

A study on the cold forging die geometry optimal design for forging load reduction

Joon Hwang[†] and Seung-Hyun Lee^{*}

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 9, 2022)

(Revised December 1, 2022)

(Accepted December 6, 2022)

Abstract This paper describes the finite element analysis and die design change of spring retainer forging process to reduce the cold forging load and plastic forming stress concentration. Plastic deformation analysis was carried out in order to understand the forming process of workpieces and elastic stress analysis of the die set was performed in order to get basic data for the die fatigue life estimation. Cold forging die design was set up to each process with different four types analysis progressing, the upper and lower dies shapes with combination of fillets and chamfers shapes of cold forging dies. This study suggested optimal cold forging die geometry to reduce cold forging load. The design parameters of fillets and chamfers are selected geometry were selected to apply optimization with the DoE (design of experiment) and Taguchi method. DoE and Taguchi method was performed to optimize the workpiece preform shape for spring retainer forging process, it was possible to expect an increase in cold forging die life due to the 20 percentage forging load reduction.

Key words Cold forging, Forging die geometry optimization, Finite element analysis, Design of experiment, Taguchi method

성형하중 감소를 위한 냉간단조금형 최적설계에 관한 연구

황준[†], 이승현^{*}

한국교통대학교 항공·기계설계학과, 충주, 27469

*한국교통대학교 대학원 항공·기계설계학과, 충주, 27469

(2022년 11월 9일 접수)

(2022년 12월 1일 심사완료)

(2022년 12월 6일 게재확정)

요약 본 연구에서는 냉간단조공정에서 성형하중과 금형내 응력집중 감소를 위해 자동차 엔진 밸브 스프링 리테이너 제품의 형상최적화를 위한 금형형상 최적설계를 수행하였다. 기존 생산에 사용되는 각 성형공정별 냉간단조 금형에 대한 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 절단공정을 포함해 총 6공정으로 구성되어 있는 냉간단조공정 별 단조 프리폼의 성형 시에 발생하는 성형하중과 성형유동 특성을 분석하였으며, 이를 통해 금형 내 응력집중이 발생하는 주요 설계인자를 확인하였다. 상형금형과 하형금형부의 챔퍼(chamfer) 및 에지필렛(edge fillet) 형상을 대상으로 4인자 3수준 설계인자 및 변수 수준을 설정하고, 성형해석 시뮬레이션과 다구찌법을 활용하여 설계인자별 영향도를 분석하여 최적의 최적설계인자를 결정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 최적설계변수를 적용하여 엔진밸브 스프링 리테이너의 최적설계 시뮬레이션 결과, 각 프리폼 성형공정별로 최대 36%, 전체 공정 평균 20%의 성형하중 감소 효과를 얻을 수 있었다. 엔진의 고효율, 고출력, 고성능화 목표가 지속적으로 높아짐에 따라 고강도 소재의 활용이 많아지게 되어 이에 대응할 수 있는 성형공정 및 금형설계의 최적화가 필요하며, 향후 연구 결과를 활용하여 현업에 적용하여 제품단조성형성 개선 및 금형수명관리를 위한 기술자료로 활용하고자 한다.

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

1. 서 론

엔진 밸브 스프링 리테이너(engine valve spring retainer, Fig. 1)는 자동차 엔진 밸브 시스템의 주요 핵심부품 중의 하나로 밸브 스템(valve stem)의 끝에 위치하여 실린더 헤드에 대해 밸브 스프링(valve spring)을 고정하는 역할을 하며, 밸브 스프링에 일정한 압력을 가해 밀폐부위를 누르며, 밸브 스템이 밸브 스프링과 동일하게 움직일 수 있게 한다. 또한, 외부로부터 들어오는 오염물질이 스프링 내부로 유입되는 것을 방지하고, 내부에 있는 오일, 윤활제 등이 누유되는 것을 방지하는 역할을 한다. 엔진 흡기(intake) 및 배기(exhaust) 밸브 상단에 조립되며, 반복적인 밸브 스프링 작동에 견고하게 파손 없이 유지되어야 한다. 특히, 고회전, 고출력의 엔진 개발 니즈가 커짐에 따라 더 높은 밸브 스프링 압력을 견딜 수 있는 스프링 리테이너의 개발이 요구되고 있다.

스프링 리테이너는 성형정밀도가 높은 냉간단조공정을 통해 제조되는 소성가공 제품이며, 냉간단조공정은 치수 정밀도가 높아 후가공 등의 공정절차를 줄일 수 있는 장점에도 불구하고, 높은 성형하중 발생으로 인해 금형마멸 및 파손의 위험성과 이로 인한 성형제품 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 여러 연구들을 통해 소성가공 성형해석 및 금형응력 예측을 연구가 이루어졌다. Kang[2] 등은 초기 마멸을 유한요소해석으로 구하고, 이를 일률적으로 더하지 않고 성형시간, 성형온도, 초기 금형의 경도 등을 입력 값으로 하여, 작업시간이 증가할수록 금형의 경도 저하에 의해 마멸량이 증가하는 마멸모형을 제시하였으며, Lee[3] 등은 냉간단조의 다단계 성형공정에서 최종금형

의 마멸체적을 감소시킬 수 있는 예비 성형체 설계방법을 제시하였고, Lee[4] 등은 냉간단조용 금형수명 및 단조품의 품질 향상을 위한 연구에서 열처리법과 설계로 인한 금형연구 방법을 제시하였다. Kim[5] 등은 냉간성형 시 소재의 변형 해석과 동시에 금형마모량을 예측할 수 있는 해석기법을 제시하였다. Hwang[6] 등은 냉간단조 금형재료의 마멸 특성을 파악하여 냉간단조금형의 재질선택의 방향성을 제시하였으며, Chenot[7] 금형의 수직방향 응력과 수평방향의 상대속도에 관한 곱을 시간에 대하여 누적하는 마멸량의 연구를 시행하였다.

본 연구에서는 자동차부품인 엔진 밸브 스프링 리테이너 냉간단조 제품의 성형에 있어서 소재의 금형충진 과정 개선과 성형하중(forging load) 감소를 통한 금형 내 발생하는 금형 응력(die stress)을 최소화할 위해 먼저, K사에서 생산 중인 기존 제품에 대한 성형 공정 유한요소 해석 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 중간 성형단계별 금형 형상의 설계 변경과 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

금형의 구조해석 문제는 기하학적 경계조건과 역학적 경계조건을 만족하는 변위장 u_i 와 이로부터 파생되는 응력을 비롯한 각종 물리량을 구하는 것으로 설명된다 [8,9].

