

감아굽힘 실험장치를 이용한 스프링백 비의 측정
Measurement of Springback Ratio Using Winding Bend Rig

김용우, 순천대학교 공과대학 기계·자동차공학부

ABSTRACT

A winding bend rig for measurement of springback ratio is made. It measures the bending angles before and after release of bending load which bends specimens with keeping a constant curvature. Thus the springback ratio can be obtained by using this bend rig.

Analytical explanations for the springback are tried by employing simple beam theory. For the analytical calculations with the theory, Young's modulus, fracture strain and stress-strain curve are necessary and these data are obtained from a tensile test. Using both of the beam theory and the results of tensile test, the springback ratio is also calculated.

Comparisons of the two springback ratios, one is obtained from bending test and the other from tensile test, show a good agreement.

1. 서론

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

본 연구에서는 판재의 스프링백 비를 측정하기 위하여 감아굽힘 실험장치를 제작하고 이 장치^[1,6]를 사용하여 SK5 M (탄소공구강) 판재

의 스프링백 비를 측정하였다. 또한 측정 결과를 이론적으로 해석하기 위하여 보의 굽힘 이론을 채용하여 분석하였으며 이 이론을 이용하여 스프링백 비를 계산하기 위해 인장실험을 실시하였다. 그리고 계산 결과를 굽힘 실험결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

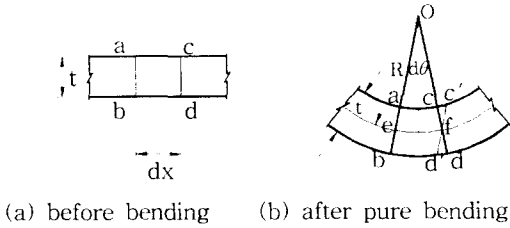
2.1 보의 탄소성 굽힘에 대한 가정

본 연구의 굽힘 시험 결과를 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 사용한다^[2,3].

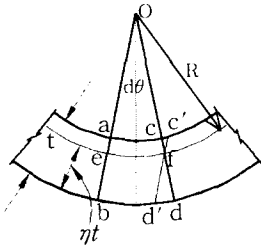
- 1) 중립면에 수직한 평면은 굽힘변형 후에도 평면을 유지한다.
- 2) 보의 굽힘변형은 보의 중립축이 원호의 일부로 되는 순수 굽힘이다.
- 3) 순수 굽힘을 위해 가해지는 하중 이외에 부가적으로 가해지는 인장력이나 압축력은 없다.
- 4) 재료의 인장과 압축시의 응력-변형률 선도는 동일하다.
- 5) 보의 단면 형상은 굽힘이 이루어지는 동안 변화하지 않는다.
- 6) 길이 방향의 응력을 제외한 나머지 응력은 무시한다.
- 7) 변형률 속도(strain rate)의 효과는 무시한다.

2.2 보의 탄소성 굽힘변형

2.1절의 가정을 바탕으로 굽힘변형시의 변형률 분포상태를 조사하기 위해, 단면의 형상이 일정하고 굽힘하중이 가해지는 면에 관하여 보의 단면이 대칭인 직선보를 고려한다.



(a) before bending (b) after pure bending



(c) beam under bending and tension

Fig. 1 Strains developed during bending

Fig. 1(a)의 두께 t 인 보에서 미소 거리 dx 만큼 떨어져 있고 중립축에 수직한 두 단면 \overline{ab} 와 \overline{cd} 는 굽힘을 받아 회전하여 Fig. 1(b)와 같이 변형한다. Fig. 1(b)에서 중립면이 점선으로 표시한 위치에 있다면 원호 ef 의 길이는 Fig. 1(a)의 dx 와 같다. 선분 $\overline{c'd'}$ 를 선분 \overline{ab} 와 평행하게 그리면, 원호 cc' 는 변형전의 섬유 길이 $\overline{ac}(=dx)$ 가 줄어든 양을 나타내며 원호 dd' 는 변형전의 섬유 길이 $\overline{bd}(=dx)$ 가 늘어난 양을 나타낸다.

중립면은 순수굽힘하중 이외의 압축이나 인장력을 받지 않는 경우 Fig. 1(b)와 같이 단면의 도심을 통과하나, 순수굽힘하중 이외의 압축력이나 인장력을 받는 경우에는 Fig. 1(c)와 같이 도심을 통과하지 않는다.

