

대형 Flange bolt의 냉간단조 성형공법 적용에 관한 연구

이권수¹ · 안용식^{2,*}

유공금속 기술연구소¹

부경대학교 융합소재공학부^{2,*}

A Study of the Application of Cold Forging Technique for a Big Flange Bolton coupling

Kwon-Soo Lee¹ · Yong-Sik Ahn^{2,*}

Research Center, Yukong metal Co.¹

Department of Materials Sci. & Eng., Pukyong National University^{2,*}

(Received March 06, 2024 / Revised March 14, 2024 / Accepted March 31, 2024)

Abstract: Due to increasing demands for environmental protection and cost reduction, the application of cold forging technology in the production of large-sized flange bolts, which was mainly manufactured through hot forging, has become necessary. An investigation was conducted on the die design of preform dies for cold forging a large-sized flange bolt. The die design, which utilized the upsetting process, was determined insufficient due to the excessive principal stress exerted on the die. Nevertheless, the die design utilized in the trimming process showed its compatibility with the cold forging of the flange bolt. The die design was evaluated using the Finite Element Method (FEM) to identify the most optimal state in terms of the preform die's outer diameter. As a result, the results of the study have been applied to the actual manufacturing process, leading to the creation of a forging die with an extended lifespan.

Key Words: Cold forging, Die design, Die life, Large sized flange bolt

1. 서론

건설 토목장비인 굴삭기, 불도저, 로더 등에 사용되는 중장비용 부품의 경우 대부분 소량 다품종이고 형상이 복잡하며 대형일 경우 소재를 가열해서 재결정 온도 이상의 온도에서 열간단조로 생산하고 있으며, 열간단조 공정은 실제로 자동차, 산업기계 등의 주요부품을 제조하는데 적용되고 있는데 특히 소재의 특징상 유동응력이 크거나 복잡한 성형을 요구하는 경우, 또는 제품의 치수가 커서 높은 하중이 필요한 경우에 적용되고 있다. 열간단조 공정에서 금형은 제조비용, 생산성, 그리고 정밀도에 크게

영향을 미치며, 특히 열간단조용 금형은 성형 중에 작용하는 열 사이클에 의한 열피로를 비롯하여 과도한 금속유동에 의한 경도저하 등이 발생함으로써 금형수명이 상당히 짧으며, 또한 열간단조 전에는 가열 도중에 발생한 표면스케일의 제거가 필요한 경우가 많다¹⁾. 이와 같이 열간단조를 위해서는 단조 전 소재의 재가열이 필요하고 단조 후 기계가공으로 인한 후공정이 필요하므로 제품의 공정단가가 높고 공정시간이 많이 소요되며 또한 소재의 손실이 많이 발생하므로 탄소발자국 생성량이 상대적으로 많다. 반면에 냉간단조 공법은 균일한 품질과 함께 공정원가가 저렴하고 환경문제의 발생이 적다. 또한 냉간단조에 의한 제품은 공정 중 발생하는 소재의 가공경화에 의해 제품의 강도가 높고 소재의 신뢰성이 높다.

† 교신저자: ysahn@pknu.ac.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

최근 군수품목 및 증장비에 대한 국내의 수요가 급격히 증가하는 추세에 있으며 이에 따라 제품의 고품질화와 함께 단가 인하요구가 거세어지고 있어 일부 품목을 냉간단조 공법으로 변경하여 적용하는 방안이 고려되고 있다. 탄소발자국과 생산비용을 줄이기 위해서는 life cycle cost의 70% 이상이 생산품의 개념 디자인 즉 성형을 위한 금형의 디자인에 의해 결정된다고 한다²⁾. 또한 냉간단조에서는 가공공정, 금형의 구조, 소재의 기계적 성질, 윤활 등이 제품품질에 큰 영향을 주지만 단조 정밀도가 엄격해질수록 공급되는 소재의 치수정밀도도 높아지기 때문에 절단면에 대한 품질도 점점 중요시되고 있다. 특히 소재의 형상불량, 중량편차, 크랙(crack), 버어(burr) 등의 표면결함은 직접적으로 냉간 단조품의 형상, 치수 및 제품 품질을 저하시키고 금형수명 단축을 야기시키며 단조하중에 커다란 영향을 미친다³⁾.

