

A study on the cold heading process design optimization by taguchi method

Joon Hwang[†] and Jin-Hwan Won^{*}

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

^{*}Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Graduate School of Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received November 30, 2023)

(Revised December 18, 2023)

(Accepted December 18, 2023)

Abstract This paper describes the finite element analysis and die design change of cold heading punching process to increase the cold forging tool life and reduce the tool wear and stress concentration. Through this study, the optimization of punch tool design has been studied by an analysis of tool stress and wear distribution to improve the tool life. Plastic deformation analysis was carried out in order to understand the cold heading process between tool and workpiece stress distribution. Cold heading punch die design was set up to each process with different four types analysis progressing, the cold heading punch dies shapes with combination of point angle and punch edge corner radius shapes of cold forging dies, punch die material properties and frictional coefficient. The design parameters of point angle and corner radius of punch die geometry, die material properties and frictional coefficient were selected to apply optimization with the DoE (design of experiment) and Taguchi method. DoE and Taguchi method was performed to optimize the cold heading punch die design parameters optimization for bolt head cold forging process, it was possible to expect an reduce the cold heading punch die wear to the 37 % compared with current using cold heading punch in the shop floor.

Key words Cold heading process, Heading punch geometry optimal design, Finite element analysis, Design of Experiment, Taguchi method

다구찌법을 활용한 헤딩공정설계 최적화 연구

황준[†], 원진환^{*}

한국교통대학교 항공·기계설계학과, 충주, 27469

^{*}한국교통대학교 대학원 항공·기계설계학과, 충주, 27469

(2023년 11월 30일 접수)

(2023년 12월 18일 심사완료)

(2023년 12월 18일 심사완료)

요약 본 연구에서는 냉간 헤딩 공정에서 성형하중과 펀치 금형의 마모 감소를 통한 펀치 수명 증대를 위해 헤딩용 펀치 형상 최적설계를 수행하였다. 기존 생산에 사용되는 냉간 헤딩 펀치와 성형공정에 대한 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 성형하중과 유동 특성 분석, 펀치금형에 집중되는 유효응력 및 마모량에 대하여 분석하였으며, 이를 통해 금형 마모와 밀접한 주요 설계인자를 확인하였다. 펀치금형의 최적설계 변수로서는 펀치 금형 포인트각(Point angle), 에지 반경값(Corner radius), 펀치소재재종(die material type), 마찰계수(friction coefficient) 등의 4가지 변수를 대상으로 4인자 3수준 인자 및 변수 수준을 설정하고, 성형해석 시뮬레이션과 다구찌법을 활용하여 설계인자별 영향도를 분석하여 최적의 최적설계 인자를 결정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 최적설계변수를 적용하여 냉간 헤딩용 펀치 최적설계 시뮬레이션 결과, 각 펀치에 발생하는 최대유효응력은 최대 8.9% 감소 효과를, 최대 펀치 마모 깊이는 37% 감소 효과를, 성형하중은 평균 20% 수준의 감소효과를 얻을 수 있었다. 현재, 소성 성형제품군이 적용되는 자동차, 건설 플랜트사에서 요구되는 고품질에 대응하면서도 적정 제조원가 절감을 위한 성형성 개선을 위한 성형공정개발 및 금형설계의 최적화가 지속적으로 필요하며, 향후 연구 결과를 현업에 적용하여 제품 성형성 개선 및 금형수명 증대 관리를 위한 기술자료로 활용하고자 한다.

[†]Corresponding author
E-mail: jhwang@ut.ac.kr

1. 서 론

냉간단조 공정에 사용되는 냉간 헤딩용 펀치(cold heading punch)는 볼트 또는 스크류머리(bolt & screw head) 성형공정에 사용되는 주요 공구 금형(tool & die)으로서, 다양한 산업군에서 사용되는 금속제품성형에 널리 활용되고 있다. 펀치를 이용하여 볼트의 머리 부분을 성형할 때 발생하는 소재와 금형간의 높은 마찰력과 마모, 응력집중에 의해 냉간 헤딩용 펀치의 금형수명은 크게 좌우되게 되며, 이는 생산원가 및 최종 성형제품의 품질에도 큰 영향을 미치고 있어 최적화된 헤딩용 펀치의 형상 설계와 금형제작 최적화를 위해 관련 업계에서는 많은 노력을 해오고 있다. 냉간단조 성형공정에서 중요한 금형 수명 인자로 인식되는 금형 마모에 대한 문제를 해결하기 위해 금형과 소재의 접촉면의 윤활 상태, 금형 재질, 열처리, 금형 형상설계, 소재 재질 등 다양한 인자에 대한 특성 고려가 필요하다.

헤딩용 펀치의 파손 발생은 그 위치에 따라 Fig. 2A)와 같이 모서리 부 충격으로 부터 마모가 시작되어 십자 날개 내부를 타고 내려오면서 마모가 진행된다. 좌우 편차 없이 균일하게 마모가 진행된다면 정상 마모라 할 수 있지만 어느 한쪽 날개부에 마모가 먼저 진행된다면 금형의 동심도 및 설비 장착시 편심에 의해 발생할 수 있다. B)번 파손은 소재와 펀치 셋팅시 발생할 수 있는 상대물의 홀더, 피가공체의 어긋난 충돌로 인해 발생할 수 있

다. C)번의 파손은 피 가공체의 면 상태가 거칠 경우, 윤활 상태가 좋지 않을 때 나타나는 마모 양상이다. D) 번 파손의 경우는 펀치 자체의 내구성이 부족할 때 즉 열처리나 재질 불량으로 인해 발생할 수 있다.

냉간단조공정은 치수정밀도가 높아 후가공 등의 공정 절차를 줄일 수 있는 장점에도 불구하고, 높은 성형하중 발생으로 인해 금형마멸 및 파손의 위험성과 이로 인한 성형 제품 품질저하 문제에 대한 대책수립이 제품개발시에 매우 중요하다. 금형 마멸은 단조공정 중에 금형과 소재 사이의 격심한 마찰과 과도한 소성변형 성형하중으로 인해 발생하게 되며, 금형형상, 성형조건, 윤활상태 등에 영향을 받게 된다.

