

평면변형 및 축대칭 단조에서 최적 속도장에 관한 연구

이 종 현* · 김 진 옥**

A Study on the Optimum Velocity Fields in Plane-strain and Axisymmetric Forging

J. H. Lee · J. W. Kim

Key words : Flashless Forging(플래시 없는 단조), UBET(상계요소법), Rib-Web Shape(리브-웨브 형상), Kinematically Admissible Velocity Fields(동적가용속도장)

Abstract

An upper bound elemental technique(UBET) program has been developed to analyze forging load, die-cavity filling and optimum kinematically admissible velocity fields for flashless forging. The simulation for flashless forgings are applied plane-strain and axisymmetric closed-die forging with rib-web type cavity. The kinematically admissible velocity fields for inverse triangular and inverse trapezoidal elements, are used to analyze flashless forging. Experiments have been carried out with pure plasticine billets at room temperature. Theoretical predictions of the forging load in plane-strain and axisymmetric forging are in good agreement with experimental results.

	기호설명	$v(x,y)$: 평면변형 요소의 y 방향 속도
		$v_{ij}, v_{ij+1}, v_{ij+2}$: 평면변형 요소 표면의 y방향 속도
C	: 재료 상수	$w(r,z)$: 축대칭 요소의 z 방향 속도
ds_f	: 소재와 다이 접촉표면의 단위 면적	w_{ij+1}	: 축대칭 요소 표면의 z방향 속도
ds_s	: 두 인접요소 표면의 단위 면적	x_i, x_{i+1}, x_{i+2}	: 평면변형요소 표면의 x방향 좌표
dV	: 요소의 단위 체적	y_j, y_{j+1}, y_{j+2}	: 평면변형 요소 표면의 y방향 좌표
m	: 마찰정수	z_j, z_{j+1}	: 축대칭요소 표면의 z방향 좌표
r_i, r_{i+1}	: 축대칭 요소 표면의 r방향 좌표	ϵ_t	: t번째 단계에서의 유효변형률
$u(x,y)$: 평면변형 요소의 x 방향 속도	$\epsilon_{t-\Delta t}$: t-Δt번째 단계에서의 유효변
$u(r,z)$: 축대칭 요소의 r 방향 속도		
u_{ij}, u_{i+1j}	: 평면변형요소 표면의 x, r방향 속도		

* 경남정보대학 차량기계과(정희원)(원고접수일 : 99년 2월)

** 경남정보대학 기계설계과(정희원)

형률

- $\dot{\epsilon}_t$: t번째 단계에서의 유효변형률 속도
- $\dot{\epsilon}_{t-\Delta t}$: t- Δt 번째 단계에서의 유효변형률 속도
- $\alpha_{t-\Delta t}$: t- Δt 번째 단계에서의 유동응력

1. 서 론

리브-웹형 단조품의 성형에 대한 이론적 해석 방법으로는 슬래브(slab)법, 상계법, 상계요소법(UBET: Upper Bound Elemental Technique), 유한요소법(FEM)¹⁾ 등이 주로 사용되고 있다. 이 중에서도 상계요소법은 유한요소법에 비해서 적용상의 간편함과 계산시간의 단축, 해석결과와의 상대적인 유용함에서 장점이 인정되어 소성가공 해석에 폭넓게 적용되고 있다. 상계요소법은 유동장 내의 소재를 단순한 형상의 여러 가지 요소로 분할하여 해석함으로써 슬래브법과 기존의 상계법에 비해 비교적 복잡한 유동을 해석할 수 있다. 또한 유동장에 있어서의 요소에 대한 동적가용속도장(kinematically admissible velocity field)은 체적 일정조건과 수직속도 연속조건, 외부 경계조건 등이 만족 되도록 유도된다.

전통적인 밀폐형 단조공정은 플래시(flash) 생성으로 인한 재료의 손실과 이의 제거를 위한 과정이 추가된다. 그러므로 재료손실 및 후처리 기계가공을 최소화할 수만 있다면 부가가치가 높은 정밀 단조품의 생산이 가능하다. 이 전통적인 단조 공정에 관한 연구는 Altan 등^{2,3)}의 연구에서 자세히 언급하고 있다. 또한 플래시 생성시 높은 단조하중으로 인하여 다이손상을 초래할 수 있어 플래시 없는 정밀단조^{4~6)}에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

플래시 없는 정밀단조(flashless precision forging)에 관한 연구는 상대적으로 적다. Hoemaker⁴⁾와 Nediani⁵⁾, Dean⁶⁾ 등은 상계법 혹은 상계요소법을 이용하여 정밀단조에 대한 연구를 수행하였다. 또한 유한요소법에 의한 연구도 Kim⁷⁾, Jain⁸⁾ 등에 의해 연구된 바가 있다.

