

〈論 文〉

UBET를 이용한 축대칭 단조공정에서의 최적설계에 관한 연구

김영호* · 배원병** · 이종현*** · 김진훈*** · 김현영****

(1993년 6월 5일 접수)

A Study on Optimal Design in Axisymmetric Forging Processes Using UBET

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

Key Words : UBET(상계요소법), Forward, Backward Tracing Program(전·후방 추적프로그램), Optimum Initial Billet(최적 초기시편), Optimum Preform(최적 예비성형체), Plasticine(플라스티신), Man-Machine Interface

Abstract

A UBET program is developed for determining the optimum sizes of preform of a rib-web part in axisymmetric closed-die forging. The program consists of forward and backward tracing processes. In forward process, material flow, degree of 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 without flash. The above program is easy to handle input data with and is convenient to visualize the whole process of closed-die forging with. Experiments are carried out with pure plasticine billets at room temperature. The theoretical predictions of the forging load and the flow pattern are in good agreement with the experimental results.

기 호 설 명

J^* : 전체 에너지소비율
 m : 마찰정수 ($0 < m < 1$)
 r_i, r_{i+1} : 요소의 R방향 좌표
 r'_i, r'_{i+1} : Δt 변형후의 R방향의 요소 절점좌표
 U_0 : 다이속도
 $U_{i,j}, U_{i+1,j}$: 요소의 R방향의 속도
 V_i : 요소의 체적
 \dot{W}_i : 내부 변형에너지율
 \dot{W}_s : 요소와 요소사이의 전단 변형에너지율
 \dot{W}_f : 다이와 재료사이의 마찰에너지율
 $W_{i,j}, W_{i,j+1}$: 요소의 Z방향의 속도

z_j, z_{j+1} : 요소의 Z방향 좌표
 z'_j, z'_{j+1} : 변형후의 Z방향의 요소 절점좌표
 $|\Delta U_f|$: 소재와 다이접촉면에서의 속도 불연속량
 $|\Delta U_s|$: 요소사이의 전단면에서의 속도 불연속량
 $\dot{\epsilon}$: 유효 변형률속도
 $\bar{\sigma}$: 유동응력

1. 서 론

단조공정에서의 공정설계는 필요한 공정의 결정, 금형설계, 예비성형체 설계, 초기소재 선정, 공정조건 및 장비의 선택과 같이 많은 분야를 포함하고 있다. 이들 중에서 가장 중요한 분야 중의 하나가 최적화된 예비성형체 설계와 초기소재의 선택이다.^(1~3) 과거에는 이론적인 면보다는 경험에 의해 측

*정회원, 부산대학교 생산기계공학과

**정회원, 부산대학교 기계설계공학과

***부산대학교 대학원 생산기계공학과

****정회원, 강원대학교 기계공학과

적된 지식을 바탕으로 예비성형체와 초기소재를 설계해 왔으나 최근에는 소성이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 단조공정설계가 많이 연구되고 있다.

단조공정의 이론적 해석방법에는 여러가지가 있지만 동적 가용속도장을 이용한 해석방법에는 상계법과 상계요소법(UBET)이 있다. 종래의 상계법이 단순한 변형의 문제에 한정된 반면 상계요소법은 소재의 변형영역을 해석가능한 단순한 요소들로 분할하고, 이 요소들을 조합하여 전체에너지를 최소화하는 방법이다. 상계요소법은 Kudo^(4,5)가 단순한 축대칭 및 평면 변형문제에서 단위 변형영역의 개념을 도입하면서 시작되었다. 최근에 Bramley^(6,7)와 Kiuchi^(8,9) 등에 의하여 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 유한요소법에 비해 프로그램 구성이 간단하고 계산량이 작아 실행속도가 빠르다는 장점을 가지고 있으며 복잡한 소성가공문제를 비교적 정확하고 경제적으로 해석할 수 있는 수치해법으로 평가되고 있다.

상계요소법에 의한 예비성형체 설계에 관한 연구는 Bramley⁽⁷⁾ 등에 의해 두개의 리브(rib)를 가진 축대칭문제에서 예비성형체 설계를 위한 방안으로 역해석(reverse solution)를 제안하였다. 이것은 현재 단계에서 구한 속도장을 반대로 하여 역과정(reverse process)을 수행한 것이며, 실제의 정과정(forward process)과는 무관한 예비성형체를 얻게되고 역추적법과 비교하면 신뢰도가 떨어진다. 저자 중의 한사람인 Kim⁽¹⁰⁾은 유한요소법의 역추적 개념을 상계요소법에 도입하여 리브-웹브형 단조에 적용하였으며 역추적 중 경계조건 제어방법과 수렴조건 등을 부가하여 새로운 예비성형체 설계방안을 제시하였다. 그러나 플래시를 포함한 최종제품에서 역추적하는 경우^(7,10,11)는 초기에 플래시를 설계하는 번거로움이 있어 최종제품에서 역추적함으로써 최적의 예비성형체와 초기소재를 얻을 수 있는 방안이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 리브-웹브형 축대칭 단조에 관해서 상계요소해석에 의한 최적 초기소재와 예비성형체를 얻을 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하고자 한다. 초기소재에서 시작하여 다이 진행에 따른 유동상태를 단계적으로 파악할 수 있는 전방추적(forward tracing) 프로그램과 역추적기법⁽¹⁰⁾을 도입하여 예비성형체를 예측할 수 있는 후방추적(backward tracing) 프로그램을 개발하였다. 기

