

자유 단조의 소성불안정 유동에 관한 연구

이병섭* · 이용성* · 윤수진** · 홍성인***

A Study on the Plastic Instable Flow in Free Forging

B.S. Lee, Y.S. Lee, S.J. Yoon and S.I. Hong

Abstract

It is difficult to predict material behavior of forming process, because the plastic instable flow phenomenon happens in practical forming process, i. e. upsetting, backward extrusion, piercing, indentation. In view of the direct relationship between instable material flow and quality defects of the products, we should find out their phenomena. In this study, we introduced the plastic spin and the kinematic hardening, considering the kinematic hardening constitutive equation for rate-dependent material. Also analysis of upset forging is carried out using the rigid plastic FEM with Al7075.

Key Words : Upset Forging, Plastic Spin, rigid pastic FEM, Al7075, Kinematic Hardening, Plastic Instable Flow

1. 서 론

소성 가공의 공정 중 발생하는 결함은 재료의 재질, 가공 온도, 가공 속도, 금형의 결함, 가공 공정의 문제 등 많은 이유로 인하여 야기되고 있다. 그러나, 생산 현장에서는 결함과 관련된 보다 정확한 거동을 살펴볼 수 있는 예측 방법을 갖추지 못하였기 때문에 아직까지 경험에 의존하여 시행착오법으로 난제를 해결하고 있다. 지금까지 개발되고 널리 쓰이고 있는 기존의 유한요소법이나, 상계해법 등 여타의 해석방법은 다분히 시간에 관계된 가공 속도와는 무관한 응력에 대한 수식화와 등방

성 가공경화에 대하여 정리되어 있기 때문에 가공 속도의 영향을 정확히 고려할 수 없었기 때문이다.

이에 대하여 Mandel⁽¹⁾는 이동경화를 도입하여 보다 가공의 진행에 따른 응력-변형률 관계를 정의하고자 하였고, Dafalias⁽²⁾, Paulun⁽³⁾ 등은 이동경화를 도입하고 그 때까지 변형에 기여하지 않는 것으로 알려진 스핀(spin) 중 변형에 기여하는 량을 소성 스핀(plastic spin)으로써 설정하여 변형 거동을 보다 정확히 하려고 노력하였다. 또한, 재료적 측면에서 Asaro⁽⁴⁾ 등이 이동경화와 소성 스핀의 개념을 도입하여 격자 구조에 기반을 둔 해석을 수행하였으며, 그후로 단열성 전단밴드라는 측면 에서도

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

Shawki⁽⁵⁾ 등은 1차원 양함수 유한차분법을 이용하여 명쾌한 설명을 하였으며, 국내에서도 정⁽⁶⁾ 등의 양함수 시간적분 유한요소법과 Shawki의 방법을 개선한 음함수 유한차분법을 이용한 황⁽⁷⁾ 등의 연구가 발표된 바 있다. 또한, 소성 불안정 유동이라는 측면에서도 최근 들어 국내외로 많은 연구가 있어 왔으며, 특히 볼트류 등의 단조시결합에 대하여 김⁽⁸⁾ 등의 발표 이후 본 저자에 의해 선행 연구로서 단조 해석 시 이동경화를 적용한 연구가 있어 왔었다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 여러 이론을 이용하여 단조 문제에 대하여 소성 스프인을 적용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 이 론

2.1 소성 스프인을 고려한 구성 방정식

강소성 재료의 변형과 관계된 경계조건문제에 대한 구성식은 응력률(stress rate)의 평형방정식이다. 이때의 적분형은 다음과 같다.

$$\dot{\pi}(u) = \int_V \dot{s}_{ij} D_{ij} dV - \int_{S_f} \dot{F}_i u_i dS \quad (1)$$