냉간단조공정에서 금형과 소재는 큰 하중이 주어진 상태 하에서 미끄럼 운동을 하게 되므로, 금형에 마멸이 발생하게 된다. 이 경우 금형의 마멸에 영향을 미치는 인자는 금형표면의 온도, 표면거칠기, 금형재료의 표면경도, 접촉면에서의 수직압력, 두 금속사이의 미끄럼 길이, 접촉면에서의 윤활조건, 접촉시간 등이 있다⁴⁾. 수치적 접근이 용이한 Archard의 마멸모델을 이용한 결과는 다음의 식(1)과 같다.

$$V = \frac{kPL}{3h} \quad (1)$$

여기서, V는 마멸체적이고, k는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수, P는 접촉하중, L은 미끄럼 길이, h는 금형재료의 표면경도이다.

대형 제품의 경우 머리 성형 시 단류선 접힘 등이 발생하여 제품의 불량을 야기시키거나, 과도한 압조하중에 의한 금형수명의 급격한 저하가 발생할 수 있기 때문에 제품의 원활한 성형과 금형수명 향상을 위해서는 최적의 공정설계 및 적용기술이 필요하다.

본 연구는 크롬몰리브덴 강(SCM435H)을 가지고 머리부가 크고 넓은 대형 볼트를 냉간압조(cold heading)하기 위한 최적의 금형설계 방안에 대한 것이다. 금형설계 시에는 성형이 까다로운 대형머리부의 단조를 위해 upsetting type과 trimming type의 두 가지 방안의 공법이 각각 적용되었다. 각각의 공법

에 의한 금형 설계 시 FE simulation program을 이용해 응력을 예측하였으며, 설계금형을 실제 공정에 적용함으로써 최적의 설계방안을 수립하였다.

2. 재료와 실험방법

Table 1에서는 본 연구에서 사용된 구조용 합금강인 SCM435H 강의 화학성분을 나타낸다. 이 강종은 기어류, 볼트, 플랜지, 축류, 공구부품 등으로 많이 사용되며, 합금 중 Cr(0.99%)과 Mo(0.16%)의 높은 함량은 경화능(hardenability), 피로저항성(fatigue resistance), 내충격성(impact resistance)을 높이기 위한 것이다⁷⁾. 시험에 사용된 소재는 선경이 29.85 mm인 냉간압연된 선재이며, 이 선재는 냉간단조 전에 소성가공성을 높이기 위하여 진공분위기 하에서 740 °C, 5시간 동안 구상화열처리되었다. 선재는 냉간압조를 위해 0.35 mm의 knife 간격(C)으로 절단되었다. 동일한 크기의 선재를 가지고 C = 0.70~ 0.35 mm의 범위에서 수행한 이전의 연구⁸⁾에 의하면 knife 간격(C)이 작을수록 우수한 절단면을 획득할 수 있는 반면에, C가 감소함에 따라 knife에 가해지는 주응력이 증가하여 전단과정에 많은 하중이 필요하게 되면서 knife의 수명이 급격히 감소하였다. 앞의 연구결과를 적용하면 본 연구에 사용된 선경을 가진 선재는 C = 0.35 mm가 가장 양호하고 평탄한 전단면을 획득하는 조건이라고 판단되었다. 시험에 사용된 냉간단조용 금형의 보강링은 인성이 우수한 합금공구강인 SKD-61종을, 내경링의 소재는 GTi50 초경합금을 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of SCM435 steels [wt.%].

Element	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM435	0.36	0.20	0.76	0.01	0.04	0.99	0.16

본 연구에서는 냉간단조용 예비성형 금형(preform die)의 설계를 위해 upsetting과 trimming 방식의 두 가지 설계방식을 적용하였다. 또한 예비성형 금형의 합리적인 몸통경 치수를 구하기 위해 금형 내부에 작용하는 응력을 분석하고, 머리부 단류선 형상을 얻기 위해 범용적으로 사용되는 소성변형 강소성 유한요소 해석도구인 AFDEX - 3D program을 사용하였다.

