

장축 다각 볼트 제조공정의 시뮬레이션 기술

한승상¹· 엄재근²· 장성민³· 이민철⁴· 전만수[#]· 강신준⁵· 손요현⁵

Special Simulation Technique of Multi-Faced Long Bolt Forging Process

S. S. Han, J. G. Eom, S. M. Jang, M. C. Lee, M. S. Joun, S. J. Kang, and Y. H. Son

Abstract

In this paper, limitation of rigid-plastic finite element method caused from rigid-plasticity assumption and numerical problem is investigated in detail and a useful scheme is proposed to get rid of the plastic deformation in rigid or elastic region. A typical example of a possible long bar extrusion process is given, which may be impossible to simulate without using the proposed scheme. The scheme is successfully applied to simulating the long bolt forging processes.

Key Words : Rigid-Plastic (강소성), Problem(수치적문제), High Aspect Ratio(고형상비), Volume Change(부피변화), Long Bolt Forging(장볼트단조)

1. 서론

소성가공 공정 시뮬레이션 기술은 이 분야의 개발 및 엔지니어링 업무에 혁신을 일으켜 왔다. 현재 소성가공 공정에서 발생하는 대부분의 주요 문제들이 이 기술에 의하여 해결되고 있고, 과거 공정 개발에 필수적이었던 시험생산의 과정이 대폭 줄어들었다. 이 기술은 소성가공 공정 개발의 대중화를 선도해 왔으며, 그 추세는 가속화될 수밖에 없다. 즉, 해당 분야와 공정에 관한 경험을 보유한 소수의 공정 개발 기관에 의존하던 과거의 신공정 개발 프로세서가 소성가공 공정 시뮬레이션 분야의 전문가를 보유한 기업체의 자체 공정 개발로 변화될 것이다.

소성가공 공정 시뮬레이션 기술은 유한요소법에 의하여 주도되어 왔다. 유한체적법에 바탕을 둔 시뮬레이션 기술은 계산시간 측면에서의 장점

으로 2000년대 초기에 많은 관심을 끌었던 것이 사실이지만, 이제 컴퓨터의 계산시간과 해석 기술의 발전에 힘입어 이 문제는 더 이상의 문제가 되지 않는 상황에 이르렀다. 유한요소법에서도 강소성 유한요소법이 실용적 측면과 결과의 신뢰성 측면에서 강점을 지니고 있다. 따라서 대부분의 실용적인 단조 시뮬레이션 기술은 강소성 유한요소법에 바탕을 두고 있다. 탄소성 유한요소법도 개발되어 있으나, 이론의 고난이도, 계산시간, 결과의 신뢰성 등의 측면에서 볼 때, 기업체에서 사용하는 데는 선결되어야 할 많은 문제를 내포하고 있다.

강소성 유한요소법은 성형 중에 대부분의 해석 대상 영역이 소성영역에 속하는 문제에서는 별 문제가 되지 않는다. 그러나 일부의 해석 대상 영역만이 소성영역에 속하고, 대부분의 영역이 탄성 변형 범위에 속할 때, 수치적 문제에 기인하는 문

1. 영신금속공업㈜
2. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터
3. 경상대학교 기계공학과 대학원
4. 경상대학교 기계공학과 박사후 과정
5. 영신금속공업(주)
#. 경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소
E-mail : msjoun@gnu.ac.kr

제를 수반한다[1]. 본 논문에서는 강소성의 이론적 한계와 수치적 문제로부터 발생하는 탄성영역의 인위적 소성변형에 관하여 설명하고 이의 해결 방안을 적용 예제와 함께 제시하고자 한다.

2. 강소성 유한요소법의 이론과 수치적 문제

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계 S 로 나누어지며, 경계 S 는 표면력 (traction)이 $t_i^{(n)} = \bar{t}_i^{(n)}$ 로 주어진 S_{t_i} , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 S_{v_i} , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 압축력이 작용하는 금형과 소재의 접촉면에서의 법선속도는 동일하다. 즉, S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화 (isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 와 정수압 p 를 구하자는 것이며, 평형방정식, 응력-변형률속도 관계식, 속도-변형률 관계식, 비압축성 조건식, 경계조건식 등으로 구성된 경계치 문제[2]로 수식화된다. 강소성 이론에서는 다음과 같은 변형률 관계식을 사용한다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 소성변형에 의한 변형률속도를 의미한다. 즉, 탄성변형은 발생하지 않는다고 가정한다. 그런데 이 가정하에서 탄성변형 영역의 유효 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 는 영이 된다. 이로 인하여 수치적 문제가 발생하게 된다.

