

개선된 굽힘시험장치를 이용한 스프링백 비의 측정 Measurement of Springback Ratio Using a Bend Rig

김용우(순천대학교 기계자동차공학부),
공성일(순천직업전문학교), 남진영(순천대학교 대학원)

Abstract

A winding bend rig is designed to overcome the drawbacks of the conventional bend rig for measuring springback ratio of a strip or plate. Using the present bend rig, springback ratios are measured and they are compared with ones that obtained by using simple beam theory and tensile test. Theoretically, there should be no difference between the two values as far as the simple beam theory holds true for the bending test. But, within the scope of our tests, there is a difference of 5% between the two values since the specimen under bend test is subjected to a transverse shear force and friction force on the surface of the specimen.

1. 서 론

판재성형(sheet forming)은 소성변형을 이용하는 가공으로서 대부분 굽힘 변형을 포함하고 있다. 굽힘가공은 인장력이나 압축력의 부가, 또는 롤포밍(roll forming) 등을 제외하면 대체로 다음의 세 가지로 대별할 수 있다. 첫째, 눌러 굽힘(press bending) 방식은 한 쌍의 펀치와 다이에 의한 형굽힘(die bending)으로 판재의 프레스 가공에 많이 사용된다. 둘째, 감아 굽힘(winding bend) 방식은 재료의 한쪽 끝을 고정시키고 고정된 형의 표면을 따라 이동하는 공구로 재료를 감아 성형하는 가공으로 판이나 형재의 굽힘에 자주 사용된다. 셋째, 보내기 굽힘(roll bending)은

재료를 세 개의 롤 사이로 통과시키면서 재료를 연속적으로 굽히는 방식으로 주로 두꺼운 판을 일정한 곡률로 굽힐 때 사용된다.

제품이나 판재의 굽힘가공시 하중이 제거된 뒤 부품형상의 뒤틀림 또는 치수의 변화를 유발할 수 있는 탄성복원에 의한 응력변화를 미리 예측하여, 원하는 형상으로 성형하기 위해서는 재료의 스프링백 비를 고려해야 한다^[1-5].

본 연구에서는, 재료의 스프링백 비를 정확히 측정하기 위하여 기존의 감아굽힘 실험장치^[4,6]의 문제점을 보완하여 SK5 M (탄소공구강) 판재의 스프링백 비를 측정하였다. 또한 보의 굽힘 이론을 채용하여 스프링백 비를 계산하기 위해 인장실험을 실시하였다. 그리고 굽힘시험으로부터 얻은 결과를 보 이론에 의한 스프링백 비와 비교하였다.

2. 이론적 배경

본 연구의 굽힘 실험 결과를 해석하기 위하여 단순 보 이론을 사용한다^[2,3]. 순수굽힘의 경우, 인장력이 걸리는 두께 t 인 직선보의 최외곽에서 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.5t/R \quad (1)$$

여기서 R 은 중립축의 곡률 반경이다.

Fig. 1과 같이 직선보를 반경 R_p 인 받침대 위에 놓고 소성변형이 발생하도록 하중을 가하여 보의 굽힘각이 θ_1 으로, 중립축의 곡률 반경이 R_1 으로 되었다면, 식(1)의 최외곽 변형률은 R_1 또는 R_p 를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

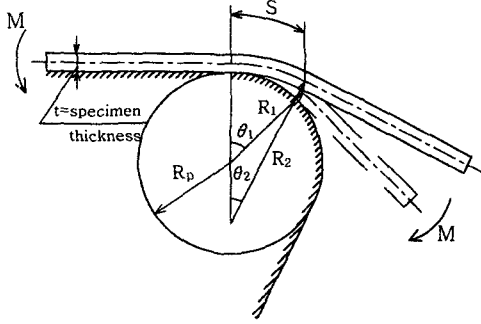


Fig. 1 Springback of sheet and plate, where

R_p = Radius of supporting block

R_1 = Radius of curvature before unloading

R_2 = Radius of curvature after unloading

θ_1 = Bend angle before release of load

θ_2 = Bend angle after release of load

S = Length of bend

$$\varepsilon = \frac{0.5t}{R_1} = \frac{0.5t}{R_p + 0.5t} \quad (2)$$

$$\text{or } \frac{R_p}{t} = \frac{1}{2\varepsilon} - 0.5 \quad (3)$$

보의 굽힘각이 θ_1 이고 중립축의 곡률 반경이 R_1 인 상태에서, 하중을 제거하면 스프링백 현상에 의해 보의 굽힘각은 θ_2 로, 중립축의 곡률반경은 R_2 로 된다. 이 때, 중립축의 굽힘 길이 (length of bend)를 S 라고 하면 다음의 관계식이 성립된다.

$$S = R_1\theta_1 = R_2\theta_2 \quad (4)$$

식(4)로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\Delta\theta}{S} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 이다. 다시 식(5)는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta\theta}{S} = \frac{2\varepsilon_1}{t} - \frac{2\varepsilon_2}{t} = \frac{2\Delta\varepsilon}{t} \quad (6)$$

여기서 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 이다.