존 연구^(7,10)에서와는 달리 처음에는 플래시가 없는 최종 형상에서 역추적을 한 뒤, 다시 전방 시뮬레이션을 하여 덜 채워진 체적을 파악한다. 이 부족한 체적을 경험식에서 얻은 플래시량을 최대량으로 하여 자동보정하고, 다시 전방 시뮬레이션을 하여 확인, 보정하는 과정을 되풀이함으로써 최적 예비성형체를 설계하였다. 초기소재의 선정도 예비성형체 설계와 같이 예비성형체를 최종제품으로 보고 역추적하여 단순한 형상의 최적 초기소재를 선정할 수 있도록 하였다. 또한 데이터를 보다 간편하게 입력할 수 있고 요소재구성, 다이충만, 격자변형과정 등을 시각화하는 Man-Machine Interface 프로그램을 개발하였다. 그리고 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 흑색과 백색 플라스틱인(plasticine)을 교대로 적층한 시편으로 상온에서 MTS(Material Testing System)를 이용하여 유동형상과 가공하중 등을 측정하였다.

2. UBET 해석

리브-웹브형 축대칭 단조에서 최적 초기소재와 예비성형체를 예측하기 위한 방안을 강구하고자 한다.

2.1 동적 가용속도장

본 연구에서는 소성변형영역을 Fig. 1과 같은 4각형과 3각형 요소로 분할하고 Kiuchi⁽⁸⁾가 제안한 아래의 동적 가용속도장을 이용하여 해석하였다.

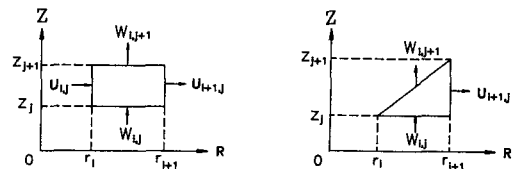
(a) 4각형 요소

$$W = B_1 z + B_2$$

$$U = -\frac{1}{2} B_1 r + \frac{B_3}{r} \tag{1}$$

여기서,

$$B_1 = (W_{i,j+1} - W_{i,j}) / (z_{j+1} - z_j)$$



(a) Rectangular element (b) Triangular element

Fig. 1 Normal velocity distribution on the boundaries of axisymmetric elements

$$B_2 = (W_{i,j}z_{j+1} - W_{i,j+1}z_j) / (z_{j+1} - z_j)$$

$$B_3 = U_{i,j}r_i + 1/2(B_1r_i^2)$$

의 좌표는 다음과 같다.

(b) 3각형 요소

$$U = -A_1(1 + \frac{A_2}{r})$$

$$W = A_1 \frac{z}{r} + A_3$$

(2)

여기서,

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

$$A_2 = r_i$$

$$A_3 = W_{i,j} + \frac{r_{j+1}z_j U_{i+1,j}}{(r_i + r_{i+1})r}$$

2.2 에너지소비율

동적 가용속도장에 근거한 소성변형역에서 전체 에너지소비율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (3)$$

여기서, 각각의 에너지소비율은 다음과 같다.

$$\dot{W}_i = \int_v \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV$$

여기서, $\dot{\epsilon} = \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \right]^{1/2}$ 이다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta U_s| ds_s \quad (4)$$

$$\dot{W}_f = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \int_{s_r} |\Delta U_r| ds_r \quad (5)$$

미지의 경계속도를 준독립변수(pseudo-independent parameter)로 하여 직접탐색법(direct search method)의 일종인 FPSM(Flexible Polyhedron Search Method)⁽¹²⁾을 사용하여 전체 에너지소비율을 최소화함으로써 전체속도장을 결정하게 된다. 또한 상계 하중 P 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{J^*}{U_o} \quad (6)$$

2.3 소재 유동 및 요소 재구성

다이진행에 따른 재료의 층만과정을 조사하기 위해서는 가공 전과정을 다이 진행에 따라 여러 단계로 나누어 각 단계에서의 전체 에너지소비율을 최소로 하는 동적 가용속도장을 이용하여 4각형 링과 3각형 링요소의 시간중분 Δt 이후의 좌표를 결정한다. 4각형 링과 3각형 링요소의 시간중분 Δt 이후

