

HSS강판 판재성형 시 스프링백 최소화를 위한 드로우 비드 최적 설계

홍석무^a, 황지훈^{a*}

Bead Optimization to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using High Strength Steel

Seokmoo Hong^a, Jihoon Hwang^{a*}^a Samsung electronics Co. Ltd., Global Technology Center, 129, Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-742, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	6	May	2014
Revised	15	July	2014
Accepted	23	July	2014

Keywords:

HSS (High Strength Steel)
Springback
Sheet metal forming
Optimization

ABSTRACT

Recently, high strength steel (HSS) sheet metal has been widely used to improve lightweight structures in the automotive industry. Because HSS sheets have high strength but low elongation, it is difficult both to make products with complex shapes and to control excessive springback. In order to reduce the springback after forming using HSS, draw beads were introduced in this study. The design variables, including the draw-bead positions and shapes, were optimized using a finite element analysis. A mold for a scanner support, which is part of an A3 printer, was designed using the proposed method and then utilized. The results from a finite element simulation and optimization were compared with the experiment results.

1. 서론

최근 전자제품 경량화 이슈로 인해 박형화 및 고강도 등이 요구되고 있고, 이러한 기능적 목적을 만족시키기 위해 금속소재 사용이 급증하고 있다. 특히 백색 가전, 프린터, TV 등과 같은 대형 전자제품의 경우 경량화는 곧, 운송비와 사후관리 등의 문제와 직결되기 때문에 매우 중요하다. 자동차 산업의 경우, 이미 연비와 친환경 문제로 경량화 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 시도되었고, 주로 고강도 강철(HSS, High Strength Steel)을 사용하여 이러한 문제를 해결해왔다^[1-3]. 이러한 고강도 강판의 필요성은 최근 전자제품 분야에서도 대두되고 있다. 그러나 HSS의 높은 항복강도와 낮은 연신율로 인해 전자제품 산업 현장에 바로 적용하기는 어렵고, 특히 과도하게 발생하는 스프링백(Springback)으로 인해

제품의 치수 정밀도 및 금형 설계에 많은 어려움이 있기 때문에, 고정밀도를 요구하는 전자부품에는 사용이 제한된다. 게다가 전자업계에서 처음 도입되기 시작한 고강도 강판 성형에 대한 경험 부족도 적극 도입을 하지 못하는 이유 중 하나이다. 기존에는 스프링백을 제어하기 위해 경험에 의존한 리스트라이킹(re-striking) 방법을 활용하거나, 공정변수의 영향을 파악하기 위해 실험적으로 접근하는 경우가 많았다^[4,5]. 전자는 재료의 파단이나 금형 파손의 문제가 될 수 있으며 복잡한 형상 및 정밀 부품의 적용에는 한계가 있고, 후자의 경우는 시간과 노력이 많이 소요된다는 단점이 있다. 특히 리스트라이킹은 가공경화를 극대화시키기 때문에, 고강도 강의 높은 항복강도로 인해 큰 효과를 보이지 못한다. 따라서 제품의 치수정밀도 향상을 위해 드로우 비드를 사용하기도 한다^[6]. 드로우 비드는 성형 시 판재의 스트레칭을 통한 인장력을 부여해 판재의 주

* Corresponding author. Tel.: +82-31-200-2531

Fax: +82-31-200-2467

E-mail address: jso.hwang@samsung.com (Jihoon Hwang).

름발생 및 스프링백을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다^[7]. 판재성형을 위한 드로우 비드는 표준 디자인 사양이 준비되어 있지만, 금형가공의 어려움으로 인해 실제 산업현장에 적용하기 어려워 아직까지 시행 착오법(trial-and-error)으로 스프링백을 제어하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 정밀가전제품이면서 부피가 큰 A3사이즈 프린터의 경량화 및 원가절감을 구현하기 위하여 부품 중 스캐너 서포트(scanner support)에 고강도 강판을 도입했고, 스프링백을 체계적으로 제어하고자 CAE해석기법을 활용했다. 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP를 사용하여 해석 정확도를 높이고, 최적 비드의 위치 및 형상 결정을 위해 실험계획법(DOE)으로 변수연구를 수행했으며 DOE 결과를 활용한 최적설계 기법으로 스프링백을 최소화하는 최적 비드 설계 방법을 제안했다.

