

<論 文>

## UBET를 이용한 축대칭 형단조 해석

김 동 원\* · 김 현 영\*\* · 신 수 정\*\*

(1989년 1월 25일 접수)

### Analysis of Axisymmetric Closed-Die Forging Using UBET

Dong Won Kim, Heon Yeong Kim and Su Jung Shin

**Key Words:** Axisymmetric Closed-Die Forging (축대칭 형단조), UBET (상계요소법), Kinetically Admissible Velocity Field (동적가용속도장), Preform Design (예비 가공형 설계), Degree of Die Filling (재료의 다이충만도)

#### Abstract

The upper bound elemental technique (UBET) is used to simulate the bulk flow characteristics in axisymmetric closed die forging process. Internal flow inside the cavity is predicted using a kinematically admissible velocity field that minimizes the rate of energy consumption. Application of the technique includes an assessment of the formation of flash and of degree of filling in rib-web type cavity using billets with various aspect ratios. The technique considering bulging effect is performed in an incremental manner. The results of simulation show how it can be used for the prediction of forging load, metal flow, and free surface profile. The experiments are carried out with plasticine. There are good agreements in forging load and material flow in cavity between the simulation and experiment. The developed program using UBET can be effectively applied to the various forging problems.

#### 1. 서 론

일반적으로 초등해법 (slab method), 미끄럼선장법 (slip line field method), 상계해법, 유한요소법 등이 소성가공문제의 수치해석에 적용되어 왔다. 그러나 이러한 해석법들을 이용하더라도 해석 가능한 범위는 한정되어 있으며, 그 원인은 각각의 해법 고유의 특성에 기인한다. 형단조 해석은 여러 가지 변형모델에 대하여 강소성 유한요소법과 UBET (Upper Bound Elemental Technique)<sup>(1~5)</sup>를 적용함으로써 어느 정도 가능하게 되었다. Oh 등<sup>(6)</sup>은 강소성 유한요소법을 이용한 시뮬레이터 (ALPID)

를 개발하여 여러 가지 모델에 적용하였으나 복잡한 형상의 형단조 해석시에는 계산량이 방대하여 아직까지 그 경제성이 의문시되는 경우가 많다.

최근에 Kiuchi, Bramley에 의하여 그 연구가 본격화된 UBET는 복잡한 소성가공문제를 비교적 정확하고 경제적으로 해석할 수 있는 수치 해법으로 평가받고 있다. Kiuchi<sup>(7~10)</sup>는 3각형과 4각형 링요소소에 대한 일반적인 속도장을 제안하고, 경계면에서 구속이 큰 복합압출 문제를 해석하였다. Bramley 등<sup>(11~13)</sup>은 축대칭 형단조 문제에 대하여 매 변형단계마다 소재의 자유표면 형상을 단순화하여 유동장과 단조하중을 구하였으나 경계조건의 처리가 실제 변형양상과는 차이가 있었다.

본 연구에서는 플래쉬 (flash)를 가진 축대칭 리브-웹형 (rib-web type) 제품의 형단조가공을 해

\*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

\*\*정회원, 서울대학교 대학원

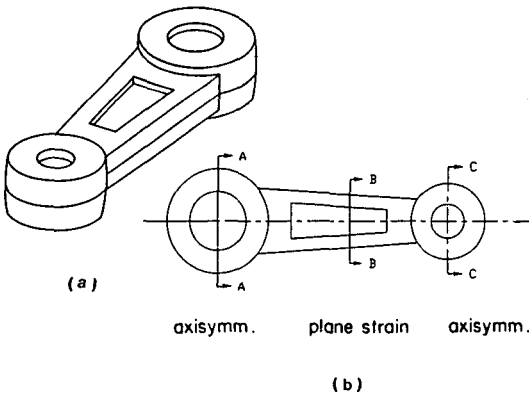
석하기 위한 UBET 프로그램을 개발하고 변형중의 경계조건처리를 다르게 한 세 가지 유동모델에 대하여 소재의 유동상태와 단조하중을 계산하여 효과적인 유동모델을 제시하였다. 또한 체적은 같으나 반지름과 높이의 비가 다른 몇 가지 초기소재 형상에 대하여 변형에 따른 소재의 다이충만도 및 하중을 비교하여 적절한 초기소재의 형상을 찾고자 하였다. 본 연구에서 제시한 유동모델의 효율성을 검증하기 위하여 플라스틱인(plasticine) 소재를 사용한 실험과 그 결과를 비교, 분석하였다.