그간에 금형 마멸에 대한 연구는 Holm[1]에 의하여 두 재료의 접촉 시 마멸기구가 제품표면에서의 원자의 소멸 현상으로 정의한 것이 기초가 되었다. 그 후 Archard[2]는 두 접촉 물체 표면에 미세 돌기들의 붕괴를 마멸 현상이라고 제안하였다. Hansen과 Bay[3]는 금형 표면 거칠기가 커질수록 소재와의 미끄럼 길이가 감소하므로 금형의 마멸이 줄어들 거라고 Archard[4]의 마멸 모델을 이용하여 제시하였다. Kang[5] 등은 초기에 일어나는 마멸은 유한요소해석을 통하여 구하고, 성형온도, 성형시간, 금형의 경도 등을 입력 값으로 하여, 공정 시간이 증가할수록 금형의 경도 저하로 인해 마멸량이 증가할 거라고 제시하였다. Lee[6]는 냉간단조의 성형 공정에서 금형의 마멸의 체적을 감소시킬 수 있는 예비 성형 설계



(a) Cold heading punches



(b) Precision bolt & screw

Fig. 1. Cold heading punch and precision bolt & screw [1].

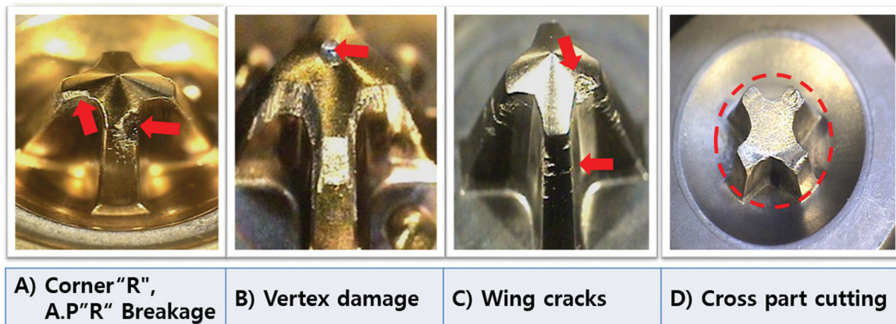


Fig. 2. The critical defects of cold heading punch [1].

방법을 제시하였고, Lee[7]는 냉간 단조용 금형 수명 및 단조품의 품질 향상을 위한 열처리 법과 설계 방법을 제시하였다. Kim[8] 등은 냉간성형시 소재의 변형량을 해석하고 금형의 마모량을 해석할 수 있는 기법을 제시하였으며 Hwang[9] 등은 냉간 단조에서 금형 재료의 특성을 파악하여 재질 선택의 중요성 및 방향성을 제시하였다. 3차원 소재의 압축 공정에 대해서 Chenot[10] 등은 금형의 마모에 대한 연구를 수행하였는데, 마모량을 금형의 수직 방향 응력과 금형 소재의 접선 방향의 상대속도 성분의 곱을 시간에 대해 누적하여 외연적인 기법으로 구하였다. Kang[11] 등은 금형의 상대 이동거리는 성형 사이클에 일정하게 반복되게 되지만 금형의 경도는 금형 온도와 작업시간에 따라 연화 과정을 거치게 됨을 고찰하였다. 금형마멸은 두 물체가 접촉한 상태에서 상대운동을 일으킬 때, 두 물체 사이의 접촉면에서 발생하는 것으로 단조 공정 중에는 금형과 소재 사이에서 이동력에 의해 발생하게 된다.

본 연구에서는 냉간단조 제품의 성형에 있어서 헤딩용 펀치의 금형 응력 최소화화를 통한 금형마모 감소와 금형 수명증대를 위해 T사에서 생산 중인 기존 제품에 대한 볼트 성형공정 유한요소해석 시뮬레이션(finite element analysis)을 통해 소재의 금속 유동 특성과 성형하중, 금형 응력 등을 분석한 후, 실험계획법(Design of Experiment)과 다구찌법(Taguchi method)을 적용하여 냉간 헤딩용 펀치 금형 형상의 설계변경과 성형해석을 통해 설계인자와 성형하중과의 상관성 및 설계인자별 기여율 파악을 통해 최적의 설계인자 조합을 도출하고, 이를 활용하여 금형형상 설계 최적화를 실시하였다.

2. 금형 구조해석 문제의 수식화 모델

냉간 단조 금형은 파단, 변형, 마모, 기계적 및 열적 피로, 표면 응착 등에 의해 금형 파손에 영향을 받는다. 제품의 성형 과정에서 제품이 소성 변형될 때 소재는 금형 프로파일을 소재가 유동하게 되며, 이로 인해 소재와 금형 사이에는 높은 국부 마찰력이 작용하게 된다. 상부 금형은 압축 응력을 받고 하부 금형은 인장응력을 받으며 소재는 압축과 인장 응력을 복합적으로 받는다. 제품이 성형될 때 금형의 표면상에는 주름과 같은 요철이 발생되고 이로 인해 마모가 생기기 시작된다. 이때 금형과 소재 사이에 원활한 유동을 위해 윤활유는 금속 간의 접촉을 경감시킨다.