2. 스프링백 측정 및 해석 정확도 검증

고강도 강의 높은 항복강도와 낮은 연신율로 인해 스프링백의 예측은 쉽지 않다. 이러한 고강도 강판이 전자제품에 사용되기 위해서는 제품의 평탄도 및 치수정밀도가 매우 중요하다. 특히 대형 프린터의 경우에는 수십 개의 부품이 조립되어 사용되므로 좀 더 엄격한 치수정밀도가 요구되고 있다. 전자제품에 기존의 연 강판을 350 MPa급 고강도 강판으로 대체하기 위해, 스프링백 최소화 연구를 시도했다. 스프링백을 구조적으로 잡기 위한 방법으로는 과도 굽힘(over-bending), 스프링백 보상(compensation) 등의 방법이

제안되고 있지만, 본 연구에서는 드로우 비드 최적화를 통해 양산에서 요구되는 스프링백 최소화를 수행했다. 과도 굽힘, 스프링백 보상 그리고 드로우 비드를 통한 스프링백의 제어 시 CAE 예측 정확도가 보장되지 않는다면, 현장에서 직접 금형의 제작과 테스트를 반복해서 결정할 수밖에 없다. 따라서 CAE 해석을 통해 드로우 비드 최적화하기 전에 해석 정확도의 검증이 반드시 필요하다. 고강도 강의 스프링백 해석검증을 위해, 현재 양산중인 제품에 대해 드로우 비드를 삽입하여 해석을 진행했다. 이 부품은 프린터에 사용되는 프레임 베이스(frame base)로 제품을 지지하는 중요한 역할을 한다(Fig. 2). 프레임 베이스의 평탄도는 전체 시스템의 성능을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 양산중인 프레임 베이스의 소재는 냉간 압연된 SECC (mild steel)를 사용하며, 프레스 4공정을 통해 성형한다. SECC를 사용한 현재 양산 제품의 최대 뒤틀림량은 3.4 mm 이다. 고강도 강판의 경우 SECC에 비해 강도가 약 1.5배 향상되었다(Fig. 3). 따라서 이에 따른 스프링백도 비례하여 증가된다고 예상할 수 있다. 고강도 강의 스프링백에 대한 성질을 알아보기 위해 실제 조건과 동일한 입력으로 CAE해석을 수행하고, 실제 제품을 트라이 아웃하여 최종 형상의 변화량을 비교 분석했다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 PAM-STAMP를 사용했다^[8]. 스프링백의 정량적 측정을 위해 비접촉 3차원 광학 측정장비인 GOM ATOS를 활용하여 스프링백을 측정했다^[9]. ATOS는 8 mega pixel triple scanner로 형상을 3D 스캔하여 CAD 대비 변위의 차이를 contour로 보여준다. 측정결과 일반 SECC 강의 뒤틀



Fig. 1 A3 size printer and component (scanner support)

