

플래시 유무에 따른 비축대칭 정밀단조에 관한 연구 (A Study on Non-Axisymmetric Precision Forging with and without Flash)

배원병*, 김영호**, 최계찬*, 이종현***, 김동영***

* 부산대학교 기계설계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

** 부산대학교 생산기계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구센터

*** 부산대학교 대학원

Abstract

An UBET(Upper Bound Elemental Technique) program has been developed to analyze forging load, die-cavity filling and effective strain distribution for flashless forging. To analyze the process easily, it is suggested that the deformation is divided into two different parts. Those are axisymmetric part in corner and plane-strain part in lateral. The total power consumption is minimized through combination of two deformation parts by building block method, from which the upper-bound forging load, the flow pattern, the grid pattern, the velocity distribution and the effective strain are determined. To show the merit of flashless forging, the result of flashless and flash forging processes are compared through theory and experiment. Experiments have been carried out with plasticine billets at room temperature. The theoretical predictions of the forging load and the flow pattern are in good agreement with the experimental results.

1. 서론

기존의 전통적인 밀폐형 단조공정에서는 단조비용(forging cost)의 약 50%를 재료비용이 차지하고 있다. 여기서 10%의 재료비용을 줄일 수가 있으면 전체적으로 5%의 단조비용이 절감된다. 또한 단조품을 만들기 위해 재료의 약 30%가 플래시(flash), 스케일(scale) 등으로 소비되므로 만약 플래시 등으로 버려지는 양을 줄일 수만 있으면 대의 경쟁력은 크게 증가될 것이다.⁽¹⁾ 따라서 플래시 등으로 소비되는 양을 줄이거나 없애는 방안이 절실히 요구됨에 따라 플래시 없는 정밀단조(flashless precision forging) 혹은 정형단조(near-net shape forging)에 관한 연구가 필요하다.⁽²⁾

전통적인 플래시 설계에 관한 연구는 Altan 등⁽³⁾의 다수의 연구에서 언급된 바가 있다. 그러나 플래시가 없는 정밀 단조공정에 관한 연구는 상대적으로 적으며 70년대 후반부터 활발히 연구되기 시작하였다. Hoenacker 등⁽⁴⁾은 상계법을 이용하여 냉간과 열간단조에서 플래시를 포함하는 기존의 단조공정과 플래시를 포함하지 않는 단조공정을 서로 비교하여 플래시 없는 단조의 장점을 연구하였다. 또한 Kim 등⁽⁵⁾은 유한요소법(FEM)을 사용하여 리브-웹브(H형) 형상의 단면을 가진 축대칭 단조에서 플래시를 생성시키지 않는 여러가지 예비성형체(preform)에 대하여 연구하였다. Jain 등⁽⁶⁾은 T형 단면을 가진 리브-웹브형 정밀단조에서 플래시 없는 단조해석을 위해 유한요소해석의 코드(code)인 ALPID⁽⁷⁾를 이용하여 해석하였고, Dean⁽⁸⁾은 정형단조에 관한 그 동안의 연구를 바탕으로 플래시 있는 기존의 단조와 차이를 설명하고 재료절감, 다이 코너의 완전한 충전 등을 분석한 바가 있다.

한편, 항공기 산업의 정밀단조 부품의 생산과 관련하여 비축대칭 리브-웹브(rib-web) 단면을 가진 부품의 플래시 없는 정

밀단조를 위한 연구가 절실함에도 불구하고 이와 관련된 연구는 해석상의 난점 등으로 저조한 실정이다. 따라서 본 연구는 유한요소법에 비해 비교적 경제적이며 간편한 상계요소법(UBET:Upper Bound Element Tehneque)을 이용하여 리브-웹브형 단면을 가진 비축대칭 단조문제를 플래시가 있는 전통적인 단조공정과 플래시가 없는 정밀단조를 병행하여 해석하였다. 비축대칭 유동을 해석하기 위해 비축대칭 형상을 비교적 해석이 용이한 평면변형부(plane-strain part)와 축대칭변형부(axi-symmetric part)로 나누고, 두 영역의 경계에서의 전단을 고려하는 방법을 사용하였다.

