

## 경화모델에 따른 고강도강판 S-rail 성형공정에서의 스프링백 모드 비교

최병현<sup>1</sup> · 이진우<sup>2</sup> · 김세호<sup>#</sup> · 이명규<sup>2</sup> · 김흥규<sup>3</sup>

### Comparison of Springback Modes in the Stamping Process of an S-rail with HSS according to the Hardening Model

B. H. Choi, J. W. Lee, S. H. Kim, M. G. Lee, H. K. Kim

(Received December 18, 2012 / Revised January 16, 2013 / Accepted January 23, 2013)

#### Abstract

In this study, springback amounts of an S-rail are quantitatively compared according to the hardening model using a finite element simulation for the stamping process with high strength steels. For comparison of the hardening models, two types of hardening models were investigated. The two models were isotropic hardening and kinematic hardening. For the analysis with kinematic hardening, the Yoshida-Uemori model was selected. Five kinds of springback modes were measured at designated sections and a comparison was made between the experiment and the analyses with two types of hardening models. The analysis results show that the springback in the flange and the wall curl are predicted more accurately with a kinematic hardening model.

**Key Words** : Hardening Model, Yoshida-Uemori Model, Springback, S-rail

#### 1. 서론

최근 자동차 부품 생산분야에서는 환경오염에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 규제 강화와 충돌안전성 향상 및 차량경량화를 위한 부품 고강도화가 가장 큰 이슈가 되고 있다. 프레스 성형 부품의 고강도화는 금형제작 측면에서 성형성 열화 및 스프링백 증가에 의한 제품 형상정밀도 문제를 야기하고 있다. 또한, 금형제작 과정에서 필요한 성형해석 과정에서 고강도 제품의 형상정밀도 예측수준이 떨어지고 있어 금형제작의 효율성 측면의 제고가 필요한 시점이다.

프레스 성형공정 해석에서 경화모델의 선정이

스프링백의 예측에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 인장강도가 낮은 일반강의 경우 인장시험으로부터 구축되는 등방 경화모델(Isotropic hardening model)을 사용하더라도 스프링백 경향이 비교적 잘 예측되나, 고강도강으로 갈수록 스프링백 예측 정확도가 떨어지는 문제가 발생한다[1, 2]. 이러한 문제점을 보완하고자 고강도강 부품 성형 해석 수행 시 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 고려한 이동 경화모델(Kinematic hardening model)을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 인장강도 590 MPa과 780 MPa급 강판으로 성형되는 S-rail 부품의 프레스 성형공정 해석에서 경화모델의 적용에 따른 스프링백의 영

1. Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Daegu University

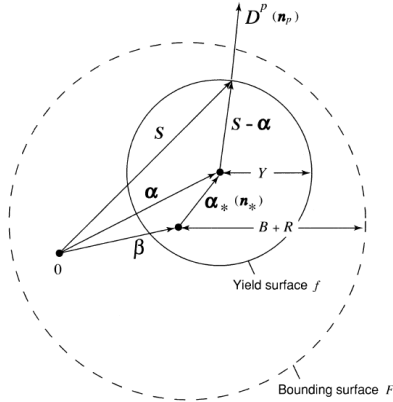
2. GIFT, POSTECH

3. Department of Automotive Engineering, Kookmin University

# Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, E-mail: mvksh@daegu.ac.kr

**Table 1 Mechanical properties of the blank**

	SGAFC590DP	SPFC780DP
YS(MPa)	442	533
UTS(MPa)	632	816
K(MPa)	963	1316
n	0.147	0.164
$\bar{R}$	0.652	0.867



**Fig. 1 Schematic illustration of the two-surface model**

향을 확인하고자 한다. 이를 위하여 등방 경화 모델 및 Yoshida-Uemori 식[1][2]를 사용한 이동 경화 모델을 적용하였다. 스프링백 변화를 정확히 비교하기 위하여 주요 단면에서의 5가지 기하학적 모드를 분류하였으며, 이를 시험결과와 정량적으로 비교하였다.

## 2. 경화모델에 따른 재료물성

### 2.1 사용소재

본 논문에서 S-rail 성형을 위하여 사용된 강관 소재는 SGAFC590DP 와 SPFC780DP 이며, 소재의 초기 두께는 1mm 였다. 소재의 기계적 물성은 인장시험을 통하여 도출하였으며 Table 1 에 도시하였다.