금형의 구조해석 문제는 해석영역 V , 표면력이 $\sigma_{ij}n_j =$

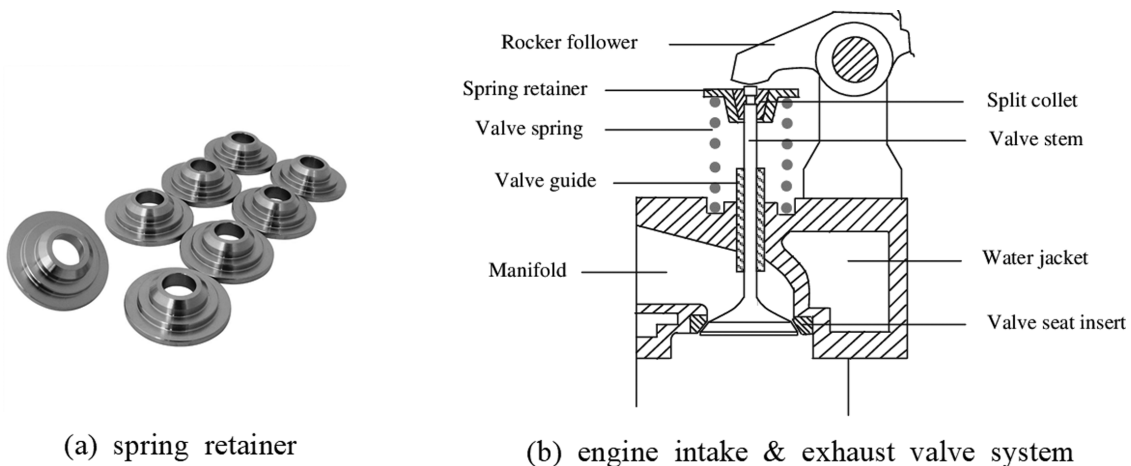


Fig. 1. spring retainer and engine intake & exhaust valve system structure [1].

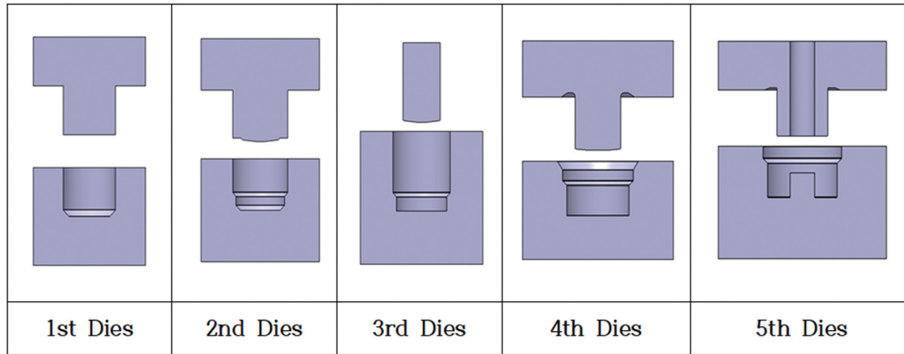


Fig. 2. Forging process and die design for spring retainer.

Table 1
Mechanical properties of spring retainer material for cold forging process simulation

Workpiece Material	AISI-1045, Cold [70F (20°C)]
No. of Mesh	2000 EA
Frictional Coefficient	0.12
Process Condition	10 m/s
No. of Forging Process	6 stage process including billet workpiece cutting

$t_i^{(n)}$ 로 주어진 표면력 지정경계 S_b , 변위가 $u_i = \bar{u}_i$ 로 주어진 변위 지정경계 S_u , 두 물체의 접촉면 S_c 로 구성되어 있다. 두 물체의 접촉면에서 법선벡터를 공유하며, 접촉면은 동일한 법선벡터 n_i 로 정의한다. 법선벡터 n_i 가 물체의 외향이면 그 물체의 접촉경계를 S_c^+ 로 정의하고, 반대로 내향인 접촉경계를 S_c^- 로 표시한다. 즉, 접촉경계에서 동일한 법선벡터를 사용하므로, 접촉경계에서는 항상 S_c^+ 와 S_c^- 가 존재한다. S_c 는 S_c^+ 와 S_c^- 를 대표하는 의미로 사용한다. 두 물체간의 접촉부의 S_c 에서의 역학적 및 기하학적 경계조건은 다음과 같다.

접촉경계의 법선방향으로는

$$u_n^{+c} = u_n^{-c} \quad \text{if} \quad \sigma_n^{+c} < 0 \quad (1)$$

$$\sigma_n^{+c} < 0 \quad \text{if} \quad u_n^{+c} - u_n^{-c} < 0 \quad (2)$$

이고, 접선방향으로는

$$\sigma_t^{+c} = -\sigma_t^{-c} = \mu |\sigma_n| \frac{(u_t^{-c} - u_t^{+c})}{|u_t^{-c} - u_t^{+c}|} \quad \text{if} \quad u_t^{-c} \neq u_t^{+c} \quad (3)$$

$$u_t^{-c} = u_t^{+c} \quad \text{if} \quad (|\sigma_t| < \mu |\sigma_n|) \quad (4)$$

이다. 여기서 하첨자 n 과 t 는 각각의 법선성분과 접선성분을 의미하며, 상첨자 $^{+c}$ 와 $^{-c}$ 는 각각 S_c^+ 과 S_c^- 에서의 성분을 의미한다.

식(3)는 접촉면에서 미끄러짐이 발생하면 미끄러짐을 방해하는 방향으로 coulomb 마찰법칙에 의하여 마찰력이 작용한다는 의미를 내포한다. 미끄러짐이 발생하지 않으면 접선방향의 경계조건은 식(4)에 의하여 지배되고, 즉 필수경계조건의 일부로 간주되고 그 때의 마찰력의

크기는 $\mu |\sigma_n|$ 보다 작게 된다.

