

다단냉간단조 비가공 타입에서 볼하우징 인서트 다이의 금형설계 검증

황원석^{*,**}, 최종원^{*}, 정의은^{*}, 강명창^{**,#}

^{*}대한메탈(주) 기술연구소, ^{**}부산대학교 융합학부,

Mold-design Verification of Ball Housing Insert Die in Non Processing Type Multi-stage Cold Forging

Won-Seok Hwang^{*,**}, Jong-Won Choi^{*}, Eu-Enn Jung^{*}, Myungchang Kang^{**,#}

^{*}R&D Center, Deahan Metal Co. LTD, 39 Gongdan 8-ro, Jillyang-eup, Gyeongsan-si,
Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

^{**}Graduate school of convergence science, Pusan National University, Busan 46241,
Republic of Korea

(Received 13 September 2021; received in revised form 24 September 2021; accepted 09 October 2021)

ABSTRACT

Cold forging is a method in which molding is performed at room temperature. It has a high material recovery rate and dimensional precision and produces excellent surface quality, and it is mainly used for the production of bolted or housing products. The lifespan of cold forging molds is generally determined by the wear of the mold, plastic deformation of the mold, and fatigue strength. Cold forging molds are frequently damaged due to fatigue destruction rather than wear and plastic deformation in a high-temperature environment as it is molded at room temperature without preheating the raw material and mold. Based on the results analyzed through FEM, an effective mold structure design method was proposed by analyzing the changes in tensile and compressive stresses on molds according to the number of molds and reinforcement rings and comparing the product geometry and mold stress using three existing mold models.

Keywords: Multi-stage Cold Forging(다단냉간단조), Die Design(금형설계), Dies Lifetime(금형수명), Ball Housing (볼 하우스), Stress-Max Principal(주 응력)

1. 서 론

냉간단조는 상온에서 성형이 이루어지는 단조공법으로 높은 재료회수율, 치수정밀도 및 우수한 표면품질이 장점이며, 주로 볼트류와 하우스류 제품 생산에 적용되고 있다^[1]. 자동차 스티어링 링크지의 구성부품인 볼 하우스는 스티어링 기어와 바퀴 사이를 연결하

는 기계적 구성요소로써 MDPS모터에서 발생하는 조향 방향성을 유니버설하게 전달하고 차축 및 전륜의 정렬을 유지하는 부품으로 모듈 구조를 Fig 1에 나타내었다. 볼 하우스는 일종의 체결부품으로서 기능에 따라 원형, 이각, 사각, 육각, 팔각형 형태의 다양한 조립 형상과 기능부로 구성되어있다.

하지만 다양한 이형 형상은 단조 작업시 응력이 집중되는 문제^[2]로 인해 금형파손의 주요 원인이 되고 생산의 효율적 측면과 금형의 수명향상으로 인한 원가 경쟁력이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 단조 금형의

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-518-3360

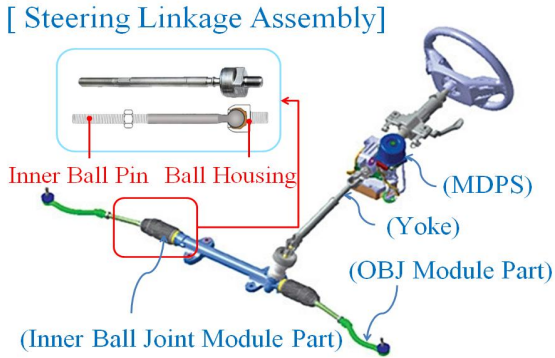


Fig. 1 Steering linkage assembly housing configuration

수명은 일반적으로 금형의 마모, 금형의 소성변형 및 피로강도에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 냉간 단조의 경우 원소재 및 금형의 예열과정 없이 상온성형이 이루어 짐으로 고온환경의 금형의 마모 및 소성 변형보다는 피로파괴에 의해 금형이 파손되는 경우가 빈번한 것으로 알려져 있다^[3].

