

비축대칭 형상의 단조 공정 설계에 관한 연구

김 영 호,* 배 원 병,** 이 중 헌,*** 박 재 훈***

A Study on the Process Design of Non-Axisymmetric Forging Components

Young-Ho Kim,* Won-Byong Bae,** Jong-Heon Lee,*** Jae-Hoon Park***

ABSTRACT

An upper bound elemental technique (UBET) program has been developed to predict forging load, die-cavity filling, preform in non-axisymmetric forging. To analyze the process easily, it is suggested that the deformation is divided into two different parts. Those are axisymmetric part in corner, plane-strain part in lateral. The plane-strain and axisymmetric parts are combined by building block method. And the total energy is computed through combination of three deformation parts. A dumbbell-type preform has been obtained from height and volumetric compensations of the billet based on the backward simulation. Experiments have been carried out with pure plasticine at room temperature. Theoretical predictions are in good agreement with experimental results.

Key Words : Non-Axisymmetric(비축대칭), Rib-Web Shape(리브-웹형상), UBET(상계요소법), Building Block Method(빌딩블럭 방법), Preform Design(예비성형체 설계), Dumbbell-Type Billet(아령모양의 시편), Plasticine(플라스티신)

1. 서 론

항공기 구조용 부품이나 자동차 부품 중에는 소재 단면의 형상이 리브-웹(rib-web)형인 부품이 상당히 많다. 리브-웹형 단조 부품에 대한 연구가 다수 있으나 대부분 재료유동이 평면변형이나 축대칭유동이고 비

축대칭 유동에 관한 연구는 해석상의 어려움 등의 이유로 저조한 편이다.

소성가공 공정을 해석하는데 널리 사용되고 있는 유한요소법(FEM)⁽¹⁾은 다른 해석 방법에 비해 비교적 정해에 가까운 해를 구할 수 있다는 잇점이 있지만 방대한 계산량, 현장에서의 실용성, 계산장비나 인적자원에

* 부산대학교 생산기계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구 센터

** 부산대학교 기계설계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구 센터

*** 부산대학교 대학원 생산기계공학과

대한 경제성의 측면에서 제약이 있다. 그러나 상계요소법(UBET: Upper Bound Elemental Technique)은 그 적용의 간편함과 계산시간의 단축, 해석결과와 상대적인 유용함에서 장점이 인정되고 있다.

비축대칭에 관한 연구를 살펴보면, Kiuchi 등은 소재를 해석 가능한 요소로 나누고 상계요소법을 이용하여 측면 플래시가 있는 원주의 비축대칭 단조 문제를 해석^(2,3)하였고, 비축대칭 해석에서 비교적 해석이 용이한 기본적인 단조공정(업셋팅, 압출 등)들을 상호 연립, 통합하여 복잡한 형상의 전체 속도장을 구성하는 범용 시뮬레이터(FORMS)⁽⁴⁾ 개발에 관한 연구를 행하였다. 또한 Kiuchi 등은 여러가지 단면 형상의 전방압출 문제에 대하여 상계법을 이용한 일반적인 3차원 동적가용 속도장의 개발에 관한 연구^(5,6)를 행하였다. 그러나, 3차원 동적가용 속도장의 수식화가 용이하지 않고 매우 복잡하다는 단점이 있다. Wada 등⁽⁷⁾은 3차원 형상을 직육면체, 삼각기둥, 직각 사면체, 5면체의 네개의 3차원 요소로 분할하여 상계요소법으로 해석하였으나, 많은 미지변수의 최적화 문제로 인하여 복잡한 형상의 문제에 적용하기는 미흡한 점이 있다.

한편, 유한요소법에 의한 연구로는 Argyris 등⁽⁸⁾은 무마찰 상태에서 항공기 터빈 블레이드를 해석하였고, Pillinger 등⁽⁹⁾은 제한된 마찰상태에서 커넥팅로드를 알루미늄을 이용하여 단조 해석하였다. 최근에는 Yanagimoto 등⁽¹⁰⁾이 3차원 단조가공 문제에 대하여 변형이 작은 영역은 상계요소해석을 변형이 큰 영역은 유한요소법을 적용하는 복합 수치해석을 실시하였다. 또한 Marques⁽¹¹⁾ 등은 사각 링인 비축대칭 문제에서 단면이 사각형인 소재를 원형으로 단조하는 공정으로 유한요소법을 사용하여 평면변형부와 축대칭변형부로 나누어 해석하였다.

유한요소법에 의한 비축대칭 부품의 예비성형체(pre-form) 설계에 관한 연구는 다소 있으나 상계요소법에 의한 연구는 상대적으로 적으며, Imai 등⁽¹²⁾이 상계요소해석의 범용 시뮬레이터인 FORMS를 이용하여 원통에 비축대칭 플랜지가 달린 제품의 예비성형체를 제시하였고, Kim 등⁽¹³⁾에 의하여 커넥팅로드(connecting rod)의 설계를 위한 예비성형체를 제안한 적이 있다.

본 연구에서는 리브-웹브형 단면을 가진 비축대칭 단조품의 공정설계를 위하여 상계요소법을 사용하였으며 비축대칭 형상을 비교적 해석이 용이한 평면변형부와 축대칭변형부로 나누고 경계에서의 전단을 고려하여 결

합하는 빌딩블럭(building block) 방법을 사용하였다. 리브의 높이 대 폭의 비(H/B)가 1:1인 경우에는 단조가공시 각 단계에서의 미지의 경계 속도와 변수들을 준 독립변수로 하여 평면변형부와 축대칭변형부, 경계에서의 에너지를 조합한 전체 에너지소비율을 최적화 기법으로 최소화함으로써 각 부의 동적가용속도장을 결정하였다. 또한 여러가지 형상의 초기소재로부터 다이충만과정과 단조하중 등을 예측하여 각각의 소재에 관한 특성을 조사하였다.

2:1인 경우에는 최종형상을 평면변형부와 축대칭변형부로 나누고 각각 독립하여 역추적⁽¹⁴⁾한 후 얻은 형상에 리브부의 높이보정을 통하여 형상을 단순화하였고 전방시뮬레이션에 의한 다이충만정도를 파악하고 불충만시 소재 전체의 뒷 부분을 체적보정함으로써 아령(dumb-bell) 모양의 비교적 단순한 예비성형체를 설계하였다.

