

비축대칭 형상의 밀폐형 링 단조에 관한 연구

배원병*, 김영호**, 이종현***, 이원희***

* 부산대학교 기계설계공학과, ** 부산대학교 생산기계공학과

*** 부산대학교 대학원

A Study on the Non-Axisymmetric Closed-Die Ring Forging

Won-Byong Bae*, Young-Ho Kim**, Jong-Heon Lee***,
Won-Hee Lee***

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Pusan National University

** Dept. of Mechanical and Production Engineering, Pusan National University

*** Graduate, Pusan National University

ABSTRACT

An upper bound elemental technique(UBET) is applied to predict the forging load and die-cavity filling for non-axisymmetric ring forging. In order to analyze the process easily, it is suggested that the final product is divided into three different deformation regions. That is axisymmetric part in corner, lateral plane-strain part and shear deformation on boundaries between them. The plane-strain and axisymmetric part are combined by building block method. Also the total energy is computered through combination of three deformation part. Experiments have been carried out with pure plasticine billets at room temperature. The theoretical predictions of the forging load and the flow pattern are in good agreement with the experimental results.

Key Words : Non-Axisymmetric Ring Forging, UBET, Rib-Web Shape, Shear Energy, Plane-Strain Part, Axisymmetric Part, Plasticine

1. 서 론

단조산업의 발달정도는 그 나라의 항공기, 자동차와 같은 장치산업의 기술 수준과 직결되는 추세에 있다. 최근 첨단 혁신기술에 대한 선진국의 기술이전 장벽이 더욱 높아가고 있어 항공기 구조용 부품 제조를 위한 생산기술의 개발이 급선무이다.

항공기 구조용 부품중에서 소재 단면의 형상이 리브-웹(rib-web)형인 부품이 상당히 많다. 리브-웹형 단조 부품에 대한 연구가 다수 있으나 대부분 재료

유동이 평면변형이나 축대칭이고 비축대칭 유동에 관한 연구는 해석상의 어려움 때문에 저조한 편이다. 특히 단면이 리브-웹형인 비축대칭 링 부품의 설계는 첨단기술의 개발과 관련하여 연구되어야만 한다.

리브-웹형 단조 부품에 대한 이론적 해석에는 슬래브법, 상계법, 상계요소법(UBET), 유한요소법(FEM) 등의 수치적인 방법이 주로 사용되고 있다. 이 중에서 유한요소법⁽¹⁾은 방대한 계산량, 현장에서의 실용성, 계산장비나 인적자원에 대한 경제성의 측면에서 나름대로 제약이 있다. 그러나, 상계요소법은 그 적용의 간편함과 계산시간의 단축, 해석결과의 상대적인 유용함에서 장점이 인정되어 소성 가공의 전반에 걸쳐 연구되고 있다. 특히 상계요소법은 유동장 내의 소재를 단순한 형상의 여러가지 요소로 분할하여 해석함으로써 슬래브법과 기존의 상계법에 비해 비교적 복잡한 유동을 해석할 수 있어 많이 연구되고 있다.

한편, 링 단조에 관한 연구를 살펴보면, 링 업셋 단조(ring-upset forging)에 관한 연구는 Kudo⁽²⁻³⁾가 극한 해석을 사용하여 첫번째로 시도하였다. 그 후 상계법에 의한 연구가 활발히 진행되었으며, Avitzur 등⁽⁴⁾은 링 단조에서 Kudo의 연구를 더 확장시켜 단조 가공시의 유동패턴과 하중 등을 계산하여 유동이 안쪽 또는 바깥쪽으로 움직이지 않는 중립면의 개념을 도입하였다. Lee 등⁽⁵⁾과 Nagpal 등⁽⁶⁾, Avitzur 등⁽⁷⁻⁹⁾은 동적 가공 속도장에 중립반경 유동변수를 준독립 변수로 포함시켜 해석하였다. 링 업셋 단조에 관한 많은 연구가 비교적 간단한 속도장을 사용하는 상계법으로 해석되었다. 반면에 축대칭 밀폐형 링 단조에 관한 연구는 Keife⁽¹⁰⁾가 상계요소법으로 중립면의 개념을 도입하여 연구한 적이 있으며, Marques 등⁽¹¹⁾은 사각 링인 비축대칭 문제에서 단면이 사각형인 소재를 원형단면으로 단조하는 공정으로 유한요소법을 사용하여 축대칭과 평면변형으로 나누어 해석하였다. 그러나 리브-웹형 단면을 가진 비축대칭 링 단조의 공정설계에 관한 상계요소 해석은 찾기가 어렵다.

따라서 본 논문은 리브-웹형의 단면을 가진 비축대칭 링(사각 링 형상) 단조를 상계요소법으로 해석하기 위하여 링을 해석이 쉬운, 평면변형부와 축대칭부로 나누고, 각 단계에서의 모르는 경계 속도를 준독립변수(pseudo-independent parameter)로 하여 전체에너지를 최소화함으로써 비축대칭 링 단조공정의 하중과 다이충만도를 결정하였다. 그리고 이론해석의 타당성을 검증하기 위하여, 모델재료인 백색과 흑색의 플라스틱인(plasticine)을 교대로 적층하여 초기시편을 만든 후 재료시험기인 MTS(Material Testing System)를 이용하여 상온에서 실험하였다.

