

1.2GPa급 강판 판재 성형에서 스프링백 감소를 위한 금형 보상 설계

권순호¹ · 이호성¹ · 이영섭¹ · 김승완² · 정철영² · 홍석무[#]

Compensation Design to Reduce Springback in Sheet Metal Forming of 1.2GPa Ultra High Strength Steel

S. H. Kwon, H. S. Lee, Y. S. Lee, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. Hong

(Received May 17, 2016 / Revised August 30, 2016 / Accepted September 2, 2016)

Abstract

The manual modification of stamping die has widely been used in order to reduce springback after sheet metal forming. When UHSS (Ultra High Strength Steel) is used in sheet metal forming, the die design considering springback compensation is more difficult because higher strength sheet has more springback. In this study, the optimization method was used in order to design die geometry considering springback compensation after forming of 1.2GPa UHSS. Die geometries were defined as design variables and the springback distance from the die surface was conducted as object function in optimization process. The optimized die geometry considering springback compensation was performed using finite element and optimization analysis. The simulation results such as thickness distribution and springback amount were compared with measured data using 3D optical measurement system (GOM ARGUS, ATOS). And the prediction of springback amount showed a good agreement within test results.

Key Words : Springback Compensation, UHSS (Ultra High Strength Steel), 3D Optical Measurement

1. 서 론

최근 자동차 업계에서는 배기가스 등의 환경문제와 연비 개선 문제로 차량 경량화에 대한 관심이 증대되고 있다. 그에 대처하기 위해 비교적 얇은 두께로 충돌 안정성을 얻을 수 있는 초고장력 강판을 적용하려는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나, 강판의 강도가 높아짐에 따라 성형성이 감소되고 스프링백 양 증가로 치수 정밀도 제어가 쉽지 않아, 제품 조립 시 불량 발생하여 스프링백을 제어하기 위한 금형 설계의 필요성이 대두되고 있다[1].

기존에는 작업자의 경험에 의해 금형 수정을 통해 스프링백 제어를 수행하여 다수의 시행착오(try-out)를 통해 시간과 노력이 많이 소요되고 금형에 대한 보상 값이 정량화 되어 있지 못 한 문제가 있었다. 2000년대 중반부터는 치수 정밀도를 높이기 위한 스프링백에 대한 평가 및 제어를 위해 상용 해석 프로그램을 통한 금형 보정 기술을 간단한 제품 형상에 적용해오고 있으며, 최근에는 최적설계기법을 통해 드로우 비드의 위치와 형상 결정하여 스프링백을 최소화하였다[2, 3]. 본 연구에서는 DYNAFORM 5.9.2[4]를 사용하여, 1.2GPa급 초고장력 강판을 적용한 B-pillar의 성형 후에 발생하는 스프링백을 예

1.공주대학교 금형설계공학과

2.대우공업(주) 기술연구소

Corresponding Author : Department of MetalMold Design Engineering,
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr

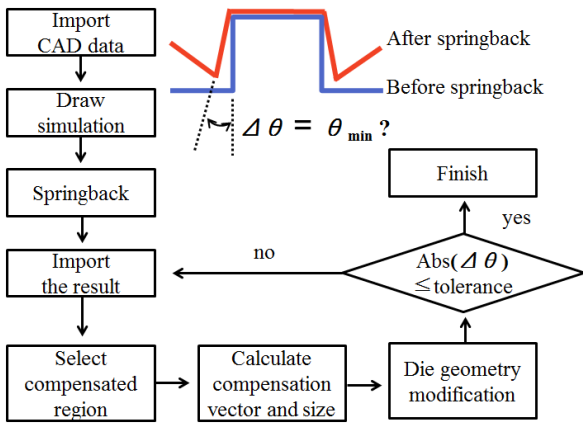


Fig. 1 Flow chart of springback compensation process

Table 1 Optimal design for springback minimization

Design variables	Punch, die and holder geometry
Objective functions	Minimize $F(x) = \Delta\theta$
Constraint condition	Undercut $< 5^\circ$

측하였다. 제품에 발생한 스프링백을 고려하여 최적설계기법을 통해 금형의 구조를 자동 보상 설계하였다. 최종적으로, 3차원 측정과 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증했다.

2. 스프링백을 고려한 보상 설계

스프링백 보상 금형 설계는 기존 금형의 스프링백 양을 설계 변수에 반영하여 보상 값을 구한다. 보상 값을 구하기 위해서 Table 1의 최적설계기법 (optimization design)을 사용한다. 스프링백이 발생하기 전에 제품도와 스프링백이 발생한 제품의 차이 ($\Delta\theta$)가 최소가 되도록 목적함수(object function)를 선정하고, 펀치와 다이 그리고 블랭크 홀더의 형상(tool geometry)을 그에 대한 설계 변수(design variables)로 정한다. 마지막으로 구속 조건(constraint condition) 범위 안에서 스프링백 양($\Delta\theta$)을 최소로 하는 금형의 보상 값을 찾는다. 구속 조건은 역구배(undercut) 양을 5° 이내가 되도록 설정하였다. Fig. 1의 프로세스를 통하여 보상 설계된 금형으로 성형한 제품에서 발생한 스프링백 양이 원하는 허용 치수공차 (tolerance)에 만족하지 않다면, 조건을 만족할 때까지 반복 해석을 실시한다. 보상 값을 구하는 구간

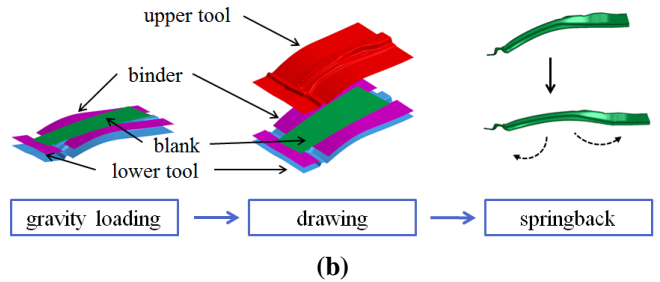
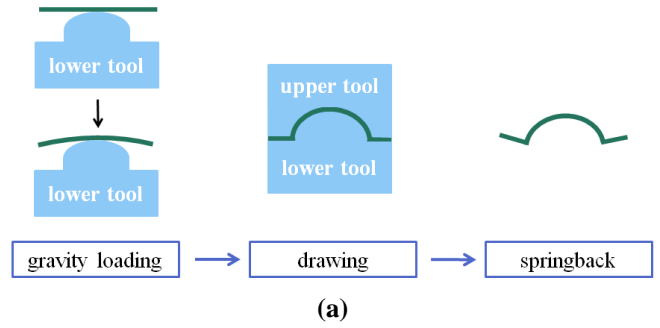


Fig. 2 Process of B-pillar manufacturing, (a) Schematic diagram (b) Finite Elements Method

을 제대로 찾지 못하면 스프링백 양($\Delta\theta$)이 최소가 되는 정확한 보상 값을 찾을 수 없기 때문에 설계 변수의 최대, 최소 그리고 구속 조건을 명확히 선정하는 것이 매우 중요하다.

3. 적용

스프링백 보상 해석을 적용하기 위해 B-pillar의 드로잉 공정(drawing), 트림 공정(trimming), 피어싱 (piercing) 및 리스트라이킹 공정(re-striking) 중 드로잉 공정의 스프링백 현상을 Fig. 2 (a)에 간략화하여 나타냈다. 이를 바탕으로 유한 요소 해석 모델링을 구성하여 성형 해석과 스프링백 해석, 스프링백 보상 해석 순으로 진행하였다. 공정에 대한 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해, 비접촉 3차원 광학식 측정 장비를 통해 측정된 값과 해석 결과를 비교하였다. 본 연구에서 사용한 비접촉 3차원 측정 장비는 GOM ARGUS와 GOM ATOS가 있다. ARGUS는 소재의 변형률을 측정하는 장비로 재료의 성형특성 평가와 성형한계 예측, 유한 요소 해석의 타당성을 검증하기 위해 중요한 실험적 데이터를 제공한다. 또한 3D 스캔이 가능한 ATOS는 제품 도면을 기준으로 실제 성형된 제품의 스프링백이 얼마나 발생했는지 정량적 측정이 가능하다[5~6].

