

자동차 조향장치 부품 요크의 온간 밀폐 단조 적용을 위한 금형 응력 저감 설계 및 온간 단조품의 기계적 특성 분석

성상규¹· 김기한²· 이영선³· 이상용⁴· 윤은유^{5,#}

Die Stress Reduction Design and Mechanical Properties Analysis of Warm Forging Process for the Application of Warm-Closed Forging of Automotive Steering Unit Yoke

S. G. Seong, K. H. Kim, Y. S. Lee, S. Y. Lee, E. Y. Yoon

(Received January 17, 2022 / Revised February 4, 2022 / Accepted February 4, 2022)

Abstract

In this study, finite element analyses were performed by applying a stress ring and split die design to relieve the tensile stress acting on the die due to high surface pressure during warm-closed forging. The applied material was a yield-ratio-control-steel (YRCS). It was used without quenching or tempering after forging. In the case of stress rings design, the number of stress rings and the tolerance for shrink fit were different. Vertical and horizontal splits were applied for insert die split design. Case 5 die with three stress rings, 0.2 % shrink fit tolerance, and vertical split was selected as an effective die design for tensile stress reduction. Based on die stress reduction analyses, Case 5 die for warm-closed forging was produced and smooth forgeability was secured, making it possible to manufacture forging product of yoke with the required geometry. In addition, controlled cooling using warm forging heat was applied to secure mechanical properties of yokes. When oil cooling was used for direct controlled cooling after warm-closed forging, a relatively uniform Rockwell hardness distribution and high mechanical properties could be obtained.

Keywords : Steering unit, Warm forging, Die stress reduction design, Control cooling, Mechanical property

1. 서 론

대량생산이 가능한 단조 산업은 절삭 가공으로 제조되는 부품에 비해 가격경쟁력과 동시에 단조 공정을 통해 가공경화를 유도하여 높은 기계적 특성을 확보할 수 있어 자동차 부품 산업에 많이 적용되어 왔다[1-3]. 최근 전기 자동차 산업의 발전에 따라 배터리 중량이 증가하여, 부품의 경량화와 고강도화 그리고 비용절감에 관한 연구를 필요로 하

고 있다. 기존 철강 소재로 제조된 부품들은 냉간 단조로 제조될 경우 높은 기계적 특성과 치수 정밀도를 확보할 수 있으나 높은 성형 하중이 필요하며, 열간 단조로 제조될 경우 낮은 성형하중으로 성형할 수 있는 반면 치수 정밀도, 금형 수명이 저하된다. 또한, 냉간 및 열간 단조 후 모두 단조품의 요구 특성을 만족시키기 위해 조질처리(Q/T)를 통해 기계적 특성을 확보하는 공정이 필요하다[4]. 이러한 냉간 단조와 열간 단조의 복합적인 문제를 해결하기 위한 방법으로 온간 단조를 적용할 수 있다. 온간 단조는 냉간 단조와 열간 단조 각각 공정에서의 단점 대비 장점으로 낮은 성형하중, 높은 치수정밀도와 금형 수명 등을 동시에 확보할 수 있으나 복

1. 한국재료연구원 파워유닛스마트제조센터, 연구원

2. Central Motek 단조설계팀, 사원

3. 한국재료연구원 부원장실, 책임 연구원

4. 국립안동대학교 재료성형디자인실험실, 교수

5. 한국재료연구원 재료공정연구실, 선임 연구원

Corresponding Author : Korea Institute of Materials Science

E-mail: eyyoon@kims.re.kr. ORCID : 0000-0002-7863-2986

합적으로 나타나는 특성을 제어하기 위해서 정밀 공정 설계에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존에 탄소강(S45C)을 이용하여 열간 단조 공정으로 제조되어온 자동차 조향장치 부품 중 하나인 요크에 항복비제어강(yield ratio control steel, YRCS)을 온간 밀폐형 단조를 적용하였으며 금형 응력 저감 설계를 통해 원활한 단조성을 얻기 위한 유한요소해석과 후열처리(Q/T) 공정 없이 단조 공정을 통한 가공경화와 단조열을 이용한 제어냉각을 통해 기계적 특성을 확보하고자 하였다.

