

박판재의 스프링백 해석(II)-해석모델의 실험적 검증

이재호¹ · 김동우¹ · 손성만² · 이문용² · 문영훈[#]

Analysis of Springback of Sheet Metal(II): Experimental Validation of Analytical Model

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. On the removal of the applied load the specimen loses its elastic strain by contracting around the contour of the block, the radius ρ can be determined by the residual differential strain. Therefore in this study the springback estimated by the residual differential strain is experimentally validated through the comparison with those obtained by U-bending test. The springback characteristics of two analytical models are also estimated at various processing conditions such as thickness, curvature of radius and drawing strain. The model based on residual differential strain has an applied transition strain where the springback undergoes a dramatic decrease. Both models show that springback decreases with increased strip thickness and with decreased radius of curvature. For no applied tension, the model based on residual differential strain predicts more springback as compared to the moment based model.

Key Words: Springback, Sheet Metal Forming, Residual Differential Strain, U-bending Test, Moment Based Model

1. 서론

스프링백(springback)은 박판재 프레스 성형시 탄성회복으로 인한 부분적 형상변형현상으로서 성형품의 기하학적인 형상변수, 재료변수 및 공정변수 등에 영향을 받는다[1~8]. 따라서 본 연구의 전반부에서는 정확한 스프링백의 예측을 위해 변형형상 및 재료인자별로 다양한 변형패턴을 가정한 후, 탄성복원 후 최대변형부와 최소변형부의 잔류변형을 차이를 이용하여 스프링백량을 예측해 주는 해석적 모델을 제시하였다[9].

본 연구에서는 이러한 예측모델의 정밀도를 검

증하기 위해 U-벤딩실험을 통해 스프링백을 구하고 그 경향을 비교하였다. 또한 검증된 예측모델을 이용하여 여러 공정조건에 대한 고장력강 및 알루미늄 합금등에 대한 스프링백을 예측하였다.

2. 실험적 검증

2.1 시편 및 실험장치

본 실험에 사용된 판재는 자동차용 냉연강판이며 종류는 SPFC1180(1.8t, 2.0t), SPFC980(1.4t), SPFC780(1.0t, 1.2t, 1.4t, 1.8t), SPFC590(1.2t, 1.4t)으로 총 4종류이다. 냉연강판의 기계적 물성치를 Table 1

1. 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형및금형가공연구소
2. 성우하이텍(주) 기술연구소
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형및금형가공연구소, E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

Table 1 Mechanical properties of specimens

Materials	E (MPa)	Y.S (MPa)	U.T.S (MPa)	K (MPa)	n
SPFC 1180	206,000	1,193	1,354	2,079	0.09
SPFC 980	206,000	727	1,124	1,634	0.14
SPFC 780	206,000	588	989	1,369	0.15
SPFC 590	206,000	462	779	1,117	0.18

에 나타냈다. U-벤딩실험을 위한 250mm×30mm크기의 띠형상의 사각시편을 가공하였고, Fig. 1에는 U-벤딩실험 장치를 도식적으로 나타내었다. 펀치의 형상의 변화를 위해 반경별 인서트를 별도로 제작, 삽입하여 펀치 형상반경(Rp)을 3mm, 9mm, 12mm의 3단계로 변화를 주었으며, 다이 어깨 반경(Rd)도 3mm, 9mm, 12mm의 3단계로 변화를 주었다. 펀치와 다이 사이의 틈새를 변화 시킬 수 있도록 지지대와 다이 사이에 거리조정이 가능한 레일을 설치 하였다. U-벤딩실험은 20ton 용량의 U.T.M(universal testing machine)장치를 이용하여 수행하였다. 시편의 인장실험결과 얻어진 응력-변형률 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 그 결과 SPFC1180이 항복강도가 높게 나타났으며 SPFC590이 가장 낮은 항복 강도를 보였다.

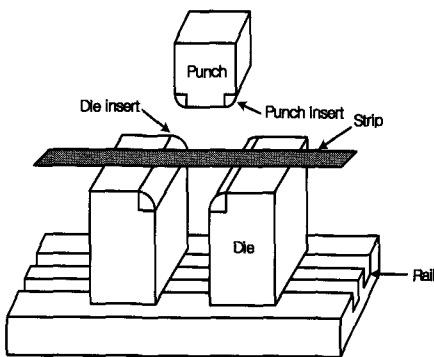


Fig. 1 Experimental apparatus of U-bending test

2.2 실험방법

판재의 U-벤딩실험을 하기 위하여 펀치와 다이의 간격은 시편 두께의 1.3배로 하였다. 성형깊이는 120mm, 펀치 속도는 5mm/sec 로 성형하였다. Table 2에 실험조건들을 나타내었다.

