



소재 물성 및 두께를 고려한 측면 비드 캠 성형 최적 펀치 변위 예측

윤준섭^a, 채유진^a, 박진수^b, 김민기^{a,*}

Prediction of Optimal Punch Displacement in Cam-Forming of Side-Bead Considering Material Properties and Sheet Thickness

Junseop Yun^a, Yujin Chae^a, Jinsoo Park^b, Minki Kim^{a,*}^a Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^b Department of Mechanical Engineering, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	29	July	2025
Revised	18	August	2025
Accepted	19	August	2025

Keywords:

Cam-forming
Multi-variable regression model
Punch displacement
Material property
Thickness
Finite element method

ABSTRACT

In this study, an optimal punch displacement model was developed for side-bead forming using the cam-forming process. Finite element simulations were conducted under various sheet thicknesses and material properties to evaluate forming error based on bead radius and sheet height. To derive the optimal cam displacements, a normalized scoring method was applied, and the most accurate cam displacements were identified. The resulting displacements were modeled using multivariable regression analysis by considering four independent variables: yield strength, ultimate tensile strength, hardening exponent, and sheet thickness. The model was simplified without interaction terms to enhance applicability. The results showed that sheet thickness had a dominant effect on punch displacement when compared with material properties. The proposed model effectively predicts the punch displacement required to achieve optimal forming outcomes. This approach provides insights for optimization in side-bead forming applications involving various materials and thicknesses.

1. 서론

금속 판재 성형 공정은 자동차, 가전, 항공 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 제품의 정밀도 확보와 반복 생산성 향상을 위해 다양한 성형 기법이 개발되고 있다^[1]. 비드 (bead)는 두 물체를 연결하는 데 사용되는 기계적 결합 방식으로 활용될 수 있으며 부품 간의 구조적 안정성 확보 및 조립 편의성 향상을 목적으로 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다^[2,3]. 두 물체를 조립 시에 용접이나 리벳 등의 추가 공정 없이도 부품을 견고하게 고정할 수 있다는 장점이 있다^[4].

최근에는 캠 성형(cam-forming) 기법을 활용하여 원통형 비드를 성형하는 기술이 개발되고 있으며, 이는 공정 단순화와 고정밀 부품 생산 측면에서 주목받고 있다^[5,6]. 이 공정은 금형의 방사 방향 움직임을 통해 비드를 형성하는 구조이다. 이러한 캠 성형 기반의 측면 비드 성형에서 펀치의 변위는 최종 형상에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수로 작용한다. 그러나, 실제 공정에서는 소재의 기계적 물성이나 판재 두께에 펀치가 존재할 수 있으며 동일한 펀치 변위 조건으로는 모든 판재에서 일관된 형상 정밀도를 확보하기 어렵다. 소재의 거동 및 스프링백 양상은 소재 물성 및 두께에 따라 상이하게 나타날 수 있으므로, 이를 고려하지 않은 고정된

* Corresponding author. Tel.: +82-32-850-0335

E-mail address: mkim@kitech.re.kr (Minki Kim).

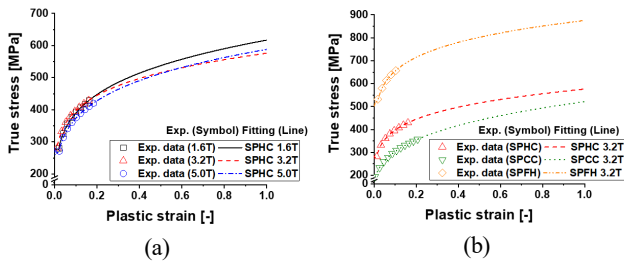


Fig. 1 Hardening curve of (a) SPHC with different thickness and (b) sheet thickness of 3.2 mm with different materials

Table 1 Material thickness, properties, and hardening parameters

	t [mm]	YS [MPa]	UTS [MPa]	K [MPa]	ϵ_0 [-]	n [-]
SPHC 1.6T	1.60	276.8	365.4	576.3	0.0000	0.1605
SPHC 3.2T	3.20	275.6	365.5	643.3	0.0000	0.2136
SPHC 5.0T	5.00	257.0	349.2	588.2	0.0000	0.1975
SPCC 3.2T	3.20	189.7	291.2	519.4	0.0145	0.2473
SPFH 3.2T	3.20	498.8	591.6	875.3	0.0011	0.1263

펀치 변위 설정은 제품의 형상 정밀도 저하로 이어질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 캠 성형을 활용한 측면 비드 성형에서 소재 물성과 두께 변화를 고려한 공정의 분석 및 예측에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 다양한 판재 두께와 소재 조건을 고려한 측면 비드 성형 해석을 수행하였으며, 각 조건에 따른 형상 정밀도를 평가하였다. 이를 바탕으로 최적의 펀치 변위 조건을 도출하고 해당 결과를 토대로 펀치 변위를 재료 물성 및 두께 변수에 기반한 예측 모델로 제시한다.

