

(論 文)

소성가공시 재료유동에 대한 수치해석 및 모델실험

김헌영* · 김동원**

(1992년 7월 7일 접수)

Analysis of Material Flow in Metal Forming Processes by Using Computer Simulation And Experiment with Model Material

Heon Young Kim and Dong Won Kim

Key Words : Upper Bound Elemental Technique(UBET, 상계요소법), Elastic-Plastic Finite Element Method(탄소성 유한요소법) Closed-Die Forging(형단조), Element Regeneration(요소 재구성), Backward Extrusion(후방압출), Flat Punch Indentation(평두형 편치압입), Experiment with Model Material(모델실험)

Abstract

The objective of the present study is to analyze material flow in the metal forming processes by using computer simulation and experiment with model material, plasticine. A UBET program is developed to analyze the bulk flow behaviour of various metal forming problems. The elemental strain-hardening effect is considered in an incremental manner and the element system is automatically regenerated at every deforming step in the program. The material flow behaviour in closed-die forging process with rib-web type cavity are analyzed by UBET and elastic-plastic finite element method, and verified by experiments with plasticine. There were good agreements between simulation and experiment. The effect of corner rounding on material flow behaviour is investigated in the analysis of backward extrusion with square die. Flat punch indentation process is simulated by UBET, and the results are compared with that of elastic-plastic finite element method.

1. 서 론

최근 기계부품에 요구되는 경량화, 강력화의 추세로 인하여 정밀단조제품에 대한 요구가 갈수록 높아지고 있다. 간단한 형상의 제품은 형단조 가공에 의하여 획기적으로 생산성을 향상시킨 바 있으나, 형상이 복잡해질 수록 형단조 금형설계는 어려워지며, 경험과 숙련에 의지해 온 것이 실정이었다.

다.

일반적으로 복잡한 형상의 금형은 제작비의 제약이 따르기 때문에 많은 실험에 의한 시행착오를 거듭할 수 없다. 따라서 단조 공정의 개선 및 소재의 결함방지 등을 위하여는 금형설계 및 가공, 특히 형충만시 재료의 유동에 대한 연구가 필수적이다. Fig. 1은 금형설계 과정을 나타낸 것이다. 금형을 직접 제작하기 이전에 단조부품 및 완성 가공형 금형(finisher die)을 임의로 설계변경하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후 원하는 제품의 성형이 가능할 때 실제로 금형을 제작함으로써 금형 설계 및

*정회원, 기아자동차 중앙기술연구소 전산지원팀

**정회원, 서울대학교 기계설계학과

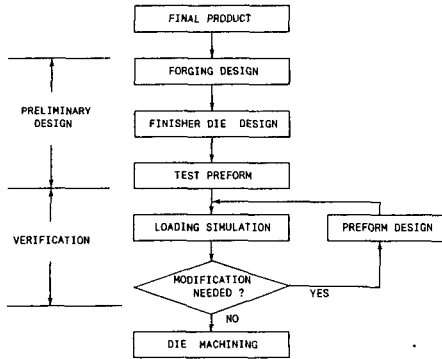


Fig. 1 Computer aided forging die design

가공의 시행착오를 최대한으로 줄일 수 있다. 만약 제품의 성형이 한번의 공정으로는 불가능하다면 예비 성형단계 (preforming operation)를 거치도록 해야한다.

UBET는 Kudo^(1,2)가 단순한 축대칭 및 평면변형 문제해석에 단위변형영역 (unit deformation region)의 개념을 도입하면서 시작되었으며, Kobayashi,⁽³⁾ Avitzur^(4,5) 등은 축대칭 문제에 대한 새로운 속도장을 제시하여 전후방 복합압출, 중공 단조 등에 적용한 바 있다. 그러나 이들 연구에서는 단지 특정한 가공단계에서의 속도장 및 하중치만을 구할 수 있을 뿐 변형에 따른 재료의 유동상태를 예측할 수 없었다. 그러므로 UBET는 소성가공문제에 대한 최대하중을 예측하는데 주로 사용되었다. 그후 Bramley, Kiuchi 등에 의하여 UBET에 대한 연구가 본격화되었다. Bramley 등⁽⁶⁻⁹⁾은 축대칭 형단조 문제에 대하여 복잡한 형상의 금형을 3각형 또는 4각형 링 요소로 분할할 수 있도록 간략화한 후, 변형단계별로 재료의 유동을 가정하여 단조 하중 및 유동장을 구하였으나 과도한 단순화로 인하여 실제 변형상상과는 차이가 있었다. Kiuchi 등⁽¹⁰⁻¹⁵⁾은 3각형과 4각형 링 요소를 일반화하여 축대칭 복합압출 문제를 해석하였다. 또한, Kichi는 비축대칭 Side-flush를 가진 제품의 단조 공정에서 Side-flush로의 재료의 충전과정을 예측하였으며, 실험으로 확인하였다. 평면변형 문제에 대하여는 Oudin 등^(16,17)이 4각형과 사다리꼴 요소에 대한 동적가공 속도장을 제안하고, 압축 및 압출문제에 적용하였다.

UBET에 의한 소성가공 문제 해석은, 압출등과 같이 피가공재가 주위로부터 구속이 큰 경우, 비교적 적은 변형자유도를 갖는 모델에 의하여 타당한

해석결과를 경제적으로 얻는 것이 가능하지만, 형단조와 같이 피가공재에 많은 자유표면이 포함된 경우에 대하여는 재료의 비정상 유동(non-steady flow)을 예측하는 것이 곤란하다. 그러므로 형단조 가공시 중요한 과제인 바람직한 재료 유동, 완전한 다이 충전과 최소의 재료손실을 위하여는 가공중 재료의 변형양상을 보다 실제에 가깝게 시뮬레이션 할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 UBET를 이용한 프로그램을 개발하여 소성가공 문제에 적용하였으며, 형단조 가공에서 형 내부의 재료의 비정상 유동을 해석할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 매 변형단계에서 요소별 가공경화를 고려하여 자동적으로 요소시스템 (element system)을 재구성함으로써, UBET에 의한 소성가공 문제 해석을 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 축대칭 형단조 문제에 있어서 리브의 높이 대 폭의 비가 1.0, 2.0일 때 UBET 및 탄소성 유한요소법에 의하여 형 내부의 재료 충전 과정을 시뮬레이션하였으며, 단조 하중, 다이 충전도 및 재료의 유동 경향을 분석하여 적절한 유동 모델과 초기 소재의 형상을 구하였다. 모델 재료를 사용한 형단조 모의실험을 수행하여 재료유동 및 변형 단계별 단조 하중분포 등을 구하였으며, 해석결과와 비교 분석하였다. 또한 후방압출(backward extrusion) 및 평두형 펀치에 의한 평판압입(flat punch indentation) 문제를 해석하였다. 후방압출시 모서리부의 라운딩(rounding) 효과가 재료 유동에 미치는 영향을 고려하였으며, 평두형 펀치에 의한 평판압입에서는 상당 소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 탄소성 유한요소법(elastic plastic finite element method)에 의한 결과와 비교하였다.

2. UBET에 의한 재료의 유동해석

단조는 기본적인 금속 성형의 하나로서, 외력을 가하여 재료를 압축하여 재료의 일부 또는 전체 높이를 줄임과 동시에 옆으로 퍼지게 하여 차츰 소요의 형상으로 성형하는 것이다. 재료를 가압 성형함으로써 그 결정조직은 재료의 유동방향을 따라 섬유상 조직이 되어 소위 단류선(folw line)이 생긴다. 이 단류선 방향으로는 인장강도, 연신률, 충격치 등의 기계적 성질이 크게 향상되므로 매우 튼튼한 기계부품을 만들 수 있다. 따라서 단조 가공은

자동차 suspension 부품과 엔진부품 등 기계적 강도가 큰 제품의 제작에 적합한 가공법이라 할 수 있다. 절삭가공의 경우 재료유동이 기계가공에 의하여 재료표면에서 끊어지는 데 반해 단조 가공의 경우 형 분할선, 코너각, 필렛부, 경사각 등을 잘 설계함으로써 재료유동이 형상을 따라 형성되며 제품의 기계적 성질, 피로강도, 내용력, 부식균열을 개선할 수 있다. 또한 마무리 가공을 하지 않는 정밀냉간 단조의 경우 기계가공을 하지 않음으로써 표면상태가 양호하며, 고 정도를 유지할 수 있다. 따라서 제품강도 향상 및 결함 방지 등을 위하여는 재료유동에 관한 연구가 필수적이다.