시험에 사용한 냉간단조기(cold former)는 HBF-424 Model이며 그 제원은 Table 2에 나타내고 있다. 이 기종은 대형 bolt류 제품을 냉간압조(단조) 성형하기 위한 목적으로 사용하기에 최적화되어 있으며 각각 4개의 die와 punch 들로 구성되어 있다. 냉간압조는 상온에서 수행되었으며 forging load는 4 step total 450 ton, 가공속도는 550 mm/sec이었다. 인장시험은 최대하중 100 ton인 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 이용하여 상온에서 수행하였으며, 이때 cross head speed는 100 mm/sec로 일정하게 하였다. 소재의 미세조직은 경면연마 후 nital 3% 용액에서 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

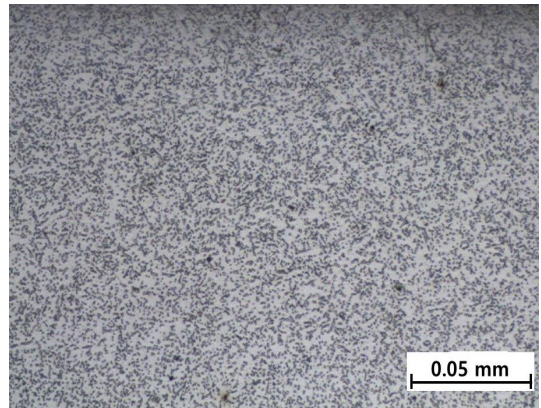


Fig. 1 Spheroidized microstructure of chromium molybdenum steel (SCM435)

Table 2 The specifications for used cold former

Item	Contents
Forging station	4 station
Forging load	450,000 Kgf
Cut-off dia	∅30 mm
Cut-off length	40 ~ 250 mm
Max RPM	65 pcs/min

3. 결과 및 고찰

3.1. 소재의 미세조직과 기계적 특성

냉간압조 전 합금강은 성형능을 향상시키기 위해 구상화열처리를 실시하였으며 구상화열처리 후의 미세조직은 Fig. 1에서 나타내고 있다. 그림에서 보면 탄화물들의 입자가 미세하고 골고루 분포한 것으로 나타나 충분히 구상화가 발생한 것을 알 수 있다. 구상화된 탄화물의 구상화율은 약 90%로 측정되었다.

Fig. 2는 사용 시편에 대한 인장시험결과이며 Table 3에서는 시험결과값(ACT)과 기준규격(SPEC)을 내고 있는데, 인장강도(TS)와 항복강도(YS), 연신율(EI) 등의 값이 기준값 범위 내에서 만족하고 있으며 이러한 소재의 특성데이터값들을 응력해석 프로그램에 적용하였다.

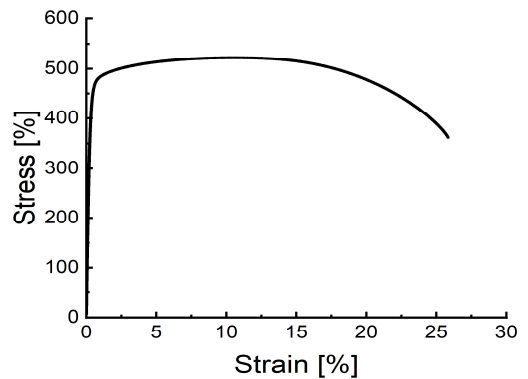


Fig. 2 Stress-strain curve of the spheroidized SCM435 steel

Table 3 The specifications (SPEC) and measured value (ACT) of the SCM 435 steel used

	TS [MPa]	YS [MPa]	EI [%]	RA [%]
SPEC	588 ↓	470 ↓	20 ↑	70 ↑
ACT	521	451	25.8	70

3.2. 냉간단조용 금형설계에서 upsetting 방식 공정적용 및 응력해석

Fig. 3(a)에서는 열간단조공정에서의 각 가공단계를 나타내고 있으며 최종 제품의 총 길이는 74 mm, 나사부 지름(M)은 24 mm이다.