2. UBET 해석

상계요소법은 에너지법의 일종으로 상계법을 기초로 한다. 상계요소법으로 소성변형 문제를 해석하는대는 소성변형 영역 전체를 여러가지 형태의 요소로 나누어 해석할 수 있으나, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 단면이 리브-웹형인 비축대칭 링 형상을 평면변형부와 축대칭부로 나누어 해석하고자 한다.

2.1 기초이론

평면변형부와 축대칭부를 각각 여러가지의 단순한 요소로 분할하고, 분할된 각 요소의 속도장은 외부속도 경계조건과 요소들 사이의 수직속도 연속조건, 체적

일정 조건을 만족하는 Oudin⁽¹²⁾과 Kiuchi⁽¹³⁾ 등이 제안한 동적가용 속도장을 이용하였다. 평면변형부는 Oudin 등이 제안한 Fig. 2 (a)와 같은 4각형과 사다리꼴요소를 사용하였고 축대칭부는 Kiuchi 등이 제안한 Fig. 2 (b)의 4각형과 3각형 요소를 사용하였다.

단조 가공시의 전체 에너지소비율은 다음과 같다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f \quad (9)$$

각 요소내의 내부 변형 에너지소비율 \dot{W}_i 는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma}_t \bar{\epsilon}_t dV \quad (10)$$

여기서, 유효변형률 속도 $\bar{\epsilon}_t = \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right]^{1/2}$ 이다.

식 (10)에서 $\bar{\sigma}_t$ 는 가공경화 재료에 있어서 t번째 단계에서 유효응력을 나타내며 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_t = K \bar{\epsilon}_t^n \quad (11)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_t = \bar{\epsilon}_{t-\Delta t} + \Delta t \bar{\epsilon}_{t-\Delta t}$ 이며 $\bar{\epsilon}_{t-\Delta t}$ 는 식(12)와 같다.

$$\bar{\epsilon}_{t-\Delta t} = \frac{\dot{W}_i}{V_{t-\Delta t} \cdot \bar{\sigma}_{t-\Delta t}} \quad (12)$$

식(12)에서 $V_{t-\Delta t}$ 는 t-Δt단계에서 요소의 체적이다.

전단 에너지소비율, \dot{W}_s 는 속도불연속면, 즉 요소와 요소 사이의 경계에서의 전단 변형에너지율을 나타내며 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_t}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V_s| ds_s \quad (13)$$

여기서, $|\Delta V_s|$ 는 요소 사이의 전단면에서의 속도 불연속량이다.

또한, 마찰 에너지소비율, \dot{W}_f 는 다이와 소재 사이에서의 마찰손실에 의한 에너지소비율을 나타내며 아래 식과 같다.

$$\dot{W}_f = m \frac{\bar{\sigma}_t}{\sqrt{3}} \int_{S_f} |\Delta V_f| ds_f \quad (14)$$

여기서, m은 마찰정수(friction factor) ($0 < m < 1$), $|\Delta V_f|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량을 나타낸다.

가공이 진행될수록 삼각형과 사각형, 사각형과 사다리꼴로 분할된 소성 변형 영역이 경계 조건에 따라 속도를 알 수 있는 면과 가정해야 하는 면으로 나누어진다. 가정한 면에 포함된 미지 속도변수(N_i)와 중립면의 위치변수(P)를 준독립 변수로 하여 이 준독립변수가 포함된 세 영역의 전체에너지 소비율, 즉 $J^* =$

$J^*(N_1, N_2, N_3, \dots, N_n, P)$ 을 최소화하기 위해 FPS(Flexible Polyhedron Search)⁽¹⁴⁾ 방법을 사용하였다. 최소화된 전체 에너지소비율에서 각 부의 속도장과 중립면을 결정하게 된다.

그리고 가공하중(forming load) L 은 다음 식으로 구하였다.

$$L = \frac{J^*}{U_0} \quad (15)$$

여기서, U_0 는 다이속도이다.

2.2 변형후 요소재구성

다이 진행에 따른 재료의 층만과정을 조사하기 위해서는 가공 전체단계를 다이 진행에 따라 여러 단계로 나누어 각 단계에서의 전체 에너지소비율을 최소로 하는 등적가용 속도장을 이용하여 각 요소의 시간증분 Δt 이후의 좌표를 결정한다. 각 요소의 시간증분 Δt 이후의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_i' &= X_i + \Delta t \cdot U_{ij} \\ X_{i+1}' &= X_{i+1} + \Delta t \cdot U_{i+1,j} \\ Y_j' &= Y_j + \Delta t \cdot V_{ij} \\ Y_{j+1}' &= Y_{j+1} + \Delta t \cdot V_{ij+1} \end{aligned} \quad (16)$$