한편 스프링백 현상이 일어나는 과정에서의 응력-변형률 선도를 그려보면 Fig. 2와 같다. 즉,

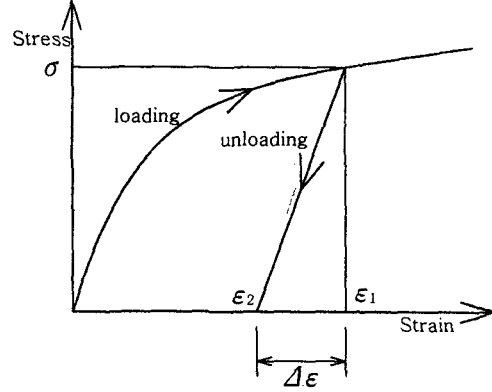


Fig. 2 Stress-strain curve before and after release of load

탄성계수(Young's modulus)가 E 인 보에 하중을 가하여 탄소성 변형(이 때의 변형률은 ε_1 이고 응력은 σ 이다)을 일으킨 다음, 하중을 제거하면 변형률은 ε_2 로, 응력은 영으로 된다. 즉,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 + \Delta\varepsilon \quad (7)$$

여기서 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 이다.

Fig. 2를 이용하여 보의 인장쪽 최외곽에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{Mt}{2I} / E = \frac{Mt}{2EI} \quad (8)$$

위 식에서 M 은 보에 가해진 굽힘 모멘트이고 I 는 단면이차모멘트이다. 식(8)을 식(7)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\Delta\theta}{S} = \frac{M}{EI} \quad (9)$$

다시 식(5)와 식(9)를 이용하여 다음의 관계를 얻는다.

$$\frac{\Delta\theta}{S} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{M}{EI} \quad (10)$$

$$\text{or } \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} - \frac{M}{EI} \quad (11)$$

스프링백 비(K)는 $K = R_1/R_2$ 과 같이 정의된다. 이 정의를 식(4)를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$K = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad (12)$$

또한 스프링백 비는 식(11)를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K=1-\frac{MR_1}{EI} \quad (13)$$

3. 실험 장치

3.1 외팔보형 굽힘실험장치

정찬건^[7]은 Photo. 1과 같이 시편을 감아 굽히는 방식을 택하였다. 시편이 일정한 곡률반경으로 굽혀지도록 받침대(supporting block)을 일정한 반경으로 가공하였다. 굽힘시편을 받침대 위에 고정시키고 만능시험기로 회전블록(rotating block)에 연결된 체인을 잡아당김으로써 회전블록과 일체로 된 굽힘 핀(bending pin)을 회전시켜 시편을 받침대에 감아 굽히도록 하였다.

3.2 개선된 굽힘실험장치

Photo. 1의 굽힘실험장치는 굽힘핀잡이(bending pin holder)를 외팔보 형식으로 설치한 것으로, 굽힘하중을 받으면 굽힘핀잡이의 자유단 쪽으로 갈수록 굽힘핀잡이의 처짐이 증가하는 경향을 보인다. 그리하여 시편이 균일한 반경으로 굽혀지지 않는다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 굽힘핀잡이를 양단에서 지지하는 형식의 굽힘실험장치(Photo. 2)를 제작하였다.

굽힘실험을 하는데 있어서 정확한 곡률반경을 유지하면서 굽히는 것이 매우 중요하다. 기존에는 받침대의 굽힘반경을 밀링가공하여 사용하였으나 이 장치에서는 일정 반경의 핀을 받침대에 부착하여 좀더 정확한 굽힘반경이 형성되도록 하였다.

회전블록(rotating block)의 구조를 보면 회전중심에 대해 무게가 한쪽으로 편심되어 있어 모멘트가 발생하게 된다. 따라서 시편을 장착하지 아니하고 회전블록을 회전시켰을 때 가한 하중은 회전각에 따라 다르게 된다. 이 점을 보완하기 위하여 회전블록의 무게 중심이 회전중심에 오도록 모멘트 균형잡이(moment-balancer)를 회전블록에 부착하였다. 이로써 시편을 장착하지 않고 회전시켰을 때 일정한 하중으로 회전시키는

것이 가능하였다.

