

## 성형공법에 따른 초고강도 모자형 박판부품 형상정밀도 평가

### Quantitative Evaluation of Shape Accuracy in a Hat-type Product with UHSS according to the Forming Procedure

최병현<sup>1</sup>, 김세호<sup>2,✉</sup>, 김흥규<sup>3</sup>  
Byeung Hyeun Choi<sup>1</sup>, Se Ho Kim<sup>2,✉</sup>, and Heung Kyu Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (주)화신 기술연구소 (R&D Center, Hwashin Co. Ltd.)

<sup>2</sup> 대구대학교 기계·자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Univ.)

<sup>3</sup> 국민대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Kookmin Univ.)

✉ Corresponding author: mvksh@daegu.ac.kr, Tel: +82-53-850-6685

Manuscript received: 2013.8.19 / Accepted: 2013.9.16

*In this paper, the shape accuracy of the stamped hat-type product is quantified and analyzed with ultra high strength steel (UHSS) sheets. The shape of the hat-type product is designed in order to simplify the geometry of the side sill and the stamping methodology is proposed in order to verify the effect of the stamping procedure on the springback amount. Experiments and finite element analyses are conducted with four kinds of the forming sequences. The springback amounts are measured and compared according to the forming procedure with the embossing shape. Experimental result in company with analysis one illustrate that the springback amount is reduced with embossing in the padding operation. They also fully demonstrates the proposed forming procedure and the analysis method can be effectively applied to the process design for producing parts with ultra high strength steel.*

Key Words: UHSS(초고강도강), Springback(스프링백), Hat-type Product(모자형상 부품), Forming Procedure(성형공법)

#### 1. 서론

최근 차량 및 차량부품 제조사에서는 강화되고 있는 연비 및 배출가스 규제에 대응하기 위한 주요 방안의 하나로 차량 경량화 연구를 진행하고 있다. 경량화와 함께 이슈가 되고 있는 충돌안전성 강화의 요구를 동시에 만족하기 위한 현실적인 대안으로 기존의 차체용 강판을 고강도 강판으로 대체하는 시도를 계속하고 있다.<sup>1,2</sup> 차량부품으로 사용되는 고강도강판의 여러 장점에 비하여 프레스 금형 및 성형의 관점에서는 성형성 열화에 의한 파단, 주름 및 과도한 스프링백에 의한 형상정밀도 저하 현상이 심해져 금형설계 및 제작, 제품

생산이 어려워지는 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 특히 냉간 프레스 성형공정을 이용한 인장강도 980 MPa 이상 초고강도 강판의 적용이 시작되면서 금형수정에 따른 제작기간 및 공수 증가에 의한 채산성 문제가 대두되고 있는 실정이다.

최근 컴퓨터의 발전으로 인하여 성형공정 해석을 통한 금형제작 및 수정이 이루어지고 있으며, 많은 공정 변수들을 동시에 고려하여 복잡한 형상을 가진 성형품의 가공결과를 예측할 수 있는 수준까지 적용되고 있다. 그러나, 초고강도강으로 제작되는 제품에 대한 성형성 및 스프링백 특성 분석은 미흡한 실정으로 초고강도강의 기초적인 성형시험과 해석을 통하여 기초 데이터베이스를 구

축하는 연구가 지속적으로 필요하다.

본 논문에서는 980 MPa급 이상의 초고강도강이 적용되는 차체부품을 단순화한 모자형 제품형상 및 성형용 금형을 설계하였으며, 폼(Form) 타입 성형공법을 기본으로 한 4가지 성형공법을 적용하였다. 제작된 금형과 설계된 성형공법을 활용하여 시험과 성형해석을 수행하였으며, 그 결과 얻은 시제품의 스프링백 현상에 따른 형상정밀도를 비교하였다. 또한, 공법 설계 시에 사용된 엠보싱 등 공정변수의 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 모자형 부품 성형시험 개요

2.1 모자형 부품 및 금형설계

본 논문에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 차량 측면부재인 사이드 시일(side sill) 부품의 단면을 모사한 모자형 부품을 설계하였다. 사이드 시일은 차량 측면부재로 측면충돌 시 센터필러 구조와 함께 승객방향으로 차체 및 충돌체가 침입하는 것을 지연시켜 주는 주요 에너지 흡수부재이다. 최근 충돌 안전성 향상을 목적으로 사이드 시일 부품에 대한 고강도화가 이루어져 초고강도강의 냉간성형 또는 열간 프레스성형 기법을 활용한 성형이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 준중형급 차량 부품을 참조하여 제품의 단면형상을 좌우대칭으로 단순화시켰다. 폭 183 mm, 높이 70 mm, 모자단면 폭이 80 mm가 되도록 설계하였으며, 성형시험 시 성형하중을 감소시키기 위하여 시편폭을 20 mm로 설계하였다. 일반적으로 냉간 폼성형의 경우 형상정밀도를 보장하기 위하여 2단계 성형을 수행하게 되나 본 논문에서는 단순화를 위하여 1공정만을 사용하여 최종형상을 성형하고, 스프링백 불량 위주의 데이터를 수집하였다.

모자형 부품 성형용 금형은 폼 타입 성형을 기본으로 여러가지 공법이 적용 가능하도록 Fig. 2와 같이 설계하였다. 펀치와 다이의 틈새는 소재 두께만큼을 부과하였으며, 펀치와 다이 곡률부의 반경은 각각 3 mm와 5 mm이다. 다이쿠션에 의하여 구동되는 하형패드(하사점 5 mm 전에서 유입 저항 부과가 가능하도록 제작되었다. 슬라이드에 의하여 상형패드가 가압되고 상형패드 받힘판이 밀려나면서 스프링을 압축하여 패딩력이 부과되며, 상형 다이에 의하여 폼 성형이 이루어진다. 제작된 금형부품의 형상은 Fig. 3에 도시하였으며, 블랭크의 형상은 Fig. 4와 같다. 패드에 부착되는 엠보

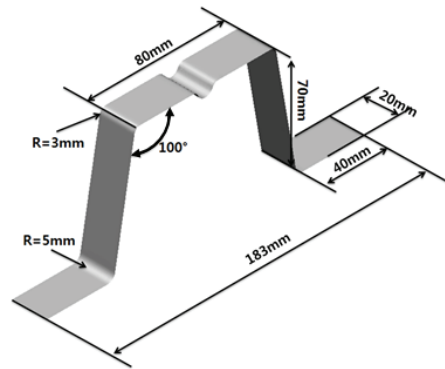


Fig. 1 Shape and dimensions of a hat-type product

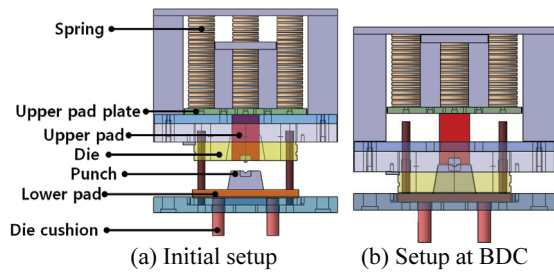


Fig. 2 Schematic shape of the tools for the forming of the hat-type product

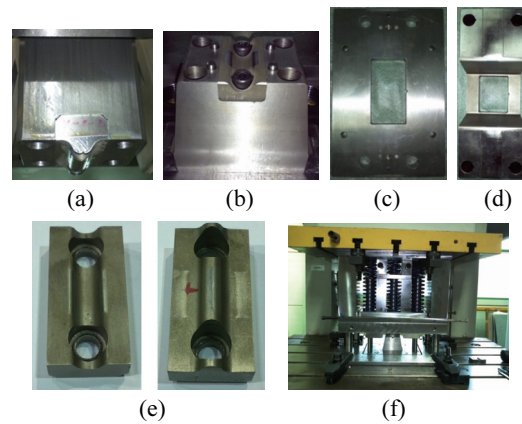


Fig. 3 Shape of the fabricated tool set for the forming of the hat-type product: (a) upper pad; (b) punch; (c) lower pad; (d) die; (e) embossing tool; (f) assembled tool set

싱의 형상이 스프링백에 미치는 영향을 확인하기 위하여 4종의 엠보싱 금형이 탈부착 가능하도록 설계되었으며, 엠보싱 형상과 주요치수는 Fig. 5와 Table 1에 도시하였다.

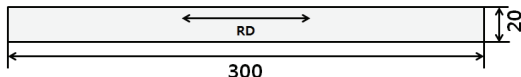


Fig. 4 Initial blank shape for hat-type product

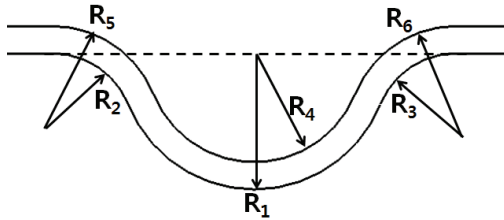


Fig. 5 Tool shape for the embossing process

Table 1 Dimensions of the embossment installed on the pad (unit : mm)

No.	offset	Lower die			Upper die		
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
1	1.0	5.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0
2	1.2	5.0	3.0	3.0	3.8	4.2	4.2
3	1.0	7.5	5.5	5.5	6.5	6.5	6.5
4	1.2	7.5	5.5	5.5	6.3	6.7	6.7

2.2 모자형 부품 및 성형공법 설계

초고강도강의 폼 성형공법이 스프링백에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 6에 도시한 것과 같이 4가지 공법을 설계하였다. CASE1은 일반적인 폼 성형공법으로 블랭크 중앙부를 고정하는 패딩 공정 후 양쪽 플랜지부에서 폼 성형을 수행한다. CASE2는 패딩 시 엠보싱 형상을 부과하여 스프링 고를 유도하며, CASE3는 역바닥성형 (reverse bottoming) 공법<sup>3</sup>으로 폼 공정 종료 후 엠보싱 형상을 부과하여 블랭크에 인장력 부과를 통한 스프링 백 감소를 유도한다. CASE4는 하형패드의 설치로 최종성형 단계 직전에서 블랭크에 추가적인 유입 저항을 부과하는 폼-드로우(form-draw) 공법<sup>4</sup>이다.

2.3 성형시험 조건

성형시험에 사용된 초고강도 강판은 SG AFC 980DP와 SG AFC1180DP 2종이며, 두께는 각각 1.0 mm와 1.2 mm이다. 각 소재의 기계적 물성은 인장 시험을 통하여 구하였고 Table 2에 나타내었다. 상형 다이의 하강속도는 20 mm/sec으로 설정하였고, 성형은 다이행정 70 mm에서 종료하였다. 소재 패딩 및 엠보싱 성형의 역할을 하는 상형패드는 최종 패딩력이 20 kN이 되도록 스프링을 설치하였다.

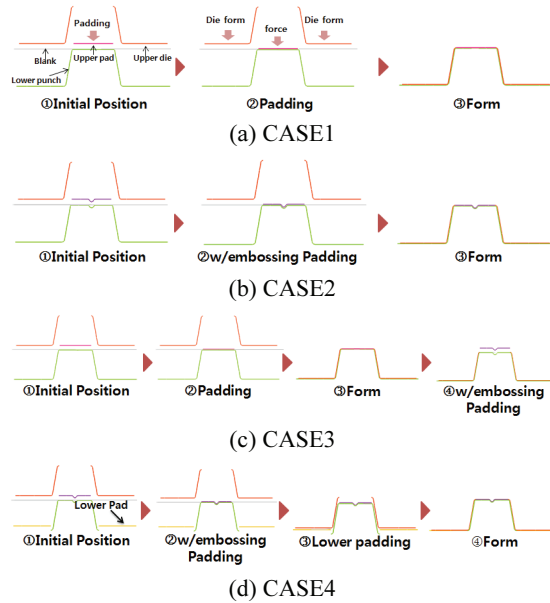


Fig. 6 Schematic description of the forming procedures according to the forming type considered for fabricating the hat-type product

Table 2 Mechanical properties of the blank

	SGAFC980DP	SGAFC1180DP
YS(MPa)	904.29	979.64
UTS(MPa)	1110.99	1385.99
K(MPa)	1277.99	1718.45
$n$	0.0527	0.0833
$\epsilon_0$	0.00244	0.00189
$\bar{R}$	0.84	0.7

CASE4 공법을 이용한 성형공정에서 하형 패드력이 부과되는 높이는 하사점 전 5 mm이며, 가압력은 35 kN로 부과하였다.