### 2.2 이동경화 모델 계수 추출

본 논문에서 이동경화 모델로 사용한 Yoshida-Uemori 모델[1]에서는 항복면이 경계곡면(bounding surface) 내에서 이동하는 것을 가정한 2 곡면모델(two-surface model)을 이용한다. 경계곡면에서 항복면의 상대이동은 Fig. 1 에서 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_* = \alpha - \beta \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$  는 항복곡면의 후방응력(back stress)이며,  $\beta$  는 경계곡면의 중심이다. 식(1)로부터 객관성(objectivity) 표현식은 아래와 같이 나타내어진다.

$$\dot{\alpha}_* = c_{1,2} \left[ \left( \frac{\alpha}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{\alpha}{\bar{\alpha}_*}} \alpha_* \right] \dot{\epsilon} \quad (2)$$

여기서,  $Y$  는 항복곡면의 반경을 나타내며,  $\dot{\epsilon}$  는 식(3)에서 변형속도텐서  $D^p$  에 의하여 표현되는 유효변형률 속도를 의미한다.  $c_1$  은 초기항복 주변의 이동경화 속도를 제어하는 물성변수를 나타내고  $c_2$  는 초기항복 이후의 물성변수이다.  $\bar{\alpha}_*$  는 식(4) 와 같이 표현된다.

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}} D^p : D^p \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_* = \sqrt{\frac{3}{2}} \alpha_* : \alpha_* \quad (4)$$

경계표면에서 등방경화를 고려하기 위한 식(5)에서  $R_{sat}$  은 등방경화의 응력 포화값을 나타내고  $m$  은 등방경화의 속도를 제어하는 재료 매개변수이다.

$$\dot{R} = m(R_{sat} - R) \dot{\bar{\epsilon}} \quad (5)$$

경계표면의 이동경화를 고려하기 위한 식(6)에서  $b$  는 수식구성을 위한 물성값이다.

$$\dot{\beta} = m \left( \frac{2}{3} b D^p - \beta \dot{\bar{\epsilon}} \right) \quad (6)$$

일반적으로 금속재료는 인장-압축 반복하중 경로에 따라 탄성계수가 연화되는 현상을 보이게 되는데, 이 관계를 식(7)과 같이 수식화하였다.  $E_0$  는 초기 탄성계수이며,  $E_a$  는 반복하중이 계속될 경우 포화 탄성계수값이고  $\xi$  는 연화관련 지수이다.

$$E = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon}^p)] \quad (7)$$

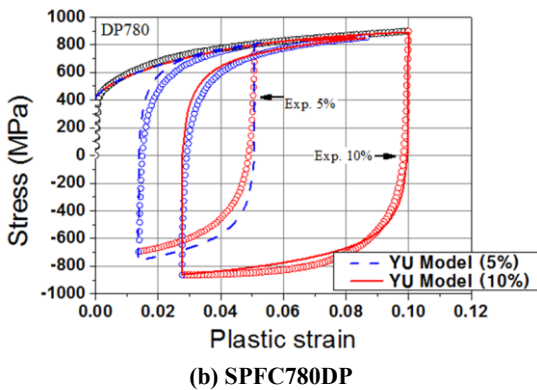
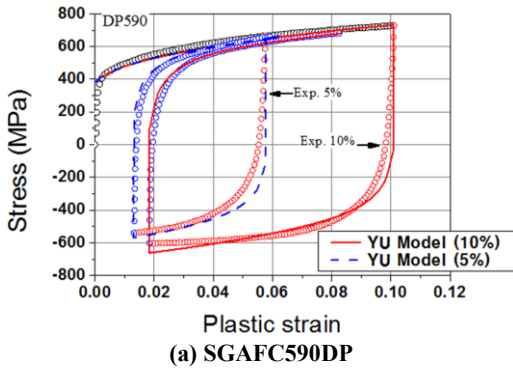
이동 경화모델을 사용하기 위해서는 강관소재의 인장-압축 시험이 필요하다. 본 논문에서 사용된 SGAFC590DP 와 SPFC780DP 강관의 인장-압축 시험에서 얻어진 결과를 Fig. 2 에 도시하였으며, 시험결과로부터 Yoshida-Uemori 모델식을 사용하여 얻은 재료 변수를 Table 2 와 Table 3 에 도시하였다.

