

〈論 文〉

리브-웹형 정밀단조에 관한 상계요소해석

이종헌* · 김영호** · 배원병***

(1994년 8월 11일 접수)

UBET Analysis on Precision Rib-Web Forgings

Jong-Heon Lee, Young-Ho Kim and Won-Byong Bae

Key Words : Flashless Forging(플래시없는 단조), Plane-Strain(평면변형), Axisymmetric(축대칭), Rib-Web Shape(리브-웹형상), UBET(상계요소법), Material Savings(재료절감), Maximum Forging Load(최대 단조하중), Effective-Strain Distribution(유효 변형률분포)

Abstract

An upper bound elemental technique(UBET) program has been developed to analyze forging load, die-cavity filling and effective strain distribution for flash and flashless forgings. The simulation for flash and flashless forgings are applied axisymmetric and plane-strain closed-die forging with rib-web type cavity. Inverse triangular and inverse trapezoidal elements are used to analyze flashless forging. The analysis is described for merit of flashless precision forging. Experiments have been carried out with pure plasticine billets at room temperature. Theoretical predictions of the forging load and the flow pattern are in good agreement with experimental results.

1. 서 론

전통적인 밀폐형 단조공정은 플래시랜드(flash land)를 설계함으로써 측방향 유동을 구속하여 소재가 금형내부(리브부)를 쉽게 채울 수 있도록 하였다. 그러나 플래시 생성으로 인한 재료의 손실과 이의 제거를 위한 후처리과정이 추가된다. 따라서 소재 손실 및 후처리 기계가공을 최소화함으로써 부가가치가 높은 정밀단조품의 생산이 가능하다. 또한 플래시 생성시 높은 단조하중으로 인하여 다손상을 초래할 수 있어 플래시없는 정밀단조(flashless precision forging)공정에 대한 연구가

절실히 요구되고 있다.

최종제품을 만들기 위해 초기소재의 약 30%가 플래시 등으로 버려진다. 조금이라도 버려지는 양을 줄이거나 최종제품의 치수 정밀도를 향상시킬 수만 있으면 단조품의 경쟁력은 크게 증가하게 된다.⁽¹⁾ 또한 기존의 단조공정(conventional forging process)으로는 플래시 생성을 피할 수가 없으며 플래시 생성시에 과도한 하중이 발생하게 되어 다마모의 원인이 되기도 한다.

기존의 전통적인 플래시 설계에 관한 연구는 Altan 등^(2,3)의 연구에서 자세히 언급되어 있다. 그러나 플래시가 없는 정밀단조공정(precision forging process)에 관한 연구는 상대적으로 적으며 70년대 후반부터 활발히 연구되기 시작하였다. Hoenacker 등⁽⁴⁾은 상계법을 이용하여 냉간과 열간 단조에서 플래시를 포함하는 기존의 단조공정과 플

*부산대학교 기계기술연구소

**정회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

***정회원, 부산대학교 기계설계공학과

래시를 포함하지 않는 단조공정을 서로 비교하여 플래시없는 단조의 장점을 연구하였다. Nediani 등⁽⁵⁾은 원형단면의 소재를 사용하여 사각단면을 가진 다이의 코너부를 플래시없이 완전히 채우는 코너필링(corner filling)에 관하여 상계법으로 해석함으로써 복잡한 형상의 플래시없는 단조 연구에 기여하였다. 또한 Kim 등⁽⁶⁾은 유한요소법(FEM)을 사용하여 H형상의 단면을 가진 축대칭 단조에서 플래시를 생성시키지 않는 여러가지 예비성형체에 대하여 연구하였다. Jain 등⁽⁷⁾은 T형 단면을 가진 리브-웹브형 정밀단조에서 플래시없는 단조 해석을 위해 유한요소해석의 코드(code)인 ALPID⁽⁸⁾를 이용하여 해석하였고, Dean⁽⁹⁾은 정형단조(net-shape forging)에 관한 그 동안의 연구를 바탕으로 플래시있는 기존의 단조와 차이를 설명하고 재료절감, 다이코너의 완전한 충전 등을 분석한 바가 있다.

소성가공 공정을 해석하는 데 널리 사용되고 있는 유한요소법은 다른 해석방법에 비해 비교적 정해에 가까운 해를 구할 수 있다는 이점이 있지만, 방대한 계산량, 현장에서의 실용성, 계산장비나 인적자원에 대한 경제성의 측면에서 나름대로 제약이 있다. 그러나 상계요소법(UBET: upper bound elemental technique)은 그 적용의 간편함과 계산시간의 단축, 해석결과의 상대적인 유용함에서 장점이 인정되고 있다.