2. 온간 밀폐 단조 공정 설계

2.1 항복비제어강 적용

항복비제어강[5]은 비조질강 소재로 소성가공 후 열처리 공정 없이 우수한 가공경화 특성으로 높은 기계적 특성을 얻을 수 있는 소재이다. 또한 온간 단조 영역까지 가열하여 단조 후 단조열의 제어냉각을 활용하여 조질처리(Q/T) 없이 기계적 특성을 확보할 수 있는 소재이다. 후열처리 공정이 생략됨에 따라 치수 제어가 용이하며 기존 열간 단조로 제조된 부품에 비해 생산성과 경제성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

2.2 유한요소 해석 공정 설계

항복비제어강 소재를 이용한 요크 제조 공정은 온간 밀폐 단조를 적용하였으며 치수 정밀도와 재료 이용율을 높이기 위해 밀폐 단조를 적용하였으나 밀폐 단조시 금형에 작용되는 높은 면압으로 성형 하중이 높아지게 되며[6] 금형 수명, 생산성을 저하시키는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 성형 하중을 낮추고 원활한 단조성을 확보하기 위해 금형 응력 저감 설계를 진행하였다. 설계 방법으로는 보강링[7], 내부금형 분할[8] 설계를 적용하였으며 보강링 설계의 경우 보강링 개수와 열박음 공차에 차이를 두고 내부금형 분할 설계 방법으로는 수직 및 수평 분할을 적용하여 유한요소해석을 진행하였다. 온간 밀폐 단조 유한요소해석에 사용된 소재는 항복비제어강 원소재로 직경 Φ 29.0, 높이 66.2 mm의 원통형 빌렛을 이용하였으며 성형품 모델 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 고온압축시험을 통해 얻어진 유동곡선을 Voce equation으로 가공경화 거동을 모델링한 물성을 얻었으며, 유한요소해석에 항복

비제어강의 물성으로 활용하였다. 유한요소 해석 프로그램은 Forge NxT 3.2를 이용하였으며 단조 공정은 KO pin 가압에 의한 밀폐 단조로 Fig. 3에 구현된 모식도를 나타내었다. 유한요소 해석 경계조건은 Table 1과 같다.

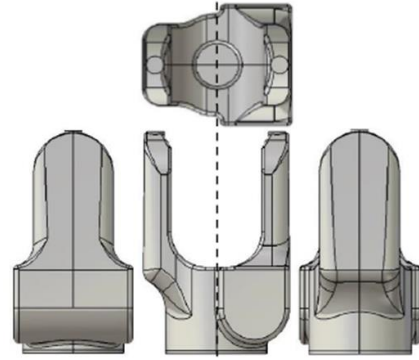


Fig. 1 End yoke model

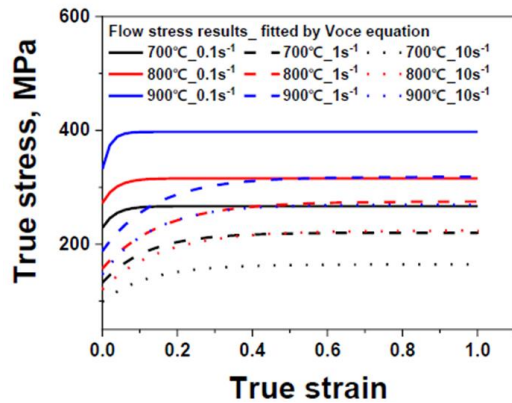


Fig. 2 FE input data fitted with the voce equation

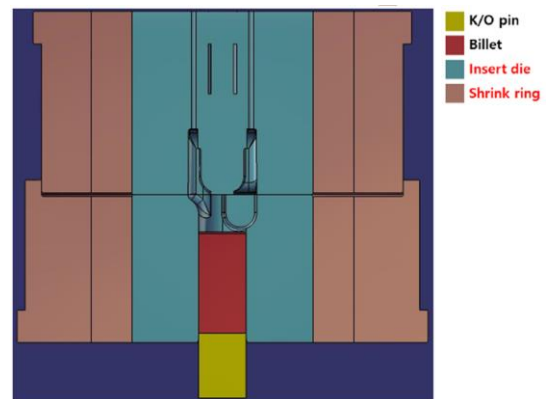


Fig. 3 End yoke FE analysis model

Table 1 FE analysis conditions

Software	Forge NxT 3.2
Problem definition	3D 180° symmetric
Punch Speed	100 mm/sec (KO Pin)
Billet Temp.	800 °C (Warm forging)
Die Temp.	250 °C
Friction	m : 0.6
Mesh size	0.2 ~ 2 mm
Thermal exchange with dies	2 X 10 ⁻⁴ W/m ² /K
Virtual interference fit	0.2 % : 0.110, 0.160, 0.240 0.5 % : 0.198, 0.288, 0.432

