

업셋 단조의 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구

김완수* · 이병섭* · 황두순* · 홍성인**

(1999년 4월 14일 접수)

A Study on the Buckling and Plastic Instable Flow in Upset Forging

Wan-Soo Kim, Byoung-Seob Lee, Doo-Soon Hwang and Sung-In Hong

Abstract

The plastic instable flow phenomenon happens in practical forming process, i. e. upsetting, backward extrusion, piercing, indentation. And also, it is difficult to control precisely the shape and dimensions of forming process. It is found that instabilities of the process are mainly connected with imperfections in the lubrication, billet eccentricity, inclined punch alignment. In view of the direct relationship between instable material flow and quality defects of the products and for better control of forming operation, we should necessarily find out their phenomena. In this study, we introduced the friction disturbance due to inclined punch angle. Analysis of upset forging is carried out using the rigid plastic FEM and slab method with eccentricity. Also, we considered the buckling parameters of billet with the large aspect ratio in upset forging.

Key Words : Inclined Punch Angle, Friction Disturbance, Eccentricity, Plastic Instable Flow, Plastic Buckling, Upset Forging, Rigid-Plastic FEM

1. 서론

소성가공에서 형상 및 치수를 정확하게 제어하기란 매우 어렵다. 그러나, 고정밀을 요구하는 실제 생산현장에서는 이들의 통제를 더욱 필요로 하고 있다.

그 중 업셋 단조 공정에서 이미 경험적 방법으로 알려진 설계 규칙은 일반적인 경우로써 적용이 가능하지만 소재의 성형성이나 소재 전단면의 정밀도, 윤활 조건에 따라 보다 보수적인 설계 한계값을 적용하여야 한다. 그렇지 못할 경우엔 성형 후 형상의 진원도가 맞지 않거나 축의 중

심과 업셋팅부의 중심이 일치되지 않아 요구되는 동심도를 만족시키지 못하는 등의 형상결함이 발생할 수 있다.

이러한 관점에서 J. A. H. Ramaekers 등은 슬래브법과 상계법을 이용하여 업셋팅 및 압출공정에서 불안정유동현상에 대해 고찰하였고⁽¹⁾, M. Shiomi 등은 초기 곡률을 갖는 사각형 바의 압축 시 일어나는 좌굴을 3차원 강소성 유한요소법으로 해석하였다.⁽²⁾ 또한, M. Gotoh 는 인장 및 압축에서 소성불안정현상을 수치적으로 고찰한 바 있다.⁽³⁾

그러나, 아직 소성불안정 현상 및 소성 좌굴에 대한 연

* 충남대학교 대학원 기계공학과

** 충남대학교 기계공학과

구가 미비하여 본 연구는 슬래브법을 사용하여 마찰과 중립축의 관계를 유도하고 그를 적용시킨 강소성 유한요소법을 이용하여 소성가공에서 비교적 형상비 (Aspect ratio)가 큰 반 밀폐형 (Semi-closed) 업셋 단조 공정에서 일어나기 쉬운 불안정 유동 (Instable flow)에 대해서 해석하고 그 설계 변수들을 규명하고자 한다.

2. 소성 불안정 유동

2.1 소성 불안정 유동과 마찰의 관계

마찰은 소성 가공의 특성을 결정짓는 주요 변수 중 하나으로써 단조 공정에서 금속 유동 (Metal flow)의 형태를 결정짓는 역할을 한다. 금형과 소재 사이 접촉면에서 생기는 마찰에 영향을 미치는 요인으로는 윤활 상태, 상대 유동 속도, 온도, 소재 접촉면에서 압력, 재료 특성, 국부적 변형, 표면 조도 등 여러 가지를 들 수 있으며, 소성 분야에서는 이런 마찰을 처리하기 위해 그동안 일반적방법으로 실험과 해석을 통하여 마찰을 일정상수로 결정하고 그 값을 유한요소법에 적용하여 왔지만, 불균일 마찰의 가능성은 그 적용의 복잡성으로 인하여 배제되어 왔다.⁽⁴⁾

그러나, 초기 빌릿 (Billet) 형상의 편심과 편치의 경사각은 금속 유동에 지대한 영향을 미쳐 중립축의 이동이 이루어지게 하고 소재 형상의 변화가 생기게 할뿐만 아니라 편마모로 인한 금형 수명에도 영향을 주게 된다. 이점을 고려하기 위해 본 연구는 단조공정에서 보편적으로 사용되어 왔던 일정한 마찰 상수를 경사각과 편심으로 인한 윤활의 불균일 (Disturbance)을 고려하도록 슬래브법을 이용하여 부분적인 수정식으로 유도하고 공정상 발생할 수 있는 중립축의 이동을 유한요소법에 적용하여 해석하는 방법을 제안한다.