따라서 본 연구는 유한요소법에 비해 비교적 경제적이며 간편한 상계요소법을 이용하여 플래시를 생성시키지 않는 리브-웹브형 단면의 축대칭 및 평면변형 문제를 해석하였다. 역삼각형과 역사다리꼴 요소를 포함한 단순 형태의 요소를 사용하여 유동장을 나누고 각 요소에 대한 동적 가용속도장(kinematically admissible velocity field)을 기초로 유동장 전체의 에너지소비율을 최소화함으로써 각 요소의 속도장과 변형 후의 좌표를 결정하여 단조공정을 해석하였다. 또한 플래시를 포함한 문제도 병행하여 해석함으로써 단조하중, 소재유동, 유효 변형률분포(effective strain distribution) 등을 예측하고 플라스틱인(plasticine)의 실험을 통하여 플래시 있는 단조와 플래시없는 정밀단조를 비교 검토하고자 한다.

2. 상계요소해석

상계요소해석은 상계정리를 기초로 하여 더욱 정

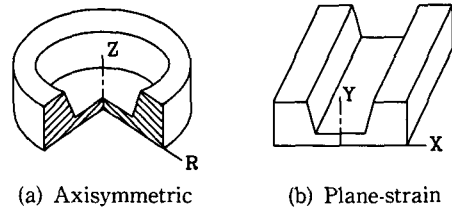


Fig. 1 Analytical model for flashless forging

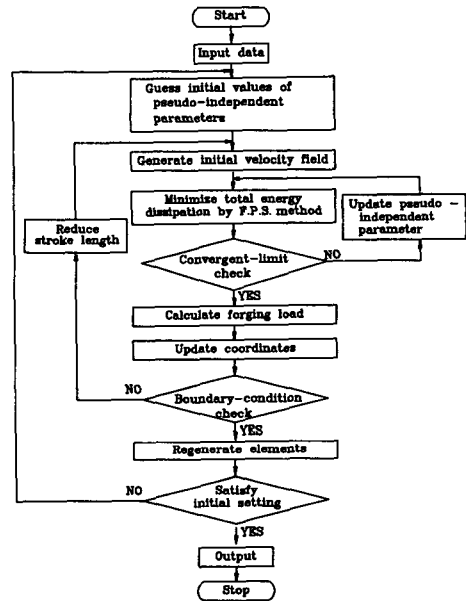


Fig. 2 Flow chart for flash and flashless forgings

확한 하중값을 구하는 상계법의 발전된 형태로서 전체 소성변형 영역을 단순한 형태의 요소로 분할 해석하는 방법이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 리브-웹브형 단면을 가진 플래시 없는 축대칭 및 평면변형 제품을 모델로 선정하여 이론해석을 행하였으며 프로그램의 전체 흐름도(flow chart)는 Fig. 2와 같다.

2.1 기초이론

분할된 각 요소의 속도장은 외부 경계에 관한 변위 경계조건, 요소간의 경계에 있어서 수직 속도 연속 조건, 각 요소에 대한 체적 일정조건을 만족함으로써 유도된다.

이 때 요소의 모든 표면에서 유동을 허용하며 각 요소는 독립적으로 취급한다. 또한 요소 경계에 있어서 수직 속도성분들은 모든 표면을 따라 일정하며 균일하다고 가정한다(평행 속도장). 본 연구에

서는 플래시 없는 축대칭 및 평면변형 문제를 해석하기 위하여 Kiuchi,⁽¹⁰⁾ Oudin⁽¹¹⁾ 등이 제안한 단순한 형상의 요소를 사용하였다. 사용된 기본 요소들은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 축대칭 요소인 (I), (II)와 평면변형 요소인 (IV), (V)의 동적 가용속도장은 kiuchi, Oudin 등의 연구에 자주 사용되어 왔으나 요소(III), (VI)은 비교적 사용 빈도가 적다. 따라서 요소(III), (VI)에 대한 동적 가용속도장은 다음과 같다.