2.3 보강링 설계 및 응력 해석

Table 2 에는 보강링 개수 및 열박음 공차에 따른 보강링 설계 조건을 나타내었으며 Case 1 ~ Case 4 의 4 가지 조건으로 유한요소 해석이 진행되었다. 해석 결과는 Fig. 4 에는 초기 금형의 압축응력과 최종성형높이에서의 금형의 최대 인장응력을 비교하였으며 Case 1 은 기준 금형으로 분류하였다.

Table 2 Stress ring design conditions

Conditions	Number of stress ring	Shrink fit
Case 1(ref.)	0 EA	0.00 %
Case 2	2 EA	0.20 %
Case 3	2 EA	0.50 %
Case 4	3 EA	0.20 %

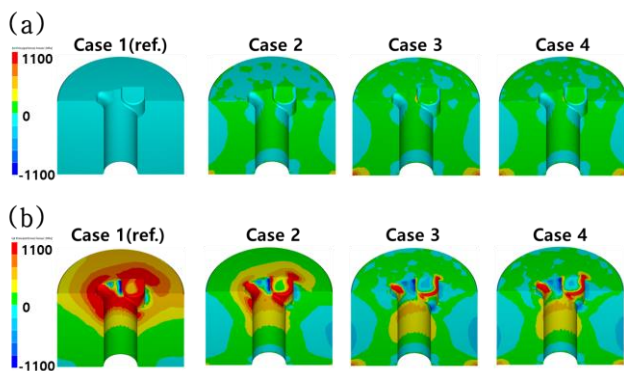


Fig. 4 Comparison of die stress according to stress ring design (a) initial die compressive stress (b) die tensile stress after forging

기준 금형인 Case 1의 경우 초기 열박음에 의한 압축응력은 없으며 단조 후 금형의 인장응력은 8,867 MPa로 나타난 것을 확인하였다. Case 2의 경우 2개의 보강링과 열박음 공차 0.2 %로 설계되었으며 초기 금형의 압축응력은 290 MPa로 나타났으며 단조 후 금형의 인장응력은 6,618 MPa 로 기준금형에 비해 인장응력이 약 25%로 해소된 것이 확인되었다. Case 3 의 경우 2개의 보강링과 열박음 공차 0.5 %로 설계되었으며 초기 금형의 압축응력은 803 MPa, 단조 후 인장응력은 4,413 MPa로 기준금형에 비해 50 % 해소되었으며 Case 4는 보강링 3개, 열박음 공차 0.2 %로 설계되었으며 초기 압축응력은 637 MPa, 단조 후 금형의 인장응력은 4,961 MPa로 기준금형에 비해 약 44 % 해소된 것이 확인되었다. 보강링 설계에 따라 보강링 개수가 증가할수록, 열박음 공차가 커질수록 초기 금형에 작용하는 압축응력이 증가하였으며 이에 따라 단조 시 금형에 작용되는 인장응력이 감소하였다. 실제 단조 금형의 보강링 설계에서는 열박음 공차를 늘리는 방법에는 금형의 특성 저하와 관련하여 한계가 있기 때문에 3개의 보강링과 0.2 %의 열박음 공차를 가지는 Case 4의 금형을 보강링 설계 조건으로 적합할 것으로 판단된다.