본 연구에서는 자동차용 조향장치인 볼 하우스징 (Ball Housing)의 원가절감을 위한 내경 비가공형태의 성형공정과 다단공정시 발생하는 인서트 (Insert) 금형의 파손 부위를 예측하고 유한요소해석(FEM)을 통해 분석된 결과를 바탕으로 인서트 금형의 응력 집중을 감소시키기 위한 금형 분할과 박음량 제어 및 보강링 개수에 따른 금형에 작용하는 인장과 압축응력의 변화량을 분석하였다. 금형 수명을 향상시키기 위해 기존의 일반적인 금형 조립 형태와 초경과 보강링 조립 형태에 따라 세 가지 금형 모델을 사용하여 제품 형상 및 금형 응력을 비교 분석함으로써 효과적인 금형 구조설계 방법을 제시하였다.

2. 단조공정 설계

2.1 볼 하우스징 공정설계

볼 하우스징 제품은 자동차 부품에 주로 사용되고 있는 냉간단조용 선제인 SWRCH25K 킬드강(Killed Steel)이 사용되고 있다. 분석된 화학 조성 및 기계적 특성은 KSD 3592 기준을 참고하였으며, Table 1에 나타내었다.

육각 볼 하우스징의 최종 제품도를 기초로 6단계 공정 설계를 진행하였으며, Fig. 2에 나타내었다.

냉간단조용 볼 하우스징의 공정도는 Fig. 3에 나타내었다. 와이어 형태의 원소재를 직선화하고 고정다이 스와 절단 나이프를 사용하여 절단 후, 1~2단계 공정에서 단면 예비성형 후 3단계 공정에서 전방압출을 이용하여 단면감소를 62%의 기초경 작업과, 4~5단계

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SWRCH25K

Wt (%)					Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)
C	Si	Mn	P	S			
0.22 ~0.28	0.10 ~0.35	0.30 ~0.60	max 0.030	max 0.035	514	410	17

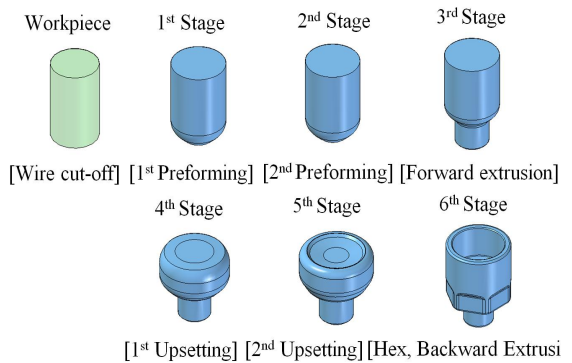


Fig. 2 Schematic of the multi-stage cold forging process

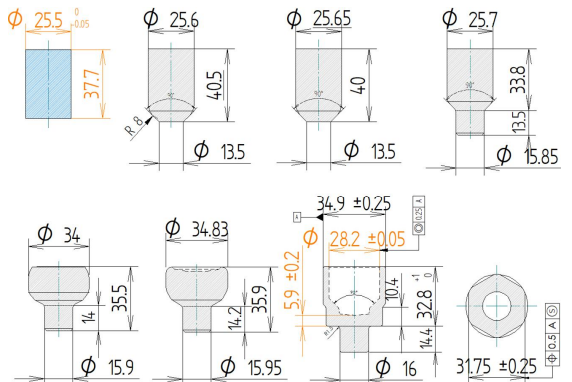


Fig. 3 Cold forging process ball housing design

공정에서는 업셋팅 공법을 이용하여 제품을 최대한 충전하고, 6단계 공정에서는 후방압출 공정을 통한 내경부 비 가공 형상과 외관부 육각(Hex) 성형작업을 통해 최종 제품의 형상을 반영한 공정설계를 진행하였다. 특히 원가절감을 위한 내경부공차 $\varnothing 28.2 \pm 0.05$ 부와 바닥부 두께 5.9mm를 중점을 두었다.

