = \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R} = -\frac{12}{E \cdot t^3} \cdot M = \Delta\theta \quad (17)$$

이다. 따라서, 앞서 % 스프링백을 구하는 식(1)에 식(17)을 대입하면 스프링백량을 정량적으로 계산할 수 있다. 또 식(20)에서  $1/R$ 은  $k$ (곡률)이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_s - k = -\frac{12}{E \cdot t^3} \cdot M \quad (18)$$

여기서,  $R_s$ 와  $k_s$ 는 스프링백 발생 후의 값이다.

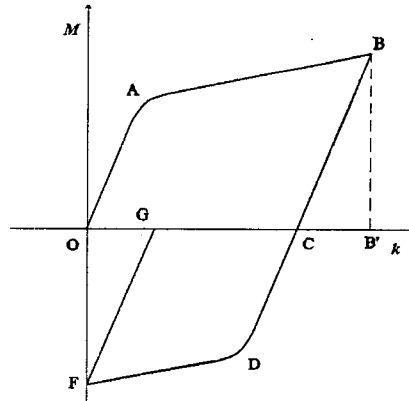


Fig. 7 Moment-curvature relationship for the sidewall zone of the sheet metal under U-draw bending process

(3) 옆벽부

옆벽 부의 블랭크는 Fig. 6의 (c)에서처럼 다이 어께 반경 부에서 곡률 반경 R로 굽힘을 받은 후 옆벽 부로 진입하면서 장력(T)과 역굽힘 모멘트(Ms)를 받아 편평해진다. Fig 7에서 블랭크의 옆벽 부의 휨을 설명하는 모멘트-곡률 선도를 나타내었다.<sup>12)</sup> 블랭크가 다이 어께 반경 부를 지날 때는 O에서 시작하여 A를 지나 B의 위치에 있으며 옆벽 부에 진입하여 편평해질 때는 C, D를 지나 F에 이른다. 이후 외력에 제거되면 G로 위치하며 이 OG만큼의 곡률이 옆벽 부의 휨으로 나타난다. OABC의 과정은 형상 반경부, 특히 다이 어께 반경부이므로 앞서 다룬 내용이다. 여기에 CDFG의 과정에 의한 스프링백을 추가로 고찰하면 옆벽 부의 휨을 역학적으로 예측할 수 있다. CDFG의 과정은 ks(Fig. 7에서 OC의 크기)의 곡률을 가지는 블랭크를 ko(=0)로 편평화시키는 것이나 역으로 생각하면 평판을 ks로 굽히는 공정으로 생각할 수 있다. 이는 형상 반경 부의 스프링백과 같이 생각할 수 있다. 따라서 다음과 같이 정리할 수 있다. R 변수를 갖는 식(10)에 Rs 값을 R 대신 대입하여 형상 반경 부에서 % 스프링백을 구하던 방법대로 구하면 된다.

$$k_F - k_O = k_F - 0 = -\frac{12}{E \cdot t^3} \cdot M(Rs) \quad (19)$$

결국, 식(19)에 의해 구해진 옆벽 부의 곡률(k<sub>F</sub>)로부터 최종 옆벽부의 곡률 반경(R<sub>F</sub>)를 구할 수 있다.

(4) 플랜지부

이 부분의 블랭크는 Fig. 6 (d)에서처럼 장력(T)과 가압력(B.H.F.)이 작용하며 어느 정도 변형이 발생하나 플랜지 길이방향의 탄성 신장만 발생하므로 변화가 없다고 가정하였다.

3. 결과

U-draw bending의 스프링백을 예측하기 위한 단순화된 이론적 계산식(식(17),(18)을 이용한 식(1))에 사용하여 스프링백량을 계산하였다. 사용된 데이터는 기존연구의 연구결과들과 비교하기 위하여 기존연구에서의 실험 조건에 상응하도록 하였다.<sup>(6),(7)</sup> Table 1에 계산에 사용된 재료의 기계적 특성 값들과 공정변수들을 나타내었다.

3.1 펀치 형상 반경부 및 다이 어께 반경부

Fig. 8은 적용한 판재들에 대한 데이터를 이용해 공구 반경 변화에 따른 계산된 % 스프링백의 변화를 나타내

고 있다. 기존연구에서와 같이 TRIP60은 SCP1에 비해 스프링백량이 현저하게 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, SCP1의 경우, 두께가 두꺼워질수록 스프링백량도 줄어드는 경향을 잘 예측하고 있다. 그리고, 모든 경우에서 공구형상반경이 증가할수록 스프링백량도 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9에 각 판재별로 블랭크가압력(B.H.F.)이 변화에 따른 스프링백량은 나타내었다. SCP1종의 0.8t의 경우에 블랭크가압력이 증가함에 따라 스프링백량이 감소하는 경향이 다른 비교 재료들보다 뚜렷하게 나타났다.