2. 측면 비드 성형 해석

2.1 소재 및 물성 분석

소재의 제조시기와 제조사에 따라 물성이 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 통일성을 확보하기 위해 각 제조사에서 두께가 다른 시편을 확보하여 단축 인장 실험을 하였다. 해석에 다양한 소재 및 두께 조건을 반영하기 위해 SPHC (1.6T, 3.2T, 5.0T), SPCC (3.2T), SPFH (3.2T)를 대상 소재로 선정하였다. 인장 시험은 Shimadzu Universal Testing Machine을 이용하여 변형률 속도 0.001/s 조건에서 수행되었으며, 변형률 측정은 디지털 이미지 상관법(digital image correlation, DIC)을 적용한 ARAMIS 소프트웨어를 통해 이루어졌다. 재료의 경화 거동은 식 (1)의 Swift 경화 식으로 모델링하였으며 Fig. 1에 나타내었다^[7].

$$\sigma = K(\epsilon_p + \epsilon_0)^n \quad (1)$$

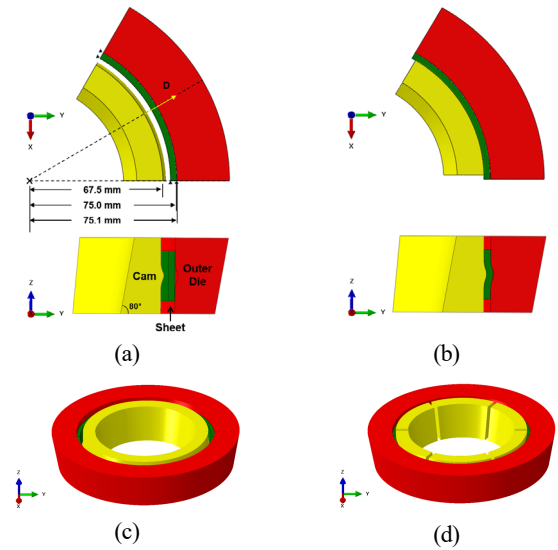


Fig. 2 Finite element modeling of side bead forming system : (a) (1/6) before, (b) (1/6) after forming, (c) (full) before, and (d) (full) after forming

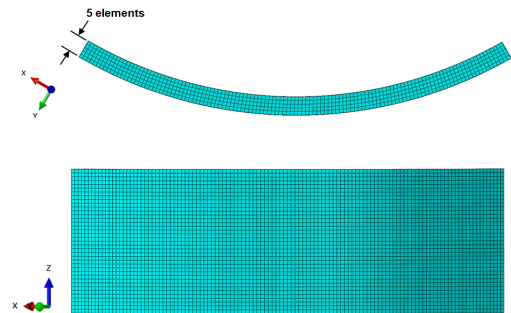


Fig. 3 Mesh configuration of the sheet

여기서 σ 는 실제 응력, ϵ_p 는 실제 소성 변형률, K , ϵ_0 , n 은 경화식의 매개변수를 의미한다. 각 소재의 두께와 물성 및 경화식 계수 값은 Table 1에 정리하였다. Fig. 1(a)에서 SPHC의 같은 소재지만 5.0T의 경우 강도가 낮게 측정이 되었는데 이는 소재가 가공되면서 발생하는 압연량의 차이로 인한 것이라고 판단된다.

2.2 측면 비드 성형 해석 모델링

측면 비드 성형 시스템은 세 개의 금형과 하나의 원통 모양 판재로 구성된다. 금형은 캠(cam), 고정 다이(fixed die), 펀치(punch)로 구성되며, 판재(sheet)는 금형의 움직임에 의해 성형된다. 실제 성형 공정에서는 펀치가 z축 방향으로 하강하면서 캠의 경사면을 따라 접촉하고, 이를 통해 캠이 방사 방향으로 이동하며 판재를 성형하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 해석의 단순화를 위하여 펀치를 제외하고 캠의 방사 방향 움직임만을 구현하여 유한요소 해석을 수행하였다.