본 연구에서의 연구범위는 유한요소법에 비해 비교적 경제적이고 간편한 상계요소법을 이용하여 리브-웹형(rib-web type) 단면을 가진 플래시 없는 평면변형 및 축대칭 문제에서 단면이 사다

리꼴인 시편을 이용하여 해석하였을 때 최적의 동적가용속도장에 대해서 연구하였다. 또한 평면변형에서, 최적 속도장을 이용하여 플래시를 생성시키지 않고 제품을 만들 수 있는 초기소재의 결정에 대해서도 연구하였다. 연구방법으로는 시편의 단면을 사각형과 삼각형, 사다리꼴 요소를 포함한 단순 형태의 요소를 사용하여 유동장을 나누고 각 요소에 대한 동적가용속도장을 기초로 전체의 에너지소비율을 최소화함으로써 각 요소의 속도장을 결정하도록 하였다. 소재실험은 재료시험기인 MTS (Material Testing System)에 의해서 수행되었으며, 소재는 플라스틱인(plasticine)을 이용하였다.

2. 이론적 해석

본 연구에서는 리브-웹형 단면을 가진 평면변형 및 축대칭 제품에 대한 단조 공정 해석을 위하여 상계요소법을 사용하였다. 기존의 전통적인 플래시 있는 단조를 위하여 사각단면 형상의 소재를 사용하는 반면, 플래시 없는 정밀단조를 위하여 역사다리꼴 단면의 소재를 이용하여 해석하였다. 평면변형 및 축대칭 단조에서 해석적 모델은 Fig. 1과 같다.

2.1 동적가용속도장

분할된 각 요소의 속도장은 외부 경계에 관한 변위 경계조건, 요소 경계에 있어서 수직속도 연속조건, 각 요소에 대한 체적 일정조건을 만족하도록 유도하였다.

이 때 요소의 모든 표면에서 유동을 허용하며 각 요소는 독립적으로 취급한다. 또한 요소 경계에 있

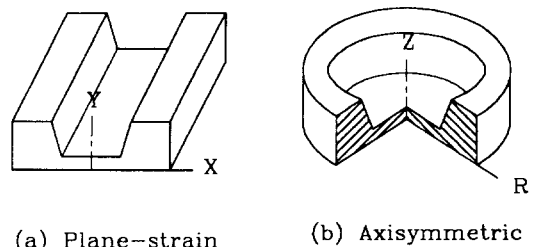
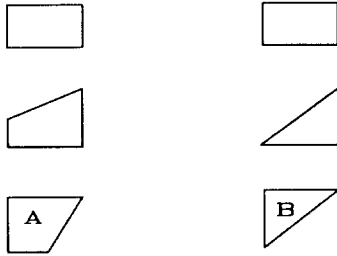


Fig. 1 Analytical model for flashless forging

어서 수직속도 성분들은 모든 표면을 따라 일정하며 균일하다고 가정하였다. 본 연구에서의 플래시 없는 평면변형 및 축대칭 단조문제를 해석하기 위하여 사용된 단순한 요소의 단면형상은 Fig. 2와 같다. 이 그림 중에서 (a), (b)의 A, B 요소에 대하여 경사면에 작용하는 속도벡터의 방향에 따른 유동 특성을 조사하여 이 시스템에 가장 적절한 최적 동적가용속도장을 조사하고자 한다.

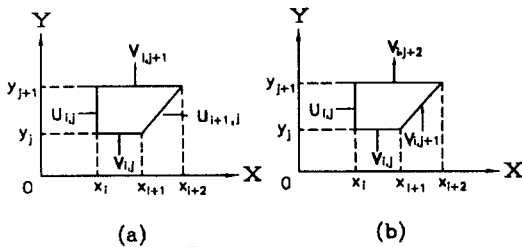
Fig. 2(a)(b)의 A, B 요소 외의 요소에 대한 동적가용속도장은 Kiuchi⁽⁹⁾, Oudin⁽¹⁰⁾ 등이 제시한 것을 사용하였으며, A, B 요소의 경사면에 작용하는 속도벡터의 유형은 Fig. 3 4와 같다.

Fig. 3 4의 평면변형 및 축대칭 요소의 동적가용속도장은 다음과 같다.

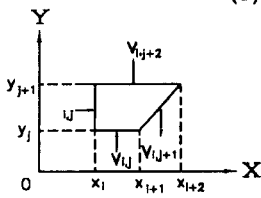


(a) Plane-strain (b) Axisymmetric

Fig. 2 Cross-section shape of plane-strain and axisymmetric elements



(a) (b)



(c)

Fig. 3 Normal velocity distributions for plane-strain element A

1) Fig. 3의 평면변형 요소(a c)

