

디지털 서보 프레스를 이용한 고강도강 성형제품의 스프링백 경향 변화

강경훈¹ · 김세호[#] · 노현철²

Change in Springback Tendency during Forming of a Hat-type Product with High Strength Steel Using a Digital Servo Press

K. H. Kang, S. H. Kim, H. C. Ro

(Received June 9, 2015 / Revised November 11, 2015 / Accepted November 25, 2015)

Abstract

In the current study, reduction of springback is quantified and the reasons for the reduction are investigated. The testing involved a digital servo motion applied to a U-draw bending to produce a hat-type product from high strength steels such as DP780 and DP980. The change in springback is compared between the constant speed motion and three kinds of servo-controlled motions during forming experiments. In order to predict the springback for the servo-controlled tool motion, a finite element method was utilized for the springback analysis considering a kinematic hardening model for the steel. The comparison of springback between the analysis and the experiments shows that they have similar tendencies. Also, the analysis results indicate that the springback reduction is greatly influenced by a decrease in the friction coefficient, which originates from the contact and detach phenomena between the tooling and the blank during the up-and-down motion of the upper die following the servo-controlled motion.

Key Words : Digital Servo Press, Springback, High Strength Steel, Slide Motion

1. 서 론

현재 자동차 관련 업계에서는 차량의 충돌성능을 보장하는 동시에 경량화를 기술적으로 추진하기 위하여 고강도 강판 적용 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 차량 부품의 고강도 강판의 적용 비율이 높아지면서 제품 제작에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위한 금형 및 성형 기술의 개발이 요구된다. 반면 소재의 강도가 증가함에 따라 스프링백 양이 증가하여 치수 정밀도를 얻기 어려운 문제가 발생하고 있다. 이에 관한 대응방법으로 Fig. 1와 같이

디지털 서보 프레스를 이용한 성형중 금형의 운동 제어에 관련된 연구가 진행되고 있으며, 부분적으로 양산에 적용되고 있다[1]. 기존 기계식 프레스와 달리 디지털 서보 프레스를 사용하는 경우 슬라이드 운동의 정밀 제어를 통해 다양한 동작 설정이 가능하며, 재료의 물성 및 마찰조건 등의 변화에 따라 성형성이 향상되고 스프링백 저감 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 프레스 속도 및 슬라이드 위치에 무관하게 일정한 에너지 능력을 가져 성형 소재에 충분한 힘을 가할 수 있는 특징이 있다[2~4]. 현재까지 서보 프레스를 사용한 공법설계 시 재료의

1. 대구대학교 대학원 기계공학과
2. 대구기계부품연구원 뿌리산업혁신본부
Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, E-mail: mvksh@daegu.ac.kr

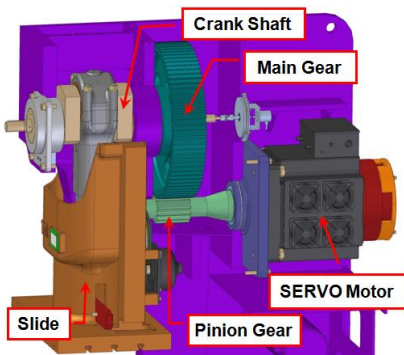


Fig. 1 Servo motor driven press system

특성 및 성형성과 스프링백 변화에 관련된 체계적인 고찰이 부족한 실정이다. 유한요소 해석 등 설계과정에서의 체계적인 검증이 부족한 상태로 시행 오차법에 의하여 현장 적용되고 있다.

본 논문에서는 서보 프레스를 이용한 판재 성형 공정에 활용 가능한 슬라이드 운동의 효과를 정량적으로 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 슬라이드 운동을 통한 단순형상 부품의 스프링백 감소효과를 확인하고 감소량을 정량적으로 평가하였다. 서보 프레스를 활용한 공법설계를 위한 도구로서의 유한요소해석이 시험결과를 예측하는 정확도를 확인하기 위하여 해석을 실시하였다. 슬라이드 운동방식에 따른 재료 거동의 변화를 모사하기 위하여 이동경화 모델이 고려된 유한요소해석을 실시하였으며, 스프링백 예측 정확도를 기초 분석하였다. 또한, 서보 운동의 대표적 영향 중 하나로 알려져 있는 마찰계수 저감효과를 해석을 활용하여 간접적으로 확인하였다.

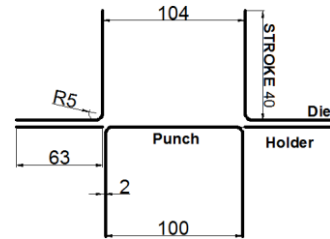
2. 모자형 부품 성형공정 및 시험

2.1 성형공정 개요

본 논문에서는 차체부품 멤버류의 스프링백을 정량적으로 평가하기 위하여 모자형 부품의 U-드로우 굽힘 성형공정을 대상으로 연구를 진행하였다. 성형 시험에 사용된 고강도 강판은 SGAF780과 SPFC 980 2종이며, 두께는 각각 1.4mm와 1.6mm이다. SIMPAC사의 200ton급 서보 프레스를 사용하여 시험을 진행하였다. 초기 블랭크는 230mm×40mm의 치수로 재단하였다. 블랭크 홀딩력은 일정한 값인 115kN을 부과하였다. 성형깊이는 40mm를 부과하였다. Fig. 2에 U-드로우 굽힘 공정의 금형 및 치수를 도시하

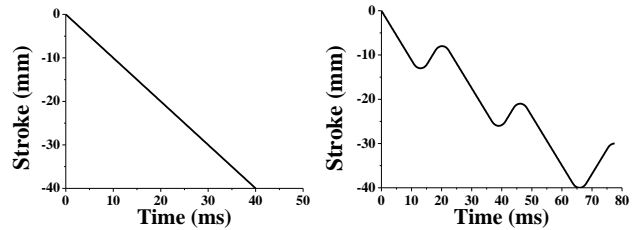


(a) tool shape



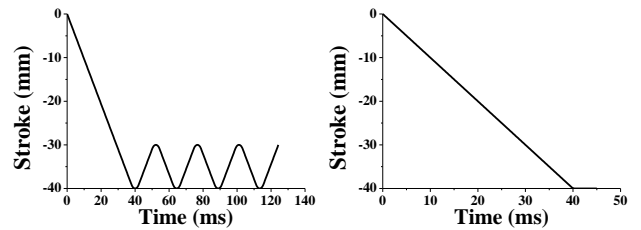
(b) dimension

Fig. 2 Schematic shape and dimension of the tools used in the U-draw bending process



(a) constant speed motion

(b) flexible motion



(c) pendulum motion

(d) stop motion









Fig. 3 Stroke vs. time curves for the considered types of the servo-controlled slide motion

였다. 성형불량 평가를 위하여 펀치부와 플랜지부의 스프링백 각도와 벽부 휨량을 정량적으로 측정하여 비교하였다.

2.2 슬라이드 운동 설계

서보 프레스의 슬라이드 운동은 상사점, 하강과정, 상승과정, 하사점에서의 동작 등 4가지로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 모자형 부품의 스프링백 개선을 위하여 슬라이드 운동의 주요 변수를 설계하였

Table 1 Shape of the deformed specimen with the servo press motion

Type	SGAFC780	SPFC980
Constant		
Flexible		
Pendulum		
Stop		

다. Fig. 3에는 본 논문에서 적용한 4가지 종류의 시간에 따른 슬라이드 운동방식을 도시하였다. 운동방식에 따라 등속(constant speed) 운동, 중간상승(flexible) 운동, 다지기(pendulum) 운동, 보압(stop) 운동의 4가지를 적용하였다. 등속운동의 경우 편치의 하강속도는 1m/s로 일정한 속도를 부과하였다. 중간상승 운동과 다지기 운동은 서보운동 시 접촉-분리에 의한 소재의 바우싱거 효과(bauschinger effect) 및 리스트라이킹 효과를 기대하여 스프링백 크기 및 양상을 변화시키고자 적용하였다. 기계식 프레스에서 부가가 불가능한 하사점에서의 성형력 유지를 위하여 보압운동을 활용하였다.

2.3 서보 프레스 성형시험

전술한 성형공정 조건을 바탕으로 시간과 행정거리 에 따른 슬라이드 운동을 부과하고 모자형 부품의 성형시험을 수행하였다. 각 슬라이드 운동 종류에 따른 시험결과 중 블랭크 형상을 Table 1에 도시하였다. 시험에서 얻은 제품의 단면을 3차원 접촉식 측정기(CMM)로 측정하였다. 스프링백 양의 정량평가 및 비교를 위하여 Fig. 4에 도시한 바와 같이 편치부와 플랜지부의 스프링백 각도와 벽부의 휨양을 계산하였다.

2.4 서보운동의 스프링백 경향

서보운동을 부과한 시험에서 얻은 스프링백 정량값을 등속운동과 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 980MPa 급 소재를 사용하고 중간상승 및 다지기 운동을 부과한 경우 상승-하강 운동에 의한 편치 평면부 및 라운드부 접촉-분리 현상으로 편치부 스프링백양이 각각 최대 30.3%와 27.7%로 증가하였다. 반면

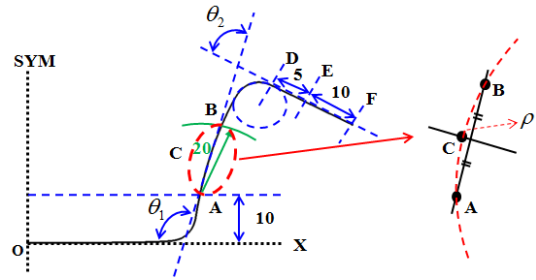
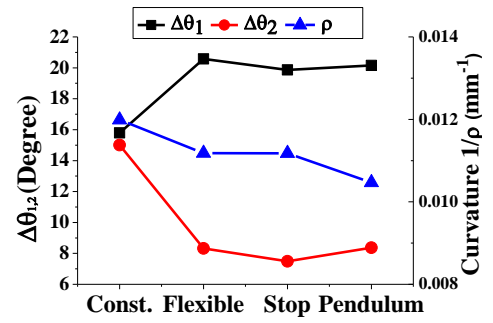
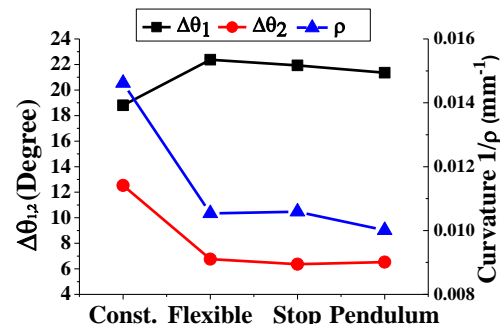


Fig. 4 Measuring method in the section for springback amount



(a) SGAFC780



(b) SPFC980

Fig. 5 Comparison of the springback amount among the applied tool motions

플랜지부의 스프링백은 각각 최대 46.1%와 47.9%로 감소하였고, 벽휨은 각각 최대 27.9%와 31.5%로 감소하는 결과를 보였다. 이러한 변화는 성형중 블랭크와 금형이 접촉-분리를 반복하게 되어 소재의 바우싱거 효과의 발생에 기인한 것으로 판단된다. 또한 전 변형률(pre-strain)에 의한 탄성계수의 감소로 인하여 스프링백 양이 증가하게 되는 현상도 보이게 된다. 그래프에서 볼 수 있듯이 보압운동의 경우에도 하사점에서 충분한 하중 전달에 의한 스프링백 감소효과가 나타난 것을 확인할 수 있었다.

3. 성형해석 및 결과 비교

일반적으로 금형 및 공정설계를 위하여 성형공정 해석을 수행하고 있으나, 서보 프레스 공정은 일반 프레스 성형공정과 상이한 공정변수 대부분을 시험을 통하여 규명하고 해석에 반영하기가 어렵다. 따라서, 경험을 바탕으로 한 공정변수를 설계하고 양산에 적용하고 있다. 본 논문에서는 서보 운동이 반영된 성형해석이 금형 및 공정설계에 활용 가능한 정보를 주는지를 확인하기 위한 기초연구로 시간에 따른 슬라이드의 운동과 블랭크의 이동경화 특성을 반영한 성형해석을 수행하였으며, 그 결과를 고찰하였다. 또한, 해석 시 슬라이드 운동의 스프링백 거동을 상세히 모사하고자 마찰계수 등의 변화를 포괄적으로 파악하기 위한 추가해석을 실시하였다.

3.1 강판의 물성도출

인장시험을 통하여 얻은 기계적 물성 및 각 계수를 Table 2에 도시하였다. 슬라이드의 하강-상승 운동에 의한 블랭크의 하중 부과-제거과정에서 발생하는 바우싱거 효과를 고려하기 위하여 인장-압축시험을 실시하였다. 인장-압축 시험의 결과를 해석에 적용하기 위한 이동경화식으로 Yoshida-Uemori 모델[5]을 이용하였다. 본 이론에서는 항복면이 경계곡면에서 이동하는 것을 가정한 2 곡면모델(two-surface model)을 이용한다. 경계곡면에서 항복면의 상대이동은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, α 는 항복곡면의 후방응력(back stress)이며, β 는 경계곡면의 중심이다. 식(1)로부터 객관성(objectivity) 표현식은 아래와 같이 나타내어진다.

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

여기서, Y 는 항복곡면의 반경을 나타내며 $\dot{\varepsilon}$ 는 식(3)에서 변형속도텐서 \mathbf{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.

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{(2/3)\mathbf{D}^p : \mathbf{D}^p} \quad (3)$$

Table 2 Mechanical properties of the blank

	SGAFC780	SPFC980
YS(MPa)	502	757
UTS(MPa)	777	1089
E_u (%)	12.8	8.2
E_f (%)	19.8	14.7
$R_o / R_{45} / R_{90}$	0.71/0.98/0.9	0.75/0.85/0.82
K(MPa)	1174.8	1509.9
ε_o	0.00153	0.00345
n	0.136	0.094

Table 3 Material parameters for Yoshida-Uemori model

Blank	Material properties					
	B-Y	0.345GPa	b_{sat}	0.137	R_{sat}	0.171
SGAFC780	C_1	220	C_2	185	m	7.27
	ξ	60	E_a	120GPa	E_o	206GPa
	B-Y	0.448GPa	b_{sat}	0.13	R_{sat}	0.102
SPFC980	C_1	422	C_2	162	m	15.03
	ξ	80	E_a	165GPa	E_o	206GPa

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

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

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

경계표면의 이동경화를 고려하기 위한 식(6)에서 b 는 수식 구성을 위한 물성값이다.

$$\dot{\beta} = m \left(\frac{2}{3} b_{sat} D^p - \beta' \dot{\varepsilon} \right) \quad (6)$$

일반적으로 금속재료는 인장-압축 반복하중 경로에 따라 탄성계수가 연화되는 현상을 보이게 되는데, 이 관계를 식(7)과 같이 수식화하였다. E_o 는 초기탄성계수이며, E_a 는 반복하중이 계속될 경우 포화탄성계수 값이고 ξ 는 연화관련 지수이다.

$$E = E_o - (E_o - E_a) [1 - \exp(-\xi \bar{\varepsilon})] \quad (7)$$

재료변수를 얻기 위해 인장-압축 곡선으로부터 Yoshida-Uemori 모델의 계수를 추출하였으며 Table 3에는 해당 모델의 계수를 도시하였다.

3.2 성형공정 CAE 조건

U-드로우 굽힘 성형공정의 유한요소해석을 위한 금형과 블랭크 형상을 Fig. 6에 도시하였다. 블랭크는 변형체로 가정하여 BLT(Belytschko-Lin-Tsay) 쉘요소[6]를 사용하여 모델링하였고, 두께 방향의 적분점은 5개로 설정하였다. 블랭크의 초기 요소 크기는 1mm로 분할하였으며, 곡률부를 7.5° 간격으로 분할하였다. 성형해석 시간의 단축을 위하여 질량 증가법(mass scaling)을 사용하였다. 모델의 대칭성을 고려하여 1/4모델을 사용하였다. 재료의 항복함수는 평면 이방성을 고려한 Hill의 1948 모델[7]을 사용하였고, 경화모델은 등방경화와 이동경화 두 가지를 고려하여 경화모델 사용이 복잡한 변형경로의 예측에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 고강도강의 경우 정확한 변형 및 스프링백을 모사하기 위한 다양한 항복조건식 및 경화모델이 활용되나, 본 논문에서는 서보 프레스 성형해석의 가능성을 확인하기 위한 기초연구로 현장에서 기본적으로 사용되는 해석이론을 활용하였다. 블랭크 홀딩력은 실제 성형공정과 동일한 115kN을 부과하였다. 성형 및 스프링백의 해석은 상용 유한요소 프로그램인 PAM-STAMP 2G 2012[8]을 사용하였다.

3.3 스프링백 예측 정확도 고찰

3.2절의 조건을 바탕으로 성형공정해석을 실시하고, Fig. 7에 등속운동을 부과한 경우의 블랭크 형상을 시험과 비교하였다. 등방경화 및 이동경화 모델을 사용한 해석결과와 시험결과에서 얻은 스프링백 양을 Fig. 8에 비교하였다. Fig. 9에 시험값을 기준으로 해석에서의 스프링백 양을 정규값으로 나타내었다. 도시한 바와 같이 두 강종 모두 펀치부 스프링백과 벽휩량의 경우 이동경화 모델이 10% 오차범위 이내로 시험값과 유사한 경향성을 보이고 있으나 플랜지부 스프링백 $\Delta\theta_2$ 는 최대 40% 이상의 차이로 과소평가하고 있음을 확인할 수 있다.

서보운동을 부과한 경우의 시험 및 해석 결과를 강종별로 Fig. 10과 Fig. 11에 비교하였다. 등속성형의 경우와 마찬가지로 이동경화 모델을 적용한 경우가 시험값과 유사한 결과를 보이고 있으나, 스프링백 각도 및 벽휩 반경의 크기가 20% 이상 작게 과소 예측되고 있다. 보압운동의 결과는 금형보정에 직접적인 사용이 가능할 수준의 예측 정도를 보이고 있으나, 중간상승 운동과 다지기 운동은 예측정확도가

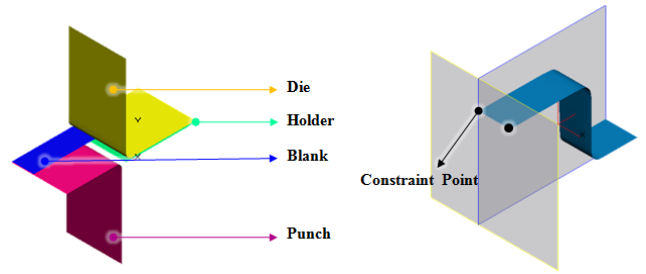


Fig. 6 Finite element model of the tools and the blank for the stamping analysis of the U-draw bending

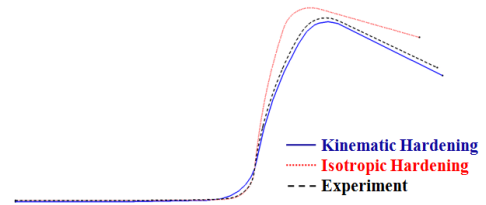
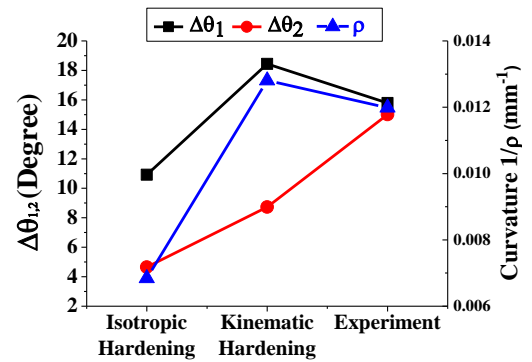
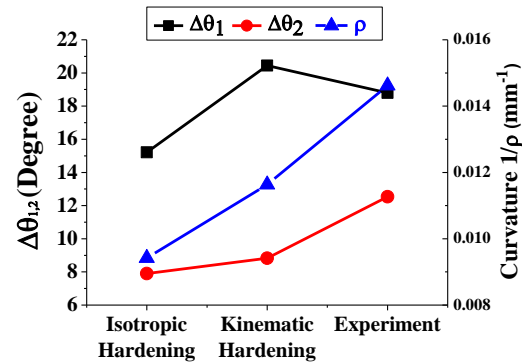


Fig. 7 Comparison of the deformed shapes among the analysis results and the experiment with the constant speed motion



(a) SGAF780



(b) SPFC980

Fig. 8 Comparison of the springback amount between the analysis and experiment with the constant speed motion

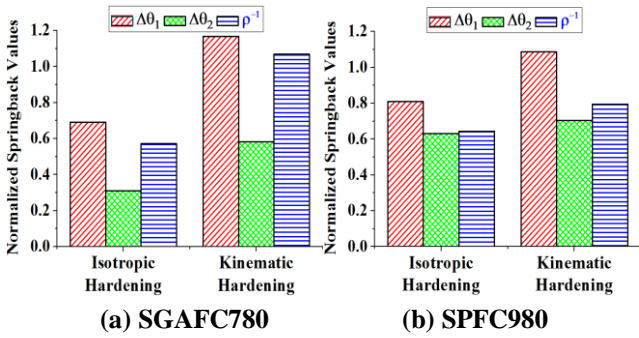


Fig. 9 Comparison of the normalized values springback amount with respect to the experiment with the constant speed motion