해석 대상 판재는 두께 1.6 mm, 3.2 mm, 5.0 mm의 세 가지

조건으로 설정하였으며, 모든 조건에서 외경은 75 mm로 동일하게 유지하였다. 이에 따라 내경은 두께에 따라 달라진다. 캠의 바깥면 직선부 반지름은 67.5 mm이고, 고정 다이의 안쪽면 직선부 반지름은 75.1 mm이다. 비드 형성부는 캠과 고정 다이 모두에서 직선부보다 1.5 mm 크게 설계하여, 성형 후 방사 방향으로 1.5 mm 높이의 비드가 형성되도록 설계하였다.

실제 금형은 Fig. 2(c), (d)와 같이 여섯 개의 캠으로 구성되어 있으나 각 캠은 가운데를 기준으로 축 대칭의 형태를 가지고 있다. 해석 효율성을 위하여 판재 단면에 대칭 조건을 적용하고 하나의 캠으로 구성하여 전체 주공의 1/6로 모델링하여 해석을 수행하였다. 캠은 방사 방향으로 이동하면서 판재를 안쪽에서 성형하고 고정 다이는 외측에서 판재를 지지함으로써 비드 형상을 유도한다. 캠의 변위는 캠이 판재에 접촉하는 지점부터 D로 정의하고 계산하여 1.6 mm에서 시작하여 0.05 mm의 간격으로 1.9 mm까지 각 조건에 대하여 7가지 해석을 진행하였다. 금형과 판재 간의 접촉은 surface-to-surface 조건으로 설정하였으며, 마찰계수는 0.1로 설정하였다^[8].

판재는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 육면체 요소로 구성하였으며, 두께 방향으로 총 5개의 요소가 배치되도록 설정하였다. 이에 따라 요소 크기는 두께 1.6 mm의 경우 0.32 mm, 3.2는 0.64 mm, 5.0 mm는 1.0 mm로 설정하였으며, 모든 조건에서 요소의 크기가 1.0 mm를 초과하지 않도록 하였다.

3. 해석 결과 및 성형 오차 분석

3.1 스프링백 거동 분석

Fig. 4는 캠의 변위가 1.6 mm일 때 스프링백 발생 전후의 등가 응력 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 동일한 소재(SPHC)에 대해 두께가 다른 조건에서의 결과를 비교한 것으로, 두께 변화에 따라 스프링백 전후의 응력 분포에는 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이를 통해 판재의 두께는 스프링백 거동에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

반면, Fig. 4(b)는 동일한 두께(3.2 mm)에서 소재가 다른 조건의 해석 결과를 비교한 것이다. 소재에 따라 스프링백 전후의 응력 분포 차이가 상이하게 나타났으며, SPFH, SPHC, SPCC 순으로 응력 차이가 감소하는 경향을 보였다. 이는 재료의 강도가 높을수록 스프링백이 크게 발생함을 의미한다. 따라서 상대적으로 고강도인 SPFH에서 가장 큰 스프링백이 발생하였으며, 저강도 소재인 SPCC에서 가장 적은 스프링백이 발생하는 것을 확인하였다.

3.2 두께에 따른 성형A 오차 분석

성형 오차 평가를 위하여 비드 형성부의 방사 방향 반지름과 성

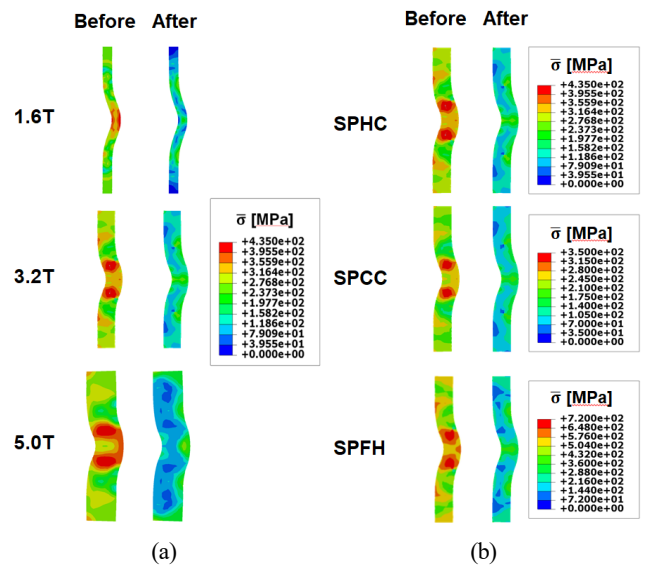


Fig. 4 Stress distribution before and after springback at D = 1.6 mm: (a) comparison by sheet thickness (SPHC) and (b) comparison by sheet material (t = 3.2 mm)