(a) 4각형 링요소

$$r'_i = r_i + \Delta t \cdot U_{i,j}$$

$$r'_{i+1} = r_{i+1} + \Delta t \cdot U_{i+1,j}$$

$$z'_j = z_j + \Delta t \cdot W_{i,j}$$

$$z'_{j+1} = z_{j+1} + \Delta t \cdot W_{i,j+1} \quad (7)$$

(b) 3각형 링요소

$$r'_i = r_i + \frac{2r_{i+1}U_{i+1,j}}{r_i + r_{i+1}}$$

$$r'_{i+1} = r_{i+1} + \Delta t \cdot U_{i+1,j}$$

$$z'_j = z_j + \Delta t \cdot W_{i,j+1}$$

$$z'_{j+1} = z_{j+1} + \Delta t \cdot \left(W_{i,j+1} \frac{z_j - z_{j+1}}{r_i + r_{i+1}} U_{i+1,j} \right) \quad (8)$$

상계요소해석에서 매 변형단계가 진행됨에 따라 변형역 내의 인접요소들 사이에 미끄럼이 발생하여 접선속도 불연속이 생기게 되며 요소의 크기와 경계 조건이 바뀌게 된다. 따라서 다음 단계해석을 위해서 요소를 재구성할 필요가 있다. 요소 재구성 방안(element regeneration method)에 대해서는 변형영역 및 다이경계가 요소시스템의 외곽선과 일치하도록 하였으며 인접요소들 사이에 침투(penetration), 엇갈림(mismatching), 간극(gap) 등이 생기지 않도록 하였다. 또한 재구성된 요소의 유효 변형률은 기존연구⁽¹⁰⁾에서 자세히 표현하였다.

2.4 예비성형체 및 초기소재의 설계

예비성형체 설계는 가공공정 설계에서 가장 중요한 단계 중의 하나이다. 밀폐형 단조에서 예비성형체 설계는 각 예비성형체의 치수와 개수, 형상의 설계를 포함한다. 본 연구는 예비성형체 설계를 위해 Park 등⁽¹³⁾이 제안하고 Kim 등⁽¹⁰⁾이 상계요소법에 도입한 역추적기법을 이용하여 예비성형체와 초기소재를 설계하였다.

플래시가 있는 최종제품에서 역추적을 시작하면, 초기에 플래시를 설정해야하고, 이와 같은 방법으로 얻은 예비성형체를 사용하여 전방 시뮬레이션했을 때 과다한 플래시량이나 혹은 다이채움의 부족 등이 생길 염려가 있다. 따라서 본 연구에서는 처음에는 플래시가 없는 최종제품에서 역추적하여 예비성형체를 결정하였다. 이 예비성형체의 타당성을 검토하기 위해 전방 시뮬레이션을 하면 예비성형체의 체적과 최종제품의 체적이 같으므로 플래시부로나가는 양이 부족하여 다이 공간을 다 채우지 못한

다. 그러므로 다이의 축방향과 반경방향의 부족량을 전방 시뮬레이션의 최종단계에서 자동적으로 파악하였다. 이것을 보정하기 위하여 프로그램에 삽입된 Wolf, Teterin, Tarnovskij 등이 제시한 플래시 경험식⁽¹⁴⁾으로 얻은 플래시량을 최대량으로하여 (대체로 이 경험식에 의한 플래시량은 소재가 다이 채움에 부족하지 않도록 여유있게 책정되어 있음을 시뮬레이션 과정에서 확인할 수 있었다.) 다이의 축방향과 반경방향의 부족량에 비례해서 예비성형체의 축방향이나 반경방향으로 자동배분한다. 보정된 예비성형체에 대해 다시 전방 시뮬레이션으로 확인하고 다이충만도와 플래시 길이 등이 적절치 못할 경우에는 앞서와 같은 방법으로 체적보정하여 확인과정을 반복함으로써 최적 예비성형체를 얻었다.

완전한 공정설계를 하려면 예비성형체 뿐만 아니라 예비성형체를 만들기 위한 초기소재의 치수도 알아야 한다. 그러므로 본 연구에서는 예비성형체의 체적보정 방식과 같은 방법으로 플래시가 없는 예비성형체를 최종형상으로 보고 역추적으로 선정된 초기소재 치수에 플래시 체적을 배분하여 반복 제어함으로써 다이가 완전히 채워지고 동시에 플래시 길이와 하중이 최소화되는 최적의 초기소재를 얻었다.

2.5 Man-Machine Interface 개발

본 연구에서는 축대칭 리브-웹브형태에 대해 Man-

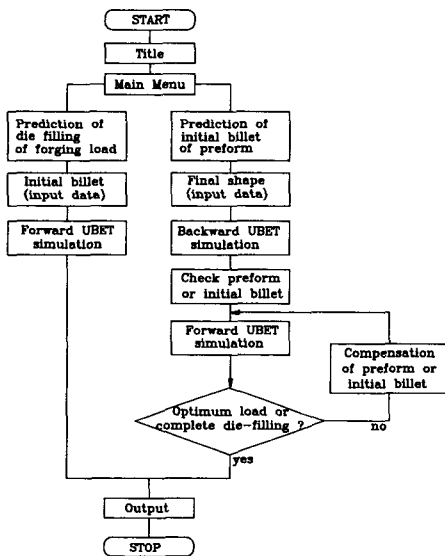
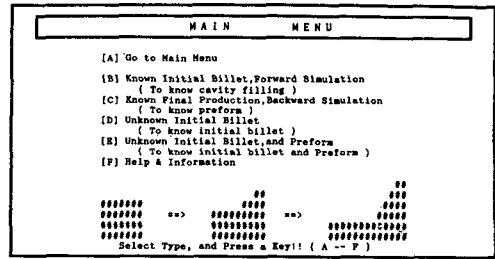
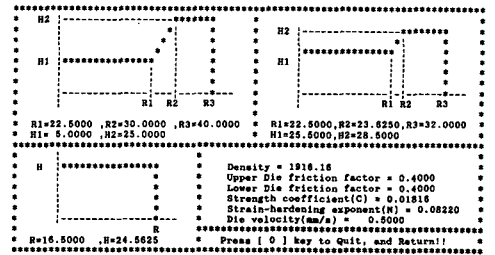


Fig. 2 Flow chart for AXFOR package program



(a) Main menu



(b) Output data

Fig. 3 Visualization for main menu and output data

Machine Interface의 일환으로 사용자가 예비성형체와 초기소재를 설계하는데 보다 편리하게 데이터를 입력할 수 있도록 플래시가 없는 최종제품의 형상만으로 예비성형체와 초기소재를 예측할 수 있는 AXFOR라는 프로그램을 개발하였다. AXFOR는 Fig. 2와 같이 입, 출력 데이터를 처리하는 Main 프로그램 밑에 전방 프로그램과 후방 추적 프로그램으로 나누어져 있다. 또한 AXFOR는 Turbo Pascal을 사용하여 Man-Machine Interface형식으로 데이터를 손쉽게 입력할 수 있고, 출력을 한눈에 알아볼 수 있도록 하였다. Fig. 3은 그 예들을 나타내고 있다.

또한, 다이 하강에 따른 요소 및 격자의 변화를 시각적으로 나타내기 위하여 시뮬레이션 데이터를 직접 받아서 Auto CAD로 그릴 수 있도록 Auto Lisp로 된 프로그램을 첨가하였다.

3. 실험

실험중 소재 내면의 변형형태를 관찰할 수 있는 플라스티신을 소재로 하여 우선 기초실험을 행한 후 다이와 초기소재 및 예비성형체를 제작하여 리브의 높이 대 폭의 비가 1:1인 경우와 2:1인 경우의 단조실험을 통하여 재료의 유동특성과 단조하

중을 파악하고자 한다.

3.1 기초실험

마찰특성과 재료의 경화특성을 조사하기 위하여 링 압축실험과 실린더 압축실험을 MTS(10 kN의 load cell 사용)에서 행하였다. 실험에 사용된 다이는 S 45C로 제작하여 표면을 매끄럽게 연마하였다. 실험시 시편의 온도를 일정하게 하기 위하여 시편과 다이를 오븐(oven)속에서 24시간 정도 보관한 뒤에 사용하였으며, 항온습습기(thermo hygostat)를 이용하여 실내온도를 상온으로 유지하였다.

링 압축실험에서 시편의 크기는 6 : 3 : 2(42 mm : 21 mm : 14 mm)의 비율로 만들었으며 다이속도 30 mm/min로 바셀린(vaseline), 탈크파우더(talc powder)윤활제를 이용하여 50%까지 압축한 뒤에 그 결과를 교정곡선에 표시하여 마찰정수를 구하였다. 그 결과 바셀린은 마찰정수가 0.1정도를 나타내며 탈크파우더는 대개 0.3에서 0.5 범위에 존재하나 0.4부근에서 안정적인 결과를 나타내었다.

실린더 압축실험은 시편의 크기를 직경 대 높이의 비가 1 : 1인 30 mm : 30 mm의 시편을 이용하였다. 실린더 압축실험에 사용되는 윤활제는 링 압축 실험에서 배블링(barreling)현상이 거의 생기지 않는 바셀린윤활제를 가지고 모델재료를 상온에서 일정 다이속도로 압하율 50%까지 압축하였다. 그 결과 플라스틱신의 응력과 변형률관계는 Fig. 4와 같

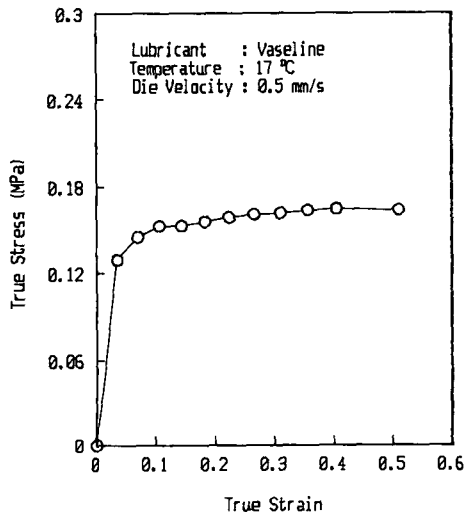


Fig. 4 True stress-strain curve for a pure plasticine

이 표시되며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.17797 \bar{\epsilon}^{0.0822} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

3.2 리브-웨브형 단조실험

소재의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류의 플라스틱신을 각각 반죽하여 재료내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 얇은 원판 모양으로 만들어 교대로 쌓아서 실린더형의 초기소재를 만들고 24시간 정도 상온에서 유지시킨 뒤 사용하였다. 다이는 S 20C의 소재로 제작하였는데 단조후 다이와 플라스틱신의 분리를 용이하게 하기 위하여 반원형의 다이를 각각 따로 만들어 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록 하였다. 사용된 다이의 형상은 Fig. 5와 같다.

실험은 상온에서 다이의 분리가 비교적 용이한 파우더 윤활제(m=0.4)를 사용하여 MTS에서 다이속도 30 mm/min로 하여 실험하였다. 리브의 높이 대 폭의 비가 1 : 1인 경우와 2 : 1인 경우의 다이형상과 치수는 Fig. 6과 같다.

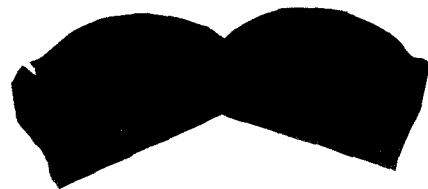
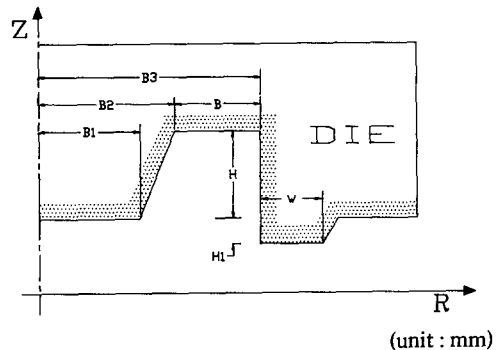


Fig. 5 Appearance of a separated die-set



H/B	B ₁	B ₂	B	B ₃	H ₁	H	W
1 : 1	22.5	25.0	15.0	40.0	3.5	15.0	7.0
2 : 1	22.5	30.0	10.0	40.0	3.5	20.0	7.0

Fig. 6 Configuration and dimensions of a die-set for axisymmetric closed-die forging

4. 결과 및 고찰

4.1 리브 높이 대 폭의 비(H/B)가 1 : 1인 경우
 리브-웹형의 축대칭 단조에서 1 : 1인 경우의 초기소재의 체적은 플래시를 제외한 완제품의 체적에서 역추적한 초기소재에 플래시 경험식을 이용한 플래시 체적을 보정한 것이다. 이 최적의 값을 기준으로 하여 초기소재의 직경 대 높이 비를 조금씩 다르게 하였을 때 다이 충만도와 플래시량을 관찰하여 유동특성을 파악하고자 하였다.

Fig. 7은 초기소재의 직경 대 높이(단위:mm)를 각각 (a) $\phi 66.0 \times 25.5$, (b) $\phi 66.0 \times 23.5$, (c) $\phi 62.0 \times 24.5$, (d) $\phi 64.0 \times 24.5$ 으로 하였을 때 다이 하강이 끝난 후의 다이 충만도를 나타내고, Fig. 8은 각각의 경우에 대한 하중 변화를 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8을 같이 비교해 보면 (a)의 경우는 다이충만은 완전하지만 플래시의 길이가 너무 길어 하중이 상당히 커졌다. (b)의 경우 초기소재의 높이를 조금 줄여서 시뮬레이션을 하면 플래시 길이는 적당하지만 리브 윗쪽 부분의 채움이 완전하지 않았다. (c)의 경우는 소재의 직경방향 길이를 줄이니 플래시부가 너무 적고 리브 바깥쪽 부분의 채움이 완전하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 시뮬레이션 결과로 얻은 최적 초기소재의 치수인 (d)를 이용하여 시뮬레이션해 보면 다이 충만도 완전하고 플래시 길이도 적당하며 하중선도에서 (a)에 비해 하중이 작아지는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 최종제품의 체적과 경험식으로 계산된 플래시부의 체적을 더한 값보다 적은 체적에서 초기소재의 치수비를 적절히 선택하면 작은 하중으로 다이충만을 완전하게 하며 플래시량을 줄일 수 있었다.

또한, 역추적으로 구해진 최적 초기소재($\phi 64.0 \text{ mm} \times 24.5 \text{ mm}$)로 단계진행에 따른 격자변형 양상과 요소의 재구성 과정을 각각 Fig. 9에 나타내었다. 두 과정을 비교해 보면 단계진행에 따라 매 단계에서 소재변형 양상과 다이 충만과정이 유사함을 알 수 있고 최종 단계에서 다이의 리브부분을 완전히 충만시키고 있음을 보여 준다.

그리고 소재의 높이 감소율에 따른 단조하중의 변화를 Fig. 10에서 실험치와 비교하였다.