또한 여러가지 형태의 초기시편을 사용한 수치해석 및 실험에서 최적의 비축대칭 단조품을 만들기 위해 아령형(dumbbell type)의 초기소재를 제안하고, 단조하중, 소재유동, 유변형률 등을 예측하여 플래시 없는 단조공정의 잇점들을 플래시 있는 단조공정과 비교 검토하였다. 그리고 이론해석의 타당성을 검증하기 위하여 플라스티신(plasticine)을 이용하여 MTS (Material Testing System)에서 단조실험을 하였다.

2. 이론해석

본 연구에서 해석하고자 하는 비축대칭 모델형상은 Fig. 1과 같으며 단면이 리브-웹브 형인 형상을 해석이 용이한 평면변형부와 축대칭변형부로 나누어 해석하고 각 단계에서 두 영역을 결합하여 변형의 전체를 해석하는 빌딩블럭 방법(building block method)을 사용하였다.

2.1 에너지소비율 및 단조하중

평면변형부와 축대칭변형부를 형성하는 여러가지 요소의 동적가용속도장(kinematically admissible velocity field)은 다음과 같은 조건들을 만족한다.

- (a) 다이와의 접촉면에서의 외부 속도 경계조건
- (b) 요소들 사이의 수직속도 연속조건
- (c) 체적 일정 조건

본 연구에서 사용된 동적가속도장은 평면변형부에서는 Udin 등⁽⁹⁾이 제안한 사각형과 사다리꼴 요소를 사용하였고, 축대칭변형부에서는 Kiuchi⁽¹⁰⁾ 등이 제안한 사각 링 요소와 삼각형 링 요소를 사용하였다.

단조 가공시의 평면변형부와 축대칭변형부의 각 요소들을 포함한 전체 에너지소비를 J^* 는 다음과 같다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_t \quad (1)$$

임의의 t번째 단계에서 각 요소내의 내부 변형에너지소비를 \dot{W}_i 는 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma}_i \dot{\epsilon}_i dV \quad (2)$$

여기서, 유효변형률속도 $\dot{\epsilon}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ 으로 표현된다.

식(2)에서 $\bar{\sigma}_i$ 는 가공경화(work hardening)재료에 있어서 t번째 단계에서 유효응력(effective stress)을 나타내며 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_i = K \bar{\epsilon}_i^n \quad (3)$$

여기서, K는 재료상수, n은 가공경화지수를 나타낸다.

또한 $\bar{\epsilon}_i = \bar{\epsilon}_{i-\Delta t} + \Delta \bar{\epsilon}_{i-\Delta}$ 이며 $\bar{\epsilon}_{i-\Delta}$ 는 식(4)에서 얻을 수 있다.

$$\bar{\epsilon}_{i-\Delta} = \frac{\dot{W}_i}{V_{i-\Delta} \cdot \bar{\sigma}_{i-\Delta}} \quad (4)$$

식(4)에서 $V_{i-\Delta}$ 는 t-Δt 단계에서 요소의 체적을 나타낸다.

전단 에너지소비를 \dot{W}_s 는 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_t}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V_s| ds_s + \dot{W}_b \quad (5)$$

여기서, $|\Delta V_s|$ 는 요소 사이의 전단면에서의 속도 불연속량을 나타내며 \dot{W}_b 는 평면변형부와 축대칭변형부의 경계에서 전단 에너지소비를 나타낸다.

또한, 마찰 에너지소비를 \dot{W}_t 는 다이와 소재 사이에서의 마찰 손실에 의한 에너지소비를 나타내며 아래 식과 같다.

$$\dot{W}_t = m \frac{\bar{\sigma}_t}{\sqrt{3}} \int_{s_t} |\Delta V_t| ds_t \quad (6)$$

여기서, m은 마찰계수, $|\Delta V_t|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량이다.

평면변형부와 축대칭변형부, 두 영역의 경계에서의 준독립변수, a_1, b_1, c_1 에 대하여 전체 에너지소비를 $J^* = J^*(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n, c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$ 를 직접탐색법의 일종인 FPS(Flexible Polyhedron Search)⁽¹¹⁾법을 사용하여 J^* 를 최소화함으로써 비축대칭 전체속도장을 결정하였다.

그리고 가공하중(forming load) F는 다음 식으로 구하였다.

$$F = \frac{J^*}{U_0} \quad (7)$$

여기서, U_0 는 다이속도이다.

2. 2 소재유동과 빌딩블리 방법

소재유동이 진행됨에 따른 시간 Δt의 이후의 요소 절점좌표는 변형 직전의 동적가속도장을 이용하여 평면변형부와 축대칭변형부에서의 각 요소의 변형 후 절점좌표를 결정한다. 각 요소의 시간중분 Δt 이후의 좌표는 다음과 같다.

$$X' = X + \Delta t \cdot V \quad (8)$$

위의 좌표 X'는 Δt 변형 후의 각 요소들의 절점좌표를 나타내며, X, V는 각 요소들의 변형전 절점좌표와 경계면의 속도를 나타낸다. 변형 후 인접 요소 사이에 미끄럼이 발생하여 접선 속도 불연속이 생기게 되고, 요소의 크기와 경계 조건이 바뀌게 되어 인접 요소들 사이의 경계의 불일치 등이 발생한다. 따라서 다음 단계를 진행하기 위하여 평면변형부와 축대칭변형부를 수직, 수평 부사에 의해 요소시스템을 재구성⁽¹²⁾하였다.

Fig. 1의 비축대칭 문제와 같이 복잡한 형상의 제품은 비교적 해석이 용이한 영역의 조합으로 근사화할 수 있다. 직선 부분의 요소는 폭에 비해 길이가 상대적으로 길기 때문에 평면변형 유동으로 가정하였고, 양쪽 가장자리의 반원부분을 축대칭 유동으로 가정하여 해석하였다. 다이가 진행됨에 따라 임의의 단계에서 평면변형부와 축대칭변형부의 유동형상이 달라 경계에서 요소들의 경계가 일치하지 않고 엇갈림이 생긴다. 그 경계부분의 속도불연속에 의한 전단에너지(식(5)의 \dot{W}_b)를 계산한 후 각각 조합하는 빌딩블리방법⁽¹³⁾을 사용함으로써 비축대칭 전체 에너지소비를 계산하였다. 본 연구의 수치해석 프로그램의 흐름도(flow chart)는 Fig. 2와 같다.

3. 플라스틱신의 단조실험

리브-웹브형 단면을 가진 비축대칭 제품의 단조실험을 위하여 재료는 Harbutt's Plasticine 사 제품인 백색과 흑색의 플라스틱신을 사용하였다.

플라스틱신의 상온(17°C)에서의 항복특성과 마찰특성에 관한 기초연구⁽¹⁴⁾에서 응력과 변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.178 \bar{\epsilon}^{0.082} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

플라스틱신으로 단조시에 소재의 유동을 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류를 각각 충분히 반죽하여 소재내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 사기 빗갓 모양으로 플라스틱신을 저충하여 양끝 부분이 만원이 되도록 하였다. 비축대칭 단조 실험을 위해 제작된 시편의 형상과 치수는 Fig. 3과 같다.

급형다이의 소재는 S 20C이며, 플래시 랜드(land)가 있는 다이와 없는 다이 모두가 단조시 플래시를 포함하지 않은 최종 제품형상의 치수가 같게 되도록 제작하였다. 또한 단조 후 소재와 다이의 분리를 용이하게 하기 위하여 다이의 반을 각각 따로 만들고 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 다이의 형상은 Fig. 4와 같다.

실험 전에 시편내부의 등분포 온도를 얻기위하여 시편을 오븐(oven)에서 상온으로 1일 정도 보관하여 사용하였으며, 또한 실험실 온도를 상온으로 유지하기 위하여 항온항습기를 사용하였다.

플라스틱신의 단조실험은 로드 셀이 100 kN인 MTS를 이용하여 다이속도 0.5 mm/sec로 일정하게 하고, 윤활제로는 탈크 파우더(talc powder)(m=0.4)를 사용하여 실험하였다. 또한 MTS에 부착된 X-Y 기록기로 다이행정에 따른 하중선도를 자동 출력하도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 최적 초기소재 선정

전통적인 플래시 있는 비축대칭 단조와 플래시 없는 비축대칭 경질단조 해석을 위해 사용된 시편은 Fig. 3의 Billet 1-Billet 5의 다섯가지 종류이다. 플래시 있는 단조를 위해 Billet 1-Billet 3의 시편을 사용하였고, 플래시 없는 단조를 위해서는 Billet 4, 5의 시편을 사용하였다.

Fig. 5-6은 플래시 있는 단조에서 Billet 1-Billet 3의 시편을 이용하여 일정 다이 속도로 단조한 후 최종단계에서의 평면변형부와 축대칭변형부의 격자변형 상태와 플라스틱신의 유동형태(최종형상을 1/4 절단)를 보여준다. 여기서 Billet 1의 시편을 사용했을 경우는 평면변형부에는 다이충만을 이루었으나 축대칭변형부는 소재의 양이 적어 리브부를 다 채우지 못하였고 플래시도 생기지 않았다. 여기서 Billet 1의 체적이 최종단조품의 체적보다 큼에도 불구하고 축대칭변형부의 다이충만이 불충분한 것은 축대칭변형부와 평면변형부의 소재 유동이 어느 정도 독립적으로 이루어진다고 할 수 있으며, 이것은 빌딩블러방식의 해석이 타당함을 나타낸다고 할 수 있다. Billet 1의 축대칭변형부에 바깥부분을 체적 보강한 Billet 2의 아령형 시편은 평면변형부와 축대칭변형부 모두 적절한 다이충만을 이룰 수 있었다. 반면에 Billet 2의 축대칭변형부의 외곽 경계를 평면변형부에 연장한 Billet 3은 축대칭변형부에서는 다이충만이 이루어졌으나 평면변형부에서는 과도한 소재 체적으로 인하여 플래시로의 손실량이 많이 발생하였다.

Fig. 7-8은 비축대칭 플래시 없는 단조해석을 위해 Fig. 3의 Billet 4, 5를 사용하여 단조 시뮬레이션했을 때의 최종단계에서의 격자변형과 실험결과를 나타낸다. Billet 4는 Billet 2와 같은 형태의 아령형 시편으로 최종단계에서 리브부를 채워 양호한 결과를 얻은 반면에 Billet 1과 같이 평면변형부의 외곽선을 축대칭변형부에 연장한 Billet 5는 Fig. 5(a)와 같이 축대칭변형부를 다 채우지 못하였다.

그러므로 Fig. 5-8의 결과에서 보면, Fig. 3 (a)의 시편형상으로는 형상의 단순함은 인정되지만 소재가 리브부를 다 채우지 못하여 완제품을 만들지 못하거나 혹은 다이충만은 이루었다 하더라도 평면변형부에서 과도한 플래시가 생성되어 Fig. 3 (b)의 Billet 2, 4와 같은 아령형 시편에서 얻은 결과에는 미치지 못하였다. 따라서 아령형 시편이 비록 단순한 형상은 아니지만 Fig. 1과 같은 비축대칭 형상을 단조하기로는 최적임을 알 수 있었다.

4.2 플래시 있는 단조와 없는 단조의 비교

4.1절에서 선정된 아령형 시편 Billet 2, 4를 이용하여 플래시 있는 단조와 플래시 없는 단조를 했을때 그 결과를 비교하고자 한다.