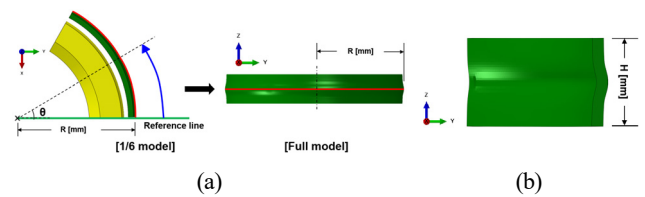


Fig. 5 Evaluation method of forming error: (a) measurement path of bead radius and (b) measurement of height in z-direction

형된 판재의 z축 높이를 측정하였다. Fig. 5(a)와 같이 기준선으로부터의 각도에 따라 비드 형성부의 방사 방향 반지름을 측정하였으며 비드 형성부는 비드 높이 중앙을 의미한다. z축 높이는 Fig. 5(b)와 같이 각 각도의 단면에서의 최대 z축 높이로 정의하였다. 목표 반지름 R_t 는 고정 다이 내측 비드 형성부에 해당하는 76.6 mm로 설정하였으며, 목표 높이 H_t 는 성형 전 판재의 z축 위치인 25 mm로 설정하였다.

Fig. 6은 여러 판재 두께 조건에서 캠 변위 조건별 비드부 반지름을 나타낸 것으로, 전반적으로 두께가 증가할수록 형성된 비드의 반지름이 작아지는 경향을 보였다. 특히 두께가 1.6 mm인 조건에서는 캠 변위가 증가함에 따라 목표 반지름을 초과하는 경우가 발생하였다. 이는 캠과 고정 다이 간 간격이 판재 두께에 비해 상대적으로 작아짐에 따라 성형 중 판재의 압축이 크게 발생하고, 그 결과 판재의 외부 표면에서 바깥 방향으로의 스프링백이 유발되었기 때문으로 해석된다. 전반적으로 캠 변위가 증가할수록 비드부 반지름이 목표 반지름 R_t 에 근접하는 경향을 나타내며, 이는 펀치의 변위가 증가할수록 비드부의 목표 반지름에 가까운 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