(a) 요소 :

$$u(x,y) = \frac{K_1}{K_1'(K_1y+b_1)} x + U_{i+1,j} \quad (1)$$

$$v(x,y) = \frac{1}{K_1'(K_1y+b_1)} + \frac{x+U_{i+1,j}}{K_1} \quad (2)$$

이고, 여기서,

$$K_1 = (x_{i+2} - x_{i+1}) / (y_{j+1} - y_j)$$

$$K_1' = \frac{K_1}{b_1(K_1v_{ij} + u_{i+1,j} - u_{i,j})}$$

$$b_1 = x_{i+1} - x_i \text{이다.}$$

(b) 요소 :

$$u(x,y) = -\frac{1}{K_2'(x-b_2)} - \frac{v_{ij+1} - v_{ij}}{K_2} \quad (3)$$

$$v(x,y) = -\frac{1}{K_2'(x-b_2)^2} y + v_{ij} \quad (4)$$

이고, 여기서,

$$K_2 = (y_{j+1} - y_j) / (x_{i+2} - x_{i+1})$$

$$K_2' = \frac{K_2}{b_2(K_2u_{ij} - v_{ij} + v_{ij+1})}$$

$$b_2 = x_{i+1} - x_i \text{이다.}$$

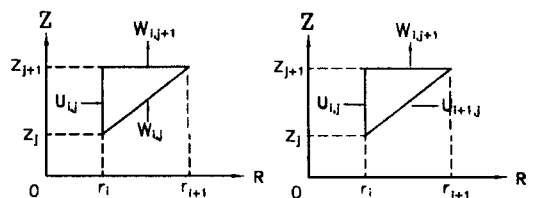
(c) 요소 :

$$u(x,y) = \frac{1}{K_3'(x-b_3)} + \frac{v_{ij+1} + v_{ij}}{K_3} \quad (5)$$

$$v(x,y) = \frac{1}{K_3'(x-b_3)^2} y + v_{ij} \quad (6)$$

이고, 여기서,

$$K_3 = (y_{j+1} - y_j) / (x_{i+2} - x_{i+1})$$



(a)

(b)

Fig. 4 Normal velocity distributions for axisymmetric element B

$$K_3 = \frac{K_3}{b_3(-K_3 u_{i,j} + v_{i,j} + v_{i,j+1})}$$

$b_3 = x_{i+1} - x_i$ 이다.

2) Fig. 4의 축대칭 요소(a b)

(a) 요소 :

$$u(r,z) = -A_1 \left(1 + \frac{B_1}{r}\right) \quad (7)$$

$$w(r,z) = \frac{A_1}{r} z + C_1 \quad (8)$$

이고, 여기서,

$$A_1 = -u_{i,j} r_i / (r_i + r_{i+1})$$

$$B_1 = r_{i+1}$$

$$C_1 = w_{i,j+1} + \frac{r_i z_{j+1} u_{i,j}}{(r_i + r_{i+1})r}$$

(b) 요소 :

$$u(r,z) = \frac{A_2}{r} + B_2 \quad (9)$$

$$w(r,z) = -\frac{B_2}{r} (z - z_{j+1}) + C_2 \quad (10)$$

이고, 여기서,

$$A_2 = \frac{r_{i+1} \cdot w_{i,j+1}}{2} \cdot \frac{r_{i+1} - r_i}{z_{j+1} - z_j}$$

$$B_2 = u_1 - \frac{r_{i+1} \cdot w_{i,j+1}}{2r_i} \cdot \frac{r_{i+1} - r_i}{z_{j+1} - z_j}$$

$$C_2 = w_{i,j+1}$$

단조 가공시의 임의의 단계에서 각 요소들을 포함한 전체 에너지소비율 J^* 는 다음과 같다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_r \quad (11)$$

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

$$\dot{W}_i = \int_v \bar{\sigma}_i \dot{\epsilon}_i dV \quad (12)$$

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

식(12)에서 $\bar{\sigma}_i$ 는 가공경화재료에 있어서 t 번째 단계에서 유효응력을 나타내며 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_i = C \bar{\epsilon}_i^n \quad (13)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_i = \bar{\epsilon}_{i-\Delta t} + \Delta t \dot{\epsilon}_{i-\Delta t}$ 이며 $\dot{\epsilon}_{i-\Delta t}$ 는 식(14)와 같다.

$$\dot{\epsilon}_{i-\Delta t} = \frac{\dot{W}_i}{V_{t-\Delta t} \cdot \bar{\sigma}_{i-\Delta t}} \quad (14)$$

식(14)에서 $V_{t-\Delta t}$ 는 $t-\Delta t$ 단계에서 요소의 체적이다.

전단 에너지소비율, \dot{W}_s 는 요소와 요소 사이의 경계에서의 전단 변형에너지율을 나타내며 다음 식(15)와 같다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_a}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta V_s| ds_s \quad (15)$$

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

또한, 마찰 에너지소비율, \dot{W}_r 는 다이와 소재 사이에서의 마찰손실에 의한 에너지소비율을 나타내며 식(16)과 같다.