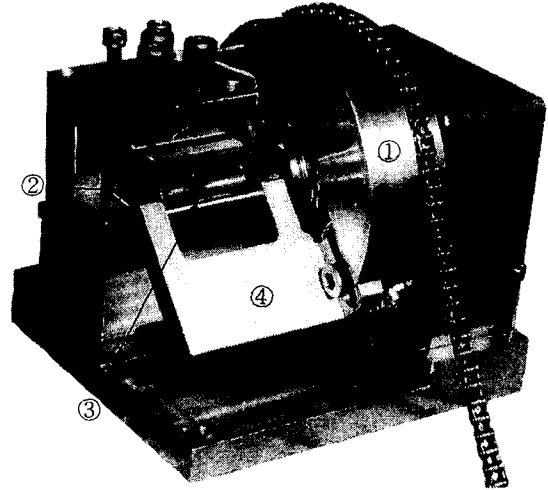


Photo. 1 Conventional cantilever-type bend rig:

- ① rotating block, ② supporting block,
- ③ bending pin, ④ bending pin holder

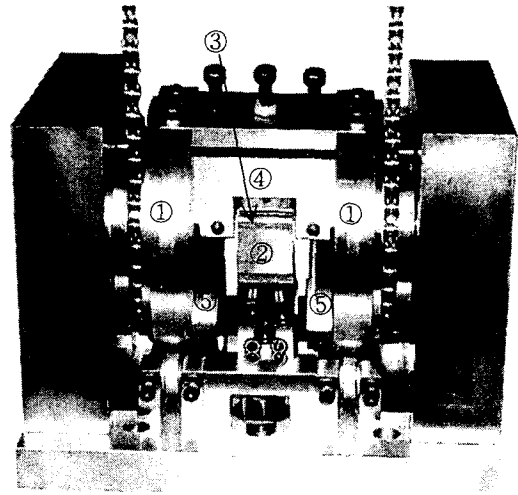


Photo. 2 Present bend rig:

- ① rotating block, ② supporting block,
- ③ bending pin, ④ bending pin holder,
- ⑤ moment-balancer

4. 실험 방법

4.1 인장 실험

인장실험을 통하여 재료의 탄성계수(E)와 응력-변형률 선도를 구하기 위해, KS의 13B호 인장시편^[9]을 1 mm/min 의 속도로 인장하였다. 본 실험에서 사용한 시편은 두께 $0.8, 1.0, 1.2\text{ mm}$ 의 판재를 압연방향에 대하여 90° 로 채취하여 사용하였다.

4.2 굽힘 실험

굽힘시험편은 인장시험편과 동일한 두께의 동일한 재료를 $24\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 의 직사각형으로 가공하여 사용하였다. 본 연구에서는 Fig. 7에 보인

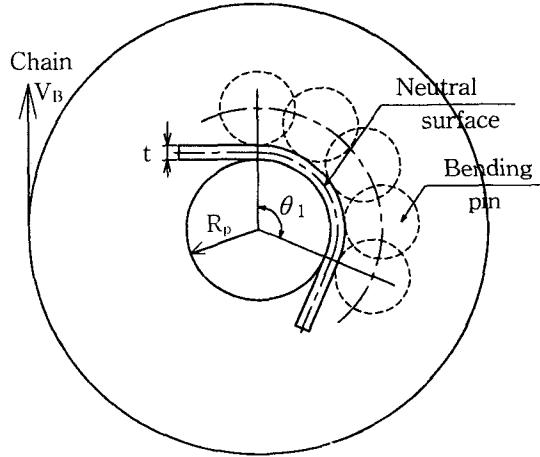


Fig. 3 Winding bend rig

바와 같이 시편을 감아 굽히는 방식을 택하였고, 받침대의 반경 (R_p)은 $3\text{ mm}, 4\text{ mm}, 5\text{ mm}$ 를 사용하였다.

굽힘시험편을 받침대 위에 고정시키고 만능시험기로 회전블록(rotating block)에 연결된 체인(chain)을 잡아당김으로써 회전블록과 일체로 된 굽힘핀(bending pin)을 회전시켜 시편을 받침대에 감아 굽힌 다음, 굽힘각(Fig. 1의 θ_1)을 측정한다. 그 후 하중을 제거한 다음 시편을 빼내어 탄성복원된 굽힘각(Fig. 1의 θ_2)을 측정하였다.

일반적으로 변형률속도가 증가하면 인장강도

는 증가하는 경향이 있다. 이와 같은 사실을 감안하여 본 연구에서는 인장쪽 최외곽의 변형속도가 일정하게 (1 mm/min) 되도록 굽힘 속도(V_B)를 설정하였다.