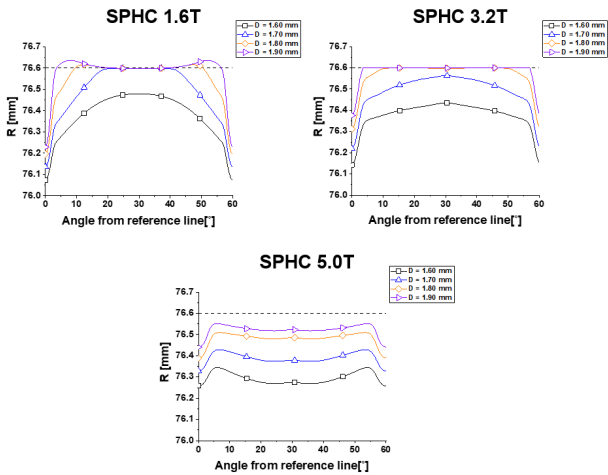


Fig. 6 Bead radius with different sheet thicknesses

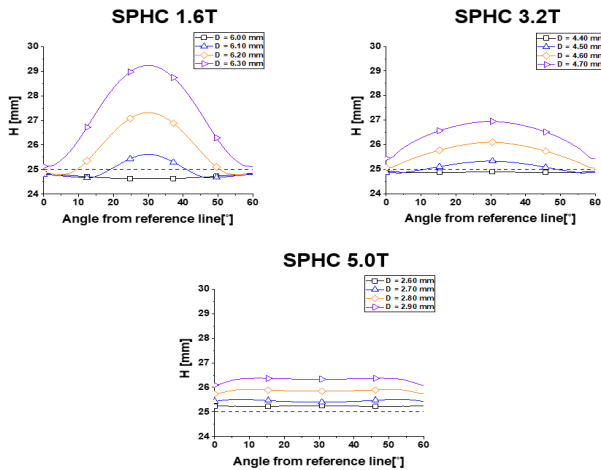


Fig. 7 Height in z-direction with different sheet thicknesses

Fig. 7은 판재 두께에 따른 캠 변위 조건별 성형된 판재의 z축 높이 변화를 나타낸 결과이다. 판재 두께가 증가할수록 캠 변위에 따른 높이 변화 폭이 감소하여 캠 변위에 대한 민감도가 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 캠 변위가 증가할수록 z축 높이는 전반적으로 증가하였으며, 이는 캠 변위에 의한 판재의 압축으로 인해 z축 방향으로 변형이 유도된 결과로 해석된다. 성형된 판재의 z축 높이는 비드부의 반지름과는 반대로 캠 변위가 클수록 목표 높이로부터 점차 멀어지는 경향을 보여, 성형 오차 측면에서 반지름과 높이 간 상반된 경향이 존재한다.

각 조건에서 종합적인 형상을 평가하기 위해 식 (2)와 같이 모든 각도에서 목표 반지름과 실제 반지름 차이의 평균과 목표 높이와 실제 높이 차이의 평균을 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\Delta_R = \frac{\sum_{i=1}^n |R_t - R_i|}{n} \quad (2)$$

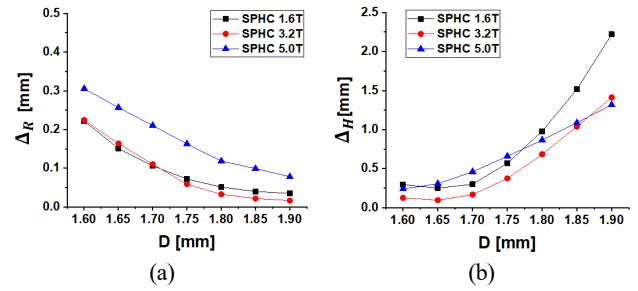


Fig. 8 Average difference from target shape: (a) bead radius, (b) height

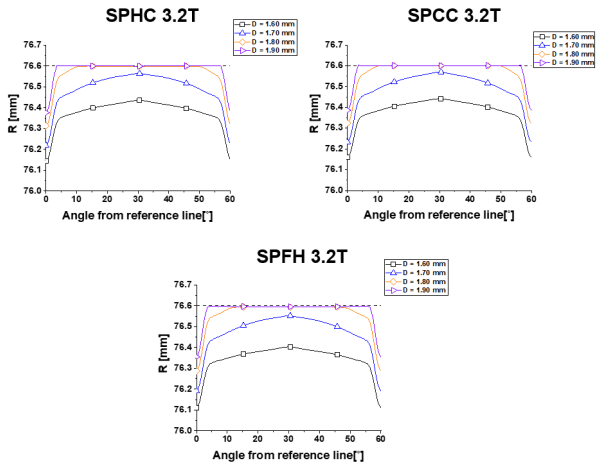


Fig. 9 Bead radius with different sheet materials

$$\Delta_H = \frac{\sum_{i=1}^n |H_t - H_i|}{n} \quad (3)$$

여기서 Δ_R 와 Δ_H 는 각각 모든 각도에서 목표 반지름과 실제 반지름 차이의 평균, 목표 높이와 실제 높이 차이의 평균, R_t 와 H_t 는 각각 목표 반지름과 목표 높이, R_i 와 H_i 는 각도마다의 실제 반지름과 실제 높이를 의미한다. Fig. 8은 다른 캠 변위 조건에서 목표 값과 실제 값 차이의 평균을 나타낸 것이다. 캠의 변위가 클수록 목표한 반지름에 가까워지고 목표한 높이에 멀어지는 것을 확인하였다.

3.3 물성에 따른 성형 오차 분석

소재의 두께 영향을 배제하고 동일 두께 조건에서 소재 물성에 따른 성형 오차를 분석하기 위하여 Fig. 5에서 정의한 평가 기준에 따라 캠 변위 조건별 결과를 비교하였다.

Fig. 9는 서로 다른 소재(SPHC, SPCC, SPFH)에 대해 캠 변위 조건에 따른 비드부 반지름의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 앞서 분석한 두께 변화에 따른 경향과 비교했을 때, 소재의 물성 변화에 따른 비드부의 반지름 차이는 매우 미미하였다. 이는 비드형상에서 반지름 형성에 있어 소재 물성보다 두께의 영향이 지배