역삼각형 요소(inverse triangular element)인 (III)은

$$u(r, z) = -C_1(1 + \frac{C_2}{r}) \quad (1)$$

$$w(r, z) = \frac{C_1}{r}z + C_3 \quad (2)$$

여기서,

$$C_1 = -u_{i,j}r_i / (r_i + r_{i+1})$$

$$C_2 = r_{i+1}$$

$$C_3 = w_{i,j+1} + \frac{r_i z_{j+1} u_{i,j}}{(r_i + r_{i+1})r}$$

또한, 역사다리꼴 요소(inverse trapezoidal element)인 (VI)은

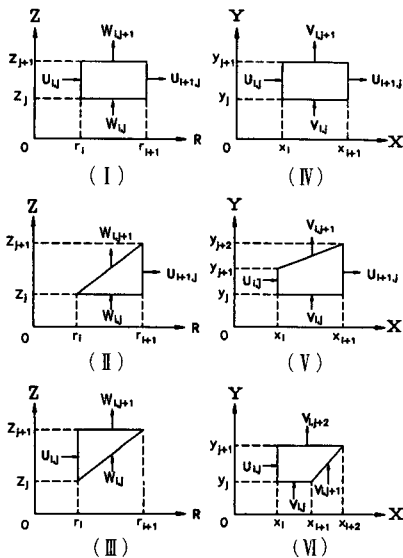


Fig. 3 Normal velocity distribution on the boundaries of axisymmetric and plane-strain elements

$$u(x, y) = -\frac{1}{K_2'(x-b)} - \frac{v_{i,j+2} - v_{i,j}}{K_2} \quad (3)$$

$$v(x, y) = -\frac{1}{K_2'(x-b)^2}y + v_{i,j} \quad (4)$$

여기서,

$$K_2 = (y_{j+1} - y_j) / (x_{i+1} - x_i)$$

$$K_2' = \frac{K_2}{b(K_2 u_{i,j} - v_{i,j} + v_{i,j+2})}$$

$$b = x_{i+1} - x_i$$

단조가공시의 각 요소들을 포함한 전체 에너지소비율 J^* 는 다음과 같다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f \quad (5)$$

각 요소내의 내부 변형에너지소비율 \dot{W}_i 는 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_i = \int_v \bar{\sigma}_t \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (6)$$

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

식(6)에서 $\bar{\sigma}_t$ 는 가공경화(work hardening)재료에 있어서 t 번째 단계에서 유효 응력을 나타내며 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_t = C \bar{\epsilon}_t^n \quad (7)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_t = \bar{\epsilon}_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{\bar{\epsilon}}_{t-\Delta t}$ 이며 $\dot{\bar{\epsilon}}_{t-\Delta t}$ 는 식(8)과 같다.

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{t-\Delta t} = \frac{\dot{W}_i}{V_{t-\Delta t} \cdot \bar{\sigma}_{t-\Delta t}} \quad (8)$$

식(8)에서 $V_{t-\Delta t} = t - \Delta t$ 단계에서 요소의 체적이다.

전단 에너지소비율, \dot{W}_s 는 속도 불연속면, 즉 요소와 요소 사이의 경계에서의 전단 변형에너지소비를 나타내며 다음 식(9)와 같다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_a}{\sqrt{3} \int_s |\Delta V_s| dS_s} \quad (9)$$

여기서, $\bar{\sigma}_a$ 는 두 인접요소의 유동응력의 산술평균을 나타내며, $|\Delta V_s|$ 는 요소 사이의 전단면에서의 속도 불연속량을 나타낸다.

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

$$\dot{W}_j = m \frac{\bar{\sigma}_a}{\sqrt{3} \int_{s_j} |dV_j| dS_j} \quad (10)$$

여기서, $|dV_j|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량이다.

분할한 각 요소의 동적 가용 속도장을 사용하여 소재 전체의 속도장을 표현하고 속도장에 포함된 준독립변수(pseudo-independent parameter)에 대해 직접탐색법의 일종인 FPS(flexible polyhedron search)⁽¹²⁾법을 사용하여 전체 에너지소비율, 식(5)을 최소화함으로써 준독립변수를 결정하며 이에 소재 전체의 속도장을 결정하게 된다.

2.2 다이진행과정

다이진행에 따른 재료의 층만과정을 조사하기 위해서는 가공 전체단계를 다이진행에 따라 여러 단계로 나누어 각 단계에서의 전체 에너지소비율을 최소로 하는 동적 가용속도장을 이용하여 각 요소의 시간증분 Δt 이후의 좌표를 결정하였다. Fig. 3의 (Ⅲ), (Ⅵ)의 시간증분 Δt 이후의 좌표는 다음과 같다.