벌칙기법을 이용하여 식(1)의 조건을 다음의 식에서

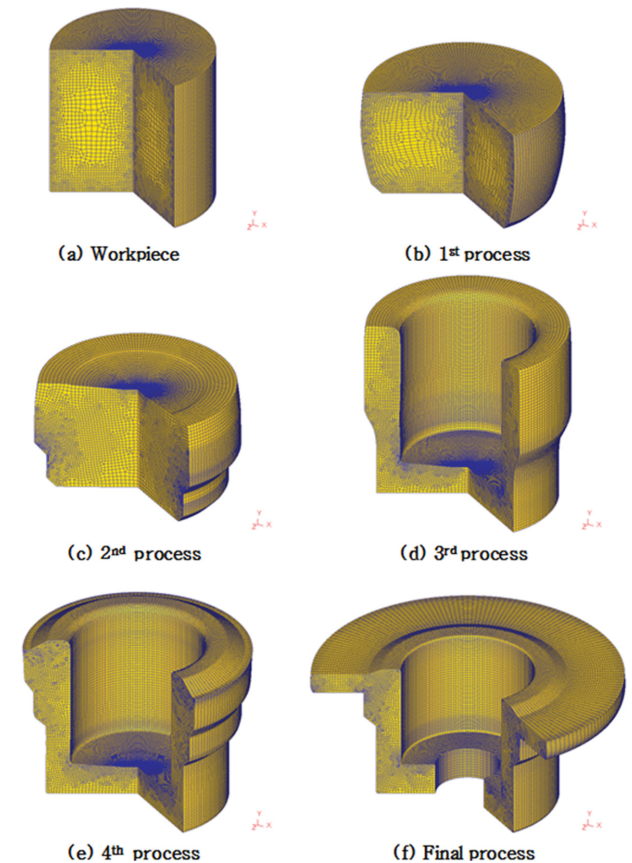


Fig. 3. Configuration of spring retainer forging at 6 stage cold forging process.

보는 바와 같이 가상일의 원리에 내포시킬 수 있다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_V f_i \delta u_i dV - \sum \int_{S_i} \bar{t}^{(m)} \delta u_i dS + \int_{S_c} \beta (u_n^{+c} - u_n^{-c}) (\delta u_n^{+c} - \delta u_n^{-c}) dS - \int_{S_c} \beta \sigma_i \delta u_i dS = 0 \quad (17)$$

여기서 $S_c (c \in S_c)$ 는 $\sigma_n^{+c} < 0$ 인 접촉경계를 의미하며, 그 자체가 미지수이다. 이 표현은 비록 기하학적으로 붙어 있다고 해도 경계에 압력이 작용하지 않으면 자유표면이 된다는 의미를 내포하고 있다. 즉, S_c 는 기하학적 접촉경계를 의미하며, 벌칙상수 β 는 매우 큰 양의 상수로써 $\sigma_n^{+c} = -\beta(u_n^{+c} - u_n^{-c})$ 의 물리적 의미를 갖는다.

3. 기존 금형의 냉간단조 성형공정 유한요소해석

먼저, 현재 생산중인 스프링 리테이너(Spring Retainer) 제품을 대상으로 기존의 공정 조건 및 금형형상을 모델링(Fig. 2)하고, 성형해석 시뮬레이션은 DEFORM(2D/3D)(SFTC)[10] 소성성형해석 소프트웨어를 사용하여 실시하여, 각 성형단계별 성형하중 및 금형응력 분포 특성을 분석하였다.

Table 1에는 빌렛 소재의 물성치를 나타내었으며, 사

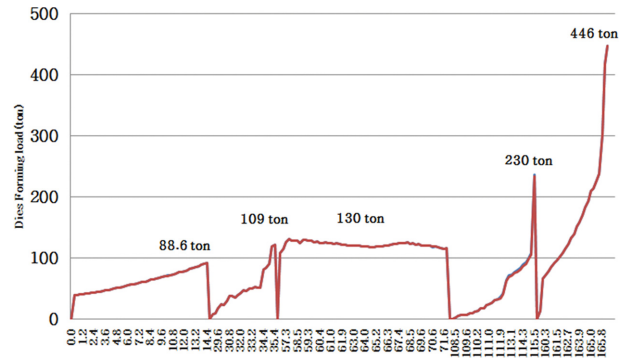


Fig. 4. Forging load variation at each stage for spring retainer.

용한 유한요소 개수 2000개, 재료 물성치는 AISI-1045 냉간단조소재를 설정하였다. 전체 스프링 리테이너 소성 성형공정은 소재 절단을 포함하여 6개 공정(stage)으로 구성되어 있으며(Fig. 3, 각 공정별 금형형상과 소재형상을 각각 모델링하고, 경계조건, 마찰계수, 성형속도 등을 정의하였다. 성형해석결과는 금형 내부의 소재 유효응력, 유효변형률, 데미지(damage)와 전체 성형하중(forging load) 등의 분석을 실시하였다.