2.1 UBET(Upper Bound Elemental Technique)

UBET는 전체 소성변형 영역을 4각형과 3각형 등의 단순한 형상의 요소들로 분할하고, 분할한 각 요소들의 조합에 의하여 연립적으로 해석하여 전체로서의 에너지를 최소화하는 방법이다. UBET에 의한 변형 해석에서 피가공재를 요소로 분할하는 경우, 분할된 각 요소의 속도장은 그 경계속도를 이용하여 정식화되며, 경계에 있어서 속도는 다음 조건을 만족하는 동적가속도장을 사용한다.

- (1) 외부 경계에 관한 변위 경계조건
- (2) 요소간의 경계에 있어서 수직속도 연속 조건
- (3) 각 요소에 관한 체적 일정의 조건

이 때 요소의 모든 표면에서 유동을 허락하며, 각 요소는 독립적으로 취급된다. 또한, 요소 경계에 있어서 수직속도 성분들은 각 경계상에서 일정하다고 가정하는 평행속도장(parallel velocity field)을 사용한다. 속도장에 포함된 준독립변수(pseudo-independent parameter) Z_i 에 대하여 전체에너지소비를 $J^* = J^*(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ 을 수치적으로 최소화함으로써 피가공재 전체의 속도장을 결정할 수 있다. 즉, 강소성체의 변형에 관한 모든 동적가속도장 중에서 실제 가공시의 에너지 소비율은 다음의 J^* 를 최소로 하는 것이다.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \tag{1}$$

위 식에서 \dot{W}_i 는 내부 변형 에너지율이며, \dot{W}_s 는 요소와 요소 사이의 전단변형 에너지율, \dot{W}_f 는 다이와 소재사이의 접촉면에서 발생하는 마찰에 의한 에너지 소비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \tag{2}$$

$$\dot{W}_s = k \int_{\Gamma_s} |\Delta U_s| dS \tag{3}$$

$$\dot{W}_f = m k \int_{\Gamma_f} |\Delta U_f| dS \tag{4}$$

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

위 식들에서 $\bar{\sigma}$ 는 상당응력(equivalent stress)이며, $\dot{\epsilon}$ 는 상당변형률속도(equivalent strain rate)이다. $|\Delta U_s|$ 는 요소사이의 전단면 Γ_s 에서의 속도 불연속량이며, $|\Delta U_f|$ 는 소재와 다이 접촉면 Γ_f 에서의 속도 불연속량이다. m 은 마찰비정수(friction factor)이며, k 는 전단항복응력(shear yield stress)이다.

본 연구에서는 직접 탐색법(direct search method)의 일종인 flexible polyhedron search method에 의하여 J^* 를 최소화하였으며, 하중을 구하기 위하여는 다음식을 적용하였다.

$$p = \frac{J^*}{U_0} \tag{6}$$

여기서, p 는 실제 하중의 상계해이고, U_0 는 하중을 가하는 펀치의 속도이다.

격자변형(grid distortion)에 대하여는, 변형 전의 소재에 미리 격자(grid)를 설정하고, 각 변형 단계에서 격자점이 포함된 요소의 속도장으로 부터 격자점의 속도를 구하며, 이를 이용하여 새로운 위치로 좌표를 수정(update)함으로써 소재의 변형 양상을 알 수 있다.

또한, 다음과 같은 방법으로 요소별 가공경화를 고려한다.

$$\bar{\epsilon}_{t+\Delta t} = \bar{\epsilon}_t + \Delta t \cdot \dot{\bar{\epsilon}}_t \tag{7}$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}_t = \frac{\dot{W}_t}{V_t \cdot \bar{\sigma}_t} \tag{8}$$

여기서, $\bar{\epsilon}_t$ 와 $\bar{\epsilon}_{t+\Delta t}$ 는 각각 시간 t 와 $t+\Delta t$ 에서의 상당변형률이며, V_t 는 시간 t 에서의 요소의 체적을 나타낸다. 위 식을 각각의 요소에 적용함으로써 요소별 가공경화를 고려할 수 있다.

2.2 요소 재구성

UBET에 의한 변형 해석에서, 피가공재를 요소로 분할하는 경우, 요소의 형상으로는 여러가지가 있을 수 있지만, 본 연구에서는 축대칭 문제 해석에서는 4각형 및 3각형 링 요소를, 평면변형 문제에서는 4각형과 사다리꼴 요소를 사용하였다^(10,16)

대부분의 소성가공 문제에서 초기 시편은 단순한 형상으로 금형내부를 부분적으로 채우고 있다. 재

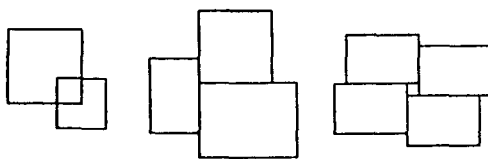
료의 충만과정을 시뮬레이션하기 위하여는 전체 과정을 여러 단계로 나누고, 각 변형단계에서 전체 에너지를 최소화 하는 동적가속속도장을 이용하여 각 요소의 미소시간 증분 Δt 이후의 좌표를 결정한다. UBET 해석시 가공이 진행함에 따라 인접 요소들 사이의 접선속도 불연속(tangential velocity discontinuity)으로 인하여 미끄러짐이 발생하게 되며, 요소의 크기 및 경계조건이 바뀌게 된다. 그러므로 다음 단계의 해석을 위하여는 매 변형 단계에서 요소 시스템을 재구성해야 한다. 본 연구에서는 요소 재구성 방안(element regeneration scheme)을 개발하여 전체 공정을 자동적으로 시뮬레이션할 수 있도록 하였다.

일반적으로 요소 시스템은 다음 조건들을 만족하도록 재구성된다.

(1) 변형 영역 및 다이 경계가 요소 시스템의 외곽선과 일치한다.

(2) 인접요소들 사이에 침투(penetration), 엇갈림(mismatching) 및 간극(gap)이 생기지 않도록 한다. (Fig. 2)

위 조건은 다이 경계와 변형 후 자유표면을 갖는 요소들의 외각선을 수평, 수직으로 투사함으로써 얻어진다. 그러나 단순한 형상을 제외하고는 재구성된 요소 시스템이 너무 많은 요소를 갖게되므로 위 조건을 만족하도록 재구성된 요소 시스템에서



(a) Penetration (b) Mismatching (c) Gap

Fig. 2 Deformation mode of UBET elements



(a) Before regeneration (b) After regeneration

Fig. 3 Element regeneration

요소들의 교차점이 매우 가까운 경우 (최종 제품 크기의 $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$ 정도), 그 교차점들을 하나로 하여 요소 시스템을 수정한다. 이때, 경계의 수정으로 야기되는 체적변화를 보정하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 자유표면을 갖는 요소들의 요소 경계에서의 수직속도에 비례하도록 전체 체적 변화량을 배분하여 보정하였다. 또한, 4각형 요소만을 사용할 경우 요소들 사이의 속도 불연속으로 인하여 자유표면은 계단모양으로 복잡하게 형성되므로 요소 재구성에 따른 분할 요소의 수가 가공이 진행됨에 따라 점점 많아지게 된다. 이에 소재와 다이의 경사진 부분사이에 3각형 요소를 사용하여 요소 증가를 방지하였다. Fig. 3은 상기한 요소 재구성 방안을 형단조 가공 해석에 적용한 것으로서, (a)는 단계 진행 직후의 요소의 변형 양상이며, (b)는 다음 단계 해석을 위한 재구성된 요소 시스템을 나타낸다.

다음 단계 해석을 위하여는 매 변형 단계에서의 자동요소분할 뿐만 아니라 재구성된 각 요소의 상당 변형률을 계산해야 한다. 재구성된 요소의 상당 변형률은 그 요소에 포함된 재구성 이전의 요소들의 상당 변형률을 체적비로 가중평균(weighted average)하여 다음 식으로 계산하였다.

$$\bar{\epsilon}'_{t+\Delta t} = \frac{\sum \bar{\epsilon}'_{t+\Delta t}^{(n)} \cdot V^{(n)}}{\sum V^{(n)}} \quad (9)$$

여기서 $\bar{\epsilon}'_{t+\Delta t}$ 는 재구성된 요소의 상당 변형률이며, $\bar{\epsilon}'_{t+\Delta t}^{(n)}$ 는 이 요소내에 포함되어 있거나 일부분을 차지하는 재구성 전 요소들의 상당 변형률로서 식(7)에 의하여 계산된 값이다. $V^{(n)}$ 은 재구성 전 요소들의 재구성된 요소 내에서 차지하는 체적값을 나타낸다.