2. 해석모델과 기본가정

수많은 형상의 형단조 부품설계에 일반적으로 적용될 수 있는 해석방법은 없다. 대부분의 복잡한 형상의 제품은 해석가능한 단순한 형상의 요소들로 조합되어 있다고 볼 수 있으며, 이들 각각의 요소들은 특징적인 유동상태(축대칭, 평면변형 등)를 나타낸다. 그러므로

- (1) 단조물을 기본적인 변형단위요소로 분할하고
- (2) 각각의 변형단위요소를 해석하여
- (3) 빌딩 블록 방식(building block manner)으로 변형단위요소를 종합함으로써 전체단조물을 해석할 수 있다.

Fig. 1에서 (a)는 케벡팅 로드를 모델링한 것으로 (b)에 나타나 있듯이 축대칭유동(단면 A-A, C-C)과 평면변형유동(단면 B-B)의 조합으로 되어있다고 볼 수 있다. 본 연구는 단면 A-A, C-C와 같은



(a) Three dimensional modelling  
(b) Representation of the various deformation units

Fig. 1 Forging geometry of connecting rod

축대칭 리브-웹형 단면을 가진 제품의 형단조 해석을 수행하였다.

재료의 소성변형시 그 유동현상 자체가 매우 복잡하므로 이에 대한 적당한 가정이 필요하다. 형단조 가공해석을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다.

(1) 재료는 강소성체(rigid-plastic material)이며 von Mises 항복조건을 따른다.

(2) 변형 중 소재의 체적변화는 없다.

$$\dot{\epsilon}_{ii} = 0 \tag{1}$$

(3) 금형, 펀치 및 금형구속장치는 완전강체로서 변형 및 체적변화는 없다.

(4) 단조공정 중 온도변화는 무시하고 유효응력은 유효변형률에만 영향을 받는다.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}) \tag{2}$$

(5) 단위면적당 마찰응력은 다음과 같다.

$$\tau = mk \quad 0 < m < 1 \tag{3}$$

여기서  $k$ 는 순수전단 항복응력이고,  $m$ 은 마찰비정수(friction factor)로서 소재의 변형 중 그 값이 일정하다.

(6) 변형유동은 상하대칭이다.

3. 이론해석

3.1 UBET 이론

UBET는 에너지법의 일종으로 상계정리를 기초로 한다. 이 방법은 전체소성변형영역을 4각형과 3각형 등의 단순한 형상의 요소들로 분할하고, 분할한 각 요소에 대하여 속도경계조건, 비압축성조건, 요소들 사이의 수직속도 연속조건을 만족하는 동적가용속도장(kinematically admissible velocity field)을 사용하여 피가공재 전체의 속도장을 표현한다. 또한 속도장에 포함된 준독립변수(pseudo-independent parameter)  $X_i$ 에 대하여 전체 에너지 소비율  $J^* = J^*(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 을 수치적으로 최소화함으로써 피가공재 전체의 속도장을 결정한다. 즉, 강소성체의 변형에 관한 모든 동적가용속도장 중에서 실제 가공시의 에너지 소비율은 다음의  $J^*$ 를 최소로 하는 것이다.

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f \tag{4}$$

윗 식에서  $\dot{W}_i$ 는 내부변형 에너지율이며,  $\dot{W}_s$ 는 요소와 요소 사이의 전단변형 에너지율,  $\dot{W}_f$ 는 다이와 소재 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰에 의한 에너지 소비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\dot{W}_i &= \int_V \sigma \dot{\epsilon}^* dV \\ \dot{W}_s &= \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{r_s} \sigma |dV_s^*| dS \\ \dot{W}_f &= \frac{m}{\sqrt{3}} \int_{r_f} \sigma |dV_f^*| dS\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 상당변형률 속도는 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}^* = \left[ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^* \right]^{\frac{1}{2}}$$

준독립 변수  $X_i$ 에 대한  $J^*$ 의 미분계수를 구하는 것이 일반적으로 곤란하기 때문에, 본 연구에서는 직접탐색법(direct search method)의 일종인 flexible polyhedron search method<sup>(14)</sup>에 의하여  $J^*$ 를 최소화하였다. 각 변형단계마다 최소치의 '탐색'이 용이한 준독립 변수의 갯수에는 제한이 따르므로 수 개에서 십수 개의 준독립 변수를 사용하였다. 또한 하중을 구하기 위하여는 다음 식을 적용하였다.

$$P = J^* / \dot{V} \quad (7)$$

여기서,  $P$ 는 실제하중의 상계해이고  $\dot{V}$ 는 하중을 가하는 펀치의 속도이다.

### 3.2 프로세스 시뮬레이션 (Process Simulation)

UBET에 의한 소성가공 문제 해석은, 압출과 같이 주위로부터의 구속이 큰 경우 비교적 적은 변형자유도를 갖는 모델에 의하여 타당한 해석결과를 경제적으로 얻는 것이 가능하지만, 형단조 가공과 같이 피가공재에 많은 자유표면이 포함된 경우에 대하여는 충분한 변형자유도를 가진 모델에 의한 해석이 곤란한 실정이었다. 형단조 가공시 다이충만도 및 재료의 절약을 위하여는 플래쉬와 예비가공형 금형(preform die)의 설계가 중요한 과제이며, 이를 위해 가공 중 재료의 변형양상을 아는 것이 필수적이다.