3. 공정 및 금형 유한요소해석

3.1 단조공정 해석

단조 공정 분석을 위해 3차원 설계 프로그램인 Solid Edge를 이용하여 공정 및 금형 모델링을 진행하였다. 또한 DEFORM-3D V11를 이용하여 단조성형 및 금형 응력에 대한 유한요소해석을 진행하였으며, 해석 조건은 Table 2에 나타내었다. 빠르고 정밀한 해석을 위해 1/4분할(90°) 조건을 적용하였으며, 소성변형 과정에서의 발열 및 금형 열전달을 반영하였다. 요소 수는 40,000개로 설정하였다.

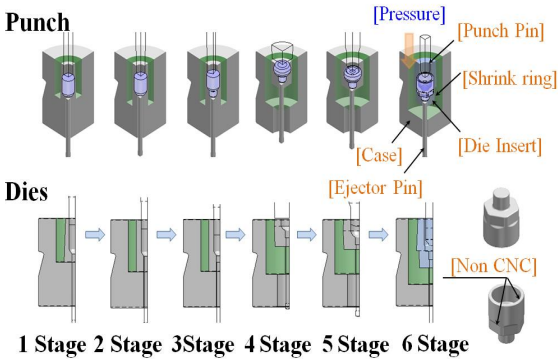


Fig. 4 Multi-Step process mold simulation conditions

Table 2 Boundary conditions for the FEA

Process Conditions	Value
DEFORM-3D	quarter (90°)
Initial specimen Diameter	25.5 mm
Initial specimen Length	37.7 mm
Friction μ	0.08
Punch velocity	150 mm/s
Temperature of Specimen	20 °C

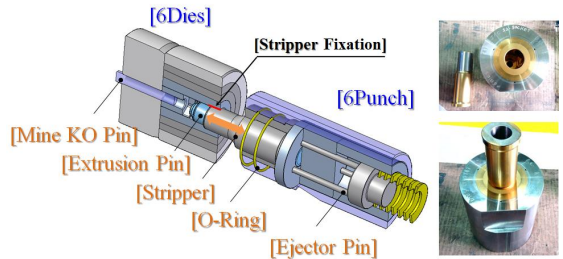


Fig. 5 Concentricity management using O-Ring method

Table 3 Forging process product analysis result value

Stage No.	1Stage	2Stage	3Stage	4Stage	5Stage	6Stage
Effective Stress [MPa]	583	613	712	720	725	810
Damage	0.065	0.067	0.22	0.23	0.23	0.33
Load [ton]	49.6	28.0	51.2	107.6	176	141.6

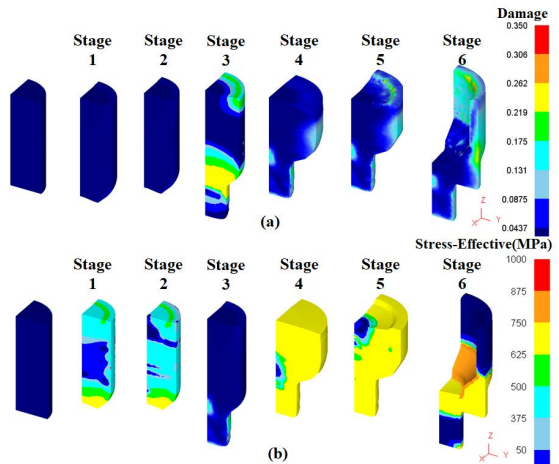


Fig. 6 Analysis results (a) Analysis Damage (b) Analysis Stress-effective

내경 비가공 불하우징 성형을 위한 금형 조립 구조에 대한 모식도는 Fig. 4에 나타내었다. 구성은 상부 펀치부와 하부 다이스부, 제품을 취출하는 밀핀부로 이루어져 있으며 성형을 위한 형상부는 초경재료(WC-Co)로 방진, 연마 및 와이어, 래핑, 절삭가공을

통하여 정도 ± 0.01 수준으로 제작되었다.

