

## 평면변형 단조에서의 예비성형체 설계에 관한 연구

이종헌 · 강 진\*\* · 배춘익\*\*

### A Study on Preform Design in Plane-Strain Forging

J. H. Lee · K. Kang · C. E. Bae

**Key words** : Plane-Strain Forging(평면변형 단조), UBET(상계요소법), Rib-Web Shape(리브-웹브 형상), Flash Design(플래시 설계) Preform Design(예비성형체 설계)

#### Abstract

A UBET program is developed for determining flash, the optimum sizes of preform and initial billet in plane-strain closed-die forging. The program consists of forward and backward tracing processes. In the forward program, flash, die filling and forging load are predicted. In backward tracing process, the optimum dimensions of initial billet and preform are determined from the final-shape data based on flash design. Experiments are carried out with pure plasticine billets at room temperature. The theoretical predictions of forging load and flow pattern are in good agreement with the experimental results.

#### 기호설명

$ds_r$	: 소재와 다이 접촉표면의 단위 면적	$\varepsilon_t$	: t번째 단계에서의 유효변형률
$ds_s$	: 두 인접요소 표면의 단위 면적	$\varepsilon_{t-\Delta t}$	: t번째 단계에서의 유효변형률
$dV$	: 요소의 단위 체적	$\dot{\varepsilon}_t$	: t번째 단계에서의 유효변형률 속도
$K$	: 재료 상수	$\dot{\varepsilon}_{t-\Delta t}$	: t- $\Delta t$ 번째 단계에서의 유효변형률 속도
$u_{ij}, u_{i+1j}$	: 평면변형요소 표면의 x, r방향 속도	$\sigma_{t-\Delta t}$	: t- $\Delta t$ 번째 단계에서의 유동응력
$v_{ij}, v_{ij+1}, v_{ij+2}$	: 평면변형요소 표면의 y방향 속도	$\tau$	: 진단응력
$x_i, x_{i+1}, x_{i+2}$	: 평면변형요소 표면의 x방향 좌표		
$y_j, y_{j+1}, y_{j+2}$	: 평면변형요소 표면의 y방향 좌표		

#### 1. 서 론

항공기 부품중에서는 리브-웹브 형상이 많은

\* 경남정보대학 차량기계과(원고접수일: 99년 5월)

\*\* 경남정보대학 기계설계과

부분을 차지하고 있는데, 이 리브-웹트 형상의 밀폐형 단조공정에서 다이체움과 재료손실의 최소화가 중요하다. 이것을 해결하기 위해서는 적절한 초기소재 선정이 중요하며, 한번의 공정으로 최종 제품이 성형될 수 없는 경우에는 하나 또는 그 이상의 예비성형체(preform)의 설계가 필수적이다<sup>1)</sup>.

단조공정의 이론적 해석 방법에는 여러 가지가 있지만 동적가용속도장을 이용한 해석방법에는 상계법과 상계요소법(UBET)이 있다. 종래의 상계법이 단순한 변형의 문제에 한정된 반면 상계요소법은 소재의 변형영역을 해석 가능한 단순한 요소들로 분할하고, 이 요소들을 조합하여 전체에너지를 최소화하는 방법이다. 상계요소법은 Kudo<sup>(2,3)</sup>가 단순한 평면변형 및 축대칭 문제에서 단위 변형영역의 개념을 도입하면서 시작되었다. 최근에 Bramley<sup>4)</sup>와 Kiuchi<sup>5)</sup> 등에 의하여 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 유한요소법에 비해 프로그램 구성이 간단하고 계산량이 작아 실행속도가 빠르다는 장점을 가지고 있으며 복잡한 소성 가공문제를 비교적 정확하고 경제적으로 해석할 수 있는 수치해법으로 평가되고 있다.

상계요소법에 의한 예비성형체 설계에 관한 연구는 Bramley<sup>4)</sup> 등에 의해 두개의 리브(rib)를 가진 축대칭문제에서 예비성형체 설계를 위한 방안으로 역해석(reverse solution)을 제안하였다. 이것은 현재 단계에서 얻은 속도장을 반대로 하여 역과정(reverse process)을 수행한 것이며, 실제의 정과정(forward process)과는 무관한 예비성형체를 얻게되고 역추적법<sup>6)</sup>과 비교하면 신뢰도가 떨어진다. 또한 대부분의 예비성형체 설계방법이 최종 제품에 대한 적절한 플래시 설계를 전제로 하지 않고 역추적하여 예비성형체를 설계함으로써 예비성형체 설계에 대한 기준이 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 상계요소법을 이용하여 항공기나 자동차 등에 널리 사용되고 있는 단면이 리브-웹트형인 평면변형 문제를 해석하였다.