중립면이 도심을 통과하는 경우, 인장력이 걸리는 최외곽의 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon = t/2R \quad (1)$$

여기서 R 은 중립축의 곡률 반경이다. 만약 Fig. 1(c)와 같이 중립면이 도심과 일치하지 않을 경

우, 인장력이 걸리는 최외곽의 변형률은

$$\epsilon = \eta t/R \quad (2)$$

이고 압축력이 걸리는 최외곽의 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon = (1 - \eta)t/R \quad (3)$$

이제, 스프링백을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 직선보를 반경 $R_1(=R_p)$ 인 받침대 위에 놓고 순수굽힘에 의해 소성굽힘변형이 발생하도록 하중을 가한 경우를 생각해 보자.

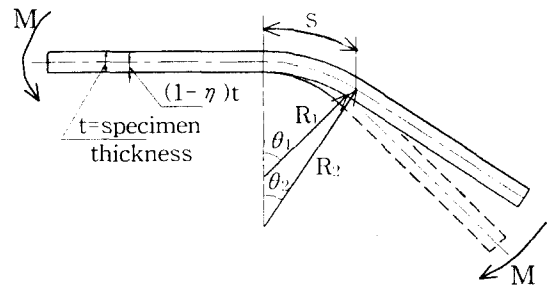


Fig. 2 Springback of sheet and plate, where R_1 = Radius of curvature before release of load R_2 = Radius of curvature after release of load θ_1 = Bend angle before release of load θ_2 = Bend angle after release of load S = Length of bend

이 때 중립축의 곡률반경(R)과 받침대의 곡률반경(R_1) 사이의 관계는 식(2)를 사용하면 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\eta t}{R_1 + (1 - \eta)t} \quad (4)$$

위 식으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{R_1}{t} = \frac{\eta}{\epsilon} - 1 + \eta \quad (5)$$

Fig. 2와 같이 보의 굽힘각이 θ_1 이 되고 중립축의 곡률 반경이 R_1 이 되도록 하중을 가하여 탄소성 변형을 일으킨 후, 하중을 제거하면 보는

스프링백 현상에 의해 굽힘각은 θ_2 로, 중립축의 곡률반경은 R_2 로 된다. 이 때 중립축의 굽힘변형 길이(length of bend)를 S 라고 하면 다음의 관계식이 성립된다.

$$S = R_1 \theta_1 \quad \text{or} \quad \theta_1 / S = 1 / R_1 \quad (6)$$

$$S = R_2 \theta_2 \quad \text{or} \quad \theta_2 / S = 1 / R_2 \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로부터 다음식을 얻는다.

$$\frac{\Delta \theta}{S} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \quad (8)$$

여기서 $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ 이다. 다시 식(8)은 식(2)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta \theta}{S} = \frac{\epsilon_1}{\eta t} - \frac{\epsilon_2}{\eta t} = \frac{\Delta \epsilon}{\eta t} \quad (9)$$

여기서 $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$ 이다.

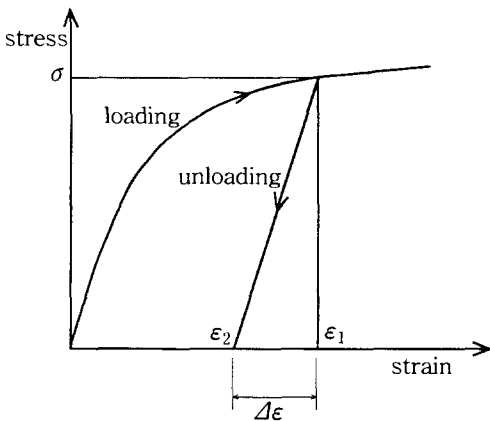


Fig. 3 Stress-strain curve before and after release of load

한편 위의 스프링백 현상이 일어나는 과정에서의 응력-변형률 선도를 그려보면 Fig. 3과 같다. 즉, 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,

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 + \Delta \epsilon \quad (10)$$

여기서 $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$ 이다.

전체 변형률(ϵ_1)은 $\Delta \epsilon$ 의 탄성 변형률과 ϵ_2 의 소성 변형률로 구성되어 있는데, 하중을 제거하면 탄성 변형률은 선형적으로 원상 복귀하여 영으로 되나, 소성 변형률은 영구변형(permanent deformation)으로 남아 있게 된다. Fig. 3을 이용하여 보의 인장쪽 최외곽에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M \eta t}{I} / E = \frac{M \eta t}{EI} \quad (11)$$

위 식에서 M 은 보에 가해진 굽힘 모멘트이고 I 는 단면이차모멘트이다. 식(11)을 식(9)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\Delta \theta}{S} = \frac{M}{EI} \quad (12)$$

다시 식(8)과 식(12)로부터

$$\frac{\Delta \theta}{S} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{M}{EI} \quad (13)$$