각 변형단계에서 에너지 소비율을 최소로 하는 동적가공 속도장을 이용하여 분할된 각각의 요소에 대한 미소시간중분 후의 위치는 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$X^{i+1} = X^i + \Delta t \cdot \dot{U}^i \quad (8)$$

여기서  $X^i$ 와  $X^{i+1}$ 는  $i$ 번째와  $(i+1)$ 번째 단계에서의 요소의 위치이며,  $\Delta t$ 는 단계진행시의 시간중분을 나타낸다.  $\dot{U}^i$ 는  $i$ 번째 단계에서 구해진 각 절점의 속도 값이다.

식 (8)은 한 변형단계에서 최적화된 속도장이 변

형 중 일정하게 유지된다고 가정하였지만 변형중분이 크게 될 경우 이러한 가정하에서는 체적일정성이 지켜지지 않는다. 특히 축대칭 문제에서 반경방향으로의 변형이 크게 되는 경우 더욱 심하다. 그러므로 4각형 링요소에 대하여 변형 전후의 체적이 일정하게 유지되도록 다음 식과 같이 속도장을 보정하였다[Fig. 6(c) 참조].

$$\begin{aligned}(\dot{W}_{i+1} - \dot{W}_i) [ (r_{i+1}^2 - r_i^2) \\ + 2\Delta t (r_{i+1} \dot{U}_{i+1j} - r_i \dot{U}_{ij}) \\ + \Delta t^2 (\dot{U}_{i+1j}^2 - \dot{U}_{ij}^2) \\ + (y_{j+1} - y_j) [ 2(r_{i+1} \dot{U}_{i+1j} - r_i \dot{U}_{ij}) \\ + \Delta t (\dot{U}_{i+1j}^2 - \dot{U}_{ij}^2) ] ] = 0\end{aligned}\quad (9)$$

한편, 격자변형(grid distortion)에 대하여는, 변형 전의 소재에 미리 격자(grid)를 설정하고 각 변형 단계에서 계산된 요소의 속도장으로부터 격자점의 속도를 구하여 다음 식과 같이 새로운 위치로 좌표를 수정함(update)으로써 소재의 변형양상을 알아보았다.

4각형 링요소 내의 격자점

$$\begin{aligned}R^{i+1} &= R^i + \left[ \frac{\dot{W}_{ij} - \dot{W}_{i+1j}}{2(y_{j+1} - y_j)} R^i \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \dot{U}_{ij} r_i + \frac{\dot{W}_{i+1j} - \dot{W}_{ij}}{2(y_{j+1} - y_j)} r_i^2 \right\} \frac{1}{R^i} \right] \Delta t \\ Y^{i+1} &= Y^i + \left[ \frac{\dot{W}_{i+1j} - \dot{W}_{ij}}{y_{j+1} - y_j} Y^i \right. \\ &\quad \left. + \frac{\dot{W}_{ij} y_{j+1} - \dot{W}_{i+1j} y_j}{y_{j+1} - y_j} \right] \Delta t\end{aligned}\quad (10)$$

3각형 링요소 내의 격자점

$$\begin{aligned}R^{i+1} &= R^i + \left[ \frac{r_{i+1}}{r_i + r_{i+1}} \dot{U}_{i+1j} \right. \\ &\quad \left. + \frac{r_i r_{i+1}}{r_i + r_{i+1}} \dot{U}_{i+1j} \frac{1}{R^i} \right] \Delta t \\ Y^{i+1} &= Y^i + \left[ \dot{W}_{ij} + \frac{r_{i+1}}{r_i + r_{i+1}} \dot{U}_{i+1j} \right. \\ &\quad \left. (y_j - Y^i) \frac{1}{R^i} \right] \Delta t\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 대괄호 [ ] 안은  $i$ 번째 단계에서의 격자점( $R^i$ ,  $Y^i$ )의 속도값으로 Kiuchi<sup>(7)</sup>의 4각형과 3각형 링요소에 대한 일반화된 속도장을 사용하였다. Fig. 2는 4각형과 3각형 링요소의 경계에서의 수직 속도분포를 나타내는 것으로 식 (9)~(11)에 사용된 기호는 이것에 따른다.

