

# 유한요소법을 이용한 초고강도 판재 굽힘에 따른 후변형의 정량적 분석: Spring-back or Spring-go

곽은정<sup>1</sup> · 이경훈<sup>#</sup> · 서창희<sup>2</sup> · 임용희<sup>3</sup>

## Quantitative Analysis of Elastic Recovery Behavior after Bending of Ultra High Strength Steel Sheet: Spring-back or Spring-go

E. J. Kwak, K. Lee, C. H. Suh, Y. H. Lim

(Received Received July 19, 2011 / Revised August 31, 2011 / Accepted September 5, 2011)

### Abstract

A major source of difficulty in die design for high strength steel is the high level of elastic recovery during unloading. The degree of elastic recovery is affected by factors such as material strength, bending angle, punch's corner radius and sheet thickness. Finite Element Method was used in the present work to quantitatively analyze the elastic recovery for various combinations of these parameters. In some cases elastic recovery happened in reverse direction. This phenomenon, which we call spring-go, was explained via changes in stress distribution in the panel occurring in the forming process.

**Key Words** : Spring-back, Spring-go, Elastic Recovery, Sheet Forming, Finite Element Method, Ultra High Strength Steel

### 1. 서 론

최근 자동차 경량화에 대한 지속적인 요구에 따라 알루미늄 및 마그네슘 등의 경량 소재에 대한 관심과 사용이 증가하고 있다. 철강업계는 이에 대응하기 위해 초고강도 강판의 개발과 이의 적용을 확대하고 있다. 초고강도 강판의 경우 기존의 소재 대비 동일한 탄성계수를 가지면서도 높은 항복강도를 갖게 되어 상대적으로 높은 후변형량을 보인다. 굽힘 공정은 판재성형에서 가장 널리 사용되는 변형 공정으로 효과적인 금형 설계를 위해서는 굽힘 공정 후의 탄성 회복량에 대한 적절한 이해가 필요하다. 굽힘 공정 후의 후변형량에 대한 수치적, 실험적 연구[1~7]는 spring-back 뿐만 아니라 후변형이 반대방향으로 일어나

는 spring-go 현상에 대한 것도 보고, 논의하고 있다. 그러나 대부분의 연구는 항복강도 300MPa 미만의 소재에 대하여 진행되어 왔다[1, 2]. 본 연구에서는 인장강도 590-1180MPa의 초고강도 물성에 대한 탄성 변형량을 다양한 설계 변수에 따라 해석하고 분석하여 이의 각 변수의 영향을 파악하고자 한다.

### 2. 탄성회복의 형태

일반적으로 굽힘 성형 시 굽힘 부위에서 펀치 쪽의 소재에서는 압축 응력이 발생하고, 금형 쪽의 소재에서는 인장응력이 발생한다. 펀치가 제거되면서 인장 응력이 작용하던 부위에서는 수축이 발생하고, 압축 응력이 발생한 부위에서는 퍼지는

1. ㈜ 솔루션랩

2. 대구기계부품연구원

3. ㈜ 신화

# 교신저자: ㈜ 솔루션랩, E-mail: klee@deform.co.kr

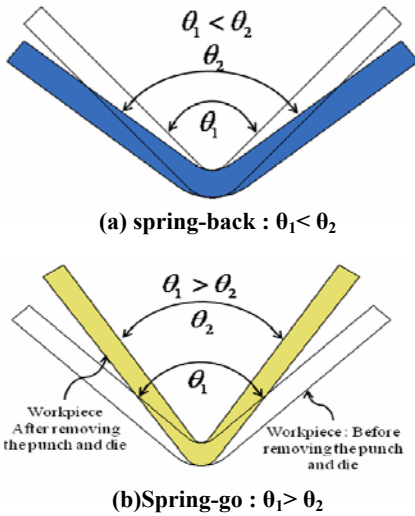


Fig. 1 Illustration of spring-back and spring-go

소재의 탄성회복이 일어난다. 일반적인 Spring-back 현상은 Fig. 1에 (a)와 같이 성형 시 굽힘 각도보다 더 커지는 형태로 탄성 회복이 일어난다. 하지만 특정한 상황에서는 Fig. 1(b)와 같이 일반적인 Spring-back의 반대 방향인 굽힘 각도가 작아지는 방향으로 탄성 회복이 발생하는 경우를 볼 수 있다[1, 2]. 이를 Spring-go 또는 Spring-forward 라 한다.