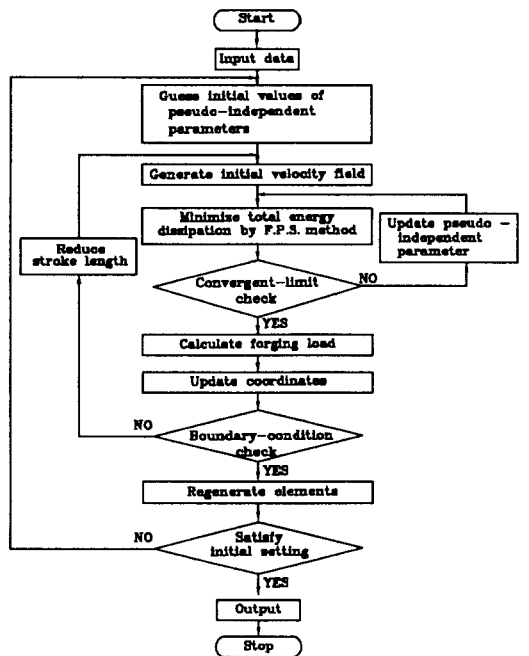


Fig. 5 Flow chart for flashless forging

$$\dot{w}_r = m \frac{\bar{\sigma}_a}{\sqrt{3}} \int_{s_r} |\Delta V_r| ds_r \quad (16)$$

여기서, $|\Delta V_r|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량이다.

분할된 각 요소의 동적가용속도장을 사용하여 소재 전체의 속도장을 표현하고 속도장에 포함된 준독립변수(pseudo-independent parameter)에 대해 직접탐색법의 일종인 FPS(Flexible Polyhedron Search)⁽¹¹⁾법을 사용하여 전체 에너지소비율, 식(11)을 최소화함으로써 준독립변수를 결정하며, 이에 임의의 단계에서의 소재 전체의 속도장을 결정하게 된다. 본 연구의 상계요소해석 프로그램의 흐름도(flow chart)는 Fig. 5와 같다.

2.2 재료유동과정

다이 진행에 따른 재료의 충전과정을 조사하기 위해서는 가공 전체단계를 다이 진행에 따라 여러 단계로 나누어 각 단계에서의 전체 에너지소비율을 최소로 하는 동적가용 속도장을 이용하여 각 요소의 시간증분 Δt 이후의 좌표를 결정하였다. Fig. 3 4의 평면변형 요소 (b)와 축대칭 요소 (a)의 시간증분 Δt 이후의 좌표의 예는 다음과 같다.

Fig. 3의 평면변형 요소 (b)에 대한 Δt 변형후 좌표 :

$$x_i' = x_i + \Delta t \cdot u_{ij} \quad (17)$$

$$x_{i+1}' = x_{i+1} + \Delta t \cdot \left(-\frac{1}{K_2(x_{i+1} - b_2)} - \frac{v_{ij+2} - v_{ij}}{K_2} \right) \quad (18)$$

$$x_{i+2}' = x_{i+2} + \Delta t \cdot \left(-\frac{1}{K_2(x_{i+2} - b_2)} - \frac{v_{ij+2} - v_{ij}}{K_2} \right) \quad (19)$$

$$y_j' = y_j + \Delta t \cdot v_{ij} \quad (20)$$

$$y_{j+1}' = y_{j+1} + \Delta t \cdot v_{ij+1} \quad (21)$$

Fig. 4의 축대칭 요소 (a)에 대한 Δt 변형후 좌표 :

$$r_i' = r_i + \Delta t \cdot u_{ij} \quad (22)$$

$$r_{i+1}' = r_{i+1} + \Delta t \cdot \frac{2r_i u_{ij}}{r_i + r_{i+1}} \quad (23)$$

$$z_j' = z_j + \Delta t \cdot \left(w_{ij+1} \frac{z_{j+1} - z_j}{r_i + r_{i+1}} \right) u_{ij} \quad (24)$$

$$z_{j+1}' = z_{j+1} + \Delta t \cdot w_{ij+1} \quad (25)$$

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_2, b_2 는 평면변형의 요소 (b)의 경우와 같다.

변형이 진행되는 동안 인접요소들 사이에 미끄럼이 발생하여 요소의 크기와 경계 조건이 바뀌게 된다. 따라서 다음 단계를 진행하기 위하여 요소재구성방법⁽¹²⁾을 사용하였다. 또한 다이 면의 모서리점과 소재의 자유표면의 모서리점을 기초로 요소를 분할함으로써 각 단계별로 요소 수를 최소화하고 준독립변수의 수를 적게 하였다.

3. 단조실험

리브-웹브형 단면을 가진 평면변형 및 축대칭 제품의 단조실험을 위하여 재료는 Harbutt's Plasticine사 제품인 플라스티신을 사용하였다. 상온에서 바셀린(vaseline) 윤활제($m \approx 0.1$)를 사용한 압축실험(13)에서 얻은 응력과 변형률의 관계식은 (26)과 같다.

$$\sigma = 0.17797 \varepsilon^{0.0822} \text{ (MPa)} \quad (26)$$

리브-웹브형 단조실험에서 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스티신을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후에 플래시 없는 제품을 만들기 위해 평면변형과 축대칭 시편 모두 단면이 역사다리꼴 모양으로 만들었다. 또한 전통적인 단조실험을 위해서 단면이 사각형인 시편도 만들었다.