또한, 요소별 가공경화현상을 고려함으로써 각각의 요소는 서로 다른 상당응력값을 갖게 된다. 그러므로 요소 경계면에서의 전단 항복응력치는 인접 요소들의 상당 응력을 산술평균하여 계산하였다.

$$k = \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (11)$$

여기서, σ_a 는 인접요소에 대한 상당응력의 평균값이며, 첨자 1, 2는 인접하고 있는 두 요소를 나타낸다. 이 식으로 계산된 k 를 식(3)에 대입함으로써 요소별 가공경화를 고려한 전단 에너지를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 UBET에 의한 소성 가공해석시 재료의 층단과정을 좀 더 실제에 가깝게 시뮬레이션할 수 있는 유동모델을 제시하였다. 이것은 다음과 같은 특성을 갖는다.

(1) 소재와 다이의 경사진 부분과의 사이에 3각형 요소를 사용하되 이 3각형 요소의 경사면 (Fig. 4의 AC)을 자유 표면으로 하였다. 이렇게 함으로써 변형 초기에 소재가 다이와 분리되는 현상이 나타나게 되나 변형이 진행됨에 따라 이 요소가 Fig. 4의 ac와 같이 다이 경계면을 침입하는 경우가 생기게 되며, 이 때부터 3각형 요소의 변 AC가 다이 경사면에 접촉하여 진행하도록 경계조건을 부여하여 다시 유동장을 구한후 진행한다.

(2) 형단조 해석에서 플래쉬부에서의 재료의 유동을 제어하기 위하여 플래쉬부로 유동하는 요소를 재분할하였다. Fig. 5에서 요소 C는 단계 진행 후 다이를 침입하게 된다. 이를 방지하기 위하여 요소 C를 A, B로 분할하고 bc 면상의 수직속도를 다이 속도와 같도록 하였으며, 이 때 단계크기(step size)는 요소 B가 플래쉬부로 완전히 빠져 나갈 때 까지만 진행하도록 하였다.

요소의 재구성과 유동형태의 결정방법이 프로그램화됨으로써 소재의 최초 상태를 결정하면 최종 단계까지 전과정이 자동적으로 수행되며, 이를 기

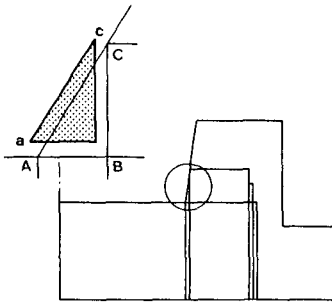


Fig. 4 Penetration of triangular ring element at die boundary

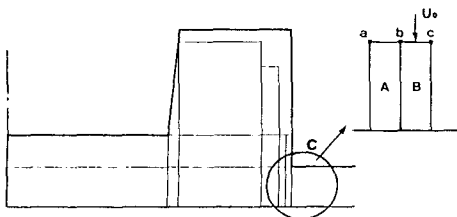


Fig. 5 Element regeneration at flash

초로 하여 형단조 가공에 대한 예비 가공형 설계를 본 프로그램에 의하여 가능하도록 하였다. 또한 경계조건을 변경하면 다른 형태의 소성가공에도 상기 프로그램이 적용될 수 있다.

3. 모델실험을 이용한 재료유동

3.1 플라스틱시 시편 제작

실제 소성가공에 대한 모의실험 재료로서는 플라스틱시, 왁스(wax), 납, 알루미늄 등이 있다. 특히 플라스틱시는 Table 1에 비교하였듯이 고온(약 1000°C)에서의 강(steel)과 비슷한 물성치를 나타내며, 유동경향이 유사함으로 모의실험 재료로 유용하게 사용되어 왔다.⁽¹⁸⁻²²⁾

플라스틱시의 사용은 다음과 같은 잇점이 있다.

- (1) 저렴한 비용, 무독성 및 손쉬운 사용이 가능하고,
- (2) 공구 및 실험장치의 비용이 저렴하며,
- (3) 실온에서 작은 하중으로 큰 변형이 가능하며,
- (4) 여러가지 색으로 시편을 제작할 수 있으므로 재료의 유동을 쉽게 관찰할 수 있다.

일반적으로 재료의 유동을 관찰하기 위한 방법으로는, (1) 시편의 표면에 잉크등을 이용하여 격자 무늬를 입히는 방법, (2) 여러가지 색의 얇은 판이나 막대를 교대로 적층하는 방법 등이 있다.

본 실험에서는 소재 내부의 유동양상을 관찰하기 위하여 흑, 백 2가지 색의 플라스틱시로부터 얇은 판을 만들어 교대로 적층하여 시편을 제작하였다. 시편 제작시 플라스틱시의 성질에 영향을 주는 인자들에 대하여 많은 주의가 필요하다. 즉, 플라스틱시는 Table 2에 보였듯이 오일(oil)성분 때문에 온도에 상당히 민감하다.⁽¹⁹⁾ 그러므로 실험실의 온도를 일정하게 유지시켜야 한다. 실험조건을 일정하게 유지하기 힘든 경우는 될 수 있는 한 짧은

Table 1 Mechanical properties of plasticine at 20°C and steel at 1,000°C⁽¹⁹⁾

Material Properties	Steel	Plasticine
E(kgf/m ²)	10,545×10 ⁶	0.70×10 ⁶
σ ₀ /E	0.0006	0.02
n	0.25	0.20

n; strain hardening exponent

Table 2 Chemical composition of white plasticine(Harbutt, England)⁽¹⁹⁾

Vaporable Material 52.3%	Ash Material 47.7%
Grease, etc.	SiO ₂ 10.6%
	Fe ₂ O ₃ ·
	Al ₂ O ₃ 19.4
	CaO 58.4
	MgO 0.4
	Na ₂ O 0.5
	TiO ₂ 10.7

기간에 일련의 실험을 행하는 것이 바람직하다. 또한, 플라스틱션은 밀도가 변할 경우 항복응력, 마찰조건 등 재료의 물성치가 변함으로 시편 내의 기포를 완전히 제거해야 한다. 본 실험에서는 1시간 정도 플라스틱션을 다진 후 압연하여 적층용 판을 제작하였으며, 판의 적층시 판과 판 사이의 기포를 제거하기 위하여 적층 후 형틀내에서 시편에 약간의 압축력을 가하였다. 일반적으로 판 사이의 결속을 강화하기 위하여 등유등을 분사하기도 한다. 이렇게 제작된 플라스틱션 시편은 제작시 발생한 응력분포와 온도구배를 소산시키기 위하여 2~3일간 대기 온도에서 방치한 후 실험을 행한다.

3.2 실험장치 및 재료시험

2 ton 용량의 플라스틱션 가공 기계가 실험에 사용되었다. 플라스틱션 가공 기계는 하중 측정을 위한 load cell과 수직변위 측정을 위한 변위계가 상부에 설치되어 있고, 변위계와 하중계로 구성된 transducer indicator가 X-Y recorder에 연결되어 변위-하중관계 곡선을 얻도록 되어있다. Fig. 6은 실험장치를 나타낸 것으로 다이는 Al2024, 다이 용기의 재질은 SS41을 사용한 것이다.

재료의 기계적 성질을 나타내는 응력-변형률 관계를 알기 위하여 실험에 사용된 백색 플라스틱션 (harbutt, england)에 대한 압축시험을 수행하였으며, 측정결과로부터 최소자승법 (least square method)을 이용하여 다음의 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 0.1059 \bar{\epsilon}^{0.2434} \text{ (Mpa)} \quad (12)$$

플라스틱션 실험에 사용된 윤활제로는 grease, powder, vaseline 등이 있으나, 본 실험에서는 형

단조 실험을 수행한 후 다이로부터 소재의 분리가 용이하고, 사용한 소재를 재활용할 경우 윤활제의 제거가 비교적 간단한 powder (Johnson's body powder)를 사용하였다. 소재의 윤활조건을 측정하기 위하여 링 압축시험 (ring compression test)을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 외경 : 내경 : 높이를 6 : 3 : 2로 한 것으로서, 실제 단조실험과 동일한 윤활 조건에 대하여 마찰비정수 $m=0.5$ 로 측정되었다. 여기서 마찰계수는 변형중 그 값이 일정하다고 가정한다.

4. 해석모델 및 결과

4.1 해석모델

축대칭 형단조 가공 해석시 전형적인 리브-웨브 형 단면을 해석 대상으로 하여 리브의 높이 대 폭의 비 (H/W)가 1.0, 2.0인 경우에 대한 재료의 충만과정을 시뮬레이션하였다. Fig. 7은 H/W=1.0인 경우에 대한 해석 및 실험에 사용된 금형과 소재를 나타낸다.