그리고 이른해석의 타당성을 검증하기 위하여, 모델재료인 백색과 흑색의 플라스틱인(plasticine)을 교대로 적층하여 시편을 만든 후에 M.T.S(Material Testing System)를 이용하여 검증하였다.

2. UBET해석

본 연구에서의 해석모델은 Fig. 1과 같으며 단면이 리브-웹브형인 비축대칭 형상을 해석이 용이한 평면변형부와 축대칭변형부로 나누고 결합하는 방법을 사용하여 해석하고자 한다.

평면변형부와 축대칭변형부를 각각 여러가지의 단순한 요소로 분할하고, 분할된 각 요소의 속도장은 외부 속도 경계조건과 요소들 사이의 수직속도 연속조건, 체적 일정 조건을 만족하는 Oudin⁽¹⁴⁾과 Kiuchi⁽¹⁵⁾ 등이 제안한 동적가용 속도장을 이용하였다. 평면변형부는 Oudin 등이 제안한 사각형과 사다리꼴 요소를 사용하였고, 축대칭변형부는 Kiuchi 등이 제안한 사각 링 요소와 삼각형 링 요소를 사용하였다. 단조공정해석을 위하여 변형단계에 따른 가공경화를 고려하지 않고, 유동응력이 유효변형률속도만의 함수로 간주하여 해석하였다. 전방 시뮬레이션의 흐름도(flow chart)는 Fig. 2와 같다.

2.1 비축대칭 단조에서의 소재 변형

단조 가공시 임의의 단계에서의 전체 에너지소비율은 다음과 같다.

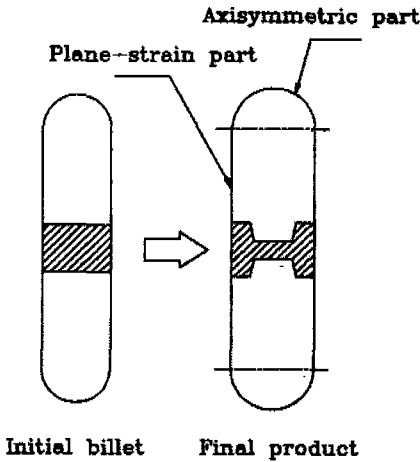


Fig. 1 Analytical model of non-axisymmetric forging

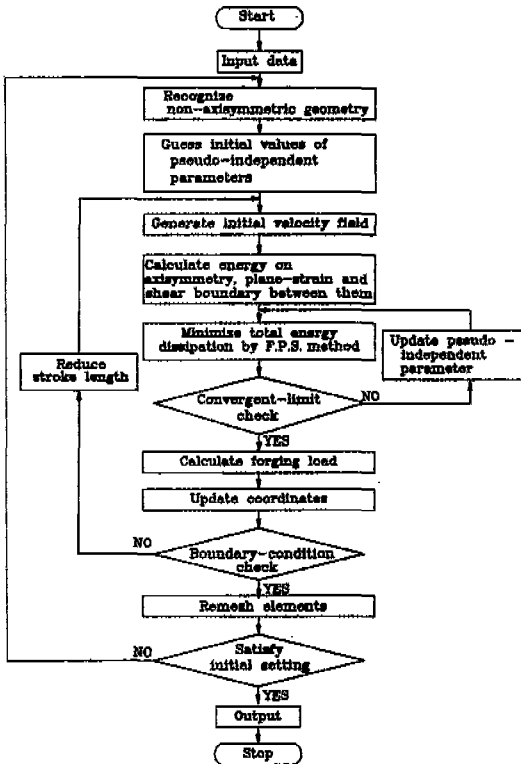


Fig. 2 Flow chart for forward UBET simulation

$$J^* = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_s + \sum \dot{W}_f \quad (1)$$

위의 식(1)에서 \dot{W}_i 는 평면변형부와 축대칭변형부에서의 내부 변형 에너지소비율, \dot{W}_s 는 평면변형부와 축대칭변형부의 요소와 요소 사이의 전단 에너지소비율(평면변형부와 축대칭변형부의 경계에서의 전단에너지 포함), \dot{W}_f 는 평면변형부와 축대칭변형부에서의 다이와 소재 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰 에너지소비율을 나타낸다.

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

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma}_t \dot{\epsilon}_i dV \quad (2)$$

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

식(2)에서 $\bar{\sigma}_t$ 는 t번째 단계에서 각 요소의 유효응력을 나타내며, 유효응력은 유효변형률속도만의 함수로 가정하여 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma}_t = C \dot{\epsilon}_i^m \quad (3)$$

여기서 변형률속도, $\dot{\epsilon}_i$ 는 각 단계에서 식(1)의 전체 에너지소비율을 최소화하는 동적가용속도장에서 구한다.

전단 에너지소비율 \dot{W}_s 는 속도불연속면의 전단 에너지소비율을 나타내며 다음 식과 같다.

$$\dot{W}_s = \frac{\bar{\sigma}_o}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta V_s| ds_s + \dot{W}_{boundary} \quad (4)$$

여기서, $\bar{\sigma}_o$ 는 두 인접요소의 유효응력의 산술평균을 나타내며, $|\Delta V_s|$ 는 요소 사이의 전단면에서의 속도 불연속량을 나타내고 $\dot{W}_{boundary}$ 는 평면변형부와 축대칭변형부의 경계에서 전단 에너지소비율을 나타낸다.

또한, 마찰 에너지소비율 \dot{W}_f 는 아래 식과 같다.

$$\dot{W}_f = m \frac{\bar{\sigma}_o}{\sqrt{3}} \int_s |\Delta V_f| ds_f \quad (5)$$

여기서, m은 마찰정수, $|\Delta V_f|$ 는 소재와 다이 접촉면에서의 속도 불연속량을 나타낸다.

평면변형부와 축대칭변형부, 경계에서의 준독립변수, p_i, a_i, c_i 에 대하여 전체 에너지소비율, $J^* = J^*(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$ 를 직접탐색법의 일종인 FPS(Flexible Polyhedron Search)⁽¹⁶⁾법을 사용하여 J^* 를 최소화함으로써 비축대칭 전체속도장을 결정하였다.

그리고 가공하중(forming load) L은 다음 식으로

구하였다.

$$L = \frac{J}{V_D} \quad (6)$$

여기서, V_D 는 다이속도이다.