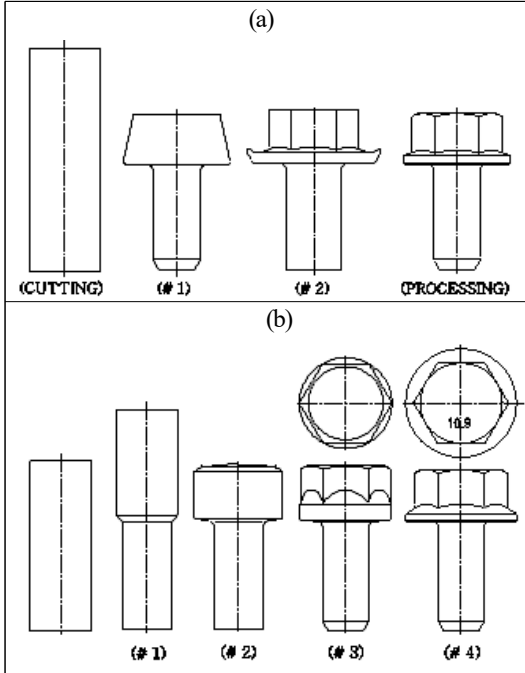


Fig. 3 The procedural steps for (a) hot forging and (b) cold forging with an upsetting process a large flange bolt

Fig. 3(a)에서 보면 단조에 필요한 금형은 3단계이지만 열간단조를 위해서는 재가열 및 후가공 공정 (processing)이 필요하다. 또한 열간단조를 위해 적정 온도까지 가열하고 각 공정사이의 열전달(공랭)을 고려해야 하는 등 추가 공정변수가 따른다¹⁰⁾. 본 연구에서는 열간단조보다 에너지 및 공정시간이 절약되는 냉간단조공법을 적용하기 위하여 금형을 4단계로 설계하였다. 냉간단조를 위한 공정도 설계를 위해 기존에 많이 적용하고 있는 upsetting 공법에 의한 설계를 시도하였으며 각 예비성형을 위한 공정도를 Fig. 3(b)에 나타내고 있다. 그림에서 보면 성형공정이 1단계(forward extrusion), 2단계(head upsetting), 3단계(hexa extrusion) 및 4단계(circle upsetting)로 구성된다. 이 공정도에 따른 금형의 설

계 제작 시 flange의 폭이 크기 때문에 #4 금형에 과도한 응력이 가해질 수 있으며 이로 인하여 금형의 수명에 나쁜 영향을 미칠 것을 우려하여 성형이 가능한 범위에서 punch와 dies의 간격을 최대한 크게 하여 금형을 설계 제작하였다. 인서트 금형과 보강링의 설계는 최대 허용내압이 작용할 수 있도록 직경을 분할하고 최대 압력이 작용할 때 보강링의 내면이 항복 조건을 만족할 수 있도록 기워맞춤 공차를 부여하였으며 압입각도는 이전의 연구에서¹¹⁾ 금형수명이 가장 길었던 5 α 로 설정하였다. 하지만 이렇게 설계된 금형을 사용하여 압조시험한 결과 약 2,000 번의 단조타격 후 Fig. 4에서 나타내는 바와 같이 #4번의 금형 내부에서 원주방향으로 크랙이 발생하였다. 경제성을 고려할 때 금형의 수명은 최소 50,000 회 이상이 되어야 한다고 알려져 있으며, 따라서 이렇게 설계 제작된 금형은 실제 생산현장에서 공정에 적용할 수 없다고 판단되었다.

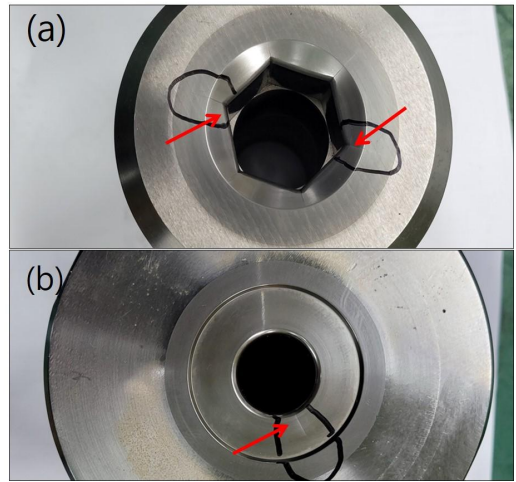


Fig. 4 Pictures of fractured #4 punch (a) and die (b)