2.2 수정된 마찰 관계식의 유도

von-Mises 재료에 대한 평면 변형 문제에서 전단응력은 'Friction hill' 현상에 의해 중심축에서 가장 큰 값을 갖는다. 그러나, 편치와 빌릿 접촉 표면에서 중립축이 편심되어 중심축과 일치하지 않는 경우 Fig. 1과 같이 전단응력 (σ_x)의 변화가 일어나고 그 결과 중립축이 Δb 만큼 한쪽으로 이동하게 된다. 이에 따라 상호 접촉되는 힘의 차이로 인하여 중심선 좌우의 마찰 차이 (Δm)가 발생하게 된다. 이 때, 접촉면의 전단응력은 다음과 같다.⁽¹⁾

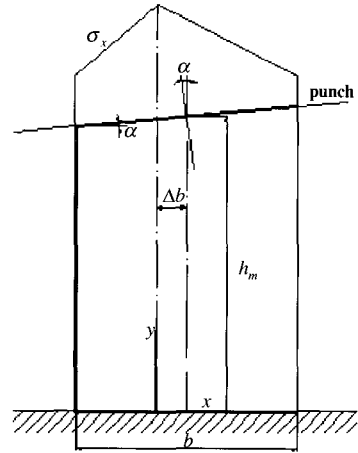


Fig. 1 Disturbed lubrication, tool and billet misalignment in upset forging

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_o} = -\frac{m}{\sqrt{3}} \frac{2x + b + 2\Delta b}{h} \quad (x \leq 0) \quad (1a)$$

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_o} = -\frac{m + \Delta m}{\sqrt{3}} \frac{b - 2\Delta b - 2x}{h} \quad (x \geq 0) \quad (1b)$$

이제 (1)식과 평형 조건으로부터 중립축과 마찰에 관한 다음식이 구해진다.

$$\Delta b / b = (1/2) \frac{\Delta m}{2m + \Delta m} \quad (2)$$

또한, Fig. 1과 같이 편치와 빌릿 사이에 일정 경사각 α 가 존재 할 경우 유동 중립축은 한 쪽으로 이동하게 되며 이 때의 응력분포를 식으로 표현하면 다음과 같다.⁽¹⁾

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_o} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{m}{\tan \alpha} + \frac{m}{2} \tan \alpha \right) \ln \frac{2h_m - b \tan \alpha}{2h} \quad (x \leq 0) \quad (3a)$$

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_o} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{m}{\tan \alpha} - \frac{m}{2} \tan \alpha \right) \ln \frac{2h_m + b \tan \alpha}{2h} \quad (x \geq 0) \quad (3b)$$

위에서 제시된 두 식과 평형조건에 의하여 초기 중립축의 위치를 얻을 수 있다.

$$\Delta b / b = (1/2) \frac{\alpha}{m} \quad (4)$$

결국, 식(2)와 (4)로부터 마찰에 대한 다음식을 유도할 수가 있다.

$$\frac{\Delta m}{2m + \Delta m} = \frac{\alpha}{m}, \quad \Delta m = \frac{2\alpha m}{m - \alpha} \quad (5)$$

3. 유한요소 수식화

본연구에서 수치해석적 방법으로 강소성 유한 요소법을 사용하였다. 재료는 von-Mises의 항복조건을 따른다고 가정하며, 비압축성조건을 만족하기 위한 벌칙함수 ζ 를 도입할 경우 범함수는 다음과 같이 알려져 있다.⁽⁵⁾

$$\pi = \int_v \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV + \int_s f_i u_i dS + \int_v \frac{1}{2} \zeta (\dot{\epsilon}_v)^2 dV \quad (6)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})}$,