먼저, 리브의 높이 대 폭의 비가 1 : 1인 경우에는 일정 초기소재에 대하여 여러가지 플래시비(flash ratio)에 따른 최적 플래시비를 선정하고 최적 초기소재도 선정하였다. 또한 초기시편에서 최종제품까지의 격자변형 및 다이충만과정을 조사

하고 각 단계에서의 단조하중 등을 조사하였다. 리브의 높이 대 폭의 비가 2 : 1인 경우에는 초기시편을 사용하여 한번만에 다이를 다 채우지 못하거나 과도한 플래시, 가공하중 등이 발생되었을 경우에는 플래시 설계에 기초하여 얻은 플래시량을 포함한 최종제품에서 역추적하여 예비성형체를 설계하였다.

## 2. 이론 해석

### 2. 1 동적가용속도장

재료가 소성변형을 일으키면 대체로 소성유동 자체가 복잡한 양상을 나타냄으로 상계요소법에 의한 소성가공 문제를 해석할때에는 적절한 가정이 필요하다. 이때 가정 조건은 다음과 같다.

- 1) 재료는 강소성체(rigid plastic material)이며, von Mises 항복조건을 따른다.
- 2) 체적 일정조건을 만족한다.
- 3) 금형은 완전 강체(rigid body)이다.
- 4) 소성변형중 온도변화는 무시하고, 유효응력(effective stress)은 유효변형률만의 함수이다.
- 5) 마찰조건은 소성변형 중 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = m_f k, \quad (0 < m_f < 1) \quad (1)$$

여기서,  $m_f$ 는 마찰정수(friction factor) ( $0 < m_f < 1$ )를 나타내며

$$k = \sigma_0 / \sqrt{3} (\sigma_0 : \text{소재 유동응력}) \text{이다.}$$

본 연구에서는 평면변형 유동을 해석하기 위하여 Oudin 등<sup>(7)</sup>이 제안한 Fig. 1과 같은 사각형과 사다리꼴의 요소를 사용하였다. 전체 유동장을 단

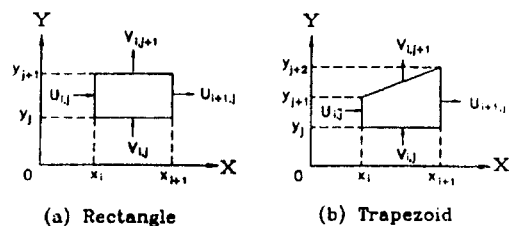


Fig. 1 Normal velocity distribution on boundaries in plane-strain elements

순한 형상의 요소로 분할하고 이들의 조합에 의하여 연립적으로 해석함으로써 변형영역의 전체에너지를 최소화하는 방법을 사용하였다.

2. 2 속도장 결정 및 에너지소비율

유효변형률 속도는 각 요소들의 동적가용속도장을 기초로 유도되어 요소내의 내부 에너지소비율을 계산하는데 사용된다.

단조 가공시 임의의 단계에서의 전체 에너지소비율은 다음과 같다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_r \tag{2}$$

위의 (2)식에서 RM  $\dot{W}_i$ 는 요소의 내부 변형 에너지소비율,  $\dot{W}_s$ 는 요소와 요소 사이의 진단 변형 에너지소비율,  $\dot{W}_r$ 는 다이와 소재 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰에 의한 에너지소비율이다.

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

$$\dot{W}_i = \int_v \sigma_i \dot{\epsilon}_i dV \tag{3}$$

여기서, 유효변형률 속도,  $\dot{\epsilon}_x = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$  이다.