**Table 2** Yoshida-Uemori parameters of SGAF590DP

$\alpha_0$	0.089	$b$	0.28	$R_{sat}$	0.144
$c_1$	214.52	$c_2$	214.52	$m$	9.88
$\zeta$	60	$E_a$	160	$E$	210

**Table 3** Yoshida-Uemori parameters of SPFC780DP

$\alpha_0$	0.15	$b$	0.182	$R_{sat}$	0.233
$c_1$	327.96	$c_2$	327.96	$m$	25.91
$\zeta$	0	$E_a$	210	$E$	210

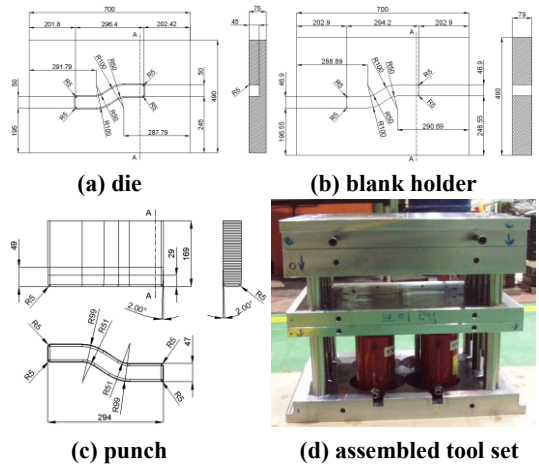


**Fig. 2** Stress-strain relation of blank materials from the tension-compression-tension test

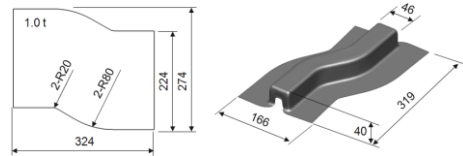
### 3. S-rail 성형시험 및 해석

#### 3.1 성형시험 [3]

본 논문에서 대상으로 사용된 S-rail 성형시험용 금형은 NUMISHEET2008-BM02[4]를 참조하여 설계, 제작하였으며, 금형 형상 및 치수는 Fig. 3 에 도시한 바와 같다. 초기 블랭크는 Fig. 4 과 같이 S 자 형태로 제작하였으며, 블랭크의 폭방향이 소재의 압연방향과 일치하도록 와이어 절단가공을 하



**Fig. 3** Shape and dimensions of the tools used for forming the S-rail



**Fig. 4** Schematic shape and dimensions of the blank before and after forming



**Fig. 5** Servo press for forming the S-rail

였다. 드로우 굽힘 변형만을 부과하는 기존 벤치마크 문제와는 달리 제품 길이방향의 블랭크 치수를 증가시켜 성형 후 벽부에 블랭크가 남아 길이방향 인장력을 발생시키는 것과 동시에 다양한 모드의 스프링백 현상을 얻도록 하였다. 제 2 장에서 기술한 바와 같이 성형에 사용된 소재는 SGAF590DP 와 SPFC780DP 2 종이다. 성형 시 사용 프레스는 Fig. 5 에 도시한 300ton 급 서보 프레스를 사용하였다. 성형 시 블랭크 홀딩력은 90kN 을 초과하였으며, 별도의 윤활은 실시하지 않았다.

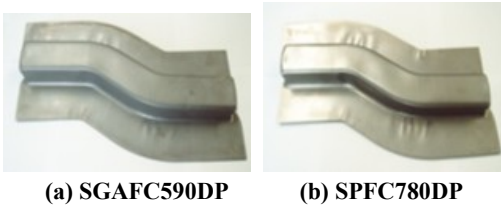


Fig. 6 Shape of the blank after the forming product



Fig. 7 Measurement of the 3-dimensional shape of the S-rail with a 3D optical scanner

Fig. 6 에 성형이 완료된 블랭크의 형상을 도시 하였다. 성형이 완료된 제품은 고정구를 이용하여 고정된 뒤 Fig. 7 과 같이 광학식 3 차원 스캐너를 통하여 형상을 추출하고 스프링백 양을 정량적으로 측정하였다.

### 3.2 성형해석 조건

제 3.1 절에서 설명된 강판의 물성값 및 공정을 위한 주요변수를 이용하여 성형공정 해석을 실시 하였다. 제작된 금형을 3 차원 측정하여 CAD 모델을 구축하였으며, Fig. 8 과 같이 유한요소 모델링을 하였다. 성형공정 해석은 상용 프로그램인 PAM-STAMP™ 2G V2011[5]을 이용하였다. 펀치의 하강속도는 5m/s 으로 하였으며, 펀치행정이 40 mm 가 될 때까지 해석을 수행하였다. 금형과 블랭크 간의 쿨롱 마찰계수는 무윤활 조건으로 가정하여 0.15 를 부과하였다. 블랭크 요소는 BLT (Belytschko-Lin-Tsay) 쉘요소[6]를 사용하였으며, 두께방향 응력계산을 정확하게 하기 위하여 두께방향 적분점 개수는 7 개로 하였다.