요소 (Ⅲ)에 대한 Δt 변형후 좌표 :

$$\begin{aligned} r_i' &= r_i + \Delta t \cdot u_{i,j} \\ r_{i+1}' &= r_{i+1} + \Delta t \cdot \frac{2r_i u_{i,j}}{r_i + r_{i+1}} \\ z_j' &= z_j + \Delta t \cdot (w_{i,j+1} \frac{z_{j+1} - z_j}{r_i + r_{i+1}} u_{i,j}) \\ z_{j+1}' &= z_{j+1} + \Delta t \cdot w_{i,j+1} \end{aligned}$$

요소 (Ⅵ)에 대한 Δt 변형후 좌표 :

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i + \Delta t \cdot u_{i,j} \\ x_{i+1}' &= x_{i+1} + \Delta t \cdot \left(-\frac{1}{K_2'(x_{i+1}-b)} \frac{v_{i,j+2} - V_{i,j}}{K_2} \right) \\ x_{i+2}' &= x_{i+2} + \Delta t \cdot \left(\frac{1}{K_2'(x_{i+2}-b)} \frac{v_{i,j+2} - V_{i,j}}{K_2} \right) \\ y_j' &= y_j + \Delta t \cdot v_{i,j} \\ y_{j+1}' &= y_{j+1} + \Delta t \cdot v_{i,j+1} \end{aligned}$$

여기서, $r_i', r_{i+1}', z_j', z_{j+1}', x_i', x_{i+1}', y_j', y_{j+1}'$ 는 Δt 변형 후의 요소의 절점좌표를 표시하며, K_2', K_2b 는 식(3~4)에서와 같다.

변형후 인접요소들 사이에 미끄럼이 발생하여 요소의 크기와 경계조건이 바뀌게 된다. 따라서 다음 단계를 진행하기 위하여 수직, 수평 투사에 의한 요소 재구성방법^(13,14)을 사용하였다. 또한 플래시 없는 단조해석을 위해 다이면의 모서리점과 소재의

자유표면의 모서리점을 기초로 요소를 분할함으로써 각 단계별로 요소수를 최소화하고 준독립변수의 수를 적게 하여 최적화를 위한 계산시간을 줄이도록 하였다. 본 연구는 486 DX-66기종의 컴퓨터를 사용하였으며 플래시 없는 축대칭 해석은 1분 15초 정도 소요되었고 플래시 없는 평면변형 해석은 1분 20초 정도가 소요되었다.

3. 모델실험

리브-웨브형 단면을 가진 축대칭 및 평면변형 제품의 단조실험을 위하여 재료는 Harbutt's Plasticine사 제품인 순수 플라스틱인(pure plasticine)을 사용하였다. 재료의 항복특성과 윤활제의 종류에 따른 마찰특성을 조사하기 위하여 기초실험을 행하였다. 플라스틱인의 상온(17°C)에서의 기초실험에 따른 시편제작 방법과 실험장치, 윤활제의 종류 등은 앞서 발표된 저자들의 연구(15)에서 자세히 언급되었다. 직경 대 높이가 1:1인 실린더 시편으로 바셀린(vaseline)을 윤활제($m=0.1$)로 하여 상온에서 압축실험하였을 때 얻은 응력과

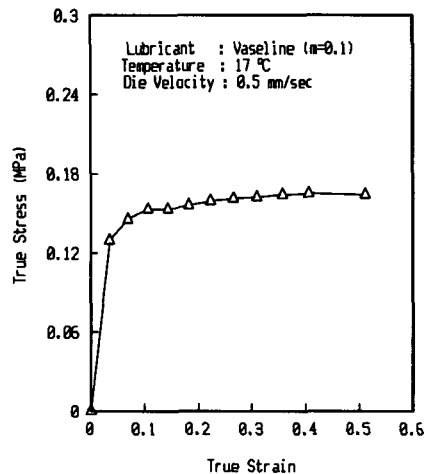


Fig. 4 True stress-strain curve of plasticine



Fig. 5 Initial billets for flashless forging

변형률의 특성 관계는 Fig. 4와 같으며, 관계 식은 (13)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.17797 \bar{\epsilon}^{0.0822} \text{ (MPa)} \quad (13)$$

리브-웹브형 단조실험에서 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스틱인을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 플래시있는 단조 시편은 일정한 두께의 원형과 사각 모양으로 만들어 축대칭은 원형을, 평면변형은 사각모양의 흑, 백색 플라스틱인을 교대로 쌓아서 초기소재를 만들었다. 또한 플래시없는 단조를 위한 시편은 축대칭과 평면변형 모두 단면이 역사다리꼴 모양으로 만들었다. 역사다리꼴 모양의 시편은 Fig. 5와 같다. 실험에 사용된 금형다이는 S20C로 제작되었으며 단조 후 다이와 플라스틱인의 분리가 비교적 용이하도록 윤활제로 탈크파우더(talc powder) (m=0.4)를 사용하였다. 또한 0.5 mm/sec의 일정 다이속도로 실험되었고, 평면변형 다이는 다이의 양쪽부분을 10 mm 두께의 아크릴 판을 볼트로 단단히 고정시켜 소재의 평면변형 유동을 유지하도록 하였으며 다이진행시 유동을 시각적으로 관찰할 수 있도록 하였다. 축대칭 다이는 단조후 다이와 플라스틱인의 분리를 용이하게 하기위하여 반원 형의 다이를 각각 따로 만들어 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록 하였다. 사용된 다이는 Fig. 6과 같다.

