[논문] 한국소성가공학회지, 제 19 권 제 4 호, 2010
Transactions of Materials Processing, Vol.19, No.4, 2010

나사전조공정을 중시한 12각플랜지볼트의 나사제조공정의 유한요소해석

장수진[1] · 이민철[2] · 심상현[3] · 손요헌[4] · 윤덕재[5] · 전만수[#]

Finite Element Analysis of Manufacturing Process of a 12 Point Flange Head Bolt with Emphasis on Thread Rolling Process

S. J. Jang, M. C. Lee, S. H. Shim, Y. H. Son, D. J. Yoon, M. S. Joun

(Received March 22, 2010 / Revised April 12, 2010 / Accepted May 26, 2010)

Abstract

In this paper, three-dimensional finite element analysis of thread rolling process of a 12 point flange head bolt is conducted using a rigid-plastic finite element method based metal forming simulator AFDEX 3D. A whole sequence of cold forming processes of a long shaft bolt composed of four forging stages and final thread rolling process is simulated to reveal the mechanism of thread formation. A mesh density control function is applied near the major plastic deformation region to achieve computational efficiency. It has been shown both numerically and experimentally that longitudinal lengthening or shortening is negligible in thread rolling.

Key Words : Thread Rolling, Finite Element Method, Intelligent Remeshing

1. 서 론

수나사를 생산하는 대표적인 공법으로 절삭과 전조가 있다. 절삭공법은 생산성과 품질 양면에서 불리하기 때문에 비규격품 또는 대형 나사의 생산에 주로 활용되고 있다. 반면, 전조는 소재 수율, 양호한 제품의 표면, 고생산성, 고강도 등의 장점이 있기 때문에 대부분의 규격 나사의 생산 목적에 이용되고 있다. 전조공법에서는 축류의 소재를 상대 운동하는 전조금형 사이에 넣고 접촉압을 가함으로써 전조금형에 새겨진 나사산을 이용하여 점진적으로 소재에 변형을 가하여 최종적으로 나사를 성형시킨다. 나사전조용 금형에는 비용은 저렴하지만 정도가 낮은 평금형과 비용은 비싸지만 정도가 높은 롤금형이 있다.

최근 고강력강, 스테인레스강, 내열강, 선조질강 등의 고강도 재료로 만들어진 나사의 수요가 증가하고 있고, 나사에 대한 내구성 및 신뢰성의 요구와 함께 저비용 생산기술에 대한 요구가 증대되고 있다. 나사 생산 공정의 성패는 치수정밀도에 따른 나사 품질과 성형용 금형 수명에 달려 있다. 따라서 난성형 소재 및 신소재의 나사전조공정에 대한 역학적 및 수치적 해석의 필요성이 대두되고 있다.

나사의 전조는 역학적으로 비교적 복잡한 문제에 속한다.

1. (주)명림
2. 경상대학교 박사후 과정
3. 경상대학교 기계공학과 대학원
4. 영신금속공업(주)
5. 한국생산기술연구원
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부/항공기술부품기술연구원
E-mail : msjoun@gnu.ac.kr

역학적 복잡성은 모든 절점의 속도 성분이 미지수이고 소성영역에 비하여 탄성영역이 매우 큰 점에 기인한다. 물론 잦은 요소망재구성 및 국부적 겹침의 발생 등으로 인하여 기하학적으로도 매우 복잡한 문제이다. 따라서 해석적 방법의 적용에는 많은 한계를 내포할 수밖에 없다. 역학적 및 수치해석적 관점에서 볼 때, 평금형에 의한 나사의 전조는 공정 해석의 관점에서 크로스웨지롤링(cross wedge rolling)과 유사하다. 나사전조 공정에 대한 유한요소 해석 문제는 다른 소성가공공정보다 해석을 위한 계산 시간의 비효율에 따른 장시간화가 일반적이다. 따라서 수치적 접근 방법에도 많은 한계점을 안고 있다. 즉, 점진 성형 공법이 가지고 있는 공통적인 문제인 과다한 해석 스텝으로 인하여 발생하는 계산 효율의 문제를 안고 있다. 이러한 문제는 컴퓨터 하드웨어 발전과 더불어 다소 개선되었고, 앞으로도 지속적인 개선이 이루어질 것이다. 나사 전조 공정의 특징은 공정 중 형상 변화가 매우 복잡하여 이를 효율적으로 표현하는데 한계가 있으며 전체 영역을 대상으로 상세해석을 실시할 경우 계산시간 측면에서 문제가 매우 많다는 점이다. 이러한 이유로 소성가공의 분야에서 널리 사용되고 있는 공정 시뮬레이션 기술의 접목 속도가 비교적 늦다.