2.4 내부금형 분할 설계 및 응력 해석

앞서 유한요소 해석을 활용하여 보강링 설계 조건을 선정하였으며 Fig. 4 (a)의 보강링 3개, 열박음 공차 0.2%의 Case 4 번 금형에서 추가적으로 인장응력을 저감시키기 위한 방법으로 금형 분할 설계를 진행하였다. 내부금형 분할 조건은 Table 3에 나타내었으며 수직, 수평분할에 따라 단조 시 인장응력의 분산 효과를 확인하였다. Fig. 5에는 내부금형 분할 설계에 따른 응력 해석결과를 나타내었으며 기준 금형은 Case 4로 선정하였다. Case 5의 경우 수직분할이 적용된 금형으로 기준금형 대비 인장응력이 6.3 % 감소하였으며 Case 6의 경우 수직, 수평 분할이 적용되어 기준 금형에 비해 인장응력이 15 % 감소한 것이 확인되었다. 금형 분할이 증가함에 따라 인장응력 저감 효과가 나타났으나 실제 감소된 인장응력 값에는 Case5, 6 금형에서 차이가 크지 않으며, 금형 가공량 및 가공 시간을 고려하였을 때 수직 분할만 적용된 Case 5의 금형을 실제 온간 밀폐 단조품 제조를 위한 금형으로 선정하였다.

Table 3 Split insert die design conditions

Conditions	Stress ring	Split method
Case 5	3 EA, 0.20 %	Vertical
Case 6		Vertical & horizontal

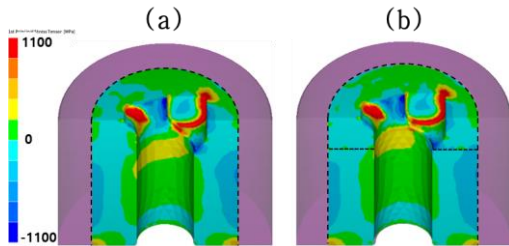


Fig. 5 Comparison of die tensile stress after forging according to split insert die design (a) case 5, (b) case 6

3. 요크 단조품 분석

3.1 단조품 제조

금형응력 저감 해석을 기반으로 제작된 금형으로 실제 단조 공정에 적용하여 단조품을 제조하였으며 1 차 단조품 제조에는 보강링 2 개, 열박음 공차 0.2 %로 설계된 Case2 금형이 사용되었다. Fig. 6 는 단조 후 금형을 나타내었으며 단계 성형을 진행하는 도중 하부 금형에 손상이 발생한 것이 확인되었으며 응력 해석 결과에서 나타난 것과 같이 최대 응력이 작용된 곳에서의 금형 손상이 발생하였다. 또한 단조 중 KO pin 의 파손이 더불어 발생하였으며 보강링 2 개, 열박음 공차 0.2 %의 Case2 금형으로는 원활한 단조성을 확보하기가 어려운 것을 확인하였다. 2 차 단조품 제조에는 수정된 금형으로 보강링 3 개, 열박음 공차 0.2 %와 수직분할이 적용된 Case 5 금형이 적용되었으며 Fig. 7 에는 Case5 의 금형을 이용하여 단계 성형에 따라 제조된 실제 단조품의 3 차원 스캔 측정 결과를 나타내었다. 1 차 단조 결과와 다르게 2 차 단조에서는 원활한 단조성이 확보된 단조품을 제조가 가능하였으며 하부 금형의 손상이나 KO pin 의 파손은 발생하지 않았다.

Fig. 8 (a)는 요크 모델의 3 차원 형상을 나타내었으며 Fig. 8 (b)의 경우 최종 성형 높이에서의 실제 단조품의 3 차원 스캔 분석 결과를 나타내었다. Fig.

8 (c)는 모델 형상에 실제 단조품을 병합하여 치수를 비교 하였으며 실제 단조품의 경우 리브(rib) 부분의 성형이 다소 부족함에도 부품 도면 기준 요구 치수가 만족됨을 확인하였다.