식(3)에서  $\sigma_i$ 는 가공경화 재료에 있어서 t번째 단계에서 유효응력을 나타내며 식(9)와 같다.

$$\sigma_i = K \epsilon_i^n \tag{4}$$

여기서,  $\epsilon_i = \epsilon_{i-\Delta t} + \Delta t \dot{\epsilon}_{i-\Delta t}$ 이며  $\dot{\epsilon}_{i-\Delta t}$ 는 식(5)와 같다.

$$\dot{\epsilon}_{i-\Delta t} = \frac{\dot{W}_i}{V_{i-\Delta t} \cdot \sigma_{i-\Delta t}} \tag{5}$$

식(5)에서  $V_{i-\Delta t}$ 는 t- $\Delta t$ 단계에서 요소의 체적이다.

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

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta V_s| ds_s \tag{6}$$

여기서,  $\sigma_a$ 는 두 인접요소의 유효응력의 산술평균을 나타내며,  $|\Delta V_s|$ 는 요소 사이의 진단면에서

의 속도 불연속량이다.

또한 마찰 에너지소비율  $\dot{W}_r$ 는 다이와 소재 사이의 마찰손실에 의한 에너지소비율을 나타내며 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_r = m_f \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \int_{sf} |\Delta V_r| ds_r \tag{7}$$

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

소성변형 영역을 평면변형 유동에서 사각형과 사다리꼴로 분할하면 경계조건에 따라 각 요소의 경계속도를 알 수 있는 면과 가정해야 하는 면으로 나누어진다. 만일 분할된 요소의 수가  $L_1$  이고, 편치나 금형 다이에 접하는 경계면 혹은 속도를 알고 있는 경계면의 수를  $L_2$ 라 하고, 모든 경계면의 수를  $L_3$ 라 하면 가정해야 하는 경계면의 수  $L$ 은

$$L = L_3 - (L_1 + L_2) \tag{8}$$

로 표현된다. 여기서  $L_3$ 개의 전체 경계면으로부터  $L$ 개의 경계를 선택하고 선택된 면의 수직 경계속도를 준독립변수(pseudo-independent parameter)로 하여 전체 에너지소비율,  $J^*$ 를 최소화하는 것이 가능하다. 따라서 문제는 n개의 다변수 함수의 극치문제로 귀착된다. 즉 준독립변수  $N_i$ 에 대하여 전체 에너지소비율  $J^* = J^*(N_1, N_2, N_3, \dots, N_n)$ 를 직접탐색법(direct search method)의 일종인 FPS(Flexible Polyhedron Search)<sup>(6)</sup>법을 사용하여  $J^*$ 를 최소화함으로써 전체 동적가용속도장을 결정하게 된다.

2. 3 예비성형체 설계

한번의 공정으로 원하는 제품을 성형할 수 있는 경우는 많지 않다. 이런 경우 초기소재로부터 여러 단계를 거쳐 최종 형상의 제품을 성형하는 것이 바람직하며, 각 단계를 설계하는 것이 예비성형체 설계이다.

예비성형체 설계의 목적은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

- 1) 금속 유동에 결합이 없어야 하며 충분히 다이 내부를 채워야 한다.
- 2) 플레시로 인한 재료 손실이 최소로 되어야 한다.

- 3) 재료의 유동을 작게하여 다이의 마모를 최소로 한다.
- 4) 재료의 기계적 성질을 제이하고 그레인플로우(grain flow)를 얻어야한다.

본 연구에서는 예비성형체 설계를 위하여 Park 등<sup>(10)</sup>이 강소성 유한요소법에 처음으로 사용하고 축대칭 상계요소해석<sup>(11)</sup>에 적용한 역추적기법을 기초로 하여 역추적시에 플래시 설계를 고려한 평면변형 공정에서의 예비성형체를 설계하였다.

### 3. 단조실험

#### 3. 1 기초실험

리브-웨브형 평면변형 단조의 실험재료로 플라스틱신(Harbut's Plasticine)을 사용하였다. 플라스틱신의 기계적성질과 화학적성질은 Table 1과 같다. 재료의 응력과 변형률 특성을 결정하기 위해서 직경 대 높이가 1 : 1(30mm : 30mm)인 원통 시편으로 압축시험을 실시하였는데, 벌징(bulging)현상이 비교적 적게 생기도록 하기 위하여 시편의 상면과 하면에 바셀린(vaseline) 윤활제(mf 0.1)를 바르고 상온에서 0.5mm/sec의 일정속도로 압하율 50%까지 압축하였다. 이 결과를 최소자승법(least square method)으로 정리한 응력과 변형률 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_a = 0.17797 \epsilon^{0.0822} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