프레스는 로드 셀(load cell)이 100 kN인 M. T. S

(하중 카드(load card)는 50 kN을 사용)를 이용하였으며, 시편의 높이 변화에 따른 단조하중 선도는 X-Y 기록계에 자동 출력되도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

리브-웹브형 단면을 가진 축대칭과 평면변형 단조에서 플래시가 생성되는 기존의 단조와 플래시없는 정밀단조를 해석하였다. 정밀단조 해석을 위하여 Fig. 3의 요소 (Ⅲ), (Ⅵ)를 기존의 단조공정에 사용된 요소에 추가하여 0.5 mm/sec의 다이속도와 마찰정수 0.4로 플래시있는 단조와 플래시없는 단조의 축대칭과 평면변형 문제를 해석한 뒤, 재료 충만과정을 시각화하여 Figs. 7, 8에 나타내었다. Fig. 7의 축대칭 단조에서 단면이 사각과 역사다리꼴 시편을 사용하여 시뮬레이션한 결과, 사각 단면의 시편은 높이감소율 약 61.0%에서 플래시가 생성되기 시작하면서 리브부분을 서서히 채우기 시작한 반면, 역사다리꼴 단면의 시편을 사용한 경우는 높이감소율 50%에서 소재가 리브의 벽에 닿게 되고, 약 73.5%에서 리브부분을 채우며 높이감소율 83.3% 부근에서 플래시 입구쪽에 소재가 완전히 차면서 플래시를 생성시키지 않고 공정이 완료되었다. Fig. 8은 평면변형에서 단면이 사각형과 역사다리꼴의 형상을 가진 두 시편의 높이를 같게 하여 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다. 사각단

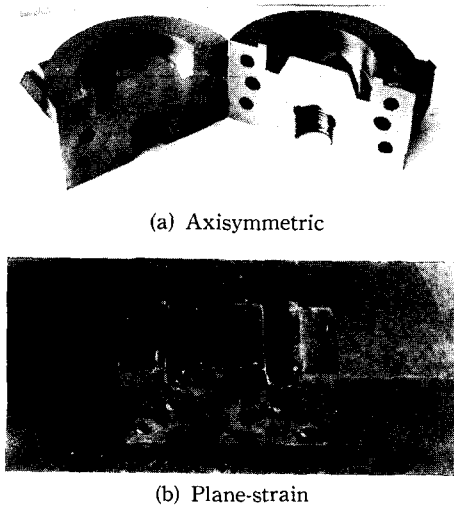


Fig. 6 Upper dies in axisymmetric and plane-strain forgings

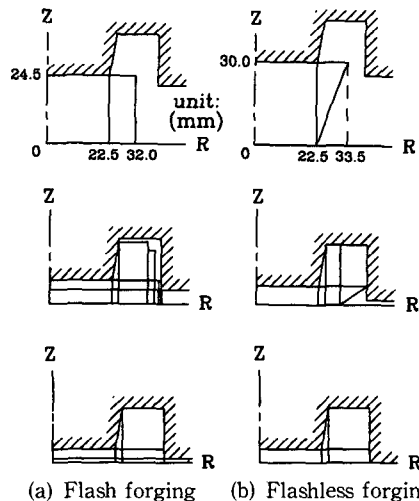


Fig. 7 Variations of element system for axisymmetric in flash and flashless forgings

면의 시편을 사용했을 경우는 소재의 높이감소율이 약 28.5%일 때 플래시가 생성되기 시작하였고, 역사다리꼴의 시편을 사용했을 경우는 21.7% 부근에서 소재가 리브의 벽에 닿게 되고, 축대칭에 비해 플래시 입구쪽으로의 유동이 상대적으로 많아 67.7% 부근에서 리브와 플래시 입구를 동시에 채우면서 공정이 완료되었다. 또한 Figs. 7, 8에서 비교적 최적의 플래시를 생성시키는 사각단면의 단조에서는 초기소재의 체적을 기준으로 축대칭에서는 약 5%, 평면변형에서는 약 10%의 플래시가 생성된 반면 초기소재의 체적이 사각단면의 시편보다 적은 역사다리꼴 단면의 시편으로도 플래시가 생성되지 않고 공정이 완료됨으로써 재료절감 효과를 가져왔다.