유한요소법을 이용하여 마모의 영향을 고려할 경우 Archard 마모 방정식 식(1)을 기초로 한다. 여기서, $w(\text{mm}^3/\text{mm})$ 는 미끄러진 거리 마다 마모의 체적, k 는 무차원수의 마모계수 이다 FN 은 접촉면이고 H 는 경도를

나타낸다.

$$w = k \times \frac{FN}{H} \quad (1)$$

미끄러진 마모의 체적은 식(2)로 나타낼 수 있다. 여기서, A 는 마모된 면적을 나타내며, $\Delta d(\text{mm})$ 는 제품의 마모된 깊이, ΔL 은 미끄러진 거리 이다.

$$w = \frac{\Delta d \times A}{\Delta L} \quad (2)$$

식(4)와 식(5)로부터의 마모의 깊이는 식(3)으로 나타낼 수 있다. 여기서, $p(\text{Pa})$ 는 접촉 압력 FN/A 이다.

$$\Delta d = k \times \frac{p \times \Delta L}{H} \quad (3)$$

미끄러지는 거리는 미끄러지는 속도의 기간 $U(\text{mm/s})$, 그리고 시간의 증가 Δt 로 다시 교환할 수 있다. K/H 의 값은 마모 계수($k(\text{Pa}^{-1})$)이다. 그러므로 마모 깊이는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = k \times (P \times U \times \Delta t) \quad (4)$$

따라서, 전체 마모 깊이는 식(5)와 같이 나타내며, 여기서, Δt_i 는 시간의 증가, U_i 와 P_i 는 각각 미끄러짐 속도와 시간증가할 때에 접촉압력이다.

$$\Delta d = \sum_{i=1}^n k \times P_i \times U_i \times \Delta t_i \quad (5)$$

금형에서 발생할 수 있는 마모는 각각의 소재와 설비, 윤활제 성분, 환경적인요인 등 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 금형의 설계, 재질, 마찰계수의 변수를 적용하여 펀치 설계의 최적화에 대해 연구하였다.

3. 기존 헤딩용 펀치 냉간단조 성형공정 유한요소 해석모델

먼저, 현재 냉간 헤딩 공정에서 사용중인 헤딩용 펀치와 볼트 머리부의 십자부 성형 제품을 대상으로 기존의 펀치금형형상을 설계하고(Fig. 3), 기존 공정조건을 적용하여 DEFORM(2D/3D)(SFTC)[12] 소성성형해석 소프트웨어를 사용하여 성형해석 시뮬레이션을 실시하였으며, 각 성형단계별 성형하중 및 금형응력 분포 특성 등을 분석하였다.

Figure 3은 현장에서의 Pan type Bolt를 성형하는 펀치로서 단조 해석을 위해 현 제품의 사용규격을 적용하여 포인트각(point angle) = 28°, 에지반경값(Corner R = 0.3)을 적용하였다.

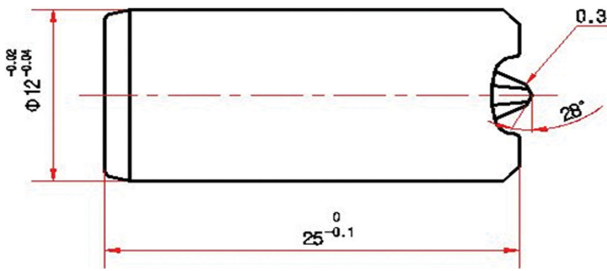


Fig. 3. Cold heading punch M30PT design.

Figure 4에는 냉간단조성형을 위한 성형전 Top die (punch), Workpiece, Bottom die의 3차원 모델링 형상을 나타내었으며, Fig. 5에는 냉간 헤딩 펀치 공정의 성형

해석 및 금형응력 계산을 위해 DEFORM을 활용한 유한요소해석 과정을 나타내었다.

Table 1에는 빌렛 소재의 물성치를 나타내었으며, 사용한 유한요소 개수 70,000개, 재료 물성치는 AISI-1045 냉간단조소재를 설정하였다. 각 공정별 금형형상과 소재 형상을 각각 모델링하고, 경계조건, 마찰계수, 성형속도 등을 정의하였다. 성형해석결과는 금형 내부의 소재 유동특성, 성형된 소재내부에 발생하는 유효응력(effective stress), 유효변형률(effective strain), 데미지(damage)와 전체 성형하중(forging load) 등의 분석을 실시하였다.

우선, 현용 헤딩용 펀치 제품의 최대 응력과 최대 마모를 확인하고자 성형해석을 진행하였다. 현 제품의 규격과 펀치에 작용되는 응력 및 최대 마모량 해석결과는

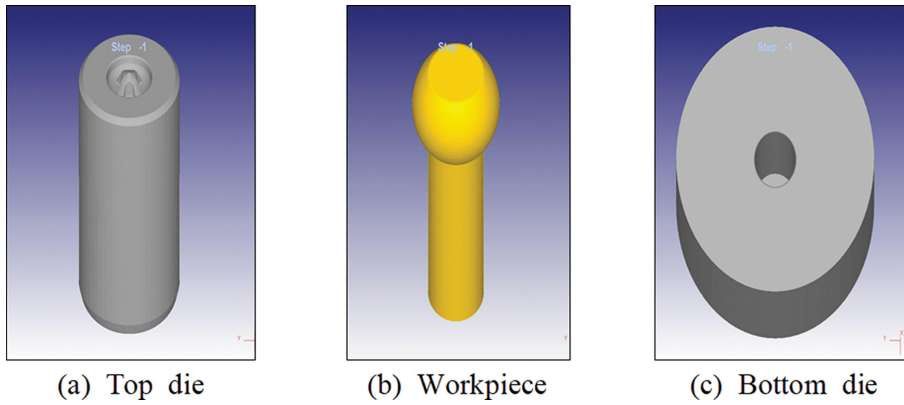


Fig. 4. Initial product configuration of cold heading process for simulation.