Fig. 3은 UBET 프로그램의 순서도이다. 내부변형 에너지를, 전단변형 에너지를, 다이와 소재 사이의 마찰에 의한 에너지 소비율의 계산과정과 최소화 과정을 부프로그램화하고, 초기시편의 요소분

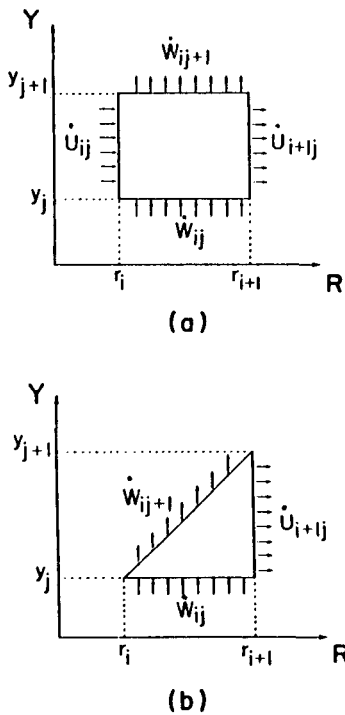


Fig. 2 Normal velocity distributions on boundaries of the rectangular and triangular element

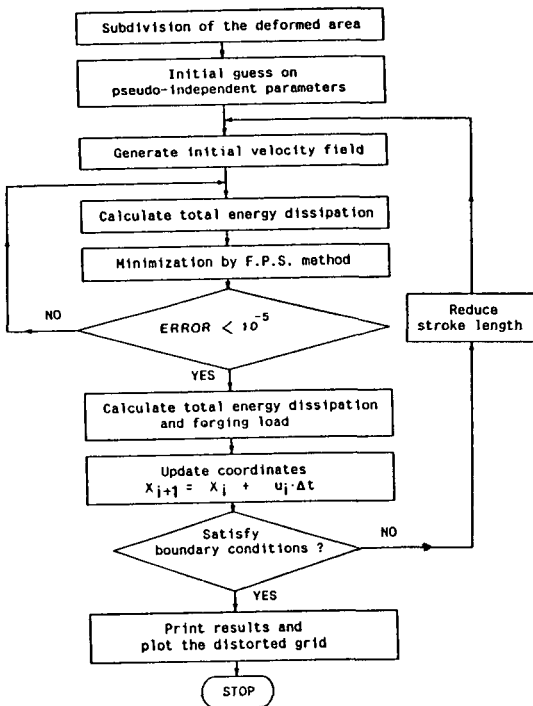


Fig. 3 Flow chart

할과 가능한 20여 개의 유동을 부프로그램화하였다. 그러므로 문제의 형상이 바뀔 경우 형상에 맞추어 주프로그램(main program)만을 수정하면 되므로 다른 형상에 대해서도 해석할 수 있도록 하였다.

#### 4. 실험

##### 4.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 가공기계의 제원은 Table 1에 보였다. 플라스틱센 가공기계는 단조하중측정을 위한 로드 셀(load cell)과 수직변위측정을 위한 변위미터가 상부에 설치되어 있고, 변위계와 하중계로 구성된 Transducer indicator(model DS-10A)가 X-Y recorder(WX4400 series)에 연결되어 변위-하중 관계곡선을 얻도록 되어 있다.

실험에 사용된 소재는 플라스틱센(Harbutt,

Table 1 Specification of plasticine forming machine

Load capacity	2000kg
Ram stroke	300mm
Loading plate diameter	240mm
Column interval	320mm
Motor	single-phase 200W
Ram speed	0-80mm/min

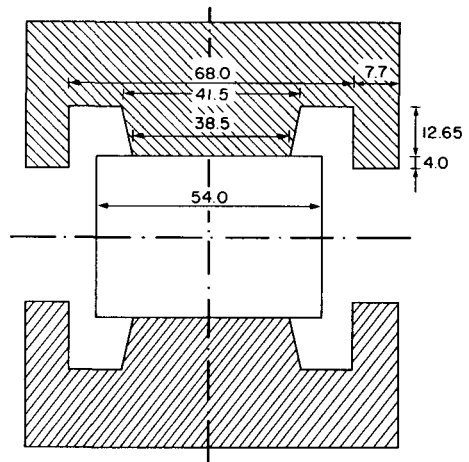


Fig. 4 Dimensions of die and workpiece

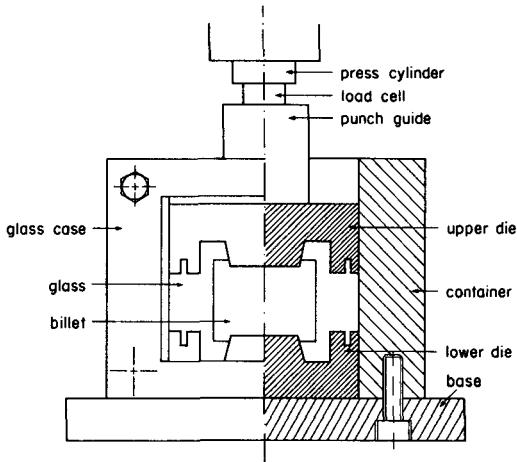


Fig. 5 Schematic diagram of experimental equipment

England)으로서 흑백 두 가지 색으로 적층하여 변형양상을 관찰하였다. 다이와 소재의 크기 및 실험장치는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 재료시험

재료의 기계적 성질을 나타내는 응력-변형을 관계를 알기 위하여 플라스틱 시편에 대한 압축시험<sup>(15)</sup>을 수행하였으며, 측정결과로부터 최소자승법 (least square method)을 이용하여 다음의 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\sigma = 0.01077\epsilon^{0.2434} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (12)$$

실험에 사용된 윤활제 Johnson powder에 대한 마찰비 정수  $m$  값을 결정하기 위하여 링압축시험 (ring compression test)을 수행하였다. 마찰력은  $\tau = mk$ 로서 소재의 변형 중 그 값은 일정하다고 가정한다. 플라스틱 시편의 (외경×내경×높이)를 54×27×18(단위 mm)로 하여 시험하였으며, 그 시험결과를 6:3:2비에 대한 Avitzur<sup>(16)</sup>의 calibration 곡선과 비교하여  $m=0.55$ 의 값을 얻었다.

5. 해석결과 및 토론

식 (8)의 증분이론은 한 변형단계에서 경계조건 및 체적일정성을 만족하는 속도장이 변형 중 일정하게 유지된다고 가정하였지만 변형증분이 아주 작은 경우를 제외하고는 이러한 가정하에서는 체적일

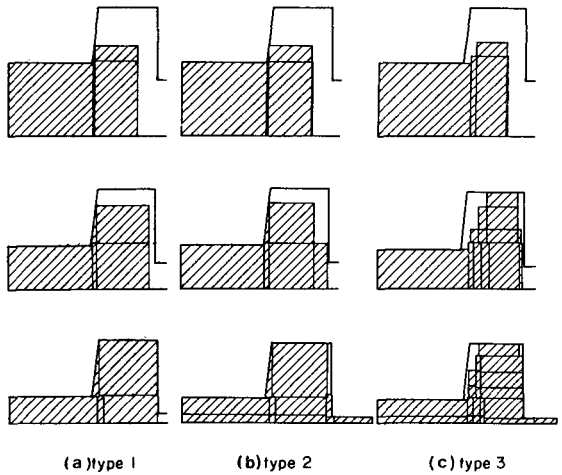


Fig. 6 Process simulation with various flow models

정성이 지켜지지 않는다. 또한 단조공정 중 경계조건 및 자유표면의 형상이 매 변형단계마다 변하므로 요소의 재구성이 필요하게 되며, 특히 자유표면이 많이 포함된 경우 변형이 진행됨에 따라서 요소의 수가 점점 많아지고, 그에 따라서 준독립변수가 많아져서 속도장의 최적화가 곤란하게 된다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 6에 나타나 있는 것과 같이 3가지 형태의 유동모델을 비교, 분석하였다.

Type 1.

Bramley<sup>(12)</sup> 등이 사용한 방법으로 소재와 다이의 경사진 부분 사이에 접촉삼각형 요소를 사용하였으며, 자유표면을 포함한 요소들의 반경방향으로의 속도를 같게 하여 변형에 따라 점점 늘어나는 요소의 수를 제한하였다. 이것은 모델이 간단하고, 요소의 수가 적어 계산이 간편하나 과도한 단순화로 인하여 실제현상과는 차이가 있었다.

Type 2.

소재와 다이의 경사진 부분 사이에 접촉삼각형 요소를 사용하여 Type 1과 같이 다이와 소재가 접촉하여 진행된다고 가정하였으나 자유표면을 포함한 요소들의 반경방향의 속도를 같게 하지 않았다. 이렇게 할 때 요소와 요소 사이의 속도불연속으로 인하여 자유표면은 계단모양으로 복잡하게 형성되어 단계진행에 따른 분할요소가 많아지게 되므로 속도장의 최적화 과정에서 준독립변수의 수가 수치계산 한계를 넘게 된다. 그러므로 반경방향으로 가장 바깥쪽에 있는 요소의 높이를 웨브의 두께와 같

게 제한하였으며 그 윗부분의 요소는 강제영역으로 취급하여 수치계산이 가능하도록 하였다. 이 유동 모델을 사용하면 플래쉬부가 형성될 때까지는 매 진행단계에서 연속계산이 가능하며, 벌징현상을 고려할 수 있다.