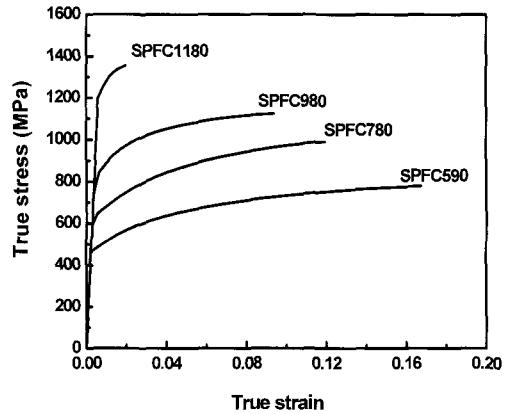


Fig. 2 True stress- true strain curves of test specimens

Table 2 Experimental conditions

Specimen	Thickness (mm)	Clearance (mm)	Rp (mm)	Rd (mm)
SPFC1180	1.8	2.34	3 9 12	3 9 12
	2.0	2.6		
SPFC980	1.4	1.82		
	1.0	1.3		
SPFC780	1.2	1.56		
	1.4	1.82		
	1.8	2.34		
SPFC590	1.2	1.56		
	1.4	1.82		

2.3 스프링백 측정

박판재의 스프링백 특성을 실험적으로 살펴보기 위해 U-벤딩시 탄성회복으로 인한 각도변화를 측정하여 해석모델과 비교하였다. Fig. 3에 SPFC780의 대칭성을 고려하여 펀치, 다이 어깨의 반경과 재료의 두께에 따라 스프링백 후의 반쪽형상을 측정하여 각각 왼쪽과 오른쪽에 탄성회복 형상을 나타내었다. 그림에서 (1), (2), (3)의 결과처럼 펀치의 형상반경(Rp)과 다이 어깨부의 반경(Rd)이 커질수록 스프링 백이 크게 발생하였다.

이러한 결과는 다른 소재(SPFC1180, SPFC980, SPFC590)에서도 나타났다. 그리고 (4), (5), (6)은 동일한 펀치 반경과 다이 어깨부의 반경이 12mm 일때의 SPFC780의 두께(1.2t, 1.4t, 1.8t)에 따른 스프링백 정도를 나타내었다. 스프링백 후의 형상은 두께가 얇을수록 스프링백이 크게 나타났음을 알 수 있었다. 스프링백의 정도는 Fig. 4에 보인 바와 같이 스프링백 퍼센트(S.B.%)는 즉, $(\theta_a - \theta_b) / \theta_a \times 100$ 으로 측정 계산하여 정량적으로 나타냈다. 여기서

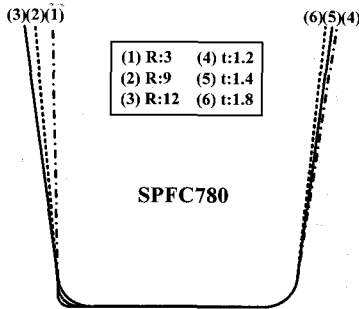


Fig. 3 Deformed shape after springback for SPFC780 according to punch, die radii and thicknesses

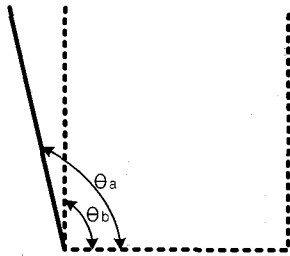


Fig. 4 Definition of θ_a , θ_b for springback calculation

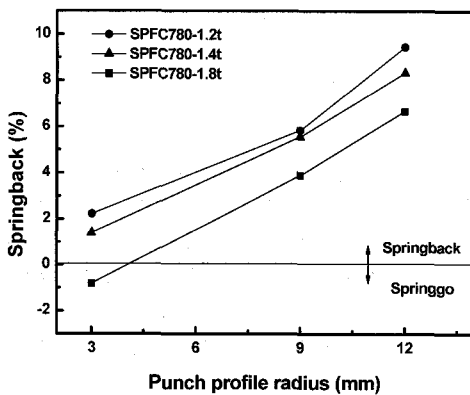


Fig. 5 Springback at various punch profile radii and thicknesses

θ_b 는 성형 후 금형에서 제거하기 전의 시편 바닥면과 옆벽부의 예각이고, θ_a 는 성형품을 금형에서 꺼낸 후 스프링백이 발생한 시편의 바닥면과 옆벽부 사이의 예각이다.