위에서 언급된 많은 해석적 어려움에도 불구하고 다수의 연구자들이 소성가공 공정 시뮬레이션 기술의 접목을 시도하였다. Domblesky와 Feng [1]은 평면변형의 가정하에서 공정 변수가 나사전조에 미치는 영향에 관한 연구를 실시하였다. 3차원 해석 기술의 응용에 관한 연구도 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다. Kao 등[2]은 나사못 생산 공정 설계 시스템의 개발에 활용하였고, Pater 등[3]은 피치와 깊이가 큰 단열 나사인 슬리퍼 고정 나사(sleeper fixing screw)의 신제조공정인 일종의 크로스웨지롤링 공정의 개발에 활용하였으며, Kim 등[4]은 리드 스크루의 초기 소재 반경의 결정에 활용하였다. 그러나 위에서 언급된 저자들이 적용한 문제는 나사피치/유효경이 비교적 큰, 즉 나사산이 유효경에 비하여 치밀하지 않아 다른 소성가공 공정의 시뮬레이션과 큰 차별성이 없어 해석적 기술의 접목적 시도는 매우 낮은 수준이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 나사전조 공정에 초점을 맞추어 나사피치/유효경이 작은 12각플랜지볼트 제조를 위한 전체 공정을 대상으로 소성가공 공정시뮬레이션을 실시함으로써 접근 방법의 실용가능성을 평가하고자 한다.

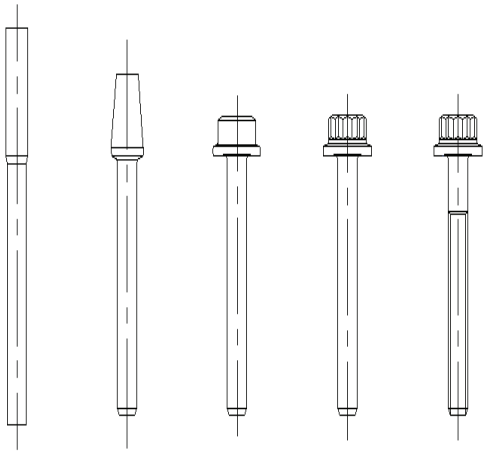
2. 나사제조 공정의 설명

Fig. 1은 나사 제조공정도를 나타내고 있다. 제 4단까지는 자동다단단조 공정에 의하여 생산이 되며, 마지막 단에서 나사전조가 실시된다.

제 1단과 제 2단은 각각 압출공정과 업세팅 공정으로써 소재의 대략적인 형상을 성형한다. 제 3단과 제 4단은 각각 헤딩공정과 후방압출공정이며, 이 두 공정은 나사의 머리를 성형하는 역할을 한다. 단조가공이 완료된 소재는 열처리 등의 후처리를 거치지 않고 전조공정으로 이송되어 나사산 가공으로 연결된다.

강소성 유한요소법에 근거한 AFDEX 2D와 AFDEX 3D[5]를 사용하여 Fig. 1의 나사제조 전체 공정의 시뮬레이션을 실시하였다. 유동응력은 선조질강인 ESW105의 인장시험으로부터 구하여 사용하였고[6,7], 제 4단까지 단조 공정에서의 마찰조건으로 쿨롱마찰법칙의 마찰계수 0.05를 사용하였다.