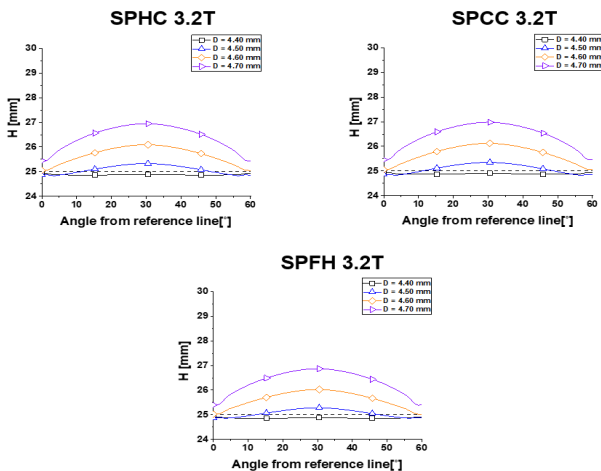


Fig. 10 Height in z-direction with different sheet materials

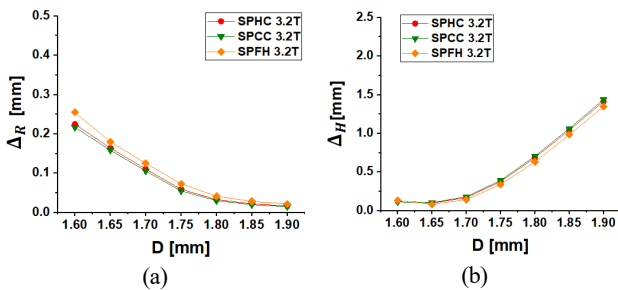


Fig. 11 Average difference from target shape: (a) bead radius, (b) height

적임을 의미한다. 다만, 세 소재 중 SPFH가 가장 작은 반지름 값을 나타내었고, SPCC는 가장 크게 나타나, 소재 강도가 클수록 스프링백의 크기가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 고강도 소재인 SPFH에서 더 큰 스프링백이 발생하여 결과적으로 더 작은 반지름이 형성된 것으로 판단된다.

Fig. 10은 소재에 따른 성형 후 판재의 z축 방향 높이 변화를 나타낸 결과이다. 반지름과 마찬가지로, 높이에 대해서도 소재 변화에 따른 차이는 미미한 수준에 그쳤으며, 이는 두께 변화에 비해 소재 물성이 성형된 판재의 높이에 미치는 영향이 적다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 성형 시 발생하는 z축 방향 변형이 소재의 강도보다는 주로 소재의 압축량에 의존함을 의미한다.

Fig. 11은 여러 캠 변위 조건에서 목표 값과 실제 값 차이의 평균을 나타낸 것이다. 소재 두께에 변화가 있을 때보다 소재 물성이 다를 때 편차가 적게 발생하였다.

4. 최적 펀치 변위 모델링

4.1 각 조건에서의 최적 펀치 변위

앞서 도출한 두 가지 성형 오차 지표를 바탕으로 전체 성형 오차

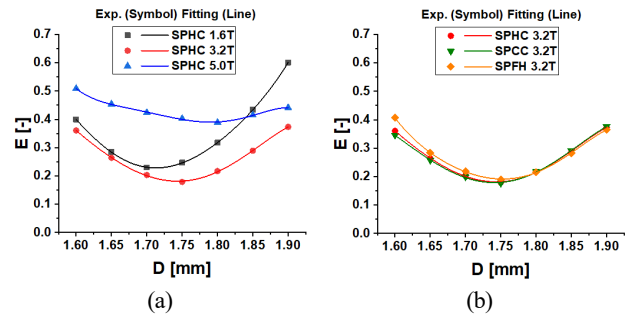


Fig. 12 Total forming error and curve fitting: (a) different thicknesses, (b) different materials

를 산출하였다. 이를 위해 각각의 지표 값을 해당 조건에서의 최댓값으로 정규화하여 1로 환산한 후, 동일한 가중치를 부여하여 식 (4)에 따라 전체 성형 오차를 계산하였다.

$$E = \Delta_{R, norm} + \Delta_{H, norm} \quad (4)$$

여기서 E 는 전체 성형 오차, $\Delta_{R, norm}$ 은 평균 비드 반지름 오차를 정규화한 값, $\Delta_{H, norm}$ 은 평균 판재 z축 높이 오차를 정규화한 값을 의미한다.

두 지표에 동일한 가중치를 적용할 경우, 반지름 값의 변화 폭이 높이에 비해 상대적으로 작기 때문에 반지름이 전체 오차에 미치는 영향이 더 크게 작용한다. 실제 성형 품질에 있어 반지름의 정밀도가 성형된 판재의 높이보다 더욱 중요하므로, 동일 가중치 방식을 그대로 적용하였다.

