

POSFORM - 단조공정 해석 및 설계용 CAE 시스템

황상무 전만수 류성룡 문호근
(포항공대) (경상대) (포항공대) (경상대)

POSFORM-A CAE System for Analysis and Design of Forging Processes

S. M. Hwang[†], M. S. Joun^{††}, S. R. Ryu[†] and H. G. Mun^{††}

[†] Pohang Univ. of Science and Technology, Dept. of Mechanical Engineering

^{††} Gyeongsang National University, Dept. of Mechanical Engineering

Abstract

A finite-element based forging simulator, POSFORM, for automatic computer simulation of two-dimensional and axisymmetric forging processes was introduced in this paper. POSFORM is characterized by solution accuracy, user-friendliness, applicability and extensibility. Basic principles and capabilities of the program were introduced. Several application examples found in cold or hot forging companies of automotive or mechanical parts were given.

1. 서론

국내의 단조산업은 관련 산업의 성장과 소재산업의 발전에 힘입어 양적·질적 성장을 지속해 왔으며, 최근의 자동차 산업 호황으로 새로운 전기를 맞고 있다. 대부분의 주요 기계부품의 생산이 단조품으로부터 시작되며, 일부 부품은 단조품의 질에 절삭가공가능 여부와 가공단가가 좌우되므로 단조 산업이 제조·생산 분야에서 차지하는 비중은 매우 크다. 국내의 단조기술은 비약적 발전 단계에 놓여 있다고 평가할 수 있다. 최근까지만 하더라도 일본으로부터의 수입품이 많았으나 일본으로의 역수출 물량이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 여건을 단조산업의 발전으로 직결시키기 위하여 체계적이고 과학적인 기술축적 과정과 고급 기술인력의 유입이 절실히 요구되고 있다.

단조산업의 발전을 가속화하기 위하여 기술적 측면에서는 소재기술, 설계기술, 금형제작기술, 열처리기술, 생산기술 등의 발전이 뒷받침되어야 한다. 국내의 단조공정 설계기술은 타분야에 비하여 낙후되어 있다. 설계보조도구가 별무하고 기술적 및 인적 환경이 관련산업의 발전에 비하면 크게 개선되지 않고 있다. 고급 기술인력의 단조산업 진출을 유인하기 위해서는 신

기술과 장비의 과감한 도입을 통한 공정개발 업무의 혁신이 필수적이다.

이러한 문제점들은 유한요소 시뮬레이션 기술[1,2,3,4]에 의하여 극복될 수 있다. 대부분의 단조공정 설계기술자들이 유한요소해석 기술에 관한 직간접적 경험을 갖고 있으나 이 기술의 활용은 기대에 크게 못미치고 있는 실정이다. 이러한 실정을 감안하여 저자들은 단조시뮬레이터 POSFORM을 개발하였다. 예측결과가 정확하고 단조설계 기술자이면 누구라도 사용할 수 있는 단조시뮬레이터를 개발하자는 점이 POSFORM 개발의 출발점이 되었으며, 이 점이 POSFORM의 특징이라고 할 수 있다. POSFORM의 주요 기능 및 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 최적의 접근방법을 사용하고 있고 해의 정확성이 매우 높다.
- 2) 공정적용을 강조하여 개발되었고 사용이 간단/용이하다.
- 3) 모든 이차원 및 축대칭 공정의 자동 시뮬레이션이 가능하며, 접근방법의 확장성이 우수하다.
- 4) 새로운 기능의 추가와 요구 조건의 반영이 용이하다.
- 5) 자체적으로 개발된 전용 후처리 프로그램의 지원을 받고 있다.

본 논문에서는 전술한 POSFORM의 기능 및 특징의 배경을 개략적으로 설명하고, 기업체 현장에서 발굴한 문제들에 대한 적용결과를 소개함으로써 단조시뮬레이터 POSFORM의 정확성과 유용성을 소개하고자 한다.

2. 단조시뮬레이터 POSFORM

2.1 결과의 정확성

강소성이론에서는 이론이 쉽고 계산시간이 단축되므로 소성변형에 비하여 상대적으로 매우 적은 탄성변형을 무시하고 있다. 특수성형 공정을 제외한 대부분의 소성가공 공정에서 가속도의 영향은 미미하므로 해석시 이를 무시하고 있다. 또한 소재는 등방성경화의 성질을 지니고 있다고 가정하고 있다. 강소성 유한요소법은 이러한 가정을 배경으로 하고 있으며, 일반적으로 이러한 가정들이 해의 정확도에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고 있다. POSFORM은 전술한 강소성 유한요소법에 이론적 근간을 두고 있다.