여기서, \dot{s}_{ij} 는 응력률, D_{ij} 는 변형률, \dot{F}_i 는 힘률, u_i 는 속도를 의미한다. 이제 Jaumann derivative을 채용하고 벌칙함수를 도입하면,

$$\begin{aligned} \dot{\pi} = & \int_V \tilde{\dot{s}}_{ij} D_{ij} dV + \int_V \omega_{ik} s_{kj} D_{ij} dV - \int_V s_{ik} \omega_{kj} D_{ij} dV \\ & + k \int_V D_{ij} D_{ij} dV - \int_{S_f} \dot{F}_i u_i dS - \int_V (\omega_{ik}^0 s_{kj}^0 - s_{ik} \omega_{kj}^0) D_{ij} dV \end{aligned} \quad (2)$$

이제, Levy-Mises 관계로부터 다음을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{s}}_{ij} D_{ij} &= \frac{4}{9} \frac{H' \dot{s}^{-2}}{s_{ij}' s_{mn}'} D_{mn} D_{ij} = L_{ijmn} D_{mn} D_{ij} \\ &= \frac{2}{3} H' D_{ij} D_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

이제 (2)식에 (3)의 관계를 도입하고 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{\pi} = & \int_V \frac{2}{3} H' D_{ij} D_{ij} dV + 2 \int_V M_{ij} D_{ij} dV \\ & + k \int_V D_{ij} D_{ij} dV - \int_{S_f} \dot{F}_i u_i dS \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, M_{ij} 는 스프인과 응력의 곱에 대한 항들을 정리하여 하나의 행렬로 표현한 것이다.

2.2 자유단조 문제에서의 구속조건

Fig. 1에 보여지는 것은 단순전단 문제에서의 구속조건을 나타내고 있다. 기하학적 형상은 현상을 잘 볼 수 있도록 임의 설정하였으며, 단면감소율은 60%까지 진행

시켰다. 또한, r 축 방향으로 축대칭 z 축 방향으로 대칭을 적용하였고, A-B 단면은 필요한 값을 출력하기 위해서 설정된 것이다.

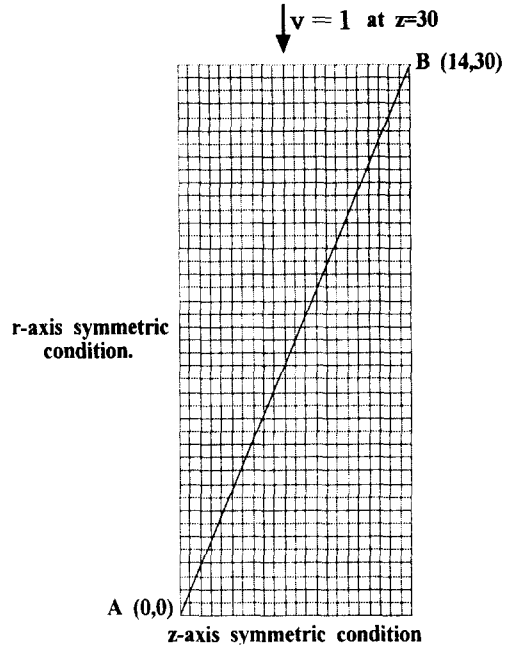


Fig. 1 Free forging motion

3. 결과 및 고찰

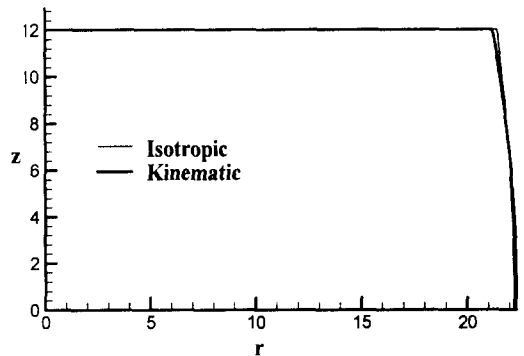


Fig. 2 Comparison of displacement at reduction 60%

Fig. 2에서는 등방성 경화와 이동 경화의 경우에 최종 변형 형상을 도시하고 있다. 등방성 경화에 비교하여 소성 스프인을 적용한 이동 경화의 경우가 보다 배불림 현상이 나타나는 것은 소성 스프인에 의한 영향으로 소성 불안정에 의한 국부화의 진행으로 인하여 변형이 증가하는 현상으로 볼 수 있다.

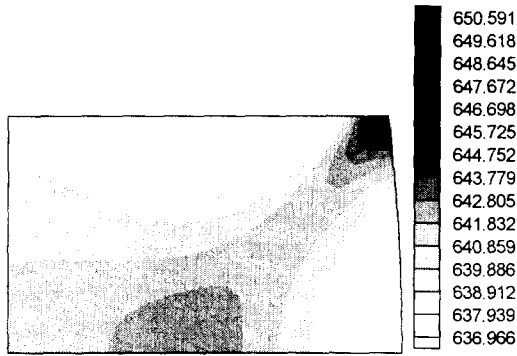


Fig. 3(a) Effective stress distribution at reduction rate 60% on isotropic hardening

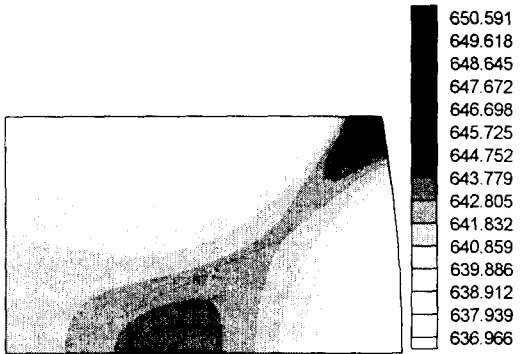


Fig. 3(b) Effective stress distribution at reduction rate 60% on kinematic hardening

Fig. 3 에서는 최종 변형 단계에서 상당 응력을 등방성 경화와 이동 경화의 경우에 비교하여 나타낸 것이다. 전단 밴드의 형성을 살펴 볼 수 있으며, 이동 경화의 경우에 전단 밴드의 폭이 좁고 응력값이 크게 나타나고 있는 것으로 보아 기존에 알려진 바와 같이 이동경화는 국부화 진행을 보다 더 잘 설명하는 것을 알 수 있다.

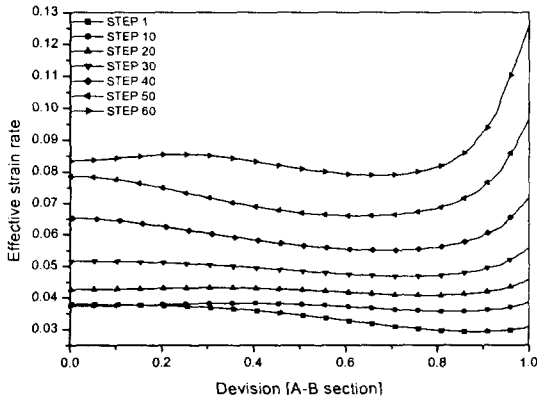


Fig. 4(a) Variation of effective strain rate for A-B section on isotropic hardening

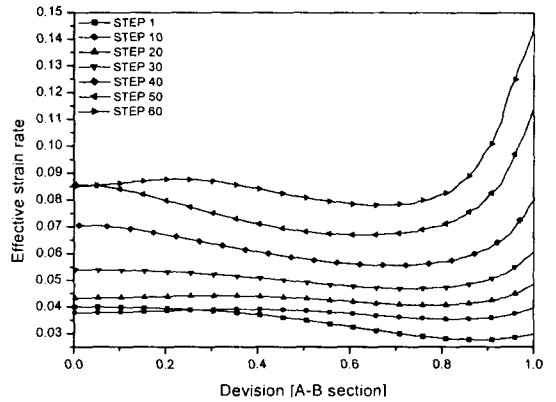


Fig. 4(b) Variation of effective strain rate for A-B section on kinematic hardening