Fig. 12(a)는 동일 소재(SPHC) 조건에서 두께 변화에 따른 전체 오차와 이를 기반으로 한 곡선 적합(curve fitting) 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12(b)는 동일 두께(3.2 mm) 조건에서 소재 변화에 따른 전체 오차와 곡선 적합 결과이다. 각 조건에서 수행된 7가지 캠 변위 조건에 대한 해석 결과를 기반으로 5차 다항 회귀를 수행하였으며, 이를 통해 최적의 캠 변위 값을 도출하였다. Table 2에 두께 및 소재 조건에 따른 최적 캠 변위 값을 나열하였다.

분석 결과, 두께가 증가할수록 최적 캠 변위가 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이는 두꺼운 판재일수록 더 큰 변형 에너지가 요구되기 때문으로 해석된다. 또한, 1.6T, 3.2T와 같은 얇은 두께의 경우, 캠 변위의 크기 변화가 전체 성형 오차 변화에 미치는 영향이 매우 큰 반면, 5.0T는 상대적으로 영향이 작다. 이에 따라, 캠 변위가 1.85 이상인 경우, 1.6T의 오차가 급격히 커져 5.0T의 오차보다 커진다. Fig. 12(b)에서 확인할 수 있듯이, 소재의 강도가 증가할수록 최적 캠 변위 역시 증가하는 경향을 나타내어, 보다 강한 소재일수록 성형을 위해 더 큰 변위가 필요함을 알 수 있다. 즉, 두께와 강도가 증가할수록 성형을 위한 캠 변위도 함께 증가한다.

Table 2 Optimal cam displacements

SPHC 1.6T	1.712 mm
SPHC 3.2T	1.743 mm
SPHC 5.0T	1.789 mm
SPCC 3.2T	1.738 mm
SPFH 3.2T	1.752 mm

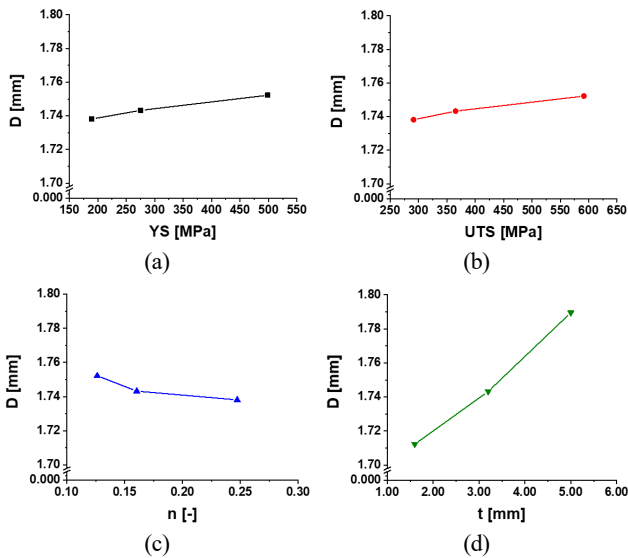


Fig. 13 Cam displacement with respect to input variables: (a) yield strength, (b) ultimate tensile strength, (c) n , and (d) thickness

4.2 최적 펀치 변위 모델링

소재의 두께 및 기계적 물성을 모두 고려하여 최적 펀치 변위를 예측할 수 있는 수식 모델을 구축하였다. 이를 위해 앞서 확보한 각 조건별 최적 캠 변위 값을 종속 변수로 설정하고, 독립 변수로는 앞서 Table 1에 기재한 항복 강도(yield strength, YS), 인장 강도(ultimate tensile strength), 경화 지수(hardening exponent, n), 그리고 판재두께(thickness, t)를 활용하였다.

모델링은 수식의 단순성을 위하여 독립 변수끼리의 상호작용 항을 고려하지 않고, 다중회귀분석(multi-variable regression analysis)을 적용하였다⁹⁾. 분석 결과를 바탕으로 최적 캠 변위 예측 모델(D)을 식 (5)와 같이 도출하였고 이에 상응하는 펀치 변위 모델(D_p)은 식 (6)과 같다.

$$D = 1.716 + 0.0012 \times YS - 0.0011 \times UTS + 0.1707 \times n + 0.0245 \times t \quad (5)$$

$$D_p = 43.760 + 0.0068 \times YS - 0.0062 \times UTS + 0.9681 \times n - 0.8611 \times t \quad (6)$$

최적 펀치 변위는 최적 캠 변위를 구현하기 위한 펀치의 변위로 앞서 활용한 캠 변위를 실제 최적 펀치 변위로 환산하였다. 도출된

식의 결정계수(R^2) 값은 0.9885로, 이는 해당 모델이 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 각 변수와 캠의 변위의 상관관계는 Fig. 13에 나타내었으며, 그 결과 다른 변수들에 비해 두께가 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자임을 확인할 수 있다.