항복함수는 평면이방성을 고려한 Hill 의 1948 항복모델[7]을 사용하였다. 경화모델로 등방 경화 모델과 바우싱거 효과를 고려하는 이동 경화모델을 사용하여 스프링백에 미치는 영향을 비교하였다. 이동 경화모델로 상용프로그램에 널리 적용되어 있는 Yoshida-Uemori 모델을 사용하였다.

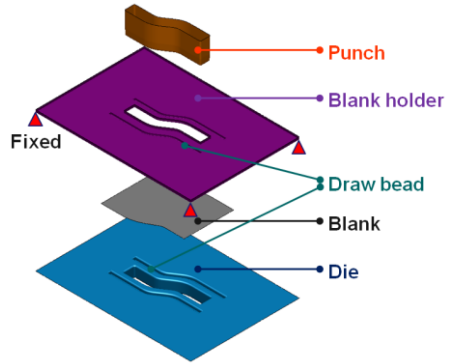


Fig. 8 Finite element model of the tools and the blank for the stamping analysis of an S-rail

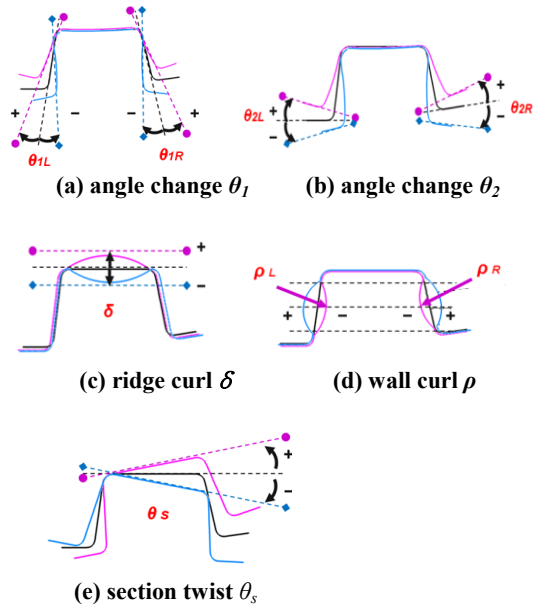


Fig. 9 Classification of springback modes in the S-rail

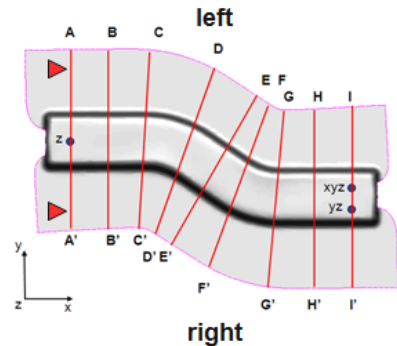


Fig.10 Measuring sections for the springback amount of the S-rail

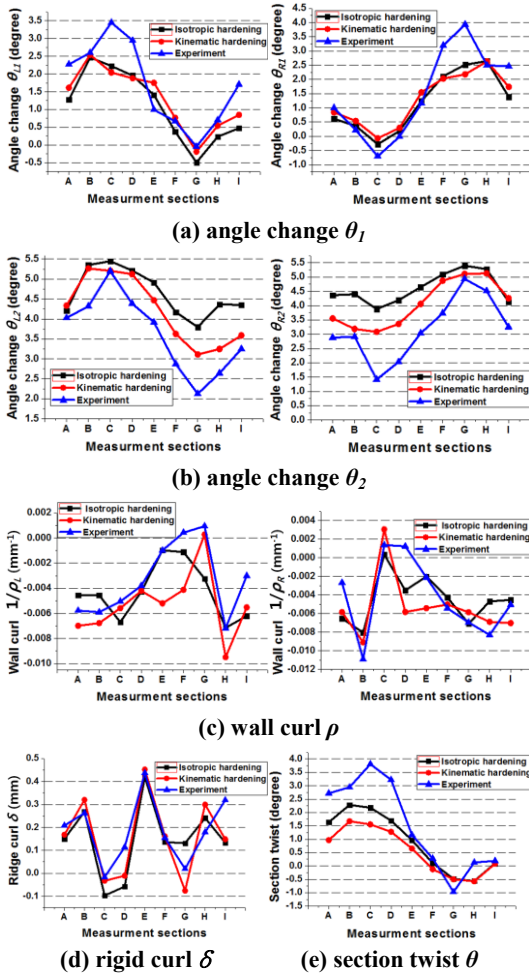


Fig.11 Comparison of springback amounts according to hardening models with SGAFCS90DP