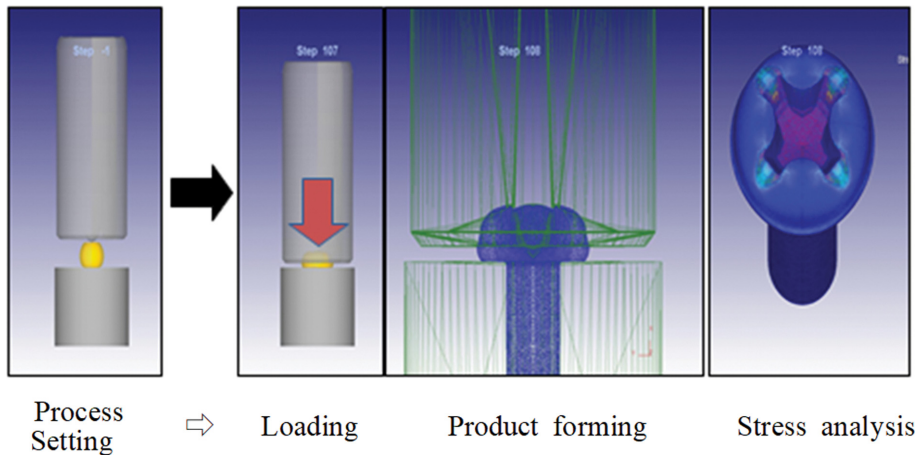


Fig. 5. Forging analysis stage modeling for cold heading process.

Table 1
Mechanical properties of cold heading process simulation

Workpiece Material	AISI-1045, Cold [70F(20°C)]
No. of Mesh	70,000 EA
Frictional Coefficient	0.12
Process Condition	10 m/s

Table 2
Design parameters and analysis results of current cold heading punch

Point angle	Corner R	Material	Frictional coefficient (μ)	Max stress (MPa)	Max wear (mm)	Hardness (HRC)
28°	0.3R	SKH51	0.12	1,240	0.00274	64

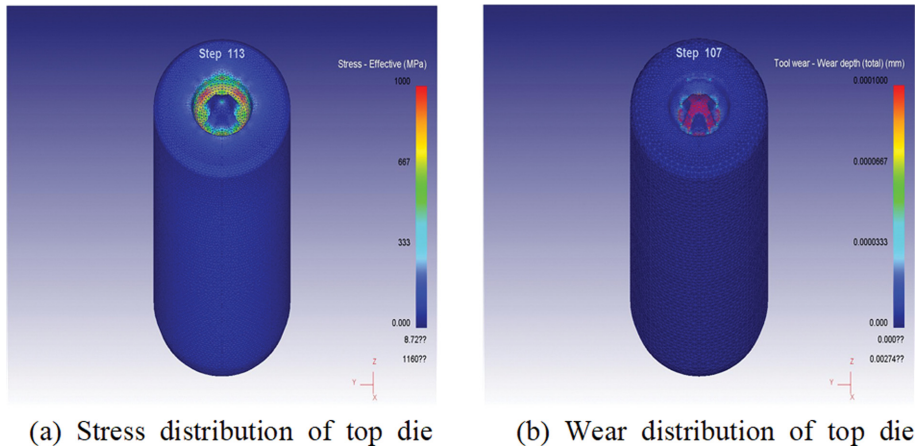


Fig. 6. Analysis results of cold heading punch stress (a) and die wear distribution (b).

Table 2와 마모 해석은 Fig. 6에 각각 나타내었다. 현장적용 공정의 규격을 적용한 펀치 해석결과에서 최대 응력 1,240 MPa과 최대 펀치 마모량 0.00274 mm로 나타났다. 이 해석은 다음 실험에서 펀치 마모에 영향을 주는 각각의 인자에 변수를 적용하여 실험한 결과와 비교하였다.

4. 설계 변수 선정 및 실험계획

본 연구에서는 냉간 heading용 펀치의 최적 설계를 위해

실험계획법을 통해 목표로 하는 결과에 대한 변수들의 영향도를 파악하고 최적조건을 만족하는 변수값을 결정하였다.

Figure 7과 같이 볼트 제품의 냉간성형 해석을 통해 확인한 바, 머리부 성형시 소재의 유동이 제한을 받아 성형하중이 가장 높게 형성되는 펀치의 Point angle와 Corner R 부분에서 최대 주응력이 발생되고 있는 것으로 분석되었으며, 이를 펀치 수명에 영향이 큰 주요 펀치 금형 설계 변수로 선택하였다.

또한 펀치 금형 재질에 따른 펀치 내구성 영향도를 분석하기 위해서 적용 가능한 펀치 소재 재종을 Table 3

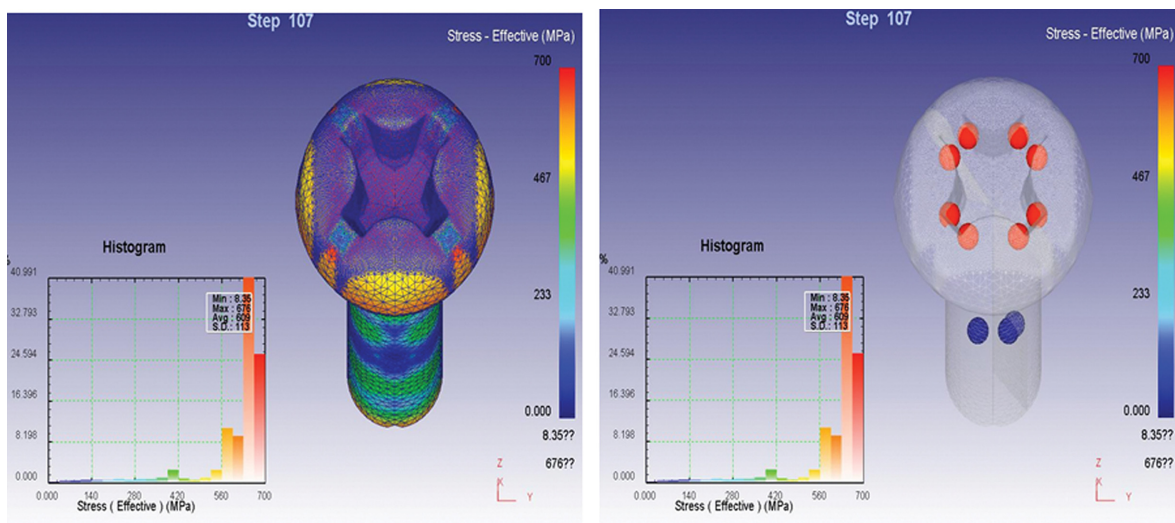


Fig. 7. Stress concentration analysis of bolt cold heading process.