위의 좌표 $X_i', X_{i+1}', Y_j', Y_{j+1}'$ 는 Δt 변형후의 요소의 절점좌표를 나타낸다. 변형 후 인접 요소 사이에 미끄럼이 발생하여 접선 속도 불연속이 생기게 되고, 요소의 크기와 경계 조건이 바뀌게 되어 인접 요소들 사이의 경계의 불일치(mismatching) 등이 발생한다. 따라서 다음 단계를 진행하기 위하여 수직, 수평 투사에 의한 요소 재구성방법⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

2.3 평면변형과 축대칭 결합부에 관한 근사해석

비축대칭 문제와 같이 복잡한 형상의 제품은 해석 가능한 단순한 형상의 요소들의 조합으로 근사화할 수 있다. 해의 단순화를 위하여 Fig. 1의 최종제품에서와 같이 구석 부분 4개를 합쳐 축대칭 유동으로 간주하였으며 나머지 직선 부분의 요소는 링의 폭에 비해 길이가 상대적으로 길기 때문에 평면변형으로 가정하여 해석하였다. 또한 그 경계부분의 속도 불연속에 의한 전단 에너지소비율을 계산한 후 각각 조합함으로써 비축대칭 전체 에너지소비율을 구하였다. 본 프로그램의 전체 흐름도(flow chart)는 Fig. 3과 같다.

한편, 축대칭과 평면변형부의 경계부에서 중첩되는 각 요소의 전단 에너지소비율은 다음과 같이 구하였다.

$$W_{\text{boundary}} = \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}} \int |\Delta V| ds \quad (17)$$

여기서, $|\Delta V| = \sqrt{(U_{\text{axi,R}} - U_{\text{plane,X}})^2 + (V_{\text{axi,Z}} - V_{\text{plane,y}})^2}$ 이다.

또한 ds 는 경계부분에서 축대칭요소와 평면변형요소의 공유 면적이며 $U_{\text{axi,R}}$ 은 경계부분에서 축대칭부의 R방향 속도 성분, $U_{\text{plane,X}}$ 는 경계부분에서 평면변형부의 X방향 속도 성분, $V_{\text{axi,Z}}$ 는 경계부분에서 축대칭부의 Z방향 속도 성분,

$V_{plane,Y}$ 는 경계부분에서 평면변형부의 Y방향 속도 성분을 나타낸다.

Fig. 4는 일정 높이감소율에서 평면변형과 축대칭부의 요소재구성에 따른 유동형상을 경계부에 중첩하여 나타내고 있다. 그림에서와 같이 다이가 진행됨에 따라 임의의 단계에서 평면변형과 축대칭부의 유동속도가 달라서 유동형상이 변화되므로 경계부에서 요소들이 일치하지 않고 엇갈림이 생긴다. 이때 각 단계별 전단 에너지소비율은 다음과 같이 계산하였다.

Fig. 4에서와 같이 각 요소의 경계를 X축에 따라 좌표값을 AX(1), AX(2), ... AX(N)으로 설정하여 경계부에서의 각 요소들이 평면변형과 축대칭부의 몇 번 요소에 해당하는가를 프로그램상에서 인식하도록 하였다. 요소 A의 경우에는 평면변형과 축대칭부가 다같이 (1,1)인 요소번호를 가짐으로 두 부분의 (1,1)인 요소의 속도값과 변형을 등을 읽어 요소 A에 대한 전단에너지를 구하였다. 요소 B인 경우는 AX(3)와 AX(4)사이의 요소로 평면변형과 축대칭부에서 몇 번 요소를 포함하고 있는가를 보면 각각 (3,1)과 (2,1)이라는 것을 알 수 있다. 따라서 평면변형부의 경우는 (3,1), 축대칭부의 경우는 (2,1)의 데이터를 이용하여 전단에너지를 계산하도록 하였다. 요소 C의 경우는 평면변형부의 요소는 있지만 축대칭부의 요소는 없기때문에 속도차이에 의한 미끄럼이 발생하지 않아 전단에너지를 계산하지 않도록 하였다. 다른 요소들도 모두 요소 A, B, C 중의 하나에 포함되므로 같은 방법으로 해석하였다.

3. 비축대칭 모델실험

비축대칭 리브-웹형 링제품의 단조실험을 위하여 재료는 Harbutt's Plasticine 사 제품인 순수 플라스틱인(pure plasticine)을 사용하였다.

순수 플라스틱인의 항복특성에 관한 기초연구⁽¹⁶⁾에서 응력과 변형을 관계는 Fig. 5와 같으며 관계 식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.17797 \bar{\epsilon}^{0.0822} \text{ (MPa)} \quad (18)$$

비축대칭의 링 단조실험은 소재의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스틱인을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 얇은 사각 링 모양으로 만들어 교대로 쌓아서 초기소재를 만들었다. 다이는 S 20C의 소재로 제작하였는데 단조 후 다이와 플라스틱인의 분리를 용이하게 하기 위하여 다이의 반을 각각 따로 만들어 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록 하였다. 사용된 다이의 한 예는 Fig. 6과 같다.

시험장치는 로드 셀(load cell)이 100 kN인 M.T.S를 이용하여 다이속도 0.5 mm/sec로 탈크 파우더(talc powder) 윤활제(m=0.4)를 사용하여 실험하였고 M.T.S에 부착된 X-Y plotter로 하중곡선을 얻었다. 실험하는 동안 시편을 일정한 온도로 유지하기 위하여 시편과 다이를 오븐(oven)속에서 24시간 정도 보관하여 사용하였으며, 항온 항습기를 사용하여 실내온도를 상온으로 일정하게 유지하였다.

4. 결과 및 검토

각 단계별 소재 유동과정은 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)와 같이 각각 축대칭부와 평

면변형부로 나누어서 관찰을 하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각에 대하여 격자 변형 양상을 보여 주고 있다. 축대칭부는 링의 형태이기 때문에 링 단조시에 중립면의 존재 때문에 링의 안쪽부분과 바깥부분의 유동양상이 서로 다르다. 다이가 하강함에 따라 중립면의 위치가 점점 바깥 방향으로 이동하게 되고 안쪽 부분의 리브보다도 바깥부분의 리브가 더 빨리 채워짐을 알 수 있었다. 이와같은 축대칭부의 중립면 변화는 저자들의 앞선 연구 결과⁽¹⁷⁾에서 언급된 바가 있다. 또한 플래시부로 빠져 나오는 양도 바깥부분이 안쪽부분 보다 더 많았다. 평면변형부는 축대칭부와는 달리 다이 진행에 따라 중립면이 소재의 한쪽 단면의 중심에 위치하여 소재유동이 좌우대칭 형태를 이룸으로써 다이충만도와 플래시량도 안쪽과 바깥쪽이 같았다.

Fig. 9의 (a)(b)는 적층한 플라스틱의 평면변형과 축대칭부의 최종단계의 재료유동 형상을 나타낸다. 평면변형과 축대칭부의 동일한 높이 감소율에서 두 부분의 요소를 겹치면 요소들이 일치하지 않고 어긋나게 되는데 Fig. 7-9에서도 알 수 있다. 실험상으로는 평면변형과 축대칭의 경계부에서는 소재가 연속적으로 변형을 하게 되나 수치해석상으로는 경계부 요소의 불일치가 생기게되므로 이에 대한 보정으로 경계부의 전단에너지를 2.3 절의 전단에너지 해석방법으로 구하였다.

Fig. 10은 평면변형부와 축대칭부, 경계부에서의 다이 진행에 따른 단조하중의 이론치를 선도로 나타낸 것이다. 여기서 평면변형부의 하중선도가 축대칭의 선도보다 높은 것은 축대칭부는 링의 사각 모서리 부분임으로 평면변형부에 비해 체적이 적은데 원인이 있다. 또한 경계부에서의 전단 하중은 전체하중에 비해 무시할 정도로 작으며, 높이감소율의 증가에 따라 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 전체 가공하중의 이론치와 실험치를 높이 감소율에 따라 비교한 것을 나타낸다. 이 선도에서 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

비축대칭 링 단조를 상계요소법으로 해석하기 위해 최종 링 형상을 평면변형과 축대칭부분으로 나누어 해석한 후 조합하는 방법을 사용하였으며, 모델재료인 플라스틱으로 실험하여 비교 검토한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 비축대칭 링 단조 문제를 비교적 해석이 용이한 평면변형과 축대칭부로 나누고 조합하여 해석하는 방안을 수립하였다.
- 2) 평면변형과 축대칭의 결합부에서 요소좌표 인식에 의해 전단에너지를 고려함으로써 비축대칭 링 단조의 공정설계에 보다 쉽게 접근할 수 있었다.
- 3) 경계부의 전단 에너지소비율은 전체 단조하중에 비해 무시할 정도로 작았으며 다이진행에 따라 변화가 거의 없었다.
- 4) 플라스틱으로 실제 제품형상과 동일한 치수로 실험한 결과 소재유동형상과 단조하중 등이 이론치와 비교적 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국과학재단의 특정 목적기초 연구의 일부로 수행되었으며, 동 재단의 관계자분께 깊은 감사를 드립니다.

6. 참고문헌

1. W. T. Wu and S. I. Oh, "ALPIDT: A General Purpose FEM Code for Simulation of Non-Isothermal Forming Processes", Proc. NAMRC-XIII, Berkeley, California, 1984, pp. 449.
2. H. Kudo, "An Analysis of Plastic Compressive Deformation of Lamella between Rough Plates by Energy Method", Proceedings of the 5th Japan National Congress for Applied Mechanics, 1955, pp. 75 - 78.
3. H. Kudo, "Some Analytical and Experimental Studies of Axi-Symmetric Cold Forging and Extrusion, Part I", Int. J. of Mech. Sci., vol. 2, 1960, pp. 102 - 127.
4. B. Avitzur, "Forging of Hollow Discs", Israel Journal of Technology, Vol. 2, 1964, pp. 295 - 304.
5. C. H. Lee and T. Altan, "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders", J. Eng. Ind., Trans. ASME, 1972, pp. 775 - 782.
6. V. Nagpal, G. D. Lahoti and T. Altan, "A Numerical Method for Simultaneous Prediction of Metal Flow and Temperatures in Upset Forging of Rings", J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 100, 1978, pp. 413 - 420.
7. B. Avitzur and C. J. Van Tyne, "Ring Forming : An Upper Bound Approach. Part 1 : Flow Pattern and Calculation of Power ", J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 104, 1982, pp. 231 - 237.
8. B. Avitzur and C. J. Van Tyne, "Ring Forming : An Upper Bound Approach. Part 2 : Process Analysis and Characteristics", J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 104, 1982, pp. 238 - 247.
9. B. Avitzur and C. J. Van Tyne, "Ring Forming : An Upper Bound Approach. Part 3 : Constrained Forging and Deep Drawing Applications", J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 104, 1982, pp. 248 - 252.
10. H. Keife, "A New Technique for Determination of Preforms in Closed Die Forging of Axi-Symmetric Products", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, 1985, pp. 473 - 477.
11. M. J. M. Barata Marques and P. A. F. Martins, "A Rigid - Plastic Finite Element Analysis of Ring Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, 1990, pp. 13 - 18.
12. J. Oudin and Y. Ravalard, "An Upper Bound Method for Computing Loads and Flow Patterns in Plane-Strain Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 21, 1981, pp. 237 - 350.
13. M. Kiuchi and S. Shigeta, "Application of Upper Bound Elemental Technique (UBET) to Asymmetric Forging Process", J. of JSTP, Vol. 22, No. 251, 1981, pp. 1208 - 1214.
14. D. M. Himmelblau, "Applied Nonlinear Programming", McGraw-Hill, 1972, pp. 152.

15. 김현영, 김동원, “소성가공시 재료유동에 대한 수치해석 및 모델실험”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제2호, 1993, pp. 285 - 299.
16. 김영호, 배원병, 김진훈, 이종헌, “축대칭 단조공정에서 상계요소법을 이용한 최적 초기소재와 예비가공형의 예측”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), 1992, pp. 376-379.
17. 김영호, 배원병, 이종헌, 남경훈, “축대칭 링 단조에 관한 UBET해석”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1994, pp. 180-184.

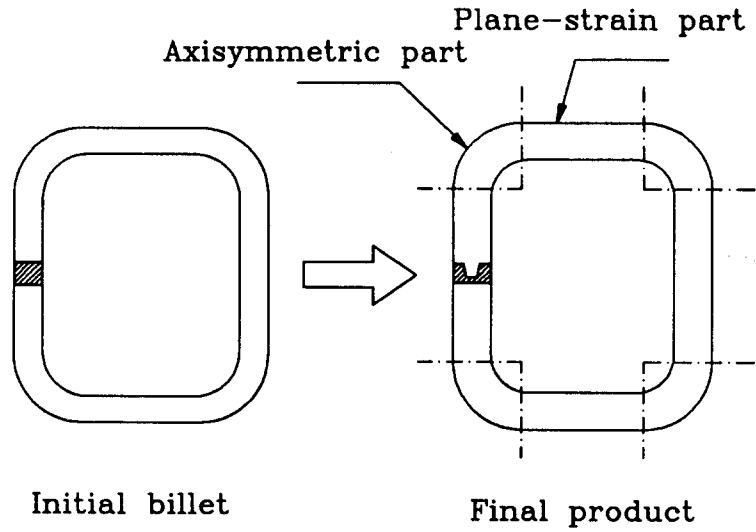
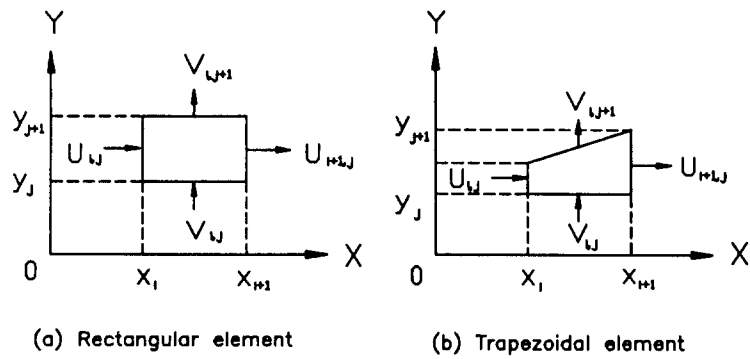
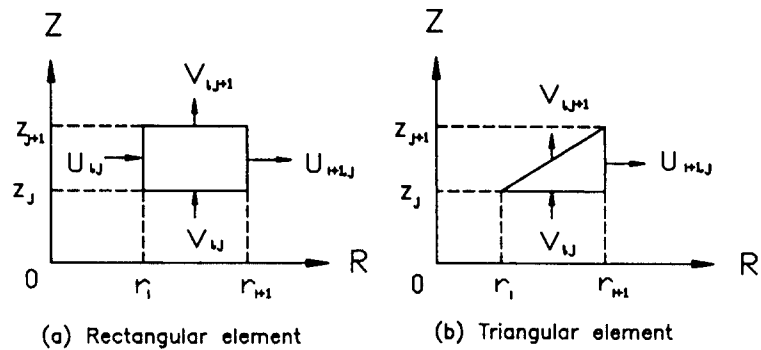