Fig. 10에서 시뮬레이션 값이 실험값에 비해 전

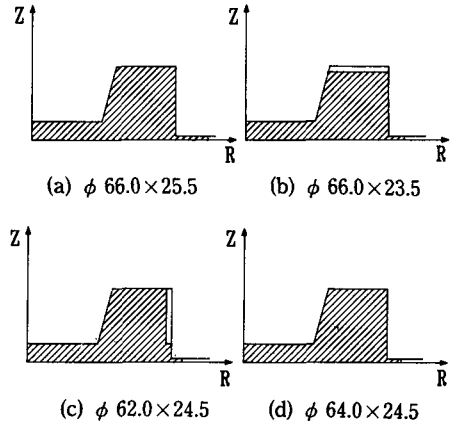


Fig. 7 Variation of cavity filling with initial billet size (H/B=1.0)

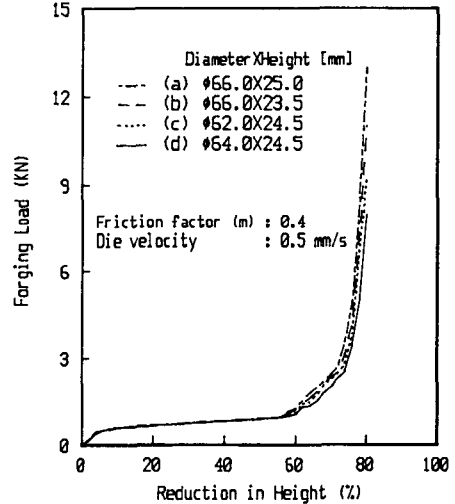


Fig. 8 Variation of forging loads with initial billet size (H/B=1.0)

반적으로 조금 높은 편이다. 이때 값의 차이가 있는 것은 소재내부에 탄성력이 조금 존재함에도 불구하고 완전 소성유동으로 가정된 것과 시스템의 기본요소가 삼각형 및 사각형으로 구성되어 있어 필렛반경(fillet radius)등의 라운딩을 고려하지 못하였기 때문에 실험보다 유동이 어려운 상태가 되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 하중이 조금씩 증가하다가 높이 감소율 65% 부근부터 하중이 급격하게 증가하는데 이것은 플래시가 형성되기 시작하였기 때문이며 높이 감소율이 약 80% 정도에서 소재가 다이의 리브부분을 완전히 충만하고 공정이 완료됨을 알 수 있었다.

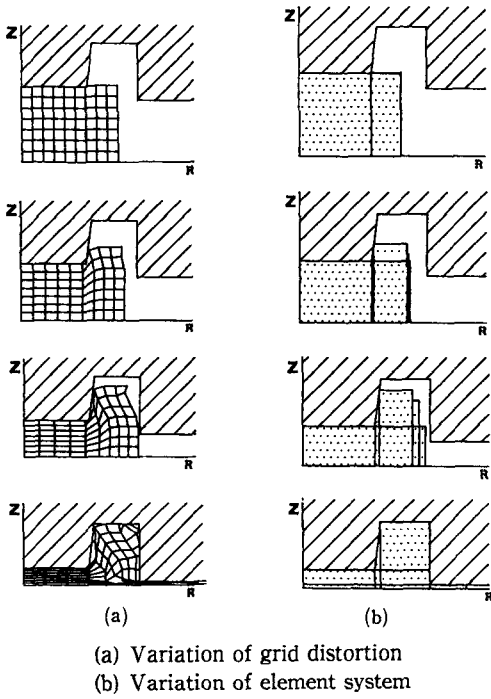


Fig. 9 Variation of grid distortion and element system in cavity filling process ($H/B=1.0$)

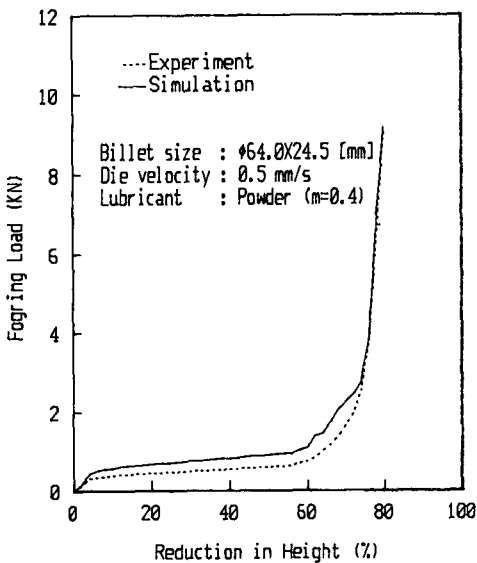


Fig. 10 Comparison between theoretical and experimental forging loads with reduction in height ($H/B=1.0$)

4.2 리브 높이 대 폭의 비(H/B)가 2:1인 경우
 Fig. 11은 리브-웨브형 축대칭 단조에서 2:1의 경우에 예비성형체 치수보정에 따라 다이 하강이

