

이동 경화를 고려한 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구

이병섭*, 황두순*, 윤수진**, 홍성인***

*충남대학교 대학원 기계공학과, **국방과학연구소, ***충남대학교 기계공학과

A Study on Buckling and Plastic Instable Flow with Kinematic Hardening

Byoung-Seob Lee*, Doo-Soon Hwang*, Su-Jin Yun**, Sung-In Hong***

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam Nat'l Univ.

**Agency for Defense Development

***Department of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

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 it is for better control of forming operation, we should necessarily find out their phenomena. In this study, we used the friction disturbance due to inclined punch angle and introduced the method considering kinematic hardening effect. Analysis of upset forging is carried out using the rigid plastic FEM and slab method with eccentricity.

Key words : Inclined punch angle, Friction disturbance, Eccentricity, Plastic instable flow, Kinematic hardening, Upset forging, Rigid-plastic FEM

1. 서 론

소성가공에서 형상 및 치수를 정확하게 제어하기란 매우 어렵다. 그러나, 고정밀 제품의 생산이 보다 요구되는 실제 생산현장에 있어 이들을 통제하려는 노력에 많은 시간을 투자하여야 한다.

그 중 업셋 단조 공정에서 알려진 경험적 규칙은 일반적으로 적용함에는 불편함이 없으나, 소재의 성형성이나 소재 전단면의 정밀도, 윤활 조건, 이동 경화에 따라 보다 보수적인 설계 한계값을 적용하여야 한다. 그렇지 못할 경우엔 축의 중심과 업세팅부의 중심이 일치되지 않아 요구되는 동심도를 만족시키지 못하여 형상결함이 발생할 수 있다.

이러한 관점에서 J.A.H.Ramaekers등은 슬래브법과 상계법을 이용하여 업세팅 및 압출공정에서 불안정유동현상에 대해 고찰하였고[1], Manabu Gotoh는 인장 및 압축에서 소성불안정현상을 수치적으로 고찰하였으며[2], Zhihong Guo등은 2차원 평면상에서 각종 경화 현상에 대하여 연구하

였다[3]. 또한, 본 연구자들에 의해 마찰 불균일과 경사각이 존재하는 업셋단조 공정에서의 소성 불안정 현상이 연구된 바 있다[4].

그러나, 이동 경화 현상의 경우 이론적 발전에 따른 실제적 적용이 이 방면에서 아직 연구가 미비하므로, 우선 슬래브법을 사용하여 수정 마찰계수를 구하고 강소성 유한요소법을 이동 경화가 고려되도록 재 정리하여 소성가공에서 비교적 형상비(Asspect ratio)가 큰 개방형(opened) 업셋 단조 공정에서 일어나기 쉬운 불안정 유동(Instable flow)에 이동경화가 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 수정된 마찰 관계식의 유도

마찰은 소성 가공의 특성을 결정짓는 주요 변수 중에 하나로써 단조 공정에서 금속 유동(Metal flow)의 형태를 결정짓는 역할을 한다. 금형과 소재 사이 접촉면에서 생기는 마찰을 처리하기 위해 그 동안 일반적 방법으로 실험과 해석

을 통하여 마찰을 일정상수로 결정하고 그 값을 유한요소법에 적용하여 왔지만, 불균일 마찰의 가능성은 그 적용의 복잡성으로 인하여 배제되어 왔다.[5]

그러나, 본 연구는 일정한 마찰 상수를 경사각과 편심으로 인한 윤활의 불균일(Disturbance)을 고려하도록 슬래브법을 이용하여 부분적인 수정으로 유도한 식을 사용하였다[4].

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. 이 때, 접촉면의 전단응력은 다음과 같다.

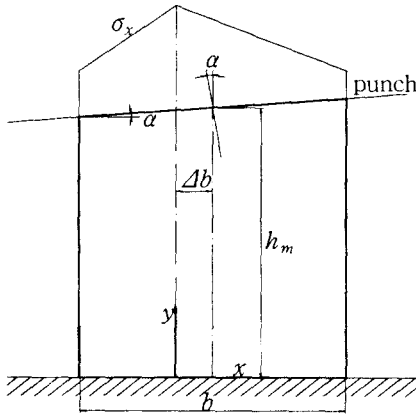


Fig.1 Disturbed lubrication, tool and billet misalignment in upset forging

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

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

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.

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

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

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

본 연구에서는 수치해석적 방법으로 이동경화를 고려한 강소성 유한 요소법을 사용하였다. 재료는 von-Mises의 항복조건을 따른다고 가정하며, 비압축성조건을 만족하기 위한 벌칙함수 (penalty function) ζ 를 도입할 경우 범함수는 다음과 같이 알려져 있다.

$$\pi = \int_V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \frac{1}{2} \zeta (\dot{\epsilon}_v)^2 dV - \int_{S_f} \dot{F}_i u_i dS \quad (6)$$

여기서, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_{ij}$ 이고 경화 계수 α_{ij} 는 Prager경화 법칙에 의해 $\alpha_{ij} = c\epsilon_{ij}$ 로 정의된다.