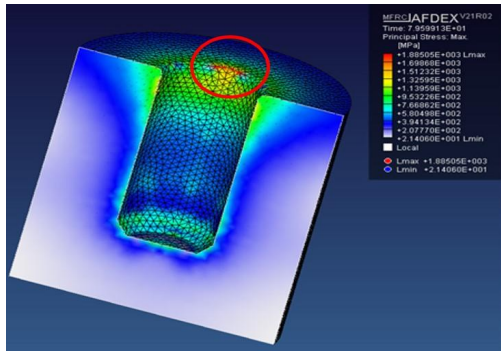
이에 대한 원인을 조사하기 위하여 FE분석을 실시하였다. 초기 소재 및 금형을 Catia를 사용하여 모델링하고 STI file로 저장하여 3차원 요소를 분할 생성하고 응력해석을 수행하였다. 펀치와 다이 접촉면에서는 마찰조건이 일정하고, 금형속도 등은 모든 공정에 동일하게 적용하였다. 금형과 소재 사이의 마찰계수는 0.1, mesh에서 요소수는 30,000개로 지정하였다. 펀치와 다이의 성형조건은 Y 방향으로 74 mm에서 멈추도록 하였다. 시뮬레이션 시에 적용

된 금형재료는 Carbide 초경합금을, 소재는 실험에 사용된 SCM435 크롬몰리브덴강과 기계적 특성이 유사한 AISI SCM435(H) 강을 사용하였다.

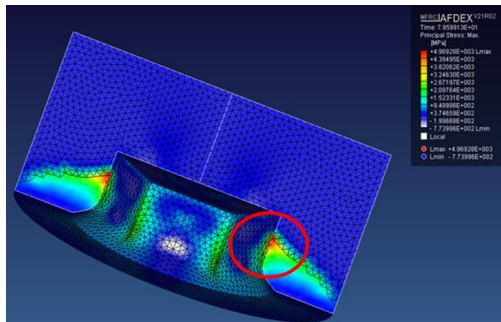
Table 4에서는 실제 단조 공정에서 사용되었던 내경링(insert ring)과 보강링(shrink ring)의 소재인 GTi50 초경합금과 SKD61 공구강의 기계적 성질들을 나타내고 있다.

Table 4 Mechanical properties of the materials used insert ring and shrink ring

Mat.	Hardness [HRC]	Young's modulus [GPa]	YS [MPa]
GTi50	87	540	3,300
SKD61	56	212	1,300



(a) $\sigma_{max} = 1.885 \text{ MPa}$



(b) $\sigma_{max} = 4,969 \text{ MPa}$

Fig. 5 FE Analysis results of the #4 die (a) and #4 punch

Fig. 5에서는 #4 예비성형금형의 upsetting die와 punch의 응력해석결과를 나타내고 있으며, σ_{max} 는 최대주응력(maximum principal stress)을 의미한다. 그림에서 die와 punch에 최대주응력이 적용되는 지

점을 적색원으로 표시하고 있다. Punch의 경우 최대 주응력은 4,969 MPa [Fig. 5(b)]이었으며 이는 punch와 내경링의 소재인 GTi50 초경의 항복강도값(YS)인 3,300 MPa [table 4] 보다 훨씬 큰 값이다. 이와 같이 항복강도보다 과도하게 높은 단조하중이 금형의 응력집중부(금형의 머리부)에 가해질 경우 이 곳에서 단시간에 파손이 발생하게 될 것임을 쉽게 예측할 수 있으며 실제 단조작업 후 최대응력이 발생하는 지점에서 균열이 발생한 것을 앞 그림 Fig. 4에서 보여주고 있다.

3.3. 냉간단조용 금형설계에서 trimming 방식 공정적용 및 응력해석

앞의 upsetting 방식의 설계를 전면 수정하여 preform die의 설계 시 trimming 방식을 적용하였으며 그것을 아래 Fig. 6에 나타내고 있다.