3. 모자형 부품 성형공정해석 개요

3.1 성형해석 개요

본 논문에서는 초고강도 부품 성형공정의 유한 요소해석을 수행하였으며, 주로 스프링백 위주의 형상정밀도 측면의 고찰을 수행하였다. 초고강도 강 성형에 관련된 성형해석 기법이 잘 정립되어 있지 않으며, 시험과 해석의 결과를 일치시키는 현장의 기법도 초기 연구단계이다. 또한, 스프링백 해석의 정확도가 높지 않은 문제가 발생하고 있어

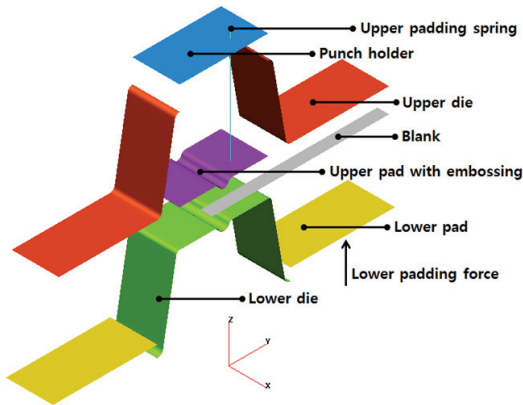


Fig. 7 Finite element model of the tools and the blank for the stamping analysis of the hat-type product

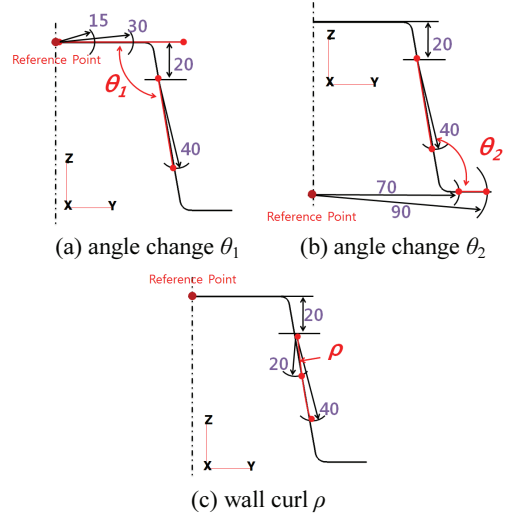


Fig. 9 Measurement method of springback modes in the hat-type product



Fig. 8 Measurement of three-dimensional shape of the fabricated prototypes

적용을 위한 많은 변수연구가 필요하다. 해석은 외연적 상용유한요소 프로그램인 PAM-STAMP 2G V2012<sup>5</sup>를 사용하였다. 본 논문에서는 폼 공정 해석 시 스프링백 결과를 안정적으로 구할 수 있는 성형속도 구간을 도출하였으며, 구해진 속도를 활용하여 성형해석을 수행하고 스프링백 양을 시험과 정량비교하였다.

**3.2 성형해석 조건**

제2절에서 서술된 금형형상 및 공법을 모사하기 위한 유한요소 모델링을 Fig. 7과 같이 수행하였다. 금형과 블랭크는 모두 셸(shell)요소를 사용하였고, 각각 변형체와 강체로 모델링하였다. 블랭크 요소는 BLT 요소<sup>6</sup>를 사용하였다. 최종 변형형상 및 스프링백을 잘 모사하기 위하여 요소 크기를 0.5 mm로 분할하였으며, 응력계산의 정확도를 높이기 위하여 적응형 요소분할(adaptive remeshing)

Table 3 Shape of the formed prototypes from the stamping experiment

CASE	$R_t$	SGAFC980DP	SGAFC1180DP
1	w/o embossing		
2	5.0mm		
	7.5mm		
3	5.0mm		
	7.5mm		
4	5.0mm		
	7.5mm		

과 질량 분할축소(mass scaling)을 실시하지 않았다. 블랭크 요소 두께방향 적분점 수는 5개로 하였다.

모자형 부품 성형해석을 위한 블랭크 재료는 성형시험 조건과 같이 초고강도강 2종을 사용하였다. 상형 패딩공정을 위한 가압력으로 스프링 요소를 연결하여 압축력을 부과하였다. CASE4 공법의 경우 하형패드에 의한 가압력으로 35 kN의 일정한 힘을 부과하였다. 금형과 블랭크 간 무윤활 조건으로 쿨롱 마찰계수 0.12를 부과하였다. 재료의 이방성을 고려하기 위하여 평면이방성을 고려한 Hill의 1948 항복조건식<sup>7</sup>을 사용하였다.