Fig. 1 Geometry of initial billet and final product



(a) Plane-strain part



(b) Axisymmetric part

Fig. 2 Normal velocity distributions on boundary for elements

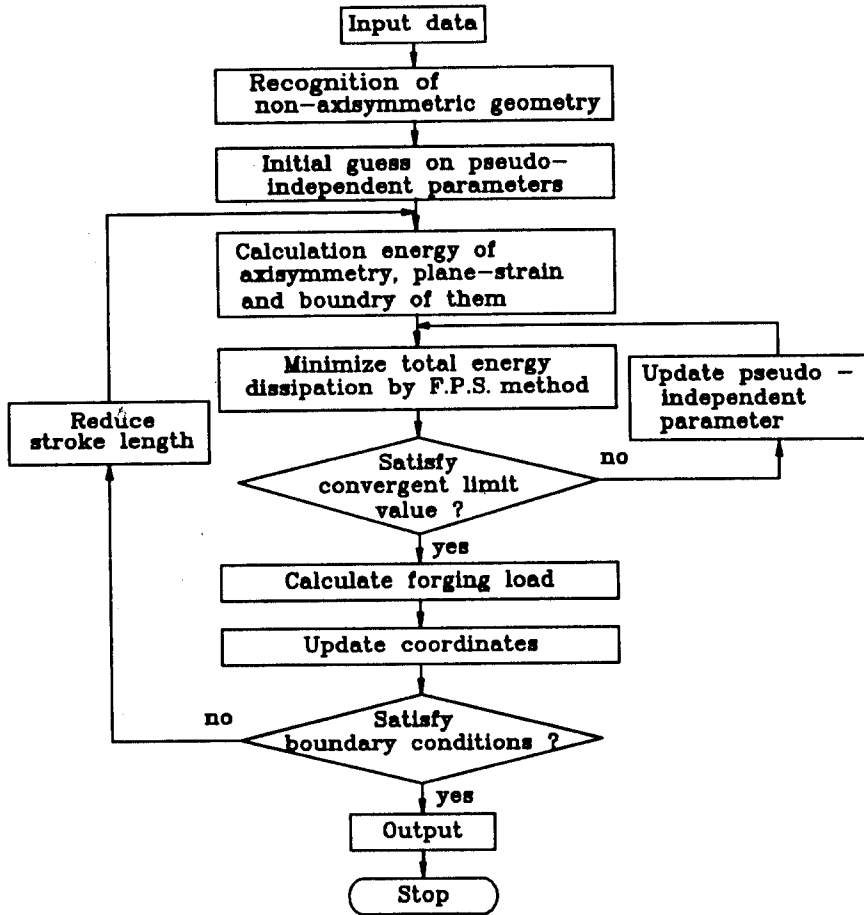


Fig. 3 Flow chart for non-axisymmetric forging

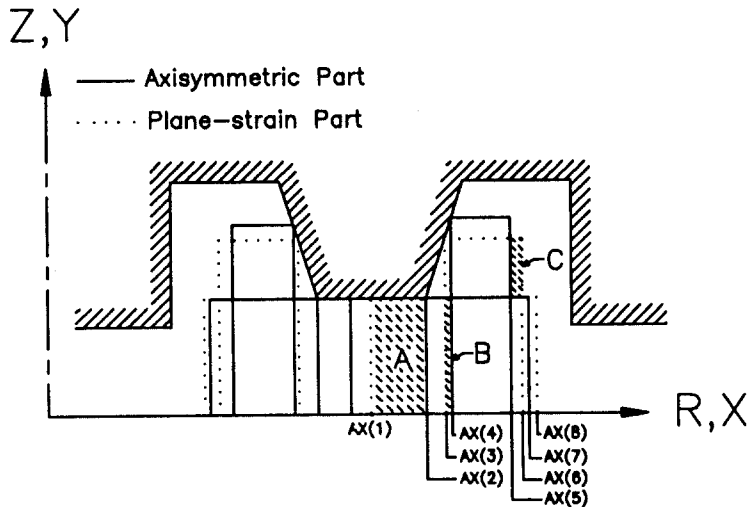


Fig. 4 Overlap of flow pattern of boundary between plane-strain part and axisymmetric part