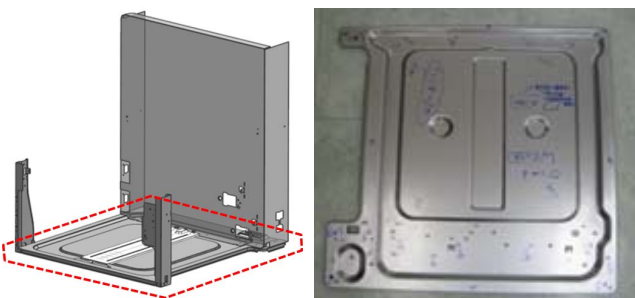


Fig. 2 Frame base of A3 sized printer

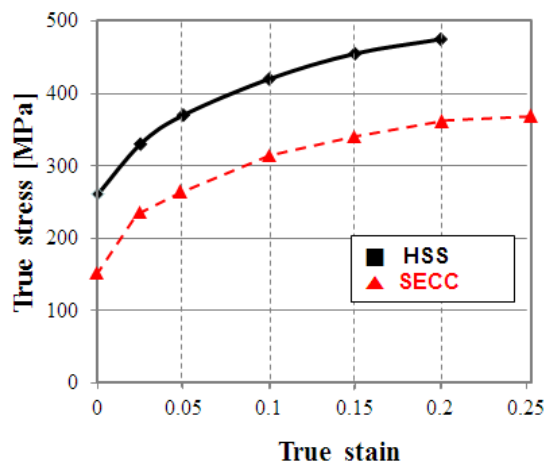


Fig. 3 Comparison of mechanical properties between SECC and HSS from tensile test

Table 1 Mechanical properties of SECC and HSS

Parameters	SECC	HSS
Yield stress (MPa)	175	251
Tensile strength (MPa)	365	387
Young's modulus (GPa)	209	209

림은 5.3 mm, 고장도 강은 18.1 mm로 3배 이상 차이가 나는 것으로 확인되었다. 측정된 두 재료의 기계적 성질의 차이는 Table 1과 같다.

특히 Fig. 4는 3차원 측정 결과를 제품의 CAD 도면과 비교한 결과이다. 도면상 법선 방향을 기준으로 제품이 앞쪽에 있으면 (+) 붉은색, 도면 대비 뒤쪽에 있으면 (-) 파란색으로 구성된다. 만약 도면과 실제 제품과 동일하다면 (0) 전체적으로 녹색으로 보여진다. Fig. 4에서 볼 수 있듯, 측정된 스프링백의 양상은 뒤틀림 현상이 발생한다는 측면에서 비슷하지만 스프링백과 스프링고(Springgo)로 서로 다른 거동을 보이며, 뒤틀림 정도에 있어 많은 차이를 보인다. 고장도 강관의 뒤틀림이 심한 것은 항복강도가 매우 높기 때문에 충분한 소성변형을 받지 못한 문제에서 기인한다. 따라서 고장도 강 성형 시 기존에 사용하던 금형 또는 일반 금형 설계법을 적용하는 것은 적당하지 않고, 스프링백을 최소화하기 위한 금형 설계와 공정조건이 제시되어야 할 것이다. 본 연구에서는 드로우 비드의 적절한 설계를 통해, 스트레칭 유도로 인장력을 부가하여

스프링백을 제어하고자 한다. 유한요소해석을 위해 필요한 기본 물성은 인장실험을 통해 획득했다. 해석에 사용된 재료의 hardening curve는 일반적인 강 재료에 사용되는 식 (1)의 Hollomon model을 사용하였고, 인장시험 결과를 피팅하여 그 계수를 결정했다.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, K 는 강도계수, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률, n 은 가공경화지수이다($K=634 \text{ MPa}$, $n=0.178$). 사용된 공정 변수 중 홀더력은 100 kN이며, 마찰계수는 해석 및 실제 테스트 결과 튜닝을 통해 얻어진 0.12를 사용했다. 고장력 강관 물성과 공정변수를 적용한 해석을 수행하고, 제품에서 가장 뒤틀림이 심한 4개의 모서리를 측정해 실제 측정결과와 비교했다. Fig. 5에서 보여지는바와 같이, 해석과 실제 측정결과와의 차이는 0.96 mm이다. 이는 최대 뒤틀림 기준 7% 정도의 오차 수준으로 유한요소해석이 충분히 신뢰할 만한 수준이며, 해석을 통한 뒤틀림 예측이 가능할 것으로 판단된다.