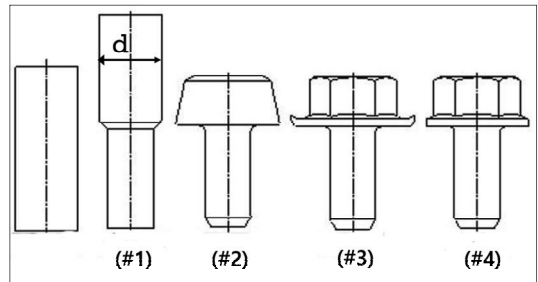


Fig. 6 The procedural steps for cold forging a large flange bolt with a trimming process

그림에서 보면 #2번 공정의 설계가 앞의 Fig.3(b)에서 보여준 upsetting 공정과 확연히 구별되며 이 공정에서는 #2번 금형에서 머리부의 외경을 flange 지름에 가깝도록 확장시키고 #3번 금형에서 퍼진 머리부를 육각으로 trimming하는 방식으로 공정을 설계하였다. 또한 인서트링과 보강링의 열박음 시에는 이전의 연구¹⁰⁾에서 가장 좋은 결과를 나타내었던 압입각도 5°로 끼워맞춤 하였다. 이 공정도의 첫 번째 예비성형금형(1st preform die)에서 금형의 몸통 외경 치수(d)는 두 번째 예비성형 금형의 내부응력

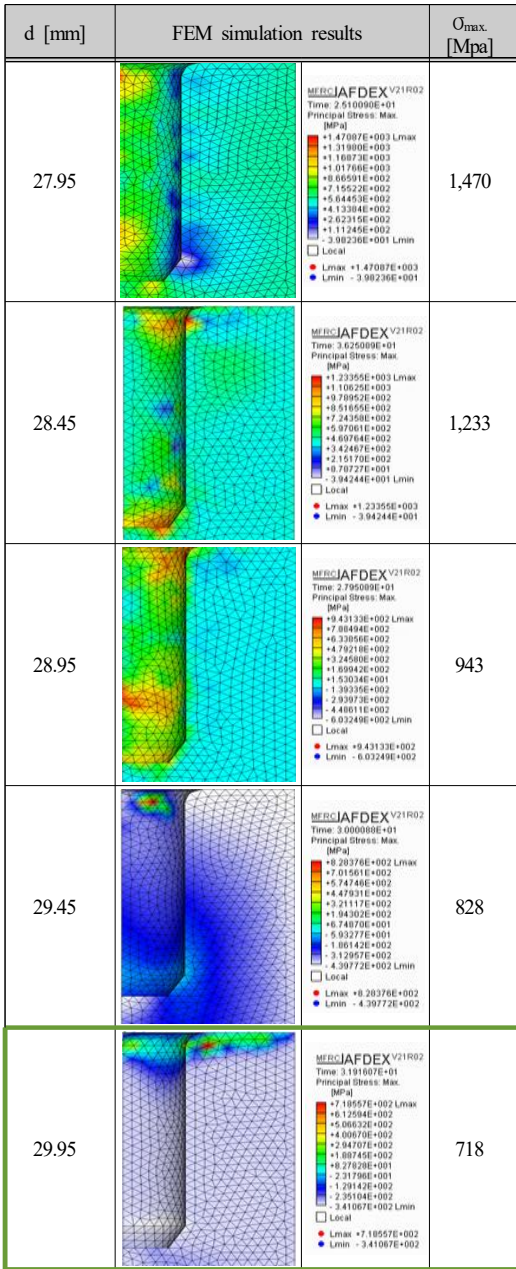


Fig. 7 Change in principal stress value inside the 2nd dies according to the exterior diameter(d) of head part of 1st dies

에 크게 영향을 미친다. 즉 #2 금형의 수명은 #1 금형의 몸통외경치수에 의해 결정적인 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 프로그램을 이용하여 #1 예비 성형금형의 몸통외경 직경(d)의

변화에 따른 #2 예비성형 금형의 내부응력을 계산 하였다. Fig. 7에서는 #1번 예비성형금형의 d 를 27.95~29.95 mm 범위에서 0.5 mm씩 단계적으로 변화 시킨 값을 적용하여 각각의 치수로 성형된 예비성형 제품이 #2 금형에서 단조될 때 인서트링에 가해지는 주응력값을 해석한 결과를 나타내고 있다.