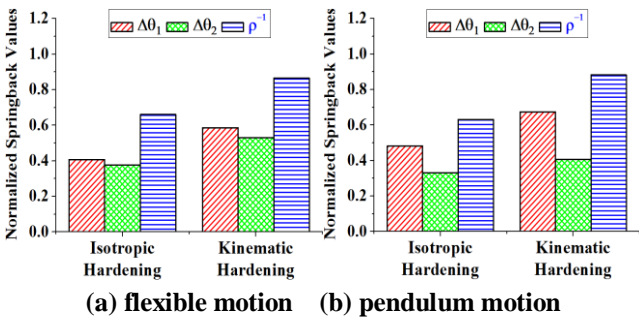


Fig.10 Comparison of the normalized values springback amount with respect to the experiment with SGAFC780

많이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이는 서보 프레스 운동의 가속-제동의 복잡한 하중경로 하에서 재료의 부분 연화 현상, 바우싱거 효과의 면밀한 모사, 마찰계수 변화 등 아직까지 해석에서 고려하고 있지 못한 공정변수의 고려가 필요함을 의미한다.

3.4 마찰계수에 따른 스프링백 경향비교

슬라이드의 상승 시 금형과 블랭크가 일시적으로 분리되며 재접촉 시 무마찰 상태에서 마찰계수가 증가하게 되는 현상이 발생한다고 알려져 있으며[9],

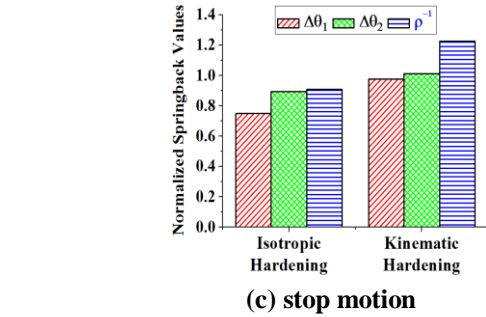
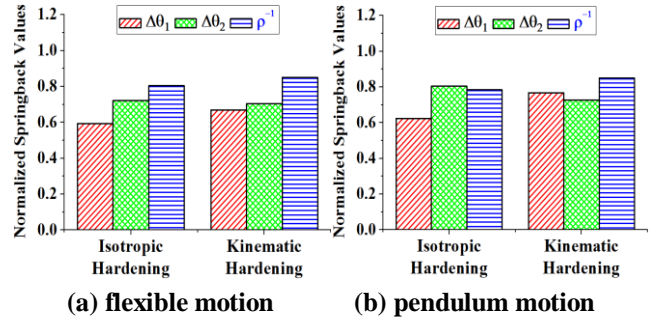


Fig.11 Comparison of the normalized values springback amount with respect to the experiment with SPFC980

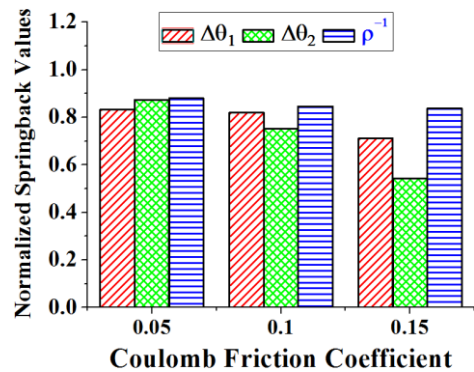


Fig.12 Comparison of the normalized springback values with respect to the experiment in the case of the pendulum motion with SPFC980

이에 따라 전체적인 성형공정 측면에서 마찰계수가 감소하는 경향을 보여 성형성 등을 향상시키는 것으로 분석되고 있다. 본 논문에서는 서보운동 시 발생하는 마찰계수의 감소현상을 간접적으로 확인하고자 성형공정해석을 실시하였다. 슬라이드 운동 중 에서 접촉-분리로 마찰계수의 영향이 가장 클 것으로 판단되는 다지기 운동에 대하여 마찰계수에 따른 스프링백 경향을 비교하였다. 마찰계수는 성형공정 전과정 및 전 접촉영역에서 동일하다고 가정하