전조공정의 해석에서는 안정적인 수렴해의 획득을 목적으로 접촉절점이 매우 작은 관계로 접착조건을 사용하였다. 3단까지는 축대칭이므로 2차원 해석을 수행하였고, 4단에서 나사의 머리 부분이 성형되므로 3차원 해석을 수행하였다. 예측된 소재의 변형 형상과 각 공정의 종료 순간의 유효변형률 분포를 Fig. 2에 나타내었다.



Stage 1 Stage 2 Stage 3 Stage 4 Screw rolling

Fig. 1 A sequence of screw manufacturing processes

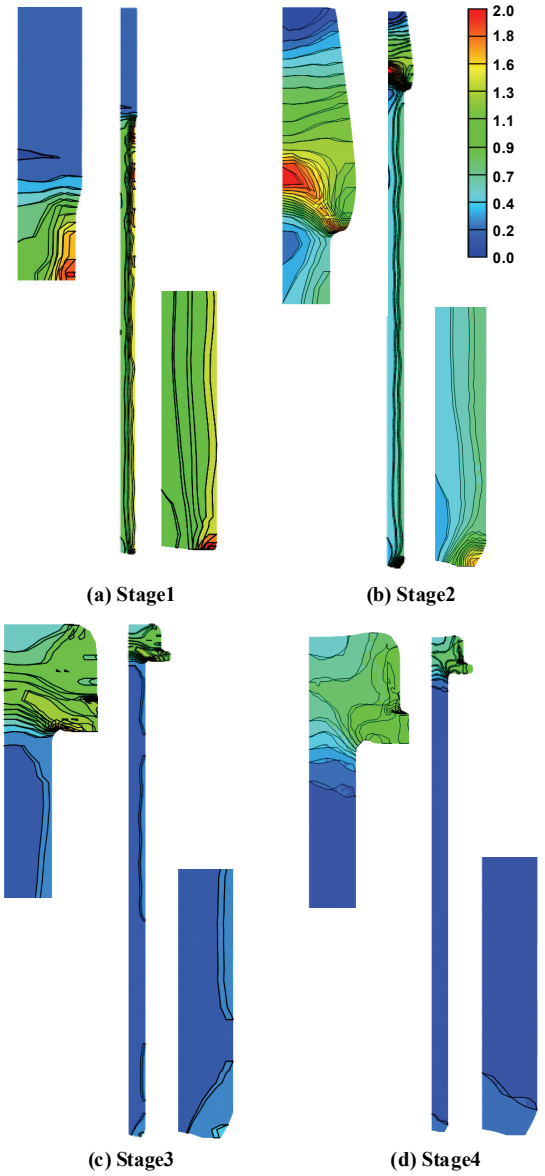
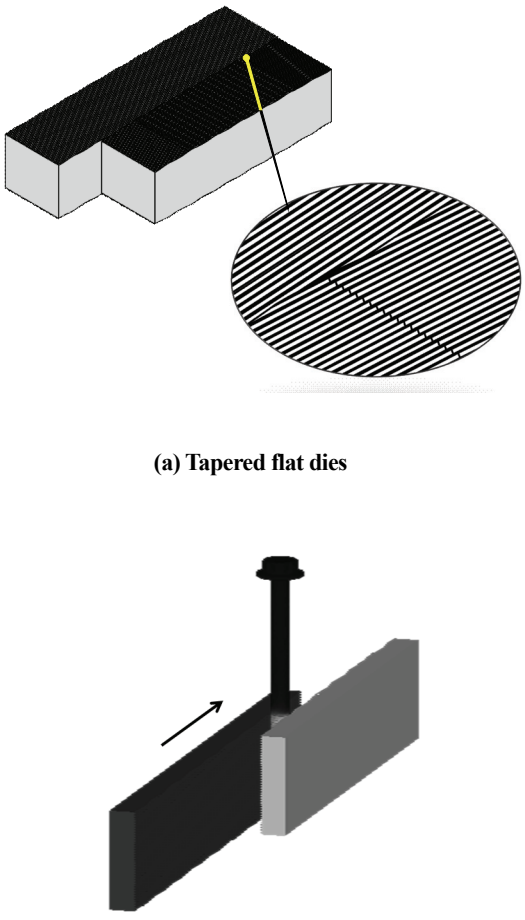


Fig. 2 Effective strain distribution

이 공정은 시뮬레이션 기술을 이용하여 소재의 유동이 최적화된 것으로 외견상 소성유동의 문제에 기인하는 형상 결함은 발생하지 않았다. 나사제조 공정의 특성상 머리부의 성형 시에 변형률이 크게 증가하였으며, 그 최대의 크기가 4.2에 이르고 있다. 그러나 나사산이 성형될 지점에서의 유효변형률은 약 0.04로 나타났으며, 이는 제 1단에서 작은 단면감소율로 압출을 실시한 것에 기인한다.

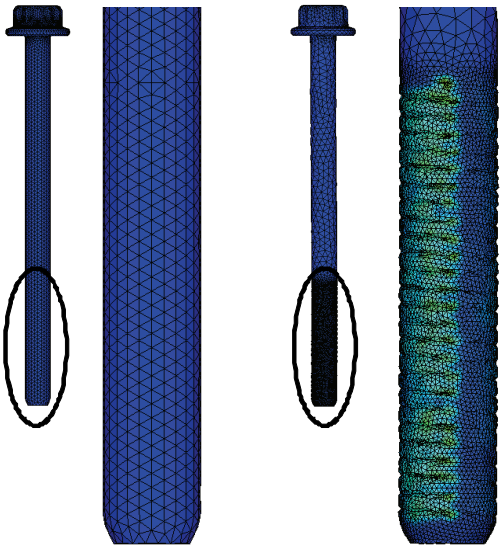


(a) Tapered flat dies

(b) Screw rolling process

Fig. 3 Screw rolling process with tapered flat dies

Fig. 3에서 보는 바와 같이 전조금형은 두 개의 평금형으로 이루어져 있다. 하나의 평금형은 고정되어 있고, 다른 하나는 고정된 평금형에 평행하게 상대운동을 한다. 전조공정 초기에 그립퍼(gripper)가 성형이 완료된 볼트 머리를 잡아 고정 평금형 위에서 일정한 힘을 가하여 균형을 유지시켜 주고 난 이후 슬라이딩 평금형이 소재를 물고 들어가면서 나사전조가 이루어진다. 일단 그립퍼를 소재가 떠나면, 두 금형에 새겨진 나사산에 의하여 소재의 균형을 유지하면서 기울어짐이 없는 상태로 전조가 실시된다.



(a) Solution step 1 (b) Solution step 400

(c) Solution step 600 (d) Solution step 1380

Fig. 4 Screw formation with effective strain distribution

Fig. 4에 나사전조 공정의 해석 결과를 나타내었다[6]. 나사전조 공정만의 결과를 얻는데 총 1,380개의 해석스텝이 소요되었으며, 이는 일반 단조공정의 시뮬레이션 시에 소요되는 300여개의 해석스텝 수에 비하면 매우 큰 수이다. 종료시점에서의 사면체요소 수는 85,000개이다.

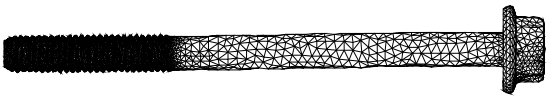


Fig. 5 Finite element mesh system at the final stroke

전체적으로 소재의 길이는 약 0.02% 증가하였으므로 길이변화는 무시 가능하다.

5 개의 시편에 대하여 나사 전조 전후의 길이를 측정하여 비교해 본 결과, 103mm의 길이의 단조 후 의 볼트 소재가 약 0.04mm 늘어난 것으로 나타났다. 따라서 실험결과와 해석결과는 늘어난 길이측면에서는 유사하다.

나사의 형상 특징상, 나사 전체를 해석 대상 영역으로 삼았을 경우, 유한요소해석의 과정에서 절점의 수를 늘리는데 한계가 있을 수 밖에 없다.

Fig. 4의 해석 결과를 얻기 위하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 나사가 성형되는 지점의 요소망의 밀도를 크게 하여 해석의 정도를 높이려고 노력하였으나, 해석 중 하나의 금형에 접촉하는 절점의 수는 약 350개에 지나지 않았다. 요소의 수를 증가시키는 것도 한계가 있을 수 밖에 없다. 사면체요소의 변의 길이를 평균적으로 반으로 줄였을 경우, 그 효과는 기대 이하인 반면 요소망의 수는 약 8배 증가하기 때문에 현실적인 해결 방법은 아니다. 따라서 나사산의 정확한 표현을 실현하기 위해서 전체의 소재를 해석하는 것은 공학적으로는 타당하지 않다. 기본적으로 나사전조는 성형이 발생하는 주위에서 나사의 축방향 변위는 크게 구속되므로 대칭조건을 둔 두 개의 평판 사이에 들어와 있는 소재만을 해석 대상 영역으로 선정하여 상세해석을 실시하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 4단의 단조공정과 나사전조 공정을 포함하는 장축 12각 볼트의 전조제조공정을 시뮬레이션하였다. 나사의 전조공정 해석이 강조되었으며, 계산의 효율과 정확도의 향상을 위하여 나사가 성형되는 부위를 조밀하게 모델링하기 위하여 요소밀도 제어기능을 사용하였다. 해석 결과 나사의 길이변화는 무시할 정도로 작게 나타났으며, 이는 실험적으로도 확인되었다.

나사산을 비교적 정확하게 표현하기 위해서는 기본적으로 절점의 수가 많아질 수 밖에 없다. 그리고 소재의 크기에 비하여 접촉영역이 작으면서 동시에 두 평판 사이에는 탄성력이 작용할 것으로 판단된다. 따라서 마찰조건 등의 설정과 적합한 유한요소해석 모델의 개발이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 현실적으로 가능한 방안으로는, 해석과 실험 결과 모두 길이 방향의 변형이 거의 발생하지 않기 때문에, 소수의 나사산을 포함하고 양면에 대칭조건을 설정한 해석모델을 제안한다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 청정기반전략기술개발사업과 교육과학기술부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0066590).

참 고 문 헌

[1] J. H. Kim, 2004, A comparative study about the anti-abrasional property of thread rolling dies of biomaterial joining method, Yeungnam University, Master's degree thesis.

[2] J. P. Domblesky, F. Feng, 2002, A parametric study of process parameters in external thread rolling, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 121, pp. 341~349.

[3] Y. C. Kao, H. Y. Cheng, C. H. She, 2006, Development of an integrated CAD/CAE/CAM system on taper-tipped thread-rolling die-plates, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 177, pp. 98~103.

[4] Z. Pater, A. Gontaz, W. Weron~ski, 2004, New method of thred rolling, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 153-154, pp. 722~728.

[5] K. H. Kim, D. H. Kim, D. C. Ko, B. M. Kim, 2002, Characteristics evaluation of process parameters for improvement the precision of thread rolling in lead screw", Proc. KSPE 2002 Autumn Conf., pp. 312~315.

[6] www.afdex.com

[7] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large of strains using a tensile test and finite element method. Mechanics of Material Vol. 40, No.7, pp. 586~593.

[8] M. S. Joun, J. G. Eom., M. C. Lee, J. H. Park, 2008, Tensile test based material identification program AFDEX/MAT and its application to two new pre-heat treated steels and a conventional CR-MO steel. International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, pp. 5774~5779.