#### 3. 2 평면변형 실험

소재의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스틱신을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 수치해석 결과로 얻은 소재의 크기가 되게 환봉을 사용하

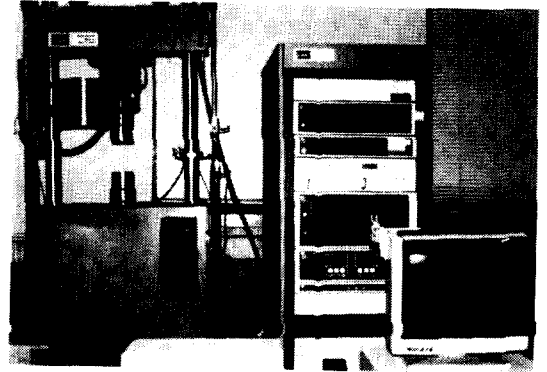


Fig. 2 MTS(Material Testing System)

여 일정한 두께로 압연하여 단면이 사각 모양으로 되도록 적층하여 사용하였다.

다이는 S20C로 제작되었으며 평면변형 유동을 유지하기 위하여 10mm 두께의 아크릴 판으로 양쪽 면을 막고 볼트로 고정시켜 길이 방향으로의 유동을 억제하고 시각적으로 유동 양상을 관찰 할 수 있도록 하였다.

실험은 상온에서 다이의 분리가 비교적 용이한 파우더(talc powder) 윤활제(mf=0.4)를 사용하여 로드 셀(load cell)이 100kN인 MTS(하중 카드(load card)는 ±50kN을 사용)에서 다이속도 0.5mm/sec로 하여 실험하였다. 실험하는 동안 시편을 일정 온도로 유지하기 위하여 시편틀 오븐(mechanical circulation oven)속에서 24시간 정도 보관하여 사용하였으며, 항온항습기를 사용하여 실내온도를 상온으로 일정하게 유지하였다. MTS는 Fig. 2와 같으며 시편의 높이 변화에 따른 단조하중 선도는 X-Y기록계에 자동 출력하도록 하였다.

### 4. 결과 및 검토

#### 4. 1 플래시 설계

밀폐형 단조에서 다이채움이 어려운 구석부의 충만을 완전하게 하기 위해서는 플래시 설계가 필수적이다. 그러나, 플래시 설계에 있어서는 소재의 충만 뿐만 아니라 단조하중, 플래시량 및 다이마모 등을 고려한 최적설계를 하기가 쉽지 않다.

Table 1 Properties of plasticine<sup>(10)</sup>

Components	CaCO <sub>3</sub> (50~60%), MgCO <sub>3</sub> , Mineral, Fe-Si
Specific Gravity	1.8~ 1.92
Specific Heat	0.24 Kcal/kg °C
Heat Conductivity	0.6 Kcal/m h °C
Hardness	HB15(24 °C)
Bulk Modulus	675,000 psi (475 kg/mm <sup>2</sup> )

본 연구에서는 축대칭의 경우 플래시 설계에 가장 널리 쓰이고 있는 Wolf, Teterin과 Tarnovskij의 플래시 경험식<sup>(12)</sup>을 평면 변형 다이 설계에 적용하여 최종제품의 치수와 소재의 물성치만 입력하면 플래시 설계를 자동적으로 할 수 있도록 하였다.