특히 Fig. 5는 6단계 공정으로 내경 비가공 성형을 적용하기 위해 동심도 관리가 핵심 화두며 통상 0.25mm수준 이하 관리가 필요하다. 하지만 냉간단조 특성상 펀치부가 독립적으로 조정되는 형태로 작업자의 숙련도에 따라 편차가 발생할 수 있다. 일괄적인 동심도 관리를 위해 펀치 금형에 O-Ring을 적용하였으며, 스트리퍼 외경과 다이스 내경 공차를 0.02mm로 관리하여 후방 압출시 금형 유동을 최소화하였다. 실제 단조 검증시 0.12mm미만의 우수한 동심도가 확보되었다.

단조해석결과에서 형상은 설계된 공정과 실험결과가 일치하게 나왔으며 데미지값은 최소 0.065, 최대값 0.33을 보였으며, Table 3과 Fig. 6(a)에 나타내었다.

Fig. 6(b)에는 유효응력값을 나타내고 있으며, 583 ~ Max 810 MPa로 최종 제품에서 집중부하가 확인되었다. 제품 성형을 위한 예상 하중은 554ton으로 Fig. 7을 통하여 나타내었으며, 장비 제원표상 600ton 범위에 만족하였다.

3.2 단조금형 설계

단조금형 설계에 있어서 우선 고려되어야 할 사항은 금형이 접촉압력을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 단조과정에서 소재가 금형에 작용하는 힘으로 인해 발생하는 금형응력 및 변형을 예측하여 금형파손을 방지할 수 있는 적절한 금형

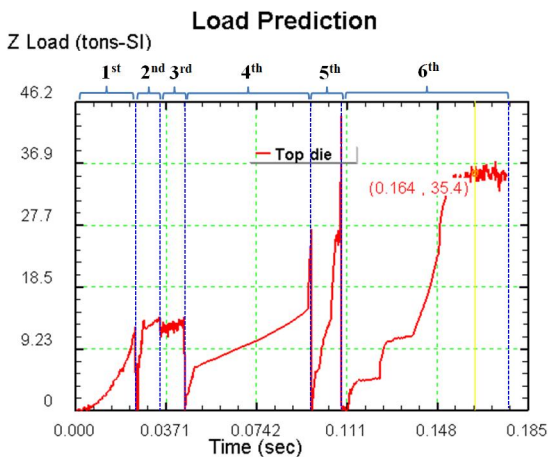


Fig. 7 Forging load prediction by FEA Analysis

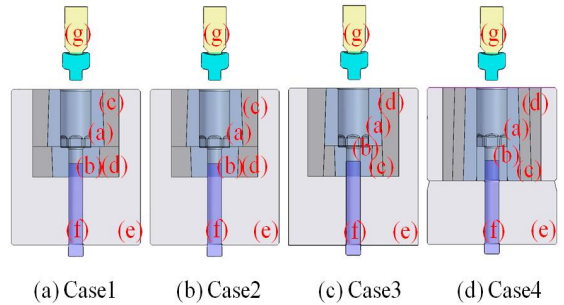


Fig. 8 Mold Design and Die Segmentation Method
 (a) Insert die1, (b) Insert die2, (c) Stress ring1, (d) Stress ring2, (e) Case, (f) Ejecting pin, (g) Punch

Table 4 Cold forged mold assembly type

No.	Case 1	Case2	Case3	Case4
Insert	WC+Co	WC+Co	WC+Co	WC+Co
Ring Type	Single ring	Single ring	Double ring	Double ring
Case Type	All-in-one	All-in-one	All-in-one	Prefabricated mold
Shrink Fit	0%	0.7%,0.4%	0.7%,0.4%	0.7%,0.2%

분할설계가 필요하다. 또한 금형 수명을 향상시키기 위하여 보강링의 사용이 필수적이며 단조과정에서 금형 열박음으로 인한 금형간의 접촉압력에 대한 예측이 필요하다^[4].