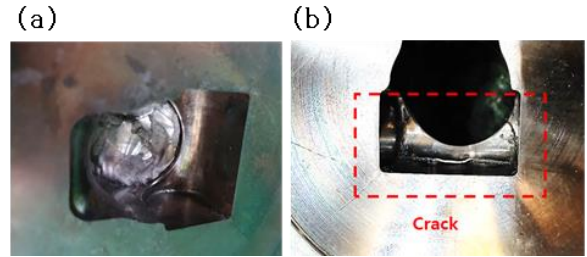


Fig. 6 Die status after 1st forging (a) bottom view, (b) top view

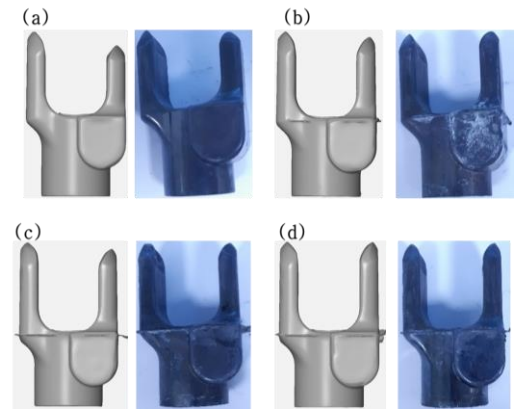


Fig. 7 Comparison of 3D scan results according to forming height of 2nd forging yoke (a) 35.0 mm, (b) 37.0 mm, (c) 37.5 mm, (d) 38.0 mm

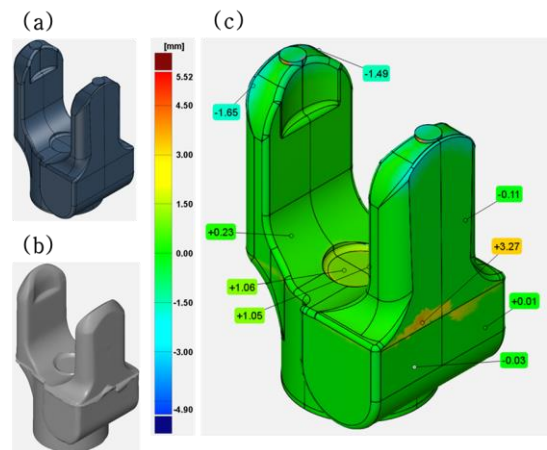


Fig. 8 Comparison of dimension End yoke (a) end yoke model (b) 2nd forged end yoke (c) compare dimensions after merging

3.2 단조열을 이용한 제어냉각 조건

앞서 서론에 언급된 것처럼 항복비제어장 적용 요크 단조품은 조절처리 공정을 생략하고 단조열을 이용한 제어냉각을 통해 기계적 특성을 확보가 가능하다. 단조품의 제어냉각 조건에 관한 모식도는 Fig. 9에 나타내었으며 공냉(air), 빠른 공냉(fan), 유냉(oil)과 같은 다양한 냉각 방법을 이용하였으며 약 800 °C의 온간 단조품을 약 400 °C 까지 냉각 후 해당 온도에서 20분간 유지시키는 열처리 방법이 적용되었다.

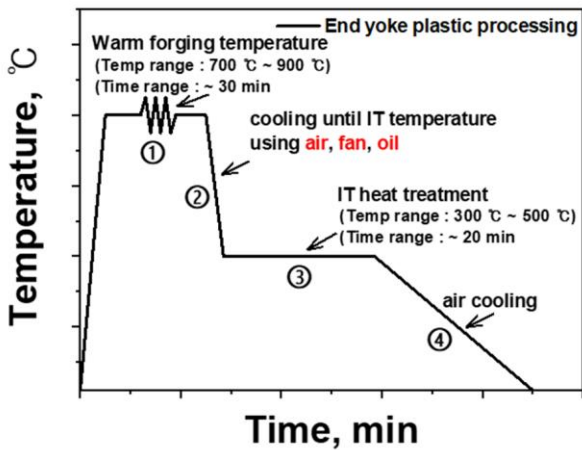


Fig. 9 Schematic diagram of controlled cooling condition after warm forging

3.3 열처리에 따른 경도 분포

Fig. 10 에는 제어냉각 열처리 조건에 따른 단조품의 경도 분포를 나타내었다. 경도는 로크웰 경도(HRC)계를 활용하여 측정되었으며 분포를 확인하기 위해 절단면을 기준으로 분석되었다.