Table 3
Chemical composition of the punch material

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SKD11	1.40~1.60	0.40	0.60	0.03	0.03	11.00~13.00	0.80~1.20
SKD1	1.90~2.20	0.10~.60	0.20~.60	0.03	0.03	11.00~13.00	
SKH51	0.80~0.88	0.45	0.40	0.03	0.03	3.80~4.50	4.70~5.20

Table 4
Design parameter for design of experiment

Design parameter	Level		
	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
A : Point angle (°)	26	28	30
B : Corner "R" (mm)	0.1	0.3	0.5
C : Material type	SKD11	SKD1	SKH51
D : Friction coefficient (μ)	0.07	0.12	0.17

Table 5
Orthogonal array table for each element of $L_9(3^4)$

No. of experiment	Design parameter			
	A	B	C	D
1	26	0.1	SKD11	0.07
2	26	0.3	SKD1	0.12
3	26	0.5	SKH51	0.17
4	28	0.1	SKD1	0.17
5	28	0.3	SKH51	0.07
6	28	0.5	SKD11	0.12
7	30	0.1	SKH51	0.12
8	30	0.3	SKD11	0.17
9	30	0.5	SKD1	0.07

에 나타난 바와 같이 3종의 재종을 실험계획 변수로 선택하였으며, 마찰계수를 변수로 적용하여 실험계획 표준 직교 배열 L_9 를 구성하였으며, 최종 4 가지 설계변수 인자를 적용하여 펀치의 응력 및 마모 해석을 수행하였다.

냉간 헤딩용 펀치 형상의 설계인자를 최적화시키기 위해 다구찌법을 적용한 유한요소해석 시뮬레이션을 적용하기 위한 수준 및 직교배열표를 작성하였다. 설계인자에 대한 변수는 Table 4와 같이 선정하였으며, 행렬 실험은 배열의 열이 서로 직교성을 가지고 각각의 조합이 같은 횟수로 나타나는 균형성을 가지고 표준 직교 배열 L_9 를 사용하여 Table 5와 같이 나타내었다.

냉간 단조 공정에서 펀치 수명에 관계가 있는 네 가지

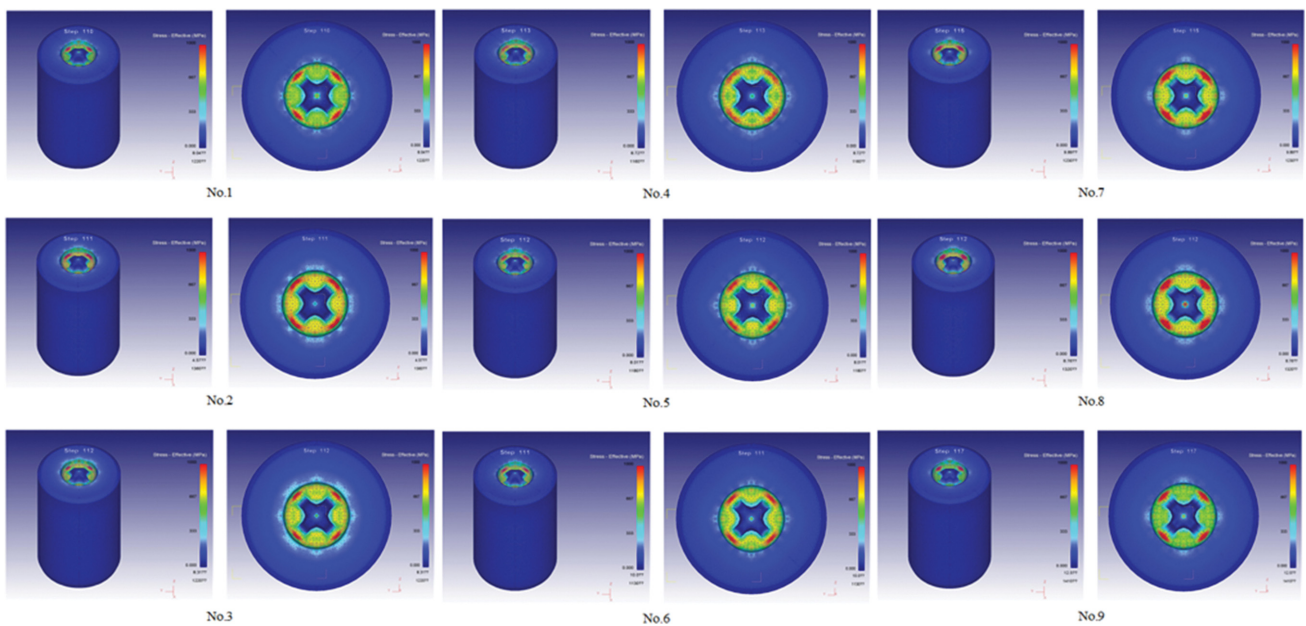


Fig. 8. Effective stress distribution analysis for 9 different of cold heading punch designs.

공정 인자 Point angle(A), Corner R(B), 펀치금형 재질(C), 마찰계수(D)의 효과를 결정하기 위해 네 가지의 변수를 적용하여 Table 5와 같이 배치하였다. 실험의 문제 형태는 “0”에 가까울수록 최적의 상태를 나타내는 망속 특성을 나타내므로 최적의 목표값은 “0”이다.

5. 설계변경된 펀치 형상의 응력해석 및 다구찌법 적용 결과

5.1. 펀치 응력 및 성형하중 해석결과 비교

각 9번의 실험에서의 냉간 단조품의 성형 시 발생하는 성형하중, 유효응력 등을 분석하고, 펀치 설계변수 변경에 따른 최대 성형하중 미치는 영향을 살펴보았다.

Figure 8에는 9가지 설계변수 조합에 따른 각 펀치 형상별 유효응력 분포를 각각 나타내었으며, Fig. 9에는 펀치 성형 하중에 대해 나타내었다. 그 결과 3번, 4번 설계변수 조합에서 가장 큰 성형하중 값이 나타남을 확인하였으며, 9번 실험조건에서 가장 작은 성형하중값을 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

Table 6에는 실험계획법을 이용한 해석 결과 및 S/N

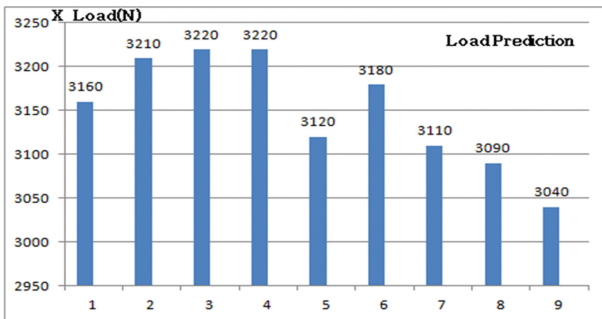


Fig. 9. Comparison of die forging load with 9 different cold heading punch shape designs.

Table 6 S/N ration analysis $L_9(3^4)$ for cold heading punch stress

No. of experiment	A	B	C	D	Max sress (MPa)	S/N ratio (dB)
1	1	1	1	1	1220	-61.7272
2	1	2	2	2	1360	-62.6708
3	1	3	3	3	1220	-61.7272
4	2	1	2	3	1160	-61.2892
5	2	2	3	1	1180	-61.4376
6	2	3	1	2	1130	-61.0616
7	3	1	3	2	1230	-61.7981
8	3	2	1	3	1320	-62.4115
9	3	3	2	1	1410	-62.9844
Average						-61.9008

비를 나타낸 표이며 Table 7은 각 인자들의 자유도 및 기여도를 나타낸 표이다. 최적의 조건으로는 Point angle = 28°, Corner R = 0.1R, Material type SKH51, Frictional Coefficient 0.17로 나타났다. 적용된 여러 설계변수 중에서 펀치 응력에 가장 영향력이 있는 것은 Point angle로 나타났으며 약 60%의 기여도를 가진다. Table 8에는 펀치 금형 해석 결과에 대한 최적설계 값을 나타냈으며, A2B1C3D3 조건의 최적형상 설계가 가능하다.

Table 7 ANOVA table of cold heading punch stress analysis

Design parameter	Degree of freedom	Contribution rate (%)
A	2	59.7
B	2	14.4
C	2	23.0
D	2	2.9
Total	8	100.0

Table 8 Calculated optimal design values for cold heading punch stress reduction

Design parameter				Experiment condition
A	B	C	D	
A2(28°)	B1(0.1R)	C3(SKH51)	D3(0.17)	A2B1C3D3

Table 9 Finite element analysis conditions for cold heading punch wear analysis

Top die materials	SKD11, SKD1, SKH51
No. of mesh	Total 70,000ea, /Curvature 0.05 /Around 0.5
Object type	Rigid body

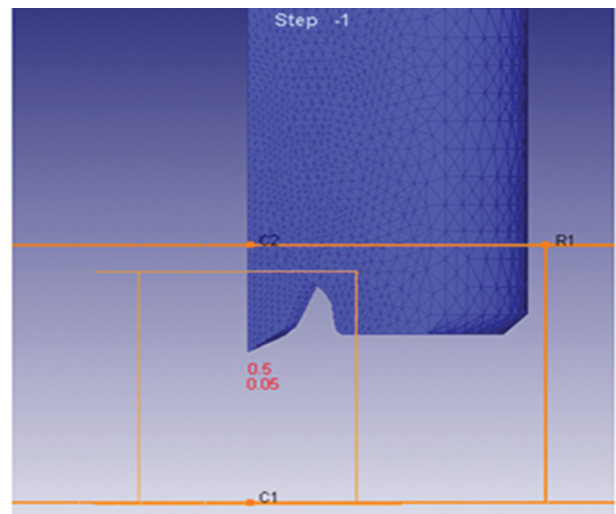


Fig. 10. Configuration of mesh generation of top die (cold heading punch) wear simulation.

