

Al 합금 볼트의 성형공정 설계

Forming Process Design of Al Alloy Bolt

김지환¹, 채수원², 한승상³, 손오현³

*J.Kim¹, #S.W.Chae (swchae@korea.ac.kr)², S.S. Han³, Y.Son³

¹고려대학교 기계공학부 대학원, ²고려대학교 기계공학부, ³(주)영신금속공업

Key words : Al alloy bolt, forging, FEM

1. 서론

환경에 대한 관심과 에너지 사용 절감 요구에 의해, 최근의 자동차는 높은 연료 효율을 추구하고 있다. 이에 대한 가장 기본적인 요소로 부품의 경량화를 꼽을 수 있다.[1] 따라서 기존의 강철 재료를 대신하여 이와 동등한 강도를 갖는 Al 합금 등의 재료를 사용한 부품이 점차 상용화 되고 있다. 기존에는 주로 수입에 의존하였지만 국내에서도 체결용 부품인 Al 합금 볼트의 수요가 점차 커지면서, 최근 이에 대한 연구와 생산이 증가하는 추세이다. 그 중 우수한 강도를 갖는 Al 7000계열 합금은 기계적 특성은 좋지만 냉간 단조 시 성형성이 좋지 않아 경험적인 설계와 시행 착오를 통한 단조 성형으로는 개발에 한계가 있었다. 이에 비해 유한요소법을 이용한 시뮬레이션의 활용은 금속 제품의 생산 전 설계 단계에서 시행착오를 줄여주어 개발 시간과 비용을 절약하는 이점을 갖고 있다.[2][6]

본 연구는 Al 7075 소재 볼트의 냉간 단조 성형에 있어 유한요소법을 이용하여 적절한 예비 성형체의 형상을 찾는 단계와, 결합이론을 적용하여 최종 성형 제품의 내부 결함을 예측하는 단계로 나누어 진행되었다. 먼저 사용된 결합 이론에 대해 간략히 소개하고, 성형공정 설계와 내부 결함 분석을 위한 유한요소 해석을 진행한다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 소성 가공을 위해 상용 유한요소 코드인 DEFORM-3D를 사용하였다. 내부 결함 분석을 위해서는 DEFORM-3D에 내장된 Normalized Cockcroft&Latham의 ductile fracture 기준을 이용하였다.[3][4] 이는 다음의 식으로 표현된다.[5]

$$\int_{\bar{\epsilon}_f}^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

σ^* : max. principle stress

$\bar{\sigma}$: effective stress

$\bar{\epsilon}$: effective strain

$\bar{\epsilon}_f$: effective fracture strain

C : critical value

DEFORM-3D의 경우 식(1)을 각 성형 단계별로 축적시킨 damage Value를 내부 결함 분석에 사용한다. 이 때 damage value가 높을 수록 ductile fracture가 발생할 가능성이 높아지며, effective fracture strain에 의해 damage value가 임계값(C)에 도달했을 때 재료가 파괴된다고 가정한다.

3. 성형공정 설계

성형 조건으로 재료는 강소성으로, 금형은 강체로 설정하였다.

이는 탄소성 해석에 비해 해석 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으며 변형량이 큰 경우에 적합하다.[3][6] 재료의 요소로는 4절점으로 이루어진 4면체 요소를 사용하였다.

알루미늄 볼트의 냉간 단조 가공에 있어 중요한 설계 인자로 성형 중간의 형상을 들 수 있다. 이는 예비 성형체의 형상에 따라 최종 성형 제품의 형상 결함을 조절할 수 있기 때문이다.[7] 본 연구에서는 총 3가지 경우의 설계를 고려하였다. Type 1, Type 2의 경우는 코일 형태로 가공된 원소재를 절단하여 볼트의 나사부위까지만 압출한 후 볼트 머리부를 단조 가공한 경우이고, Type 3는 코일 형태의 원소재의 size를 다르게 하여 절단한 후 단조 가공한 경우이다. 3가지 Type 모두 소재→예비 성형체→최종 단조품의 과정으로 2단계 단조 과정을 실시하였다.