Table 2 Drawing parameter used in CAE

Friction coef.	0.125
Blank holding force (kN)	200
Punch speed (m/s)	2
Mesh size (mm)	10

Table 3 Mechanical properties of UHSS

Material	UHSS
Thickness(mm)	1.4
$K(\text{MPa})$	1704
$\varepsilon_0(-)$	0.016
n	0.108
Poisson's ratio(ν)	0.3
Young's modulus(GPa)	210
r_{00}	0.827
r_{45}	1.06
r_{90}	1.06

판재 성형 해석에서 금형의 조합은 펀치, 다이 그리고 블랭크 홀더로 구성되었다. Fig. 2 (b)에서 보여주는 바와 같이 금형 구조는 싱글 액션 다이(single action die) 형식으로 모델링 되었으며, 상부 다이(upper tool), 블랭크(blank), 블랭크 홀더(binder), 하부 펀치(lower tool)으로 구성 되어 있다. 블랭크는 4절점 쉘 요소(shell element)로 구성하였다. 소재는 일반 탄소, 실리콘, 망간을 첨가하여 강도와 연신률을 동시에 확보한 TRIP(transformation induced plasticity) steel이며, 두께는 1.4mm이고 Table 1에 물성을 나타내었다. 해석에 사용된 소재의 유동응력 곡선(flow stress curve)은 (1)의 swift model을 사용하였고, 압연 방향에 따라 소재의 항복점이 달라지는, 이방성을 고려한 Barlat의 3-parameter plasticity model을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유동응력, K 는 강도계수, ε_0 는 초기 변형률, $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률, n 값은 가공경화지수를 나타내고 r_{00} , r_{45} , r_{90} 는 압연 방향 별 이방성 계수를 나타낸다. Table 2와 같이 해석 공정조건을 모델링 하였다. 스탬핑(stamping) 전에 소재 유입 후, 블랭크를

하부 금형에 올려 놓았을 때 중력 방향으로 블랭크가 자연스럽게 처지는 것을 고려하기 위해 중력 해석(gravity loading)을 수행하였다. 드로잉 공정 후, 제품을 꺼냈을 때 스프링백이 발생하는 현상을 모델링 하기 위해 성형 해석 후에 순간적으로 금형이 제거 됨을 가정하여 잔류응력으로 인해 발생하는 탄성 복원 현상을 구현하였다. 스탬핑 해석에는 외연적(explicit) 유한 요소 해석을 사용하여 수행했고, 중력 해석과 스프링백 해석은 내연적(implicit) 시간적분법을 사용하였다[7].

3.1 성형 해석 결과 및 검증

초고장력 강판의 낮은 성형성으로 제품 표면에 파단(fracture), 주름(wrinkle), 쇼크라인(shock line)이 발생하여 품질확보에 어려움이 많다. 따라서 유한 요소 해석으로 진행한 성형 해석과 제품의 변형률을 비교하여 검증된 결과로 스프링백 해석을 진행해야 해석의 정확도를 높일 수 있다. 제품의 변형률을 정량적 측정을 위해 비접촉 3차원 광학 측정장비인 ARGUS를 활용하여 변형률을 측정했다. ARGUS는 6Mega pixel camera로 원형 그리드가 에칭(etching)된 블랭크를 스탬핑한 후, 제품의 외관을 촬영하여 얻은 변형된 그리드 데이터로부터 변형률 측정값을 정량화하여 보여준다. Fig. 3(a)는 성형 해석 후 두께 감소율 결과이고, Fig. 3(b)는 ARGUS로 측정된 두께 감소율을 나타낸다. 곡면 부위의 인장으로 인해 평면 부분 보다 곡면에 두께 감소율이 큰 것을 확인 할 수 있었으며, CAE 해석 결과와 3D 측정 결과에서 두께 감소율의 분포는 상당히 양호한 일치율을 보여 주고 있다. (a)와 (b)의 최대 두께 감소율의 차이가 약 2%이므로 실제 금형의 표면의 마찰이나 윤활 조건 등을 고려했을 때, 성형 해석 결과를 충분히 신뢰 할 수 있다.

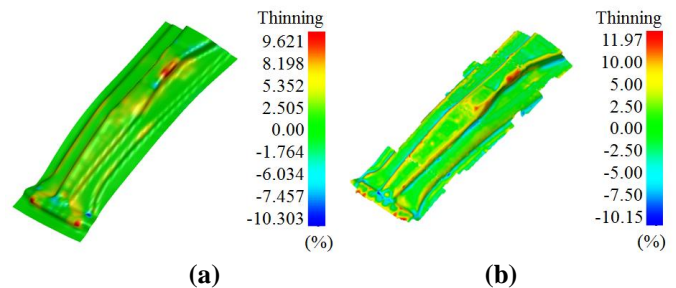


Fig. 3 Comparison of thinning between (a) simulation and (b) 3D measuring using GOM ARGUS

