



## 허스 커플링 기어 반자유단조 공정의 유한요소해석 기반 블랭크 치수 최적화

김윤성<sup>a</sup>, 채유진<sup>a</sup>, 임성식<sup>a</sup>, 박진수<sup>b</sup>, 김민기<sup>a,\*</sup>

## FEA Based Optimization of Blank Dimension for Hirth Coupling Gear Semi-Open Die Forging Process

Yoonseong Kim<sup>a</sup>, Yujin Chae<sup>a</sup>, Seongsik Lim<sup>a</sup>, Jinsoo Park<sup>b</sup>, Minki Kim<sup>a,\*</sup><sup>a</sup> Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Inha University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	21	May	2025
Revised	25	June	2025
Accepted	27	June	2025

## Keywords:

Hirth coupling gear  
Semi-open die forging  
Finite element analysis  
Blank size  
Optimization

## ABSTRACT

This study aims to optimize the semi-open-die forging process of Hirth coupling gears by analyzing the influence of initial material dimensions. Due to the gear's complex radial tooth geometry, challenges such as material overflow, surface irregularities, and localized deformation hinder dimensional accuracy. A parametric study was conducted on the initial inner diameter of the workpiece, with die geometry held constant. Evaluation criteria included flash volume, reaction force, and geometric profile deviations based on ISO 1101 tolerance standards. Results show that selecting an optimal inner diameter minimizes flash volume while preserving profile accuracy. Under optimized conditions, the final geometry exhibited a maximum deviation within 0.05 mm, meeting industrial tolerance requirements. These findings offer practical guidance for forging precision components, contributing to reduced material waste and improved process efficiency.

## 1. 서론

허스 커플링 기어(Hirth coupling gear)는 높은 토크 전달과 정밀한 맞물림 특성을 요구하는 기계요소로, 항공우주, 자동차, 중공업 등 다양한 산업에서 활용된다. 이 기어는 방사형 톱니 구조를 갖추고 있어 고하중에서도 정밀한 정렬이 가능하며, 반복적인 분해 및 조립이 필요한 경우에도 높은 신뢰성을 제공한다<sup>[1,2]</sup>. 그러나, 이러한 기하학적 특성으로 인해 제조 과정에서 높은 치수 정밀도와 균일한 표면 품질이 요구된다.

일반적으로 허스 커플링 기어의 제조에는 주조(casting), 분말 야금(powder metallurgy) 및 단조(forging)와 같은 여러 가지 방

법이 사용된다<sup>[2]</sup>. 주조는 복잡한 형상 제작에 유리하나 내부 기공 및 강도 저하의 위험이 있고, 분말 야금은 균일한 미세구조를 제공하나 소결과 후가공이 필요하다. 반면 단조는 재료 낭비를 줄이면서 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있어 효율적인 제조 방식으로 주목받고 있다<sup>[3]</sup>.

본 연구는 SPHC 소재를 기반으로 한 허스 커플링 기어의 단조 공정을 재현하였다. SPHC는 대표적인 자동차 강판 재료로서, 자동차용 구조 부품 및 외장 패널 제조에 널리 사용되고 있다<sup>[2,4]</sup>. 이러한 산업적 활용성을 고려할 때, SPHC를 활용한 허스 커플링 기어 성형 공정의 최적화는 자동차 산업을 포함한 다양한 분야에 실질적인 적용 가능성을 제공할 수 있다. 단조 방식 중에서는 자유단조

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

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

(open-die forging)와 판단조(plate forging)를 고려하였다. 자유 단조는 대형 부품 성형에 적합하고, 판단조는 얇은 판재를 성형하는 공정으로 내부 기공이나 두께 변화 제어에 유리하다<sup>[5,6]</sup>. 판단조는 CNC 가공 대비 재료 손실이 적고, 성형 강도가 높으며, SPHC와 결합할 경우 높은 공정 효율성을 기대할 수 있다. 그러나 판단조를 이용한 허스 커플링 기어 제조에는 플래시(flash) 발생, 표면 불균일성, 국부 변형 집중 등이 발생할 수 있다<sup>[7,8]</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 기존의 단조 공정 최적화 연구는 다이의 형상을 변경하여 최종 성형품의 품질 개선하였다. 하지만, 블랭크의 초기 크기 또한 재료의 변형 거동과 최종 품질에 영향을 미친다<sup>[9,10]</sup>.

본 연구에서는 유한요소해석을 기반으로 블랭크의 치수 조건을 비교·분석하여, SPHC 소재를 활용한 허스 커플링 기어 판단조 공정의 형상 정밀도와 공정 효율성을 모두 고려한 최적 조건을 도출한다.

## 2. 성형 공정의 유한요소해석 모델링

### 2.1 재료 물성 측정 및 경화 모델 정의

SPHC 4.0t 판재의 물성을 얻기 위해, ASTM E8 규격에 따라 시편을 준비하여 일축 인장 실험을 수행하였다. 실험은 SHIMADZU Universal testing machine을 사용하여 진행하였으며, 실험 중 변형 측정은 DIC, Aramis 5M 장치를 사용하였다. 획득한 실험 데이터를 바탕으로 유한요소해석 물성 데이터를 확보하기 위해 경화식을 (1)과 같이 설정하였다. 일반적으로 금속 소재의 경화식에는 Swift 식이나 Voce 식이 단독으로 사용된다. Swift 식은 초기 항복 이후 빠른 경화 거동을, Voce 식은 소성 후반부의 경화 거동을 각각 잘 설명한다. 그러나, 본 연구에서 실험을 통해 얻은 응력-변형률 데이터는 기존의 단일 경화식만으로는 경화 거동을 설명하기 적합하지 않았으며, 이에 Swift 식과 Voce 식을 결합한 복합 경화식을 구성하여 보다 높은 실험 적합성을 확보하였다. 이를 통해 Fig. 1과 같이 실험 결과를 근사하였다.

$$\sigma = \alpha \{ \sigma_0 + R(1 - e^{-C_r \epsilon_T^p}) \} + (1 - \alpha) \{ K(\epsilon_T^p + \epsilon_0)^n \} \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $R$ ,  $C_r$ ,  $K$ ,  $\epsilon_0$ ,  $n$  등의 매개변수가 포함되며,  $\epsilon_T^p$ 는 소성 변형률 그리고  $\sigma$ 는 유효응력을 의미한다. 경화식의 매개변수 값들은 Table 1에 정리하였다.

### 2.2 금형 및 소재 형상 정의와 해석 모델 구축

본 연구에서는 허스 커플링 기어의 판 단조 공정을 재현하기 위해, 실제 산업 현장에서 사용되는 공정 치수를 기반으로 금형을 설계하였다. Fig. 2는 금형의 형상과 주요 구성 요소를 나타낸다.

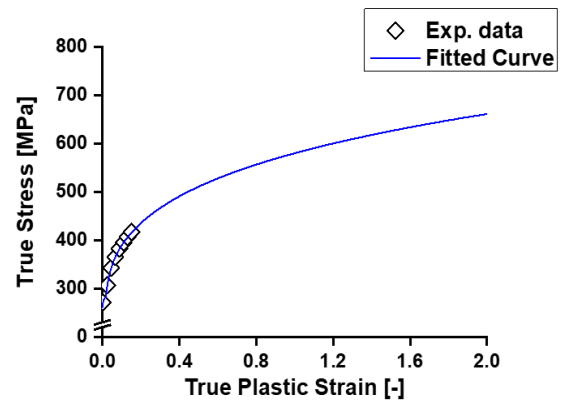


Fig. 1 Fitted curve for hardening behavior of SPHC material

Table 1 Parameters for the hardening equation

$\alpha$	$\sigma_0$ [MPa]	$R$ [MPa]	$C_r$	$K$ [MPa]	$\epsilon_0$	$n$
0.045	0.000	1604	51.95	530.0	0.017	0.217

금형은 상형(upper die), 하형(lower die), 패드(pad)로 구성되며, 블랭크는 상형과 하형 사이에 배치되어 성형이 진행된다. 상형은 블랭크의 재료 유동(material flow)을 제어하는 금형으로, 이때 상형의 내경이 36.9 mm로 설정되어 있다.

Fig. 3(a)은 패드, 하형의 톱니 형상, 그리고 블랭크의 초기 배치 및 치수를 나타낸다. 실제 하형은 30개의 톱니가 원형으로 배열되어 있으나, 유한요소해석에 적용한 모델은 톱니들의 반복 대칭 구조를 고려하여 전체 형상 대신 단일 톱니 형상(12°)만을 해석 영역으로 설정하였다. 금형들의 치수로는, 패드는 상단부 외경이 35.7 mm, 하단부 외경이 38.75 mm로 설정되어 블랭크의 초기 위치를 제한하는 역할을 수행한다. 블랭크 내경( $d_{material}$ )은 본 연구의 주요 설계 변수로, 초기 치수는 39.5 mm로 설정하였다. Fig. 3(b)는 해석 모델과 경계 조건을 나타낸다. 블랭크 및 금형에는 회전 대칭 경계 조건을 적용하여 해석 영역을 최소화 하였으며, 상형은 -Z 방향으로 하강하여 블랭크를 성형하도록 하였다. 하형과 패드는 모든 방향의 변위와 회전 자유도를 고정하였다.

해석은 ABAQUS Explicit solver를 이용하였으며, 모든 접촉 조건은 Surface-to-surface contact로 설정하였다. 이때, 마찰계수는 해석의 간편성을 위해 0으로 설정하였다. 성형 전후의 블랭크 요소 구성(mesh configuration)은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 성형 이후에도 요소들은 과도한 왜곡이나 불안정성 없이 해석이 안정적으로 수행되었다는 것을 나타낸다. 재료 유동이 집중되는 하형 톱니부의 형상 특성을 고려하여, 해당 영역에는 더 세밀한 요소 크기를 적용하였다. 하형의 톱니 성형부와 접촉하는 영역에는 0.1 mm, 그 외 영역에는 0.2 mm 요소를 적용하였다.

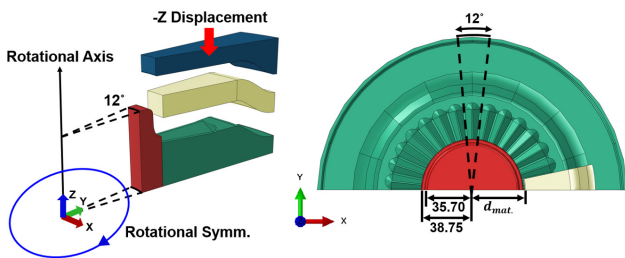


Fig. 2 Cross-sectional and detailed views of the forging assembly

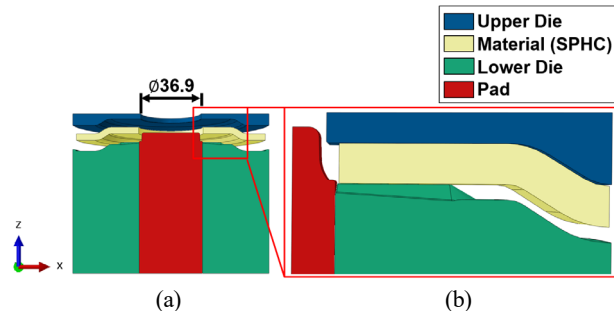


Fig. 3 (a) Application of rotational symmetry and boundary conditions for 12° segment modeling, (b) 180° lower die and pad geometry with 12° segment blank configuration

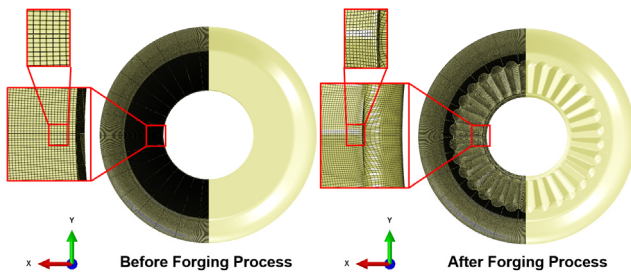


Fig. 4 Comparison of mesh configuration for before and after forging process

### 2.3 공정 변수의 설정 및 범위 정의

성형 공정에서 형상 품질을 개선할 수 있는 공정 변수를 도출하기 위해, 초기 치수를 39.5 mm로 설정하여 단조 해석을 수행하였다. Fig. 5(a)는 초기 치수 조건에서의 성형 결과를 보여주며, 일부 소재가 상형과 패드 사이 공간까지 유입되어 플래시가 발생하였다. 플래시는 최종 제품의 형상과 무관한 여분의 재료로, 산업 현장에서는 이를 챔퍼링 같은 후공정을 통해 제거한다. 그러나, 이는 재료 낭비와 추가 공정을 요하는 원인이 되므로, 본 연구에서는 이러한 플래시 발생을 최소화하는 동시에 톱니 형상을 정밀하게 성형하는 것을 목표로 한다.

공정 최적화의 공정 변수를 선정할 때 블랭크의 치수와 금형의 치수를 공정 변수 후보로 고려할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 설계한 금형의 치수는 목표 제품의 최종 형상과 일치하도록 설계되어 있다. 그러므로, 공정 변수는 블랭크의 치수로 선정하였으며,

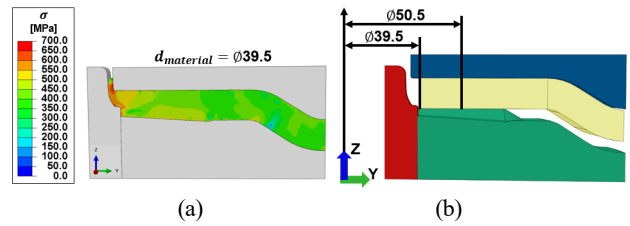


Fig. 5 (a) FEA result for material inner diameter of 39.5 mm, (b) upper and lower boundaries of material inner diameter

그중에서도 블랭크 내경( $d_{material}$ )을 공정 변수로 설정하였다. 일반적인 자유단조 공정에서는 재료가 내·외경 방향 모두로 유동하지만, 본 연구의 금형 구조는 상형과 하형의 곡률 형상으로 인해 재료 유동이 주로 내경 방향으로 유도된다. 이러한 특성은 밀폐단조와 자유단조의 중간 형태로, 본 연구는 이를 반자유단조(semi-open die forging)로 정의하였으며, 블랭크의 내경을 공정 변수로 선정하였다. 블랭크 내경 변화에 따른 성형 거동을 평가하기 위한 변수 범위는 초기 내경 39.5 mm를 기준으로 1.0 mm 간격으로 50.5 mm까지 설정하였다. 이는 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 하형 톱니의 절반 직경에 해당하는 치수이다.

## 3. 해석 결과 분석

### 3.1 공정 변수 변화에 따른 경향성 분석

본 연구에서는 블랭크 내경이 성형 품질에 미치는 영향을 평가하기 위해, 39.5 mm부터 50.5 mm까지 총 12개의 내경 조건에 대해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6은 대표적인 내경 조건별 성형 결과를 보여준다. 내경이 작은 39.5 mm 조건에서는 상형과 패드 사이의 공간까지 재료가 과도하게 유입되어 플래시가 발생하는 형상 과충분(overflow) 현상이 나타났다. 반면, 내경이 큰 42.5 mm, 45.5 mm, 50.5 mm 조건에서는 소재가 형상을 충분히 채우지 못하는 형상 불충분(underfill) 현상이 관찰되었다. 42.5 mm 조건에서는 패드 접촉면이 채워지지 않았으며, 45.5 mm와 50.5 mm 조건에서는 패드 접촉면과 하형 톱니부 접촉면 성형이 미달되는 형상 불충분이 발생하였다. 이는 블랭크 내경이 커질수록 재료량이 감소해 형상 성형이 어려워짐을 나타낸다. 이러한 경향을 바탕으로, 형상 불충분이 시작되는 임계 내경을 보다 정밀하게 분석하기 위해 39.0 mm에서 41.5 mm까지 0.5 mm 간격으로 세분화하여 추가 해석을 수행하였다.

성형 후 제품 외부로 돌출되는 재료의 양( $V_{flash}$ )은 Fig. 7과 같이 기준 형상 평면을 기준으로 상부에 돌출된 재료 체적을 측정하였다. 목표 체적 대비 부족한 체적은 음수 값으로 산출하여 평가하였다. 해석 결과, 내경이 작을수록  $V_{flash}$ 가 증가하였으며, 39.0 mm 조건

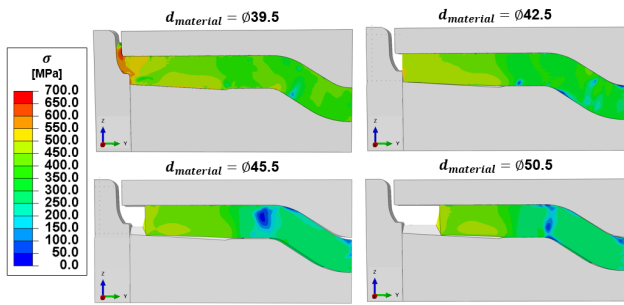


Fig. 6 FEA results according to material inner diameter

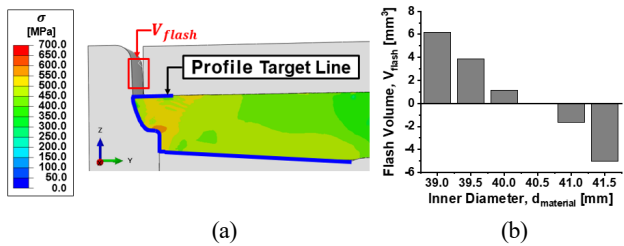


Fig. 7 (a) Identification of flash volume, (b) quantified flash volume according to material inner diameter

에서는 기준 형상 대비 약  $6.19 \text{ mm}^3$ 의  $V_{flash}$ 가 발생하였다. 반대로 내경이 증가할수록  $V_{flash}$  값이 감소하여, 40.5 mm 이후 조건부터는 음의 값을 나타내어 형상 불충분이 발생함을 보여주었다. 다른 평가 지표로는 성형 과정에서 금형이 받는 성형 하중( $F_{reac}$ )에 대한 분석을 수행하였다. 실제 공정에서는 성형 하중이 낮을수록 금형에 작용하는 부하가 줄어들어, 성형기기(프레스)의 용량 요구 조건을 낮출 수 있고, 전체 공정비용 또한 절감되는 이점이 있다. 따라서 최적 공정 조건을 평가함에 있어  $V_{flash}$ 를 제거하는 것 뿐만 아니라 성형 하중 또한 공정 최적화의 중요한 판단 요소로 작용한다. Fig. 8은 상형에서 추출한 Z방향 반력 값을 나타내며, 블랭크 내경 변화에 따른 하중 변화를 시각적으로 나타낸다. 해석 결과, 39.0 mm 조건에서는 약 624 kN의 하중이 발생하였으며, 내경이 증가할수록 하중은 점진적으로 감소하여 41.5 mm 조건에서는 약 208 kN로 나타났다. 이는 블랭크 내경이 작을수록 금형과의 접촉 면적이 증가하여 재료 유동 저항이 커지고, 성형 하중도 함께 증가하기 때문이다. 반면 내경이 커질수록 금형과의 접촉 면적이 줄어들어 성형 하중이 감소하는 경향을 보였다. 블랭크 내경에 따른  $V_{flash}$ 와  $F_{reac}$ 의 값은 Table 2에 정리하였다.

### 3.2 성형 정밀도 평가

성형품의 정밀도 평가를 위해, 먼저 성형 과정에서 어느 부위가 가장 늦게 성형되는지를 분석하였다. Fig. 9는 상형의 하강에 따른 소재 유동과 블랭크의 성형 순서를 보여주며, 허스 커플링 기어 톱니의 골부(valley) 하부 단면이 가장 마지막에 성형되는 것을 확

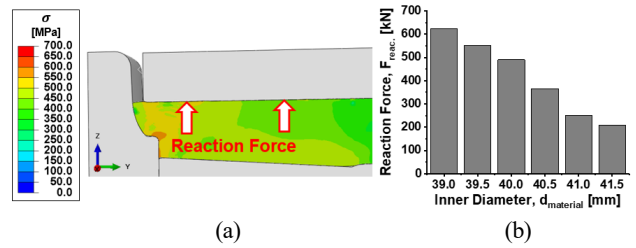


Fig. 8 (a) Identification of reaction force, (b) quantified reaction force according to material inner diameter

Table 2 Flash volume and reaction force values according to material inner diameter

$d_{material}$ [mm]	39.0	39.5	40.0	40.5	41.0	41.5
$V_{flash}$ [ $\text{mm}^3$ ]	6.189	3.844	1.131	-0.039	-1.643	-5.033
$F_{reac}$ [kN]	624.3	551.3	490.1	366.0	250.9	208.5

인하였다. 이 영역은 소재 유동의 한계가 가장 먼저 드러나는 구간으로, 해당 부위까지 형상이 완전히 채워지면, 성형품의 전체 형상도 충분히 충전된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3D 전체 형상에 대한 윤곽도 분석을 수행하는 대신, 성형의 최종 완성도를 대표할 수 있는 해당 단면을 평가 대상으로 선정하였다. 일반적으로 단조품의 형상 정밀도 평가는 ISO 1101 표준에 따라 양측균등공차와 편측불균등공차를 적용한다. 산업현장에서는 주로 총 0.1 mm의 공차( $\pm 0.05 \text{ mm}$ )를 설정하여 품질을 평가한다. Fig. 10은 두 공차의 정의를 시각화 한 것으로, 왼쪽은 목표 윤곽을 중심으로 최대 실체치수(maximum material size, MMS)를 내·외측 양방향으로 정의하여 최대 허용 치수(공차 상한)와 최소 허용 치수(공차 하한)를 모두 고려하는 방식이다. 반면, 오른쪽은 일 방향(외측)으로만 허용 범위를 설정하여 공차 하한이 존재하지 않는 방식이다. 본 연구에서는 금형 형상을 목표 윤곽으로 설정하였기 때문에, 내측 방향(금형 내부)을 향한 공차 하한을 설정할 경우 금형 형상을 침범하는 비현실적인 평가가 발생하게 된다. 이에 따라 금형 외측으로의 편차( $+0.05 \text{ mm}$ )만을 허용하는 편측불균등공차를 적용하였다.

성형품의 형상 정밀도 평가 구간은 Fig. 11에 나타난 바와 같이 패드 접촉면과 하형 접촉면으로 선정하였다. Fig. 11에서는 해당 평가 구간을 형상 목표선과 함께 시각적으로 나타내었다. 블랭크 내경에 따른 패드 접촉면의 평가 결과는 Fig. 12의 (a)와 (b)에 나타내었다. (a)는 블랭크 내경에 따른 형상 윤곽선을 시각화 한 것이고, (b)는 전체 편차( $d_{pad}$ )와 최대 편차( $d_{pad,max.}$ )를 정량적으로 정리한 것이다. Fig. 12(a)에서 검정색 파선은 목표 윤곽(target)을 나타내며, 남색 점선은 공차 상한(MMS)을 의미한다. 이를 기준으로 각 조건별 윤곽선이 허용 범위 내에 있는지 판단할 수 있다. 분석 결과, 40.5 mm까지는 최대 편차가 0.05 mm를 넘지

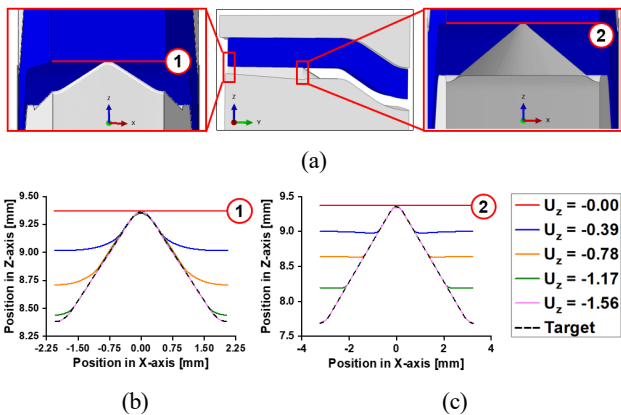


Fig. 9 Deformation behavior of material according to upper die displacement: (a) identification of front and back tooth, (b) front of tooth, (c) back of tooth

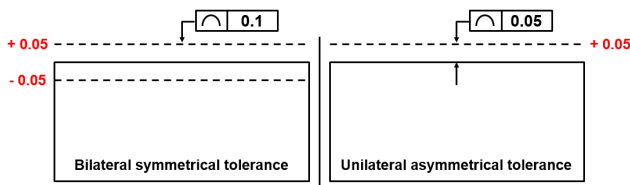


Fig. 10 Comparison of profile tolerance definitions

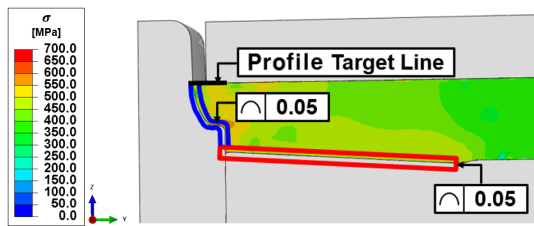


Fig. 11 Designation of profile evaluation regions at pad and lower die interface with 0.05 mm profile tolerance

않아 공차 허용 범위 내에 있었으나, 41.0 mm 조건부터는 공차를 초과하였다. 하형 접촉면의 평가 결과는 Fig. 13(a)과 (b)에 제시되어 있다. 하형 접촉면에서는 40.0 mm 이하 조건에서 총 편차 ( $d_{lowerdie}$ )가 0에 수렴했지만, 40.5 mm 조건부터 편차가 발생하여 41.5 mm 조건에서 최대 0.1 mm 이상의 오차가 발생하였다.  $d_{material}$ 에 따른 패드와 하형 접촉면의 총 편차와 최대 편차는 Table 3에 정리하였다.

### 3.3 성형 품질 향상을 위한 블랭크 치수 최적화

본 연구에서는 형상 정밀도와 공정 효율성을 동시에 고려하여, 다음과 같은 목적함수  $O_{Target}$ 을 정의하였다. 이 목적함수는 하형 및 패드 접촉면의 윤곽 편차, 성형 중 발생한 플래시 체적, 그리고 성형 하중을 하나의 정량적 지표로 통합한 값으로 구성된다. 이에 따라 최적화된 목적함수는 아래와 같은 식 (2)와 같

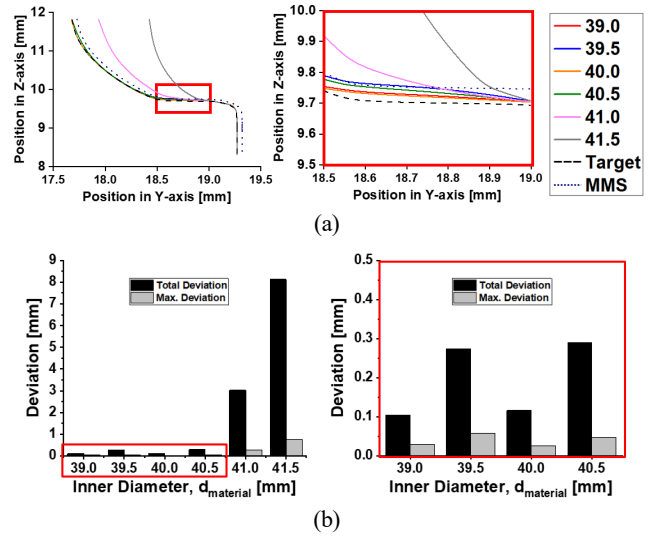


Fig. 12 Pad profile according to material inner diameter: (a) comparison with target and tolerance upper bound, (b) total and maximum deviations

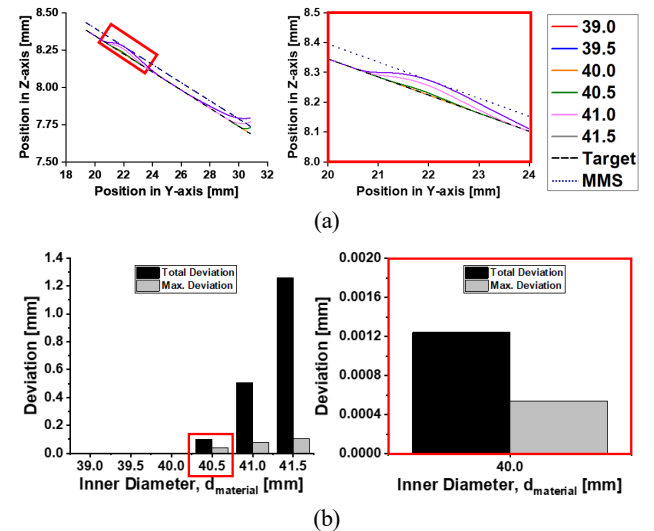


Fig. 13 Lower Die profile according to material inner diameter: (a) comparison with target and tolerance upper bound, (b) total and maximum deviations

Table 3 Profile deviation by varying material diameter

$d_{material}$ [mm]	39.0	39.5	40.0	40.5	41.0	41.5
$d_{pad}$ [mm]	0.104	0.274	0.116	0.290	3.027	8.132
$d_{pad,max.}$ [mm]	0.030	0.058	0.025	0.048	0.274	0.746
$d_{lowerdie}$ [mm]	0.000	0.000	0.001	0.103	0.505	1.258
$d_{lowerdie,max.}$ [mm]	0.000	0.000	0.001	0.040	0.077	0.105

이 표현하였다.

$$\text{minimize } d_{material}, O_{Target} = d_{pad} + d_{lowerdie} + V_{flash} + F_{rec.} \quad (2)$$

$$\text{subject to } 38.75mm \leq d_{mat} \leq 50.5mm$$

$$d_{pad,max.} \leq 0.5mm$$

$$d_{lowerdie,max.} \leq 0.5mm$$

$$V_{flash} \leq 0mm^3$$

$$F_{reac.} \leq 5000kN$$

이때 최적화 변수는  $d_{material}$  하나로 한정하였으며, 이는 패드 외경과 간섭을 피하기 위한 최솟값(38.75 mm)과 하형의 성형 한계를 초과하지 않는 최댓값(50.5 mm) 사이에서 설정되었다. 제한 조건은 다음과 같다. 형상 정밀도 측면에서 하형( $d_{lowerdie,max.}$ ) 및 패드( $d_{pad,max.}$ ) 접촉면의 윤곽 최대 편차는 산업 허용 공차 기준에 따라 0.5 mm를 초과하지 않도록 제한하였다.  $V_{flash}$  은 0 이하로 유지되어야 한다. 또한, 산업용 프레스 장비의 최대 허용 하중이 5000 kN라는 점을 반영하여,  $F_{reac.}$  은 이 값을 초과하지 않도록 하였다. 식 (2)의 각 항목은 조건 간 상대 비교를 위해 식 (3)과 같이 정규화를 진행하였다.

$$x' = \frac{\sqrt{x - x_{min}}}{\sqrt{x_{max} - x_{min}}} \quad (3)$$

여기서  $x$  는 각 조건에서의 지표 값이며,  $x_{min}$  및  $x_{max}$  는 해당 지표의 전체 조건 내 최소 및 최댓값이다. 일반적으로는 각 지표별 상대적 중요도를 반영하기 위해 가중치(weighting factor)를 직접 부여하는 방식이 사용될 수 있다. 가중치 방식은 사전에 각 지표의 중요도를 정의해야 하지만, 본 연구의 경우 지표별 상대적 중요도를 명확히 판단하기 어렵고, 단순 가중치만으로는 충분한 영향력 균형 조정이 어려운 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 가중치를 명시적으로 부여하는 대신, 변수 간 변화폭 차이가 큰 상황에서 상대적인 범위를 맞추었다. 식 (2)의 목적함수에서는  $d_{pad}$ 와  $F_{reac.}$  은 값의 변화폭이 크고,  $d_{lowerdie}$ 와  $V_{flash}$  는 상대적으로 작은 폭으로 변화한다. 이러한 불균형은 특정 지표가 목적함수에 과도하게 영향을 미치는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구는 최소·최댓값 정규화로 각 변수의 값이 0에서 1 사이 범위로 표준화되도록 맞추었으며, 이후 제곱근(root-scaling) 기반 스케일링을 통해 변화폭이 큰 지표의 영향력을 완화하고, 모든 지표가 균형 있게 목적함수에 기여할 수 있도록 설정하였다.

앞서 정의한 정규화된 목적함수를 바탕으로 블랭크 내경에 따른 종합 품질 평가를 수행하면,  $d_{material}$  이 40.5 mm일 때 목적함수 값이 최솟값을 갖는 것으로 나타났다. 보다 명확한 경향성을 파악하고 최적 조건을 연속적으로 추정하기 위해 Fig. 14와 같이 4차 다항함수(polynomial)로 피팅을 수행하였다. 피팅된 식은 (4)와 같으며, 각 항의 계수는 Table 4에 기재하였다.

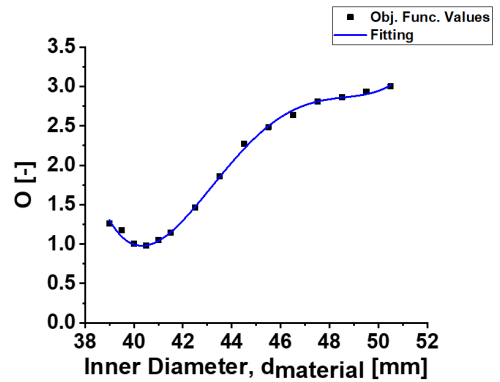


Fig. 14 Fitted Objective function with respect to material inner diameter

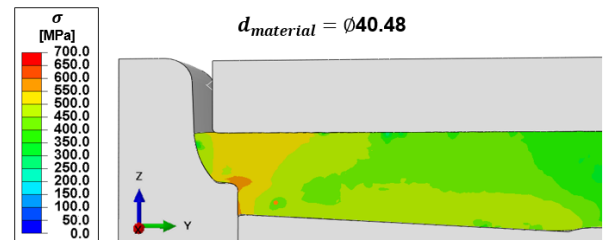


Fig. 15 FEA result at optimized condition

$$O = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 \quad (4)$$

피팅 결과는  $R^2$ 값이 0.99916로 매우 높은 상관성을 보였다. 도출된 4차 다항함수의 최솟값을 계산함으로써 최적의 블랭크 내경(40.48 mm)을 확보하였다. 해당 내경 조건에서 유한요소해석을 수행한 결과, Fig. 15와 같이 하형의 총 윤곽 편차 및 최대 편차는 0.0905 mm와 0.0362 mm로 나타나 목표 윤곽 내에 들어오는 것을 확인하였다. 패드 윤곽 편차 같은 경우, 총 편차는 0.2348 mm 그리고 최대 편차는 0.0470mm로, 목표 윤곽 공차 내에 들어오는 것을 확인하였다.  $V_{flash}$  는 -0.0009 mm<sup>3</sup>로 플래시가 제거됨을 확인하였다.  $F_{reac.}$  는 초기 치수(39.5 mm)와 비교했을 때 551.279 kN에서 약 371.536 kN으로 32.6% 감소하여 공정 부하가 개선되었음을 보여주었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 SPHC 소재를 활용한 허스 커플링 기어 반자유단 조 공정의 품질 향상을 목표로, 블랭크 내경을 공정 변수로 설정하여 유한요소해석 기반 최적화 연구를 수행하였다.