이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} - \frac{M}{EI} \quad (14)$$

2.3 스프링백 비

스프링백 비 K 는 다음과 같이 정의된다.

$$K = R_1 / R_2 \quad (15)$$

식(15)의 정의를 식(6)과 식(7)을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$K = R_1 / R_2 = \theta_2 / \theta_1 \quad (16)$$

또한 식(15)는 식(14)를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K = 1 - MR_1 / EI \quad (17)$$

3. 실험 방법

3.1 인장 실험

인장실험을 통하여 재료의 탄성계수(E)와 응력-변형률 선도를 구하기 위해, SK5 M 판재를 KS B 0801-1981의 13 B호 시험편로 제작하여 인장시험편을 1 mm/min의 속도로 인장하였다. 본 실험에서 사용한 시험편은 판재로부터 다음과 같이 채취하여 사용하였다.

- ① 0.5t, 압연방향에 대하여 0°로 채취
- ② 0.8t, 압연방향에 대하여 0°로 채취
- ③ 0.5t, 압연방향에 대하여 90°로 채취

3.2 굽힘 실험

■ 굽힘시험편

굽힘시험편은 인장시험편과 동일한 두께의 동일한 재료를 18mm×65mm의 직사각형으로 가공하여 사용하였다.

■ 굽힘실험장치와 굽힘각의 측정

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 외팔보의 시편을 감아 굽히는 방식을 택하였다. 시편이 일정한 곡률반경으로 굽혀지도록 받침대(supporting block)을 일정한 반경($R_p = 3mm$)으로 가공하였다. 굽힘시편을 받침대 위에 고정시키고 만능시험기로 회전블록(rotating block)에 연결된 체인을 잡아당김으로써 회전블록과 일체로 된 굽힘핀(bending pin)을 회전시켜 시편을 받침대에 감아 굽힌 다음 굽힘각(Fig. 4의 θ_1)을 측정하였다. 그 후 하중을 제거한 다음 시편을 빼내어 탄성복원된 굽힘각(θ_2)를 측정하였다.

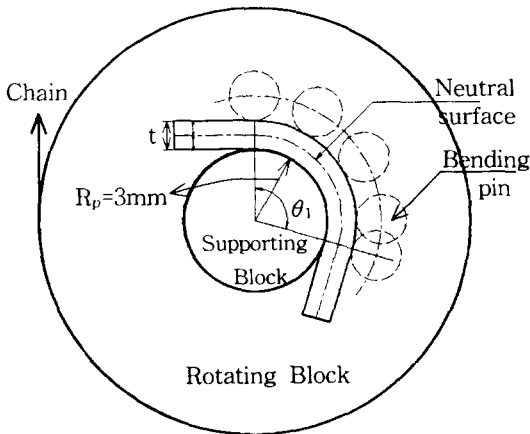


Fig. 4 Winding bend rig

3.3 실험결과를 이용한 계산

■ 굽힘 모멘트의 계산

굽힘 실험으로부터 시편에 가해지는 굽힘 모멘트를 얻는 것이 쉽지 아니하므로, 인장 실험에서 얻은 응력-변형률 곡선을 이용하여 굽힘 모멘트를 계산한다.

식(14)와 식(17)의 굽힘모멘트 M 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M = \int_A y \sigma_x dA \quad (22)$$

그런데 $\epsilon = \frac{y}{R} = \frac{y}{R_p + t/2}$ 이므로 위식은 다음과 같이 된다.

$$M = (R_p + t/2) \int_A \epsilon \sigma_x dA \quad (23)$$

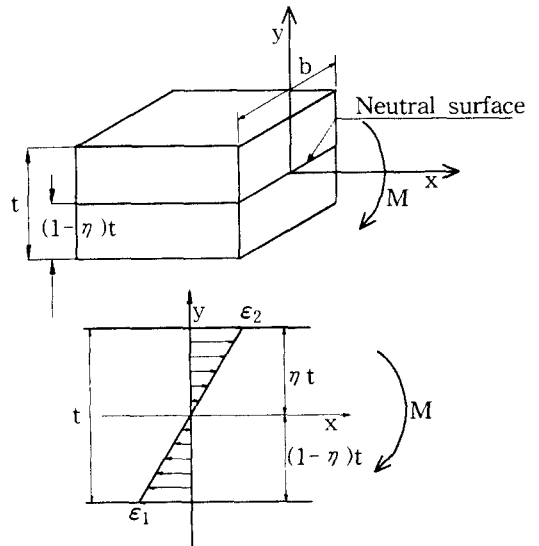


Fig. 5 Strain distribution at a cross section

보의 단면이 폭이 b 이고 두께가 t 인 사각 단면이라면(Fig. 5), $dA = bdy = b(R_p + t/2)d\epsilon$ 이므로

$$M = b(R_p + t/2)^2 \int_{\epsilon_1^*}^{\epsilon_2^*} \epsilon \sigma_x d\epsilon \quad (24)$$