또한, 국부적으로 극심한 변형을 포함하는 소성 가공 문제에서 성공적인 성형을 위한 가장 중요한 인자는 모서리 반경이다. 모서리 반경의 크기가 재료유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 축대칭 후방압출을 해석대상으로 하였다. Fig. 8은 금형, 펀치 및 소재를 나타낸 것이다. 계산의 간편함을 위하여 재료는 Mises 재료로 가정하였으며, 가공 경화가 없으며, 항복응력 $\sigma_0=1$, 마찰비정수 $m=$

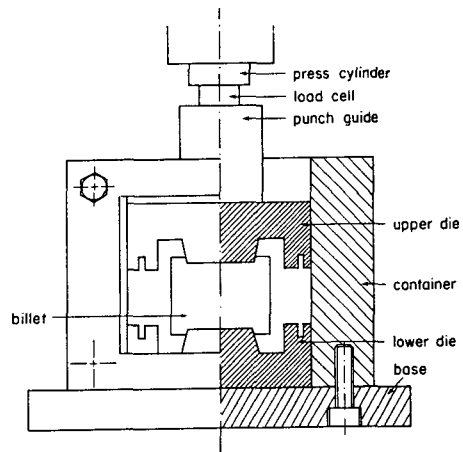


Fig. 6 Schematic diagram of experimental equipment

0.05로 하였다.

평면변형 문제에 대하여는 평두형 펀치에 의한 평판압입 문제를 해석하였다. 탄소성 유한요소법에 의한 해석결과와 비교, 분석하여 UBET에 의한 소성가공 문제 해석의 신뢰도 및 유용성을 검증하려 한다. Fig. 9는 해석에 사용된 펀치 및 소재의 크기, 초기 요소분할을 나타낸다.

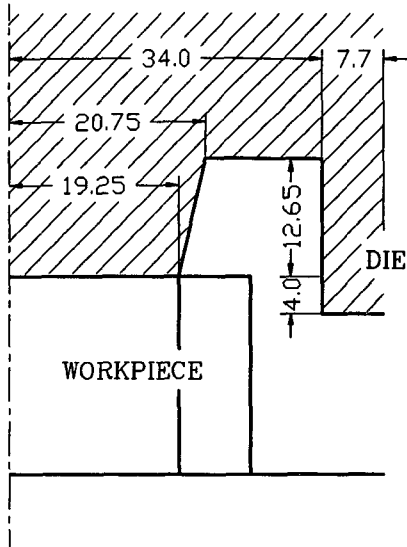


Fig. 7 Dimensions of die and workpiece in closed-die forging($H/W=1.0$)

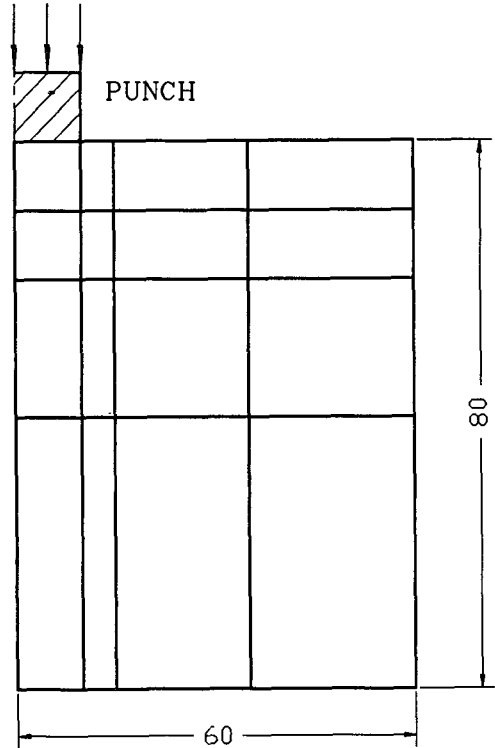


Fig. 9 Dimensions and initial element system in flat punch indentation

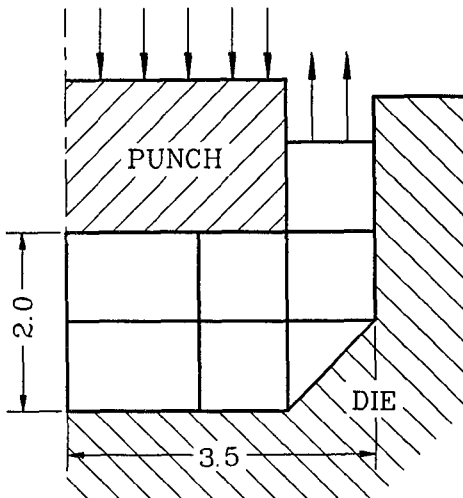


Fig. 8 Dimensions of die, punch and workpiece in backward extrusion

4.2 결과 및 토론

리브의 높이 대 폭의 비가 $1.0(H/W=1.0)$ 인 완성 가공형 금형에 대하여, 최종 제품 성형에 합당한 초기 소재의 형상을 구하기 위하여 3가지 종류의 원통형 시편을 사용하였다. Fig. 10은 같은 체

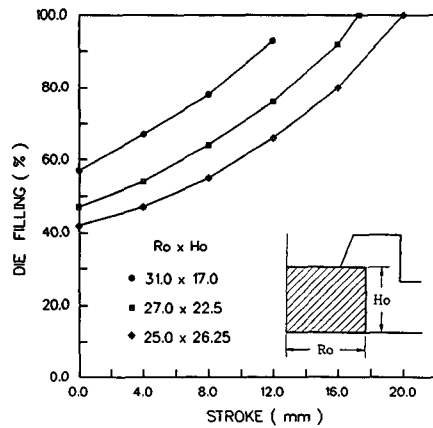


Fig. 10 Effect of initial billet geometry on degree of die filling

적의 각기 다른 반경 X 높이 ($R_0 \times H_0$)에 대하여 단조 행정에 따른 다이 충만도를 비교한 것으로 다음의 결과를 얻었다.

(1) 31.0×17.0의 경우 완성까지의 행정이 짧으나 최종 단계에서 소재가 다이 내부를 완전히 충만하지 못했음을 알 수 있다. 그러므로 이것으로부터는 원하는 제품을 만들 수 없다.

(2) 27.0×22.5의 경우 소재가 다이를 완전히 충만하였으며, 완성까지의 행정도 적절하여 불필요한 에너지 소모가 없었다.

(3) 25.0×26.25의 경우 소재가 다이 내부에 완전히 충만되었으나 최종 과정까지의 행정이 길고, 이로 인하여 에너지 및 하중이 불필요하게 소모되어 비효율적이다.

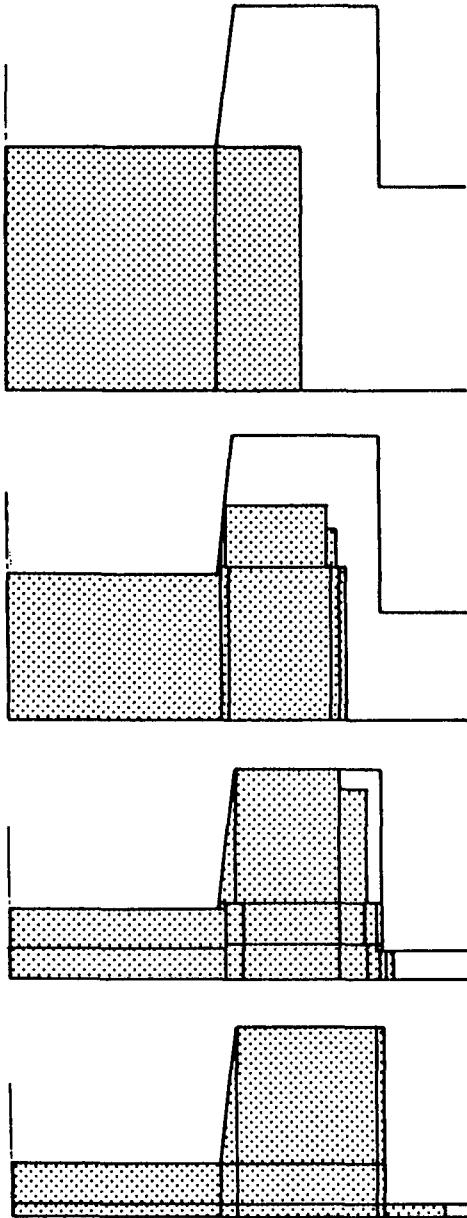


Fig. 11 Deformation of element system in cavity filling process(H/W=1.0)