#### 4. 경화모델에 따른 스프링백 정량비교

##### 4.1 스프링백 측정

S-rail 성형공정해석을 수행하고, 스프링백 후의 블랭크 형상을 시험결과와 비교하였다. 3 차원 형상에서 발생하는 스프링백 문제를 정량적으로 파악하기 위하여 Fig. 9 와 같이 (a) 편치부 각도변화  $\theta_1$ , (b) 플랜지부 각도변화  $\theta_2$ , (c) 상부처짐  $\delta$ , (d) 벽휨  $\rho$ , (e) 비틀림  $\theta$  등 5 가지 모드의 스프링백 양을 측정하였다. 스프링백의 정량적 분석을 위해 Fig. 10 에 도시한 9 개의 단면에서 해석결과와 시험결과의 스프링백 양을 비교하였다.

##### 4.2 스프링백의 정량적 분석

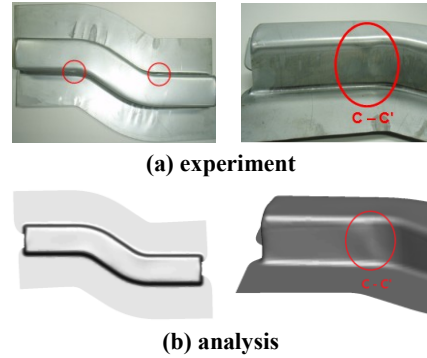


Fig.12 Wrinkling problems in the flange and the wall region during the forming process

등방 경화모델 및 이동 경화모델 적용이 스프링백에 미치는 영향을 파악하기 위하여 스프링백 후의 기하학적 형상의 각 모드를 시험결과와 비교하여 도시하였다. Fig. 11(b)에서 확인할 수 있듯이 SGAFCS 590DP 소재에서 이동 경화모델을 사용한 경우 플랜지부의 각도변화의 예측 정확도가 등방 경화모델을 사용한 경우에 비하여 크게 증가하고 있다. Fig. 11(a)와 같이 편치부 각도변화의 경우 등방 경화모델과 이동 경화모델간의 큰 차이를 보이지 않았으며, Fig. 11(c)와 (d)에 도시한 그래프를 살펴보면 벽휨과 상부처짐량은 이동 경화모델의 경우가 좀더 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 벽면 및 다이 어깨부 위치의 블랭크 소재는 유입에 따라 굽힘과 찌름을 받기 때문에 반복경화의 특성에 직접적으로 영향을 받게 되며, 등방 경화모델에서 고려할 수 없었던 영구연화(Permanent softening) 현상에 의하여 플랜지부 각도변화, 벽휨량이 실제와 유사하게 예측된 것으로 판단된다.

Fig. 12 에 도시한 바와 같이 성형시험에서는 단면 C-C'와 G-G' 주변의 플랜지부에서 주름이 발생하며 일부 벽면에서도 주름이 발생하는 경향이 관찰되고 있으며, 시험의 경우가 해석보다 주름높이가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 주름의 발생에 따라 편치부와 다이부의 각도변화가 정확하게 측정되지 못하여 해당부위에서 시험과 해석의 차이가 발생한 것으로 분석된다.

SPFC780DP 소재의 스프링백 모드를 Fig. 13 에 도시하였다. SGAFCS90DP 소재의 경우와 유사하게 이동 경화모델을 사용한 경우 플랜지부 각도변화의 예측 정확도가 높아진 것을 확인할 수 있었으며, 인장강도가 높아지면서 등방 경화모델에 비하여 시험결과에 더 근접하는 결과를 보이고 있