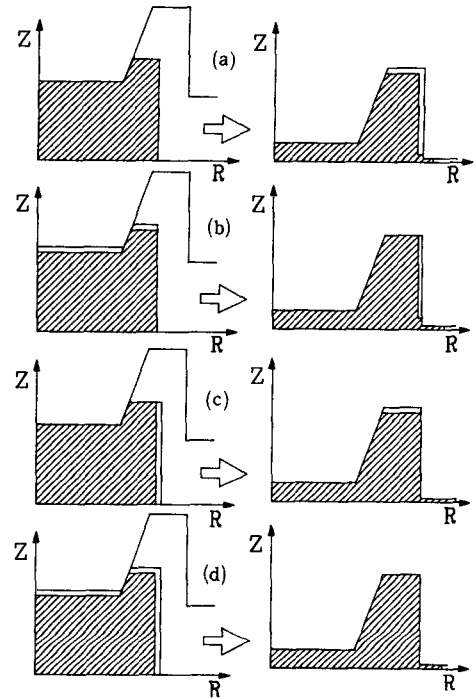


Fig. 11 Variation of cavity filling with volumetric compensation of preform size ($H/B=2.0$)

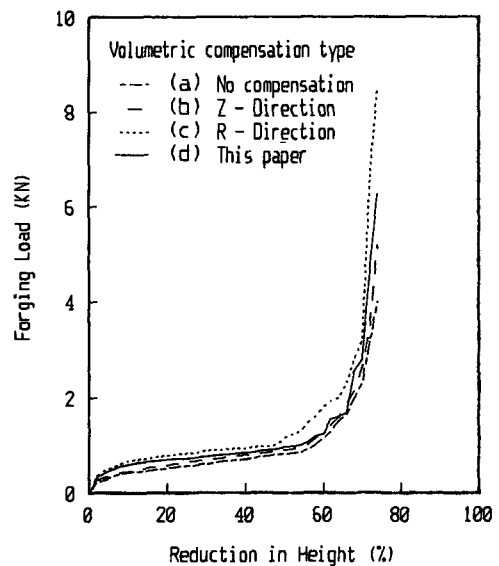


Fig. 12 Variation of forging loads with volumetric compensation of preform size in Fig. 11 ($H/B=2.0$)

끝난 후의 다이 채움을 나타내고 Fig. 12는 Fig. 11의 각각에 대하여 높이 감소율에 따른 하중선도를 나타내고 있다.

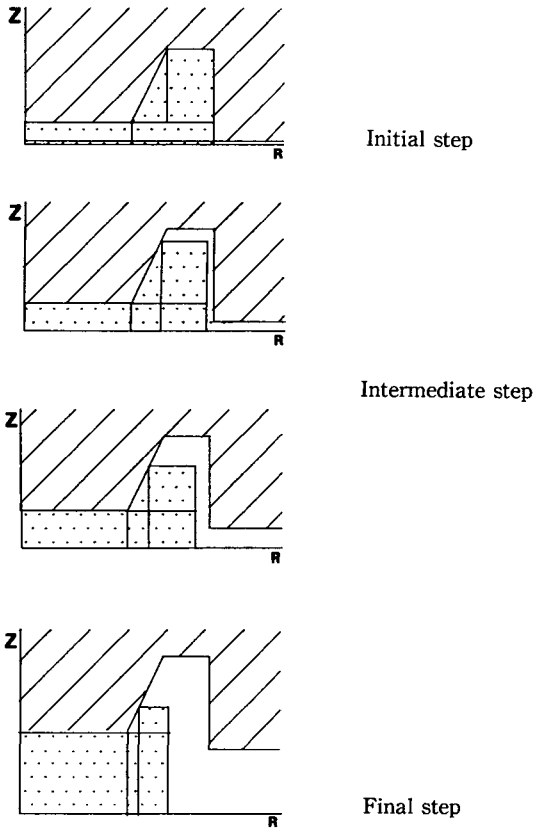


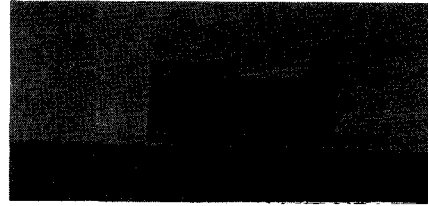
Fig. 13 Backward process from final configuration ($H/B=2.0$)

여기서, (a)는 플래시부를 고려하지 않은 최종 제품의 형상만으로 역추적한 것으로 전방 시뮬레이션을 해보면 다이충만이 완전하지 않음을 알 수 있다. 이때 예비성형체의 역추적과정을 Fig. 13에 나타내었다. (b)는 (a)의 예비성형체에 축방향으로 플래시부의 체적을 보정한 것이다. 그 결과 축방향의 다이채움은 향상되었으나 반경방향은 다 차지 않았다. (c)는 (a)에서 반경방향으로 체적보정한 것으로 다이충만은 별로 향상되지 못했고 플래시가 길고 하중이 커졌다. (d)는 (a)의 형상에 본 연구의 체적보정방법을 이용하여 얻은 예비성형체로 다이하강이 끝난후 다이채움을 나타낸다. 이때는 리브의 윗쪽 부분도 모두 차고 플래시와 하중의 크기도 적절함을 알 수 있다. 이와 같이 체적을 보정한 위치에 따라 소재유동과 다이충만, 플래시량, 하중 등이 다르게 나타남을 알 수 있다.