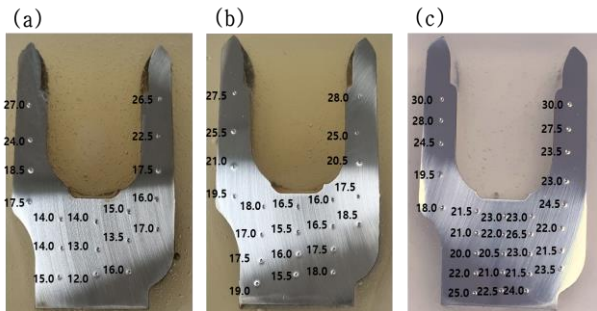


Fig. 10 Comparison of hardness Rockwell according to cooling conditions (a) Air cooling (b) Fan cooling (c) Oil quenching

전체적으로 리브(rib)부분에서는 빠른 냉각속도로 인해 내부보다 높은 경도 분포를 나타내는 것이 확인되었으며 Fig. 10(a)의 공냉에서는 17.5 ~ 27.0 HRC, (b)의 빠른 공냉에서는 19.5 ~ 28.0 HRC, (c)의 유냉에서는 19.5 ~ 30.0 HRC의 경도값이 측정되었다. 내부의 경도 분포의 경우 공냉에서는 12.0 ~ 17.0 HRC, 빠른 공냉에서는 15.5 ~ 18.0 HRC, 유냉에서는 21.5 ~ 23.5 HRC의 경도값이 측정되었으며 공냉 또는 빠른 공냉을 이용하여 제어냉각 된 단조품의 경우 단조품의 상/하부의 경도 값의 차이가 크며 불균일한 분포를 나타내었으나 유냉 방법을 통해 제어냉각 된 단조품은 비교적 심부와 리브 부분에서의 경도 차이가 줄어들고 심부의 경우 균일한 경도 분포를 보였다. 단조열을 이용한 제어냉각 시 유냉의 빠른 냉각속도가 다른 제어냉각 조건 대비 경도 분포가 균일하고 높은 기계적 특성 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 온간단조 공정 시 금형응력 저감을 위해 보강링, 내부금형 분할 설계의 효과를 유한요소 해석을 통해 금형의 응력분포 및 최대인장응력을 분석하였다. 유한요소 해석 결과를 바탕으로 온간 밀폐 단조 금형 설계 및 제작하였다. 또한 온간 단조열을 이용한 제어냉각 방법을 통해 요크 단조품의 기계적 특성 분석을 통해 다음과 같은 결과를 확인하였다.

(1) 보강링과 열박음 공차가 증가하고 내부금형 분할 수가 증가할수록 금형의 인장응력 저감에 효과적으로 작용하였으며, 실제 단조 금형을 제작하여 온간 단조 시 응력 저감 설계에 따른 원활한 단조성 확보가 가능하였다.

(2) 단조열을 이용한 제어냉각 방법을 통해 조절처리를 생략하여도 기계적 특성의 확보가 가능하였으며 냉각방법에 따른 경도 분포를 비교한 결과 유냉 방법을 이용했을 때 비교적 균일한 경도 분포와 높은 기계적 특성 확보가 가능하였다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 기술개발지원사업 중소기업 지원 선도연구기관 협력기술개발사업과 한국재료연구원 주요사업(PNK8520) 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. Fujikawa, H. Yoshioka, S. Shimamura, 1992, Cold- and warm-forging applications in the automotive industry, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 35, pp. 317-342, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90325-M](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90325-M)
- [2] Y. S. Lee, J. H. Lee, J. Y. Lee, M. H. Bae, 2001, 3D FEM Analysis of Warm forging Process Design for Socket at Automotive Steering Unit, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 186-189
- [3] S. Chen, Y. Qin, J.G. Chen, C.M. Choy, 2018, A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 137, pp. 1-14
- [4] D. L. Lee, 2002, The Current Status of the Development of Heat-Treatment-Free Steel, *Pro. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Vol. 11, pp. 388-393
- [5] Y. S. Lee, C. G. Lee, E. Y. Yoon, 2017, Characteristics of 8T-bolt manufactured by the Yield-Ratio-Control-Steel for Cold Former, *Int. C. Tech. Plast.*, pp. 496-501
- [6] J. H. Song, Y. T. Im, 2007, Process design for closed-die forging of bevel gear by finite element analyses, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 192-193, pp. 1-7 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.081>
- [7] J. Groenbaek, T. Birker, 2000, Innovations in cold forging die design, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.98, pp. 155-161 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00192-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00192-2)
- [8] Q. Yuangen, H. Y. Cho, 2020, A Split Die Design for Forging of Hexagonal Bolt Head, *J. Mater. Process, Technol.*, Vol. 19, No. 5, pp. 91~97