σ'_{ij} : 편차응력, f_i : 표면력, u_i : 속도성분,

$\dot{\epsilon}_{ij}$: 변형률속도, $\dot{\epsilon}_v$: 체적변형률속도

단조 공정에서는 압축하는 동안 중립축이 발생하게 된다. 따라서, 표면 외력이 주로 작용하는 금형과 소재 사이의 마찰 처리를 위하여 마찰면에 중립점 발생으로 인한 특이성을 피하고 수치해의 안정성을 고려한 Chen과 Kobayashi의 연구가 널리 이용되고 있다.⁽⁶⁾ 이에 본 논문에서는 이를 채용하고 2.2절에서 구해진 수정된 마찰 상수를 도입하였다.

$$f_i = -(m + \Delta m)k \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{u_0} \right) \right\} \frac{v_r}{|v_r|} \quad (7)$$

여기서, m : 마찰상수, Δm : 수정 마찰상수,

k : 소재의 전단 항복 응력,

v_r : 금형에 대한 소재의 상대속도,

u_0 : $0 < u_0 \ll v_r$ 인 아주 작은 양의 상수

4. 해석결과 및 고찰

4.1 해석조건

해석에 사용된 조건은 다음 Table 1과 같다. 또한, Fig. 2는 공정의 개략도로서 세장비 (H_o / D_o)를 보이고 있다.

Table 1 Input data for analysis

Billet width(D_o)	15 mm
Aspect ratio(H_o / D_o)	1.0~3.0
Eccentricity(E_c)	-0.6~0.6 mm
Inlet speed(v_o)	10 mm/sec
Inclined angle(α)	1°, 2°
Friction factor(m)	0.01, 0.05, 0.1
Material Property	pure aluminum $\bar{\sigma} = 120(0.002 + \bar{\epsilon})^{0.045}$
	pure copper $\bar{\sigma} = 289.56(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.3518})^{0.28}$
	SWRCH45K $\bar{\sigma} = 950\bar{\epsilon}^{0.185}$

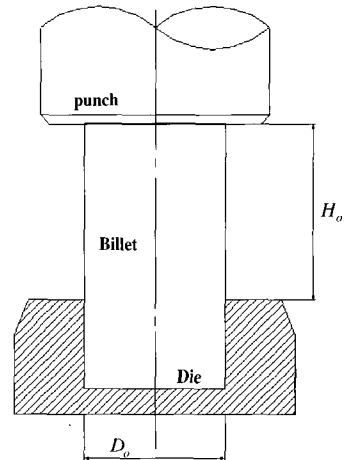
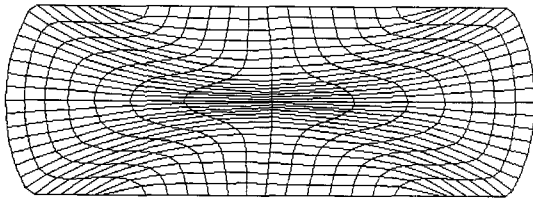


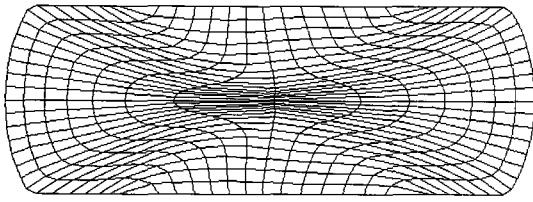
Fig. 2 The shape of die and billet

4.2 마찰의 영향

Fig. 3 (a), (b)는 압축률이 60%일때의 결과이다. 그림에서 재료유동은 오른쪽으로 치우쳐 있음을 볼 수가 있는데, 여기서는 마찰상수가 같고 접촉면에서 편치각도에 따른 비교를 보여주고 있다. 편치각도가 클수록 유동이 더 오른쪽으로 편중되는 현상을 관찰할 수 있는데, 이것은 빌릿과 편치사이에서 마찰상수가 같은 조건이라 하더라도 편심각에 따라 제품의 동심도가 맞지 않아 마찰 불균일을 일으킨다는 결과를 알려준다.