성형하중 변화를 Fig. 4에 나타내었으며, 1번 공정에

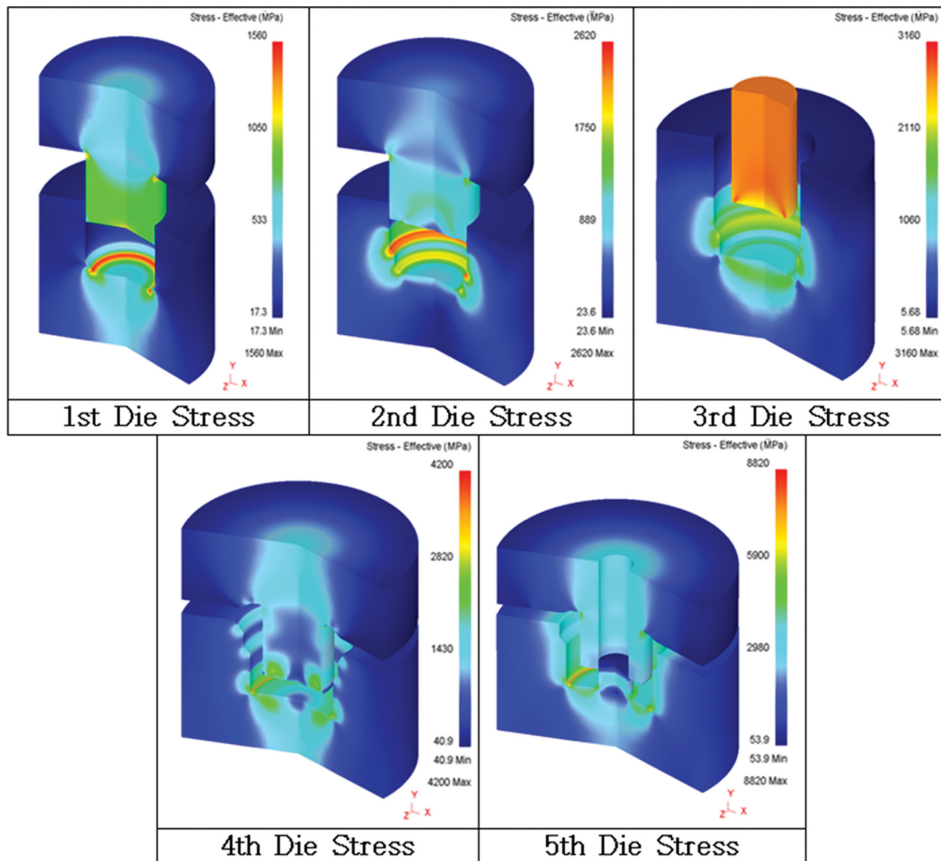


Fig. 5. Effective stress distribution of forging die at each steps.

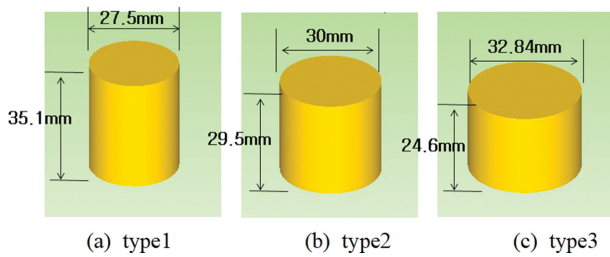


Fig. 6. Configuration of initial billet dimensions for spring retainer forging.

서 88.6 ton, 2번 공정에서 109 ton, 3번 공정에서는 130 ton, 4번 공정에서 230 ton, 최종 공정에서 446 ton으로 총 1003.6 ton의 성형 하중을 금형이 받는 것으로 나타났다. 특히, 3번 공정은 후방압출 공정이므로 상부 금형 자체가 전체적으로 높은 하중으로 나타났으며 최종 공정에서는 금형이 닫히면서 가장 높은 성형하중과 유효응력 변화를 나타냈다.

냉간단조성형 중에 금형 캐비티(cavity) 내에서의 빌렛 소재의 유동을 원활하게 하여 단류선(flow line) 형성을 도와주는 곡면부 모서리의 챔퍼(chamfer)와 라운딩 엣지(edge fillet) 부분에 금형 응력이 집중되는 것을 금형 응력 해석을 통해 Fig. 5와 같이 확인할 수 있다. 이러한 응력집중은 냉간단조금형의 과도한 마멸 및 마찰열 발생으로 인한 금형수명 저하 및 금형 파손의 원인이 될 수 있으며, 성형되는 제품의 가공정밀도 저하와 생산성 하락 및 생산단가 증가의 원인이 된다.

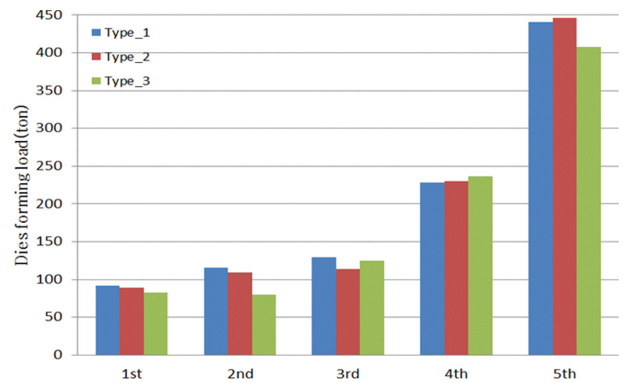


Fig. 8. Comparison of die forging load with three different initial billet workpiece shapes.

4. 초기 빌렛 형상 치수변경에 따른 냉간단조 성형 특성 분석

성형하중 감소를 위해서 먼저, 초기 빌렛 소재(initial billet)의 형상(직경 및 길이)이 스프링 리테이너 성형시 금형의 성형하중에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 신선 인발이 가능한 3가지 규격(type)을 선택하여 해석하였으며, 초기 빌렛 소재의 제원은 Fig. 6과 다음과 같다.

초기 빌렛소재 형상별 성형해석 시뮬레이션을 통해 유효변형률 분포를 Fig. 7에, 성형 하중 예측결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Type1 소재의 경우, 최대 유효변형률 값은 6.23, 성형하중은 1번 공정 92.4 ton, 2번 공정