2.2 수직, 수평투사에 의한 요소재구성

다이 진행에 따른 재료의 층만과정을 조사하기 위해서는 가공 전체단계를 시간 Δt 의 증분에 따라 여러 단계로 나누고, 각 단계에서의 전체 에너지소비율을 최소로 하는 동적가용속도장을 이용하여 평면변형부와 축대칭변형부에서의 각 요소의 변형 후 좌표를 결정한다. 각 요소의 시간증분 Δt 이후의 좌표는 다음과 같다.

$$X' = X + \Delta t \cdot U \quad (7)$$

위의 좌표 X' 는 Δt 변형 후의 각 요소들의 절점좌표를 나타내며, X , U 는 각 요소들의 변형전 절점좌표와 경계면의 속도를 나타낸다.

변형 후 인접 요소 사이에 미끄럼이 발생하여 접선 속도 불연속이 생기게 되고, 요소의 크기와 경계 조건이 바뀌게 되어 인접 요소들 사이에서 경계의 불일치 등이 발생한다. 따라서 다음 단계를 진행하기 위하여 수직, 수평 투사에 의한 요소 재구성방법⁽¹³⁾을 사용하였다.

2.3 빌딩 블럭방법에 의한 해석

비축대칭 문제와 같이 복잡한 형상의 제품은 해석 가능한 단순한 형상의 요소들의 조합으로 근사화할 수 있다. 해의 단순화를 위하여 Fig. 1의 최종제품에서와 같이 양쪽 라운딩 부분 두개를 합쳐 축대칭 유동으로 가정하였으며 나머지 직선 부분의 요소는 폭에 비해 길이가 상대적으로 길기 때문에 평면변형으로 가정하여 해석하였다. 이와 같은 가정은 Marques⁽¹¹⁾, Kim⁽¹³⁾ 등의 연구에서도 찾아볼 수 있다. 또한 다이가 진행됨에 따라 입의 단계에서 평면변형부와 축대칭변형부의 유동형상이 다르게 되므로 경계에서 요소들이 일치하지 않고 엇갈림이 생긴다. 그 경계부분의 속도불연속에 의한 전단 에너지소비율을 계산한 후 각각 조합하는 방법⁽¹⁷⁾을 사용하였고 각 부의 에너지를 합한 전체 에너지소비율을 최적화함으로써 비축대칭 전체 에너지소비율을 계산하였다.

평면변형부와 축대칭변형부의 경계에서 중첩되는 각 요소의 전단 에너지소비율은 다음과 같이 구하였다.

$$\dot{W}_{\text{boundary}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int |\Delta V| ds \quad (8)$$

여기서,

$$|\Delta V| = \sqrt{(U_{\text{axi,R}} - U_{\text{plane,X}})^2 + (V_{\text{axi,Z}} - V_{\text{plane,Y}})^2} \text{ 이다.}$$

또한, ds 는 경계부분에서 평면변형부의 요소와 축대칭변형부에서의 요소의 공유 면적이며, $U_{\text{axi,R}}$ 은 경계에서 축대칭변형부의 R방향 속도 성분, $U_{\text{plane,X}}$ 는 경계에서 평면변형부의 X방향 속도 성분, $V_{\text{axi,Z}}$ 는 경계에서 축대칭변형부의 Z방향 속도 성분, $V_{\text{plane,Y}}$ 는 경계에서 평면변형부의 Y방향 속도 성분을 나타낸다.

2.4 예비성형체 설계

예비성형체 설계는 가공공정 설계에서 가장 중요한 단계 중의 하나이다. 밀폐형 단조에서 예비성형체 설계는 예비성형체의 치수와 단제수, 형상의 설계를 포함한다. 본 연구는 예비성형체 설계를 위해 Park 등⁽¹⁸⁾이 제안하고 Kim 등⁽¹³⁾이 축대칭 및 비축대칭 단조문제에 상계요소법으로 예비성형체를 설계하기 위해 도입한 역추적 기법을 기초로 하였으며 여기에 높이보정과 체적보정을 통한 비교적 단순한 예비성형체를 설계하였다.

최종형상을 평면변형부와 축대칭변형부로 나누고 각각 다이에 접하는 면을 자유 표면으로 하여 직선 단계의 절점들을 역추적하였다.

역추적시에도 전방시물레이션의 임의 단계와 같이 평면변형부와 축대칭변형부의 유동형상이 다르므로 경계에서 요소들이 일치하지 않고 엇갈림이 생겨 역추적이 끝난 상태의 형상도 윗 방향과 바깥 방향에서 서로 어긋나게 된다. 이런 경우에 예비성형체 다이가 매우 복잡하게 되어 수치해석과 금형다이 제작에 어려움이 있으며 예비성형체 형상의 단순화 작업이 필요하다.

따라서, 최종형상에서 역추적하여 얻은 형상에 먼저 평면변형부와 축대칭변형부의 리브 윗 부분의 높이를 같게하기 위하여 역추적하여 얻은 형상의 체적과 일치하도록 요소의 바깥 경계는 고정시키고 윗 경계만 높이 수정을 하였다. 다음에 리브부의 시편 높이를 보정한 형상을 초기소재로하여 리브의 높이 대 폭의 비가 2:1인 다이로 전방 시물레이션을 경우 리브가 다 차지 못할 경우는 덜 찬 부분의 소재체적을 파악하여 초기소재의 웨브부를 포함한 윗 부분에 일정하게 체적보정하여 다시 시물레이션함으로써 다이충만이 완전하고 비교

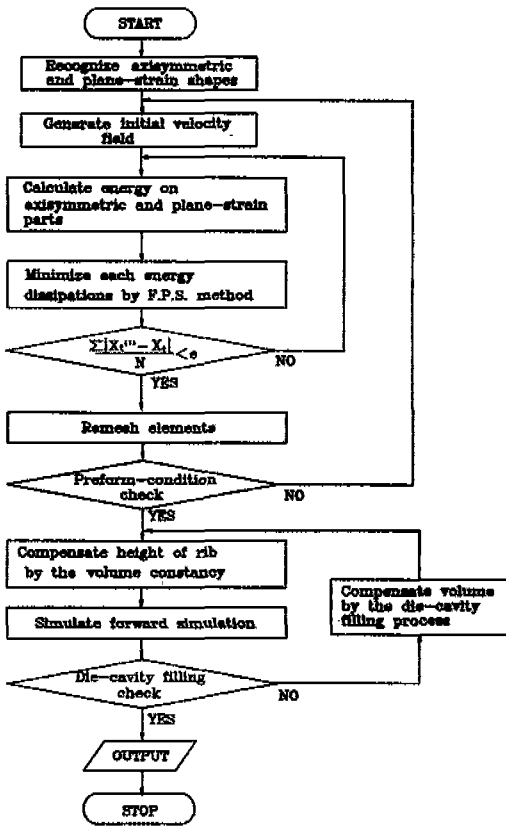


Fig. 3 Flow chart of backward simulation for preform design

적 형상이 단순한 아령 모양의 예비성형체를 설계하는 방안을 강구하였다.