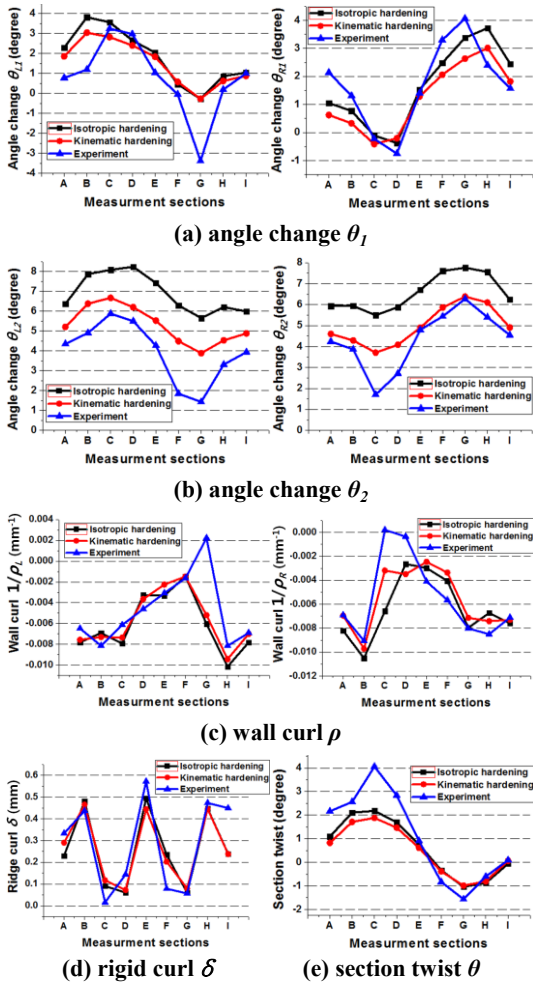


Fig. 13 Comparison of springback amounts according to hardening models with SPFC780DP

다. 다른 스프링백 모드는 큰 차이를 나타내고 있지 않으며, 시험결과에서 SGAFCS90DP 소재의 경우와 유사하게 단면 C-C'과 G-G'에서 주름경향에 의하여 스프링백 모드가 정확하게 측정되지 못하는 문제가 발생하고 있음을 간접적으로 확인하였다.

### 5. 결론

본 논문에서는 고강도강 판재 프레스 성형공정 해석 시 스프링백 예측의 정확도에 미치는 경화모델의 영향을 고찰하였다. 인장-압축 시험을 통하여 얻은 응력-변형률 곡선을 이용하여 Yoshida-Uemori식의 계수를 얻었으며, 이를 이용하여 이동 경화모델을 이용한 해석의 기초자료로 사용하였

다. 기존 사용되는 등방 경화모델과 이동 경화모델에서의 스프링백 예측결과를 비교하기 위한 기준으로 S-rail 성형시험을 수행하였다. 시험에서 얻은 블랭크 형상에서 단면의 스프링백 모드를 기하학적으로 분류하고 해석결과와 정량적인 비교를 수행하였다. 이동 경화모델을 사용할 경우 플랜지부 각도변화와 벽휨량에 대한 예측 정확도가 크게 향상되었으며, 이는 드로잉공정에서 굽힘-파짐의 반복변형 상태의 응력예측의 정확도 향상에 의한 결과로 판단된다. 추후 고강도강판을 이용한 드로잉 성형공정의 유한요소 해석 시 이동 경화모델을 이용한 스프링백 예측이 수반될 경우 예측 정확도 향상에 큰 도움을 줄 것이라 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] F. Yoshida, T. Uemori, 2002, A model of Large-Strain Cyclic Plasticity Describing the Bauschinger Effect and Workhardening Stagnation, *Int. J. Plast.*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 661~686.
- [2] T. Uemori, S. Sumikawa, S. Tamura, H. Akagi, T. Naka, F. Yoshida, 2010, Springback Simulation of High Strength Steel Sheets Calculated by Yoshida-Uemori Model, *Steel Res. Int.*, Vol. 81, No. 9, pp. 825~828.
- [3] D. G. Jeong, 2011, Analysis of Springback Mechanisms for the Improvement of the Shape Accuracy in the Stamping Process, M. S. Thesis, Daegu University, Gyeongbuk, Korea.
- [4] K. Roll, K. Wiegand, P. Hora, 2008, Proc. NUMISHEET2008, Part B(P. Hora, W. Volk, K. Roll, B. Griesbach, L. Kessler, W. Hotz), Institute of Virtual Manufacturing, ETH, Zurich, pp. 45~111.
- [5] ESI Group, 2011, PAM-STAMP™ User's Manual, www.esi-group.com(electronic version).
- [6] T. Belytschko, J. I. Lin, C. Tsay, 1984, Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 42, No. 2, pp. 225~251.
- [7] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [8] A. Aryanpour, 2011, Experimental & Numerical Study of Sidewall Curl in Advanced High Strength Steels, M. S. Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada.