

M10 육각 머리 볼트 다단 금형 설계 및 단조 성형해석 자동화 프로그램 개발

오민성¹ · 이사람² · 최정묵³ · 홍석무^{4,*}

Development of M10 Hex Head Bolt Multi-stage Die Design and Forging Analysis Automation Program

M. Oh, S. Yi, J.M. Choi, and S. Hong

(Received August 21, 2024 / Revised September 9, 2024 / Accepted September 9, 2024)

Abstract

Many studies have focused on the optimal design of multi-stage forging molds. For optimal design progress, geometry parameters must be automatically modified, and the updated analysis file delivered. However, existing automation processes set and change parameters at the analysis input file stage, limiting them to simpler tasks like 2D shapes and basic process conditions (e.g., friction, elasticity), making it challenging to handle 3D asymmetric shapes. To address these limitations, an automated program was developed that modifies geometry directly in the CAD model, enabling the automation of complex 3D and asymmetrical shapes. In this process, a 3D mold is generated immediately after the drawing is input, automating the design of both the product and the mold without manual intervention. The program's effectiveness was demonstrated in the design and forging analysis of a multi-stage mold for M10 hex head bolts. This fully automated program reduced preprocessing time by approximately 6.7 times and successfully performed sensitivity analysis without manual input.

Keywords : Automation, Cold forging, Finite element analysis, Multi-stage die design, Non-axisymmetric shapes

1. 서 론

자동차는 2만 가지 이상의 부품으로 구성되어 있으며, 이를 고정하기 위한 다양한 볼트가 개발되고 있다[1, 2]. 그러나 실제 금형 제작을 통한 볼트의 개발 방식은 상당한 시간과 비용 손실을 유발하기 때문에 최근 단조 성형해석 시뮬레이션을 기반인 최적설계 방식이 주목받고 있다[3-6]. 하지만, 최적설계를 수행하는 데 필요한 전처리 과정에 많은 작업 시간이 소요되기 때문에 설계 및 해석 과정을 자동화하기 위한 프로세스의 도입과 이를 통한 효율적

인 업무 수행이 중요하다. 일반적으로 사용되는 기존의 자동화 프로세스는 외부 프로그램으로부터 모델링을 전달받아 해석 프로그램에서 해석 조건과 설계변수를 함께 설정하는 방식이다. 이때 마찰계수, 탄성계수와 같은 단순한 공정 조건과 2차원 형상에 대해서는 두께, 축 대칭 설정과 같은 일부 형상 제어는 가능한 반면[7, 8], 3차원 형상에 대한 설계변수에 대한 설정이 어려운 단점이 있다[9]. 선행 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 다양한 방법으로 자동화 프로세스를 구축하였다. An 등[10]은 복잡 격자 구조체에 대한 설계 및 해석을 자동화하는 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 모델링 시간이 기존방식보다 약 90% 이상 감소함을 보여주었다.

그러나, 해당 자동화 프로세스는 모델링과 해석이 가능한 상용 소프트웨어가 요구되어 호환성이 떨어지는 한계가 있다. Youn 등[11]은 힌지 설계

1. 공주대학교 미래융합공학과, 석박사통합과정

2. 공주대학교 미래융합공학과, 박사과정

3. (주) 진합, 상무이사

4. 공주대학교 미래자동차공학과·그린카기술연구소, 교수

*Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering,
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr,
ORCID: 0000-0001-5569-6285

메커니즘과 요구사항을 수식으로 정리하고, 캐드와 해석 소프트웨어를 연동하였다. 그 결과 317개의 모델 제작 및 해석을 8시간 30분 만에 완료할 수 있음을 보여주었다. Park 등[12]은 캐드와 해석 소프트웨어 간의 파일 파싱(file parsing) 기법을 이용하여 자동화를 구성하였다. 그 결과 전처리 시간이 해석당 22초로 단축되었다. 그러나 제안된 연동 방식은 서로 다른 프로그램 간의 연동을 위해 상용 소프트웨어와 전문 인력이 필요하다는 측면에서 일반적으로 사용하는데 한계가 있다. Lee 등[13]은 차량 배기 부품인 벨로우즈의 초기 설계 단계에서 설계를 분석하고, 벨로우즈 모델링 스크립트를 제작하였다. 이를 기반으로 7개의 설계 인자에 대한 수식과 스크립트를 추가하여 설계 치수 변동에 효과적으로 대처하였다. 마지막으로 Kim 등[14]은 버터플라이 밸브의 API 설계 코드를 분석하고 파라메트릭 캐드 프로그램을 활용한 설계 자동화를 구현하였다. 그 결과 API 설계 코드의 설계변수들을 자동화 프로세스에 반영하였으며, 전처리 과정이 생략된 CAE 해석이 가능함을 보여주었다. 하지만 앞서 제안된 모든 자동화 프로세스는 벨로우즈, 버터플라이 밸브와 같은 단일 부품에 국한되어 개발되었으며, 다단 단조 금형과 같은 멀티 스테이지에 대한 대응책으로 적합하지 않다.

앞선 연구들은 모델링과 해석이 모두 가능한 상용 프로그램을 활용하거나, 프로그램 간 연동을 위해 추가적인 고급 도구를 활용하였다. 이러한 방식은 자동화 프로세스의 범용성 및 확장성 측면에서 다양한 제품 및 공정에 대한 적용 가능성을 제한할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 3차원의 형상 치수 변경이 가능한 M10 육각 헤드 볼트를 대상으로 다단 금형 설계 및 단조 성형 해석 자동화 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서 제시한 프로그램은 Fig. 1(b)과 같이, 파라메트릭 캐드 프로그램과 파이썬 스크립트를 활용하여 구현되었다. 이때, Fig. 1(a)의 기존 방식과 다르게 볼트 도면을 캐드 프로그램에 직접 입력하면 형상 변경 파라미터와 입력된 파라미터를 기반으로 점, 선, 면을 생성하는 컴포넌트를 기반으로 형상이 자동으로 생성된다. 또한, 도면 입력과 동시에 3차원 금형의 형상 정보도 자동으로 생성되어, 제품과 금형에 대한 자동화 설계가 가능하다.

그리고 무개입 설계와 다양한 캐드 및 해석 프로

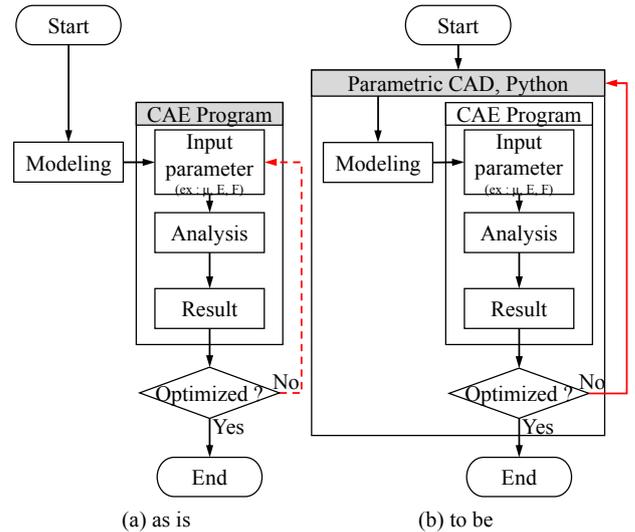


Fig. 1 Differences of optimal design automation: (a) as is; (b) to be

그램 간 연동이 가능하도록 범용성이 확보된 프로그램을 개발함에 따라, 그 실효성을 검증하기 위해 M10 육각 머리 볼트 다단 금형 설계 및 단조 성형 해석을 진행하였다. 또한, 비숙련자를 대상으로 자동 및 수동의 전처리 과정에서 각각 작업 시간 비교를 통해 개발된 자동화 프로그램의 유효성을 입증하였다.

2. 금형 설계 및 해석 자동화 프로세스

2.1 M10 육각 머리 볼트 도면 생성

금형 개발에 앞서 M10 육각 머리 볼트에 대한 기준 설계 형상을 지정해야 한다. 육각 볼트는 표준번호 KBB 1002로 관리되며[15], 나사의 호칭, 피치, 치수, 머리부의 편심, 자리 면의 기울기 그리고 측면의 기울기 등이 규격으로 명시되어 있다. 기초 형상이 확정된 후에는 다단 단조 제품 형상을 설계해야 한다. 이 과정에서 단조 성형 중 금형 파손을 방지하기 위해 금형에 작용하는 성형 하중, 응력, 변형률을 예측하여 적절한 금형 다단 설계를 진행해야 한다. 따라서 본 논문에서는 실제 현장에서 생산하고 있는 다단포머를 사용한 볼트 성형 공정을 모사하여 5단계의 단조 공정으로 기초 형상 도면을 작성하였다(Fig. 2(a)).

그러나 원본 제품 도면을 3차원 캐드 프로그램에 그대로 불러 들어올 경우, 형상 설계 알고리즘이 제

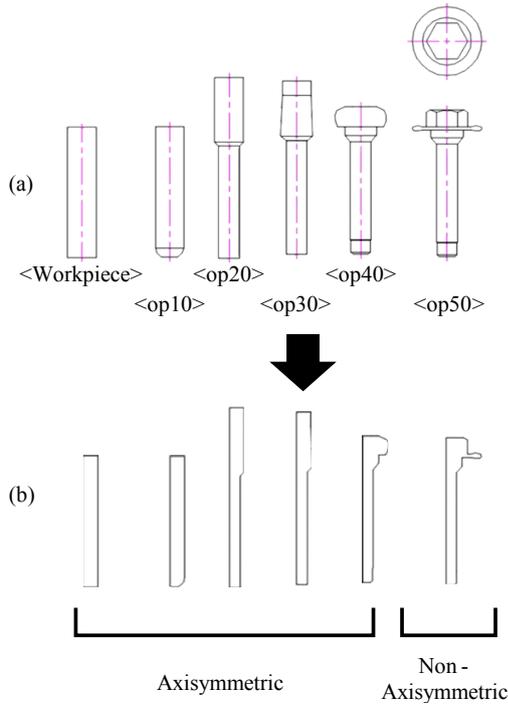


Fig. 2 Cross section of a multi-stage six head bolt: (a) original; (b) modified for program input

대로 적용되지 않을 수 있다. 따라서 실제 제품 형상의 설계적 특징을 추출하고, 이를 캐드 프로그램에 적용하기 위해 볼트 형상을 단순화하였다(Fig. 2(b)).

2.2 볼트 및 금형 형상 모델링 자동화

본 연구에서는 자동화 설계의 대상이 되는 볼트와 금형을 모델링 하기 위해서 파라메트릭 설계 방식을 도입하였다. 이때, 상용 캐드 프로그램으로 불러들인 제품 도면으로부터 추출된 설계 정보(점과 선의 위치, 길이)를 분석하고, 모델링할 수 있도록 파라메트릭 캐드 소프트웨어와 오픈소스 기반의 파이썬 스크립트를 활용하였다[16-18]. 먼저 dwg 파일 형식의 2D 도면을 불러들이는 파싱(Parsing) 컴포넌트를 제작하고, 이를 통해 제품 도면을 불러왔다. 불러온 도면은 파라메트릭 컴포넌트를 통해 각 성형 단계에 맞는 제품으로 제작되었으며, 단조 성형 환경에 맞는 gap, 다이(die) R 등에 대한 파라미터도 함께 적용하였다. 동시에, 제품 형상 도면과 설정된 설계번호에 따라 3차원 금형에 대한 STL 파일을 생성하도록 컴포넌트를 구현하였다. 마지막으로 제작된 모델링을 즉시 저장할 수 있도록 추출 컴포넌트

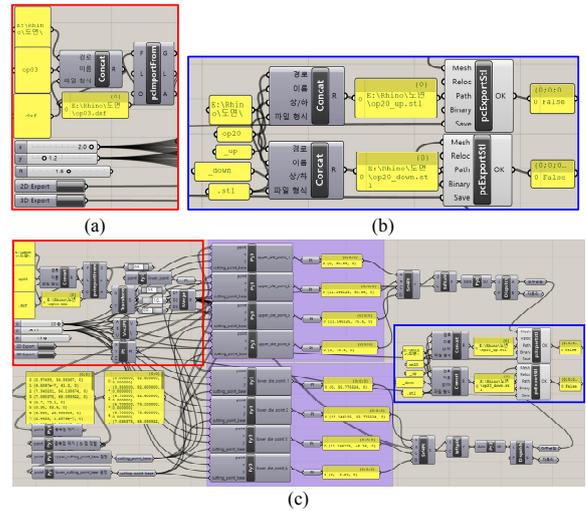


Fig. 3 Modeling automation applied to parametric CAD program: (a) 2D drawing input and parameterization; (b) 3D model export; (c) 3D model created on parametric CAD from a 2D drawing