Fig. 9-10은 아령형 시편을 사용하여 시뮬레이션했을 경우에 시편의 높이 감소율에 따른 격자변형과, 플라스틱신을 이용한 실험결과를 보여 주고 있다. 여기서, 최종단계의 유동형태를 보면 플래시 있는 단조나 없는 단조 모두 평면변형부에 비해 축대칭변형부에서 유동이 비교적 완만함을 알 수 있는데, 이것은 다이가 진행됨에 따라 평면변형부에서 바깥방향으로의 유동속도가 윗쪽으로 보다 빨라 소재가 리브의 바깥쪽에 부딪힌 후 위로 벽을 타고 올라가거나 축대칭변형부에 비해 플래시 랜드로 빠른 속도로 빠져나감으로 인한 결과로 생각되며 이와 같은 현상은 최종단계에서의 유동 속도벡터를 나타내는 Fig. 11에서

잘 알 수 있다.

한편, 최종제품이 완전한 다이 충만을 이루는 Billet 2~Billet 4를 초기 소재로 사용한 단조에서 Billet 4를 사용한 플래시 없는 단조가 Billet 2, 3를 사용한 플래시 있는 단조에 비해 약 16%, 29%의 재료절감(material savings) 효과가 얻어진 다.

Fig. 12는 Billet 2, 4를 사용한 플래시 있는 단조와 없는 단조에서의 단조하중에 대한 이론치와 실험치를 나타낸다. 여기서 플래시 있는 단조와 없는 단조 모두 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있으며, 높이감소율 40% 부근에서 단조하중이 증가하기 시작하는 것은 플래시 있는 단조에서는 평면변형부와 축대칭변형부에서 플래시가 생기기 시작하였고 플래시 없는 단조에서는 축대칭변형부에 비해 상대적으로 많은 체적을 차지하는 평면변형부의 소재가 리브 바깥쪽에 부딪혀 윗쪽으로 이동하기 시작하였기 때문으로 여기진다. 또한 (a)(b)에서 최종 단조하중의 이론치는 플래시 없는 단조가 플래시 있는 단조에 비해 약 15%의 단조하중이 낮게 나타났으며, 실험치는 약 22% 낮게 나타났다. 또한 플래시 있는 단조에서 사용된 Billet 3에 의한 단조하중의 실험치(Fig. 6의 Billet 3)와 비교하면 Billet 4가 약 40% 정도 낮게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13에서는 Billet 2, 4의 아령형 시편을 사용하여 플래시 있는 단조와 없는 단조에서 최종단계의 유효변형률 분포를 나타내고 있다. Fig. 13에서 축대칭변형부에서는 리브 상단의 바깥쪽 부근이 유사한 것을 제외하면 대체로 플래시 없는 단조에서 유효변형률 값이 낮게 나타났으며, 평면변형부에서는 플래시 없는 단조가 플래시 있는 단조에 비해 전체적으로 낮게 나타나고 있다.

따라서 본 연구의 플래시 없는 단조가 플래시 있는 단조에 비해 재료절감, 최종 단조하중 감소, 향상된 유효변형률 분포 등의 잇점이 있음을 알 수 있었고 Hoemaker 등⁽⁴⁾의 축대칭 단조에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

5. 결론

리브-웨브형 단면을 가진 비축대칭 부품의 단조해석을 위해 상계요소법을 이용하여 비축대칭 형상을 평면변형부와 축대칭변형부로 나누어 조합 해석하는 방법을 사용하였으며, 플라스틱신을 사용하여 실험한 뒤 이론 결과와 비교 검토하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 비축대칭 단조공정을 해석하는데 해석모델을 평면변형부와 축대칭변형부로 나누고 조합하여 해석하는 빌딩블러 방법을 사용함으로써 비축대칭의 단조 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있었다.
- 2) 평면변형부와 축대칭변형부의 유동 양상이 달라 아령형의 시편이 비축대칭 형상을 단조하기 위한 적절한 초기소재의 형태임을 알 수 있었다.
- 3) 아령형의 시편을 사용한 플래시 없는 단조가 플래시 있는 단조에 비해 재료절감 효과를 나타내었다.
- 4) 플래시 있는 단조에 비하여 플래시 없는 단조에서 최종단조하중이 감소되었으며, 유효변형률 분포도 비교적 낮게 나타났다.