Table 1 Mechanical properties of applied specimen and conditions of U-draw bending

Material	SCP1			TRIP60
	0.8	1.2	1.6	
Thickness (mm)	0.8	1.2	1.6	1.0
Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	16.2			44.35
Young's Modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	20250			22730
Plastic coefficient (kgf/mm <sup>2</sup> )	83.496			119.44
Friction coefficient	0.241			0.256
Blank holding force (B.H.F., kgf)	125, 250, 500			
Tool profile radius (mm)	3, 5, 6, 9, 10, 15			

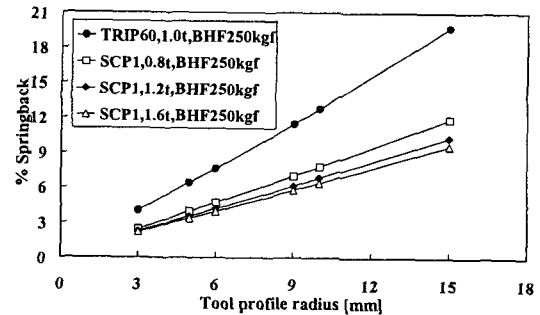


Fig. 8 calculated % Springback for the various tool profile radius

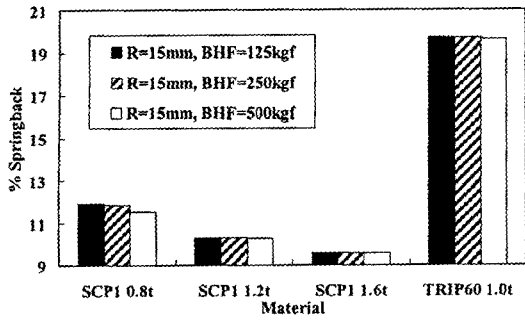


Fig. 9 Calculated % springback for the various blank holding forces and the various materials

Fig. 10에서 13까지의 그림에서는 본 연구에 적용된 재료 변수들이 각각 스프링백량에 독자적으로 어떤 영향을 주는 지를 보여주고 있다. 여기에서 R/t는 굽힘비 (bend ratio)를 나타내며, 모든 그래프를 보면 굽힘비가 증가할수록 스프링백량이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이, 탄성계수가 증가함에 따라 스프링백량이 감소한다는 것을 알 수 있다. Fig. 11을 보면, 항복강도가 증가할수록 스프링백량도 크게 증가한다는 것을 잘 알 수 있다. Fig. 12에서는 블랭크가압력을 100 kgf에서 SCP1종 0.8t의 탄성 한계 블랭크 가압력 직전의 값인 1000kgf까지 변화시켜 스프링백량에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, BHF에 의해 발생하는 인장력의 크기가 탄성 한계 인장력에 가까워질수록 스프링백량은 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 13에서는 소성계수가 증가하면 스프링백량도 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10에서 13까지의 그림을 분석해 보면, 다른 재료 변수들의 변화에 비해 항복강도의 변화가 스프링백량 변화에 미치는 영향이 크다고 판단되어진다.

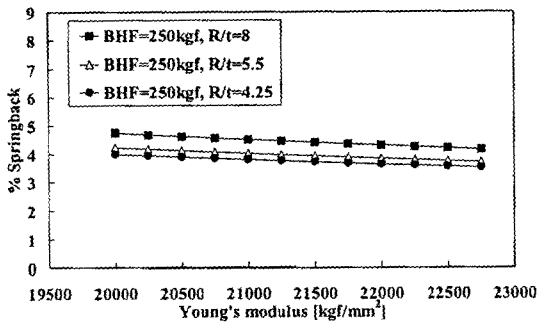


Fig. 10 Calculated % springback for the various Young's modulus

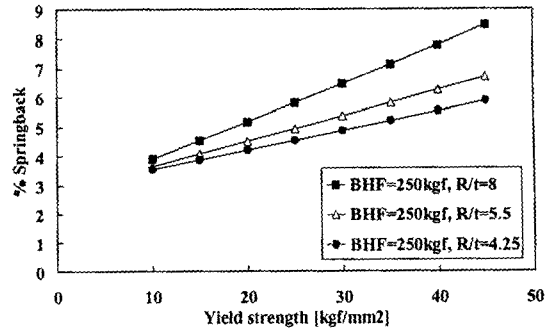


Fig. 11 Calculated % springback for the various yield strengths

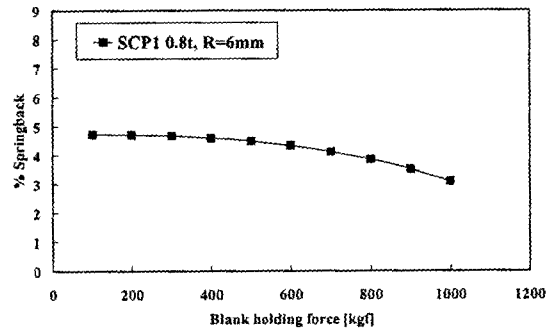


Fig. 12 Calculated % springback for the various blank holding forces

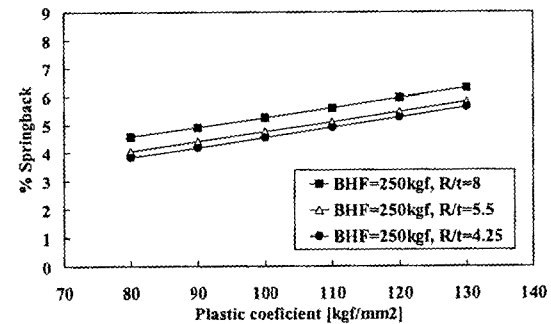


Fig. 13 Calculated % springback for the various plastic coefficients

### 3.2 옆벽부

옆벽부의 힘을 단순화된 이론식을 이용하여 계산된 스프링백 이후 곡률 반경의 결과는 다음과 같다.