집중 응력 발생 공정의 금형 구조와 조립 형태를 Fig. 8을 통하여 나타내고 있으며, 주요 변수는 압입대를 기준하였다. Case1은 열박음을 주지 않은 조건을, Case2~Case3은 일체형으로 케이스에 인서트 초경을 열박음하였다. Case4는 초경에 초경을 후방압입하는 형태로 유압기를 이용하여 50ton의 힘으로 조립하였다. 조건별 해석에 사용된 금형의 조립 형태는 Table 4에 나타내고 있다.

3.3 단조금형 해석

금형응력해석을 진행하는 이유는 제품의 반복적인 생산으로 인한 금형파손을 미리 예방하고, 금형 설계

시 보강링의 적용으로 금형의 수명을 증가시키는데 그 목적이 있다^[5].

금형에 하중이 가해지면 금형이 인장응력 상태에 놓이게 되어 금형이 쉽게 파괴될 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 금형을 인서트(Insert)와 보강링(Compressive ring)으로 분할하여 압축응력을 부과하는 금형 압입(Shrink fitting) 처리를 하게 된다. 금형의 분할과 압입량은 금형응력 상태에 직접적인 영향을 주는 인자로서 소재의 성형 형상에 따라 결정되어야 하지만 현업에서는 경험에 따라 부여하는 경우가 많아 금형수명 편차의 주요 원인이 되고있다^[6].

불 하우징의 금형 파손 유형을 Fig. 9에 나타내고 있으며 주요파손 부위는 상부다이 육각 코너 라운드 Fig. 9(a)와 하부다이 평면부위 Fig. 9(b), Fig. 9(c) 보강링이다. 금형 해석에 사용된 물성치 및 데이터는 Table 5에 나타내었다.

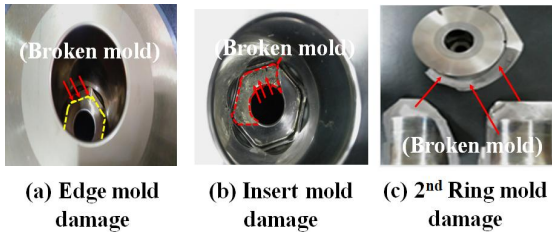


Fig. 9 Experimental set-up for multi-stage cold forging and the dies used in this test

Table 5 Boundary conditions for the FEA

Part	Material	Elastisity [GPa]	Possion's Ratio	Yield Stress [MPa]
Insert (a)	WC+Co	468	0.23	2100
Insert (b)	WC+Co	470	0.23	2200
1st Ring (c)	STD61	215	0.3	1380
2nd Ring (d)	STD61	215	0.3	1380
Case (e)	SCM440	205	0.3	1110
K/pin (f)	SKH51	201.7	0.3	-
Punch (g)	WC+Co	619	0.23	1210

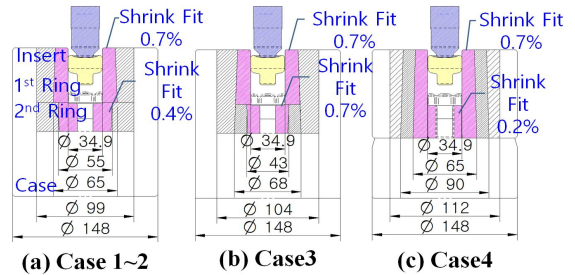


Fig. 10 Mold dimensions and Shrink Fit conditions

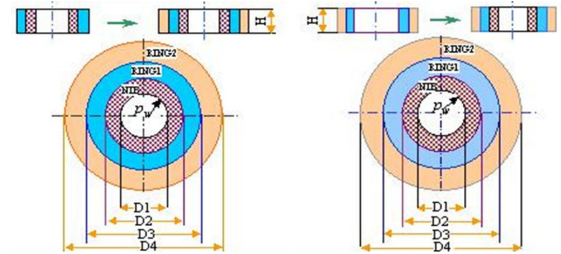


Fig. 11 Criteria for the selection of shrink fit of molds

금형 응력해석은 금형을 탄성체로 가정하여 내압을 부가하여 금형 응력해석을 수행하였다^[7]. 해석 모델의 요소 수는 모델 크기에 따라 32,000~60,000개를 사용하였고 경계조건은 1/4모델을 이용하였다.