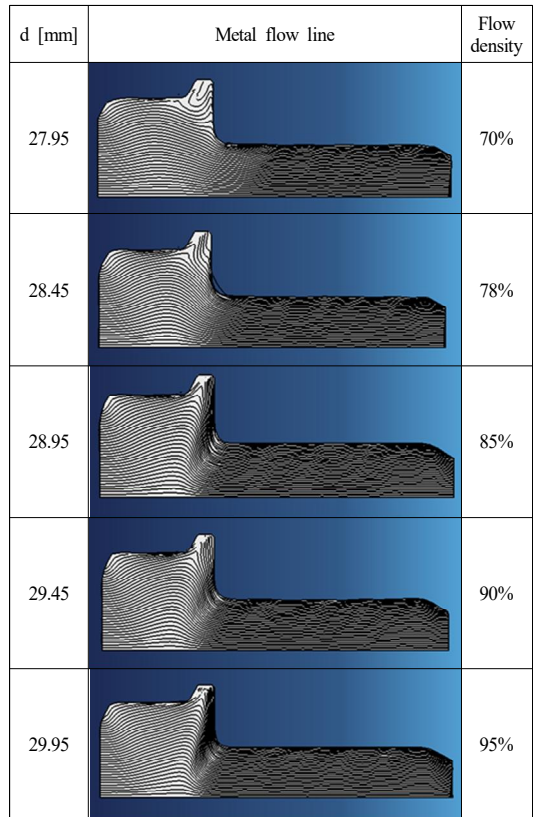


Fig. 8 Metal flows after forging by the 2nd preform die according to the exterior diameter (d) of head part of 1st preform dies

Fig. 7에서 보면 주응력은 플랜지 바로 아래부분에 집중되어 있는 것을 알 수 있으며 이곳에서 계산된 최대 주응력값(maximum principal stress, σ_{max})에 의하면 몸통외경 치수(d)값이 클수록 최대 주응력값은 작아지고 있다. 본 제품의 단조가공 성형을 위해서 실질적으로 설계할 수 있는 몸통외경 최대 값인 d=29.95mm 일 때는 최대주응력값이 718 Mpa로서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 앞의 도표 4에서 보면 인서트링 소재인 초경합금 GTI50 및 보강링 소재인 SKD61의 항복강도가 각각 3,600 MPa 및

1,300 Mpa 이고, 금형에 작용하는 최대 주응력값이 718 MPa이면 소재의 항복강도에 비해 상대적으로 매우 낮으므로 각 금형 소재가 충분히 견딜 수 있는 조건이다.

각 치수에 따라 피단조재 내부의 단류선변화를 조사하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내고 있다. 그림에서 보면 몸통외경 치수가 29.95 mm 일 때 단류선의 굴곡이 없으며 단류선 밀도가 가장 높아서 가장 양호한 최종 머리부 형상을 획득할 수 있을 것으로 예상되었다.

Table 5 Total number of forged product(Nf) according to the exterior diameter(d) of head part of 1st preform die

d [mm]	27.95	28.45	28.95	29.45	29.95
Nf	72,000	94,000	110,000	125,000	150,000

Table 5 는 몸통외경 치수(d)를 27.95mm~29.95mm 범위에서 각각 제작한 금형을 가지고 실제 공정에 적용하여 금형의 수명(Nf)을 측정된 결과를 나타내고 있다. 표에서 보면 최대 주응력값이 가장 낮은 29.95mm 치수일 때의 금형수명이 가장 높았으며 이것은 27.95mm일 때 보다 Nf가 2배 이상 향상된 수치이다. 즉 플랜지가 넓은 볼트의 냉간단조용 금형 설계 시 응력해석에 의한 최대 주응력값이 가장 낮은 값을 가지는 예비성형의 몸통외경 치수로 설계하면 최적의 금형수명을 획득할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