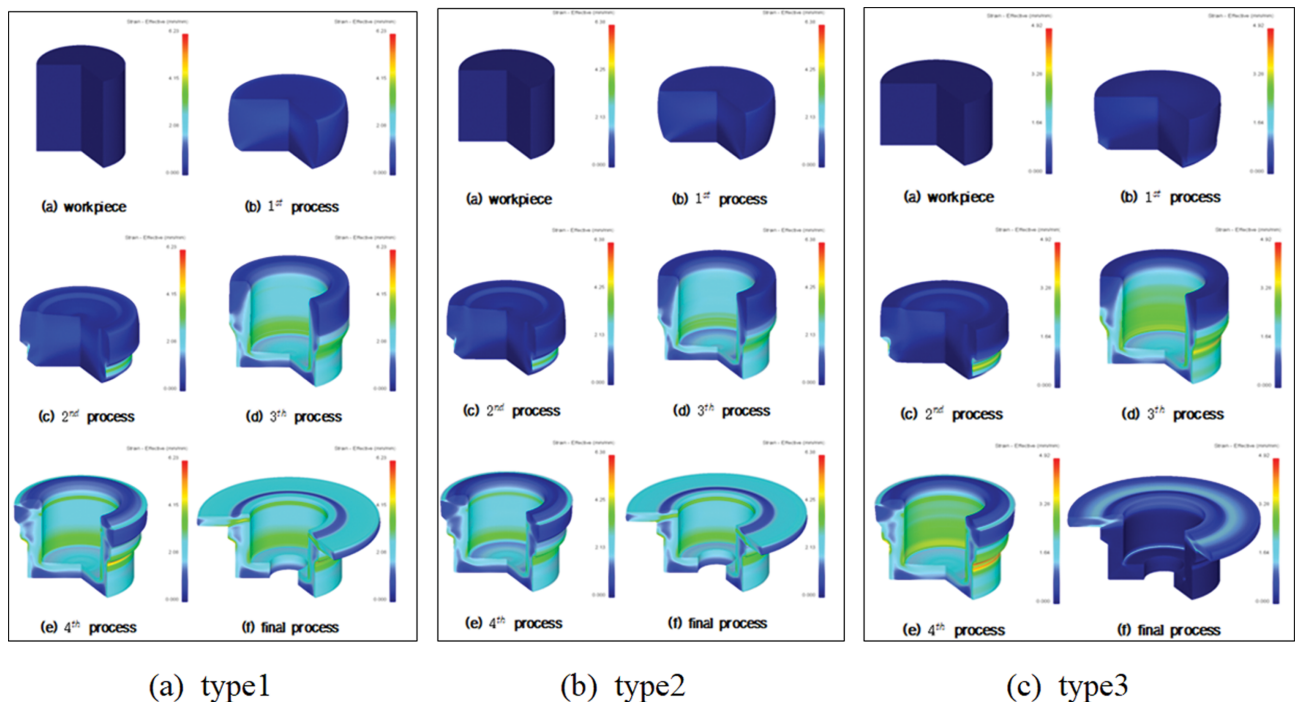


Fig. 7. Effective strain distribution of spring retainer with initial billet shape design change.

116 ton, 3번 공정 129 ton, 4번 공정 228 ton이, 5번 공정 440 ton으로 나타났으며 총 1005.4 ton으로 예측되었다. Type2 소재는 최대 유효변형률 값이 6.38, 성형하중은 1번 공정 88.6 ton, 2번 공정 109 ton, 3번 공정 130 ton, 4번 공정 230 ton, 5번 공정 446 ton으로 총 1003.6 ton이다. Type3 소재는 최대 유효변형률 값은 기존 공정에 비해 20 % 정도 작은 4.92로 나타났다. 성형하중은 1번 공정 82.7 ton이, 2번 공정 79.7 ton, 3번 공정 125 ton, 4번과 최종 5번 공정은 각각 236 ton과 408 ton으로 총 931.4 ton으로 예측되었다.

이상의 결과를 볼 때, 스프링 리테이너 냉간단조공정에서의 성형하중 감소를 위해서는 우선, 얇고 긴 환봉 형태의 소재보다 상대적으로 굵고 짧은 형태의 초기 빌렛소재인 type3를 사용하는 것이 성형하중 감소에 유리할 것으로 판단되며, 향후 성형하중 최소화를 위한 금형 설계해석 시뮬레이션에 적용하였다.

5. 냉간단조 성형하중 감소를 단조금형 설계인자 변경

금형 응력 해석결과를 바탕으로 먼저 각각의 성형공정 단계에 대해 주요 설계인자 및 변수들을 Fig. 9와 Table 2와 같이 설정하였으며, 설정된 설계인자들은 챔퍼의 길이 및 각도, 필렛 반경값이다. 이러한 이유로는 이 설계인자들은 단조공정에서 금형응력이 집중되는 부분이며, 성형하중 변화 및 집중에 빌렛 소재금속의 유동성에 큰 영향을 끼치기 때문이다.

Table 2
The specifications of design parameters for cold forging die shape change

Die Number	Design Parameters	Positions
2nd Die	A (edge fillet radius)	Upper die
	B (chamfer length)	Lower die
	C (chamfer angle)	Lower die
	D (edge fillet radius)	Lower die
3rd Die	A (contact length)	Upper die
	B (chamfer length)	Upper die
	C (edge fillet radius)	Lower die
	D (chamfer length)	Lower die
4th Die	A (edge fillet radius)	Upper die
	B (chamfer length)	Upper die
	C (edge fillet radius)	Lower die
	D (chamfer length)	Lower die

스프링 리테이너 냉간단조 금형 최적설계를 위해 성형 공정 2번, 3번, 4번 성형공정에 적용되는 금형 세트별로 각각 4가지 설계인자를 설정하였으며, 실험계획법과 다구찌법을 이용하여 최적화를 실시한다. 또한, 1번 업세팅 공정 금형과 5번 최종제품 성형공정은 설계변경에 포함시키지 않았는데, 1번 업세팅 공정은 금형내에 절단된 빌렛 소재를 자리잡게 하고 스프링 리테이너 기본 벌크형상을 성형하는 공정이며, 5번 최종형상은 다른 부품과 조립되어야 하는 이미 확정된 형상과 치수공차를 만족해야하기 때문이다.

각 금형별 설계인자를 최적화시키기 위해 다구찌법을 적용한 유한요소해석 시뮬레이션을 적용하기 위한 수준 및 직교배열표를 작성하였다. Table 3~5에 설계변수 및 그

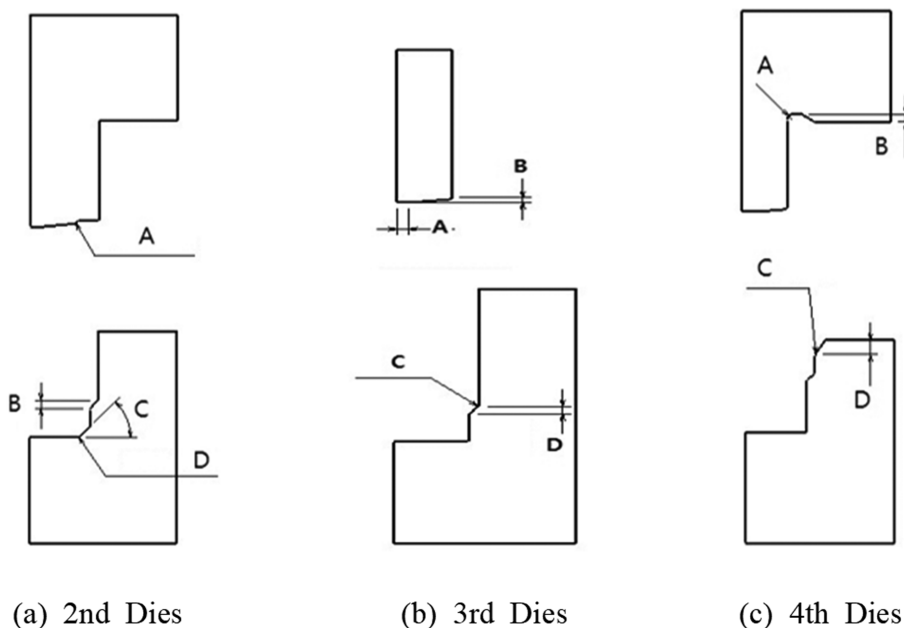


Fig. 9. Design parameters of 2nd, 3rd, 4th dies sets for cold forging.