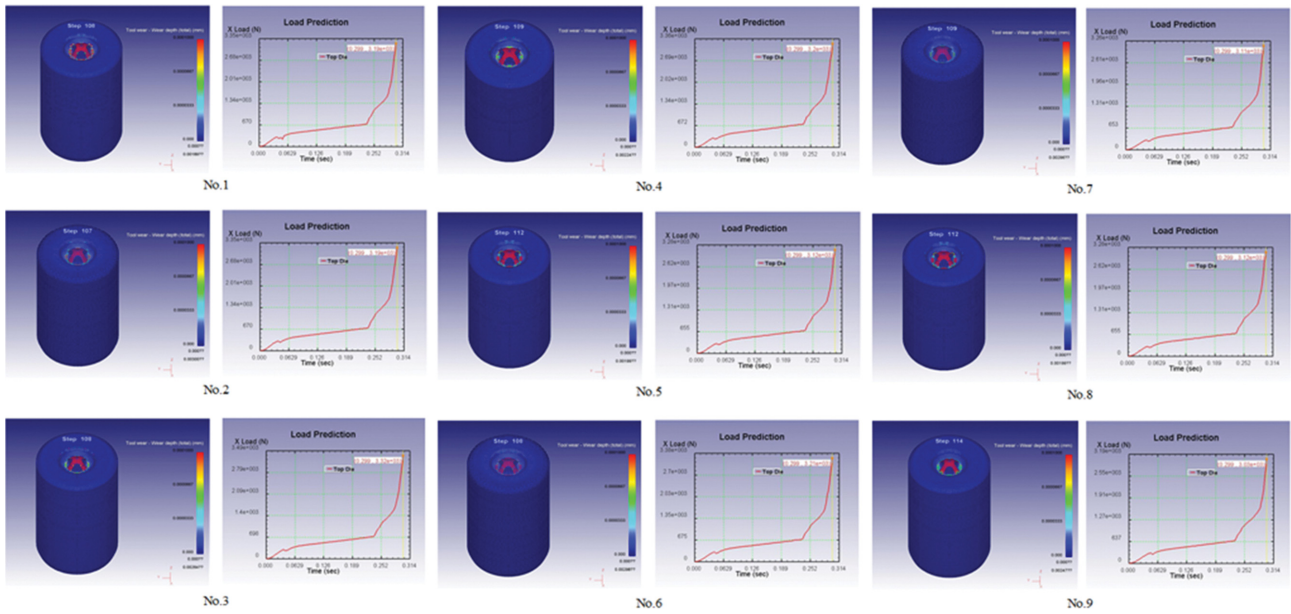


Fig. 11. Wear analysis of cold heading punch.

Table 10
S/N ration analysis $L_9(3^4)$ for cold heading punch wear

No. of experiment	A	B	C	D	Max wear (mm)	S/N ratio (dB)
1	1	1	1	1	0.00189	-54.4708
2	1	2	2	2	0.00300	-50.4576
3	1	3	3	3	0.00264	-51.5679
4	2	1	2	3	0.00224	-52.9950
5	2	2	3	1	0.00253	-51.9376
6	2	3	1	2	0.00298	-50.5157
7	3	1	3	2	0.00296	-50.5742
8	3	2	1	3	0.00246	-52.1813
9	3	3	2	1	0.00247	-52.1416
Average						-51.8718

5.2. 펀치 마모 해석 결과 비교

펀치 마모 해석은 냉간 단조 해석과 동일하게 -1 Step 부터 순차적으로 진행되었으며, Mesh 설정은 70,000ea 이고 객체 타입은 강체로 설정하였다. 펀치 마모 해석은 곡률부의 정밀한 해석을 위해 곡률부의 Mesh는 0.05, 주변부를 0.5로 추가로 설정하여 변형량이 많은 부위에 Mesh를 조밀하게 설정하였다.

각 펀치금형 재종의 경도는 SKD11은 HRC62, SKD1 은 HRC62, SKH51은 HRC64로 설정하였다. Table 9에 는 펀치 금형 마모해석 설정조건을, Fig. 10에는 유한요 소해석 Mesh 설정에 대해서 각각 나타냈었으며, Fig. 11에는 9가지 실험계획에 따른 설계조건 조합별 펀치 금형의 마모 해석결과를 각각 나타내었다.

Table 10에는 실험계획법을 이용한 최대 펀치 금형 마

Table 11
ANOVA table of cold heading punch wear analysis

Design parameter	Degree of freedom	Contribution rate (%)
A	2	3.2
B	2	21.4
C	2	11.5
D	2	63.9
Total	8	100.0

Table 12
Calculated optimal design values for cold heading punch stress reduction

Design parameter				Experiment condition
A	B	C	D	
A3(30°)	B3(0.5R)	C3(SKH51)	D2(0.12μ)	A3B3C3D2

모 해석 결과 및 S/N 비를 나타내었으며, Table 11에 는 각 인자들의 자유도 및 기여도를 나타낸 표이다. 최적 조건으로는 Point angle = 30°, Corner R = 0.5R, Material SKH51, friction coefficient 0.12로 나타났다. 특히 여러 변수 중에 금형응력에 가장 영향력이 있는 것은 마찰계수로 나타났으며 약 64%의 기여도를 가진다. Table 12에는 펀치 금형 마모 저감을 위한 최적설계 값을 나타냈으며, A3B3C3D2 조건의 최적형상 설계가 가능하다.

5.3. 냉간 헤딩용 펀치의 최적설계안 제안

냉간 헤딩용 펀치 설계의 최적설계 조건을 Table 13과

Table 13
Compromised optimal design parameters for cold heading punch

Design parameter					Design parameter set
	A	B	C	D	
Compromised optimal design	A2(28°)	B3(0.5R)	C3(SKH51)	D2(0.12)	A2B3C3D2

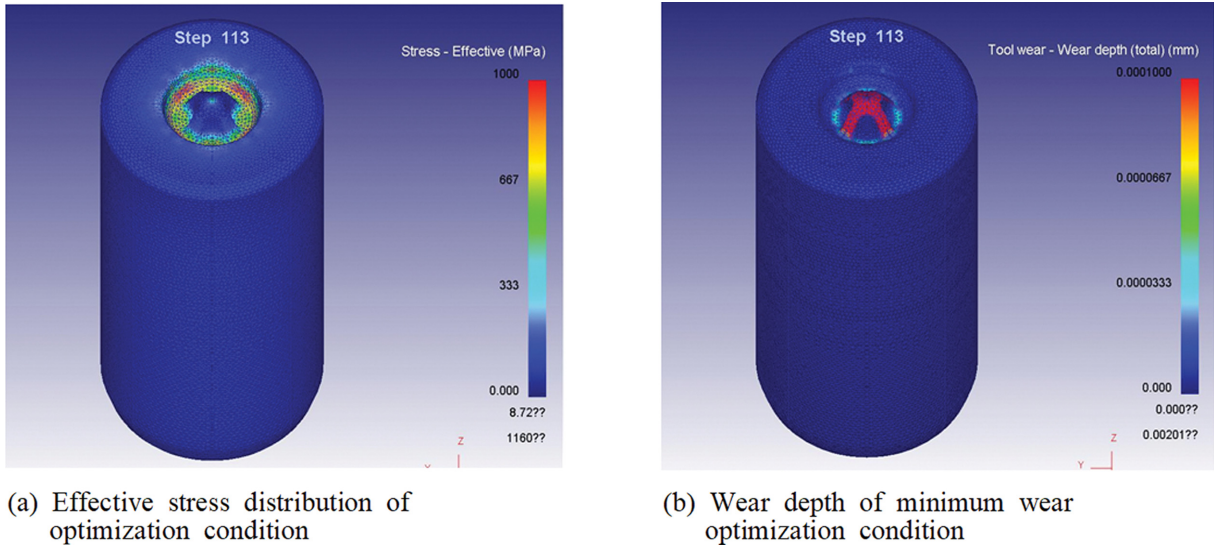


Fig. 12. Analysis results of effective stress and wear distribution of compromised optimal punch design for cold heading process.