### 3. 굽힘 성형 해석 및 결과

#### 3.1 모델 및 공정 조건

이번 연구에서는 굽힘 성형 시 탄성 회복에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 설계 변수를 파악하고, 설계 변수의 변화에 따른 탄성 회복량을 비교 검토하고자 한다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 펀치 곡률( $R_p$ ), 판재두께( $t$ ), 굽힘 각도( $\theta$ ), 금형 길이( $L_d$ )를 설계 변수로 선정하였다.

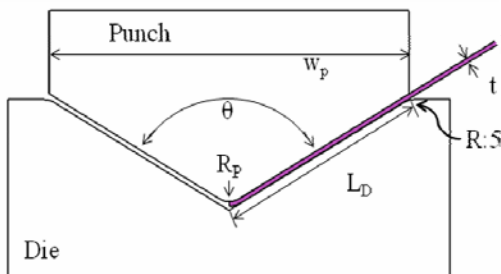


Fig. 2 Die setup and bending parameters

Table 1 FEM simulation conditions

Simulation model	Plane Strain
Object type	Sheet: Elasto plastic Die : Rigid
Material	SPFC590 : $\bar{\sigma} = 787.02\bar{\epsilon}^{0.162}$ SPFC780 : $\bar{\sigma} = 969.00\bar{\epsilon}^{0.165}$ SPFC980 : $\bar{\sigma} = 1170\bar{\epsilon}^{0.175}$ SPFC1180 : $\bar{\sigma} = 1415\bar{\epsilon}^{0.133}$
Punch tip radius( $R_p$ )	4.5 mm, 5.5 mm, 7 mm
Bending angle( $\theta$ )	60°, 90°, 120°
Thickness of sheet( $t$ )	1mm, 1.2mm, 1.4mm
Length of sheet	13 mm 1/2 model)
Die length ( $L_d$ )	50mm, 100mm
Young's modulus	200GPa
Poisson's ratio	0.3

해석은 상용 해석 프로그램인 DEFORM-2D v10.1을 사용하였고, 2차원 평면 변형률 조건을 사용하였다. 설계 변수의 상세 내역은 Table 1과 같다.

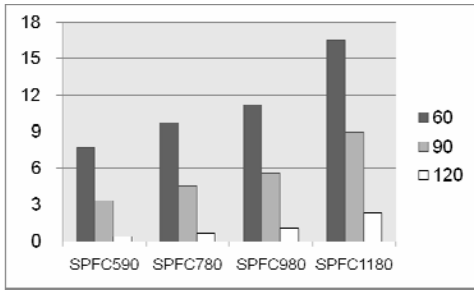
고려된 소재는 현재 많이 사용되고 있는 SPFC590, SPFC780, SPFC980과 상용화되기 시작한 SPFC1180에 대하여 진행하였다. 각 물성에 대한 유동응력은 Table 1에 나타내었다.

4종의 물성에 따라 4가지의 고려 설계 변수, 판재 두께(3종), 굽힘 각도(3종), 펀치 곡률(3종), 금형 길이(2종)의 조합인 총 216개의 해석을 실시하였다. 해석 상의 어려움으로 성형하중은 설계변수로 고려되지 않았다. 해석 결과의 일관성을 유지하기 위하여 평탄부에서의 펀치와 금형간의 최단거리(판재 두께 +0.01mm)를 사용하여 굽힘 변형을 정지하고 후변형을 측정하였다.

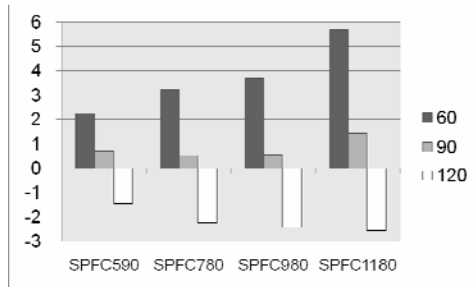
#### 3.2 굽힘 공정 성형 해석 결과

##### 3.2.1 굽힘 부위 각도에 따른 물성별 탄성 회복량 결과 비교

굽힘 부위 각도 변화에 따른 결과를 Fig.3에 나타내었다. Fig. 3(a)의 경우 예측된 바와 같이 인장응력이 커짐에 따라 Spring-back량도 커진다. 최대 펀치 곡률 7mm, 최소 판재 두께 1mm의 경우 최대 인장응력 1180MPa의 경우에서 최대 Spring-back량을 확인하였다. Fig. 3(b)의 경우는 (a)와는 펀치 곡률만 4.5mm로 변경된 경우로 Spring-back량도 현저하게 감소하였을 뿐만 아니라 굽힘 각도가 120도의 경우는 spring-go가 발생한다.