(a) $m = 0.20$ ($\alpha = 1^\circ$, $\Delta m = 0.04$)



(b) $m = 0.20$ ($\alpha = 2^\circ$, $\Delta m = 0.08$)

Fig. 3 Comparison of distorted grid patterns

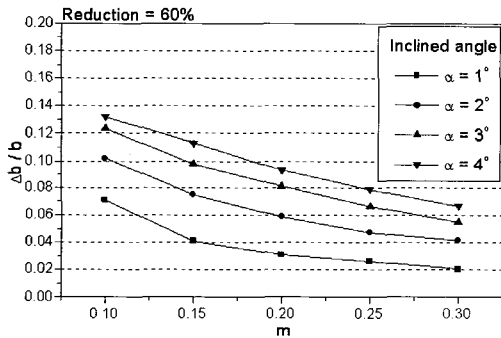
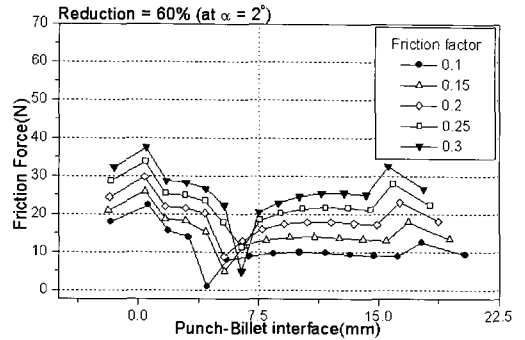


Fig. 4 Comparison of varied inclined angle

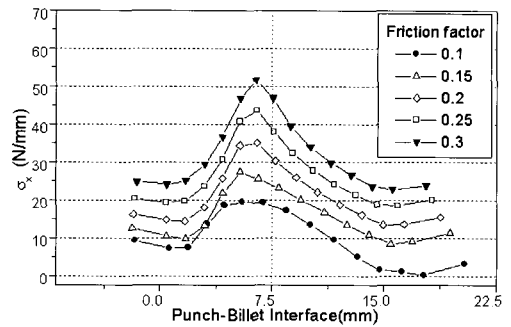
Fig. 4는 경사각을 1°에서 4°까지 주어가면서 중심축 이동량을 도시한 그림이다. 경사각이 클수록 마찰이 작을수록 보다 큰 중심축 이동을 보여주는 데, 이는 마찰이 작을수록 마찰 불균일에 의한 효과가 보다 큼을 나타낸다. 이는 경사각에 대한 적절한 대책으로 유효를 적게 하는 것이 효과적이지 못하다는 사실을 알려준다.

Fig. 5 (a)는 Fig. 3 (b)에서 압축률 60%일 때 마찰에 따른 접촉면에서의 마찰력 분포를 나타낸 것이다. 중심축은 7.5(mm)이지만 마찰력이 가장 작게 나오는 중립축의 위치는 이보다 좌측으로 약간 이동한 것을 볼 수 있다.

Fig. 5 (b)는 압축률에 따른 'Friction Hill'의 이동현상을 나타낸 그래프이다. 이 결과로 볼 때 성형 중에 재료



(a) Friction Force



(b) x-direction stress

Fig. 5 Comparison of varied friction factor

유동이 한쪽으로 치우치게 되어 제품의 동심도가 일치하지 않게 됨을 알 수 있다.

4.3 압축률에 따른 좌굴량

일반적으로 압축률에 따라 편심된 소재의 좌굴량 (buckling)은 더 많아지게 되는데, Fig. 6는 마찰상수가 0.05, 초기편심비가 0.01이고, $\alpha = 1^\circ$ 형상비가 각각 1:2.0, 1:2.5, 1:3.0일 때의 압축률 20%, 40%에서 변형되는 모양을 나타내고 있다. Fig. 7은 구속지지부가 비구속지지부에 비해서 긴 경우, 편심비가 0.01, 마찰상수가 0.05, $\alpha = 1^\circ$ 형상비가 1:2.5인 알루미늄 소재의 좌굴된 격자모양과 속도장, 유효응력 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 마찰상수가 0.05일 때 형상비 3.0, 2.5, 2.0, 1.5인 경우의 압축률에 따라서 성형전후의 외주의 차이인 좌굴량 (ΔL)을 무차원화시켜 관계를 나타낸 그림이다. 압축률이 증가할수록 초기 형상비가 클수록 좌굴량이 점차적으로 증가하는 것을 알 수가 있다.

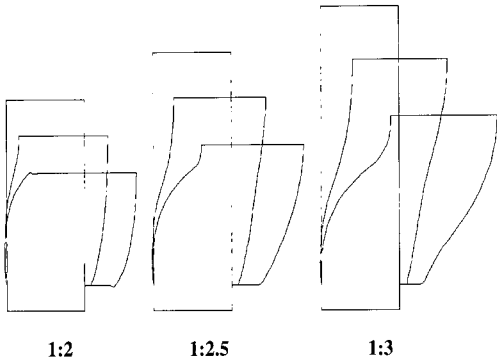
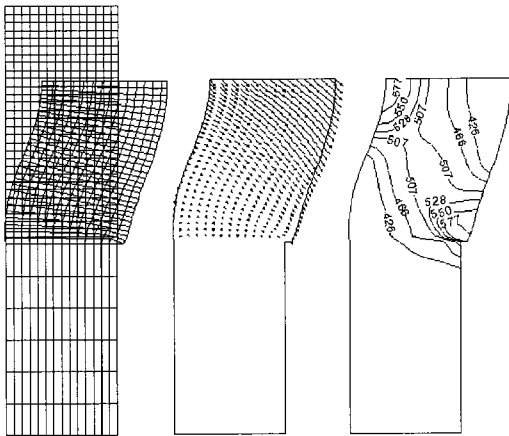


Fig. 6 Distorted grid pattern for aspect ratio



(a) Deformed shape (b) velocity field (c) effective stress

Fig. 7 Results of semiclosed type forging

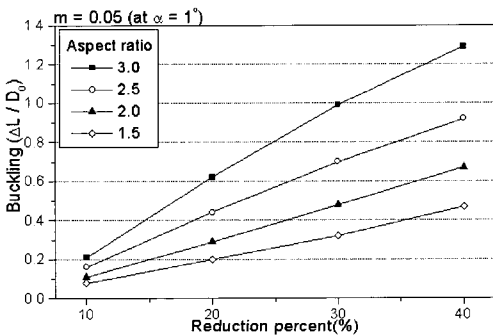


Fig. 8 Variation of buckling with reduction

4.4 마찰과 소재의 좌굴량

열간단조에 비해 냉간단조는 마찰상수가 보통 0.01~0.2이다. 따라서, 이 영역에서 편심량과 형상비의 정도에 따른 좌굴량을 살펴 보면, 편심비가 0.01이고 $\alpha = 1^\circ$, 마찰상수가 0.05와 0.1일 때 형상비에 따른 각각의 좌굴량은 Fig. 9와 같다. 마찰이 작을수록 좌굴량이 커짐을 알 수 있다.

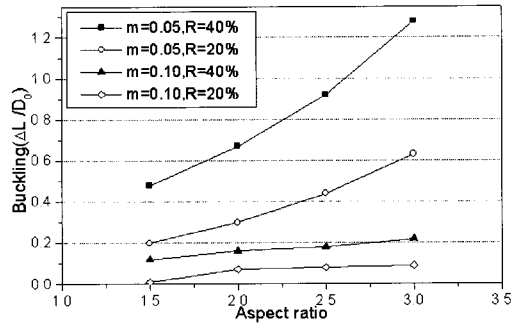


Fig. 9 Variation of buckling with aspect ratio

마찰상수가 0.05일 때 0.1에 비해 좌굴량이 현저하게 커짐을 볼 수가 있다. 이것은 편심과 빌릿접촉면에서의 구속효과인 마찰이 작으면 그만큼 쉽게 한쪽으로 유동이 쉬어져 좌굴량이 커지는 것이다. 따라서 좌굴은 윤활조건에 따라서도 크게 영향을 받음을 알 수가 있다.

4.5 초기 편심비와 소재의 좌굴량

Fig.10은 마찰상수 0.05, $\alpha = 1^\circ$, 편심비가 0.0~0.04일 때 형상비에 따른 소재의 좌굴량을 나타낸 그림이다. 형상비가 1:3.0으로 큰 경우 편심비가 0.02이하일때는 좌굴량이 서서히 증가하다가 그 이상에서는 증가량이 현저하게 커지며, 나머지 경우에도 정도의 차이는 있으나 0.02