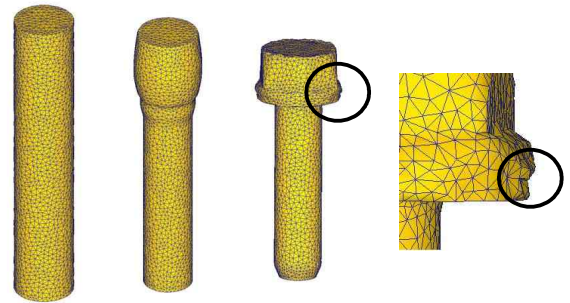


Fig. 1 Preform shape fault of Type 1

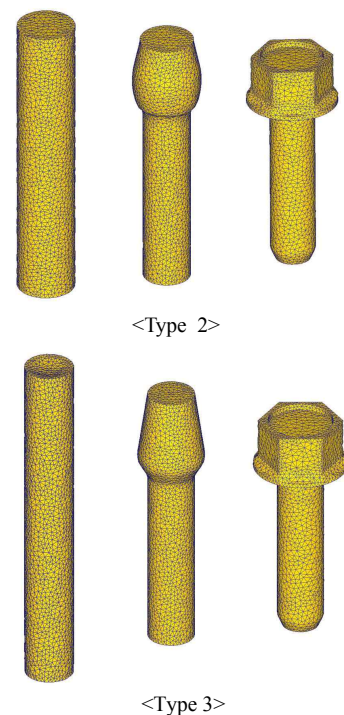


Fig. 2 Forging Simulation of Type 2 and Type 3

Initial design인 Type 1의 경우 총 2단계의 과정 중, 예비 성형체에서 최종 단조품으로 진행되는 2번째 과정에서 접합 현상이 발생하였다. Fig.1 은 다이 하중이 가장 큰 최종 단조 단계에서 Type 1의 형상 결함이 발생함을 보여준다. 이로 인해 동심도가 맞지 않는 등의 결함이 예상되어 설계 단계에서 적절한 예비 성형체를 찾기 위해 Type 2, Type 3로 대체되었다. 이는 불안정한 형상 때문에 발생한 것으로, 성형 중 재료가 퍼지는 성질을 고려하여 공정을 설계해야 함을 보여준다. Fig.2는 Type 2, Type 3의 각 단계 별 성형 과정을 simulation한 형상을 보여준다. Type 1에서 형상 결함을 발생시킨 예비 성형체의 형상과 다르게 볼트의 플랜지 부위가 퍼져 나가기 용이하도록 설계하였다. 이로 인해 성형 과정 중 형상 결함이 발생하지 않음을 확인하였고 두 가지 타입 중 실제 시험 생산에 적합한 설계를 찾는 작업을 실시하였다.

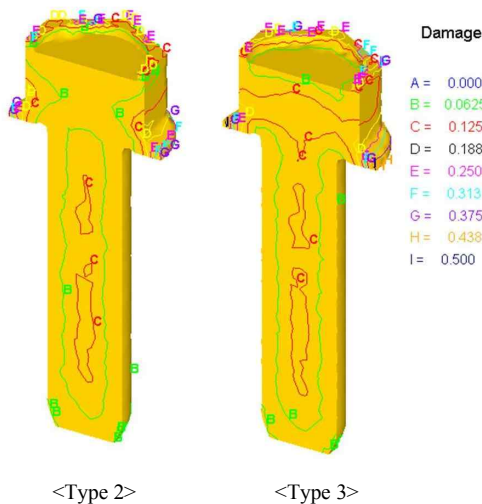


Fig. 3 Damage value between Type 2 and Type 3

시험 생산을 위한 설계의 선택은 damage value의 비교를 통한 내부 결함 분석과 치수 정밀도 확보 용이성 등을 기준으로 하였다. Fig.3은 최종 성형 제품의 damage value를 비교하는 그림으로, Type 2의 경우 볼트 머리 내부에 damage가 낮게 분포하지만 나사부위의 중심 및 표면에 상대적으로 높은 damage 분포를 보인다. Type 3의 경우 볼트 머리 중심부에 damage 분포가 높고 나사부위에는 상대적으로 낮은 damage 분포를 보인다. damage 비교를 통해 볼트의 인장강도에 대하여 Type 2가 Type 3에 비하여 다소 유리할 것으로 예측된다. 반면에 단조 후 나사산을 만드는 전조 가공 이후의 치수 정밀도는 Type 3가 유리할 것으로 예측된다. 또한 Type 2의 경우 예비 성형체의 성형 시 나사 부위 압출과 볼트 머리부위 성형이 동시에 이루어지므로 치수 정밀도와 작업 단순화 측면에서 Type 3에 비해 불리할 것으로 예측된다.



Fig. 4 Prototype of Al alloy bolt

Fig. 4는 Type 3의 설계를 이용하여 시험 생산한 Al 합금 볼트의 단조 과정 및 최종 나사산 가공까지의 각 단계별 시편을 보여주고 있다. 단조와 나사산 가공을 위한 전조 과정의 중간에는 열처리를 실시하였다. 용체화 처리(solution heat treatment)를 통해 내부 조직의 균일화를 유도한 후 시효 처리(aging)를 하여 내부 응력 제거를 유도하였다.[8] 열처리와 전조 가공을 거친 최종 시편의 경우 인장 시험 결과 강도 요구치인 400MPa를 만족하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 부품의 경량화를 위한 Al 합금 볼트의 성형에 대한 공정을 설계하였다. 유한요소 해석을 이용하여 실제 제작 전 성형성 평가를 통해 시행 착오를 줄일 수 있었다. 또한 여러 가지 설계 변수를 적용하여 최적의 설계 사양을 확보 할 수 있었다. 이를 통해 기존 국내 제품의 경우 통상 3~4단계의 단조 과정으로 생산되는 것에 비해 2단계의 단조 과정만으로 성형을 완료하는 기술적 성과를 이루었다. 이러한 공정의 단순화를 통해 제작 비용을 절감하는 효과가 있을 것으로 예상된다. 또한 개발된 설계 기법을 Ti 등 고강도 경량 재료를 이용한 부품 생산에 응용할 수 있을 것으로 기대된다. 끝으로 본 연구를 통해 수입의 비율이 높은 부품의 국산화로 국내 산업 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No.R11-2007-028-01001-0)

참고문헌

1. 조원석, "자동차 산업의 신소재 기술", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, 351-360, 1994
2. S.Kubota, T.Yamamoto, M.Yamanaka, "Forging Process Design by the Computer Simulation", Trans. of Material Processing, Vol.16, No.2, 95-100, 2007
3. DEFORM-3D User's Manual
4. H.Kim, M.Yamanaka, T.Altan, "Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forging Using FEM Simulations", Trans. NAMRI/SME 23, 63-69, 1995
5. M.G.Cockcroft, D.J.Latham, "Ductility and Workability of Metals", J. Ins. Metals, Vol.96, 33-39, 1968
6. K.J. Bathe, "Finite Element Procedure", Prentice Hall, 1996
7. 김동진, 고대철, 김병민, 최재천, "신경망을 이용한 냉간 단조의 기하학적 형상 및 연성파괴 예측", 한국정밀공학회지, 제13권, 제10호, 105-111, 1996
8. 박상준, 홍영환, "주물과 비철금속재료의 열처리", 원창출판사, 1991