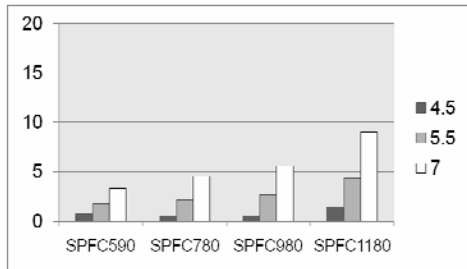


(a)  $L_d: 100\text{mm}, R_p: 7\text{mm}, t: 1\text{mm}$

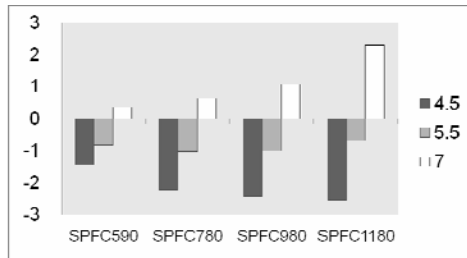


(b)  $L_d: 100\text{mm}, R_p: 4.5, t: 1\text{mm}$

Fig. 3 Comparison of the amount of spring-back/spring-go with respect to the bending angles and materials

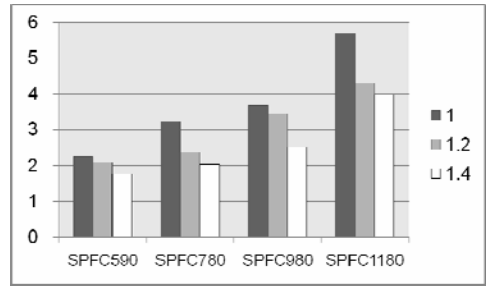


(a)  $L_d: 100\text{mm}, \text{Bending angle}(\theta): 60^\circ$

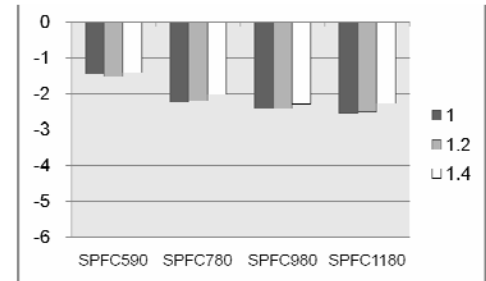


(b)  $L_d: 100\text{mm}, \text{Bending angle}(\theta): 120^\circ$

Fig. 4 Comparison of the amount of spring-back/spring-go with respect to the curvature and materials



(a)  $L_d: 100\text{mm}, R_p: 4.5, \text{Bending angle}(\theta): 60^\circ$



(b)  $L_d: 100\text{mm}, R_p: 4.5, \text{Bending angle}(\theta): 120^\circ$

Fig. 5 Comparison of the amount of spring-back/spring-go with respect to the thickness of sheet and materials

### 3.2.2 펀치곡률에 따른 탄성회복량 비교

펀치 곡률이 커질수록 탄성 회복량이 증가하는 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 굽힘 각도가 60도인 경우에는 펀치 곡률에 상관없이 모두 Spring-back이 발생하였고, 그 양도 판재 강도에 따라 증가하는 경향성을 보인다. 하지만 굽힘 각도가 120도인 경우는 곡률 5.5mm 이하에서는 Spring-go가, 곡률 7.0mm의 경우에는 Spring-back이 나타나고 회복량도 1도 수준으로 미미하였다.

### 3.2.3 소재두께에 따른 탄성회복량 결과비교

판재의 두께가 증가할수록 탄성 회복량이 감소하는 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 펀치 곡률이 4.5mm이고 굽힘 각도 60도의 경우 Spring-back 현상이, 굽힘 각도 120도에서는 Spring-go가 모든 두께에서 전체적으로 발생한다. 두 조건 모두에서 탄성 변형량이 소재 두께가 증가함에 따라 감소하는 결과를 얻었다.