리브의 높이 대 폭의 비가 1 : 1인 경우에 단면이 사각인 일정한 초기시편(밀변×높이×폭 : 62mm

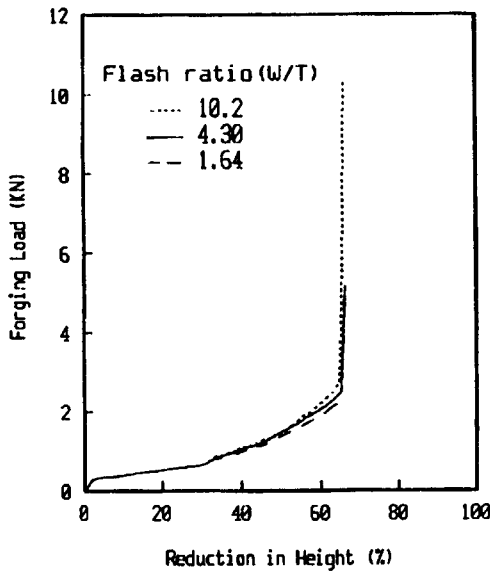


Fig. 3 Variation of forging loads for flash ratio

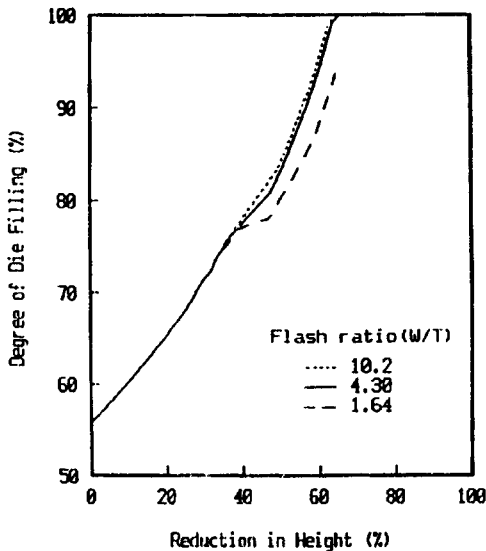


Fig. 4 Variation of die-cavity filling for flash ratio

× 15.5mm×60mm)으로 플래시 비(W/T)를 달리 주었을 경우의 가공하중과 다이충만도를 조사하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 플래시 치수에 따른 단조하중 및 다이 충만도를 보여주고 있다. 그림에서 W/T=10.2(6.50mm/0.64mm)와 같이 플래시 비가 큰 경우에는 다이 충만은 이루어지나 하중이 급격하게 증가함을 알 수 있다. 반면에 플래시 비가 W/T=1.64(6.50mm/4.00mm)와 같이 작은 경우에는 단조하중의 급격한 증가는 없으나 다이 충만이 완전히 이루어지지 않음을 보여주고 있다. 그러나 플래시 경험식에 의해 구한 플래시 비가 W/T=4.3(6.50mm/1.50mm)인 경우에는 위의 두 경우에 비해 적절한 하중과 플래시량으로 다이충만이 이루어짐을 알 수 있었다.

#### 4. 2 예비성형체 및 초기소재 설계

예비성형체가 필요한 제품에서 초기소재는 중간 단계의 예비성형체에 못지않게 중요하다. 적절한 초기소재를 얻기 위하여 경험식에서 얻은 플래시를 포함한 예비성형체를 최종형상으로 보고 역추적을 한다. 역추적 중요소 유동방향을 다이가 상승함에 따라 전방 시뮬레이션의 경우와 반대 방

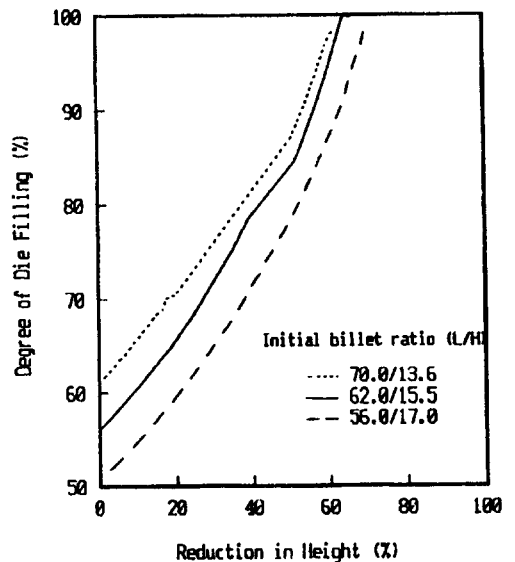


Fig. 5 Variation of die filling for initial billet geometry

향으로 진행하도록 하였고, 소재의 각 경계를 점점 단면이 사각형인 초기소재의 형태로 접근하도록 하였으며 최종적으로 소재 위쪽 방향과 바깥 방향의 경계가 일정 거리 이내까지 진행하였을 때 역추적과정이 끝나도록 하였다.

리브의 높이 대 폭의 비가 1 : 1인 경우에 플래시를 포함한 최종제품에서 역추적하여 초기시편을 구하고, 이것을 기준으로 초기소재의 폭을 일정하게 두고 밀변 대 높이(L/H)를 각각 다르게 했을 때 다이 충전도를 조사하였다.