금형구조에 따른 금형치수와 열박음량을 도식화하였으며, Fig. 10에 나타내었다. 보강링 외경은 케이스 및 제품의 외경과 부하량을 고려하여 계산할 수 있으며, Fig. 11의 기준에 근거하여 식 (1), (2)로 구할 수 있다. 식 (1)을 통하여 1차 보강링에 대한 기준을 도출할 수 있으며, 식 (2)를 통하여 2차 보강링 기준을 도출할 수 있다.

$$D2 = \sqrt[3]{Internal\ dia.D1^2 \times External\ diameter\ D4} \quad (1)$$

$$D3 = \sqrt[3]{Internal\ dia.D1 \times External\ diameter\ D4^2} \quad (2)$$

여기서 D1은 제품의 외경 지름이며, D2는 초경의 지름, D3는 1차 보강링 지름, D4는 케이스의 지름을 말한다. 금형 인서트는 초경재질(WC-Co)을, 1~2차 보강링은 금형강인 STD61을, 케이스는 합금강 SCM440 소재가 사용되었다. Table 6은 초경, 보강링, 케이스의 강종 및 경도값을 나타내고 있다.

Table 6 Material and hardness of the final selected mold

Part	Insert (a)	Insert (b)	1st, 2 nd Ring (c)(d)	Case (e)
Material	WC-Co (G6)	WC-Co (M8)	STD61	SCM440
Hardness	HRA 85.5~86.5	HRA 81.3~82.3	HRC 50~52	HRC 40~44

4. 실험결과 및 고찰

4.1 금형 구조해석 결과

금형구조에 따른 금형응력을 비교 분석하기 위해 성형과정에서 금형에 작용하는 내압은 동일한 것으로 판단하고 해석을 진행하였고^[8], 그 해석 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

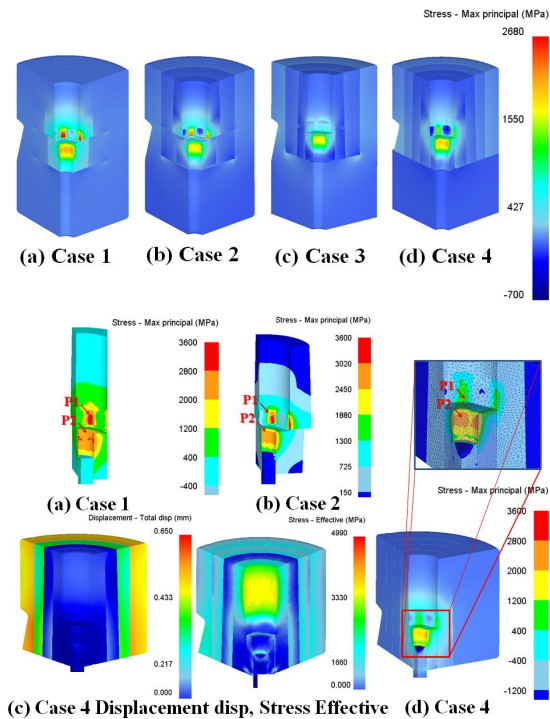


Fig. 12 Analysis results of die stress for split die

Table 7 Maximum principle stress of die/Tool life

Part	Type	Material	Stress Max Principal [MPa]	Die life [number of pieces produced]
Shrink Fit 0%	Case1 (0 ring)	WC-Co(P1)	2750	-
		WC-Co(P2)	2160	-
Shrink Fit 0.2%	Case2 (1 ring)	WC-Co(P1)	2050	200
		WC-Co(P2)	1750	220
0.4%	Case3 (2 ring)	WC-Co(P1)	1840	2,000
		WC-Co(P2)	1640	2,400
0.7%	Case4 (2 ring)	WC-Co(P1)	1340	22,000
		WC-Co(P2)	1310	22,000

네 가지의 열박음 조건과 분할설계 금형의 응력해석 결과에서 응력의 분포를 비교하여 볼 경우 (a)Case1과 (b)Case2에서 최대 주응력이 높음을 알 수 있었고 (c)Case3~Case4의 2중 박음 금형에서 응력집중이 완화된 것을 확인할 수 있었다.