Table 3
Design parameter of 2nd dies set

Design Parameters	Level		
	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
A (edge fillet radius)	R 0.1 mm	R 0.3 mm	R 0.5 mm
B (chamfer length)	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm
C (chamfer angle)	35°	45°	55°
D (edge fillet radius)	R 0.1	R 0.3	R 0.5

Table 4
Design parameter of 3rd dies set

Design Parameters	Level		
	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
A (contact length)	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm
B (chamfer length)	0.5 mm	1 mm	1.5 mm
C (edge fillet radius)	R 0.1 mm	R 0.3 mm	R 0.5 mm
D (chamfer length)	1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm

Table 5
Design parameter of 4th dies set

Design Parameters	Level		
	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
A (edge fillet radius)	R 0.5 mm	R 1.5 mm	R 2.5 mm
B (chamfer length)	1 mm	2 mm	3 mm
C (edge fillet radius)	R 0.1 mm	R 0.3 mm	R 0.5 mm
D (chamfer length)	2 mm	4 mm	6 mm

수준 값을 나타내었으며, 성형해석 시뮬레이션은 Table 2의 설계인자 조합을 바탕으로 Table 3(2번 금형셋), Table 4(3번 금형셋), Table 5(4번 금형셋)의 4인자 3수준 $L_9(3^4)$ 의 직교배열표를 작성하여 각 수준 조합에 따른 성형해석을 실시하였다.

6. 설계변경된 스포링 리테이터 금형의 성형해석 및 다구찌법 적용 결과

6.1. 2번 금형의 성형해석을 통한 다구찌법 적용 결과

Table 6에는 해석 결과 및 S/N ratio를 나타낸 표이며,

Table 6
S/N ratio analysis of $L_9(3^4)$ for 2nd forging stage

Simulation case No.	Dies forging load (ton)	S/N ratio (dB)	Simulation case No.	Dies forging load (ton)	S/N ratio (dB)
1	104	-40.34	6	197	-42.35
2	91.3	-39.21	7	69.2	-36.8
3	71.1	-37.04	8	131	-42.35
4	76.2	-37.64	9	93.5	-39.42
5	70.9	-37.01	Average		-37.17

Table 7
ANOVA table of 2nd dies set design parameters

Design parameters	Degree of freedom	Contribution rate (%)
A	2	1.59
B	2	9.17
C	2	87.38
D	2	1.86
Total	8	100

Table 8
Calculated optimal design parameters for 2nd dies set

Factor				Experiment condition
A	B	C	D	
A1 (R0.1)	B1 (2.5 mm)	C3 (55o)	D1 (R0.1)	A1B1C3D1

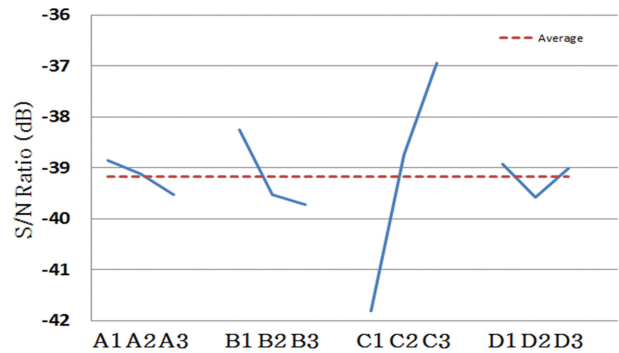


Fig. 10. ANOVA analysis of 2nd dies set.

case7 모델이 2번 공정에 있어서 최적의 결과로 나타났다. Table 7은 각 인자들의 자유도 및 기여도를 나타낸 표이다. 특히 여러 변수들 중에서도 하부 금형의 챔퍼 각도인 C가 87.38%로 가장 높은 기여율을 가진 것으로 나타났으며, Table 8과 Fig. 10은 성형해석결과에 대한 최적값과 ANOVA 분석결과이다.

6.2. 3번 금형의 성형해석을 통한 다구찌법 적용 결과

2번 성형공정에서 최적의 결과로 나온 case에 대한 3번 성형공정의 해석을 진행하였으며, Table 9는 3번 성

Table 9
S/N ratio analysis of $L_9(3^4)$ for 3rd forging stage

Simulation case No.	Dies forging load (ton)	S/N ratio (dB)	Simulation case No.	Dies forging load (ton)	S/N ratio (dB)
1	127	-42.08	6	124	-41.87
2	124	-41.87	7	124	-41.87
3	124	-41.87	8	123	-41.80
4	124	-41.87	9	126	-42.01
5	125	-41.94	Average		-41.91

Table 10
ANOVA table of 3rd dies design parameters

Design parameter	Degree of freedom	Contribution rate (%)
A	2	7.23
B	2	12.73
C	2	1.76
D	2	78.28
Total	8	100

형공정에 대한 각각의 성형하중 값과 S/N 비를, Table 10에는 각 인자들에 대한 자유도 및 기여율을 나타낸 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 3번 공정에서의 최적값은 Table 11과 같으며 이에 따른 ANOVA 분석결과는 Fig. 11과 같다.