### 3.2.4 Spring-go/ Spring-back 현상에 따른 응력분포 비교

Spring-go 현상은 펀치 곡률이 굽힘 각도에 비

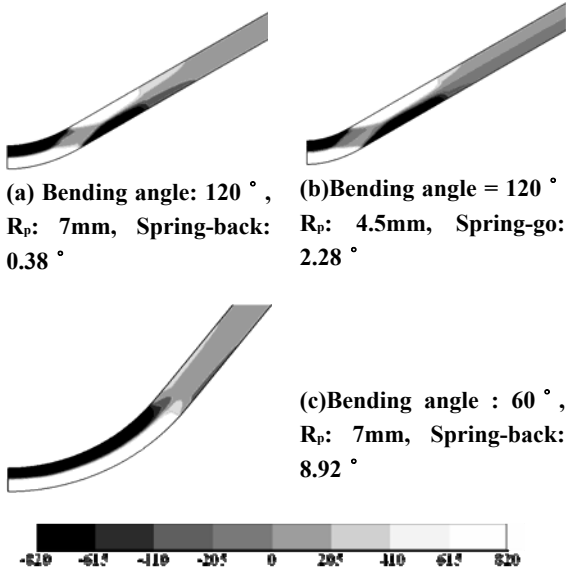
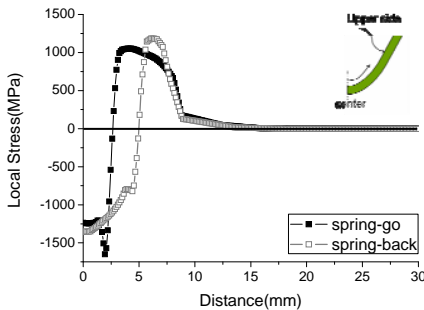
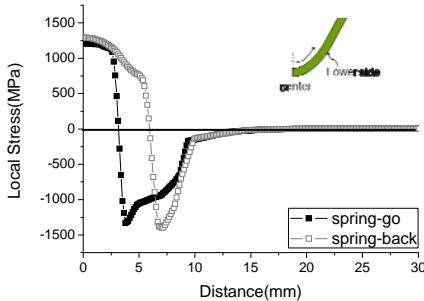


Fig. 6 Comparison of Local Stress distribution analysis with respect to bending angles and the curvature(SPFC 980, Ld:100mm, t:1.4mm)



(a) The upper side of sheet from center to end



(b) The lower side of sheet from center to end

Fig. 7 Comparison of Local Stress distribution analysis with respect to spring-back/ spring-go. SPFC 980, L<sub>d</sub>: 100mm, T : 1mm, R<sub>p</sub> : 4.5, spring-go (θ: 120°)/ spring-back (θ: 60°)

Table 2 The sum of the tensile and compressive stress distribution from the center to adjacent area [+ : tensile stress, - : compressive]

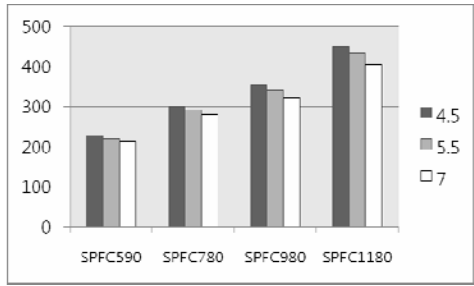
Unit(MPa)	Upper side		Lower side	
Area	Spring-go	Spring-back	Spring-go	Spring-back
Center	-25,101	-40,946	27,104	46,499
Adjacent	44,127	27,094	-46,241	-29,571

하여 작을 때 변형 초기에 변형이 코너에 집중되고 이후 인접부위에서 역굽힘 현상이 발생하여 압축/인장응력이 교차되는 응력분포를 만드는 데서 기인한다. Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 편치 곡률이 크고(R=7mm) 굽힘 각도가 큰 경우(120도)는 편치 쪽에는 압축 응력이 급형 쪽에는 인장응력만이 발생하여 Spring-back 현상을 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 Fig. 6(a), (b)의 경우는 모두 중심부 위에는 일반적인 굽힘 응력이 발생하지만 그 인접부위에서 반대 응력이 발생한다. 그렇지만 Fig. 6(a)의 경우는 미약하지만 여전히 Spring-back이 발생하고 (b)의 경우 Spring-go가 발생하고 있다. 이를 보다 정량적으로 확인하기 위해 Fig. 7에서 소재의 상하부면에서의 응력 값을 중심면에서의 거리로 나타내었고, Table. 2에서 중심부위와 인접부위에 인장, 압축 응력을 각각 합으로 나타내었다. Spring-back이 발생하는 경우 판재의 상하면 모두 중심부의 응력값의 합이 인접부에 비하여 크고 반대로 Spring-go의 경우는 인접부의 응력 값의 합이 더 크다.