강소성 유한요소법에서 전술한 수치적 문제를 해결하기 위하여 일반적으로 탄성체 영역 또는 $\dot{\epsilon}$ 가 허용최소유효변형률속도 수치보다 작을 경우에 이 허용최소유효변형률속도 수치로 간주하도록 하고 있다[1]. 다시 말하면, 탄성영역에서 식 (1)의 분모는 상수가 되며, (1)의 조건은, 재료의 유동응력이 변형률속도 의존적이지 않을 경우, 비압축성 재료의 후크법칙과 동일하게 된다. 물론 이 후크법칙은 실제의 재료의 성질을 반영하는 것이 아니라 대다수의 문제에서 사용상에 문제를 발생시키지 않을 정도로 미미한 영향력을 가진

인위적인 후크법칙이다. 문제는 강소성 유한요소법에서 절점의 새로운 위치의 계산 시에 탄성변형의 배제가 불가능하며, 이전 해석스텝의 응력정보를 사용하지 않는다는 점이다.

따라서 강소성 유한요소법에서 이론의 한계와 수치적 문제로 인하여 탄성변형 영역에서의 인위적 소성변형은 불가피하다. 대부분의 경우, 이러한 소성변형량은 매우 작은 값으로 공차 범위 이내에 존재하기 때문에 문제가 되지 않지만, 장축 압출과 같이 인위적인 소성변형량이 누적되어 허용 공차를 벗어나게 되는 경우가 존재할 수 있다. 이러한 경우는 실제 공정과 해석 결과는 다를 수 있다. 물론 허용최소유효변형률속도 수치를 작게 하면, 그 인위적인 소성변형량을 줄일 수 있으나, 이 값을 충분히 작게 하면 해의 수렴성이 크게 나빠지고, 유한요소해를 얻지 못하게 된다. 다음에 전술한 문제의 전형적인 예를 제시하였다.

Fig. 1은 실제의 공정도이다. 이 공정은 실제로 가능한 공정이지만, 강소성 유한요소법에 근거한 단조 시뮬레이터를 이용하면, 필연적으로 Fig. 2에 소 보는 바와 같이 불가능하다는 결과를 얻게 될 것이다. Fig. 2는 AFDEX 2D [3]의 일반적인 조건으로 해석하여 얻은 결과이다. 해석에 사용된 유동응력은 $\bar{\sigma} = 72.7E^{0.22}$ 이며, 마찰계수는 0.05이다. 펀치의 하강속도를 1.0 mm/s로 하였고, 허용최소유효변형률속도수치는 0.0001로 하였다. 참고로 다른 소프트웨어를 사용하여도 이 문제는 발생하였다.

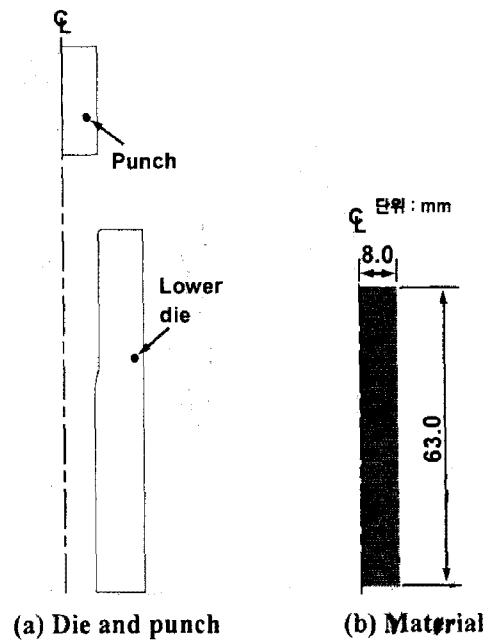


Fig. 1 Process definition.

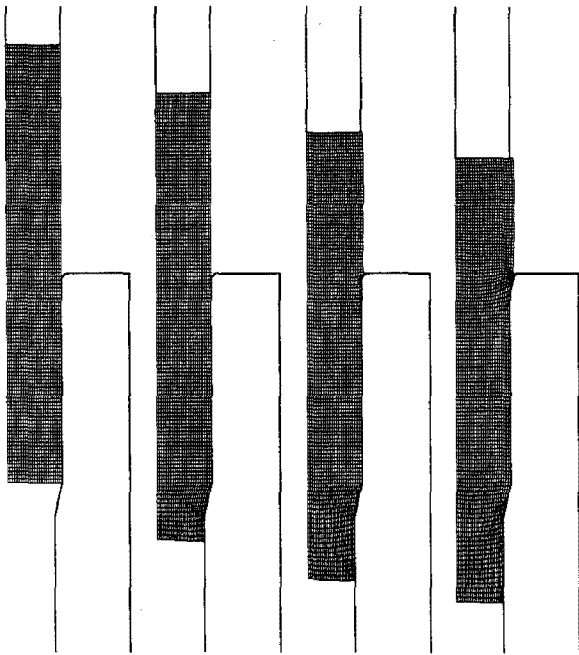


Fig. 2 Predictions obtained without eliminating plastic deformation of rigid or elastic zone during nodal updating