아령 모양의 예비성형체를 얻기 위한 흐름도는 Fig. 3과 같다.

3. 플라스틱을 이용한 실험

비축대칭 리브-웨브형 제품의 단조실험을 위하여 재료는 순수 플라스틱을 사용하였다.

플라스틱의 기초실험에 관한 마찰특성과 유동특성은 저자들의 선행연구⁽¹⁹⁾에서 언급되었다. 유동응력 $\bar{\sigma}$ 와 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 와의 선도에서 변형률 $\bar{\epsilon} = 0.05$ 에서의 구성방정식은 다음과 같다.

플라스틱 : 17°C

$$\bar{\sigma} = 0.224 \dot{\epsilon}^{0.117} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

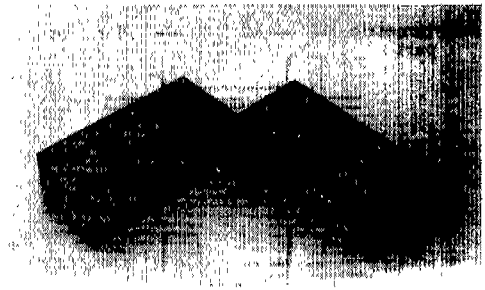
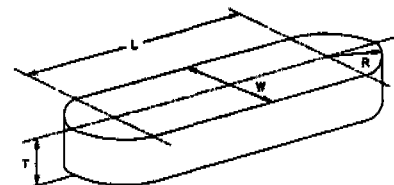
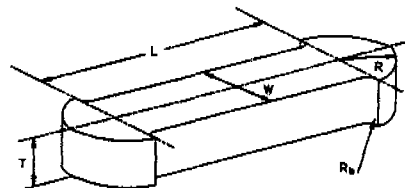


Fig. 4 Upper and lower dies for experiment of plasticine



(a) Billet 1 and Billet 3



(b) Billet 2

Dimensions of initial billet (H/B=1:1) (Unit : mm)

Billet	Dimension	T	W	L	R	R _b
Billet 1		24.4	30.0	120.0	15.0	
Billet 2		24.4	30.0	120.0	18.4	2.0
Billet 3		24.4	36.8	120.0	18.4	

* H : height of rib
B : width of rib

Fig. 5 Dimensions and configuration of initial billet for Non-axisymmetric forging (H/B=1:1)

플라스틱은 소재의 유동형태를 관찰하기 위해 시편은 흑색과 백색의 두가지 종류를 각각 반죽하여 재료 내의 기포를 충분히 제거시킨 후, 사각 빌렛 모양으로 플라스틱을 적층하여 양끝 부분이 라운딩이 되도록 만들었다.

또한 아령형 시편은 평면변형부와 축대칭변형부의 경

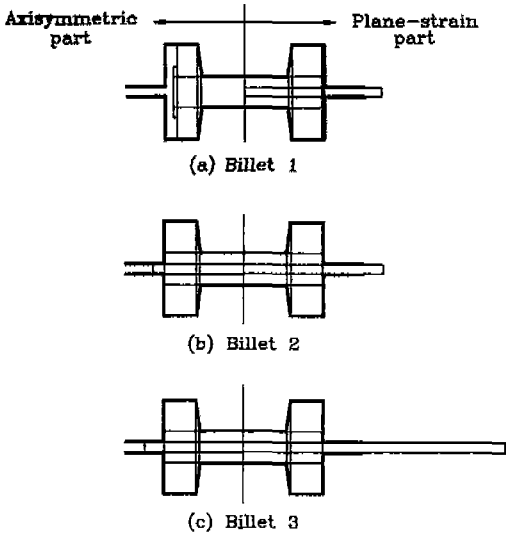


Fig. 6 Die-cavity filling of final step for various initial billets in Fig. 5

계를 적당히 라운딩을 주어 단조시에 제품의 결함 발생을 방지하도록 하였다.

다이는 S20C의 소재로 제작하였는데, 단조 후 다이와 플라스틱인의 분리를 용이하게 하기 위하여 다이의 반을 각각 따로 만들어 핀으로 중심을 맞추고 볼트로 조일 수 있도록 하였다.

플라스틱인의 시험장치는 로드 셀이 100 kN인 M.T.S를 이용하여 다이속도 0.5 mm/sec로 탈크 파우더 (talc powder) ($m=0.4$)를 사용하여 실험하였고, M.T.S에 부착된 X-Y 플로터로 하중곡선을 얻었다.

실험하는 동안 시편을 일정 온도로 유지하기 위하여 시편과 다이를 오븐속에서 24시간 정도 보관하여 사용하였으며, 항온항습기를 사용하여 실내온도를 상온으로 일정하게 유지하였다. 플라스틱인의 단조를 위한 금형 다이의 예는 Fig. 4와 같다.

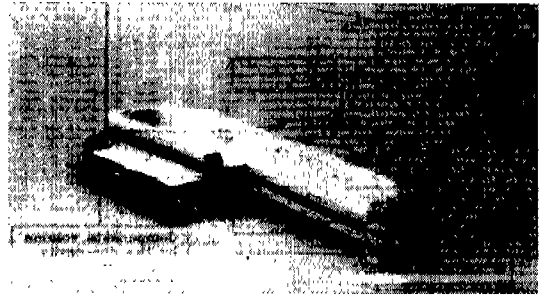
4. 결과 및 검토

4.1 리브의 높이 대 폭의 비가 1:1인 경우

Fig. 1의 비축대칭 형상의 공정설계를 위하여 리브의 높이 대 폭의 비가 1:1인 경우에 대해 Fig. 5와 같이 세가지 시편을 사용하였다. Fig. 6, 8은 Fig. 5의 치수가 다른 세 시편을 이용하여 전방 시뮬레이션했을 경우의 최종단계에서의 요소충만 상태와 실험에 의한



(a) Billet 1



(b) Billet 2



(c) Billet 3

Fig. 7 Flow pattern of final step of multi-layered plasticine for various initial billets in Fig. 5

플라스틱인의 최종 유동형상, 단조하중 선도를 보여주고 있다. 여기서, Billet 1은 평면변형부에서는 다이충만을 이루면서 플래시가 적절히 생겼으나 축대칭변형부에서는 리브부분에 소재채움이 불충분하였고 플래시도 생기지 않았다. Billet 2는 축대칭변형부의 소재채움을 향상시키기 위하여 축대칭변형부의 바깥방향으로 체적을 보정한 아령형 시편으로 평면변형부와 축대칭변형부가 모두 다이의 소재충만이 이루어졌고 플래시량도 적절한 상태를 나타내었다.

그러나 Billet 2와 같은 아령형 시편은 초기소재로서

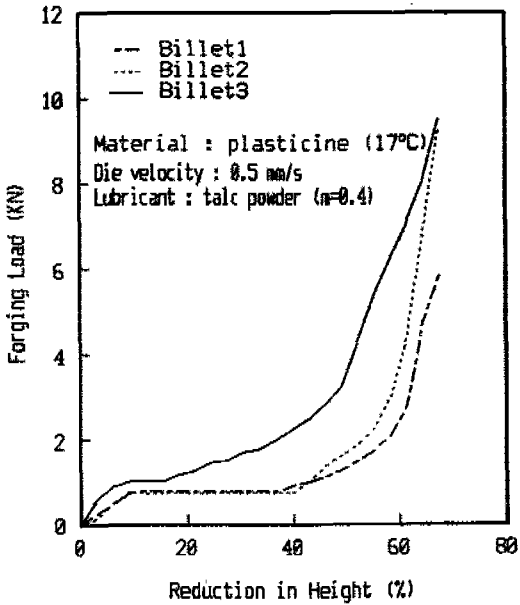


Fig. 8 Variation of experimental forging loads for various initial billets in Fig. 5

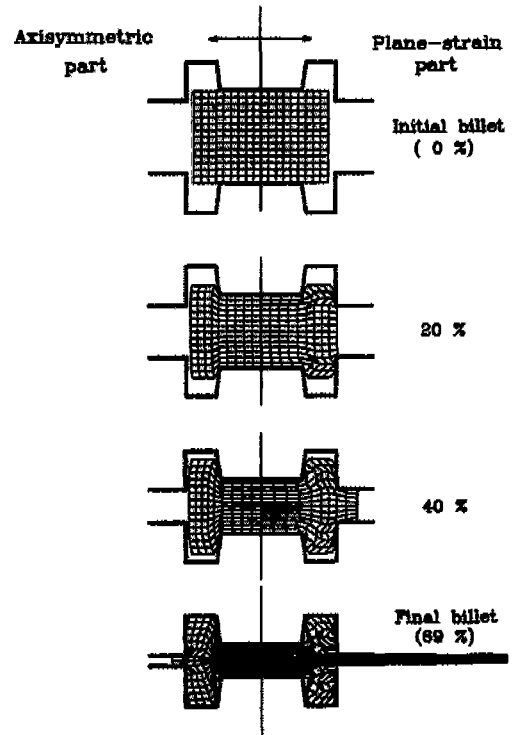


Fig. 10 Die-cavity filling process of grid distortion pattern for Billet 3 in Fig. 5 ($H/B=1:1$)

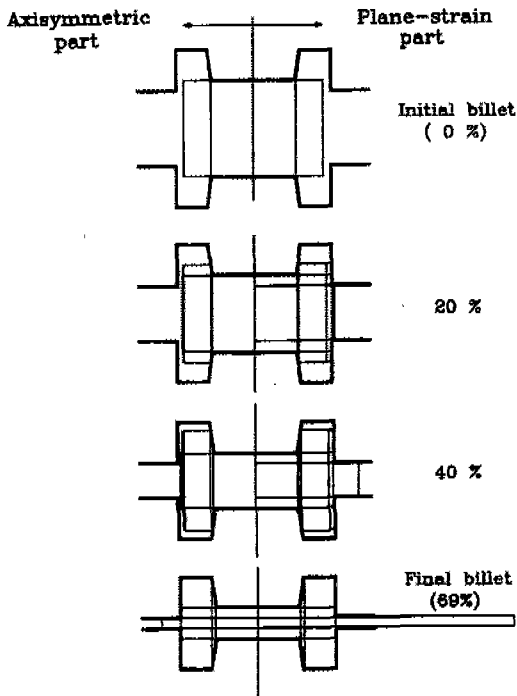


Fig. 9 Die-cavity filling process of element system for Billet 3 in Fig. 5 ($H/B=1:1$)

사용하기로는 또 다른 공정이 추가되므로 초기소재의 형상으로 선택하기에는 어려움이 있다. 따라서 축대칭 변형부의 다이채움이 보장되면서 초기소재의 형상도 비교적 간단한 형상이 요구되므로 Billet 2의 축대칭 변형부의 외각 경계치수를 평면변형부에 연장한 Billet 3 시편을 사용함으로써 Billet 2에 비해 평면변형부에서 상당량의 플래시가 발생하나 형상의 단순함이 인정된다.

Fig. 8의 단조하중의 실험치 선도에서 보면 Billet 1, 2는 평면변형부가 같기 때문에 높이감소율 약 40% 부근까지는 하중의 증가가 유사하나 아령 모양의 시편인 Billet 2는 높이감소율 40% 부근에서부터 평면변형부와 축대칭변형부가 거의 동시에 플래시가 생기는 반면 Billet 1은 평면변형부에서만 플래시가 발생하므로 Billet 2가 Billet 1에 비해 높이감소율 40% 부근부터 하중이 증가하고 있음을 보여준다. 반면에 Billet 3은 높이감소율 17% 정도에서 평면변형부에서 플래시가 생기기 시작하고 55% 부근에서 축대칭변형부의 플래시가 발생함으로 플래시 생성시기를 기준으로 하중의 증가

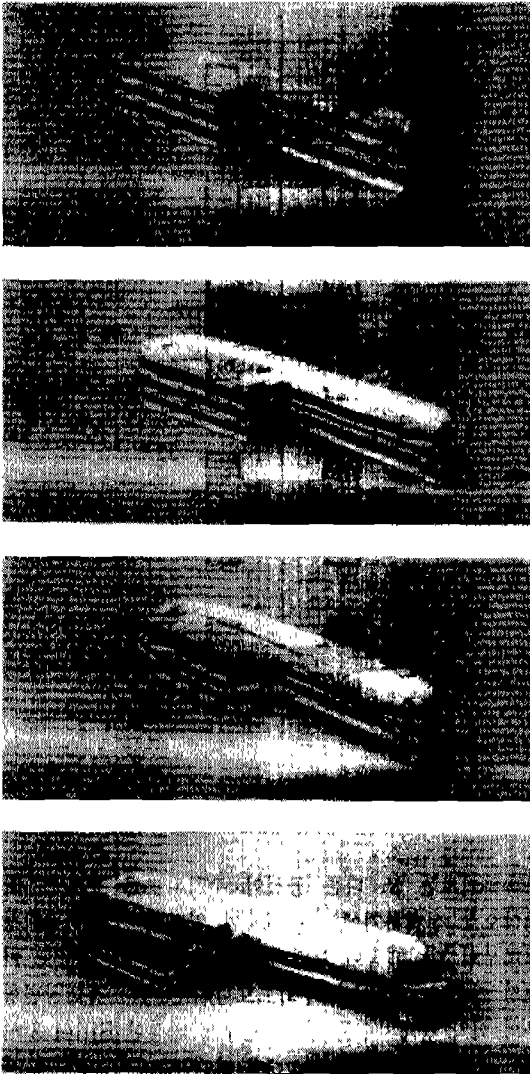


Fig. 11 Material flow pattern of multi-layered plasticine for Billet 3 in Fig. 5 ($H/B=1:1$)

폭이 클을 알 수 있다.

Fig. 9, 10은 Billet 3에 대해 초기단계에서 최종까지의 평면변형부와 축대칭변형부의 요소충만과 격자변형과정을 나타내고 있으며, Fig. 11은 플라스틱 실험에 의한 여러 단계에서의 재료충만 과정을 시편의 1/4을 절단하여 평면변형부와 축대칭변형부의 유동을 쉽게 볼 수 있도록 하였다. Fig. 9, 11에서 다이가 진행됨에 따라 임의의 단계에서 평면변형부와 축대칭변형부에서 윗 쪽과 바깥방향으로 재료 유동이 달라 두 경계에

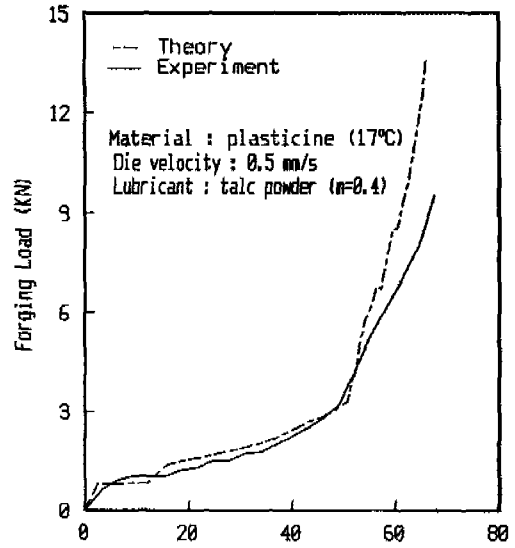


Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental forging loads for Billet 3 in Fig. 5 ($H/B=1:1$)

서 요소경계가 어긋나게됨을 알 수 있다. 이것은 Fig. 11의 실험에서도 확인할 수 있으며, 이 경계를 해석하기 위하여 앞에서 언급한 빌딩블럭 방법을 사용하였다. 또한 축대칭변형부에 비해 평면변형부에서 플래시가 먼저 생기기 시작하고, 축대칭변형부가 다 채워질 무렵에서는 평면변형부에서 상당량의 플래시가 생김을 알 수 있다. Fig. 12는 Billet 3에 대한 단조하중의 변화를 나타낸다. 이 선도에서 수치해석치가 실험치에 비해 대체로 조금 높은 것은 상계해석으로 인한 원인에 있으며 대체로 잘 일치하고 있다.

4.2 리브의 높이 대 폭의 비가 2:1인 경우

리브의 높이 대 폭의 비가 1:1인 경우, 소재의 다이충만 과정에서 아령 모양의 시편인 Billet 2가 플래시량이나 단조하중 등이 적절함이 확인되었다. 이것은 리브의 높이 대 폭의 비가 2:1인 경우에도 최종제품을 가공하기 위한 예비성형체로 아령 형의 시편형상이 적절함을 예견할 수 있다.

비축대칭 최종제품에서 역추적하면 전방시물레이션의 임의의 단계에서와 같이 평면변형부와 축대칭변형부의 유동양상이 달라 Fig. 13의 최종상태와 같은 리브의 높이와 폭이 다르게 된다. 이러한 형상을 예비성형체로 했을 경우 예비성형체 다이가 매우 복잡하게 되어 수치

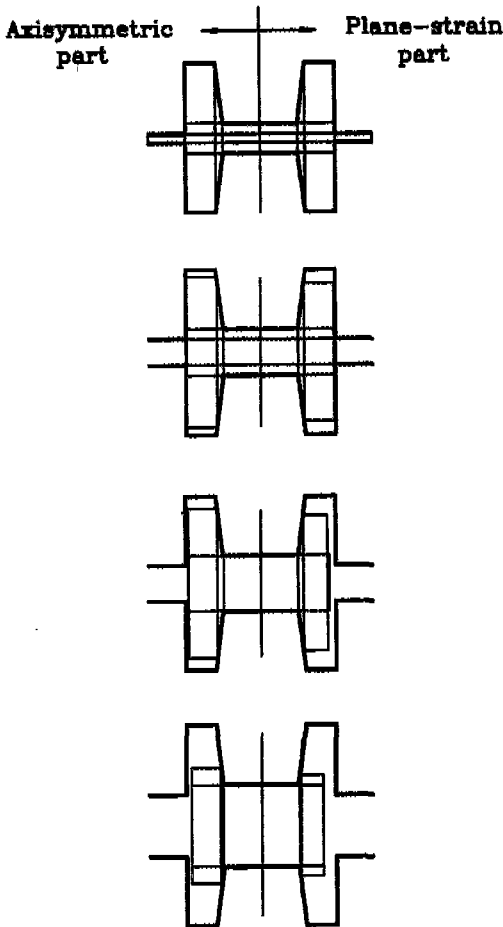


Fig. 13 Backward process from final configuration in non-axisymmetric forging ($H/B=2:1$)

해석과 금형다이 제작에도 어려움이 있으므로 예비성형체 형태의 단순화가 요구된다.

따라서, 먼저 Fig. 14 (a)와 같이 역추적이 끝난 상태의 리브의 높이 y_2 , y_3 를 체적일정 조건에 의하여 높이보정을 하여 y_n 의 높이로 일치시켰다. 이렇게하여 얻은 시편을 이용하여 리브의 높이 대 폭의 비가 2:1인 다이로 전방시물레이션하여 다이충만도를 파악하고 다이 불충만량을 계산하여 Fig. 14 (b)와 같이 웨브를 포함한 윗 부분 전체를 일정하게 체적보정하여 Fig. 15와 같은 아령 모양의 예비성형체를 얻었다. Fig. 14 (b)에서 보면 체적보정한 양이 보정전 체적보다 상대적으로 많은 것은 보정전 형상이 역추적시 초기에 플래시 길이를 플래시 랜드의 끝에 설정하여 역추적하였기 때

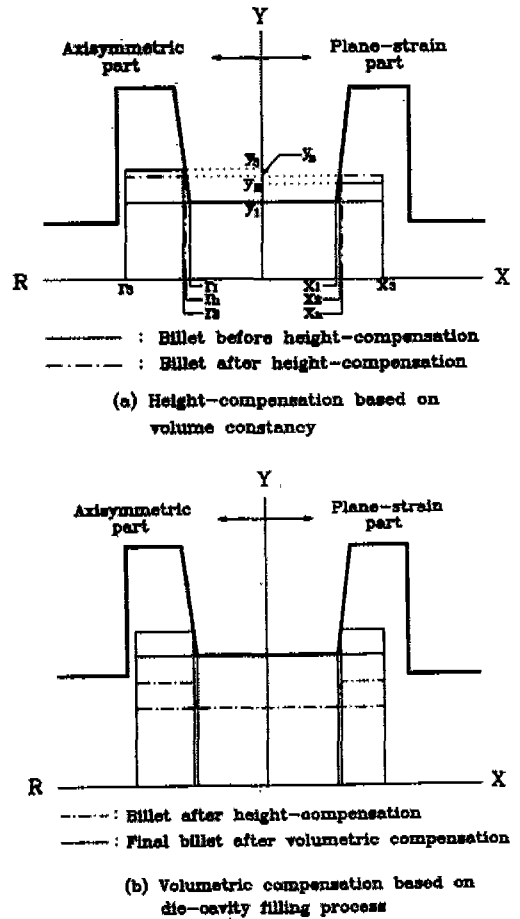
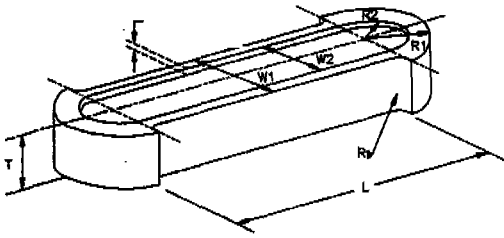


Fig. 14 Height and volumetric compensations based on final billet in Fig. 13

문에 실제 비축대칭 단조에서는 상당량의 플래시가 발생하는 것을 감안하면 역추적으로 얻은 형상의 체적은 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 또한, 시편의 바깥 방향으로는 고정하고 윗 방향으로만 체적보정을 하였는데 그렇지않고 바깥 방향으로도 같이 체적보정을 하게 되면 플래시부로의 유동이 많아지고 상대적으로 리브부로의 유동이 적게되어 다이충만을 이루는 예비성형체를 찾기가 어려워지며 또한 축대칭변형부의 소재치수가 다이 치수를 넘어서는 문제가 발생하게 된다.

Fig. 16은 Fig. 15의 예비성형체를 이용하여 전방시물레이션했을 때의 다이충만과정을 보여주고 있고, Fig. 17은 플라스틱신을 이용한 실험에서 초기시편의 형상과 예비성형체, 최종제품의 1/4를 절단한 유통형상



Dimensions of preform (H/B=2:1) (Unit : mm)

Dimension	T	W1	W2	L	R1	R2	P	R _b
Billet 4	44.4	33.2	21.0	120.0	18.8	10.5	3.6	20

* H : height of rib
B : width of rib

Fig. 15 Dimensions and configuration of preform in non-axisymmetric forging (H/B=2:1)

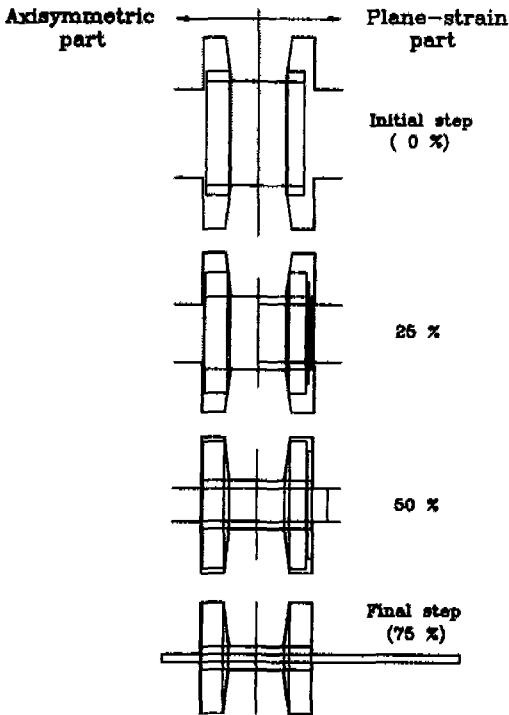
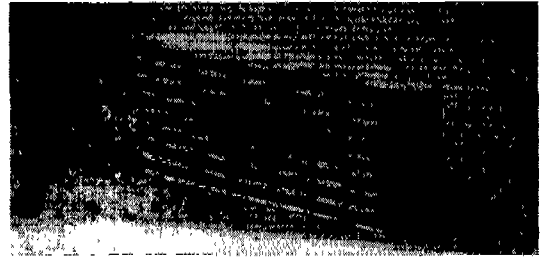