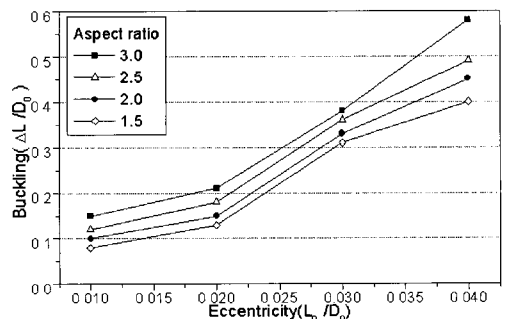


Fig. 10 Variation of buckling with eccentricity

이하 보다 좌굴량의 증가량이 커진다. 따라서, 초기편심비는 재료유동의 쓸림에 영향을 주지만 0.02이하일 때는 그다지 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

4.6 소재의 성형성과 좌굴량

좌굴은 소재의 성형성의 정도에 따라서도 달라지게 된다. 소재가 각각 순수 알루미늄(pure aluminum), 순수 구리(pure copper), 그리고 냉간단조 선재인 'SWRCH45K'의 세가지 재료에 대해서 좌굴량을 비교하였다. 마찰상수는 0.05, $\alpha = 1^\circ$, 형상비 1:2.0, 초기 편심비 0.01일 때 좌굴량을 비교한 그래프는 Fig. 11과 같다. 성형성이 비교적 좋은 알루미늄이나 구리가 실제 냉간단조 선재인 'SWRCH45K' 보다 같은 조건에서 좌굴이 쉽게 일어난다.

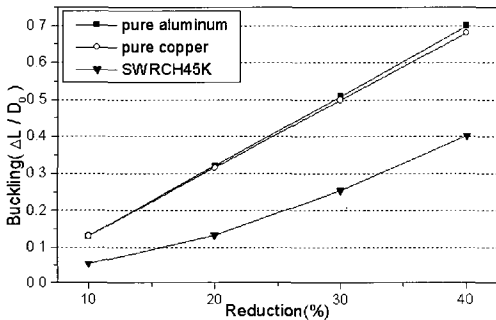


Fig. 11 Variation of buckling with reduction in case of pure aluminum, pure copper, SWRCH45K

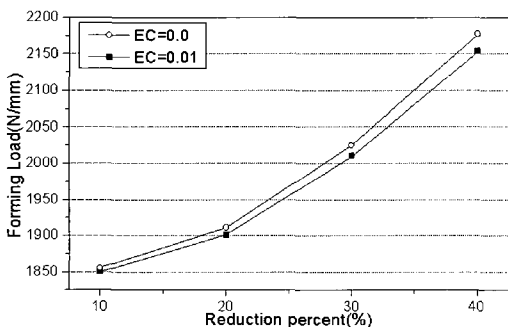


Fig. 12 Comparison of forming load in case of $E_c=0.0$ and $E_c=0.01$

Fig. 12은 순수 알루미늄소재에 대한 가공하중을 나타낸 그림인데 형상비가 1:2.0일때 편심이 없고 정상적인

소재에 비해 편심비가 0.01인 경우, 가공하중은 조금 작게 나오지만 경향은 같은 것을 알 수가 있다.

5. 결론

평면변형 강소성 유한요소법을 이용하여 단주의 소성좌굴문제를 해석하였다. 초기 소재의 편심량의 정도에 따라 각 압축률에 따른 좌굴정도가 달라지고 마찰상수의 영향이 크게 작용하는 것을 예측할 수 있었다. 또한 소재와 편치간 중심의 불일치나 소재단부의 경사각이 존재할 경우에도 유동의 치우침이 발생하고 성형성이 좋은 소재일수록 적은 편심량으로 쉽게 좌굴이 일어나게 됨을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) J. A. H. Ramaekers and J. A. G. Kals, 1982, "Instable Material Flow in Extrusion and Upsetting", Annals of the CIRP Vol.31/1/, pp.191~193.
- (2) M. Shiomi, J. H. Xu, K. Mori & K. Osakada, 1996, "Three-Dimensional Finite Element Simulation of Buckling Behavior of Slab in Width-Sizing Process", Advanced Technology of Plasticity, pp.355~358.
- (3) M. Gotoh, 1998, "A Numerical Study of Various Plastically Unstable Behavior in Tension and Compression", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.628~639.
- (4) S. I. Hong, 1992, "Effect of Surface Generation upon Local Values of Friction in Cold Forging", 한국소성가공학회 추계학술대회'92, pp.29~34.
- (5) S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, "Metal Forming and The Finite Element Method", Oxford Univ Press.
- (6) C. C. Chen, S. Kobayashi, "Rigid Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD, vol. 28, p.163.