Fig. 14에는 다이 어깨 반경 변화에 따른 옆벽부의 스프링백 이후 곡률 반경 변화를 나타내었다. 그림을 보면, 모든 판재에 대해서 반경이 증가할수록 스프링백 이후 곡률 반경도 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, TRIP60강판의 경우에는 전체적으로 공구 반경에 상관없

이 SCP1종 강판에 비해 큰 휨(curl)이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 블랭크 가압력의 변화에 따른 스프링백 이후 곡률 반경 변화를 나타내고 있다. 여기에서는, TRIP60, SCP1 1.2t와 1.6t의 경우에, 증가하는 경향을 나타냈으나 그 정도는 아주 미비하였다. 그러나, SCP1 0.8t의 경우는 다른 판재보다는 증가하는 정도가 크게 나타났다. 이는 적용된 B.H.F.의 값에 의한 인장력이 다른 판재의 경우에는 아주 작은 값인데 비해 SCP1 0.8t의 경우에는 상대적으로 큰 값이기 때문이다.

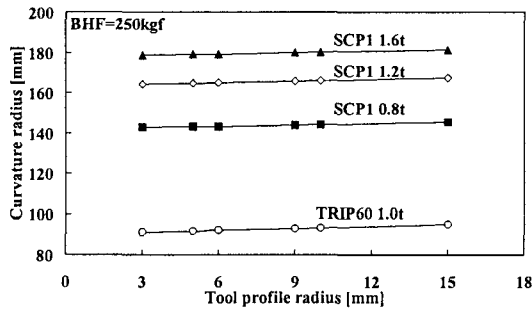


Fig. 14 Calculated side-wall curvature radius for the various tool profile radii

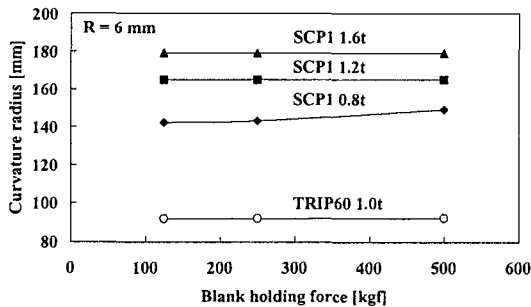


Fig. 15 Calculated side-wall curvature radius for the various blank holding forces

#### 4. 결론

지금까지 U-드로오 벤딩시 박판 금속의 스프링백의 정도를 계산 예측할 수 있는 단순화된 이론식을 제시하여 그 이론식으로 스프링백량의 계산을 수행하여 결과를 검토하였다.

정량적으로 실험 결과와 비교 검토하는 것은 향후 연구에 지속할 것이며 본 연구에서 제시된 단순화된 이론식을 사용하여 예측한 스프링백 계산 결과는 기존연구에서 제시된 바 있는 각 재료 변수 변화에 대해 스프링백량의 변화 경향을 잘 예측한다고 판단되어진다.

#### 참고 문헌

- (1) T. Uemori, T. Okada, F. Yoshida, 1998, "Simulation of Springback in V-bending Process by Elasto-Plastic finite Element Method with consideration of Bauschinger Effect", METALS AND MATERIALS, Vol. 4, No. 3, pp. 311~314.
- (2) F. Pourboghra, E. Chu, 1995, "Prediction of spring-back and side-wall curl in 2-D draw bending", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 31~374.
- (3) M. J. Finn, P. C. Galbraith, L. Wu, J. O. Hallquist, L. Lum, T. -L. Lin, 1995, "Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 395~409.
- (4) 양동열, 이상욱, 윤정환, 유동진, 1999, "박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp. 22~28.
- (5) 이호용, 황병복, 1994, "3점 굽힘에서의 스프링백에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제3권 제4호, pp. 401~414.
- (6) 김성환, 신장모, 장성호, 서대교, 2001, "차체 성형용 판재의 U벤딩시의 스프링백에 관한 연구", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 66~70.
- (7) 이상무, 장성호, 최이천, 허영무, 서대교, 2001, "박판의 온간 2차원 드로오 벤딩에서의 스프링백", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 75~80.
- (8) William Wing-Leung Tse, B. Eng., 1985, Mechanics of Bending And Springback of Sheet Metal, A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Engineering, McMaster Univ.