Fig. 5은 SPFC780 소재실험의 결과를 스프링백(%)으로 나타내었다. SPFC780-1.8t 소재에서 펀치와 다이 반경이 3mm 일때는 스프링백이 아닌 스프링고(Springgo)현상이 나타났다. 스프링고는 (-)로 표

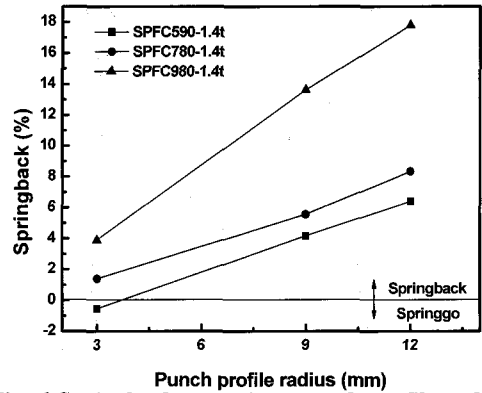


Fig. 6 Springback at various punch profile radii and materials

기하였다. 소재의 기계적인 특성(SPFC590, SPFC780, SPFC980)에 따른 스프링백 퍼센트를 Fig. 6에 나타내었다. 소재의 기계적 강도가 높을수록 스프링백은 높게 나타났다.

2.4 스프링백 해석모델 검증

스프링 예측식에 이용하여 스프링백 정도를 예측하고 실제 실험 결과와의 비교를 통해 예측식과 실제 결과값의 차를 비교하였다. 스프링백량을 예측해 주는 해석적 모델은 성형형상과 재료인자에 의해 6개의 변형패턴으로 나누었고 각각의 변형패턴별로 6개의 해석모델이 있다. 따라서 박판 재료와 굽힘형상인자로부터 해당변형패턴과 적용 모델을 먼저 결정한 후 스프링백을 계산한다[9].

$$S_p = \frac{Et}{2\rho\sigma_0} \quad (1)$$

여기서, σ_0 :항복응력, E :탄성계수, ρ :굽힘반경 Table 2에 보인 실험조건을 적용하면 식 (1)의 S_p 가 1보다 크고 드로잉력이 없이 굽힘응력만 가해지고 있으므로 ($\epsilon_a=0$) 'LA'모델을 이용하여 스프링백을 구할 수 있다. Table 1과 Table 2에 보인 SPFC780 소재 조건으로부터 예측식을 이용한 스프링백 결과값과 실험의 결과값을 Fig. 7에 비교하였다. 스프링백의 절대값으로 볼 때 변형을 모델이 전체적으로 모멘트 모델에 비해 낮게 예측이 되었으며 다양한 두께 및 곡률반경별 스프링백의 양을 비교했을 때 두 해석모델 모두 실험치와 높은 상관관계를 보였다. Fig. 8은 SPFC780의 예측 스프링백과 실측 스프링백을 비교하였을 때의 상관관계를 나타내고 있다.

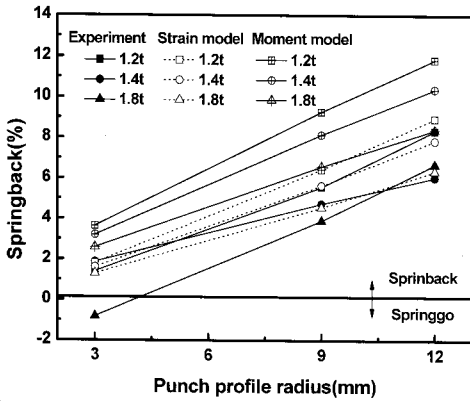


Fig. 7 Comparison of prediction results with experimental results for SPFC780 ($\epsilon_a=0$)

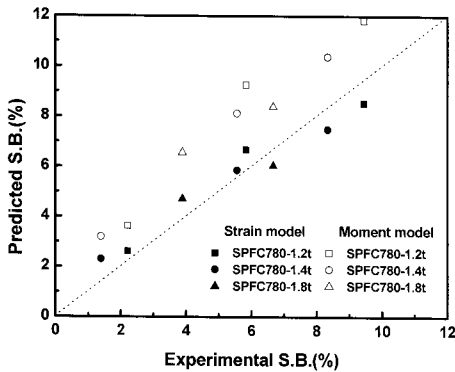


Fig. 8 Predicted S.B.(%) vs. experimental S.B.(%) for SPFC780 ($\epsilon_a=0$)