3번 성형공정을 분석한 결과, 일정한 두께의 상부 금형으로 눌러 상부 금형 방향으로 길이를 늘려주는 후방 압출 공정이라고 할 수 있다. 이러한 후방압출 공정의 특징으로는, 초기에 금형이 압출 공정으로 발전하기 전 까지 성형하중이 증가하지만, 압출이 시작되면 일정한 범위 내에서 큰 하중의 변동 없이 공정이 진행된다는 것이다. 이러한 특성상 3번 성형공정에서는 설계인자들의 치수변화가 있다 하더라도 성형하중에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Table 11
Calculated optimal design parameters for 3rd dies set

Factor				Experiment condition
A	B	C	D	
A3 (3.5 mm)	B2 (1 mm)	C3 (R0.5)	D3 (3.5 mm)	A3B2C3D3

Table 12
S/N ratio analysis of $L_9(3^4)$ for 4th forging stage

Simulation case No.	Dies forming load (ton)	S/N ratio (dB)	Simulation case No.	Dies forming load (ton)	S/N ratio (dB)
1	180	-45.11	6	291	-49.28
2	199	-45.98	7	165	-44.35
3	478	-53.59	8	207	-46.32
4	167	-44.45	9	220	-46.85
5	191	-45.62	Average		-46.84

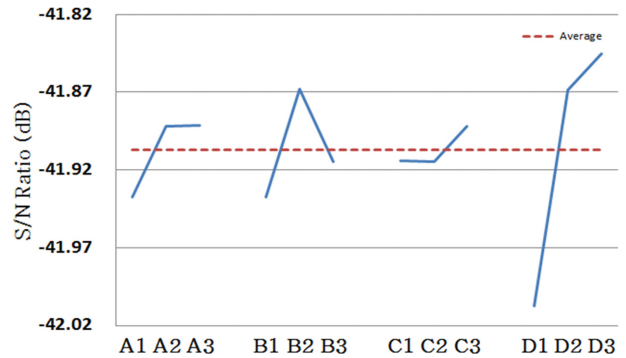


Fig. 11. ANOVA analysis of 3rd dies set.

6.3. 4번 금형의 성형해석을 통한 다구찌법 적용 결과

4번 성형공정은 스프링 리테이너의 피어싱(piercing)직 전 공정으로써 어떠한 형상으로 성형되느냐에 따라 가장 큰 금형 하중이 걸리는 최종형상의 금형 하중을 줄일 수 있는 중요한 공정이다. 이 공정에서는 내부에 구멍(hole)이 있어 가공 시 소재의 접힘(cold shut)이나 결속(under fill) 등의 불량 발생에 주의해야 하며, 반대의 경우 금형 하중이 크게 증가하므로 가공 조건 선택의 세밀한 주의가 필요한 공정이다.

Table 12에는 4번 성형해석을 통해 얻어진 각 실험조

Table 13
ANOVA table of 4th dies design parameters

Design parameter	Degree of freedom	Contribution rate (%)
A	2	13.36
B	2	65.33
C	2	9.56
D	2	11.75
Total	8	100

Table 14
Calculated optimal design parameters for 4th dies set

Factor				Experiment condition
A	B	C	D	
A3 (R2.5)	B1 (1 mm)	C2 (R0.1)	D1 (2 mm)	A3B1C2D1

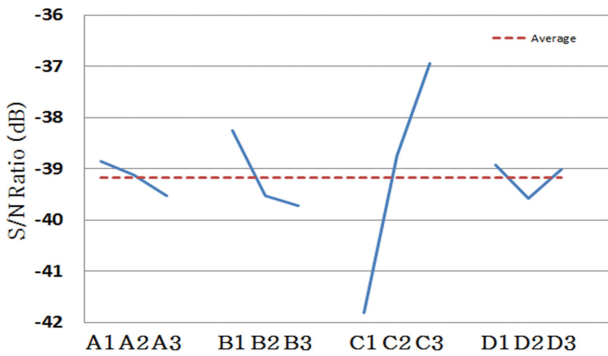


Fig. 12. ANOVA analysis of 4th dies set.

건에서의 성형하중과 S/N ratio를 나타냈다. Table 13에는 각 인자들에 대한 자유도 및 기여율을 나타내었다. Table 14에는 각 설계인자들의 자유도 및 결과에 대한 각 인자들의 기여도를 분석하였으며 상부금형의 챔퍼인 B 인자가 약 65%로 가장 큰 영향력을 보이고 있다. Table 14에는 4번 금형의 설계인자 최적 결과이며, Fig. 12는 이에 따른 ANOVA 분석에 따른 설계인자별 S/N ratio 특성을 나타내었다.

6.4. 금형 최적설계 적용에 따른 성형하중 비교

냉간단조금형의 성형하중 및 금형 응력집중 감소를 위해 2번, 3번, 4번 금형 설계인자를 4인자 3수준의 변수로 설정하고, 단조성형 해석 시뮬레이션과 다구찌법을 활용한 민감도 해석 등을 통해 최적설계인자를 결정하였다. 최적설계인자 조합을 활용한 냉간단조 금형설계 변경을 실시하고 최종 제품의 성형해석시뮬레이션을 통해 성형성, 성형하중 및 금형응력분포 등을 분석하였다.

Figure 13에는 금형 캐비티 내에서의 엔진밸브 스프링 리테이너의 단조성형단계에서의 유효변형률 변화와 성형

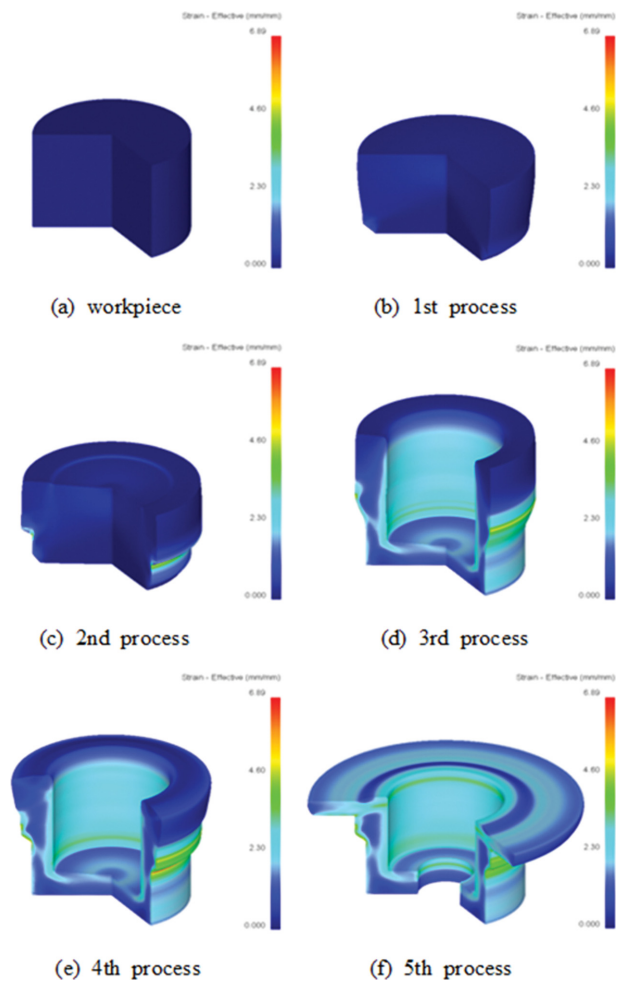


Fig. 13. Effective strain of optimized spring retainer workpiece.