Figs. 7, 8의 초기소재를 이용하여 단조 실험한 결과는 Figs. 9, 10과 같다. 여기서 사각단면의 시편을 사용한 (a)는 다이가 진행될 수록 시편의 아랫부분을 중심으로 플래시렌드로 빠져나가면서 부분적으로는 리브의 바깥벽을 따라 올라가게 된다. 반면에 (b)의 역사리꼴 시편을 사용했을 경우는 시편의 아랫부분의 체적이 윗부분에 비해 적으므로 시편의 윗부분이 리브의 바깥벽에 부딪힌 후에 위로의 유동이 진행되는 동안 시편의 아랫부분은 플래시로의 유동이 억제되면서 거의 수평방향의 유동이 진행되다가 다이가 닫히는 순간 플래시부의 입구에 도달하게 된다. 따라서 사각단면의 시편보다 역사다리꼴 시편을 사용했을 경우가 유동의 흐름이 비교적 완만하여 향상된 유동 흐름을 보여주고 있다.

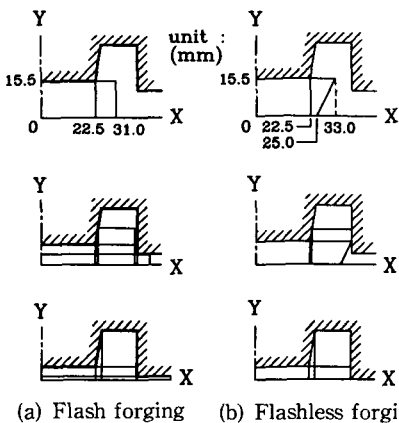


Fig. 8 Variations of element system for plane-strain in flash and flashless forgings

Figs. 11, 12는 Figs. 7~10에서의 기존의 단조공정과 플래시 없는 단조공정에서 소재의 높이감소율에 따른 단조하중의 변화를 나타내고 있다.

Figs. 11, 12에서 보면 플래시를 생성시키는 사각단면의 시편을 사용했을 경우 이론치가 실험치보다 다소 높게 나타나고 있으나 이것은 상계해석으로 인한 원인 때문이며 역사다리꼴 시편을 사용했을 경우는 축대칭과 평면변형 모두에서 실험치가 이론치에 비해 거의 유사하거나 조금 높게 나타났는데 이것은 초기소재를 만들때 제작상의 치수오차로 인하여 체적이 조금 많은데 원인이 있다고 본다.

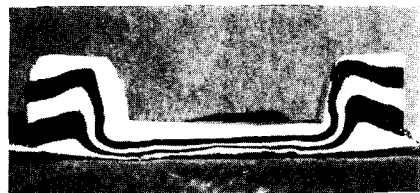


(a) Flash forging product



(b) Flashless forging product

Fig. 9 Flow patterns of plasticine in axisymmetric forging



(a) Flash forging product



(b) Flashless forging product

Fig. 10 Flow patterns of plasticine in plane-strain forging

다. 또한 역사다리꼴 단면의 시편을 사용한 경우는 축대칭과 평면변형 모두 플래시를 생성시키는 사각 단면의 단조에 비해 하중이 낮게 나타났으며, 특히 이론적인 최종 단조하중은 축대칭에서는 약 75%가 감소되었고, 평면변형에서는 약 83%가 감소되었다. 이와같은 단조하중의 감소는 Hoenacker 등⁽⁴⁾의 축대칭 단조 결과에서도 플래시 있는 단조에 비해 현저하게 하중이 감소됨을 알 수 있었다. 평면변형이 축대칭에 비해 최종 단조하중의 감소율이 큰 것은 Figs. 7~10을 서로 비교하여 보면 기존의 플래시 있는 평면변형 유동이 축대칭 유동 보다 플래시 쪽으로의 유동이 상대적으로 많아 플래시가 더 많이 생겨 하중이 증가하는 데 원인이 있다. 따라서 Figs. 7~12에서 역사다리꼴의 단면의 시편을 사용한 플래시 없는 단조에서 평면변형이 축대칭 단조에 비해 약 5%의 재료절감이 더 생김으로 평면변형 단조에서 플래시 없는 단조에 관한 연구가 축대칭에 비해 생산단가의 절감 측면에서 더 많은 연구가 필요하다. Fig. 13은 플래시를 생성시키지 않는 역사다리꼴의 단면을 사용하여 평면변형에서 소재의 높이와 체적을 일정하게 두고 역사다리꼴 요소의 밑변과 윗변의 길이 X_1 , X_2 만을 변화시키면서 소재 충전과정과 플래시 생성 유무를 조사하였다. Fig. 13에서 역사다리꼴 요소의 밑변과 윗변의 길이비, (X_1/X_2) 를 0.24(2.5/10.5 : 단위<mm>), 0.37(3.5/9.5), 0.53(4.5/8.5)를 사용하여 시뮬레이션한 결과, 길이 비가 0.24인 Billet 1은 Fig. 8의 (b)