실험에 사용된 금형다이는 S20C로 제작되었으며 윤활제로 탈크 파우더(talc powder)($m \approx 0.4$)를 사용하였다. 평면변형 다이는 다이의 양쪽부분을 10mm두께의 아크릴 판을 볼트로 단단히 고정시켜 소재의 평면변형 유동을 유지하도록 하였으며 다이진행시 유동을 시각적으로 관찰할 수 있도록 하였다. 축대칭 다이는 단조 후 다이와 플라스티신이 분리가 용이하도록 반원형의 다이를 각각 따로 만들어 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록

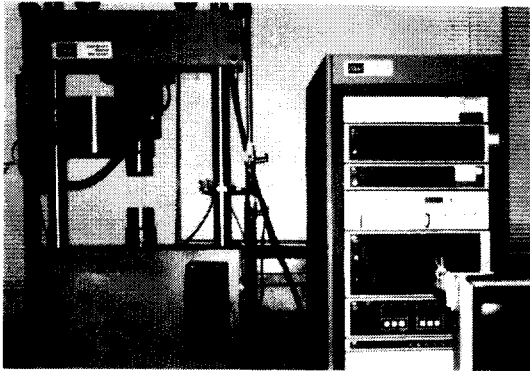


Fig. 6 MTS(Material Testing System)

록 하였다.

재료 시험기는 MTS(100kN을 사용)를 이용하였으며, 시편의 높이 변화에 따른 단조하중 선도는 X-Y기록계에 출력되도록 하였다. MTS는 Fig. 6과 같다.

4. 결과 및 고찰

리브-웹형 단면을 가진 소재의 평면변형과 축대칭 단조에서 플래시 없는 정밀단조의 최적 해석을 위하여 Fig. 3 4의 동적가속속도장에 대하여 조사하였다.

Fig. 3의 평면변형 요소 (a)를 사용했을 때는 시뮬레이션 초기부터 (a) 요소의 체적일정조건에서 $u_{i,j}$ 와 $u_{i+1,j}$ 가 같게 되고, $v_{i,j}=0$ (하부 다이 금형은 정지)는 $v_{i,j+1}$ 와 같게 된다. 따라서 식(1)(2)에서 K_1' 의 분모가 0(zero)이 되어 수치연산이 곤란하게 된다. 그러므로 이 요소는 본 연구의 평면변형 모델을 해석하기 위한 요소로 사용될 수 없다.

Fig. 3(b)(c) 요소를 사용했을 때 전체 에너지소비율에 대한 각각의 에너지소비율의 비(ratio)(\dot{W}_i/J^* , \dot{W}_s/J^* , \dot{W}_f/J^*)를 Fig. 7~8에 나타내었다.

요소 (b)와 (c)를 사용했을 때 모두 다이충만은 이루어지나 Fig. 8의 요소 (c)의 경우는 높이감소를 45%~50%부근에서부터 내부에너지 소비율이 마찰에너지 소비율과 전단에너지 소비율보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 리브-웹형 밀폐형 단조에서 일반적으로 내부 에너지소비율이 다른 에너지소비율보다 크게 나타나는 것과는 대조적이

므로 논리적으로 타당성이 부족하다. 반면에 Fig. 7의 요소 (b)는 다이가 닫히는 최종까지 내부에너지 소비율은 다른 에너지 소비율에 비해 약 3배 정도 높게 유지하고 있다. 따라서 요소 (b)가 요소 (c)

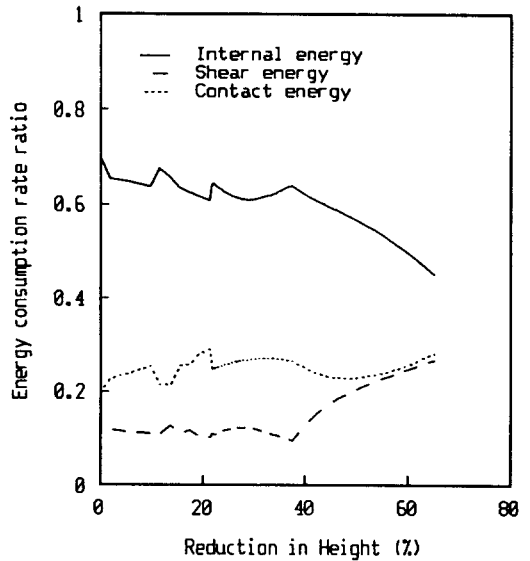


Fig. 7 Variation of energy consumption rate ratio(\dot{W}_i/J^* , \dot{W}_s/J^* , \dot{W}_f/J^*) using element (b) of Fig. 3

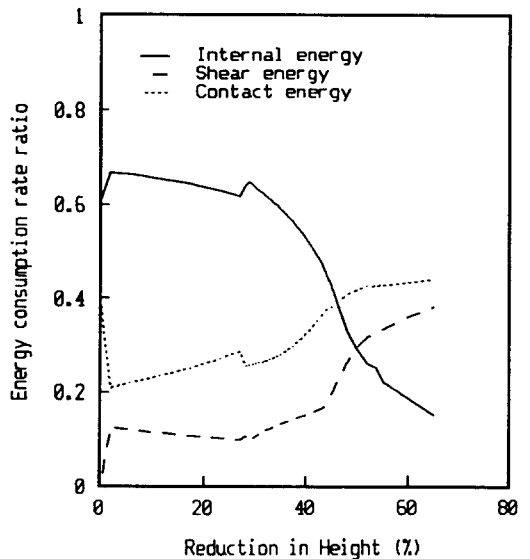


Fig. 8 Variation of energy consumption rate ratio(\dot{W}_i/J^* , \dot{W}_s/J^* , \dot{W}_f/J^*) using element (c) of Fig. 3