후 기

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

참고문헌

1. T. Altan and H. J. Henning, "Closed-Die Forging of Round Shapes ; Flash Design and Material Savings", Metallurgia and Metal Forming, Vol. 39, pp. 83-88, 1972.
2. T. A. Dean, "Die Technology ; The Feasibility of Flashless Forging", Metallurgia and Metal Forming, Vol. 44, pp. 488-498, 1977.
3. T. Altan, et al., Forging Equipment, Materials and Practices, Metal and Ceramics Information Center, 1973.
4. Y. Van Hoenaeker and T. A. Dean, "The Application of Upper Bound Analysis to Real Situation - A Comparison of Flash and Flashless Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 18, pp. 81-93, 1978.
5. N. S. Kim and S. Kobayashi, "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by The Finite Element Method", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No. 2, pp. 243-268, 1990.
6. V. K. Jain, R. L. Goetz and C. M. Lombard, "Application of Computer Methods to the Design and Analysis of Precision Rib-Web Forgings", J of Materials Processing Tech., Vol. 36, pp. 1-16, 1992.
7. 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, pp. 449, 1984.
8. T. A. Dean, "Progress in Net-Shape Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1031-1040, 1993.
9. 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, pp. 237-350, 1981.
10. 木内學, "Upper Bound Elemental Technique(UBET)의 概 要と問題点", 生産研究, 第30卷, 第2號, pp. 31-38, 1978.
11. D. M. Himmelblau, Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, pp.152, 1972.
12. 김현영, 김동원, "소성가공시 재료유동에 대한 수치해석 및 모델실험", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제2호, pp. 285-299, 1993.
13. 배원병, 김영호, 이종현, 이원희, "비축대칭 형상의 밀폐형 링 단조에 관한 연구", 한국소성가공학회, 제3권, 제2호, pp.202-214, 1994.
14. 김영호, 배원병, 이종현, 김진훈, 김현영, "UBET를 이용한 축대칭 단조공정에서의 최적설계에 관한 연구", 대한 기계학회 논문집, 제18권, 제5호, pp. 1117-1125, 1994.

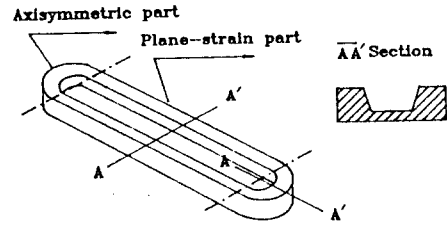


Fig. 1 Analytical model for flash and flashless non-axisymmetric forgings

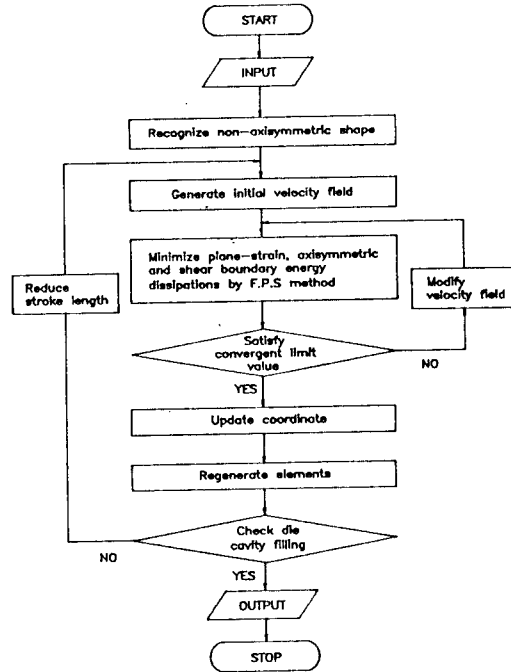
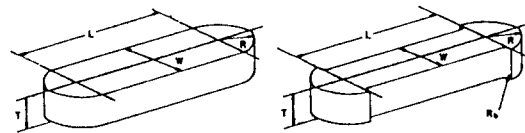