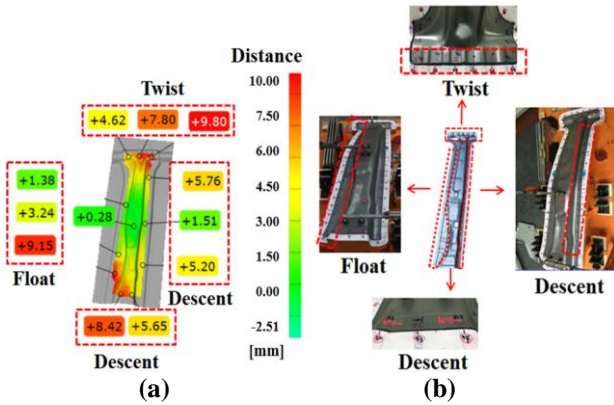


Fig. 4 Comparison of springback location between (a) simulation and (b) modify dies in field

3.2 스프링백 해석 결과 및 검증

높은 항복강도와 낮은 성형성을 갖는 초고장력 강관의 스프링백 예측은 어려움이 많다. 스프링백 해석의 타당성을 검증하기 위해서는 제품의 CAD 도면을 기준으로 실제 제품과 비교하여, 스프링백의 위치와 크기가 제품 CAD 도면과 해석에서 발생하는 스프링백의 위치와 크기가 근접해야 해석의 타당성을 검증 할 수 있고, 이를 통해 금형 수정 위치와 양을 정량적으로 결정할 수 있는 보상 값을 얻을 수 있다. 실제 제품의 형상 데이터를 얻기 위해 3D 광학 측정 장비(GOM ATOS)를 사용하였다. 제품에 발생한 스프링백의 양과 위치를 3차원으로 가시화 할 수 있으며, 해석 결과와 비교 분석 할 수 있다. 제품의 CAD 도면의 법선 방향을 기준으로 해석 결과가 앞 쪽에 위치하면 (+) 붉은색으로 구성되고, 해석 결과가 뒷 쪽에 위치하면 (-) 파란색으로 나타낸다. 만약 제품의 CAD 도면과 동일하게 위치하면 (0)으로 측정되어 녹색으로 보여진다. Fig. 4(a)는 금형 수정 전의 해석 결과와 제품 CAD 도면을 비교하여 스프링백의 발생 위치와 양을 나타내고, (b)는 현재 현장에서 실제로 금형을 수정하는 위치를 나타낸 것이다. 실제 스탬핑 후 제품이면 부상(float), 먼 뒤틀림(twist), 먼 꺼짐(descent)의 발생 위치가 해석 결과에서도 유사하게 확인되었고 스프링백 해석의 타당성을 검증하였다. 이를 통해 스프링백 발생 양을 예측하여 보상 해석을 진행해야 보상 해석의 타당성 또한 검증 할 수 있다.