소성가공 공정 시뮬레이터가 예측한 해석 결과의 정확도는 요소망의 질, 입력된 소재의 성질, 마찰조건 등에 좌우된다. 상온상태에서 소재의 변형저항식은 인장시험 또는 압축시험으로부터 비교적 정확하게 구할 수 있다. 마찰조건으로는 일정전단마찰모델과 Coulomb 마찰모델을 주로 사용하고 있는데 실제의 현상은 후자에 가깝다. 그러나 많은 경우가 일정전단마찰모델을 사용하고 있다는 점을 관련 문헌에서 확인할 수 있다. 그 이유는 일정전단마찰모델이 수식화 및 수치적 측면에서 쉽고, 계산시간이 적게 소요되기 때문이다. 마찰에 민감한 완전소성재료의 링압축 문제에 대한 해석결과가 두 모델 사이의 유사성을 보여주고 있으므로[2] 일정전단마찰 모델도 일부의 문제에 대해서는 신뢰성이 높은 결과를 예측해 줄 것으로 기대되며, 이러한 사실에 근거하여 일정전단마찰모델을 광범위하게 사용하고 있다. 그러나 많은 경우가 이러한 개념의 확장을 허용하지 않는다는 점을 간과해서는 안된다[2]. 그 대표적인 예를 Fig.1과 2의 열간박판압연공정(40%압하율, $\bar{\sigma} = \hat{\epsilon}^{0.15}$)에 대한 해석결과에서 찾을 수 있다. 마찰인자로 $m=1.0$ 을 사용하였는데도 불구하고 일정전단마찰모델로는 마찰언덕을 충분히 표현할 수 없음을 확인할 수 있다. 이러한 문제는 금형압력 분포의 변화가 심한 단조공정에서도 마찬가지다. 비록 일정전단마찰모델이 소성유동을 비교적 정확하게 예측하는 경우라도 금형수명의 예측 목적으로

그 결과를 사용하는 데는 한계가 있을 수밖에 없다. S. M. Hwang 등은 이러한 기존의 유한요소법이 안고 있는 접촉문제 특히, Coulomb 마찰조건 처리시에 수반되는 문제를 개선하기 위하여 벌칙강소성 유한요소법을 개발하여 다양한 종류의 해석 및 설계 문제에 성공적으로 적용한 바 있다[5-8]. 이 방법의 장점으로 Coulomb 마찰모델을 정확하게 표현한다는 점과 수렴성 역시 양호하다는 점을 들 수 있다. 따라서 벌칙강소성 유한요소법은 정밀 소성가공 공정의 자동유한요소 해석 목적에 적합하다고 하겠다. POSFORM은 전술한 벌칙강소성 유한요소법에 바탕을 두고 있고 Coulomb 마찰모델을 근간으로 하고 있다. 따라서 POSFORM이 예측하는 해석결과의 정확도는 높다고 할 수 있다.

2.2 사용자 친밀성

단조공정의 시뮬레이터가 지녀야 할 가장 중요한 조건이 사용자와의 친밀성이라는 인식하에, POSFORM의 개발과정에서 단조공정 설계 전문가들의 의견을 적극적으로 반영하였다. 특히, 단조회사에서 문제가 되고 있는 실제의 공정들을 발굴하여 개발과정에서 시험 공정으로 사용하였다. 이러한 노력의 대표적인 결과로서, 다단공정의 자동 시뮬레이션, 소성유동의 가시화, 플림열처리 및 피어싱 공정의 처리, 전용 후처리 프로그램 등을 들 수 있다. 따라서 POSFORM은 현장설계자가 손쉽게 사용할 수 있도록 계획되었다는 점이 장점이다. 단조공정 설계 경험자가 컴퓨터 사용에 대한 기본 지식을 지니고 있다면, 30분 이내에 사용법의 숙지가 가능하다.