같이 도출하여 현 제품에서의 조건과 비교 분석하였다. 냉간 헤딩용 펀치 금형응력의 측면에서 최적설계조건은 A2(28°), B1(0.1R), C3(SKH51), D3(0.017)로 최대 유효응력값은 1,160 MPa로 나타내고 있으며, 헤딩 용 펀치 마모 감소를 위한 최적설계조건으로는 A3(30°), B3(0.5R), C3(SKH51) D2(0.17)로 마모값은 0.0020 mm로 나타났다. 이는 현재 적용중인 펀치 형상과 비교하여 펀치의 최대응력은 6.45 % 감소, 펀치 마모량은 최대 27 % 감소 효과를 가져올 것으로 판단된다.

최종, 현업에 적용할 펀치 금형설계를 위해 실험계획법과 다구찌법 실험을 통해 얻어진 최대 응력분표와 마모 해석결과를 토대로 절충된 설계안을 도출하였으며, 최대 유효 응력 조건에서의 가장 영향력이 있는 A2(28°)와 C3(SKH51)를 적용하고 최적 마모 조건에서는 B3(0.5R)와 D2(0.12)를 적용하여 응력 해석과 마모 해석을 수행하였다.

Figure 12에는 최종 절충된 최적설계조건으로 설계된 냉간 헤딩용 펀치의 유효응력, 최대 마모깊이, 성형하중에 대한 해석결과를 각각 나타내었다. 펀치에 작용하는 최대 유효응력은 1,130 MPa, 최대 마모 깊이는 0.0017 mm, 최대 성형하중은 3,150 N으로 예측되었으며, 금형응력 감소 측면에서는 최대 8.9 % 감소와 펀치 마모량은 현용 펀치 대비하여 최대 37 % 감소 효과가 나타나

는 것으로 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 성형해석을 기반으로 실험계획법과 다구찌법을 이용하여 냉간 헤딩용 펀치금형의 주요 설계인자 및 수준을 변경에 따른 펀치금형 응력 및 마모량 감소를 위해 설계 영향도와 최적값을 도출하여 금형형상 최적설계안을 제시하였다. 높은 성형하중을 발생하는 냉간단조공정에서의 금형형상은 미소한 형상 변화만으로도 소재 유동성에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 이로 인한 성형하중 및 금형응력 변화를 유도하여 금형마모 및 수명에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 연구를 통해 도출된 최적설계인자를 반영한 최종 냉간헤딩 공정용 단조금형 설계변경을 실시하여 성형성 해석 및 성형하중 예측결과, 공정별로는 최대 37 %, 평균 약 20 %의 성형하중 감소효과를 얻을 수 있었다. 소성 성형제품군이 적용되는 자동차, 건설 플랜트사에서 요구되는 고품질에 대응하면서도 적정 제조원가 절감을 위한 성형성 개선을 위한 성형공정개발 및 금형설계의 최적화가 지속적으로 필요하며, 향후 연구 결과를 활용하여 현업에 적용하여 제품 성형성 개선 및 금형수명 증대 관리를 위한 기술자료로 활용하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- [1] W.F. Hosford and R.M. Caddell, "Metal Forming", (Prentice Hall, New Jersey, 1993) p. 52.
- [2] J.N. Reddy, "Finite Element Method", (McGraw Hill, New York, 1993) p. 246.
- [3] P.H. Hansen and N. Bay, "A Flexible Computer Based System for Prediction of Wear Distribution in Forming Tools" 1 (Advanced Technol. of Plasticity, Kyoto, 1990) p. 19.
- [4] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures", (Prentice Hall, New Jersey, 1996) p. 485.
- [5] J.H. Kang, I.W. Park, J.S. Jae and S.S. Kang, "A study on a die wear model considering thermal softening(II) : Application of the suggested wear model", J. Mater. Process. Tech. 94 (1999) 183.
- [6] J.H. Lee, D.C. Ko, T.H. Kim, B.M. Kim and J.C. Choi, "Methodology of preform design for reducing tool wear in cold forging", Proceeding of Korean Society for Technology of Plasticity (1997) p. 164.
- [7] Y.S. Lee, Y.N. Kwon, Y.C. Kwon, J.H. Lee and S.T. Choi, "Characteristics of tools for improving the tool life and forged product on cold forging", Proceeding of Korean Society for Precision Engineering (2006) p. 125.
- [8] T.H. Kim, B.M. Kim and J.C. Choi, "Prediction of tool wear in cold forming", Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers (1994) p. 744.
- [9] S.H. Hwang, J.H. Lee, B.M. Kim, T.H. Kim and D.J. Kim, "Estimation of wear characteristic for cold form die materials", Proceeding of Korean Society for Precision Engineering (1998) p. 138.
- [10] Y. Tronel and J.L. Chenot, "Prediction of tool wear using finite-element software for the three-dimensional simulation of the hot-forging process", J. Mater. Process. Tech. 31 (1992) 255.
- [11] J.H. Kang, I.W. Park, J.S. Jae and S.S. Kang, "A study on a die wear model considering thermal softening: (I) Construction of the wear model", Transactions of Materials Processing 7 (1998) 274.
- [12] DEFORM 3-D Ver10.1.2 User Manual, (2010).