Fig. 2 Flow chart for UBET simulation

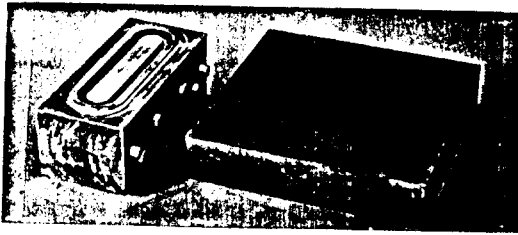


(a) Billet 1, Billet 3 and Billet 5 (b) Billet 2 and Billet 4

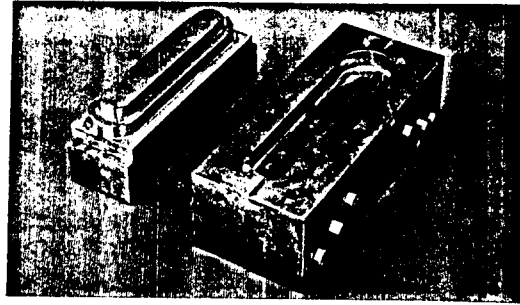
Dimensions of initial billet (Unit : mm)

Type	Dimensions					
	Billet	T	W	L	R	R _b
Flash forging	Billet 1	12.2	29.6	120.0	14.8	
	Billet 2	12.2	29.6	120.0	18.4	2.0
	Billet 3	12.2	36.8	120.0	18.4	
Flashless forging	Billet 4	10.8	27.4	120.0	18.6	2.0
	Billet 5	10.8	27.4	120.0	13.7	

Fig. 3 Configurations and dimensions of initial billets for non-axisymmetric forging



(a) Upper and lower dies for flash forging



(b) Upper and lower dies for flashless forging

Fig. 4 Appearance of dies for experiment of plasticine in flash and flashless non-axisymmetric forgings

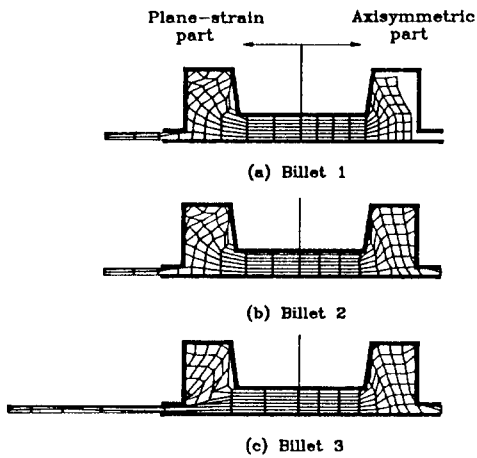
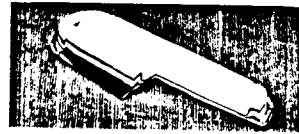


Fig. 5 Grid distortion patterns at the final step using Billet-1, 2, 3 in flash forging



(a) Billet 1



(b) Billet 2



(c) Billet 3

Fig. 6 Flow patterns at the final step of multi-layered plasticine using Billet-1, 2, 3 in flash forging

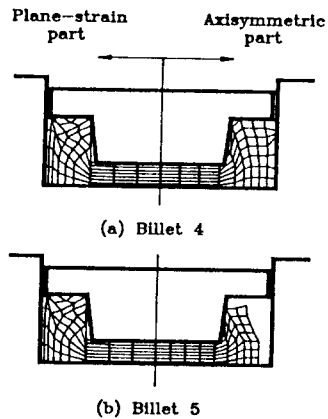


Fig. 7 Grid distortion patterns at the final step using Billet-4, 5 in flashless forging



(a) Billet 4



(b) Billet 5

Fig. 8 Flow patterns at the final step of multi-layered plasticine using Billet-4, 5 in flashless forging