단조공정 시뮬레이터는 매우 복잡한 계산 과정의 복합체이므로 사용자의 중간 개입을 배제하지 않으면, 활용성이 떨어지게 된다. 단조공정 시뮬레이션의 자동화를 위해서는 요소망재구성의 자동화가 필수적이며, 자동요소망재구성은 적용 영역을 확대하는데 있어서 핵심기술이다. 따라서 요소망 자동생성 기법 및 관련 프로그램이 단조공정의 자동유한요소해석에 사용되기 위해서는 일반성과 유연성이 보장되어야 한다. POSFORM은 두가지 방법의 요소망재구성 기법을 제공하고 있는데, 각 방법 및 관련 프로그램의 성능이 단조공정의 자동유한요소해석 목적에 최적절하도록 개발되었으며, 이 점은 공정적용을 통하여 입증될 것이다. POSFORM에서 사용하고 있는 요소망재구성 기법의 기능 및 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이차원의 경우 사각형요소만을 사용하고 있으며, 소요망의 질이 우수하다.
- 2) 절점 수의 제어가 가능하므로 시뮬레이션 종료 시점의 예측이 가능하다.
- 3) 천이영역의 수를 최소화할 수 있으므로 최소bandwidth의 최소화에 따른 계산시간의 최소화가 가능하다.
- 4) 해석경계에서의 요소질이 특히 우수하므로 접촉영역에서의 요소질이 해의 정확도에 큰 영향을 미치는 소성가공 공정의 해석에 적합하다.
- 5) 해석경계의 길이 변화, 각 요소의 절대적 및 상대적 각도변화량, 금형과 해석 영역과의 상관관계, 사용자의 요구 등을 고려하여 요소망재구성 시점을 자동적으로 결정한다.
- 6) 해석경계, 요소망재구성 이전의 경계조건 및 금형과 소재간의 상대속도, 금형정보 등을 고려하여 요소망생성 데이터를 자동생성하도록 하였으므로 빈번한 요소망재구성이 야기하는 해의 부정확성을 최소화하였다.
- 7) 요소망자동생성 후 절점의 위치를 최적절하게 위치시킴으로써 해석결과의 정확도를 높임과 아울러, 요소망재구성 회수가 최소화되도록 하였다.

한편, 사용된 접근방법의 삼차원 확장이 가능하다는 점이 POSFORM에서 사용된 요소망재구성

관련 기법의 장점이다.

POSFORM은 두 가지 형태의 입력 데이터 구조 즉, 상세형과 간소형을 제공하고 있다. 상세형은 해석에 필요한 모든 초기값을 사용자가 작성하는 것이고, 간소형은 시뮬레이터가 자동적으로 초기조건을 영 또는 일정한 값으로 간주하는 것이다. 다만 공정의 자동 시뮬레이션이 하나의 입력데이터로 가능하도록 되어 있으므로 대부분의 단조공정 시뮬레이션 문제는 간소형을 사용하여 해결 가능하다. 상세형에서 입력해야 할 데이터의 양은 매우 많다. 여기에는 절점의 위치, 국부좌표계, 온도, 속도, 변형율, 정수압, 소재의 성질, 요소정보, 금형 정보 등을 비롯한 모든 공정 데이터가 포함된다. 물론 이 입력데이터를 자동 생성하는 프로그램을 제공하고 있다. 간소형은 소재의 반경과 높이 또는 소재형상, 소성유동을 가시화하기 위한 격자의 수, 소재의 초기조건(온도 등), 소재의 성질, 금형데이터 등만으로 구성되어 있으며, 이 입력데이터를 만드는데 걸리는 시간은, 직접 금형을 설계한 설계자의 경우, 수분 또는 수십분이면 충분하다. 단조공정의 경우, 최초로 전 공정에 관한 모든 데이터를 입력한 후 해석과정중에 해석결과를 바탕으로 손쉽게 설계변경을 반영할 수 있도록 하였고, 금형의 위치를 사용자가 편한대로 입력할 수 있도록 하였다.

해석 결과로, 금형하중, 응력, 변형율, 변형율속도, 정수압, 금형압력, 속도, 소성유동선도 등을 비롯한 모든 설계정보가 출력 및 저장되며, 이 결과들은 전용 후처리 프로그램과 자동적으로 연결되도록 되어 있다. 후처리 프로그램은 PATRAN, AutoCAD을 비롯한 범용 프로그램과 연결되도록 되어 있음은 물론, 자체적으로 개발된 후처리 프로그램 SHOFLOW를 제공하고 있다. SHOFLOW는 일반적인 후처리 전용 프로그램이 가지고 있는 기능뿐만 아니라 컴퓨터 애니메이션 기능을 제공함으로써 해석 결과의 가시화를 통한 설계정보의 조기 추출을 돕고 있다.