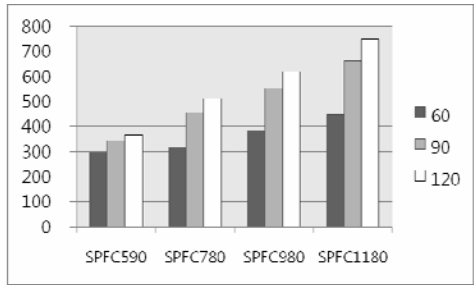
Fig. 6, 7에서 사용한 국부응력(local stress)는 각 위치의 강제 회전을 고려한 응력으로 인장의 경우 최대 주응력, 압축의 경우 최소 주응력으로 이해하면 된다.

### 3.2.5 곡률 및 성형각도에 따른 성형 하중 비교

성형하중은 공정 설계에 있어 가장 중요한 변수로 해석을 통한 선행적 파악이 가능하다면 그 의미가 가장 크다 할 수 있다. 일정한 굽힘 각도와 판재 두께의 경우 소재의 강도가 강해질수록 성형 하중은 커지는 것은 Fig. 8(a)에서 나타내었다. 같은 그래프에서 편치 곡률이 커질수록 판재 성형 시 필요한 하중은 작아진다. 이는 편치 곡률이 작아짐에 따라 국부적인 소성변형이 발생하고 역



(a)  $L_d$ : 100mm, Bending angle( $\theta$ ): 120°, 1.0t



(b)  $L_d$ : 100mm,  $R_p$ : 4.5, 1.4t

**Fig. 8 Comparison of the forming load with respect to the curvature, bending angles and materials**

굽힘에 따른 하중으로 설명할 수 있다. 특이한 사항으로는 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 동일 편치 곡률, 동일 관재 두께의 경우 굽힘 각도가 클수록 (굽힘량이 적을수록) 성형 하중은 증가함을 볼 수 있다. 본 연구에서 관찰한 하중은 일반적인 굽힘 하중이 아니고 최종 압착 단계에서 발생한 단조 하중에 가깝다. 굽힘각도 60도의 경우보다 120도의 경우에서 압착에 필요한 하중이 더 크다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초고강도 강판의 굽힘 변형에서의 탄성 후변형량을 다양한 설계 변수에 따라 정량적으로 파악하여 보았다. 탄성 회복량의 방향과 크기는 편치 곡률과 굽힘 각도에 영향 받는다. 후 변형량에 대한 인장강도, 관재 두께에 따른 영향

은 인장강도가 클수록, 관재 두께가 두꺼워 질수록 커진다. 소재의 두께, 굽힘 각도가 고정된 경우 특정 편치 곡률에서 후변형량이 최소화 된다. 굽힘 변형 중의 응력 분포를 분석하여 Spring-go의 발생 원인을 수치적으로 설명하였고, 편치 곡률이 작은 경우 굽힘부에 소성 변형이 집중된다. 정지 조건(관재 두께+0.01mm)을 만족하기까지 압하하는 경우는 굽힘 각도가 큰 경우에 더 높은 성형 하중을 요구하는 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Thipprakmas, S. Rojanan, 2008, Investigation of spring-go phenomenon using finite element method, Mater. Design, Vol. 29, pp.1526~1532.
- [2] M. Bakhshi-jooybari, B. Rahmani, V. Daezadeh, Z. Gorji, 2009, The study of spring-back of CK67 steel in V-die and U-die bending processes, Mater. Design, Vol. 30, pp. 2410~2419.
- [3] Y. M. Huang, D. K. Leu, 1998, Effects of process variables on V-die bending Process of steel, Int. J. Mech. Sci. Vol. 40, No. 7, pp. 631~650.
- [4] H. Baseri, M. Bakhshi-Jooybari, B. Rahmani, 2011, Modeling of spring-back in V-bending process by using fuzzy learning back-propagation algorithm, Expert System with Applications, Vol. 38, pp. 8894~8900.
- [5] Özgür Thkaslan, N. Gerger, U. seker, 2008, Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies, Mater. Design, Vol.29, pp. 1043~1050.
- [6] Özgür Thkaslan, U. seker, A. Öxdemir, 2006, Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5mm thickness in bending dies, Mater. Design, Vol. 27, pp. 251~258.
- [7] Y. M. Huang, Y. H. Lu, 1992, Elasto-Plastic finite-element analysis of V-shape sheet bending, J. Mater. Process. Technol., Vol. 35, pp. 129~150.