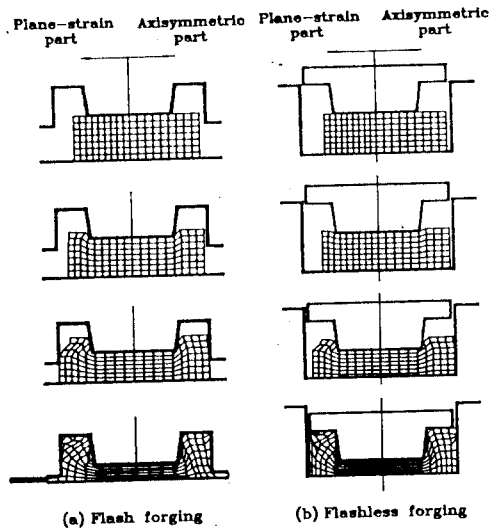


Fig. 9 Die-cavity filling process of grid distortion pattern using Billet-2, 4 in flash and flashless forgings

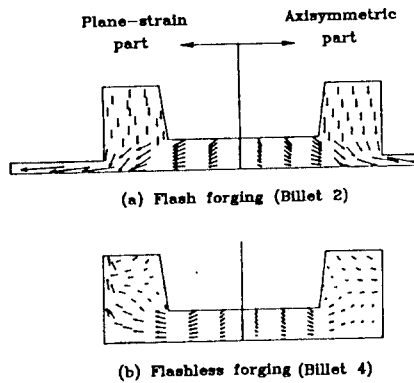


Fig. 11 Velocity vectors at the final step using Billet-2, 4 in flash and flashless forgings

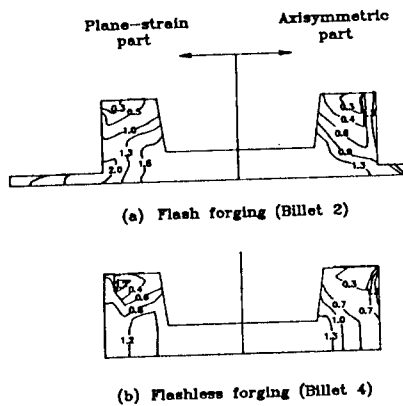
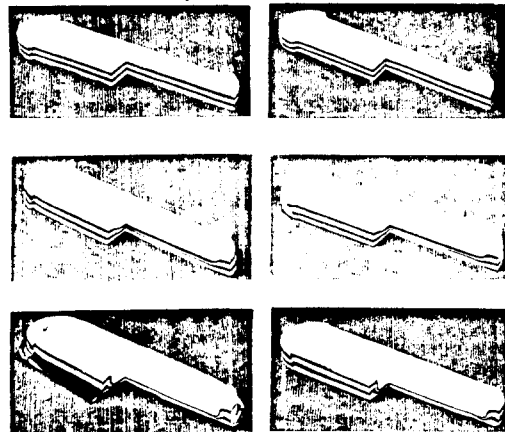
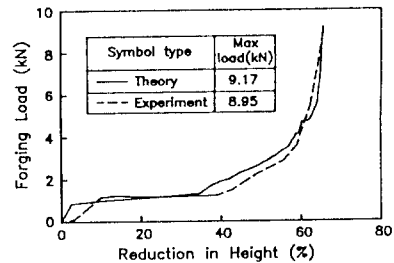


Fig. 13 Comparison of effective strain between flash and flashless forgings using Billet 2, 4

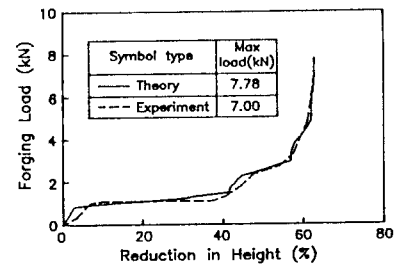


(a) Flash forging(Billet 2) (b) Flashless forging(Billet 4)

Fig. 10 Material flow patterns of multi-layered plasticine using Billet-2, 4 in flash and flashless forgings



(a) Flash forging (Billet 2)



(b) Flashless forging (Billet 4)

Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental forging loads using Billet-2, 4 in flash and flashless forgings