3. 공정적용 사례

Fig.3-10은 공정적용 결과이다. Fig.3-9의 공정은 단조관련 회사에서 문제가 된 대표적인 공정들이다. 그리고 시뮬레이션 결과들은 실제의 공정 결과와 직간접적으로 비교검토되었으며, 예측결과와 실제현상은 매우 잘 일치하였다.

Fig.3은 파이핑의 생성을 예측한 결과이며, 실제의 현상을 매우 잘 반영하고 있음을 확인한 바 있다. Fig.4는 베어링 내외륜의 냉간단조 공정이며, 결육이 생기는 과정을 보여 주고 있다. 그림에서 예측된 최종제품의 형상과 실제로 단조된 제품의 형상은 매우 잘 일치하였다. Fig.5는 농기구 부품으로 공정설계가 실패로 이어지는 과정을 잘 보여 주고 있다. 이 결과 역시, 실제의 공정 결과와 매우 잘 일치하였다. Fig.6-9은 자동차용 각종 기어류와 베어링의 열간단조 공정을 시뮬레이션한 결과이다. 열간공정은 고온 등의 제약조건으로 실제의 공정과 정확하게 비교검토할 수 없었으나, 제품과 기술자의 관찰을 통하여 직간접적으로 결과의 타당성을 확인하였다. Fig.10은 새로운 요소망재구성 기법에 의한 해석 결과이다. 이 공정은 냉간축대칭단조 공정으로 프로그램의 성능을 조사하기 위한 가상의 공정이다.

4. 결론

본 논문에서는 단조 시뮬레이터 POSFORM과 공정적용 결과를 소개하였다. POSFORM의 장점으로, 사용이 쉽고 해가 정확하다는 점과 확장성이 우수하다는 점을 들 수 있다. 또한, 개발단계

부터 단조공정 설계기술자의 의견을 적극적으로 반영해 왔다는 점과 추가적인 요구를 손쉽게 반영할 수 있다는 점을 특징으로 지적할 수 있다. 이러한 점들은 다양한 종류의 공정적용을 통하여 입증되었다.

단조 시뮬레이터는 단조공정 설계자 자신이 될 수 없다. 단조공정 설계 기술의 특성상 경험 기술이 중요하므로 단조 시뮬레이터는 단조공정 설계 기술자의 친구에 지나지 않는다. 개발자로서 POSFORM은 사귀기에 쉽고 장래성이 밝은 친구라는 점을 지적할 수 있다.

후기

본 논문의 예제들은 현장에서 실제 문제가 되고 있는 공정들을 발굴한 것이다.

본 연구에 도움주신 대연정공사, 삼광공업사, 현대기공, 대창단조, 한국종합기계(주), 현대자동차(주) 등의 관계자 여러분들에게 심심한 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

- [1] C. H. Lee and S. Kobayashi, "New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", *ASEM Trans., J. Eng. for Ind.*, Vol.95, p.865, 1973.
- [2] S. M. Hwang, M. S. Joun and J. S. Park, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece Interface in Metal Forming," *Trans. of NAMRI of SME, Vol. XVIII*, pp.13-19, 1990.
- [3] S. I. Oh, W. T. Wu, J. P. Tang and A. Vedhanayagam, "Capabilities and Application of FEM Code DEFORM: the Perspective of the Developer," *J. of Materials Processing Tech.*, Vol.27, pp.25-42, 1991.
- [4] Y. K. Lee, N. K. Lee and D. Y. Yang, "A New Automatic Remeshing Technique for Finite Element Analysis of Metal Forming Process," *Computational Engineering*(Edited by B. M. Kwak *et al.*), Elsevier, pp.441-446, 1993.
- [5] Park, J. S. and S. M. Hwang, "Automatic Remeshing in Finite Element Simulation of Metal Forming Processes by Guide Grid Method," *J. of Materials Processing Tech.*, Vol. 27, pp. 73-89, 1991.
- [6] S. M. Hwang and M. S. Joun, "Analysis of Hot Strip Rolling by a Penalty Rigid-Viscoplastic Finite Element Method," *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol.34, No.12, pp.971-984, 1992.
- [7] S. M. Hwang, M. S. Joun and Y. H. Kang, "Finite Element Analysis of Temperatures, Metal Flow, and Roll Pressure in Hot Strip Rolling," *ASME Trans., J. Eng. for Industry*, Vol. 115, pp. 290-298, 1993.
- [8] M. S. Joun and S. M. Hwang, "Optimal Process Design in Steady-State Metal Forming by Finite Element Method -I.Theoretical Consideration," *Int. J. Mach. Tools and Manufacture*, Vol. 33, No. 1, pp. 51-61, 1993.

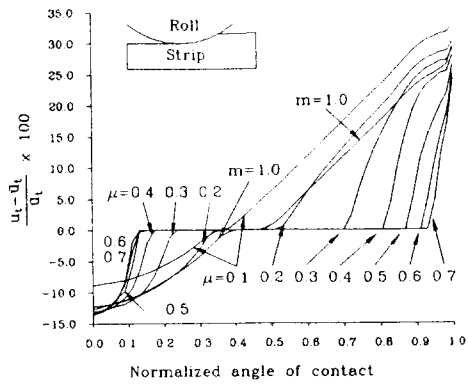


Fig.1 Variation of sticking region with frictional conditions.

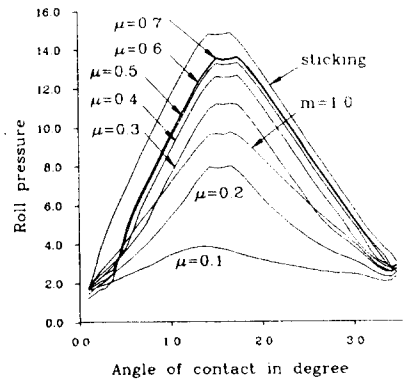


Fig.2 Variation of roll pressures with frictional conditions.

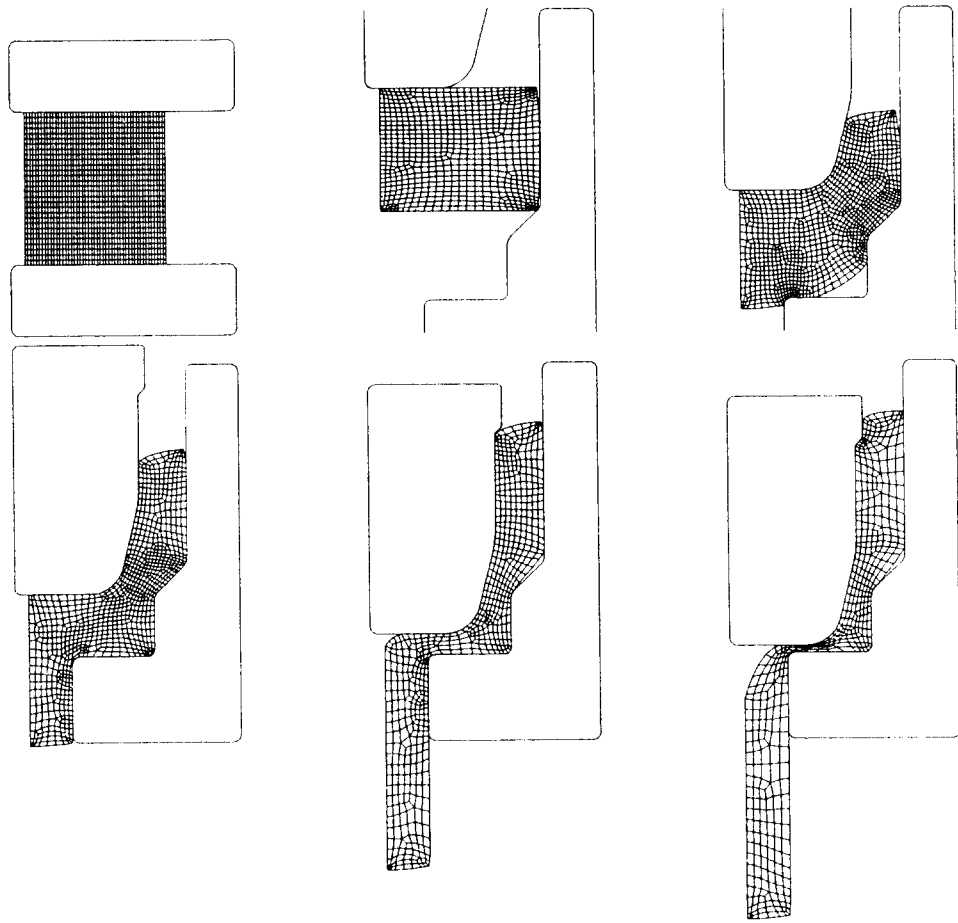


Fig.3 Formation of piping defect in a cold forging process.