Table 15
Forging load reduction effect due Cold forging die optimal design

Cold forging dies set No.	Forging Load (ton)		Forging load reduction ratio (%)
	Before design change	Optimal design	
1st Dies	88.6	83.2	6.1
2nd Dies	109.0	69.2	36.5
3rd Dies	130.0	123.0	5.4
4th Dies	230.0	167.0	27.4
5th Dies	446.0	366.0	18.0
Total	1,003.6	808.4	19.5

형상을 나타내었으며, Fig. 14에는 냉간단조금형에서의 유효응력 분포를 각각 나타내었다.

Table 15에는 이번 냉간단조금형형상 최적설계를 통해서 얻게된 성형하중 감소효과를 표로 정리하였다. 최적설계를 통해 확인된 성형하중은 기존 금형 사용시의 성형하중과 비교했을 때, 1번 업세팅 공정은 88.6 ton에서 83.2 ton으로 약 6.1% 감소, 2번 성형공정은 기존 109 ton에서 69.2 ton으로 약 36.5% 감소, 3번 성형공정은

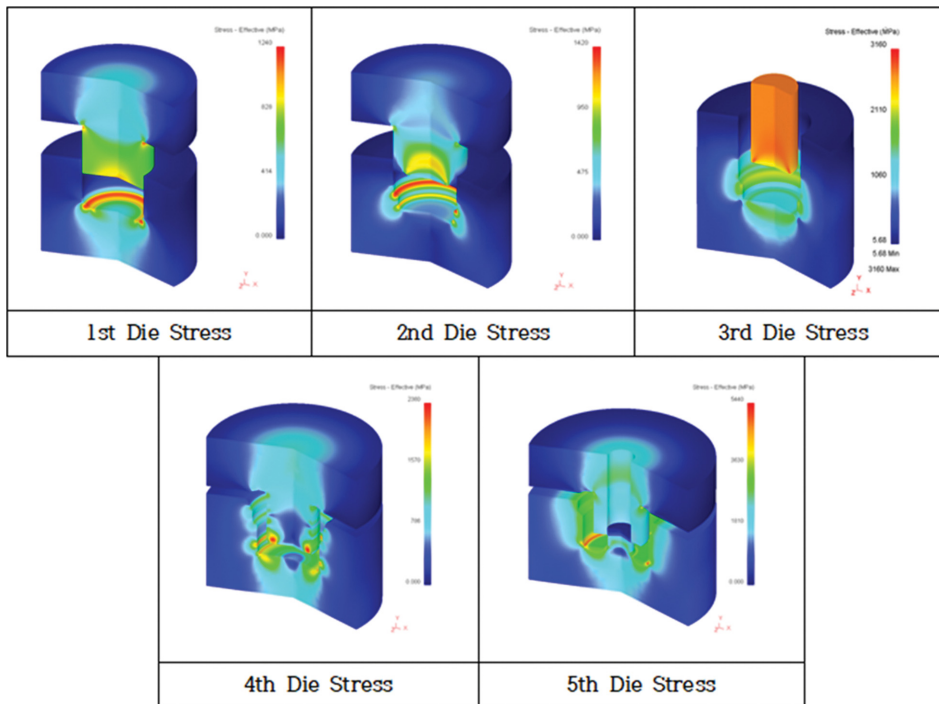


Fig. 14. Effective stress distribution of forging die at each steps.

130 ton에서 123 ton으로 약 5.4 % 감소, 4번 성형공정은 기존 230 ton에서 개선 후 167 ton으로 약 27.4 %의 감소가 이루어졌으며, 최종 5번 성형공정은 446 ton에서 366 ton으로 약 18 %가 감소하여 전체 성형하중은 1003.6 ton에서 808.4 ton으로 약 20 % 성형하중 감소효과를 얻을 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 기존 금형 캐비티 내에서의 소재 성형 유동 특성을 분석하였으며, 각 성형단계별 성형하중 변화와 금형 마모 및 파손에 영향을 줄 수 있는 금형 응력이 집중되는 주요 챔퍼부 및 필렛부를 확인하였다. 이를 바탕으로 실험계획법과 다구찌법을 이용하여 냉간단조금형의 주요 설계인자 및 수준을 변경에 따른 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 금형 마모 및 수명에 큰 영향을 줄 수 있다. 본 연구를 통해 도출된 최적설계인자를 반영한 최종 냉간단조금형 설계 변경을 실시하여 성형성 해석 및 성형하중 예측결과, 공정별로는 최대 36.5 %, 평균 약 20 %의 성형하중 감소효과를 얻을 수 있었다. 엔진의 고효율, 고출력, 고내구

성 목표가 높아짐에 따라 성형성 개선을 위한 성형공정 개발 및 금형설계의 최적화가 지속적으로 필요하며, 향후 연구 결과를 활용하여 현업에 적용하여 제품단조성형성 개선 및 금형수명관리를 위한 기술자료로 활용하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- [1] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-the-valve-system_fig1_225397750.
- [2] J.H. Kang, I.W. Park, J.S. Jae and S.S. Kang, "A study on a die wear model considering thermal softening", *J. of Material Processing Technology* 96 (1999) 53.
- [3] 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", *Transactions of Materials Processing* (1997) 164.
- [4] 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 Conference of Korean Society for Precision Engineering* (2006) 125.

- [5] T.H. Kim, B.M. Kim and J.C. Choi, "Prediction of tool wear in cold forming", J. of Mechanical Science and Technology (1994) 744.
- [6] S.H. Hwang, J.H. Lee, B.M. Kim, T.H. Kim and D.J. Kim, "Estimation of waer characteristic for cold form die materials", Korean Society for Precision Engineering (1998) 138.
- [7] 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. Material Processing Technology 31 (1992) 255.
- [8] W.F. Hosford and R.M. Caddell, "Metal forming", Prentice Hall (1993).
- [9] J.N. Reddy, "Finite element method", McGraw Hill (1993).
- [10] DEFORM 3-D ver10.1.2 user manual (2010).