Fig. 9 는 변형을 모델과 모멘트 모델을 이용하여 드로잉력이 증가함에 따른 스프링백의 변화를 나타내었다. 모멘트 모델의 경우 가해주는 드로잉력(ϵ_d)이 증가함에 따라 스프링백이 점진적으로 감소하는 반면 변형을 모델에서는 어떤 임계 변형율에 이르기까지는 드로잉력(ϵ_d)이 증가함에 따라 스프링백이 크게 감소하지 않다가 임계드로잉력에 이르면 스프링백이 급격히 감소하여 모멘트 모델의 예측 스프링백 값으로 수렴하는 특성을 보였다. 이러한 임계 드로잉력은 두께와 곡률반경의 변화에 따라 변하며 이는 박판재의 탄성-소성 거동이 변형패턴에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

박판의 스프링백을 예측하기 위하여 6 개의 변형 패턴에 대하여 잔류변형율에 근거한 해석적

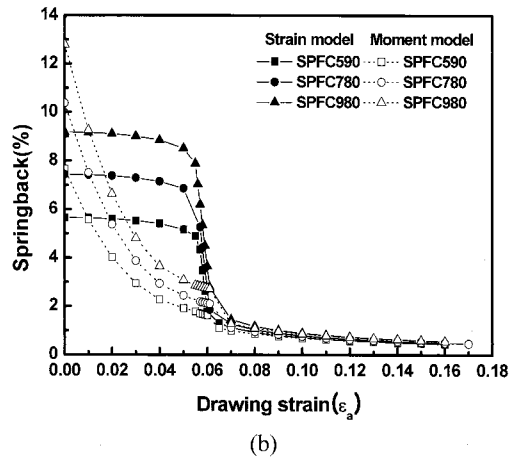
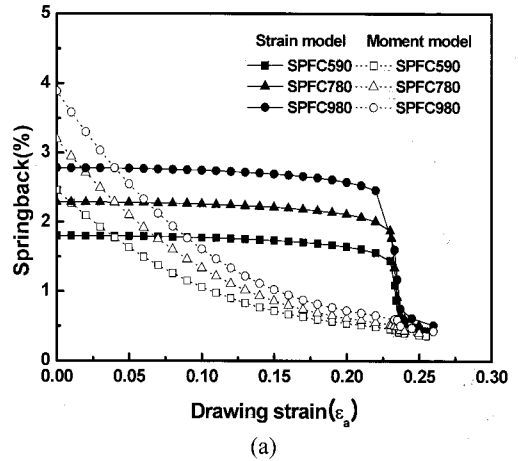


Fig. 9 Comparison of predicted springback between maximum stress and bending moment (a) thickness:1.4mm, radius of curvature: 3mm, and (b) thickness: 1.4mm, radius of curvature: 12mm

모델을 제안하였고 본 연구에서는 이를 검증하기 위해 모멘트 평형에 근거한 스프링백과 U-벤딩실험을 통해 비교, 검증하였다.

(1) 해석적 방법으로 예측한 스프링백을 동일 조건하에서 U-벤딩실험을 통하여 얻어진 값과 비교한 결과, 드로잉력이 부가되지 않은 경우 변형을 모델이 전체적으로 모멘트 모델에 비해 낮게 예측이 되었으며 다양한 두께 및 곡률반경별 스프링백의 양을 비교했을 때 두 해석모델 모두 실험치와 높은 상관관계를 보였다.

(2) 모멘트 모델의 경우 가해주는 드로잉력이

증가함에 따라 스프링백이 점진적으로 감소하는 반면 변형율 모델에서는 어떤 임계 변형율에 이르기까지는 드로잉력이 증가함에 따라 스프링백이 크게 감소하지 않다가 임계 드로잉력에 이르면 스프링백이 급격히 감소하여 모멘트 모델의 예측 스프링백 값으로 수렴하는 특성을 보였으며 이는 박판재의 탄성-소성거동이 변형패턴에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서의 변형율 모델은 스프링백 영향인자가 간단한 수식형태로 표현되어 조업 변수의 영향도에 대한 해석이 용이하고, 프레스 작업시 조업인자의 변화에 따른 스프링백 감도 조정 등에 활용이 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 부산대학교 국가핵심연구센터의 연구비 일부지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 장성호, 허영무, 서대교, 2003, U 드로오 벤딩에서의 스프링백 예측을 위한 이론적 단순화, 한국소성가공학회 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. Wagner, 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. Pourboghrat, 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, SAE2002 - 01-0039.
- [9] 이재호, 김동우, 손성만, 이문용, 문영훈, 2007, 박판재의 스프링백 해석(1)-잔류 변형율에 근거한 예측모델, 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 7 호, pp.