대형 플랜지 볼트 냉간단조를 위한 공정설계를 하였으며, 이때 1st 예비성형 몸통경 치수 변화에 따른 2nd 금형내부에 가해지는 최대 주응력값과 머리부 metal flow 형상을 FEM program인 AFDEX-3D로 해석하였다. 4 step으로 설계된 금형에서 예비성형 금형(preform die)의 설계 시 upsetting 방식으로 설계된 금형은 단조하중이 적용될 때 머리부에 과도한 압조하중이 발생하기 때문에 적용이 어려운 것으로 나타났다. 반면 trimming 방식을 적용하여 설계된 예비성형 금형의 경우 단조하중이 상대적으로 작게 집중되는 것으로 나타났으며 이중 1st preform die의

몸통경 치수가 증가함에 따라 2nd preform die 내부의 응력집중부에 가해지는 최대 주응력값이 감소하였으며 단조설비의 최대 절단경까지의 가능한 몸통경 치수인 29.95mm일 때 가장 낮은 주응력값을 나타내었으며 실제 금형을 제작한 후 공정에 투입한 결과 가장 높은 금형수명을 나타내었으며 이 때 생성된 플랜지 볼트의 단류선 형상도 우수하여 제조된 볼트의 기계적 특성도 우수할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2023년도 LINC 3.0 산학공동과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Archard, J.F. "Contact and rubbing of flat surfaces", Journal of applied physics, pp. 981-988, 1953.
- 2) He B., Tang W., Wang J., Huang S., Deng Z. and Wang Y., "Low-Carbon conceptual Design based on Product Life Cycle Assessment", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, pp.863-874, 2015.
- 3) Engel, U. and Aensel, M., "FEM- Simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", Adv. Tech. Plast. Vol. 1, pp. 355-360, 1990.
- 4) Kragelsky, I. V.(ed.), "Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook", Vol. 1, Pergamon Press, New York, 1st edn., 1981.
- 5) Kim, T.K., "The Application of Finite Element Method for the Improvement of the Dimensional Accuracy of Cold Forged Products", The Doctor Thesis of Pusan National University, 1997.
- 6) Singh, A.K., Rooks, B.W. and Tobias, S.A., "Factors Affecting Die Wear", Wear, Vol. 25, pp. 271-279, 1973.
- 7) Davis, J.R., "Alloying: Understanding the Basics", ASM international, pp. 123-192, 2001.
- 8) Lee, K.S. and Ahn, Y.S., "A Study on the Optimum Shearing Clearance of SCr440 Steel Rod for Track Pin", Korean Society for Power System Engineering, Vol. 26, Issue 4, pp.12-19, 2022.
- 9) Harris, S.R., Sharma, S. and Kini, U. A., "Influence

of Spheroidizing Heat Treatment on Mechanical Properties of EN47 steel”, Materials Science Forum Vol. 880, pp. 136-139, 2016.

10) Choi, D.S, Kim, T.M., Han, B.S., Han, Y.J., Ko, K.H., Park, J.R., Park J.R., Park, K.B, Lee, J.W. and Kim, D.U., “Titanium alloy bolt hot forging process analysis through plastic working analysis”, Design & Manufacturing Vol. 14, pp.42-48, 2020.

11) Lee, K.S., Kim G.Y. and Ahn, Y.S. “Study on the Optimum Design of the Insert Ring and Shrunk Ring of the Cold Forging Die for an Automotive Wheel Nut”, Transactions of Materials Processing, Vol.27, No.3, pp. 165-170, 2018.

저자 소개

이 권 수 (Kwon-Soo Lee)



- 2020년 10월 : 부경대학교 재료공학과(공학박사)
- 2000년 09월 ~ 현재 : 유공금속 기술연구소 연구소장

< 관심분야 >

냉간 및 열간 금형/성형, 유동해석, 최적화 설계

안 용 식 (Yong-Sik Ahn)



- 1989년 12월: Stuttgart Univ.(독일) 재료공학과(공학박사)
- 1990년 05월~1992년 3월: RIST(포항 산과기연) 특수강연구부 주임연구원
- 1992년 3월~현재: 부경대학교 재료공학과 교수

< 관심분야 >

특수강 개발 특성분석, 금속 소성가공, 합금 Design