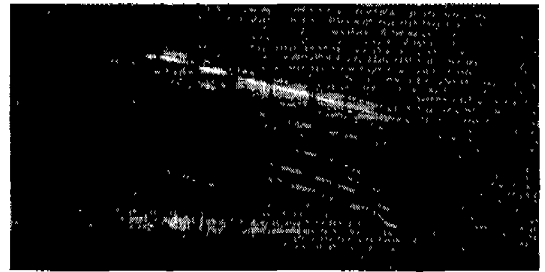
Fig. 16 Die-cavity filling process of element system from preform in non-axisymmetric forging (H/B=2:1)

을 보여주고 있다.

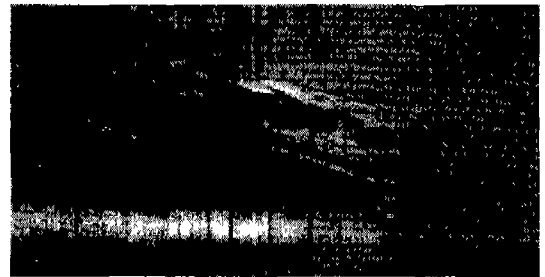
Fig. 16, 17에서 평면변형부와 축대칭변형부에서 완전한 다이충만이 이루어졌으며 실험에서 얻은 예비성형



(a) Initial billet



(b) Preform



(c) Final product

Fig. 17 Initial billet, preform and final product using plasticine in non-axisymmetric forging (H/B=2:1)

체와 최종형상이 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

비축대칭 단조공정을 상계요소법으로 해석하여 단계 진행과 예비성형체를 설계하였으며, 플라스틱인을 이용한 실험에서 얻은 결과를 비교 검토하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 비축대칭 단조에서 소재변형을 해석하기 위하여 단순히 평면변형부와 축대칭부를 각각 해석하여 결합하는 방법이 아닌 각부의 에너지를 조합한 전체에너지를 최적화하는 방법을 사용함으로써 비축대칭 유동에 보다

접근 할 수 있었다.

2) 수치해석과 플라스틱인의 실험에서 평면변형부와 축대칭변형부의 유동형상이 달라 아령 모양의 초기시편과 예비성형체를 예견할 수 있었다.

3) 예비성형체 설계를 위하여 평면변형부와 축대칭부를 각각 역추적한 형상에 높이보정과 체적보정을 통하여 비교적 단순한 아령 모양의 예비성형체를 얻었다.

4) 수치해석을 토대로 플라스틱인을 사용한 단조 실험에서 단조하중과 소재 유동형상이 비교적 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 1991~1994년 한국과학재단의 특정 목적 기초 연구의 일부로 수행되었으며, 동 재단의 관계자분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. W. T. Wu and S. I. Oh, "ALPIDT : A General Purpose FEM Code for Simulation of Non-Isothermal Forming Processes", Proc. NAMRC-XIII, Berkeley, California, pp.449, 1984.
2. M. Kiuchi and A. Karato, "Application of UBET to Non-Axisymmetric Forging", Advanced Tech. of Plasticity, Vol.11, pp.967~972, 1984.
3. 木内學, 唐戸彰夫, "非對稱フラッシュ部への材料充滿過程の解析", 塑性と加工, 30卷, 290號, pp. 307~315, 1985.
4. 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, 30卷, 342號, pp.997~1003, 1989.
5. 木内學, 岸英敏, 石川政和, "正方形 矩形 六角形その他異形材の押出し 引抜き加工の上界法解析", 塑性と加工, 24卷, 266號, pp.290~296, 1983.
6. 木内學, 石川政和, "L-, T-, H-形材の押出し 引抜き加工の上界法による解析", 塑性と加工, 24卷, 270號, pp.722~729, 1983.
7. T. Wada and T. Nanba, "Numerical Method for Plastic Working Processes in Three Dimensions", Advanced Tech. of Plasticity, Vol.11, pp.1005~1012, 1987.
8. J. H. Argyris, J. St. Doltsinis and J. Luginsland, "Three-Dimensional Thermo-mechanical Finite Element Calculation of Three-Dimensional Analysis of Forming Processes"; Proc. Int. Workshop Simulation of Metal Forming Processes by the Finite-Element Method (SIMON-I), Stuttgart, 1985, Springer-Verlag, Berlin pp. 125, 1986.
9. I. Pillinger, P. Hartley, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe, "A three Dimensional Analysis of the Cold Forging of a Model Aluminium Connecting Rod", Proc. Inst. Mech, Engrs. Vol.199, pp.319, 1985.
10. 柳本潤, 木内學, "塑性加工の複合數値解析に関する研究", 塑性加工春季講演會, pp.559~562, 1989.
11. M. J. M. Barata Marques and P. A. F. Martins, "A Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Forging", Advanced Technology of Plasticity, Vol.1, pp.13~18, 1990.
12. 今井敏博, 木内學, 村松勁, "非軸對稱すえこみ加工の解析", 塑性と加工, 33卷, 374號, pp.253~258, 1992.
13. H. Y. Kim and D. W. Kim, "Computer-aided preform design in the closed-die forging process", J. of Materials Processing Technology, Vol.41, pp.83~104, 1994.
14. J. Oudin and Y. Ravalard, "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.
15. M. Kiuchi and Y. Murata, "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,

- 1981.
16. D. M. Himmelblau, Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, pp.152, 1972.
17. 배원병, 김영호, 이종현, 이원희, “비축대칭 형상의 밀폐형 링 단조에 관한연구”, 한국소성가공학회 논문집, 제3권, 제2호, pp.202~214, 1994.
18. J. J. Park, N. Rebelo and S. Kobayashi, “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.
19. 김영호, 배원병, 이종현, “MMT를 이용한 Al-7075 열간 압셋 단조의 가공하중 예측”, 한국소성가공학회 논문집, 제2권, 제3호, 통권 제4호, pp.37~50, 1993.