따라서 본 연구의 체적보정방법이 최적 예비성형



(a) Initial billet



(b) Preform



(c) Final production

Fig. 14 Flow patterns for the cavity filling process in the experiment ($H/B=2.0$)

체와 초기소재를 설계하는데 프로그램상의 반복수행으로 인한 시행착오는 있을 수 있으나 저자의 경험으로는 플래시가 있는 최종형상에서 역추적할 경우에 미리 최적의 플래시를 설계하는 일 또한 시간적인 손실과 번거로움이 존재함으로 플래시 없는 최종제품에서 예비성형체를 설계하는 것이 중요하다.

리브 높이 대 폭의 비가 2:1인 경우에 대해 실린더 형태인 초기소재로 시뮬레이션한 결과 어떠한 직경과 높이 비로도 다이충만이 완전하지 않음을 알 수 있었고 이것으로 리브 높이 대 폭의 비가 2:1 또는 그 이상인 경우에는 예비성형체가 필요함을 알 수 있었다.

역추적 시뮬레이션으로 선정된 초기소재를 사용하여 예비성형체를 만들고 그것으로 다시 2:1 다이에서 완전한 최종제품을 제작하였다. Fig. 14는 2:1인 경우의 초기소재, 예비성형체, 최종제품의 형상을 각각 보여준다. 여기서, 각 단계에 따른 유동형상이 실험결과와 시뮬레이션결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

리브-웹브형 축대칭 단조공정에서 다이충만과정과 최적 예비성형체 및 초기소재를 예측하는 상계요소해석 프로그램을 개발하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 토대로 모델재료인 플라스틱인을 이용하여 단조실험 후 비교 검토하였다. 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 플래시가 없는 최종제품에서 역추적하여 얻은 예비성형체에 플래시 경험식에 의한 자동 체적보정으로 최적의 초기소재 및 예비성형체를 얻을 수 있는 수치해석 프로그램을 개발하였다.

(2) 수치해석 프로그램에 Wolf, Teterin, Tarnovskij 등의 플래시 경험식을 포함시킴으로써 플래시 설계에 따른 번거로움을 줄일 수 있었고, 플래시가 없는 최종제품에서 역추적하여 얻은 예비성형체를 전방 시뮬레이션했을 때 다이채움이 불완전한 부분의 체적보상 기준을 마련 하였다.

(3) 데이터를 손쉽게 입력할 수 있고, 출력을 한 눈에 알아볼 수 있도록 하였으며 생산현장에서 쉽게 사용할 수 있는 Man-Machine Interface 프로그램을 개발하였다.

(4) 시뮬레이션결과를 토대로 한 플라스틱인의 실험에서 실험결과와 이론결과를 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 91년도 한국과학재단의 특정 목적기초 연구의 일부로 수행되었으며, 동재단의 관계자분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Kobayashi, S., 1990, "Design and Simulation in Forging and Rolling," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 733~740.
- (2) Hwang, S. M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Disk Forging," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 26, No. 3, pp. 231~143.
- (3) Vemuri, K. R., Oh, S. I. and Altan, T., 1989,

- "A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 29, No. 4, pp. 505~518.
- (4) Kudo, H., 1960, "An Upper Bound Approach to Plane-Strain Forging and Extrusion- I," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 1, pp. 57~83.
- (5) Kudo, H., 1960, "Some Analytical and Experimental Studies of Axisymmetric Cold Forging and Extrusion- I," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 2, pp. 102~127.
- (6) Osman, F. H. and Bramley, A. N., 1982, "An Incremental Analytical Technique for Foding and Extrusion of Metals," *Int. Conf. on Num. Methods in Industrial Forming Processes*, Swansea, U. K., pp. 333~342.
- (7) Osman, F. H., Bramley, A. N. and Ghobrial, M. I., 1984, "Forging and Preform Design Using UBET," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 563~568.
- (8) 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.
- (9) Kiuchi, M. and Katrato, A., 1984, "Application of UBET to Non-Axisymmetric Forging," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 12, pp. 967~972.
- (10) 김현영, 1990, "UBET를 이용한 형단조 예비가공형 설계," 서울대학교, 박사학위논문.
- (11) 김현영, 김동원, 1993, "소성가공시 재료유동에 대한 수치해석 및 모델 실험," 대한기계학회 논문집, 제17권 제2호, pp. 285~299.
- (12) Himmelblau, D. M., 1972, *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill.
- (13) Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "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.
- (14) Altan, T., et al., 1973, *Forging Equipment, Materials and Practices*, Metal and Ceramics Information Center.