3.3 스프링백 보상 해석 결과

B-pillar 성형 시 발생하는 스프링백 양을 예측하

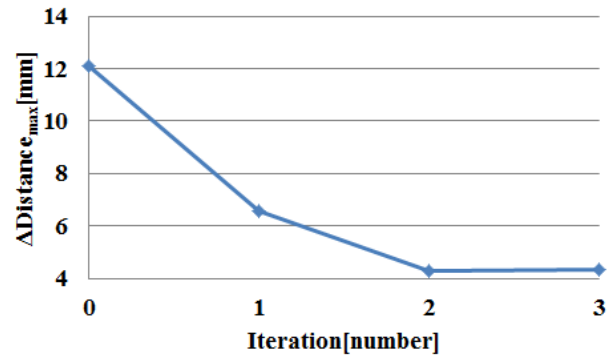


Fig. 5 Springback reduction after compensation simulation

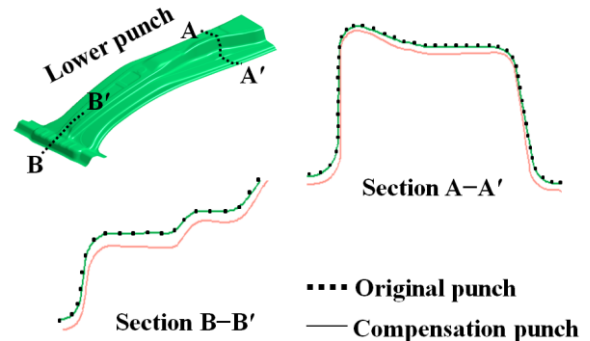


Fig. 6 Modified lower punch section after compensation simulation

여 설계 변수에 반영하였고, 스프링백 보상 해석을 통하여 스프링백 양을 최소로 하는 보상 값을 얻고자 했다. 하형 펀치를 기준으로 하여 금형 전체를 보상하도록 설정하였으며, 성형 후 스프링백이 발생하기 전의 형상을 target으로 설정하고 스프링백이 발생한 만큼 소재를 더 굽히는 금형을 생성하였다. 스프링백 양이 최소값에 수렴하며 치수 허용공차 조건에 만족하면 보상 해석을 종료 하였고, 만족하지 못하면 반복하여 해석을 수행했다. 제품의 스프링백 전과 후의 차이를 정량적으로 측정하기 위해 $\Delta\theta$ 값을 측정 해야 하나, 형상에 곡면이 많고 복잡하여 측정하는데 어려움이 많다[8]. 따라서 본 연구에서는 스프링백이 발생하지 않은 성형 해석 결과의 곡면에 법선 기준으로, 스프링백 발생 전과 후의 거리 차로 스프링백 량을 정의하였다. 측정 기준에 따라 제품의 스프링백 전과 후의 거리 차이가 최소화 되도록 목적 함수를 설정하였다. Fig. 5와 같이 총 3회의 스프링백 보상 해석을 수행하였다. 스프링백 보상 해석을 1회 수행했을 때 45%, 2회 수행했을 때 64%, 3회 수행했을 때 대략 64%로

수렴하는 값을 보인다. Fig. 6는 3차레 보상 해석하여 생성된 금형 단면을 나타내었다. 기존 편치에 비해 대략 5mm 정도의 보상 값을 나타낸다. 여러 차례 보상 해석을 진행해도 스프링백 양이 0이 되지 않는다. 초고장력 강판의 스프링백 양이 크게 발생하므로 소재를 과도하게 굽혀 스프링백이 발생해도 제품 치수 허용공차를 만족하도록 한다. 이 때 구속 조건이 없다면 스프링백 양이 0에 근접하게 되지만, 금형의 undercut이 과도하게 발생하여 제품에 과단이 발생한다.

4. 결론

초고장력 강판의 박판 성형 시 스프링백 감소를 위한 금형 설계 프로세스를 검증하기 위해 1.2GPa급 강판을 대상으로 성형 실험 및 해석을 수행하였다. 사용된 초고장력 강판의 성형 특성과 해석을 평가하기 위해 3D 측정을 통해 두께 감소율과 스프링백의 거동을 정량적으로 측정하였다. 이 결과를 바탕으로 최적설계기법을 사용하여 스프링백을 고려한 보상 해석을 통해 최적의 금형을 설계하였다.

(1) 스프링백을 고려한 자동 금형 보상 설계 프로세스를 확립하였다.

(2) 성형 CAE 예측 정확도 검증을 위해 3차원 측정 결과와 해석 결과를 비교하여 타당성을 검증하였다.

(3) 보상 전 금형에 비하여 제품에 발생하는 스프링백 양을 64%까지 감소시키는 보상 금형을 설계하였다.

(4) 향후 스프링백을 고려한 금형 제작 시 자동 금형 보상 설계 프로세스의 적용 시 개발 기간과 비용이 많이 절감될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] S. A. Asgari, M. Pereire, B. F. Rolfe, M. Dingle, P. D. Hodson, 2008, Statistical Analysis of Finite Element Modeling in Sheet Metal Forming and Springback Analysis, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 203, No. 1, pp. 129~136.
- [2] D. Y. Lee, B. S. Choi, J. H. Hwang, I. K. Baek, K. Y. Choi, 2009, Springback Control of an Automotive Surround Molding part Using Automatic Die Compensation Module, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 3, pp. 210~216.
- [3] S. Hong, J. Hwang, 2014, Bead Optimization to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using High Strength Steel, J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng., Vol. 23, No. 4, pp. 350~354.
- [4] DYNIFORM-PC User's Manual, Version 1.0, 2001, Engineering Technology Associates Inc.
- [5] ATOS, GOM mbH, <http://www.gom.com>.
- [6] ARGUS, GOM mbH, <http://www.gom.com>.
- [7] S. W. Lee, D. Y. Yang, 1998, An Assessment of Numerical Parameters Influencing Springback in Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 60~67.
- [8] C. Gomes, O. Onipede, M. Lovell, 2005, Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 159, No. 1, pp. 91~98.