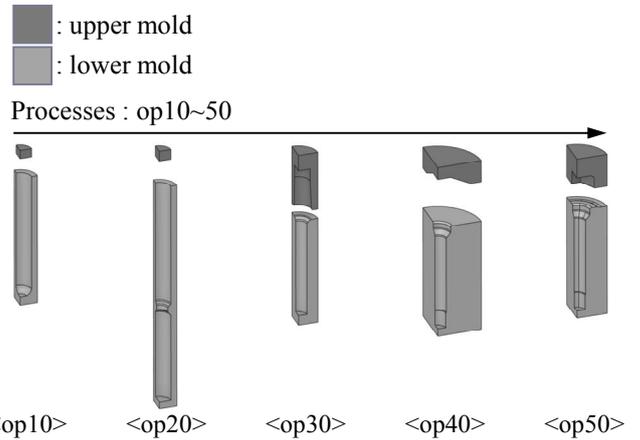


Fig. 4 Forging process and die design for hexagon head bolt

를 구성하였다. 이 과정은 모든 공정에 동일하게 적용되었으며, 해당을 통해 배열된 컴포넌트 구성은 Fig. 3에 자세히 도시하였다.

이를 통해 제작된 육각 머리 볼트는 3차원 비대칭 머리 형상이 60° 를 기준으로 형상이 반복되며, 이 형상은 면대칭, 30° 기준으로 나눌 수 있다. 따라서 제품 형상은 30° 기준으로 제작되었으며, 금형 또한 30° 로 제작하였다. 이 과정을 통해 생성된 3차원 단조 금형의 최종 형상은 Fig. 4과 같다.

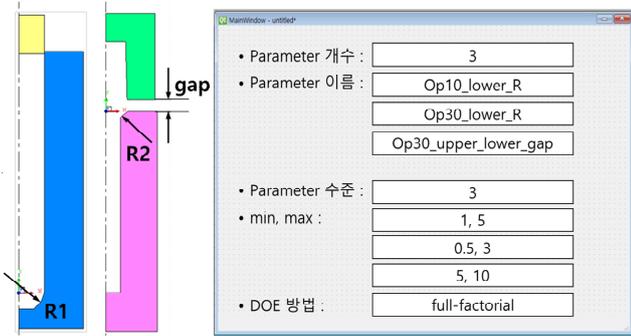
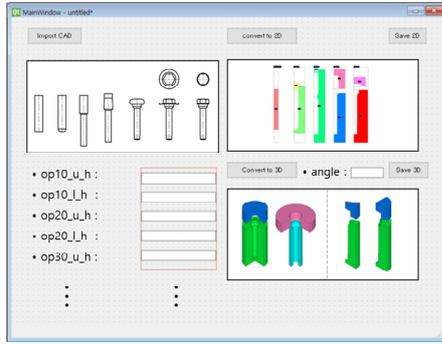


Fig. 5 GUI for design automation integration

2.3 자동화 프로그램 GUI 개발

본 연구에서 제안된 다단 금형 설계 자동화를 용이하게 수행할 수 있도록 Fig. 5와 같이, GUI(Graphic User Interface)를 개발하였다. 이 GUI는 모델링 자동화 단계에서 설정된 gap, 다이 R 파라미터를 동일하게 설정할 수 있도록 파이썬 스크립트와 연동하고, 파라미터의 범위, 수준 그리고 실험 계획법(DOE) 설정에 따른 설계 사례를 생성할 수 있는 기능을 구현하였다. 이를 통해 설계변수에 따라 제품과 금형 모델링을 3차원 캐드 파일로 자동 추출할 수 있다.