고 일정값을 사용하였다. 금형 가공도를 고려하여 쿨롱 마찰계수를 0.1과 0.15를 사용하였으며, 추가적으로 슬라이드 상승시 무마찰 상태로 변화하는 상황을 가정한 평균 마찰값으로 0.05를 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 12에 마찰계수 변화에 의한 스프링백 양을 도시하였으며, 마찰계수가 작아질수록 해석값이 시험값에 접근하는 것을 확인하였다. 특히 마찰계수 0.15 대비 0.05인 경우에 플랜지부 스프링백 $\Delta\theta_2$ 가 60% 이상 증가하여 가장 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 금형의 상승-하강 운동 시 편치 라운드부는 소재가 이동하지 않으나, 플랜지부의 소재는 다이 라운드부 내측으로 유입되어 굽힘-펴짐을 반복하는 관계로 마찰의 영향을 많이 받는 것으로 유추할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고강도강 모자형부품의 성형공정에 서보 슬라이드 모션을 적용하고 스프링백양의 변화에 대한 정량적 분석을 실시하였다. 그리고 서보 운동을 적용한 유한요소 성형해석이 금형 및 공정설계에 적용이 가능한지 여부를 기초적으로 확인하기 위하여 서보 운동 및 이동경화모델을 적용한 해석을 실시하고 시험결과와 정량비교 하였다. 본 논문에서 얻은 결론을 다음과 같이 종합할 수 있다.

(1) 서보 운동을 적용한 시험 결과 등속운동 대비 편치부 스프링백양이 최대 30.3% 증가하였고, 플랜지부 스프링백 및 벽휩량은 각각 최대 47.9%와 31.5%로 감소하는 경향을 얻어 서보 프레스 적용 시 스프링백 감소효과를 확인하였다.

(2) 성형공정해석에서 이동경화 모델을 적용한 경우가 등방경화 모델의 결과보다 스프링백 관점의 예측정확도가 크게 증가함을 확인할 수 있었으나, 스프링백 및 벽휩양이 20% 정도 작게 예측되고 있었다.

(3) 서보 운동 적용 시 마찰계수가 감소하는 현상을 고려하기 위하여 마찰계수를 감소시켜 해석을 수행하였고, 마찰계수가 작아질수록 스프링백 양이 증가하여 시험값과 유사한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 플랜지부 스프링백이 60% 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 추후 해석을 이용하여 서보 운동을 적용한 성

형공정에서 유용한 정보를 제공하기 위해서는 가중-제중 등 복잡한 변형경로의 면밀한 모사를 위한 재료 물성 모델과 마찰계수 변화 등의 추가연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업의 “자동차 핵심 부품 생산기반공정 플랫폼 기술” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] K. Osakada, K. Mori, T. Altan, P. Groche, 2011, Mechanical Servo Press Technology for Metal Forming, CIRP Ann.-Manuf. Technol., Vol. 60, No. 2, pp. 651~672.
- [2] C. Murata, J. Yabe, J. Endou, K. Hasegawa, 2014, Proc. NUMISHEET2014, Part B(J. W. Yoon, B. Rolfe, J. H. Beynon, and P. Hodgson), AIP Publishing, New York, pp. 1016~1019.
- [3] K. Mori, K. Akita, Y. Abe, 2007, Springback Behaviour in Bending of Ultra-high-strength Steel Sheets using CNC Servo Press, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 47, No. 2, pp. 321~325
- [4] D. H. Kim, 2015, Study on the Pressure Load Increment Mechanism for Mechanical Type Press System using Servo Motor, M. S. Thesis, Chungnam National University, Chungnam, Korea.
- [5] 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, pp. 661~686.
- [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. London, Ser. A, Vol. 193, No. 1033, pp. 281~297.
- [8] ESI Group, 2012, PAM-STAMP™, User's Manual.
- [9] N. Ma, N. Sugitomo, T. Kyuno, S. Tamura, T. Naka, 2014, Proc. NUMISHEET2014, Part B(J. W. Yoon, B.

- Rolfe, J. H. Beynon, and P. Hodgson), AIP Publishing, New York, pp. 918~921.
- [10] M. G. Lee, 2013, Prediction on Springback Behavior of High Strength Steel using U-bending, Trans. Mater. Process., Vol. 2013, No. 12, pp. 3560~3565.
- [11] K. H. Hyun, 2003, A Study on the Spring-back Control in U-bending of Sheet Metal, M. S. Thesis, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea.
- [12] S. U. Lee, 2012, Prediction of springback for DP590 Sheet using Yoshida-Uemori Model, M. S. Thesis, Kyungpook National University, Gyeongbuk, Korea.