3. 드로우 비드 최적형상 설계

3.1 스프링백 최소화 적용 모델 선정

A3 사이즈 프린터 부품 중, 평탄도 유지가 중요한 스캐너 서포트를 HSS 소재 적용 검증을 위한 샘플로 선택했다. 스캐너 서포트(Fig. 1)의 기존소재는 1.5 mm 두께 SECC이다. 대형 프린터의 상측에 위치하여 스캐너 부위 처짐을 지탱하는 부품으로, 높은 강성과 강도적 특성이 요구된다. 경량화를 위해 두께를 30% 이상 감소시키면서 강도를 유지하기 위해 1.0 mm의 고장력 강관 적용이 고려되었으며, 이를 양산적용 목표로 개발하면서 스프링백에 의한 치수변형이 발생하게 되었다. 스프링백은 소재의 강도에 비례하는 경향이 있으며, 스캐너 서포트 부품 자체가 기하학적으로 상-좌-우 완전 비대칭 형상이기 때문에 성형 부분과 비 성형 부분이 확연히 구분된다. 또한 성형 시 큰 응력 편차로 인해 뒤틀림 현상이 발생되는 것으로 판단된다. 성형공정은 드로우 비드 성형과 포밍 공정, 총 두 공정으로 이루어지며 2공정에서 굽힘을 통해 최종 형상을 성형한다. 그 후 사이드 트리밍 및 피어싱 등의 공정으로 마무리한다.

본 연구에서는 드로잉 공정 시 고장력 강관의 스프링백을 최소화하는 드로우 비드 최적설계에 있어 두 단계를 거쳤다. 드로우 비드의 설계 변수 모두를 독립 변수로 설정하면 총 135회의 DOE 수행이 필요하고 각 해석마다 드로우 비드 위치와 형상을 변경해야하기 때문에, 스텝핑 해석 시 요소의 증가 및 집중문제에 계산시간이 과도하게 길어질 수 있다. 따라서 드로우 비드의 최적위치를 먼저 결정하고, 이어서 스프링백 감소를 위한 최적형상을 결정하도록 분리 진행하였다.

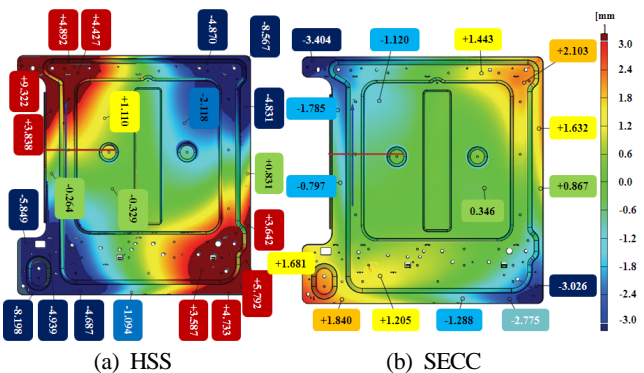


Fig. 4 Measurement and comparison of springback between (a) HSS and (b) SECC

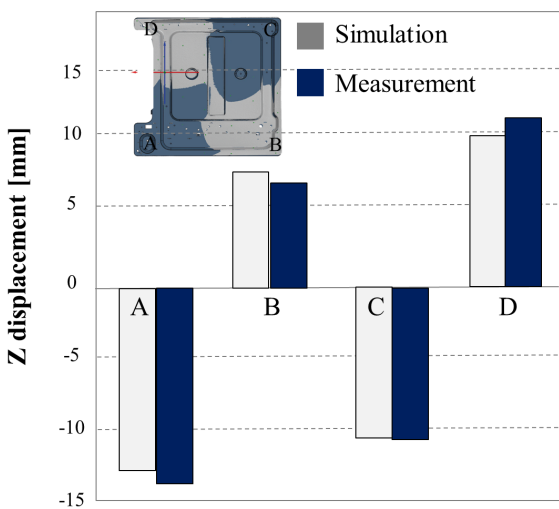


Fig. 5 The difference of displacement at 4 measuring points between 3D measuring and simulation