이 된다. 여기서 ϵ_1^* 은 인장쪽 최외곽의 변형률이고, ϵ_2^* 는 압축쪽 최외곽의 변형률이다. 가정 3)로부터 중립축은 도심에 위치하고 가정 4)로부터 인장과 압축시의 응력-변형률 곡선이 동일하므로

$\epsilon_1^* = -\epsilon_2^*$ 이다. 따라서 식(24)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M = b(R_p + t/2)^2 \int_{-\epsilon_1^*}^{+\epsilon_1^*} \epsilon \sigma_x d\epsilon$$

$$= 2b(R_p + t/2)^2 \int_0^{\epsilon_1^*} \epsilon \sigma_x d\epsilon \quad (25)$$

여기서 ϵ_1^* 은 가정 2)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_1^* = \frac{t/2}{R_p + t/2} \quad (26)$$

굽힘실험장치로부터 R_p 가 주어지므로 ϵ_1^* 를 계산할 수 있다. 본 실험에서는 $R_p = 3 \text{ mm}$ 이므로 $t = 0.5 \text{ mm}$ 와 $t = 0.8 \text{ mm}$ 인 보의 ϵ_1^* 은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$(\epsilon_1^*)_{t=0.5} = 0.25/3.35 = 0.07697,$$

$$(\epsilon_1^*)_{t=0.8} = 0.4/3.4 = 0.117647$$

그러므로 가정 2)와 6)에 의해 보의 굽힘변형시의 길이방향의 섬유는 일축 응력만을 받기 때문에, 응력-변형률 관계를 안다면 식(25)를 이용하여 굽힘 모멘트를 계산할 수 있다. 식(25)의 적분 계산은, 구간 $[0, \epsilon_1^*]$ 에 사다리꼴 수치적분법 (trapezoidal rule) [7]을 적용하여 계산하였다.

■ 인장 실험을 이용한 스프링백 비의 계산

식(17)과 식(25)를 사용하여 다음과 같이 스프링백 비를 계산한다.

$$K_T = 1 - MR_1/EI$$

여기서 스프링백 비, K_T 의 하첨자 T 는 인장실험의 결과로부터 계산한 것을 의미한다.

■ 굽힘 실험을 이용한 스프링백 비의 계산

굽힘 실험시 θ_1 (하중을 가했을 때의 보의 굽힘각)과 θ_2 (하중을 제거했을 때의 굽힘각)을 실측하여 식(16), 즉 $K_B = \theta_2/\theta_1$ 을 이용하여 스프링백 비를 계산한다. 여기서 스프링백 비, K_B 의 하첨자 B 는 굽힘 실험의 결과로부터 계산한 것을 의미한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험 결과

4.1.1 SK5 M(0도, 0.5t)의 실험 결과

■ 인장실험: 인장실험을 통해 탄성계수(E)와 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있다. 이 진응력-진변형률 곡선과 식(27) 및 다음의 기초 데이터를 이용하여 굽힘 모멘트를 구하고, 식(17)을 이용하여 스프링백 비 K_T 를 구하여 Table 1에 정리한다. 기하학적 데이터는 다음과 같다.

- 단면 2차 모멘트, $I = 0.1875 \text{ mm}^4$
- 하중을 가했을 때 중립축의 곡률반경,

$$R_1 = 3.25 \text{ mm}$$

Table 1 Springback ratio(K_T) obtained by tensile test

Test No.	$E \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$	$M \text{ (kgf mm)}$	$K_T = 1 - \frac{MR_1}{EI}$
1	6240.00	166.372	0.5379
2	6140.35	166.429	0.5302
mean	6190.18	166.401	0.5341

■ 굽힘실험: 굽힘실험에서 하중을 가했을 때의 굽힘각 θ_1 과 하중을 제거했을 때의 굽힘각 θ_2 를 측정하고 식(16)을 이용, 스프링백 비 K_B 를 계산하여 Table 2에 정리한다.