4.3 스프링백 비의 계산

4.3.1 인장시험 결과를 이용한 계산

굽힘 모멘트(M_T)는 인장실험에서 얻은 응력-변형률 관계를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$M_T = \int_A y \sigma_x dA \quad (14)$$

그런데 $\varepsilon = y/R = y/(R_p + t/2)$ 이므로 식(14)는 다음과 같이 표현된다.

$$M_T = (R_p + t/2) \int_A \varepsilon \sigma_x dA \quad (15)$$

단면의 폭이 b 이고 두께가 t 인 사각 단면의 보에 대하여, $dA = bdy = b(R_p + t/2)d\varepsilon$ 이므로

$$M_T = b(R_p + t/2)^2 \int_{\varepsilon_1^*}^{\varepsilon_2^*} \varepsilon \sigma_x d\varepsilon \quad (16)$$

이 된다. 여기서 ε_1^* 은 인장쪽 최외곽의 변형률이고, ε_2^* 는 압축쪽 최외곽의 변형률이다. 인장과 압축시의 응력-변형률 곡선이 동일할 경우, $\varepsilon_1^* = -\varepsilon_2^*$ 이므로 식(16)은 다음과 같이 된다.

$$M_T = 2b(R_p + t/2)^2 \int_0^{\varepsilon_1^*} \varepsilon \sigma_x d\varepsilon \quad (17)$$

여기서 ε_1^* 은 다음과 같다.

$$\varepsilon_1^* = \frac{t/2}{R_p + t/2} \quad (18)$$

굽힘실험장치로부터 R_p 가 주어지므로 ε_1^* 를 계산할 수 있다. 따라서 응력-변형률 관계가 주어지면 식(17)을 이용하여 굽힘 모멘트를 계산할 수 있다. 식(17)의 적분은 수치적분법(trapezoidal rule)^[8]을 사용하여 계산하였다.

식(13)과 식(17)을 사용하여 다음과 같이 스프링백 비를 계산한다.

$$K_T = 1 - \frac{M_T R_1}{EI} \quad (19)$$

여기서, K_T 의 하첨자 T 는 인장실험으로부터 얻었음을 나타낸다.

4.3.2 굽힘 실험을 이용한 계산

굽힘 실험시 측정된 θ_1 과 θ_2 을 식(12), 즉 $K_B = \theta_2/\theta_1$ 에 대입하여 스프링백 비를 계산한다. 여기서 스프링백 비, K_B 의 하첨자 B 는 굽힘 실험의 결과로부터 계산한 것을 의미한다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 굽힘각도에 따른 스프링백 비의 비교

두께 및 굽힘반경에 따른 스프링백 비의 변화 경향을 살펴보기 위해 식(19)를 이용하여 두께 0.8 mm 시편의 스프링백 비(K_T)를 계산하여 보면 Fig. 4와 같다.

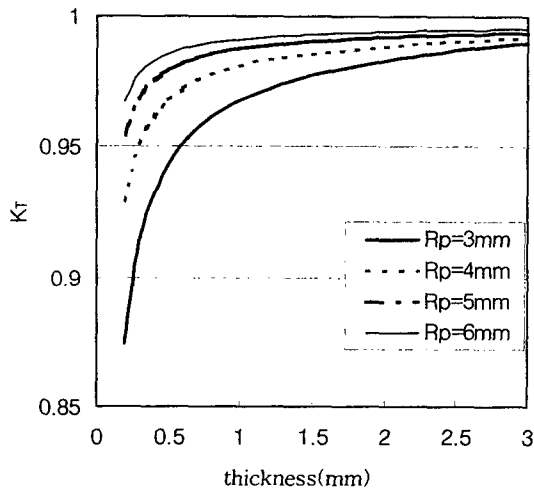


Fig. 4 Variation of springback ratio(K_T) in terms of thickness and bend radius

Fig. 4에서 보는 바와 같이 스프링백 비는 시편의 두께가 두꺼워질수록 또한 굽힘반경이 증가할수록 증가됨을 알 수 있다.