해석 결과에서 나타나듯 상팁에서 발생하는 인장값은 Fig. 12(a)에서 Fig. 12(d)로 갈수록 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 최대주응력(Maximum principle stress)은 Case1에서 2750MPa로 가장 높게 나타났다. 1중 박음 형태인 Case2는 2050MPa로 응력 집중이 계속되었으며, 2중 박음 형태인 Case3은 하팁부분 보강 후 하팁을 2중으로 보강하는 형태로 Case2 보다는 보완되어 1840MPa로 나타났다. Case4에서 1340MPa로 가장 작은 최대주응력값으로 금형 수명이 가장 우수할 것으로 추론할 수 있다.

해석을 기초로 한 금형 제작과 단조 테스트를 진행하였으며, 예상 수량과 실제 금형 타수를 Table 7에 나타내었다. 금형 수명 예측결과에 대한 타당성 검증을 위하여 1중 박음과 2중 박음으로 제작된 금형의 실제 타발 수량을 비교하였다. Case2은 1중 박음으로 200개 미만의 수량이 확인되었으며, Case3은 보강링 2중 박음으로 2,000개의 타발 수량이 확인되었다. Case4는 초경에 초경을 2중 박음한 형태로 22,000개의 가장 우수한 타발 수량이 확인되었다. 실제 금형에서도 최대 주응력값의 개선된 차이가 나타났다.

Fig. 13은 금형 수명을 테스트한 결과로 1중 박음과

2중 박음 금형의 파손 형상 및 단조품을 나타내었다. 금형의 파손 부위를 관찰하여 볼 때 금형응력해석 결과에서 응력집중이 발생한 위치와 동일한 지점에서 발생한 것을 알 수 있다^[9].(Case2~Case3 금형파손)

단조 금형의 주요파손 원인은 성형하중과 금형구조, 예비성형 형상, 윤활조건, 작업자의 노하우와 작업조정 등 다양하지만^[10] 금형 구조적인 측면에서 볼 때 초경의 크기와 보강링의 수, 압입대의 변경 만으로 금형 수명을 향상시키는 데에는 한계가 있으며 다양한 금형의 구조를 고안하여 적용시 효과가 극대화되는 것을 본 연구를 통하여 알 수 있었다.

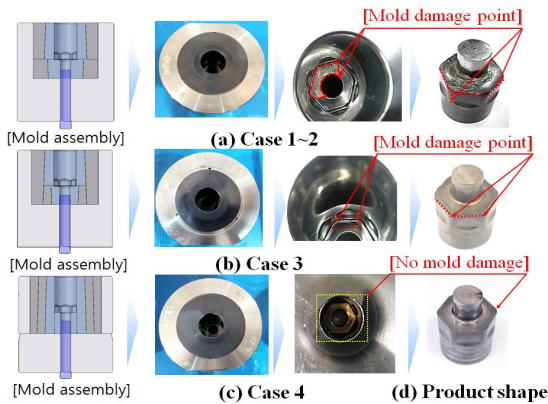


Fig. 13 Analysis results of die stress for split die



Fig. 14 Final results of multi-stage cold forging process.