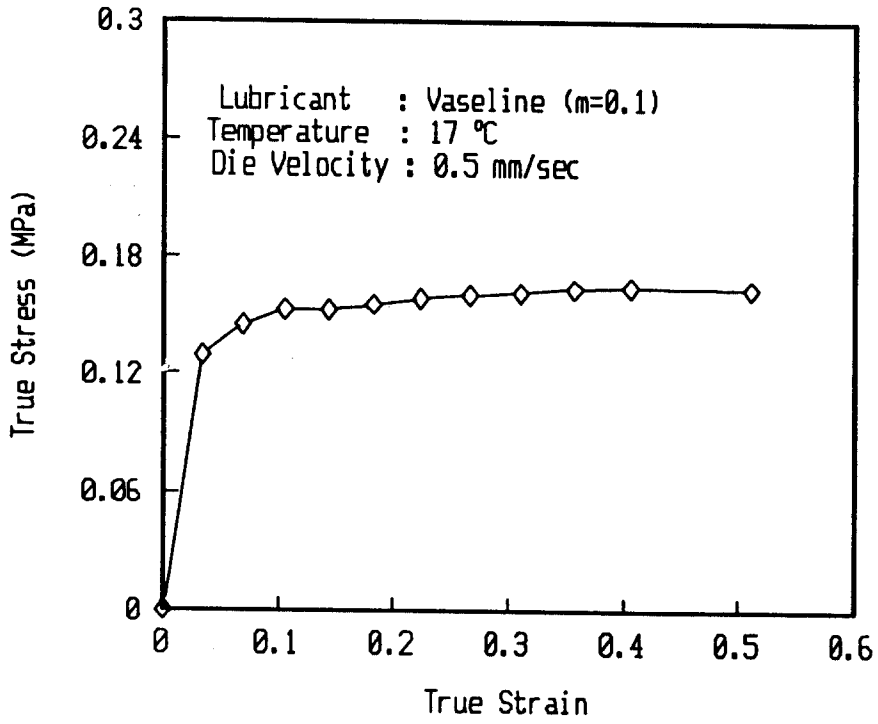
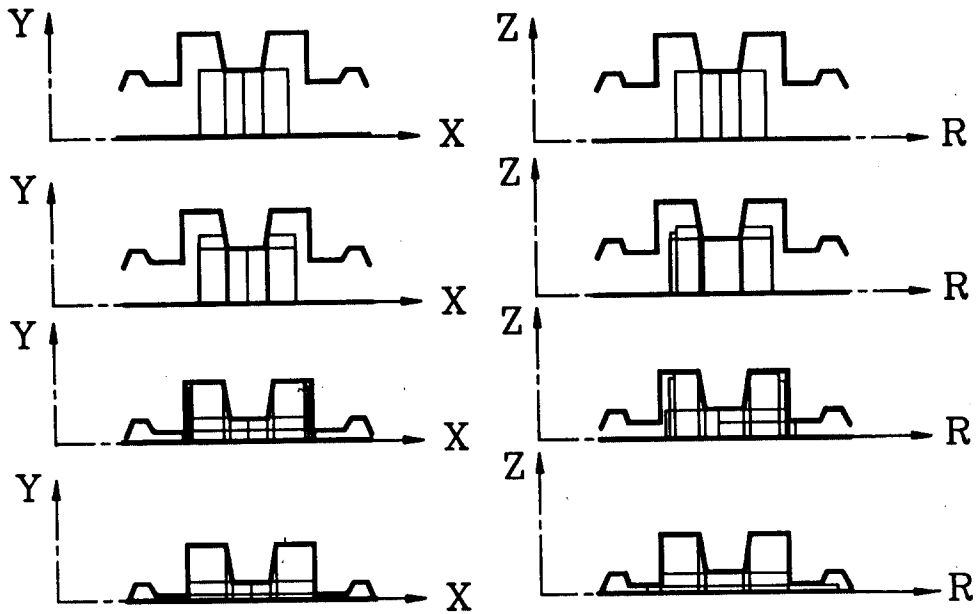