2.4 M10 육각 머리 볼트 해석 자동화

단조 공정은 설정된 설계변수의 범위에 따라 제품의 가공 형상에 영향을 받아 결속(under-fill) 혹은 프래시(flash)와 같은 결함이 발생 할 수 있다[7]. 따라서 해석 자동화를 수행하기 위해 설계 전반에서 결함이 발생하지 않는 안정적인 해석 결과를 확인 가능한 설계 범위를 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 단조 성형을 위해 단조 전용 해석 소프트웨어인 AFDEX를 사용하였다[19]. 금형 설계 자동화로 생성된 금형 모델링과 함께 공정 조건을 소프트웨

Table 1 Material properties

Workpiece Material	SWCH45F
Density [kg/m ³]	7,850
Young's modulus [GPa]	214.0
Poisson's ratio [-]	0.3
Coefficient of thermal Expansion [1/°C]	12 × 10 ⁻⁶

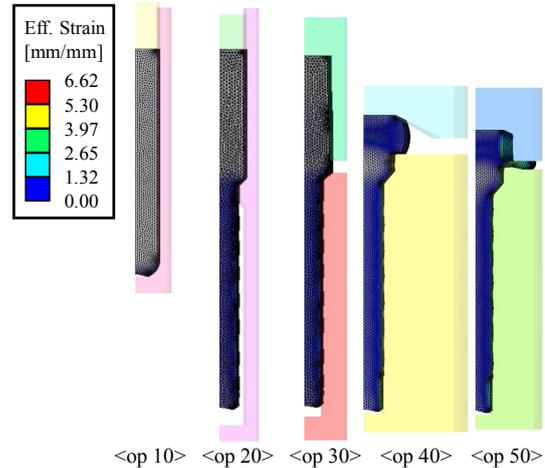


Fig. 6 Effective strain of multistage forging analysis

어에 입력하였다. 냉간 단조 성형 시 볼트에 적용된 물성은 SWCH45F로, 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 사용한 요소의 개수는 1공정에서 20,000개로 시작하여, 각 다음 공정마다 4,000개씩 추가하였다. 볼트 성형의 모든 과정은 총 5단계의 공정으로 구성되어 있으며, 경계조건, 마찰계수, 성형 속도 등을 추가로 설정한 후 행식을 진행하였다.

그 결과, Fig. 6과 7은 M10 육각 머리 볼트 성형에 따른 유효 변형률 결과와 성형 하중을 보여준다. 여기서, Fig. 7의 노란 선은 상부 금형에 가해지는 성형 하중, 빨간 선은 하부 금형에 가해지는 성형 하중을 의미한다. 최대 하중은 공정 진행에 따라 1 공정에서는 42.1 ton, 2 공정에서는 170.8 ton, 3 공정에서는 26.7 ton, 4 공정에서는 78.8 ton, 마지막 5 공정에서는 161.5 ton으로 총 479.9 ton의 성형 하중이 예측되었다. 이후 금형 제작 및 해석 구현의 전처리 과정 작업 시간을 비교하기 위해 비숙련자를 대상으로 수동과 자동 각각의 작업을 진행하였다. 해석 시간을 포함하여 1 공정 수행까지 수동 시스템은 약 10분이 소요된 반면, 자동 시스템은 1분 30초가 소요되었다.

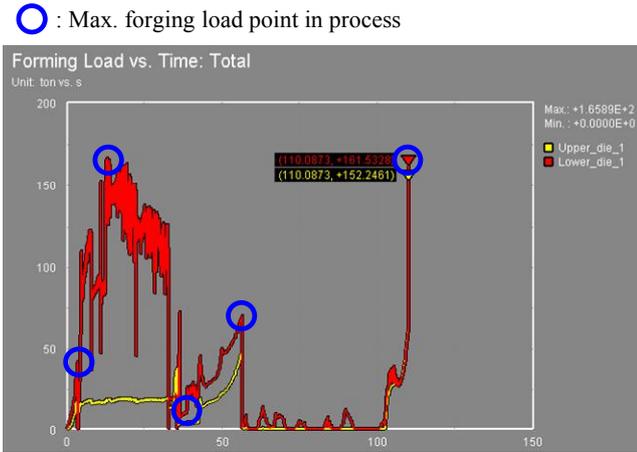


Fig. 7 Forming load as forging analysis

자동화 시스템을 활용할 경우 비숙련자의 수동시스템보다 약 6.7배 빠르게 작업을 완료할 수 있었다. 또한 공정이 5단계로 확장될 경우, 소요 시간 차이는 8분 30초에서 42분 30초로 더욱 증가하였다. 이러한 실험 결과를 통해 단조 금형 캐드 제작으로부터 해석 구현까지의 전처리 과정을 크게 단축할 수 있음을 확인하였다.

3. 자동화 프로그램 적용

3.1 무개입 민감도 분석 적용

볼트 냉간 단조 공정은 성형 정밀도가 높아 후가공 절차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 금형에 가해지는 높은 성형 하중으로 인해 금형 마멸 및 파손의 위험이 있으며, 이는 성형 제품의 품질 저하로 이어질 수 있다. 선행 연구에서는 이러한 품질 저하 문제를 해결하기 위해 최적설계가 적용된 금형을 사용하였으며[3-6], 본 논문에서는 자동화 프로그램의 유효성을 검증하기 위해 추가로 금형 최적설계의 기초가 되는 민감도 분석을 진행한다.

민감도 분석(sensitivity analysis)이란 설정된 각 설계변수가 변경됨에 따라 목적 함수에 끼치는 영향을 확인하는 방법이다[20]. 이를 통해 설계변수의 영향도를 수치화할 수 있으며, 이는 각 변수의 값이 클수록 목적 함수에 끼치는 영향이 커진다는 것을 의미한다. 민감도 분석 결과의 정확도는 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 통해 평가한다. 결정계수의 경우 식 (1)과 같이 표현한다. 여기서 R^2 은 결정계수, y_i 는 관측값, \bar{y} 는 관측값의 평균, \hat{y}_i 는

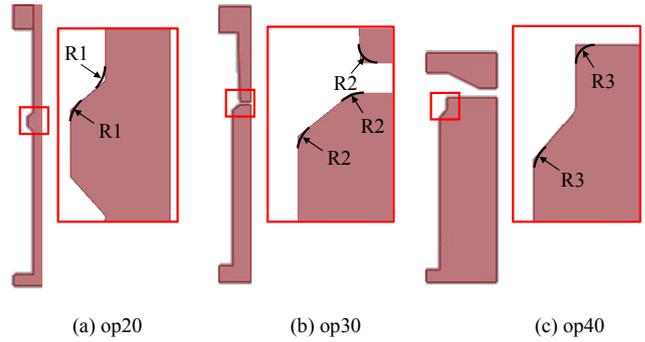


Fig. 8 Design variables for op20, op30 and op40

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

회귀 추정값이며, 결정계수가 1에 가까울수록 예측함수의 유효성이 높음을 의미한다.

민감도 분석을 진행하는 설계변수는 냉간 단조 성형 해석을 바탕으로 선정되었다. 성형해석 결과 성형 하중은 하부 금형에 상대적으로 높은 하중이 가해지고 있으며 2 공정에서부터 상대적으로 과도한 하중이 발생하였다. 일반적으로 단조 성형에서 소재와 맞는 펀치와 다이 R에서 가장 높은 하중이 발생하기 때문에 2 ~ 4 공정의 펀치 R, 다이 R 조정하였다. 따라서 2 공정의 다이 R(R1, X1), 3 공정의 다이 R(R2, X2) 그리고 4 공정에서의 다이 R(R3, X3)을 설계변수로 지정하였으며, 각각 0.5 mm부터 1.5 mm까지 3수준으로 설정하였다. 각각의 설계변수는 Fig. 8에 자세히 도시하였다. 본 논문에서 민감도 분석을 수행하는 목적은 자동화 프로그램의 유효성 검증에 있기 때문에, 연구의 신속한 결과 확인을 위해 각 공정의 펀치(punch)와 다이 R은 동일하다고 가정하고 설계변수의 수를 제한하였다. 이전에 수행한 냉간 단조 성형 해석을 바탕으로 각 공정에서의 최대 성형 하중(maximum ton, Y)의 합을 목적함수로 설정하였으며, 설계변수가 2 공정부터 적용되기 때문에 1 공정의 성형 하중 최대값은 목적함수에서 제외하였다. 설계변수의 범위는 목적함수에 대하여 일괄된 해석 결과를 보이는 설계변수의 범위로 지정하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 총 3요소 3수준, 27번의 해석을 진행하여 단조 공정 해석 진행 과정에서 각 공정에서 발생하는 최대 하중의 총합에 대한 민감도를 분석하였다.