Fig. 14 (a), (b)는 최종 제품과 공정품이며 Fig. 14 (c), (d)는 내경부 형상으로 비가공 형태로 적용이 가능한 수준의 조도와 성형이 이루어 졌고, Fig. 14 (e)는 내경 비가공 형태의 불 하우징의 특징인 바닥부 두께가 얇아짐으로 인한 랙바 조립 시 목부 단류선 파단과 같은 이상은 발생되지 않았으며 단류선 흐름도 이상 없음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 불 하우징의 내경 비가공 방식 적용과 냉간단조 공정에서 발생하는 공정간 응력과 금형의 응력집중 현상을 방지하기 위해 여러 형태의 금형구조를 설계하여 유한요소해석법을 통해 정량적으로 수치화하고 실제적인 금형을 제작하여 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CAE 해석을 통하여 내경 비가공 불 하우징의 성형 하중과 소재 유동특성을 고려한 공정을 설계할 수 있었고 최적의 예비성형을 반영한 설계를 함으로써, 제품의 결합과 금형 파손을 사전에 해결하였다.
2. 기존금형(Case1, 2)에 비해 금형 구조를 변경하여 응력집중이 발생하는 지점에(Case3, Case4) 최대 주응력 값의 감소는 금형의 수명에 직접적인 영향이 있으며, 금형 수명을 고려한 금형설계가 이루어져야 함을 확인하였다.
3. 2중 보강링을 이용하여 열박음 한 후 후방압입을 통해서 인서트 금형을 조립하면 에어 배출과 분할된 지점의 응력분포가 균일하며 모서리 부분의 응력집중 현상이 작게 나타난다. 금형수명향상을 위해 인서트 조립법을 사용하는 것이 유리하다.
4. 냉간단조품의 품질 향상과 원가절감, 수명향상을 위한 금형구조와 제작조건에 대한 중요도를 확인할 수 있었고 해석과 실제 금형을 연속 작업을 통하여 검증하고 적용하였다.
5. 불 하우징의 비가공 타입 적용을 통한 원가절감과 제조리드타임 단축을 통한 글로벌 경쟁력 확보와 기술개발을 동시에 제시하였다.

후 기

“이 논문은 2019년 산업소재혁신기술개발사업 연구비 지원에 의하여연구되었음.(NO.20006979)”

REFERENCES

1. Kwon, I. W., Seo, Y. H., Jung K. H., “Development of Uniaxial Tensile Test Method to Evaluate Material Property of Tungsten Carbide-Cobalt Alloys for Cold Forging Dies“, Journal of The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 27, No. 9, pp. 370-378, 2018.
2. Lee, M. C., Joun, M. S., “Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Multi-Stage Automatic Cold Forging Processes by Combined Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Approaches“, The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 17, No. 3, pp. 155-160, 2008.
3. Suh, D. Y., Lee, M. C., Joun, M. S., “Elastic Finite Element Analysis of the Cold Forging Dies Prestressed by Shrinkage Rings“, Journal of The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 7, No. 4, pp. 347-353, 1998.
4. Qiu, Y. G., Cho, H. Y., “A Split Die Design for Forging of Hexagonal Bolt Head“, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 5, pp. 91-97, 2020.
5. Kim, H. M., Lee, H. J., Kim, T. B., Sin, K. S., Park, Y. B., “Precision Cold Forging of Battery Clamp Using Finite Element Analysis“, Journal of The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, pp. 72-74, 2011.
6. Ahn, K. H., Cho, H. Y., Heo, S. J. and Kang, J. H., “A Study on the Cold Forging Die Design for the Adapter of Automobile Engine Mount considering Tool Service Life“, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 36, No. 12, pp. 1-9, 2019.
7. Jung, T. W., Kim, S. W., Lee, Y. S., Moon, Y. H., Nam, J. H., “A Study on the Split Die to Prevent Stress Concentration under Cold Former Forging Process“, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 2, pp. 249-250, 2010.
8. Seo, Y. H., “Research Prediction and Reduction Method of Manufacturing Cost of Automobile Steering Parts Based Quantitative Prediction Technology of Cold Forging Mold Life“, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 726-732, 2020.
9. Lee, H. C., Saroosh, M. A., Song, J. H., Im, Y. T., “The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes“, journal of materials processing technology, Vol. 109, pp. 3766-3775, 2009.
10. Seo, J. H., “A study on the relationship between stress concentration factor and fatigue stress concentration factor for die life prediction in cold forging“, A Thesis for a Master degree, Korea University, 2019.