이제, s_{ij} 을 구하기 위해 Jaumann 도함수를 채용하고 Prandtl-Reuss 식관계로부터

$$\dot{s}_{ij} = \frac{4}{9} \frac{H}{s_{ij} s_{mn}} \dot{\epsilon}_{mn} = L_{ijmn} \dot{\epsilon}_{mn} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } H = d\bar{\sigma} / d\bar{\epsilon}$$

또한,

$$\dot{s}_{ij} = \dot{s}_{ij}^v - \dot{\epsilon}_{ik} s_{kj} - s_{ik} \dot{\epsilon}_{kj} + u_{i,k} s_{kj} + s_{ik} u_{j,k} \quad (8)$$

업셋단조에 있어 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 2절에서 구해진 수정된 마찰 상수를 도입하였다.

$$f_i = -(m + \Delta m)k \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{u_0} \right) \right\} \frac{\vec{v}_r}{|v_r|} \quad (9)$$

4. 해석결과 및 고찰

4.1 해석조건

해석에 사용된 조건은 다음 Table 1과 같다. 또한, Fig.2는 공정의 개략도로써 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 $\bar{\sigma} = 120(0.002 + \bar{\epsilon})^{0.045}$ |

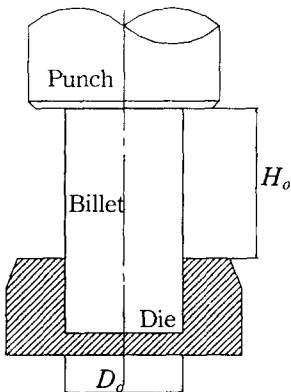


Fig.2 The shape of die and billet

4.2 마찰의 영향

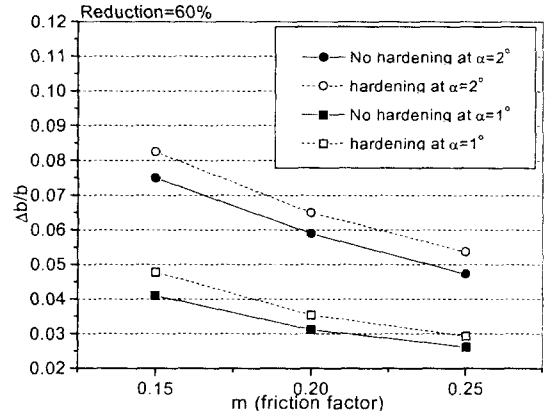


Fig.3 Results of open type forging

Fig.3는 경사각 1° 와 2° 에서 마찰값에 따른 차이를 보여 주고 있다. 이동경화를 고려하지 않을 때보다 이동경화를 고려할 경우에 중심축 이동량이 커짐을 확인할 수 있으며, 경사각이 클수록 마찰이 작을수록 보다 큰 중심축 이동을 보여 주고 있다. 이는 마찰이 작을수록 마찰 불균일에 의한 효과가 보다 커짐을 나타내며, 또한 마찰 불균일에 이동경화가 미치는 효과도 마찰이 작을수록 경사각이 클수록 더 크게 미침을 나타내고 있다. 이는 경사각에 대한 대책으로 윤활을 적게 하는 것이 경화 현상으로 수반되는 마찰 불균일에 의한 중심축 이동량에 대해서도 개선책임을 알려준다.

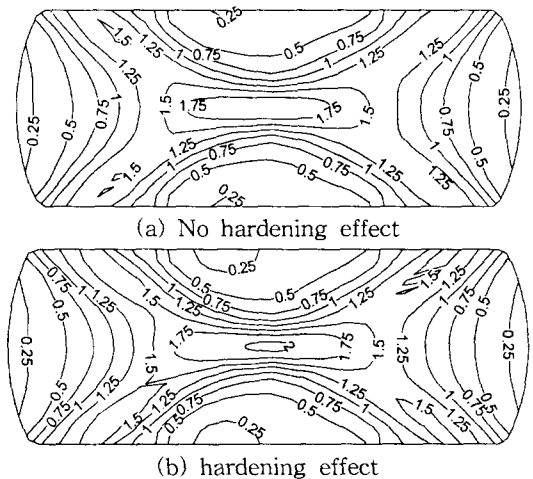


Fig 4. Contour of effective strain ($\alpha = 2^\circ$, reduction=60%, $m=0.2$)

일반적으로 경화가 고려될 경우 유효 변형률은 증가되는 것으로 알려져 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 이동 경화가 고려될 경우가 고려되지 않을 경우에 대하여 현저하게 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며 또한 대각선 방향에 따라 변형률 국부화 현상이 일어나 전체적으로 등고선 사이의 간격이 경화가 고려되지 않았을 경우보다 좁아짐을 관찰할 수 있다.

Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD, vol. 28, pp.163

5. 결론

평면변형 강소성 유한요소법을 수정하여 이동 경화 및 마찰 불균일을 고려할 경우에 단주를 해석하였다. 초기 소재의 편심량의 정도에 마찰상수의 영향이 크게 작용하는 것을 예측할 수 있었으며, 이동 경화로 인하여 보다 크게 작용함을 알 수 있었다. 또한, 이동경화를 고려할 경우의 해석에서 대각선 방향으로 보다 급격하게 변형률이 증가하는 변형률 국부화 현상을 살펴볼 수 있었다.

참고 문헌

- (1) J.A.H.Ramaekers and J.A.G. Kals, "Unstable Material Flow in Extrusion and Upsetting", Annals of the CIRP Vol.31/1/, pp.191-193, 1982.
- (2) Manabu Gotoh, "A Numerical Study of Various Plastically Unstable Behavior in Tension and Compression", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.628-639, 1998
- (3) Zhihong Guo, Osamu Watanabe, "Effects of Hypoelastic Model and Plastic Hardening on Numerical Simulation", JSME Internat. Journal Series A, Vol.38, No.4, 1995
- (4) 김완수, 이병섭, 홍성인, "편심으로 인한 업셋 단조의 좌굴 및 소성불안정유동에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98추계학술대회 논문집, pp.125-128
- (5) S.I.Hong, "Effect of Surface Generation upon Local Values of Friction in Cold Forging", 한국소성가공학회 추계학술대회'92, pp.29-34, 1992.
- (6) Chen, C.C., and Kobayashi, S., "Rigid