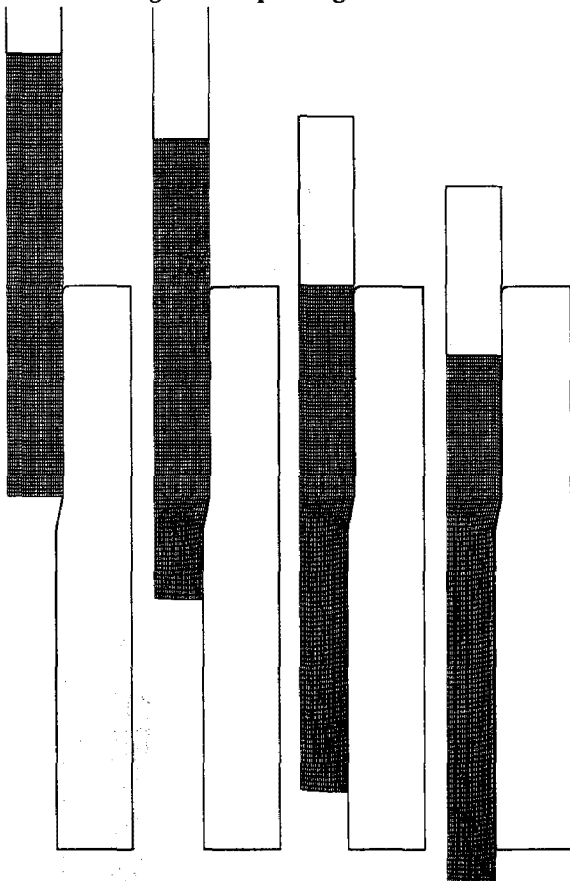


Fig. 3 Predictions obtained after eliminating plastic deformation of rigid or elastic zone during nodal updating

3. 수치적 문제의 대책

제2장에서 설명한 강소성 유한요소법이 안고 있는 수치적 문제는 2장에서 소개한 Fig. 1의 예와 같이 비교적 긴 축류의 압출과 인발 시에 주로 발생한다. 경험적으로 볼 때, 재료의 형상비가 5 이하이면, 탄성변형 영역의 인위적인 소성변형으로 인하여 문제가 되는 경우가 없다. 5 이상일 경우에도 많은 경우는 문제가 되지 않지만, 탄성영역의 비율이 소성영역에 비하여 현저하게 클 경우에 주의를 기울일 필요가 있다.

AFDEX에서는 이러한 문제의 해결을 위하여 형상비가 클 경우, 해석결과로부터 얻은 속도 정보를 바탕으로 절점을 이동시킬 때, 탄성영역에서 소재의 외곽 형상을 변경시키는 요소를 인위적으로 제거하고 있다. 이러한 인위적 제거는 다소의 부피변화를 초래할 수 있다. 이 문제는 부피변화를 사전에 반영한 재료의 치수 선정이나 해석 이후 부피의 보상 등으로 비교적 용이하게 해결될 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 1의 공정에 대하여 AFDEX를 이용하여 얻은 해석한 결과이며, 전술한 인위적 탄성변형 문제의 해결 기법이 해석에 적용되었다. Fig. 1의 예제는 실공정에서 발굴한 것으로 실제의 결과는 Fig. 3의 해석결과와 일치한다.

4. 장축 육각볼트 제조공정의 유한요소해석

Fig. 4는 장축 육각볼트 제조공정을 나타내고 있다. 총 4개의 단으로 이루어져 있으며, 3단까지는 축대칭 공정에 속하며, 마지막 공정에서 12각의 볼트를 성형한다. 재료는 ESW105[4,5,6]이며, 해석을 위한 마찰계수로 0.05가 사용되었다.