Fig. 5 True stress - strain curve of plasticine

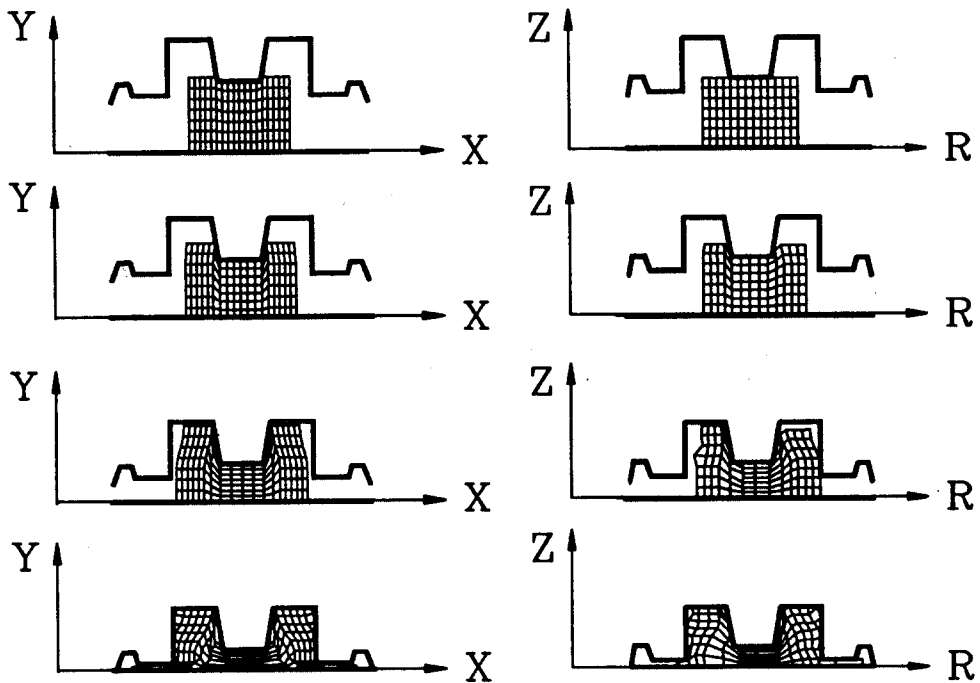


Fig. 6 Separated upper die



(a) Plane-strain part (b) Axisymmetric part

Fig. 7 Variations of element system in cavity filling process



(a) Plane-strain part (b) Axisymmetric part

Fig. 8 Grid distortion patterns in cavity filling process

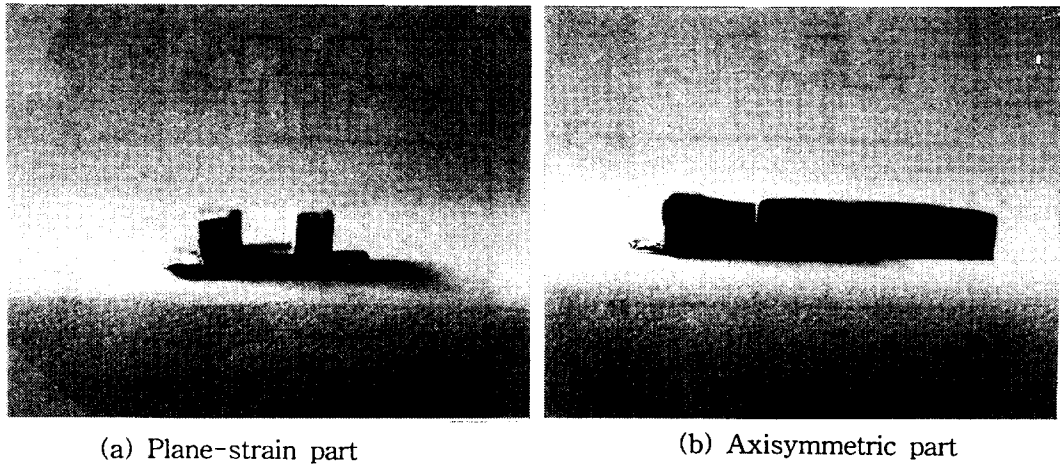


Fig. 9 Flow patterns of final step of multi-layered plasticine

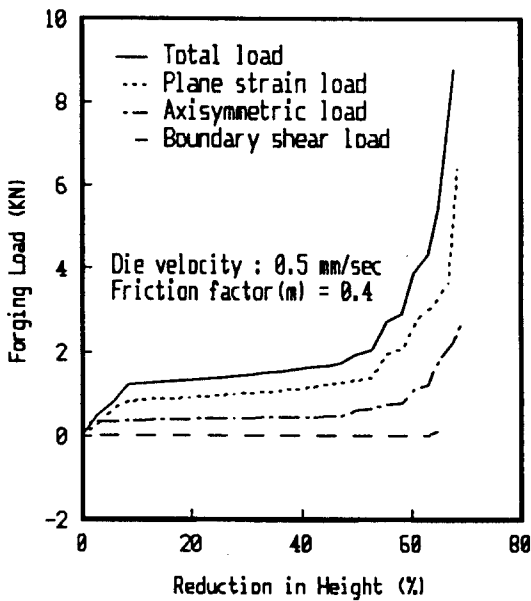


Fig. 10 Variations of theoretical forging load for reduction in height

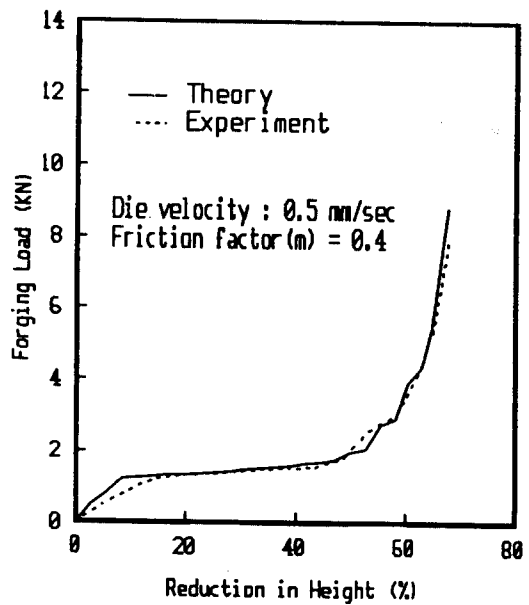


Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental forging loads