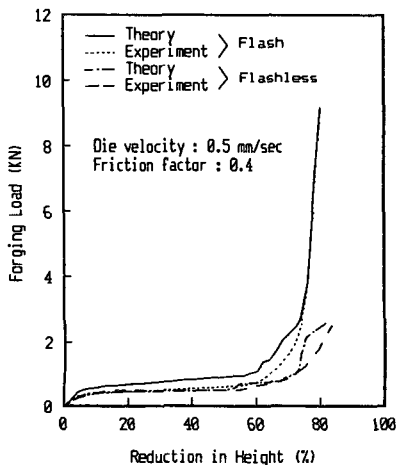


Fig. 11 Variations of forging load for reduction in height in axisymmetric forging

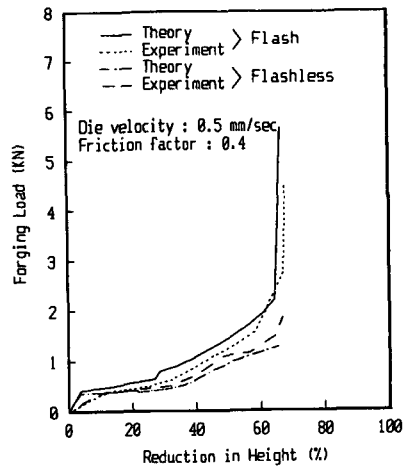


Fig. 12 Variations of forging load for reduction in height in plane-strain forging

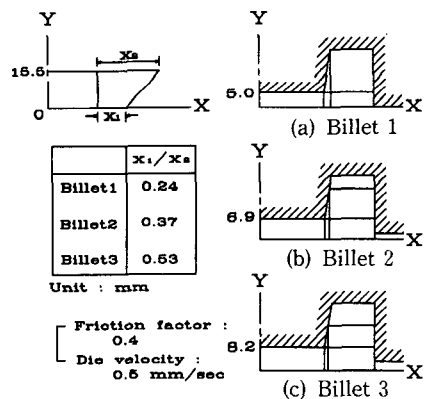


Fig. 13 Variations of formation of initial flash for initial billet in plane-strain forging

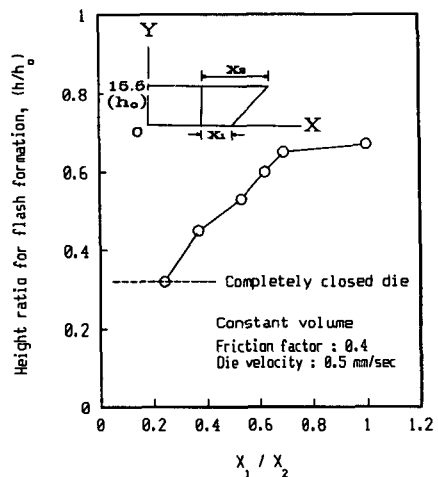


Fig. 14 Variation of height ratio of billet for X_1/X_2 on formation of initial flash in plane-strain forging

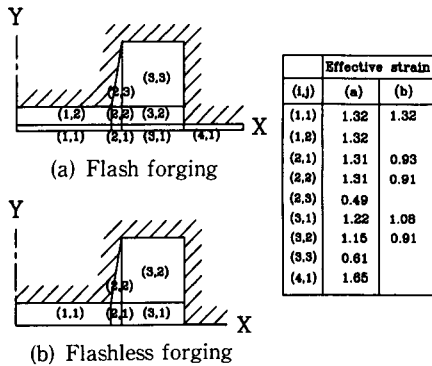


Fig. 15 Comparison of effective strain between flash and flashless forgings in plane-strain forging

와 같은 크기의 시편이므로 최종단계(웹의 높이 : 5.0 mm)에서 플래시가 생기기 직전에 다이를 완전히 채우면서 공정이 완료되었다. 반면에 비가 0.37과 0.53를 가진 Billet 2와 Billet 3은 웹의 높이가 각각 6.9 mm(높이감소율 : 55.48%)와 8.2 mm(높이감소율 : 47.10%)에서 플래시가 생성되기 시작하였다.