제안된 회귀 모델은 측면 비드 성형 공정에서 소재의 물성과 두께를 조건에 따른 최적 펀치 변위를 예측하는 데 활용될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 캠 성형 공정을 활용한 측면 비드 성형에서 다양한 소재와 두께 조건에 따른 최적 펀치 변위를 도출하고, 이를 기반으로 예측 모델을 수립하였다. 성형 오차는 비드부 반지름과 성형된 판재의 z 축 높이를 기준으로 평가하였으며, 두 기준의 정규화를 통해 전체 성형 오차를 산출하였다.

분석 결과, 판재 두께는 성형 오차 및 최적 펀치 변위에 지배적인 영향을 미치는 변수로 확인되었으며, 두께가 증가할수록 더 큰 펀치 변위가 요구되었다. 반면, 소재 물성(항복 강도, 인장 강도, 경화 지수)에 따른 성형 오차의 차이는 비교적 미미한 수준으로 나타났으며, 이는 동일한 두께 조건에서는 소재가 다르더라도 비드부 반지름과 z 축 높이의 차이가 크지 않다는 것을 의미한다. 단, 소재의 강도가 높을수록 스프링백이 더 크게 일어나 같은 두께이더라도 더 큰 펀치 변위가 요구되었다.

최종적으로 도출된 모델은 소재의 물성과 두께를 입력 변수로 하여 최적 펀치 변위를 예측할 수 있는 수식 형태로 정립되었으며, 비드 성형 공정의 공정 조건 설정에 있어 유용한 설계 지침으로 활용될 수 있다.

후 기

이 연구는 한국생산기술연구원 내부과제 (No. KITECH JE-25-0006)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Atlan, T., Tekkaya, A. E., 2012, Sheet Metal Forming: Processes and Applications, ASM International, USA.
- [2] Jones, P. W., Abbott, J. R., Fleming, R. A., 1991, Bead Retainer, US Patent: 5060706.
- [3] Mayer, J., Poschner, P., Kvist, J., Lehmann, M., Mooser, P., 2022, Fastening Object to Each Other, US Patent: 11453174 B2.
- [4] Switz, R. J., 1979, Beryllium Science and Technology-Joining I:

- Mechanical/Adhesive, Springer, US, https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0668-0_12.
- [5] Park, J., Lim, S., Kim, Y., Lim, S., 2022, A Study on the R-Bead Forming Process of a Driven Hub and Inertia Wheel for Transmitting Automobile Crankshafts' Rotation Power, Proc. Korean Society for Technology of Plasticity and materials processing Autumn Conf., 158-158.
- [6] Yun, J., Chae, Y., Lim, S., Park, J., Kim, M., 2025, Optimization of Cam-forming Process for Side Bead Considering Springback, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 34:3 129-136, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.3.129>.
- [7] Chae, Y., Lim, S., Kim, Y., Kim, M., 2024, Modeling of Hardening Behavior for Titanium Alloy Sheet Considering Strain Rate and Temperature, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 33:6 342-348, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.6.342>.
- [8] Kim, B., Kim, Y., Lim, S., Kim, M., 2024, Determination of Friction Coefficient in Structural Forming Analysis Considering Anisotropic Yield Function, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 33:1 1-10, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.1.1>.
- [9] Bonamente, M., 2022, Statistics and Analysis of Scientific Data-Multi-Variable Regression, Springer Nature, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-19-0365-6_13.

	<p>Junseop Yun Student Researcher in Korea institute of Industrial Technology. His research interest is Metal Forming. E-mail: sana408@kitech.re.kr</p>
	<p>Yujin Chae Researcher (M. S.) in Korea institute of Industrial Technology. Her research interests are Material Testing & Modeling. E-mail: cyj253@kitech.re.kr</p>
	<p>Jinsoo Park Ph. D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Metal Forming. E-mail: pjs0000822@naver.com</p>
	<p>Minki Kim Senior Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are Plasticity, Material Testing & Modeling, Experimental Mechanics. E-mail: mkim@kitech.re.kr</p>