Table 2 Objective function and design variable ranges

Design variables	$R1 = X1, R2 = X2, R3 = X3$
Object function	$Minimize Y = \max(F_{op20} + F_{op30} + F_{op40})$
Constraint	$0.5 \leq X1 \leq 1.5$
	$0.5 \leq X2 \leq 1.5$
	$0.5 \leq X3 \leq 1.5$

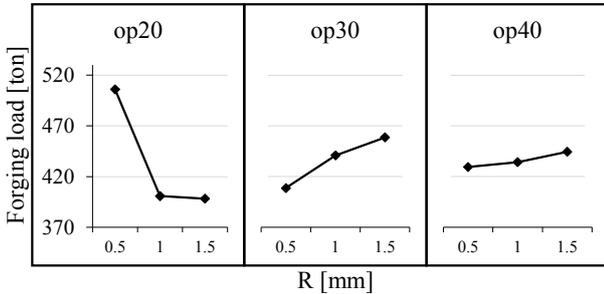


Fig. 9 Reliability analysis

Table 3 Forming load and sensitivity analysis results

Level	op20	op30	op40
1 [ton]	506.18	408.07	428.59
2 [ton]	400.76	439.78	433.23
3 [ton]	398.19	457.28	443.31
Delta [ton]	107.99	49.21	14.72
Share [%]	62.8	28.6	8.6
Rank [-]	1	2	3

3.2 민감도 분석 결과

상하부 금형의 다이 R 부분에 설계변수 파라미터를 부여하여 성형 하중에 미치는 민감도를 분석하였다. 민감도 분석 결과는 Fig. 9와 같으며, 이를 표로 정리한 것은 Table 3과 같다. 분석 결과, 2 공정이 62.8 %로 가장 높은 민감도를 보였으며, 그 다음으로 3 공정과 4 공정이 높은 민감도를 나타내었다. 본 연구의 자동화 프로그램을 이용해 획득한 결정계수는 $R^2 = 0.98$ 로, 예측 함수가 유효하며 높은 신뢰도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 파라메트릭 캐드 프로그램, 파이썬 스크립트를 활용하여 다단 금형 설계 및 해석 자동

화 프로그램을 개발하였다. 또한, 무개입 민감도 분석을 통해 자동화 프로그램의 유효성을 검증하였다. 이렇게 수행된 본 연구의 내용과 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3차원 캐드 프로그램, 파라메트릭 모델링 기능 그리고 파이썬 스크립트를 활용한 모델링 자동화를 구현하여, 3차원 다단 단조 금형의 모델링 전처리 과정을 대폭 단축하였다.

(2) 프로그램의 접근성을 높이기 위하여 파이썬 스크립트를 활용하여 GUI를 제작하였으며, 이를 통해 모델링 자동화와 설계변수 설정 기능을 연동하였다. 이를 통해 설계 자동화 기능을 구현하여 설계 사례 제작에 대한 시간을 절약할 수 있었다.

(3) 제작된 단조 금형 모델링을 활용하여 단조 성형 시뮬레이션을 수행하였으며, 추가로 GUI와 연동하여 금형 모델링의 전처리부터 단조 해석 과정까지의 소요되는 시간을 약 6.7배 단축할 수 있었다.

(4) 개발된 프로그램의 유효성 검증을 위하여 성형하중 감소를 목적으로 민감도 분석을 진행하였으며, 그 결과 결정계수 R^2 가 0.98로 나타나 다단 금형 설계 및 단조 성형 해석 자동화 프로그램이 신뢰성 있는 결과를 도출함을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 자동화 프로그램을 통해 무개입 설계, 해석 및 민감도 분석을 통해 3차원 비대칭 금형에 대하여 설계 자동화 및 민감도 분석을 진행하였다. 이 연구는 AI와 디지털 트윈을 활용한 최적화 및 실제 공정 적용을 목표로 하는 기초 연구의 일환이며, 후속 연구를 통해 공정변수나 설계변수를 더욱 세분화하고 이를 조정하는 무개입 최적설계를 진행하고자 한다.

후 기

이 연구는 중소벤처기업부의 스마트 제조혁신 기술개발사업(R&D)(RS-2024-00446241)과 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술정보통신부의 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004)의 지원에 의한 연구임.