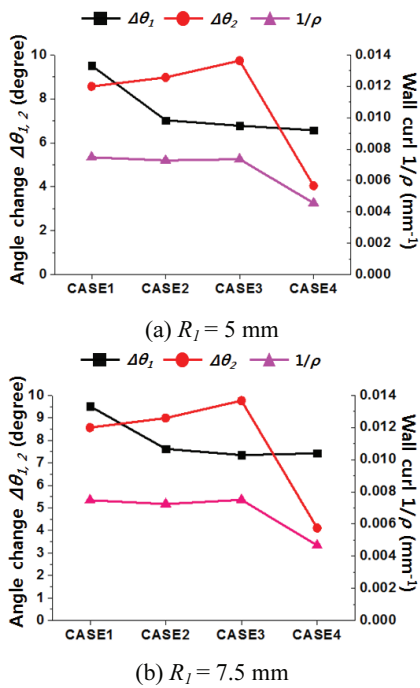


Fig. 10 Comparison of the springback amounts according to the stamping type with SGAF980DP from the experiment

성형제품이 단순한 모자형상을 가지며 블랭크 폭이 20 mm로 작아 단면의 비틀림 현상이 없을 것으로 판단하고 해석시간을 단축하기 위하여 1/4 모델을 사용하였다. 동적 불안정성을 제거하기 위하여 상형패드의 하강속도를 0.01 m/s로 부과하였으며, 변수연구 과정에서 상형다이의 속도 영향을 분석하여 최적의 속도를 해석에 이용하였다.

#### 4. 형상정밀도 측정

##### 4.1 형상 측정방법

성형시험에서 얻은 모자형 부품의 형상을 측정하기 위하여 Fig. 8에 도시한 바와 같이 비접촉식 3차원 측정기로 제품의 단면형상을 추출하였다. 추출된 단면 데이터를 CAD 형식으로 변환하여 추후 스프링백 모드 측정에 활용하였다. 해석의 경우 대칭면의 단면형상을 추출하여 비교하였다.

##### 4.2 스프링백 정량화 방법

표준부품의 단면에서의 주요 스프링백 모드를 Fig. 9와 같이 기하학적 형상에 따라 펀치부 각변

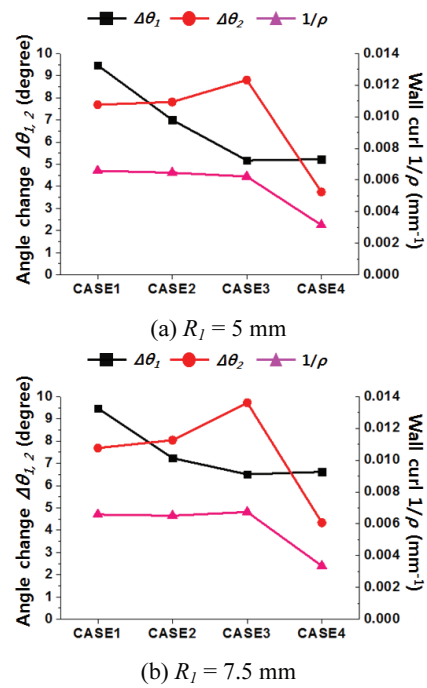


Fig. 11 Comparison of the springback amounts according to the stamping type with SGAF1180DP from the experiment

화( $\theta_1$ ), 플랜지부 각변화( $\theta_2$ )과 벽힘( $\rho$ )의 대표적인 3가지 모드로 분류<sup>8</sup>하고 각 모드에 대한 정량 분석을 실시하였다