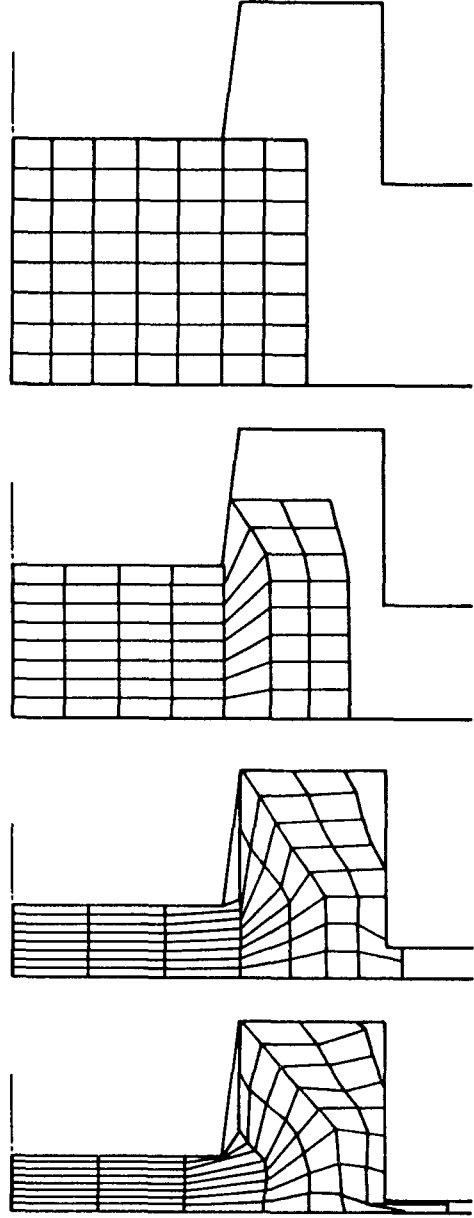


Fig. 12 Grid distortion pattern in cavity filling process (H/W=1.0)

Fig. 11과 Fig. 12는 $H/W=1.0$ 에 대한 재료의 층만 과정시 요소 시스템 및 격자변형 양상을 나타낸 것으로 최종 단계에서 다이 내부를 완전히 충전하였다. 격자변형 양상은 변형전의 소재에 미리 격자를 설정하고, 각 변형단계에서 격자점이 포함된 요소의 속도장으로부터 격자점의 속도를 구하며, 이를 이용하여 새로운 위치로 좌표를 수정함으로써 알 수 있다. 해석에서 단계 크기는 전체 행정의 2~3% 정도로 하여 약 35~40 단계가 필요하였다. 매 변형단계에서 속도장의 최적화에 소요된 반복수행시간은 준 독립변수의 수에 따라서 상당한 차이가 있었는데, VAX-750을 사용하는 경우, 초기에 준 독립변수가 5개 이하일 때는 수 초에서 십수 초, 5개 이상일 때는 수십 초 정도가 소요되었다. 최종 단계까지의 총 계산시간이 약 30분으로 유한요소 해석에 비하여 현저하게 계산 시간이 감소함을 확인할 수 있었다.

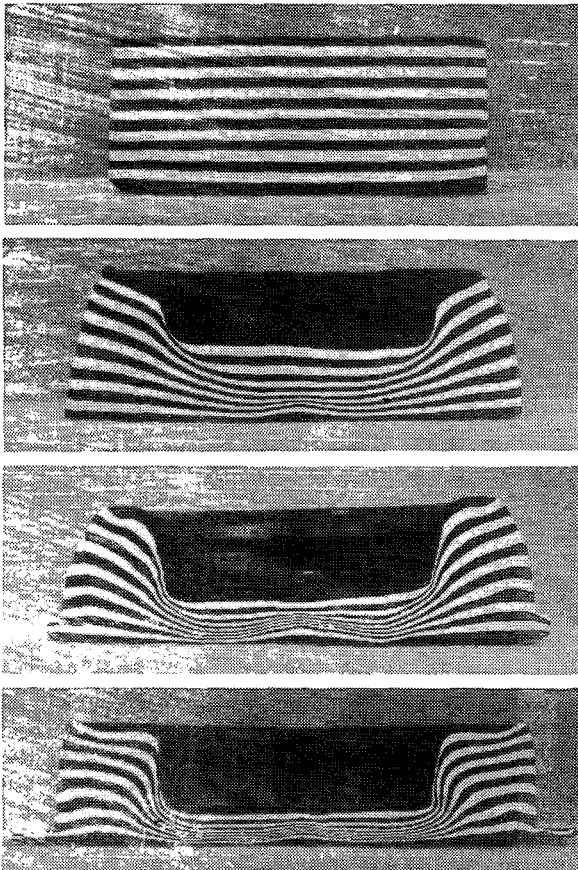


Fig. 13 Material flow pattern by experiment with multi-layered plasticine

Fig. 13은 플라스틱션을 흑, 백 2가지 색으로 적층하여 실험한 결과로서 변형단계에 따른 재료의 유동 양상을 나타낸다. Fig. 12에 나타난 시뮬레이션 결과와 유사한 변형 양상을 보여준다.

Fig. 14는 높이 감소율에 대한 단조 하중분포로서 해석과 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 높이 감소율 60% 정도일 때부터 하중이 급격히 증가하는데, 이는 이때부터 플래쉬(flash)가 형성되기 때문이다. 플래쉬부의 형성은 재료의 유동저항을 증가시키기 때문에 재료가 금형 속을 완전히 채울 만큼 큰 압력이 생긴다. 그러나 플래쉬 두께가 너무 얇게되면 단조 하중이 매우 커져서 다이 마멸과 파괴의 원인이 되기도 한다. 이상적인 것은 단조에 필요한 최소의 플래쉬로서, 재료손실과 최대 단조 하중을 고려하여 최적치를 구해야 한다.

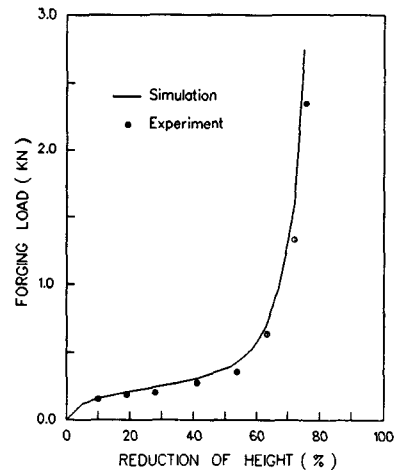


Fig. 14 Variation of forging loads with respect to reduction of height ($H/W=1.0$)

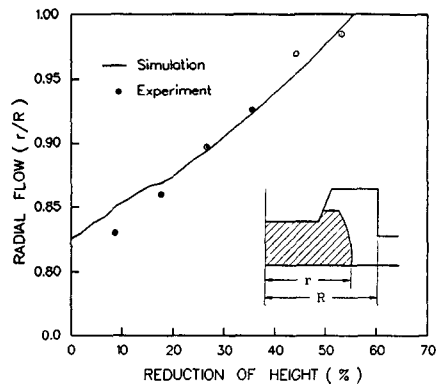


Fig. 15 Relationship between radial flow (r/R) and reduction of height

Fig. 15와 Fig. 16은 높이 감소율에 대한 재료의 폭 방향의 유동량과 높이방향의 유동량의 변화를 나타낸 것이다. 해석과 실험의 약간의 차이는 근본적으로 속도장과 마찰에 대한 가정, 즉 요소분할시 요소의 크기 및 단순화된 속도장과 변형 중 마찰이 일정하게 유지된다는 가정 등이 실제현상과 일치하지 않는데서 기인한다.

Fig. 17은 직각다이(square die)를 통한 후방압출 해석시 모서리부를 라운딩(rounding)하지 않은 경우와 한 경우에 대한 요소시스템 및 속도장의 분포를 나타낸 것이며, Table 3은 2가지 모델에 대한 하중, 내부 변형에너지율, 전단에너지율, 마찰에너지율을 비교한 것이다. (a)의 모델 1에서는 예리한 모서리부에서 국부적으로 극심한 변형이 발생하므로 변형을 위하여는 요소의 내부 변형 보다는 요소들 사이의 전단에 의한 변형이 현저함을 알 수 있다. 모델 2가 모델 1보다 내부 변형에너지율은 크고, 전단에너지율은 작으며, 전체에너지율 및 하

중값이 상대적으로 작게 나타났다.

Fig. 18은 평두형 펀치에 의한 평판압입 문제를 해석한 것으로 펀치변위 2.2 mm일 때의 상당 소성

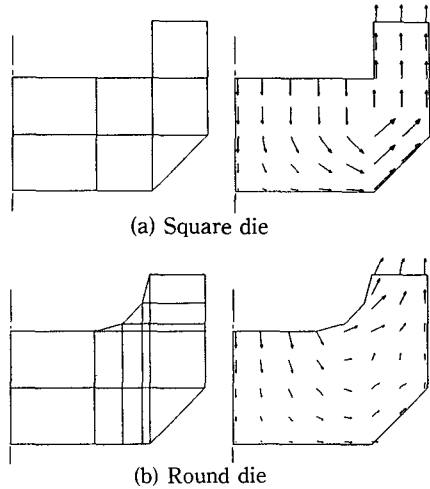


Fig. 17 Effect of corner rounding on material flow in backward extrusion

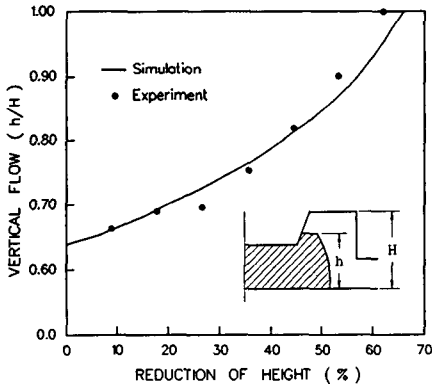


Fig. 16 Relationship between vertical flow (h/H) and reduction of height

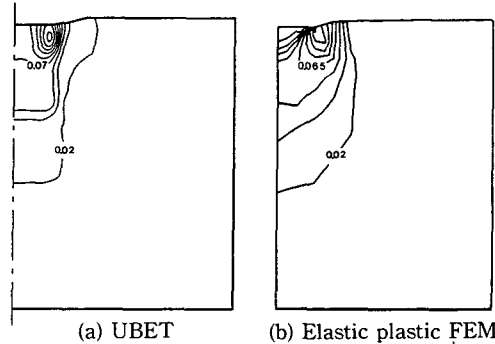


Fig. 18 Effective plastic strain distribution at punch displacement 2.2 mm in flat punch indentation

Table 3 Comparison of energy dissipation rate and load between square die and round die in backward extrusion

	Square Die	Round Die
Internal Power (N mm/s)	192.619	353.799
Shear Power	541.215	276.732
Contact Power	17.608	15.175
Total Power	751.442	645.706
Total Load (N)	751.442	645.706
Backward Velocity (mm/s)	1.0417	1.0417

* Punch Velocity $U_0 = -1.0$ mm/s, Friction constant $m = 0.05$, Mises Material $\sigma_0 = 1.0$

변형률 분포를 탄소성 유한요소법에 의한 결과⁽²³⁾와 비교한 것으로, 펀치 끝단에서 최대 소성변형률이 발생하였으며, 강제역의 경계는 펀치 주위에 wedge형으로 나타났다. 이는 미끄럼 선장이론에 의한 결과와도 유사한 분포를 보인다.

$H/W=1.0$ 인 경우 3가지 종류의 원통형 시편에 대한 충전 과정을 시뮬레이션하여 최종 제품에 합당한 초기 소재의 형상을 구할 수 있었으나, Fig. 19에 나타난 것과 같이 $H/W=2.0$ 인 경우는 단순한 원통모양의 초기 시편으로는 다이 내부를 완전히 충전하지 못하였다. 그러므로 다이 충만을 위하여는 하나 혹은 그 이상의 예비 성형 단계가 필요하다. Fig. 20은 $H/W=2.0$ 인 경우에 대하여 설계

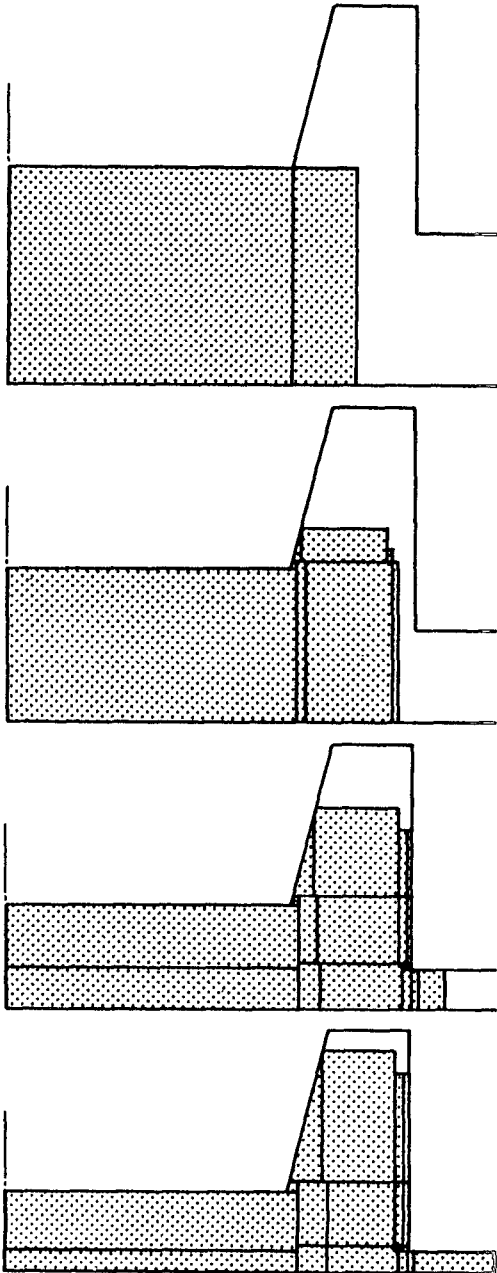


Fig. 19 Cavity filling process ($H/W=2.0$) with solid cylinder

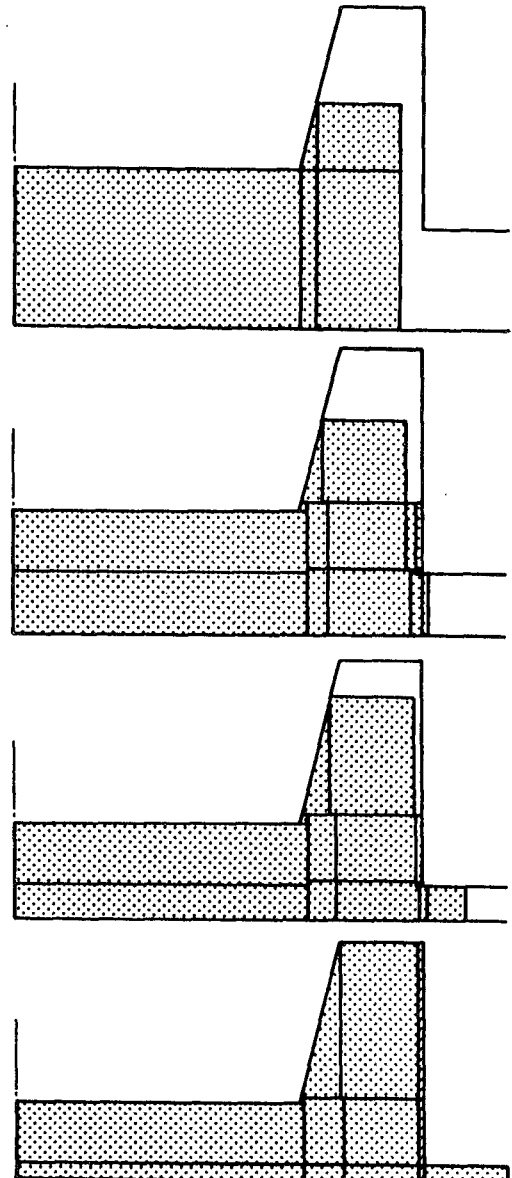


Fig. 20 Cavity filling process ($H/W=2.0$) with designed preform

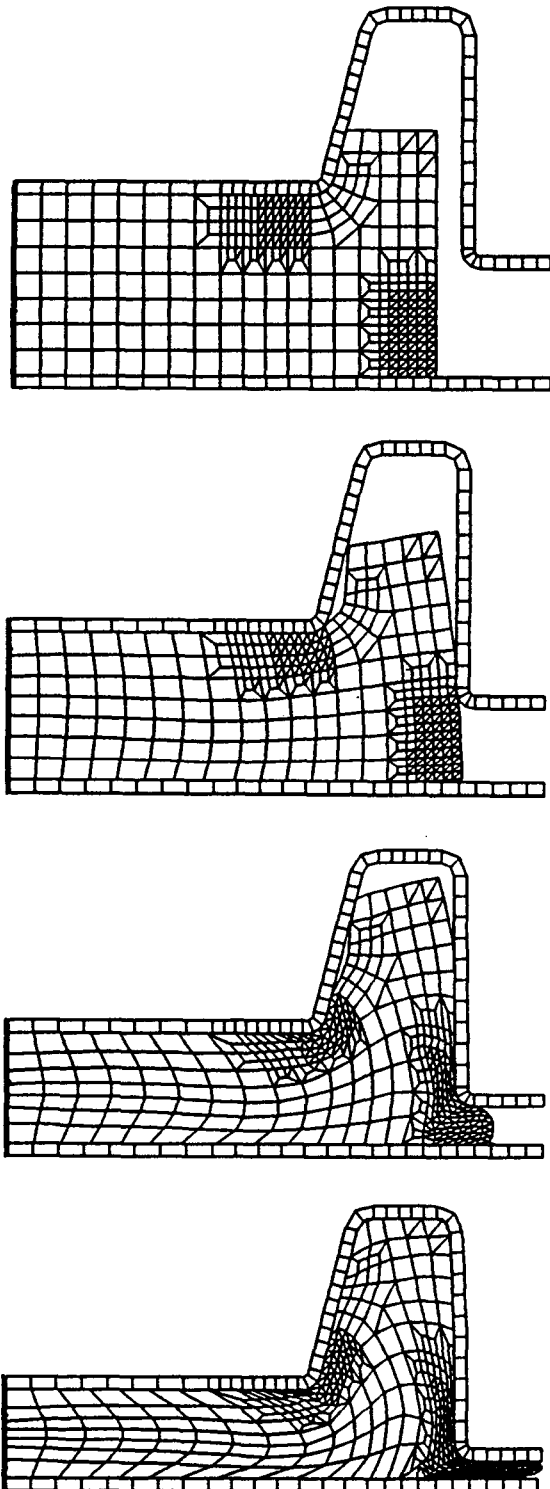


Fig. 21 Cavity filling process (H/W=2.0) by elastic plastic FEM

된 예비 가공형^(24,25)으로부터의 충만 과정을 나타낸 것으로 최종단계에서 다이 내부가 완전히 충만되었다. 그러나 UBET를 이용한 역추적법에 의하여 설계된 예비가공형은 그 형상이 단순하여 실용적이나, 실제 형단조에 적용하기 위하여는 경사각 (draft angle), 모서리반경 (corner radii), 필렛반경 (fillet radii) 등의 단조 성형성에 미치는 영향을 고려해야 한다. Fig. 21은 탄소성 유한요소 해석 프로그램인 NIKE2D를 사용한 재료의 충만 과정이다. 금형 및 소재를 실제 실험과 같도록 모서리부를 부드럽게한 것으로, 최종 단계에서 금형 내부가 완전히 충만되었음을 알 수 있다. 탄소성 유한요소 해석시 소재는 등방성 재료로 가정하였으며, 등방경화, 연관유동법칙 (associated flow rule)을 따르며, 변형률 속도의 영향은 무시하였다. 비선형 방정식의 해법은 quasi-Newton법 중의 BFGS법 (broyden-fletcher-goldfarb-shanno method)을 사용하였다. 요소분할은 4절점 축대칭 연속체 요소 (4 node axisymmetric solid element)로 모델링하였으며, 변형이 극심할 것으로 예상되는 모서리부와 플래쉬부는 효율적인 시뮬레이션을 위하여, 3절점 요소를 사용하여 세분화하였다. Fig. 22는 플라스틱 실험의 결과로서 변형에 따른 재료의 유동

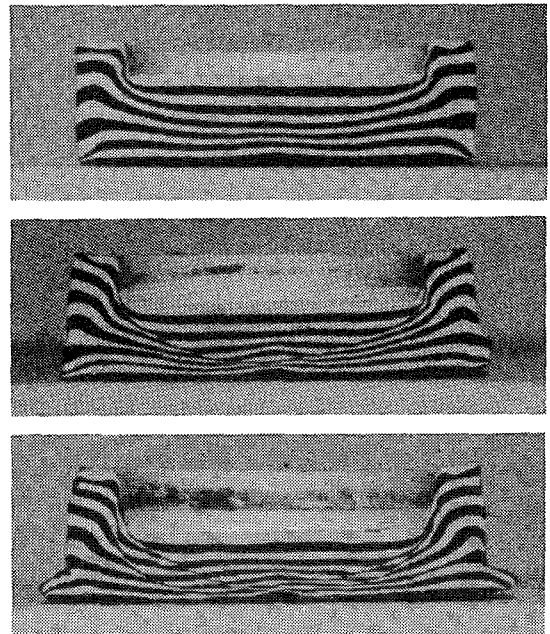


Fig. 22 Material flow pattern (H/W=2.0) by experiment with multi-layered plasticine

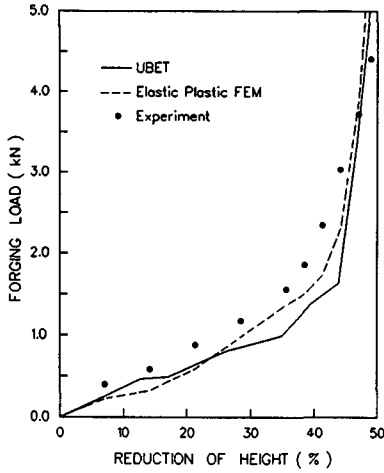
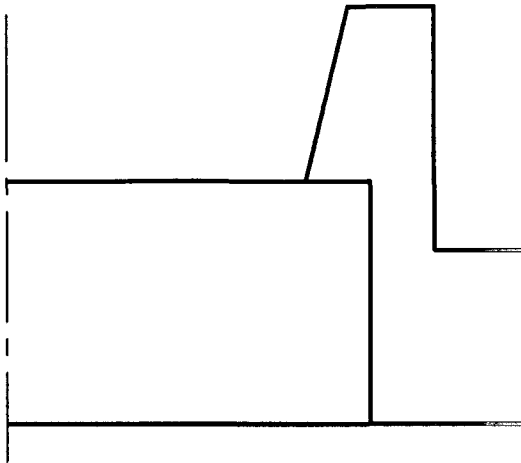
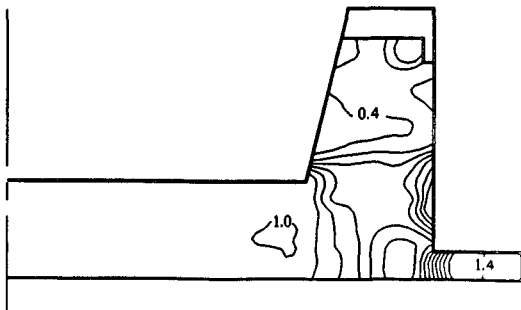


Fig. 23 Variation of forging loads with respect to reduction of height (H/W=2.0)

양상을 나타낸다. 실험 및 해석결과, 설계된 예비가공형은 최종 단계에서 완성 가공형 금형 내부를 완전히 충만함을 알 수 있다. Fig. 23은 높이 감소율에 대한 단조 하중분포를 나타낸 것으로, UBET와 탄소성 유한요소법으로부터 얻은 결과 및 실험결과를 비교한 것이다. 실험치가 해석치보다 크게 된 이유는, 해석에서는 예비가공형 성형시에 발생한 가공경화를 정확하게 고려하지 못한 데에 있다. 또한, 다이 충만을 위하여 설계된 예비가공형이 최종 제품의 변형률 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 초기 소재의 형상에 따른 상당 변형률분포를 비교하였다. Fig. 24는 단순한 원통 모양의 초기 소재에 의한 다이 충만 과정시 최종 단계에서의 상당변형률 분포이다. 최종 단계에서 다이 내부를 완전히 충만하지 못하였을 뿐만 아니라 모서리부 및 플래쉬부에서 변형률의 구배 (gradient)가 상당히 크게 나타났다. Fig. 25는 설

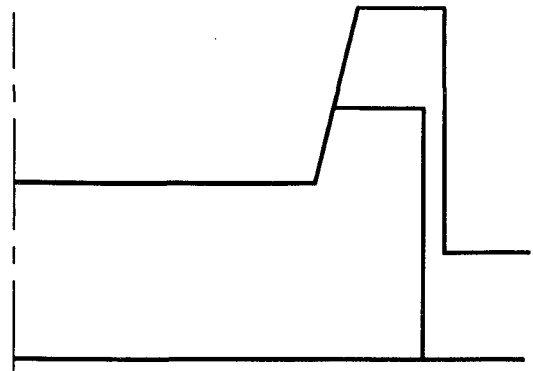


(a) Initial die-workpiece (solid cylinder)

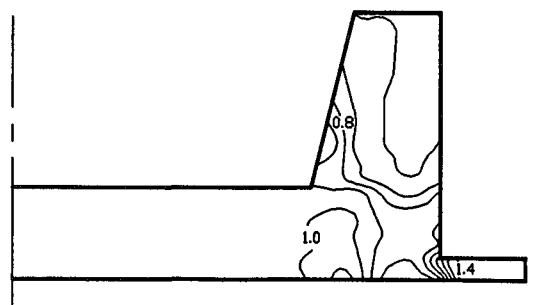


(b) Equivalent strain distribution

Fig. 24 Initial die-workpiece system (solid cylinder) and equivalent strain distribution of final product



(a) Initial die-workpiece (preform)



(b) Equivalent strain distribution

Fig. 25 Initial die-workpiece system (designed preform) and equivalent strain distribution of final product

제된 예비가공형에 의한 최종 제품의 상당변형을 분포를 나타낸 것이다. 상대적으로 변형률의 크기는 증가하였으나, 전체적으로 변형률 분포의 균일성이 뚜렷하게 향상되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 소성가공시 재료유동 해석을 위한 UBET 프로그램을 개발하여 형단조 가공 해석에 적용하였으며, 모델재료를 사용한 실험을 수행하였다. 해석 및 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 축대칭 및 평면변형 문제를 일반적으로 해석할 수 있는 UBET 프로그램을 개발하였다. 가공경화를 고려한 요소 재구성 방안을 확립하여 매 변형 단계에서 자동적으로 요소 시스템을 재구성함으로써 소성가공 문제를 UBET에 의하여 효율적으로 해석할 수 있도록 하였다.

(2) 플라스틱을 모델재료로 사용하여 형단조시 재료유동 양상을 예측하였으며, 이를 해석결과와 비교, 분석하여 유용한 결과를 얻었다.

(3) 리브의 높이 대 폭의 비가 1.0, 2.0인 리브-웹형 (rib-web type) 단면의 형단조시 형 내부재료의 충만 과정을 UBET 및 탄소성 유한 요소법에 의하여 시뮬레이션 하였다. 리브-웹형은 단조 공정 중 재료의 유동을 분석할 수 있는 좋은 예로서, 원통형 초기 시편의 반경과 높이의 비에 따른 다이 충만도를 해석하여 최종 제품의 성형에 합당한 초기 소재의 형상을 구하여 이를 예비 가공형 설계의 기초로 하였다. 또한 변형 단계별로 하중과 변형양상, 폭 방향 및 높이 방향으로의 재료 유동을 실험 결과와 비교한 결과, 해석과 실험의 양호한 일치를 확인하였다. 그러므로 단조 공정을 개선하는 데 있어서 직접 금형을 제작, 실험하지 않고서도 개선의 타당성을 예측할 수 있을 것이다.

(4) 국부적으로 극심한 변형을 포함하는 모서리부 반경이 재료 유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 축대칭 후방압출 문제를 해석하였다. 2가지 모델에 대한 속도장의 분포 및 에너지값을 비교, 분석하였다. 평두형 펀치에 의한 평판압입 문제를 해석하여 상당 소성변형을 분포를 알아보았다. 탄소성 유한요소법에 의한 해석결과와 대체로 일치하는 양상을 나타내었으며, 미끄럼 선장이론과도 유

사한 분포를 보였다.

참고문헌

- (1) Kudo, H., 1960 "An Upper Bound Approach to Plane-Strain Forging and Extrusion- I, II," Int. J. Mech. Sci., Vol.1, pp. 57~83/pp. 229~252.
- (2) Kudo, H. 1960, 1961, "Some Analytical and Experimental Studies of Axisymmetric Cold Forging and Extrusion- I, II," Int. J. Mech. Sci., Vol.2, pp. 102~127, Vol.3, pp. 91~117.
- (3) Kobayashi, S., 1964, "Upper Bound Solutions of Axisymmetric Forming Problems- I, II," J. Eng. Ind. Trans. ASME, Vol.86, pp. 122-126/pp. 326~332.
- (4) Avitzur, B., Han, W.C. and Mori, M. 1976, "Analysis of Combined Backward-Forward Extrusion," J. Eng. Ind., Trans. ASME, No.75. Prod-C, pp. 438~445.
- (5) Kudo, H., Avitzur, B. and Yoshikai, T., 1980, "Cold Forging of Hollow Cylindrical Components Having an Intermediate Flange-UBET Analysis and Experiment," Annals of the CIRP., Vol.29, No.1, pp. 129~133.
- (6) Cramphorn, A.S and Bramley, A.N., 1977 "Computer Aided Forging Design with UBET," Proc. 18th Int. MTDR Conf., pp. 717~724.
- (7) Osman, F.H. and Bramley A.N., 1982, "An Incremental Analytical Tnalytical Technique for Forging and Extrusion of Metals," Int. Conf. on Num. Methods in Industrial Forming Processes, Swansea, U.K., pp. 333~342.
- (8) Osman, F.H. and Bramley, A., N, 1984, "Forging and Preform Design Using UBET," Advanced Tech. of Plasticity, Vol.1, pp. 563~568.
- (9) Bramley, A.N., 1987, "Computer Aided Forging Design," Annals of the CIRP, Vol.36/1, pp. 135~138.
- (10) Kiuchi, M. and Murata, Y., 1981 "Study on Application of UBET (Upper Bound Elemental Technique) 1st Report-Simulation of Axisymmetric Metal Forming Process," J. of JSTP, Vol. 22, No.244, pp. 495~502. (in Japanese)
- (11) Kiuchi, M. and Murata, Y., 1981 "Study on

- Application of UBET(Upper Bound Elemental Technique) 2nd Report-Simulation of Contact Pressure Distribution on Tool Surface," J. of JSTP, Vol.22, No.246, pp. 689~696 (in Japanese).
- (12) Kiuchi,M. and Shigeta.S., 1981, "Application of Upper Bound Elemental Technique(UBET) to Asymmetric Forging Process," J. of JSTP, Vol.22, No.251, pp. 1208~1214 (in Japanese).
- (13) Kiuchi,M. and Karato.A, 1985, "Simulation of Flow Behaviors of Billet to Fill Side-Flush Cavity of Die-Application of UBET to Non-Axisymmetric Forging I," J. of JSTP, Vol.26, No. 290, pp. 307~315. (in Japanese).
- (15) Kiuchi,M., Chung,H.K. and Yanagimotoy.J., 1989, "Analysis of Upsetting of Non-Axisymmetric Hollow Billets-Application of UBET to Forging V," J. of JSTP, Vol.31, No.349 (in Japanese).
- (16) 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. 237~250.
- (17) Oudin,J. and Ravalard,Y., 1982, "Computer Aided Forging Design in Plane-Strain Conditions," Int. Conf. on Num. Methods in Industrial Forming Processes, Swansea, U.K., pp. 351~362.
- (18) Himmelbrau,D.M., 1972, "Applied Nonlinear Programming," McGraw-Hill, New York.
- (19) Bodnar,R.L., Ronemus,D.C., Bramfitt,B.L. and Shah,D.C., 1986, "Physical Modelling of Hot-Deformation Processes-Using Plasticine," Trans. ISS, pp. 35~46.
- (20) Wanheim,T. and Danckert,J., 1987, "Combined Physical and Numerical Modelling of Metal Forming Processes," Advanced Tech. of Plasticity, Vol.1, pp. 29~36.
- (21) 이근안, 임용택 외 3인, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구," 단조 심포지엄 '91, 반도출판사, pp. 52~62.
- (22) 신현우, 1992 "단순화된 3차원 유한요소법을 이용한 압연 및 압출공정 해석," 박사학위논문, 서울대학교.
- (23) 전병희, 1990, "마찰을 고려한 탄소성 접촉 문제에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교.
- (24) 김동원, 김현영, 신수정, 1989, "UBET를 이용한 축대칭형단조해석," 대한기계학회논문집, 제13권 3호, pp. 337~344.
- (25) 김동원, 김현영, 이동재, 1989, "UBET를 이용한 축대칭 형단조 해석(II)," 대한기계학회, '89년도 춘계학술대회초록집 고체역학부문, pp. 169~171.