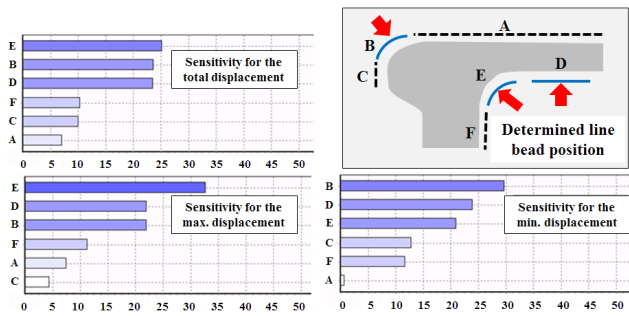


Fig. 6 Initial position of line bead (A~F) and the determined area of insert bead according to sensitivity analysis

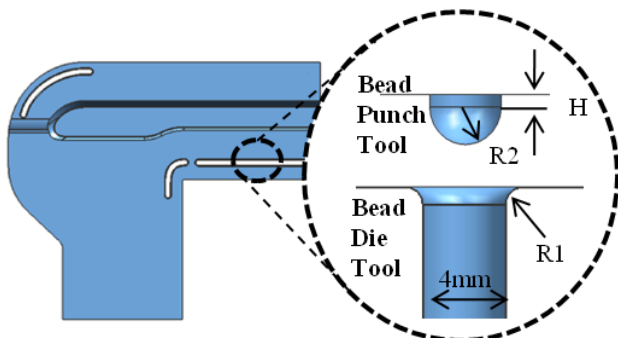


Fig. 7 The position of draw bead and bead shape (R1: the radius of bead die tool, R2: the radius of bead punch tool and H : bead height)

Table 2 Objective function and constraints

Objective function	Minimize $F(x) = ABS(Displacement_z)$
Constraint	$0.5 < R1 < 1.5$
	$0.1 < H < 1.0$
	$1.0 < R2 < 1.5$

3.2 비드 삽입 위치 결정

스탬핑 시 스프링백을 최소화 할 수 있는 메인 공정과 포밍 공정에 대한 유한요소해석을 수행했다. 3D 광학측정장비(GOM ATOS)를 활용하여 스프링백을 3차원 가시화 할 수 있었으며, 이를 해석 결과와 비교분석하기 위해 치수 불량률이 자주 일어나는 9개 부위 포인트를 기준으로 Z방향의 변위를 측정했다. 유한요소해석을 기초로 9개 포인트 중 스프링백을 줄일 수 있는 비드의 초기위치 6군데를 선정하고(A~F), 이 중 스프링백 민감도 분석을 통해 영향도가 가장 큰 3 영역(B, D, E)으로 비드의 위치를 결정했다(Fig. 6).

3.3 비드 최적형상 결정

최적 비드 형상 결정을 위해, 정해진 영역(A~F)에서 Table 2와 같은 목적함수와 구속조건을 가지고 최적화를 수행했다. Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 비드 유무(Bp), R1(bead sliding radius),

Table 3 Initial vs. optimal design variables

Design variables		Initial	Optimal
	R1	0.5	1.08
H	0.1	0.55	
R2	1	1.01	
Objective	y1	13.86	8.75