#### 5. 모자형 부품 스프링백 특성 평가

##### 5.1 성형시험 결과

제2절에서 설명한 방법으로 4가지 성형공법에 따라 시험을 수행하고 얻은 시제품의 형상을 Table 3에 도시하였다. 모든 경우에 대하여 파단 없이 성형이 완료되었음을 확인할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11에 스프링백 측정법에 따라 구하여진 스프링백 모드를 비교하였다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 CASE1 대비 CASE2~CASE4에서 펀치부 각도변화가 모두 감소하며, 특히 CASE3와 CASE4의 각도변화가 크게 감소하고 있다. CASE2의 경우 폼성형된 엠보싱 형상을 성형하므로 역방향의 스프링백이 유도되는 형상 측면의 효과가 큰 반면, CASE3의 경우 폼성형이 완료된 후 엠보싱 성형을 하므로 소재가 엠보싱부로 유입되어 펀치 어깨부에 인장응력이 가해지므로 펀치부 각변화가 크게 감소



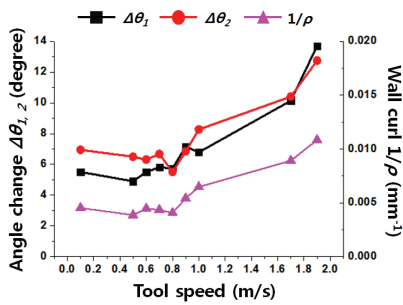


Fig. 12 Comparison of the springback amounts according to the stamping type with SGAF980DP from the analysis

하는 효과를 보이는 것으로 판단된다. SGAF980DP의 경우 엠보싱 반경이 5 mm와 7.5 mm일 때 펀치부 각변화가 CASE3에서 CASE1 대비 각각 약 3°와 2° 감소하였다. SGAF1180DP의 경우 엠보싱 반경이 5 mm와 7.5 mm일 때 CASE3에서 CASE1 대비 각각 약 4°와 3°가 감소하였다. 이는 소재강도가 높고 두께가 두꺼울수록 동일형상의 엠보싱에서 얻을 수 있는 스프링백 보정효과가 크다는 것을 의미한다.

플랜지부 각변화는 성형공법 CASE1와 비교할 때 CASE2와 CASE3에서 더 큰 값을 보이고 있으며, CASE4에서 4~5° 정도 낮아지고 있는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 벽힘의 경향도 CASE1 대비하여 CASE2와 CASE3의 경우 큰 감소 효과가 없었던 반면 CASE4의 경우 크게 낮아진 경향을 확인할 수 있었다. CASE4에서 플랜지부 각변화 및 벽힘 현상이 급격히 감소하는 것은 소재를 성형종료 직전 가압하고 유입저항을 주어 블랭크의 전체 영역에 인장력이 부과되어 스프링백 감소 효과를 미친 것으로 판단된다. CASE2의 경우 엠보싱 후 폼성형을 수행하므로 플랜지부 각도 변화 및 벽힘에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. CASE3의 경우 폼성형 후의 엠보싱 성형공정에서 다이 곡률부로 블랭크가 추가적으로 유입되어 해당부위 블랭크의 굽힘-피짐 현상발생으로 플랜지부 각변화 증가 및 벽힘현상이 제거되지 않은 것으로 판단된다.

### 5.2 성형해석 결과

시험조건과 동일하며 동적 불안정성을 최대한 제거하기 위하여 상향다이의 하강속도에 대한 스프링백 양을 분석하였다. 하강속도를 0.1~2 m/s 범

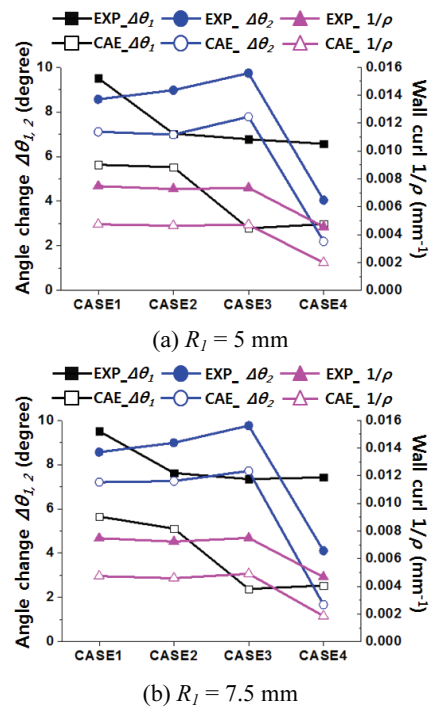


Fig. 13 Comparison of the springback amounts according to the stamping type with SGAF980DP from the experiment

위로 부과하고 스프링백을 비교하여 Fig. 12에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 폼 공정의 특성상 플랜지부가 성형중 자유상태로 하강하게 되므로 일정속도 이상을 부과하게 되면 동적 불안정성에 의한 스프링백이 증가하는 문제가 발생한다. 스프링백 양 분석을 통하여 안정적인 성형해석을 위한 급형 하강속도는 0.1 m/s로 정하였다.