Fig. 5에서는 각각의 경우에 있어서 다이 충전의 정도를 보여주고 있다. 즉 L/H가 70.0mm/13.6mm인 경우에는 리브의 윗 부분에 다이 충전이 이루어지지 않았으며 플래시부로 유동되는 양도 많았다. L/H가 56.0mm/17.0mm인 경우는 리브의 바깥 부분에 다이 충전이 이루어지지 않았음을 알 수 있었다. 반면에 본 연구의 수치해석에서 얻은 초기시편 L/H가 62.0mm/15.5mm인 경우에는 다이 충전이 이루어졌으며 플래시량도 적절하였다.

또한, 최적 초기소재를 이용하여 다이 진행에 따른 재료의 충전과정을 격자변형으로 시각화하고 백색과 흑색의 플라스틱인을 적층하여 상온에서 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 수치해석과 실험상의 유동경향과 플래시생성, 다이충

만 등이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 수치해석 결과와 실험치와의 단조하중을 비교하였으며 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하였다.

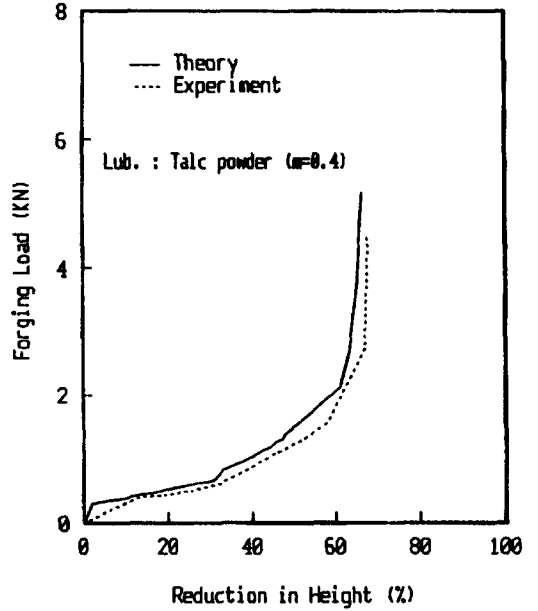


Fig. 7 Comparison between theoretical and experimental forging loads

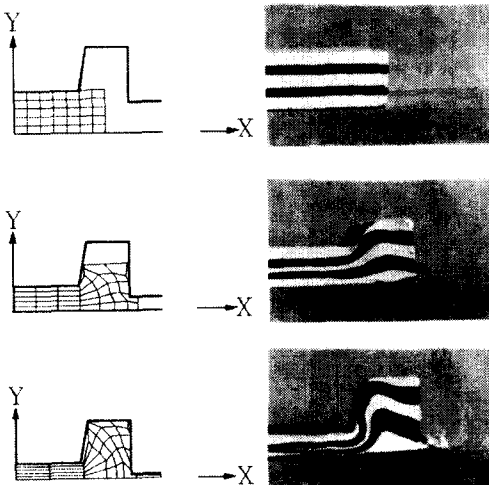


Fig. 6 Die-cavity filling process of grid pattern and multi-layered plasticine

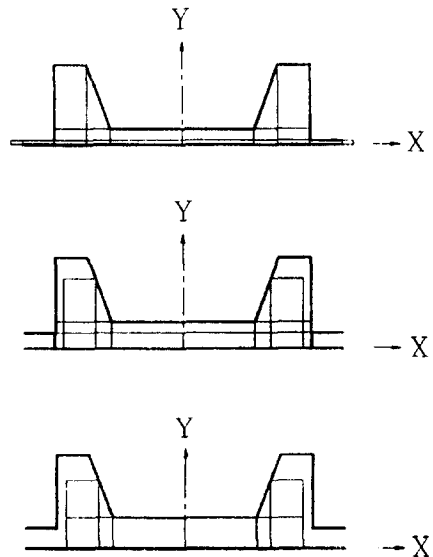
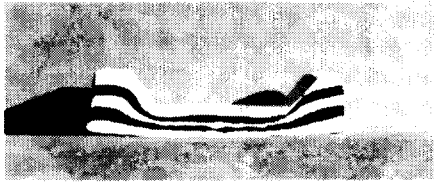
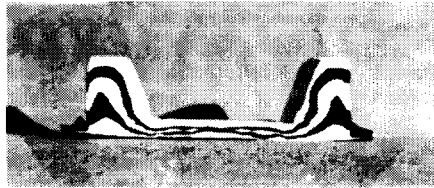