굽힘각도(θ_1)의 크기에 따른 스프링백 비(K_B)의 변화 유무를 확인하기 위해, 굽힘실험을 통하여 얻은 K_B 를 Table 1에 정리한다. Table 1로부터 K_B 는 굽힘반경($R_p + t/2$)이 동일하면 굽힘각도 θ_1 에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of average springback ratios of K_B when θ_1 is varied at $R_p = 3mm$

thickness	θ_1 (degree)	K_B
0.8mm (90°)	111.29	0.9307
	89.36	0.9365
	69.01	0.9327
1.0mm (90°)	110.10	0.9427
	89.66	0.9431
	68.86	0.9384
1.2mm (90°)	109.90	0.9425
	89.41	0.9453
	68.31	0.9394

5.2 곡률반경에 따른 스프링백 비의 비교

인장 실험을 통하여 얻은 스프링백 비(K_T)와 굽힘 실험을 통하여 얻은 스프링백 비(K_B)를 Table 2에 비교 정리한다. Table 2에서 보인 바와 같이 항상 $K_T > K_B$ 의 경향을 보이며, K_B 를 기준으로 한 두 값의 차이는 5%이내에 있다.

Table 12 Comparison of average springback ratios of K_T and K_B

thickness (mm)	bend radius (mm)	K_T	K_B	Difference(%) $\left \frac{K_T - K_B}{K_B} \right \times 100$
0.8 (90°)	3.4	0.9708	0.9333	4.02
	4.4	0.9634	0.9319	3.38
	5.4	0.9564	0.9171	4.29
1.0 (90°)	3.5	0.9759	0.9414	3.66
	4.5	0.9697	0.9339	3.83
	5.5	0.9651	0.9246	4.38
1.2 (90°)	3.6	0.9773	0.9424	3.70
	4.6	0.9715	0.9300	4.46
	5.6	0.9659	0.9257	4.34

K_T 는 이론적으로 계산한 값으로서 시편의 표면에 작용하는 마찰력과 전단력의 효과가 배제된 값이다. 이에 비해 K_B 는 마찰력과 전단력의 효과가 작용한 값이다. 이러한 관점에 볼 때, 두 값이 차이가 나는 것의 주요 원인은 본 연구를 위해 제작한 실험장치가 시편의 표면에 작용하는 수직 전단력 및 마찰력으로 인하여 정확히 순수 굽힘을 구현하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 굽힘실험장치의 단점을 보완하기 위해 개선된 감아굽힘 실험장치를 설계, 제작하여 스프링백 비(K_B)를 구하였다. 이 값을 검증하기 위하여, 인장실험으로 얻은 결과에 보의 이론을 적용하여 스프링백 비(K_T)를 구하였다. K_T 는 이론적으로 계산한 값으로서 시편의 표면에 작용하는 마찰력과 전단력의 효과가 배제된 값이다. 이에 비해 K_B 는 시편의 표면에 작용하는 마찰력과 전단력의 효과가 고려된 값이다. 본 연구에서 실시한 실험 범위내의 결과로부터 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 1) 굽힘실험에서 굽힘각도(θ_1)를 변화시켜 실험한 결과, 굽힘각도에 따른 스프링백 비(K_B)의 변화는 거의 없다.
- 2) 보의 이론을 적용하여 얻은 스프링백 비(K_T)의 값은 굽힘 실험을 통해 얻은 스프링백 비(K_B)의 값에 비해 5% 이내의 더 큰 값이다. 이는 시편의 표면에 작용하는 마찰력과 굽힘 실험장치의 마찰력으로 인한 모멘트에 기인한다.

후기: 본 연구는 2002년도 순천대학교 BK21지역 대학육성사업지단의 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

[1] 김낙수, 임용택, 진종태, 1994, 공업재료 가공학, 반도출판사

[2] Crandall, Dahl and Lardner, 1978, An Introduction to the Mechanics of Solids, McGraw-Hill

[3] R. L. Rolf and E. P. Patrick, 1977, "Bending and Spring Back of Aluminum Alloy Sheet and Plate", Formability Topics-Metallic Materials, Symposium on Mechanical Testing, American Society for Testing and Materials, pp. 65-85

[4] Selcuk, A. and Rawling, R. D. 1991, "A Cantilever-type Bend Test Technique for Formability Analysis of Strip/Plate Metals", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 19, No. 5, pp. 349-358

[5] C. C. Weng and R. N. White, 1990, "Cold-bending of Thick High-Strength Steel Plates", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, 1, pp. 40-54

[6] 최창주, 1998, STS304-CSP 판재의 외팔보형 굽힘실험, 순천대학교 산업대학원 석사학위 논문

[7] 정찬건, 2000, 외팔보형 굽힘실험장치를 이용한 스프링백 비의 측정에 관한 연구, 순천대학교 산업대학원 석사학위 논문

[8] M. L. James, G. M. Smith and J. C. Wolford, 1977, Applied Numerical Methods for Digital Computation with FORTRAN and CSMP, Harper & Row, New York

[9] KS B 0801-1981, 금속재료 인장시험편