REFERENCES

[1] K. Lee, G. Kim, Y. Ahn, 2018, Study on the Optimum Design of the Insert Ring and Shrunk Ring of the

- Cold Forging Die for an Automotive Wheel Nut, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 3, pp. 165-170.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.3.165>
- [2] Y. Kim, H. Kim, S. Hwang, Y. Kim, 2016, A Study on Development of Pre-heat Treated Steel Head Bolt for Swashplate Type Compressor of Car Air-conditioner, *Trans. Kor. Soc. Automot. Eng.*, Vol. 24, No. 5, pp. 588-595.
<https://doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.5.588>
- [3] J. Hwang, S. Lee, 2022, A study on the cold forging die geometry optimal design for forging load reduction, *J. Kor. Cryst. Growth Cryst. Technol.*, Vol. 32, No. 6, pp. 251-261.
<https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2022.32.6.251>
- [4] H. Yeo, K. Park, K. Hur, 2006, Evaluation of the Forging Process by the Application of Optimization Technology, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 15, No. 3, pp. 226-231.
<https://doi.org/10.5228/KSPP.2006.15.3.226>
- [5] H. You, 2012, A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Element Simulation and the Taguchi Method, *J. Kor. Acad.-Ind. Coop. Soc.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1990-1995.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.1990>
- [6] K. Kim, G. Lee, H. Cho, 2016, A forging die design to improve the flower shape of flange bolt, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, Vol. 40, No. 4, pp. 314-319.
<http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2016.40.4.314>
- [7] U. Jung, J. Lee, G. Park, 2011, A Preliminary Study on the Optimal Shape Design of the Axisymmetric Forging Component Using Equivalent Static Loads, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-10.
<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.1.001>
- [8] S. Park, W. Dong, K. Lee, 2018, Design of a thread rolling process for manufacturing Al6061-T6 alloy bolt using FE analysis and the Taguchi method, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, Vol. 42, No. 6, pp. 443-450.
<http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.6.443>
- [9] G. Kim, 2017, Development of A Software Tool for Automatic Trim Steel Design of Press Die Using CATIA API, *J. Kor. Acad.-Ind. Coop. Soc.*, Vol. 18, No. 3, pp. 72-77.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.72>
- [10] H. An, M. Jung, N. Kim, E. Lee, K. Shin, 2022, Study on the Automated Size Optimization and Structural Analysis Program for Composite Lattice Structures, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 46, No. 1, pp. 77-83.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.1.077>
- [11] S. Youn, Y. Noh, S. Kim, J. Kim, 2014, Optimization of Door Hinges of a Large Refrigerator, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 1, pp. 71-78.
<http://doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.1.071>
- [12] C. Park, J. Lee, D. Choi, 2011, Design Optimization of Cleaning Blade for Minimizing Stress, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 5, pp. 575-582.
<http://doi.org/10.3795/KSME-A.2011.35.5.575>
- [13] S. Lee, C. Yang, 2014, Automated Modeling and Structure Analysis of Bellows, *Trans. Kor. Soc. Automot. Eng.*, Vol. 22, No. 7, pp. 152-157.
<http://doi.org/10.7467/KSAE.2014.22.7.152>
- [14] T. Kim, K. Lee, H. Kim, S. Han, 2018, Development of the Design Process for a Butterfly Valve Based on an API Code, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 42, No. 1, pp. 85-90.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.1.085>
- [15] KB B 1002, 2021, Hexagon Head Bolt, *Kor. Agency Technol. Stand.*, Eumseong, Republic of Korea, pp. 1-56.
- [16] Rhinoceros, Robert McNeel Associates,
<http://www.rhino3d.co.kr/> (Accessed 10 AUG 2017).
- [17] Grasshopper, 2017, Algorithmic modeling for Rhino, Robert McNeel Associates,
<http://www.grasshopper3d.com/> (Accessed 10 AUG 2017).
- [18] Python Software Foundation, 2017, Python script,
<https://www.python.org/> (Accessed 10 AUG 2017).
- [19] AFDEX, <https://www.afdex.com>.
- [20] S. Hwang, M. Oh, O. Sul, M. Yoo, Y. Chung, S. Hong, 2023, Design of a Lightweight Model for the Battery Carrier of a Commercial Large Electric Truck Using the Response Surface Method, *J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 32, No. 5, pp. 283-288.
<https://doi.org/10.7735/ksmte.2023.32.5.283>