Fig. 8 Backward process from final configuration for preform prediction



(a) Preform



(b) Final product

**Fig. 9 Preform and final product**

리브의 높이 대 폭 비가 2 : 1 이상에서는 리브의 윗 부분에서 다이 충만이 이루어지지 않고 플래시 부로 빠져나오는 양도 지나치게 많아 중간 단계의 예비성형체가 필요하다. 따라서 예비성형체의 예측을 위하여 먼저 플래시 설계의 경험식으로부터 얻은 플래시량을 포함한 제품으로부터 역추적하여 소재의 바깥 방향의 경계가 일정한 거리 이내까지 진행하였을 때 역추적이 끝나도록 하였다. 그리하여 얻어낸 예비성형체와 역추적과정을 Fig. 8에 보여주고 있으며, 플라스틱인 실험에 의한 예비성형체와 최종 제품의 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 수치해석에 의한 초기소재와 예비성형체를 기초로 실험한 결과 양호한 제품을 만들 수 있었다.

### 5. 결 과

리브-웹브 형상의 평면변형 단조 부품의 설계를 위하여 다이 충만 과정, 초기 소재와 예비성형체를 설계할 수 있는 상계요소해석 프로그램을 개발하였으며 모델재료로 실험하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다이 진행에 따른 재료의 유동과정과 예비성형체, 초기소재 등을 예측할 수 있는 평면변형의 전, 후방 프로그램을 개발하였다.
- 2) 축대칭 다이설계에 사용되던 플래시 설계 경

험식을 평면변형의 다이 설계에 도입한 결과 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

- 3) 플래시를 포함한 최종제품으로부터 역추적함으로써 보다 최적의 초기소재와 예비성형체를 설계할 수 있었다.
- 4) 이론해석을 기초로 한 플라스틱인을 이용한 단조실험에서 만족스러운 예비성형체와 최종제품을 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

1. Lange, K. Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, 1985.
2. Kudo, H. "An Upper Bound Approach to Plane-Strain Forging and Extrusion- I", Int. J. Mech. Sci., Vol. 1, pp. 57~83, 1960.
3. Kudo, H. "An Upper Bound Approach to Plane-Strain Forging and Extrusion- II", Int. J. Mech. Sci., Vol. 1, pp.229~252, 1960.
4. Bramley, A. N. "Computer Aided Forging Design", Annuals of the CIRP, Vol. 36/1, pp. 135~138, 1987.
5. 木内學, 村松勁, 今井敏博, "非軸對稱複合鍛造の解析", 塑性と加工, 第30卷, 第342號, pp. 997~1003, 1989.
6. Kim, H. Y. and Kim, D. W., "Computer-aided preform design in the closed-die forging process", J. of Materials Processing Technology, Vol. 41, pp. 83~104, 1994.
7. Oudin, J. and Ravalard, Y., "An Upper Bound Method for Computing Computing Loads and Flow Patterns in Plane-Strain Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 21, pp. 237~350, 1981.
8. Himmelblau, D. M., Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, pp. 152, 1972.
9. Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., Metal forming : Fundamentals and Application, American Society for Metals, 1983.
10. Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with The Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71~79, 1983.
11. Chijiwa, K., Hatamuro, Y. and Hasegawa, N.,

Characteristics of Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting”, Trans. Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 21, pp. 178~186, 1981.

- 12. Altan, T., et al., Forging Equipment, Materials and Practices, Metal and Ceramics Information Center, 1973.

**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. 당학회회원.



**강 건(姜 建)**

1949년 6월생. 1971년 중앙대학교 기계공학과 졸업. 1976년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 1984년 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1993~1994년 미국 U. C. at DAVIS 객원교수. 1999년~현재 정남정보대학 기계설계과 교수.



**배춘익(裵壽益)**

1949년 10월생. 1976년 동아대학교 기계공학과 졸업. 1996년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1999년~현재 정남정보대학 기계설계과 교수.