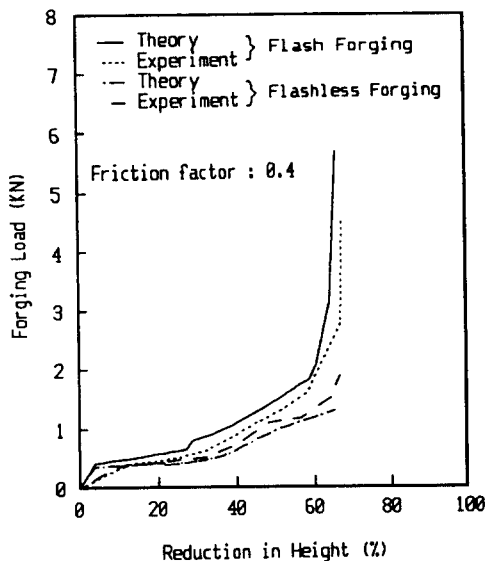


Fig. 9 Variation of forging load for theory and experiment in plane-strain forging

보다 더 적합한 요소임을 알 수 있다. 요소 (b)의 사용시에는 소재의 높이감소를 21.7% 부근에서 소재가 리브의 바깥벽에 닿게 되고, 축대칭에 비해 플래시 입구쪽으로의 유동이 상대적으로 많아 65.2% 부근에서 리브와 플래시 입구를 동시에 채우면서 공정이 완료되었다.

또한 요소 (b)를 사용한 이론과 실험치의 단조하중과 기존의 사각단면의 시편을 이용한 이론과 실험치의 단조하중을 Fig. 9에 표시하였다. 여기서 역사다리꼴 단면의 시편인 Fig. 3(b)의 시편은 사각단면의 시편에 비해 플래시를 생성시키지 않고 공정이 완료됨으로써 최고 단조하중의 값이 현저히 적다.

Fig. 4의 축대칭에서 요소 (a~b)를 사용했을 때에 소재가 리브의 벽에 닿을 때까지의 유동형상을 Fig. 10에 표시하였다. 요소 (a)의 경우는 다이가 진행되는 동안 소재의 위쪽과 바깥쪽으로 유동이

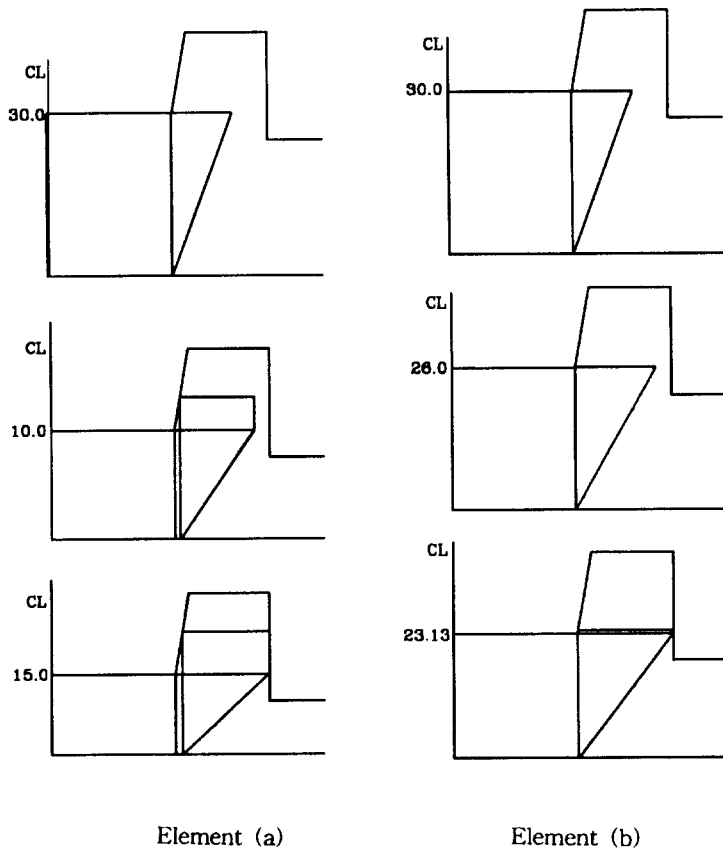


Fig. 10 Configuration of element systems for using element (a)~(b) in Fig. 4

진행되면서 높이감소를 50%에서 소재가 리브의 바깥벽에 닿게 되고, 약 73.5%에서 리브부분을 채우며 높이감소를 83.3% 부근에서 플래시 입구쪽에 소재가 완전히 차면서 플래시를 생성시키지 않고 공정이 완료되었다. 이와 같이 플래시를 만들지 않고 완제품을 만들 수 있는 반면, 요소 (b)를 사용했을 때는 소재가 리브의 바깥벽에 닿기까지는 다이 윗쪽에서의 유동이 거의 일어나지 않고 바깥쪽으로의 유동만 일어났다. 이러한 현상은 축대칭 유동이 평면변형 유동에 비해 리브의 벽에 닿을 때까지 상대적으로 윗쪽에서의 유동이 많이 일어난다는 사실(12)에서 볼 때 요소 (b)는 요소 (a)보다 타당성이 작다.