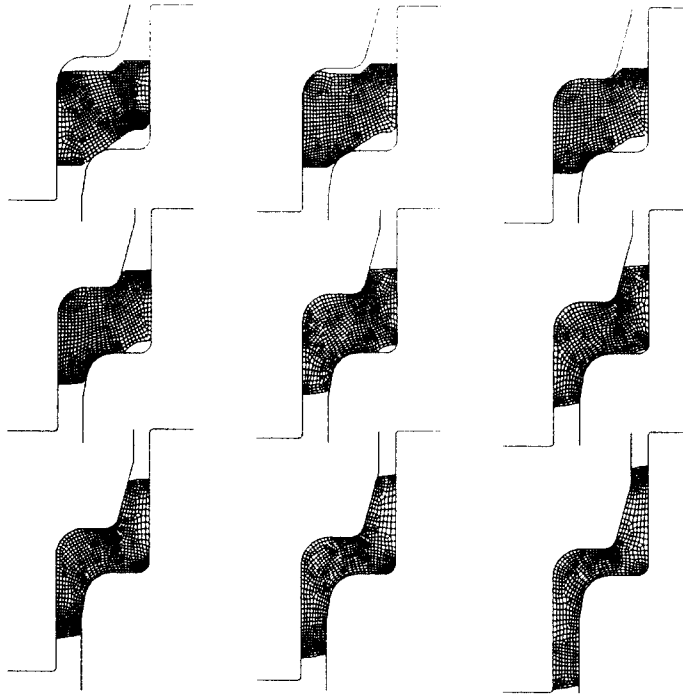


Fig. 4 Formation of unfilling defect in a cold forging process.

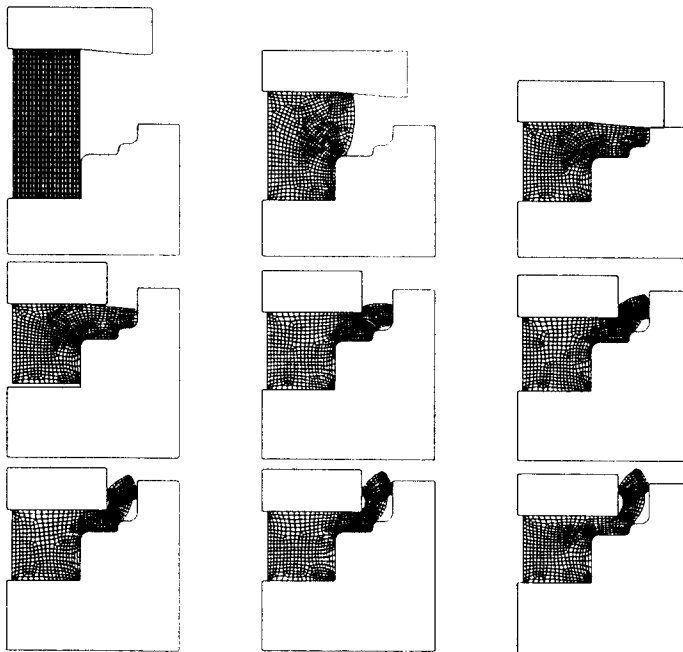


Fig. 5 Formation of bending defect in a cold forging process.