이상의 조건을 바탕으로 SGAF980DP 강판에 대하여 4가지 성형공법의 성형해석을 수행하였으며, 그 결과를 시험에서 얻은 측정값과 비교하여 Fig. 13에 도시하였다. 시험과 해석간에 일정한 경향성을 나타내었지만 전체적으로 해석의 결과값이 낮게 예측되었다. 해석에서 이동경화모델(kinematic hardening)과 다축 응력상태를 고려하는 항복 함수를 적용하지 않은 경우 스프링백 양의 예측정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 초고강도강의 스프링백의 현재 해석이론을 이용할 경우 예측정확도가 떨어질 가능성이 매우 크므로 급형 또는 공정설계 시 시험적 방법을 통하여 예측도를 보완하여야 함을 확인할 수 있었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 인장강도 980~1180 MPa급 초고강도강 모자형 판재 부품의 폼타입 성형공정의 시험 및 해석을 통하여 성형공법에 따른 스프링백 경향을 비교하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 기존 폼 성형공법 대비 엠보싱 공정을 적용할 경우 역방향으로의 스프링고 효과 또는 인장력 부과에 의하여 편치부 각도변화가 크게 감소하였으나, 플랜지부 각도변화와 벽힘양은 크게 개선되지 않거나 악화되는 현상을 보였다.

(2) 하형패드를 적용하여 최종성형 단계에서 블랭크에 인장력을 부과한 경우 벽힘과 플랜지부 스프링백이 크게 감소하여 형상정밀도가 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 초고강도강 성형시 엠보싱 공법과 폼-드로우 공법을 조합하여 사용하면 금형설계 단계 초기부터 스프링백 양을 감소시켜 보다 안정적인 제품 제작이 가능할 것으로 예상된다.

(3) 성형공정 해석결과 시험과 스프링백 발생의 경향은 잘 일치하고 있으나 절대값에서 많은 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이는 현재 박관성형공정의 해석에서 활용되고 있는 재료의 항복함수, 경화모델, 윌요소 선정 등의 재검토가 필요하다. 또한, 초고강도강 부품의 프레스 금형 및 공정설계 시 반드시 해석에서 얻은 결과와 시험에서 얻은 결과의 비교가 선행되어야만 안정적인 설계를 수행할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술개발사업 “자동차 핵심부품 생산기반공정 플랫폼 기술” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. IISI, “ULSAB-AVC Engineering Report,” Southfield, MI., 2001.
2. WorldAutoSteel, “Steel Vehicle Overview Report,” [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org), 2011.
3. Toyota Motor Co. and Kobe Steel Co. Ltd., “Press Forming Method,” JPN Patent No. 2011-045905,

2011.

4. WorldAutoSteel, “Advanced High Strength Steel(AHSS) Application Guidelines, Version 4.1,” <http://www.worldautosteel.org/projects/ahss-guidelines/html>, pp. 2-56, 2009.
5. ESI, “PAM-STAMP 2G User’s Guide,” 2012.
6. Belytschko, T., Lin, J. I., and Tsay, C., “Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells,” *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 42, No. 2, pp. 225-251, 1984.
7. Hill, R., “A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals,” *Proc. The Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1033, pp. 281-297, 1948.
8. Jeong, D. G., “Analysis of Springback Mechanisms for the Improvement of the Shape Accuracy in the Stamping Process,” M.Sc. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Daegu Univ., 2011.
9. Choi, B. H., “Evaluation of Springback Characteristics in the Stamping Process for a Hat-type Standard Product with UHSS,” M.Sc. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Daegu University, 2012.
10. Choi, B. H., Lee, J. W., Kim, S. H., Lee, M. G., and Kim, H. K., “Comparison of Springback Modes in the Stamping Process of an S-rail with HSS according to the Hardening Model,” *Trans. Mater. Process.*, Vol. 22, No. 1, pp. 30-35, 2012.