Fig. 14에서는 X_1/X_2 의 비에 따른 초기 플래시 생성시의 시편높이 비(h/h_0)를 나타내고 있다. 여기서 X_1/X_2 의 비가 대개 0.24에서 0.69까지는 기울기가 커지다가 그 이후는 기울기의 변화가 비교적 완만하다. Figs. 13, 14와 같이 X_1/X_2 의 비가 크면 클수록 바깥쪽(플래시 방향)으로의 유동이 상대적으로 많아 시편의 낮은 높이감소율에서 플래시가 생성되는 것을 알 수 있었다.

또한, Fig. 15에서는 평면변형에서 플래시를 생성시키는 사각단면의 시편을 사용했을 때와 플래시 없는 단조를 위해 역사다리꼴 단면의 시편을 사용했을 경우에 최종단계에서의 유효 변형률분포를 나타내고 있다. 여기서, 전반적으로 플래시 없는 단조품이 플래시 있는 제품에 비해 유효 변형률분포가 비교적 낮게 나타나고 있으며 기존의 연구결과⁽⁴⁾에서도 확인된 바가 있다.

5. 결 론

리브-웹브형 단면을 가진 축대칭과 평면변형 문제에서 플래시를 생성시키는 기존의 방식과 플래시 없는 정밀단조의 상계요소법과 실험에 의한 비교 해석에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 역사다리꼴 단면의 시편을 사용했을 때가 플래시를 생성시키는 사각단면의 시편을 사용했을 때보다 재료가 절감되었으며, 축대칭에 비해 평면변형에서 더 많은 재료절감 효과가 나타났다.
- (2) 플래시 없는 단조가 기존의 플래시 있는 단조에 비해 최종 단조하중이 현저히 감소되었다.
- (3) 평면변형 공정의 최종단계에서 전반적으로 플래시 없는 단조품이 플래시 있는 기존의 제품에 비해 유효변형률 분포가 비교적 낮게 나타났다.
- (4) 단조실험에서 사각단면의 시편보다 역사다리꼴 시편을 사용했을 경우가 비교적 향상된 소재 유효흐름을 보였다.
- (5) 시뮬레이션 결과를 토대로 한 플라스틱성의 실험에서 이론치와 실험치의 단조하중이 잘 일치하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Dean, T. A., 1977, "Die Technology : The Feasibility of Flashless Forging," *Metallurgia and Metal Forming*, Vol. 44, pp. 488~498.
- (2) Altan, T. and Henning, H. J., 1972, "Closed-Die Forging of Round Shapes ; Flash Design and Material Savings," *Metallurgia and Metal Forming*, Vol. 39, pp. 83~88.
- (3) Altan, T., et al., 1973, *Forging Equipment, Materials and Practices*, Metal and Ceramics Information Center.
- (4) Van Hoenacker, Y. and Dean, T. A., 1978, "The Application of Upper Bound Analyses to Real Situation-A Comparison of Flash and Flashless Forging," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 18, pp. 81~93.
- (5) Nediani, G. and Dean, T. A., 1983, "Forging of Rectangular Sections in a Completely Closed Die Cavity," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 25, No. 5, pp. 347~360.
- (6) Kim, N. S. and Kobayashi, S., 1990, "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.
- (7) Jain, V. K., Goetz, R. L. and Lombard, C. M., 1992, "Application of Computer Methods to the Design and Analysis of Precision Rib-Web Forgings," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, pp. 1~16
- (8) Wu, W. T., and Oh, S. I., 1984, "ALPID : A General Purpose FEM Code for Simulation of Non-Isothermal Forming Processes," *Proc. NAMRC- X III*, Berkeley, California, pp. 449.
- (9) Dean, T. A., 1993, "Progress in Net-Shape Forging," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 1031~1040.
- (10) 木内學, 1978, "Upper Bound Elemental Technique(UBET)の概要と問題点," 生産研究, 30卷, 2號, pp. 31~38.
- (11) Oudin, J., and Ravalard, Y., 1981, "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.
- (12) Himmelmblau, D. M., 1972, *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, pp. 152.
- (13) 김동원, 김현영, 신수정, 1988, "UBET에 의한 축대칭 형단조 가공해석," 대한기계학회 춘계학술대회 초록집(I), pp. 5~9.
- (14) 김영호, 배원병, 김진훈, 이종현, 1992, "축대칭 단조공정에서 상계요소법을 이용한 최적 초기소재와 예비가공형의 예측," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), pp. 376~379.
- (15) 이종현, 김영호, 배원병, 이원희, 1993, "고온 연강 유동특성을 상사하는 모델재료 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1161~1171.