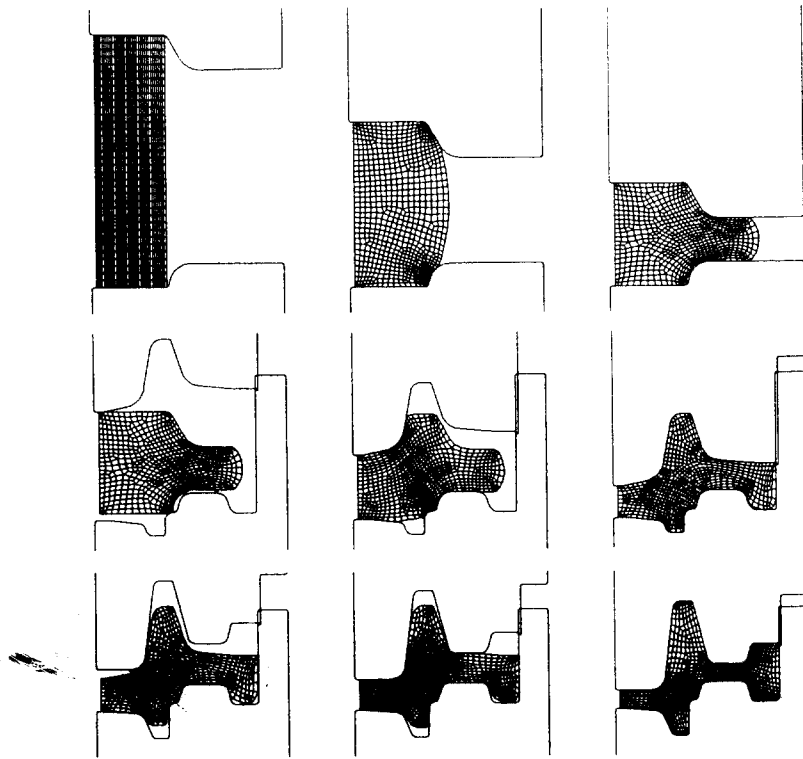


Fig.6 Simulation of a three-stage close-die hot forging process.

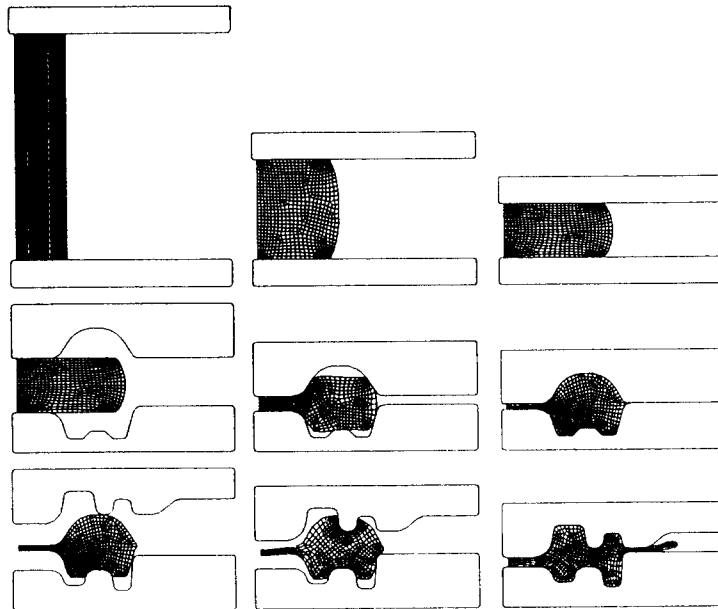


Fig.7 Simulation of a three-stage open-die hot forging process.

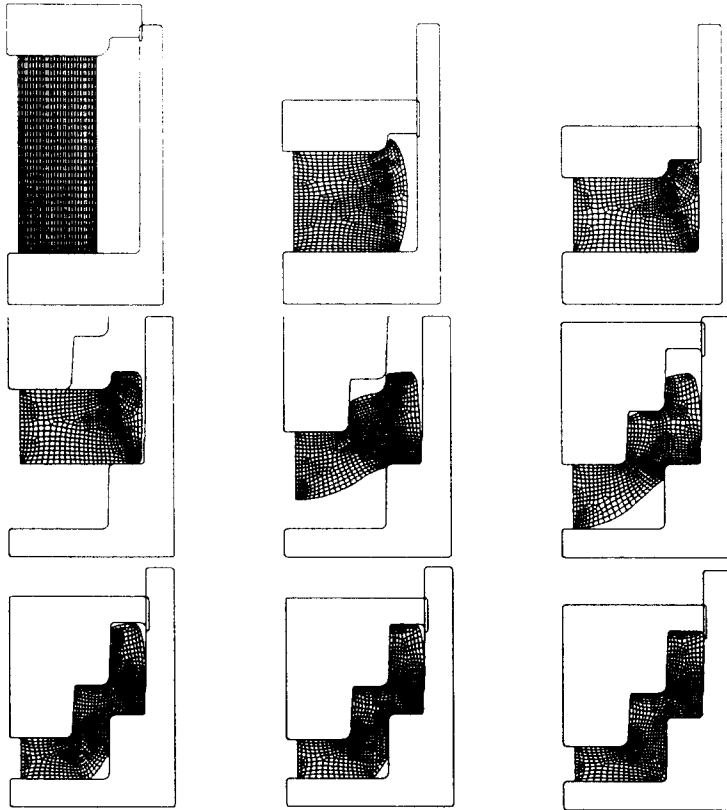


Fig.8 Simulation of a hot forging process,
sensitive affected by the preform.