또한 요소 (a)를 사용한 이론과 실험값의 단조하중과 사각단면의 시편을 이용한 기존의 단조하중과의 비교는 Fig. 11과 같다. 여기서도 평면변형과 같이 역사다리꼴 단면의 시편이 사각단면의 시편

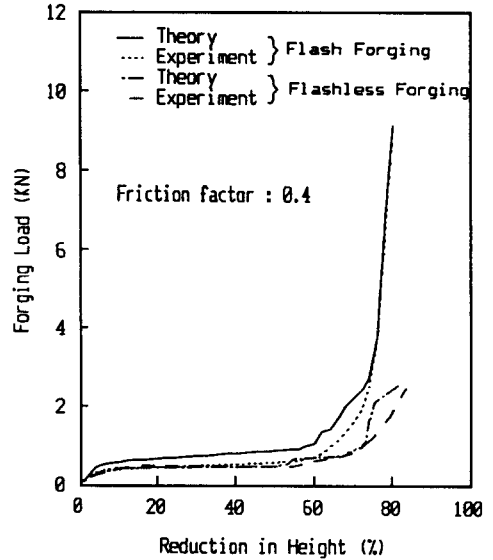


Fig. 11 Variation of forging load for theory and experiment in axisymmetric forging

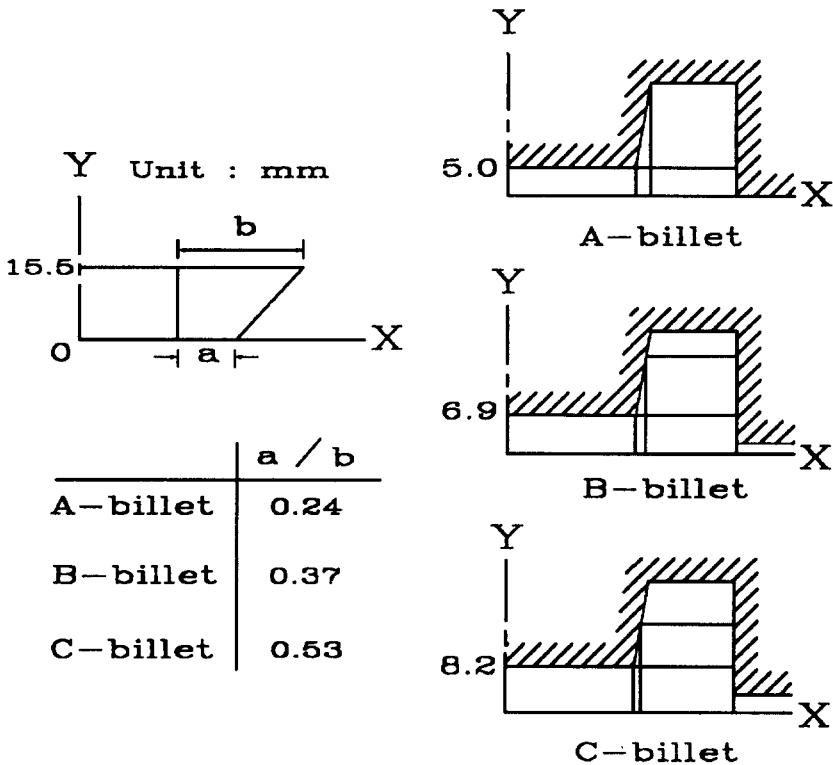
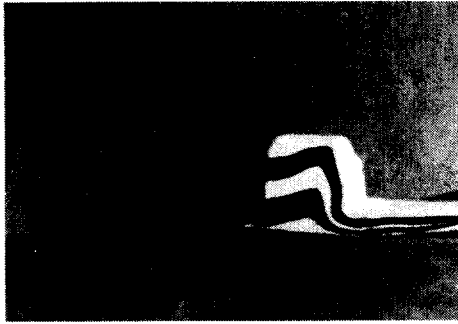
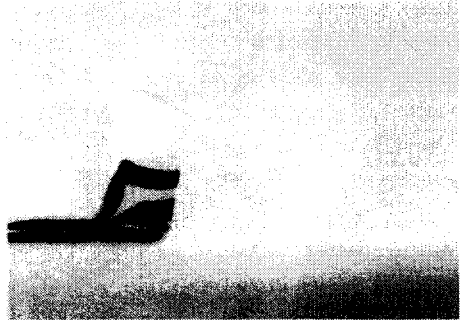


Fig. 12 Variation of formation of initial flash for initial billets in plane-strain forging