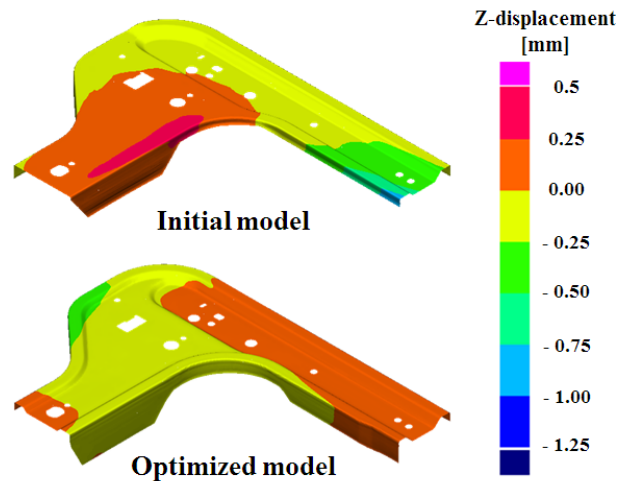


Fig. 8 Verification of draw-bead design

H(bead height) , R2(bead punch radius)의 설계변수가 있으며, 목적함수는 각 위치에서 z방향 변위가 최소화 되도록 설정했다. 또한 실제 가공이 가능한 범위 내에서 각 설계변수들의 제한조건을 부여했다. 최적화 후 설계변수는 Table 3과 같으며 z방향 변위가 초기 설계에 비해 37% 감소했다. 최적화 해석 및 자동화 프로세스 구현은 상용 최적화 프로그램인 PIAAnO(PIDOTECH)를 사용해 구현했다^[10]. Fig. 8은 해석 결과를 반영하여 실제 금형을 제작해 검증한 결과이다. 프레스 공정은 초기 블랭킹(stage 1) 후 2공정(드로잉(stage 2), 플랜지 굽힘(stage 3))으로 구성된다. Stage 2에서 발생한 스프링백은 stage 3을 통해서 다시 한 번 감소되었으며, 최종 제품의 실측 결과 평탄도 0.05 mm 이하로 매우 양호하다.

4. 결론

HSS판재성형에서 스프링백 최소화를 위한 비드 최적 설계에 대한 연구를 수행했다. 스프링백을 감소시키기 위해 드로우 비드를 적용했고, 민감도 분석을 통해 드로우비드의 위치를 먼저 결정했다. 결정된 B, D, E의 위치에서 유한요소 해석을 통해 비드의 형상

최적화를 수행했다. 스프링백이 최소화 되도록 비드의 높이 0.55 mm, R1과 R2는 각각 1.08 mm와 1.01 mm로 결정되었다. 최적 형상 및 위치를 검증하기 위해, 스캐너 서포트의 실제 양산 부품으로 금형을 제작하여 실험한 결과 기존에 비해 z방향 변위가 37% 감소하고 평탄도가 매우 양호한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 활용한 비드 설계 및 최적화 기법은 현업에 유용한 정보를 줄 것으로 기대되며, 아울러 비드의 형상과 위치간의 상관관계까지 파악한다면 보다 효율적이고 강건한 설계가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Han, S., Kim, S., Seo, Y., Yu, E., Kim, J., 2011, Development of 1.2GPa grade hot rolled ultra high strength steel for automobiles, *Trans. of the Kor. Soc. Automotive Eng.*, 1873-1879.
- [2] Park, S., Kang, J., Hwang, B., Kim, S., Kwak, J., 2011, Mechanical Properties of High-Strength Light-Weight Steel Sheets, *Trans. of the Kor. Soc. Automotive Eng.*, 1869-1872.
- [3] Kim, K., Jang, S., Jung, H., Oh, K., Yun, J., Park, C., 2011, The Development of High Strength Steel Car on Sill Side by Roll Forming Process, *Trans. of the Kor. Soc. Automotive Eng.*, 29-34.
- [4] Yang, W. Y., Lee, S. Y., Keum, Y. T., Hwang, J. Y., Yoon, C. S., Shin, C. S., Cho, W. S., 2003, Spingback Control in the Forming Processes for High-Strength Steel Sheets, *Trans. of Meterials Processing*, 12:8 718-723.
- [5] Suh, C. H., Jung, Y., Lim, Y. H., Yun, H. Y., Lee, K., 2012, The Effects of Process Parameters of Multi-Stage Forming on Springback for a U-Channel made of Ultra-High-Strength Steel, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, 36:3 283-288.
- [6] Keum, Y. T., Kim, D. J., Kim, G. S., 2010, Numerical Design of Drawbeads for Advanced High Strength Steel Sheets, *Trans. of Meterials Processing*, 348-356.
- [7] Jung, D., Lee, S., 2000, The Effect of the Drawbead Shape on the Sheet Metal Forming Process, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., A* 24:6 1624-1632.
- [8] PAM-STAMP, 2012, PAM-STAMP user's manual, ESI-Group Co..
- [9] Gom ATOS 2011, ATOS Professional user's manual, GOM mbH.
- [10] PIAAnO, 2008, PIAAnO user's manual version 2.4, PIDOTECH Inc..