Fig. 5에 해석 결과를 나타내었다. 제1단의 해석 시에 전술한 AFDEX의 탄성영역의 인위적 소성변형 제거 기법을 사용하였으며, 이 기법으로 인하여 발생한 부피변화 3% 내외를 제2단으로 넘어가기 직전에 길이 방향으로 재료를 늘림으로써 부피변화를 인위적으로 보충하였다. 이 공정은 정상적인 시뮬레이션 기능으로 해석이 불가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 강소성 유한요소법에서 강제 영역 또는 탄성영역을 취급할 때 발생하는 수치적

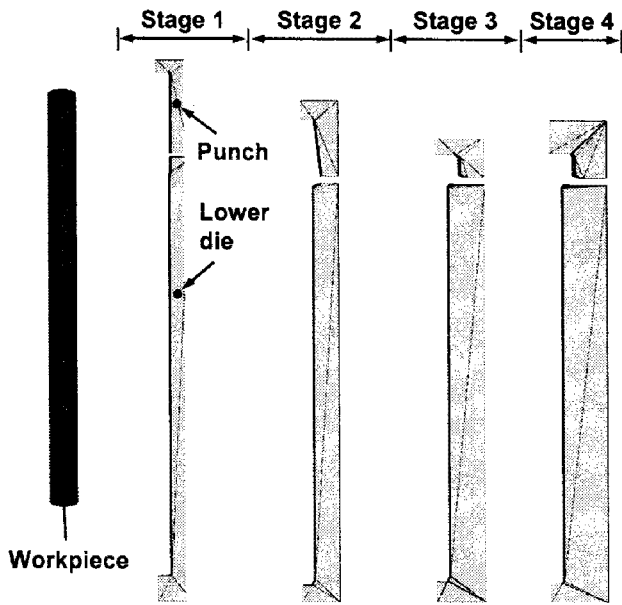


Fig. 4 Long bolt forging process

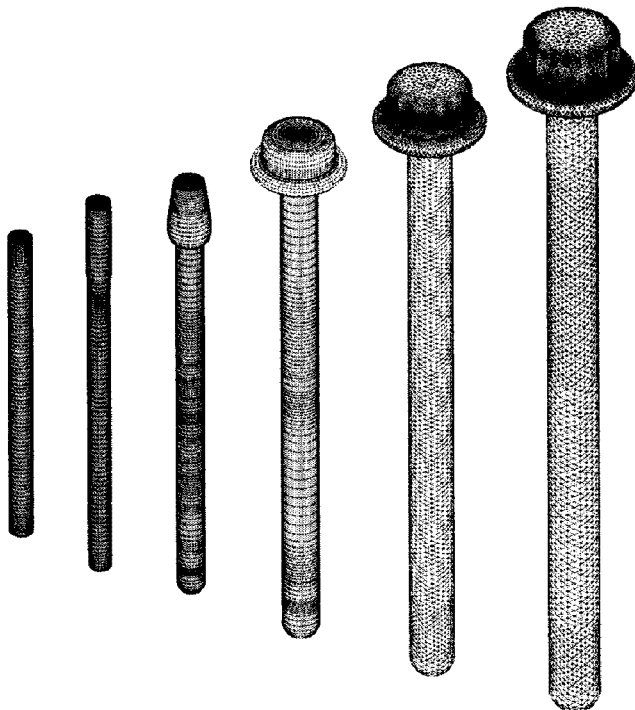


Fig. 5 Simulated results of the long bolt forging process

문제를 분석하였으며, 그 해결 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 강소성 유한요소법에서 수치적 문제의 해결을 위하여 도입한 허용최소변형률속도 수치에 기인한 인위적 소성변형량을 해석결과로 구한 속도 정보를 바탕으로 절점을 이동할 때 제거한다. 이러한 과정에서 부피변화가 무시할 수

없는 정도로 발생할 경우에는 인위적인 부피 보상 기능이나 초기 소재에 부피변화량을 반영하는 방법을 제안하였다.

실제의 공정에서는 가능하지만, 전통적인 강소성 유한요소법으로 해석했을 경우에 불가능하다는 결과를 내는 공정을 소개하였으며, 제시된 방법으로 실제의 공정에 적합한 결과를 얻었다.

적용 예제로 제시한 방법을 사용하지 않을 경우에는 해석이 불가능한 12각 장축볼트제조 공정에 대하여 시뮬레이션을 실시하였으며, 제시한 방법의 유용성을 입증하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부와 교육과학기술부의 연구비 또는 인력지원으로 실시되었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, Metal Forming and The Finite-Element Method, Oxford University Press,
- [2] 전만수, 2009, 고등 고체역학과 유한요소법, 진샘미디어
- [3] <http://www.afdex.com>
- [4] 안순태, 야마오카유키오, 10-2001-0056917, 09-14.
- [5] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, J. H. Park, D. J. Yoon, 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, The 9th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications, pp. 168.
- [6] 장성민, 엄재근, 이민철, 전만수, 2008, 인장시험의 실험과 해석 결과를 이용한 임계소상도의 결정, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 292~296.