Flash forgings



Flashless forgings

Fig. 13 Flow pattern of material in plane-strain forgings

에 비해 최고 단조하중이 현저히 적음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3 4의 동적가속속도장을 통해서 알 수 있는 것은 비록 속도장이 체적일정조건, 외부 경계조건, 수직 속도연속조건을 만족하는 속도장이라 할지라도 해석모델을 가장 잘 표현할 수 있는 속도장이 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 평면변형에서 Fig. 3(b)요소의 속도장을 이용하여 소재의 높이(15.5mm)와 체적을 일정하게 두고 역사다리꼴 요소의 밑변과 윗변의 길이 a, b를 변화시키면서 시뮬레이션했을 때의 최적시편과 플래시 생성 시기를 조사하였다. 여기서 밑변과 윗변의 길이 비(a/b)에 따라 A-billet(2.5mm/10.5mm)과 B-billet (3.5mm/9.5mm), C-billet (4.5mm/8.5mm)로 나누었다. A-billet은 최종단계(웨브의 높이 : 5.0mm)에서 플래시가 생기기 직전에 다이를 완전히 채우면서 공정이 완료되었다. 반면에 B-billet과 C-billet은 웨브의 높이가 각각 6.9mm와 8.2mm에서 플래시가 생성되기 시작하였다. 따라서 일정 체적하에 플래시를 생성시키지 않고 완제품을 만들 수 있는 시편은 A-billet의 시편임을 알 수 있다.

Fig. 13은 평면변형 단조에서 사각 단면의 시편을 이용한 전통적인 단조품과 역사다리꼴의 시편을 이용한 플래시 없는 단조품을 나타내고 있다. 여기서 기존의 전통적인 사각단면의 시편보다 역사다리꼴 시편을 사용했을 경우가 유동의 흐름이 비교적 완만하여 향상된 유동 흐름을 보여주고 있다.

5. 결 론

리브-웨브형 단면을 가진 평면변형과 축대칭 문제에서 상계요소법에 의한 플래시 없는 정밀단조해석과 재료실험에서 얻은 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플래시 없는 평면변형 및 축대칭 단조품을 제작하기 위해서 단면의 형상이 역사다리꼴인 소재를 사용하여 양호한 결과를 얻었다.
- 2) 역사다리꼴 요소와 역삼각형 요소에 대한 동적가속속도장에서 요소의 빗변은 윗방향으로 속도를 부여하는 것이 최적의 속도장을 얻을 수 있었다.
- 3) 기존의 플래시 다이를 이용하여 플래시 없는 제품을 만들기 위해서는 초기소재의 형상과 치수가 매우 중요함을 알 수 있었다.
- 4) 단조실험에서 기존의 사각단면을 이용한 단조에 비해 역사다리꼴 단면을 가진 단조에서 비교적 향상된 소재 유동 흐름을 보였다.
- 5) 이론적인 결과를 토대로 한 플라스틱인의 실험에서 단조하중의 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하였다.

참고문헌

1. Wu, W. T., and Oh, S. I., "ALPID : A General Purpose FEM Code for Simulation of Non-Isothermal Forming Processes", Proc. NAMRC-XIII, Berkeley, California, pp. 449, 1984.

2. Altan, T., and Henning, H. J., "Closed-Die Forging of Round Shapes ; Flash Design and Material Savings", Metallurgia and Metal Forming, Vol. 39, pp. 83~88, 1972.
3. Altan, T., et al., Forging Equipment, Materials and Practices, Metal and Ceramics Information Center, 1973.
4. Van Hoenacker, Y., and Dean, T. A., "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, 1978.
5. Nediani, G., and Dean, T. A., "Forging of Rectangular Sections in a Completely Closed Die Cavity", Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, No. 5, pp. 347~360, 1983.
6. Dean, T. A., "Progress in Net-Shape Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 1031~1040, 1993.
7. Kim, N. S., and Kobayashi, S., "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.
8. Jain, V. K., Goetz, R. L., and Lombard, C. M., "Application of Computer Methods to the Design and Analysis of Precision Rib-Web Forgings", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 36, pp. 1~16, 1992.
9. 木内學, "Upper Bound Elemental Technique (UBET)の概要と問題点", 生産研究, 30卷, 2號, pp. 31 38, 1978
10. Oudin, J., and Ravalard, Y., "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.
11. Himmelblau, D. M., Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, pp. 152,1972.
12. 김영호, 배원병, 이종헌, 박재훈, "비축대칭 형상의 단조공정설계에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제12권, 제10호, pp. 57~68, 1995.
13. 이종헌, 김영호, 배원병, 이원희, "고온 연강 유동특성을 상사하는 모델재료 개발에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp.1161~1171, 1993.

저 자 소 개



이종헌(李鍾憲)

1961년 12월생. 1988년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1991년 동대학원 생산기계공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 졸업(박사). 1996년~현재 경남정보대학 차량기계과 교수. 당학회 회원.



김진욱(金進郁)

1953년 10월생. 1977년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1979년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 졸업(박사). 1978년~현재 경남정보대학 기계설계과 교수. 당학회 회원.