**Type 3.**

소재와 다이의 경사진 부분이 접촉하여 진행된다는 가정과 자유표면의 형상을 제한하는 가정을 하지 않고, 일반적인 4각형 링요소만을 사용하여 해석하였다. 이 경우 변형에 따라 요소의 수가 급격히 증가하게 되나, 변형증분을 크게 하여 전체단계 진행수를 줄임으로써 요소의 수를 제한하였다. 변형증분을 크게 함으로써 발생하는 변형 전후의 체적차이는 식 (9)에 의하여 보정하였다. 이 모델은 벌징현상과 소재의 다이로부터의 떨어짐을 고려할 수 있다.

Fig. 7은 위에서 언급한 세 가지 형태의 유동모델에 대한 하중치를 비교하였다. Bramley의 가정을 사용한 Type 1의 경우보다 벌징현상을 고려한 Type 2와 Type 3이 실험치에 더 근접하였다. 특히 높이 감소율(reduction of height) 60~70% 사이에서 큰 차이를 보이는데 Type 1의 경우 다이의

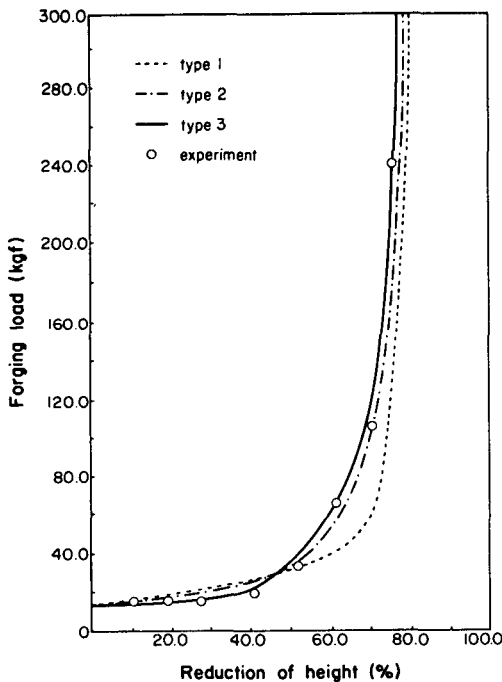


Fig. 7 Correlation between forging loads of various flow models and experiment

경사면과 변형재료 사이에 접촉삼각형 요소를 사용하여 바깥쪽으로의 유동을 억제시켰으며, 더불어 자유표면에서 반경방향으로의 속도가 같다고 가정하였으므로 이 구간에서 아직 플래쉬부에 재료가 도달하지 않았다. 그에 반해 Type 2, Type 3의 경우는 이때부터 플래쉬부로 재료가 빠져나가기 시작하므로 하중이 급격히 커지게 된다. 또한 높이 감소율이 40~50%까지는 Type 3이 실험에 가장 근접함을 볼 수 있는데 이는 접촉삼각형 요소를 사용하지 않았으므로 재료가 다이 경사면에서 떨어져 있어서 하중이 다른 경우에 비해서 작다. 그러므로 하중예측을 위해서는 Type 3이 가장 적합한 모델이나 Type 2의 경우도 근접한 결과를 나타내며 또한 요소의 분할이 쉽고, 연속적인 계산이 가능하며, 준독립변수의 갯수도 적어 효율적이다.

Fig. 8은 높이 감소율에 따른 격자변형양상을 나타내는 것으로 초기요소에 격자(10×6 points)를 배치해 놓고 식 (10), (11)에 의하여 새로운 위치로 격자절점의 좌표를 수정하였다. 플래쉬부가 형성되기 시작할 때 (reduction 60%) 플래쉬부의 재료의 유동상태를 명확하게 하기 위하여 새로운 격자(10×7 points)를 재구성하였다. 단계진행은 소재의 형상 및 유동모델에 따라 다르지만 Fig. 6의 Type 1과 Type 2의 경우는 단계크기(step size)를 0.5mm로 하여 약 25~30단계(step)가 소요되었으며, Type 3의 경우는 단계크기를 2mm로

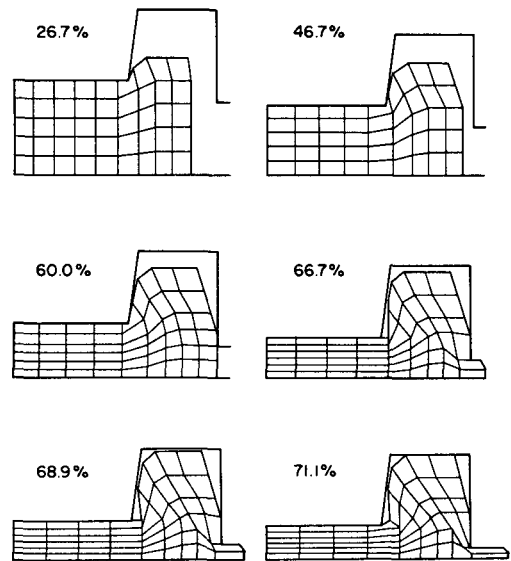


Fig. 8 Grid distortion pattern

하고, 플래시가 형성되면 그 때부터 0.5mm로 하여 약 10~15단계가 소요되었다. 한편 매 진행단계에서 속도장의 최적화에 소요된 반복수행 시간은 준독립변수의 수에 따라서 상당한 차이가 있었는데, 초기에 준독립변수가 5개 이하일 때는 수초에서 십수초 정도가 소요되었으며, 5개 이상일 때는 수십초정도 소요되었다. 최종변형까지의 총 CPU 시간이 유동모델에 따라 다르지만 강소성 유한요소 해석<sup>(17)</sup>에 비하여 현저하게 감소함을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(a)는 플라스틱을 적층하여 실험한 높이 감소를 69%일 때의 실험결과로서 (b)에 나타난 동일한 변형에서의 시뮬레이션 결과와 흡사한 유동상태를 보여준다.

Fig. 10, 11에서는 변형 전의 시편에 대한  $R_0 \times H_0$  (반경  $\times$  높이)값이 31.0 $\times$ 17.0, 27.0 $\times$ 22.5,

25.0 $\times$ 26.5인 3가지 경우에 대하여 단조행정에 따른 하중치와 소재의 다이충만도(degree of die filling)를 비교하였다. 이는 예비가공형 설계와 관련이 있는 것으로 같은 체적의 각기 다른(반경 $\times$ 높이) 값에 따라 소재의 충만 과정이 차이가 있음을 알 수 있다.

(i) 31.0 $\times$ 17.0의 경우 완성까지의 행정이 짧고 단조하중이 작은데 비해 최종단계에서 소재가 다이내부를 완전히 채우지 못했음을 알 수 있다. 그러므로 이것으로부터는 원하는 제품을 만들 수 없다.

(ii) 27.0 $\times$ 22.5의 경우 소재가 다이를 완전히 채웠으며 완성까지의 행정도 적절하여 불필요한 에너지 소모가 없었다.

(iii) 25.0 $\times$ 26.25의 경우 소재가 다이를 완전히 채우기는 하나 최종과정까지의 행정이 길고, 이로 인하여 에너지 및 하중이 불필요하게 소모되어 비