윤곽도 편차,  $V_{flash}$  그리고  $F_{reac.}$  을 품질 지표로 정의하고, 최소·최댓값 기반 정규화 및 제곱근 기반 스케일링을 적용한 종합 목적함수를 수립하여 블랭크 내경 변화에 따른 성형 품질을 정량적으로 평가하였다. 해석 결과, 블랭크 내경 40.48 mm 조건에서

**Table 4 Coefficients of the 4<sup>th</sup> order polynomial fitting curve**

Parameters	Values
<i>A</i>	4618.958 ± 339.581
<i>B</i> [mm <sup>-1</sup> ]	-407.256 ± 30.732
<i>C</i> [mm <sup>-2</sup> ]	13.410 ± 1.04072
<i>D</i> [mm <sup>-3</sup> ]	-0.195 ± 0.016
<i>E</i> [mm <sup>-4</sup> ]	0.001 ± 8.780·10 <sup>-5</sup>

가장 우수한 성형 품질이 도출되었다. 이 조건에서 플래시가 실질적으로 제거되고, 성형 하중은 기존 조건 대비 약 32.6% 감소하였다. 하형 윤곽 편차는 초기 치수 대비 총 편차가 0.0905 mm만큼 증가하였으나, 최대 편차는 0.039 mm로 산업적 허용공차 내에서 수용 가능한 수준으로 평가되었다.

이러한 결과는 금형 형상 변경 없이 블랭크 크기만으로도 성형 품질과 공정성을 동시에 개선할 수 있음을 보여주며, 공정 설계 초기 단계에서의 블랭크 크기 최적화가 매우 효과적인 전략임을 시사한다. 향후 본 연구는 금형 형상, 다단계 공정 변수 등 복합 인자를 고려한 통합 최적화로 확장될 수 있으며, 이를 통해 비선형 변형이 지배적인 단조 공정의 해석-설계 연계 최적화 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

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

## References

- [1] Liu, X., Yuan, Q., Liu, Y., Gao, J., 2014, Analysis of the Stiffness of Hirth Couplings in Rod-Fastened Rotors Based on Experimental Modal Parameter Identification, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 7A:Structures and Dynamics V07AT31A027, <https://doi.org/10.1115/GT2014-26448>.
- [2] Crococo, D., De Agostinis, M., Fini, S., Olmi, G., Robusto, F., Vincenzi, N., 2018, On Hirth Ring Couplings: Design Principles Including the Effect of Friction, Actuators, 7:4 79, <https://doi.org/10.3390/act7040079>.
- [3] Kanani, J. B., Lalwani, D. I., 2021, An Experimental and FEA Investigation of Near-Net-Shape Cold Forging of Spur Gear, Materials Today: Proceedings, 44:1 92-98, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.422>.
- [4] Efstathiou, C., Tsormpatzoglou, I., Tapoglou, N., 2023, Parametric Modeling of Curvic Couplings and Analysis of the Effect of Coupling Geometry on Contact Stresses in High-Speed Rotation Applications, Machines, 11:8 822, <https://doi.org/10.3390/machines11080822>.
- [5] Banaszek, G., Bajor, T., Kawalek, A., Garstka, T., 2020, Analysis of the Open Die Forging Process of the AZ91 Magnesium Alloy, Materials. 13:17 3873, <https://doi.org/10.3390/ma13173873>.
- [6] Mori, K., Nakano, T., 2016, State-of-the-art of Plate Forging in Japan, Prod. Eng. Res. Devel., 10 81-91, <https://doi.org/10.1007/s11740-015-0648-1>.
- [7] Abruzzo, M., Macoretta, G., Romoli, L., Veracini, M., 2024, Technological and Contact Analysis of Hirth Joints Including Manufacturing Tolerances, Precis. Eng., 86 66-74, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.11.011>.
- [8] Jolgač, M., Sulaiman, S. B., Ariffin, M. K. A., Faieza, A. A., Baharudin, B. T. H. T., 2010, FE Analysis and Optimization of Plate Forming Process, Proceedings of the 3rd Engineering Conf. on Advancement in Mechanical and Manufacturing for Sustainable Environment, 14-16, <<https://www.researchgate.net/publication/270904823>>.
- [9] Rajendran, N., Yurgel, C. C., Misiolek, W. Z., Sousa, R. A., 2023, Hot Forging Die Design Optimization Using FEM Analysis for Near-Net Forming of 18CrNiMo7-6 Steel Pinion Shaft, Metals, 13:4 815, <https://doi.org/10.3390/met13040815>.
- [10] Zhabankov, I. G., Perig, A. V., Aliieva L. I., 2016, New Schemes of Forging Plates, Shafts, and Discs, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 82 287-301, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7377-7>.

	<p><b>Yoonseong Kim</b> Student Researcher in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Metal Forming. E-mail: chris096@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Yujin Chae</b> Researcher (M. S.) in Korea Institute of Industrial Technology. Her research interests are Material Testing &amp; Modeling. E-mail: cyj253@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Seongsik Lim</b> Principal Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Metal Forming. E-mail: sslim@kitech.re.kr</p>
	<p><b>Jinsoo Park</b> Ph. D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Metal Forming. E-mail: pjs0000822@naver.com</p>
	<p><b>Minki Kim</b> Senior Researcher (Ph. D.) in Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are Plasticity, Material Testing &amp; Modeling, Experimental Mechanics. E-mail: mkim@kitech.re.kr</p>