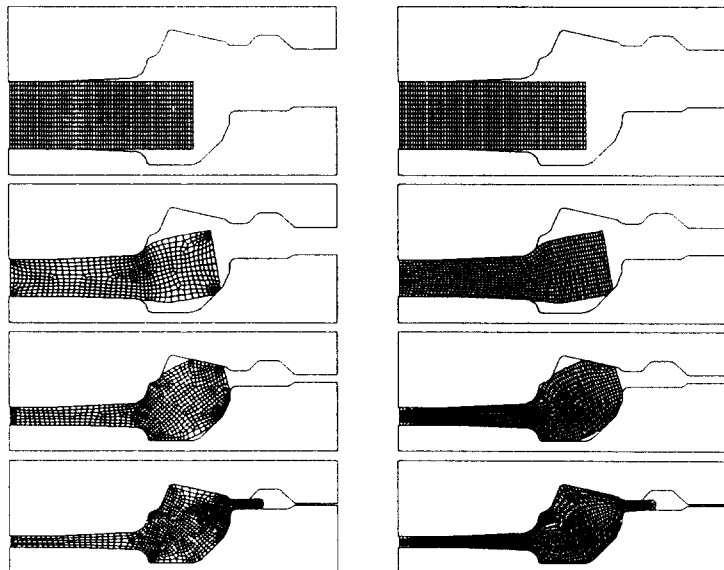


Fig.9 Metal flow visualization of a hot forging process.

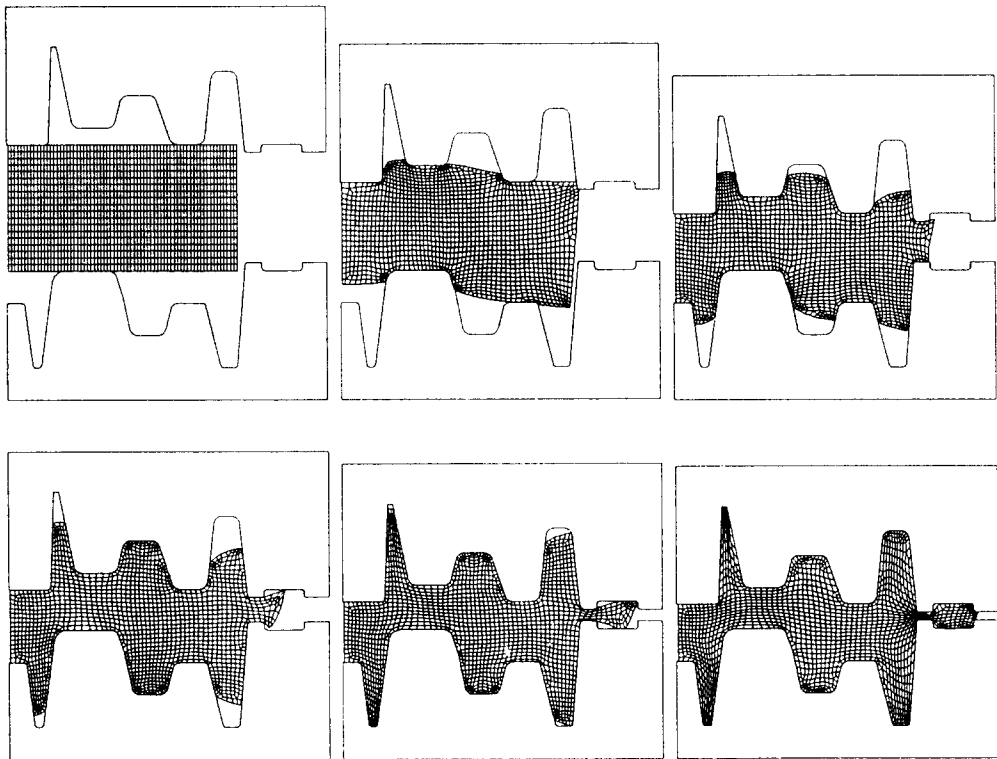


Fig.10 Simulation of a complex forging process by a new remeshing scheme.