Table 2 Springback ratio(K_B) obtained by bending test

Test No.	$\theta_1 \text{ (degree)}$	$\theta_2 \text{ (degree)}$	$K_B = \theta_2/\theta_1$
1	60	33	0.55
2	59	30	0.51
3	70	36	0.51
4	69	36	0.52
5	90	51	0.57
6	89	50	0.56
mean	73	39	0.54

4.1.2 SK5 M(0도, 0.8t)의 실험 결과

이 경우의 기하학적 데이터는 다음과 같다.

- 단면 2차모멘트, $I = 0.768 \text{ mm}^4$
- 하중을 가했을 때 중립축의 곡률 반경,

$$R_1 = 3.40 \text{ mm}$$

■ 인장실험:

Table 3 Springback ratio (K_T) obtained by tensile test

Test No.	$E \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$	$M \text{ (kgf mm)}$	$K_T = 1 - \frac{MR_1}{EI}$
1	5300	476.4	0.6021
2	5277	477.2	0.6000
mean	5289	476.8	0.6011

■ 굽힘실험:

Table 4 Springback ratio (K_B) obtained by bending test

Test No.	$\theta_1 \text{ (degree)}$	$\theta_2 \text{ (degree)}$	$K_B = \theta_2 / \theta_1$
1	90	50	0.56
2	90	51	0.57
3	99	58	0.59
4	100	59	0.59
5	110	67	0.61
6	110	65	0.59
mean	99.8	58.3	0.59

4.1.3 SK5 M(90도, 0.5t)의 실험 결과

이 경우의 기하학적 데이터는 다음과 같다.

- 단면 2차모멘트, $I = 0.1875 \text{ mm}^4$
- 하중을 가했을 때 중립축의 곡률 반경,

$$R_1 = 3.25 \text{ mm}$$

■ 인장실험:

Table 5 Springback ratio (K_T) obtained by tensile test

Test No.	$E \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$	$M \text{ (kgf mm)}$	$K_T = 1 - \frac{MR_1}{EI}$
1	6900	171.5	0.5692
2	6900	170.7	0.5727
mean	6900	171.1	0.5710

■ 굽힘실험:

Table 6 Springback ratio (K_B) obtained by bending test

Test No.	$\theta_1 \text{ (degree)}$	$\theta_2 \text{ (degree)}$	$K_B = \theta_2 / \theta_1$
1	97	50	0.52
2	98	56	0.57
3	110	64	0.58
mean	102	57	0.56

4.2 K_T 와 K_B 의 비교

인장실험을 통하여 얻은 스프링백 비(K_T)와 굽힘실험을 통하여 얻은 스프링백 비(K_B)를 Table 7에 비교 정리한다.

Table 7 Comparison of average springback ratios of K_T and K_B

	SK5 M (0°, 0.5t)	SK5 M (0°, 0.8t)	SK5 M (90°, 0.5t)
K_T	0.53	0.60	0.57
K_B	0.54	0.59	0.56
Difference(%) $\left \frac{K_T - K_B}{K_B} \right \times 100$	1.85	1.69	1.79

위 표에서 알 수 있듯이 SK5 M의 경우 두 값이 매우 근사한 값으로 나타난다

5. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 두 가지 방법으로 스프링백 비(springback ratio)를 구하였다. 첫

재는 감아굽힘 실험장치를 사용하여 구한 스프링백 비(K_B)이고, 둘째는 보의 이론과 인장실험 결과를 이용하여 구한 스프링백 비(K_T)이다. 두 가지 방법으로 구한 스프링백 비를 비교해 본 결과 매우 잘 일치하였으며 이 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 1) 본 연구에서 사용한 SK5 M 얇은 판재의 굽힘 성형시 인장실험결과만 사용하여 스프링백 비를 계산할 수 있다.
- 2) 본 연구를 위해 제작한 감아굽힘 실험장치를 이용하여 스프링백 비를 측정할 수 있다.
그러나 더 정확하고 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해서는 굽힘실험장치의 제작 과정에서의 형상 공차를 줄일 필요가 있는 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 SK5 M의 재료만을 사용하였으나 일반화를 위해서는 다른 재료를 사용하여 실험해 볼 필요가 있으며, 받침대의 굽힘 반경도 다양하게 제작하여 실험해 볼 필요가 있다.

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 Kogakusa

[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] Selçuk, A. and Rawlings, 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, No. 1, pp. 40-54

[6] 최창주, STS304-CSP 판재의 외팔보형 굽힘 실험, 1998, 순천대학교 산업대학원 석사학위논문

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

[8] KS B 0801-1981. 금속재료 인장시험편

[9] KS D 3551-1992, 특수 마대강(냉연특수강대)

□후기: 본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 순천대학교 자동차부품 및 소재 연구·개발 센터 연구비 지원에 의한 것임.