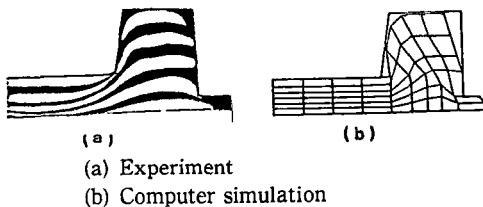


Fig. 9 Grid distortion at reduction of height 69%

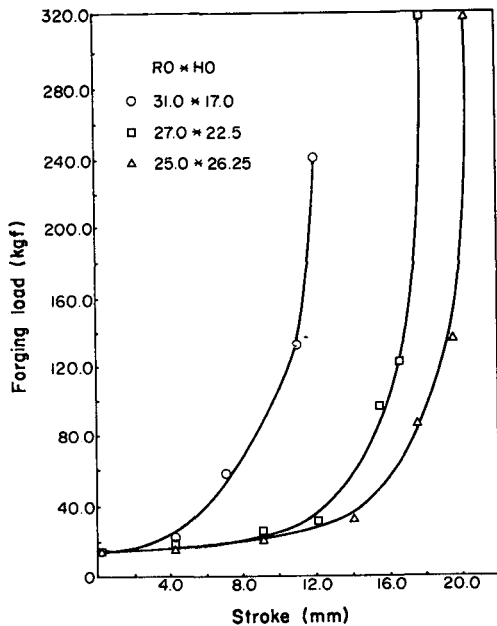


Fig. 10 Effect of initial billet geometry on forging load

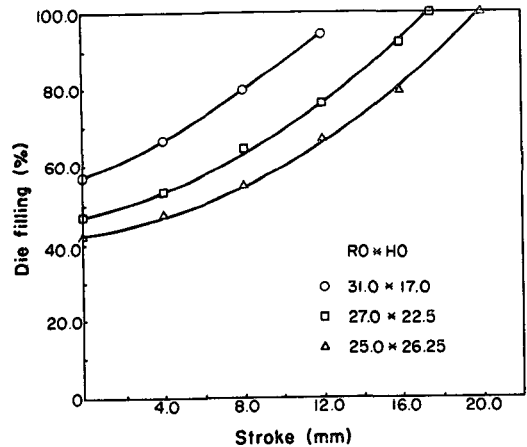


Fig. 11 Effect of initial billet geometry on degree of filling

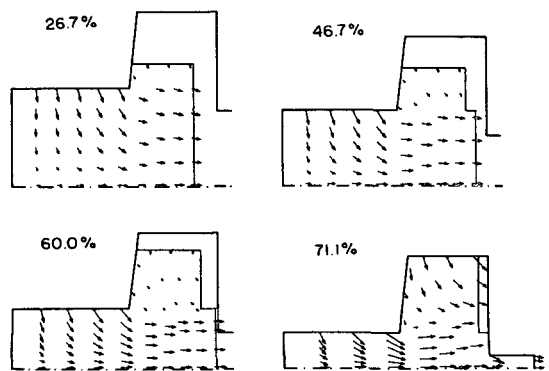


Fig. 12 Velocity distribution

효율적이다.

Fig. 12는 유동모델 Type 2(Fig. 6)에 대한 해석 결과로서 단조행정에 따른 변형재료 내의 속도분포를 나타낸다. 리브쪽으로 올라가는 부분에서의 속도가 중심선 부분의 반경방향으로의 속도보다 작으나, 플래쉬부가 형성된 이후부터 이 부분의 속도가 커짐을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

축대칭 형단조 가공해석을 위한 UBET 프로그램을 개발하여 리브-웹형 단면에 적용하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 여러 가지 유동모델에 대하여 하중 및 변형 양상을 비교, 분석하여 단조행정에 따른 소재의 유동을 좀더 효과적이고 실제에 가깝게 시뮬레이션할 수 있는 유동모델(Fig. 6(b), (c))을 제시하였다.

(2) 변형단계별로 하중과 변형 양상을 플라스틱센을 사용한 실험결과와 비교한 결과 해석과 실험의 양호한 일치율을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서 개발한 UBET 프로그램에 의하여 리브-웹형 단면을 가진 축대칭 제품의 형단조 해석이 가능하다.

(3) 초기시편의 반경과 높이의 비에 따른 다이충만도 및 하중을 비교하여 최종제품에 합당한 예비가공형(preform)을 찾았다.

(4) 보다 효과적이고 실제에 가까운 시뮬레이션을 위하여는 새로운 요소의 개발과 변형단계마다 자동적인 요소재구성이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1987년도 목적 기초연구비의 지원하에 이루어졌음을 밝히며, 관계 제위에게 감사의 뜻을 표하는 바이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kudo, H., 1960, "Some Analytical and Experimental Studies of Axisymmetric Cold Forging and Extrusion- I", I.J.M.S., Vol. 2, pp. 102~127.
- (2) Kudo, H., 1961, "Some Analytical and Experimental Studies of Axisymmetric Cold Forging and Extrusion- II", I.J.M.S., Vol. 3, pp. 91~117.
- (3) Kobayashi, S., 1964, "Upper-bound Solutions of Axisymmetric Forming Problems- I, II", J. Eng. for 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. for 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) Wu, W.T., Oh S.I. and Altan, T., 1984, "Investigation of Defect Formation in Rib-Web Type Forging by 'ALPID'", Proc. of NAMRC-XII.
- (7) 木内學, 村田良美, 1981, "UBET의 応用に関する研究", 塑性と加工, Vol. 22, No. 244, pp. 495~502.
- (8) 木内學, 唐戸彰夫, 1985, 非対称フラツシュ部への材料の充満過程の解析, 塑性と加工, Vol. 26, No. 290, pp. 307~315.
- (9) 木内學, 唐戸彰夫, 1985, "非対称フラツシュ部への材料の充満過程の解析- II", 塑性と加工, Vol. 26, No. 292, pp. 503~511.
- (10) 木内學, 柳本潤, 1988, "鍛造加工の複合数値解析", 塑性と加工, Vol. 29, No. 330, pp. 710~717.
- (11) Osman, F.H. and Bramley, A.N., 1982, "An Incremental Analytical Technique for Forging and Extrusion of Metals", Int. Conf. on Num. Methods in Industrial Forming Processes, Swansea, U.K., pp. 333~342.
- (12) Osman, F.H. and Bramley, A.N., 1984, "Forging and Preform Design Using UBET", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 563~568.
- (13) Bramley, A.N., 1987, "Computer Aided Forging Design", Annals of the CIRP, Vol. 36/1, pp. 135~138.
- (14) Himmelbrau, David M., 1972, "Applied Nonlinear Programming", McGraw-Hill, New York.
- (15) 김동원, 1986, 소성학, 청문각, 서울, p. 121.
- (16) Avitzur, B., 1968, "Metal Forming: Process and Analysis", McGraw-Hill, New York.
- (17) 양동열, 이낙규, 윤정호, 1988, 유한요소법을 이용한 냉간단조금형 및 가공공정설계, 소성변형 및 가공심포지움논문집, 서울대학교.