Fig. 4 에서는 A-B 단면을 통하여 전단 밴드의 진행 여부를 확인하기 위하여 변형률을 비교하여 보여 주고 있다. 끝단점인 B에서 급격한 변화가 있는 것으로 보아 전단 밴드가 형성되는 것으로 생각된다. 두 그래프의 비교를 통하여 이동 경화의 경우에 국부화 진행이 빠르고 최대 변형률 값 또한 큰 것으로 나타났으며, 60% 단면 감소율의 최종 단계를 비교하면 그래프의 기울기가 이동 경화의 경우가 보다 더 급격하다는 것은 형성된 전단밴드의 폭이 보다 좁다는 것을 나타내는 것으로 살펴 알 수 있으며, 이는 기존의 연구된 경향과 일치하는 것으로 소성스핀을 적용한 이동 경화의 경우 국부화 진행을 보다 더 잘 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 5 의 경우 응력의 변화를 도시한 것이다. Fig. 3 의 경우와 같은 경향을 보이고 있으며, 중심부인 A지점에서 거의 같은 값을 갖지만, 결함에 예측되는 끝단부에 많은 차이가 커짐은 소성 스펀에 의한 추가적 변형으로 인한 것으로 생각되며, 초기 변형 단계에서의 응력값의 역전 현상이 보다 두드러지는 것 역시 실제로 스펀량이 거의 적고 실제로 변형에만 기여하게 되는 초기 소성 불안정 현상을 보여주는 것으로 보다 더 변형 거동을 정확하게 나타낸 것으로 생각된다. 또한, 변형의 말기에 가서 중심부의 변형이 멈추고 핵이 생기는 현상 또한, 이동 경화의 경우 A점에서 응력이 거의 동일함을 보여 주는 것으로 증명된다고 할 수 있다. 변형 거동은 소성 불안정, 안정 다시 소성 불안정의 상태로 진행되어 국부화 현상을 심화시키는 것으로 등방성 경화에서는 볼 수 없었던 현상의 가시화가 본 프로그램으로 가능하다고 할 수 있다. 또한, 보다 더 폭이 좁게 나타나는 전단밴드와 큰 응력값은 결함 발생의 경우 설명을 보다 잘 할 수 있도록 해 줄 것으로 생각된다.

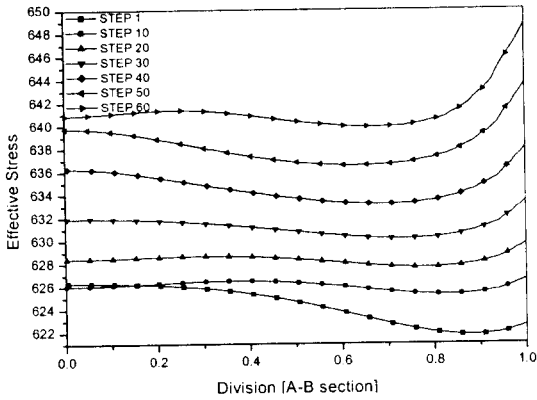


Fig. 4(a) Variation of effective stress for A-B section on isotropic hardening

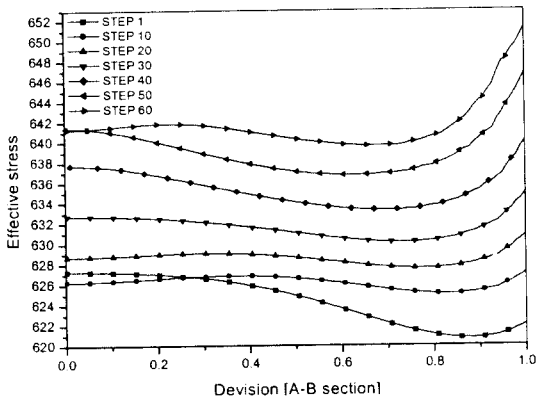


Fig. 4(a) Variation of effective stress for A-B section on kinematic hardening

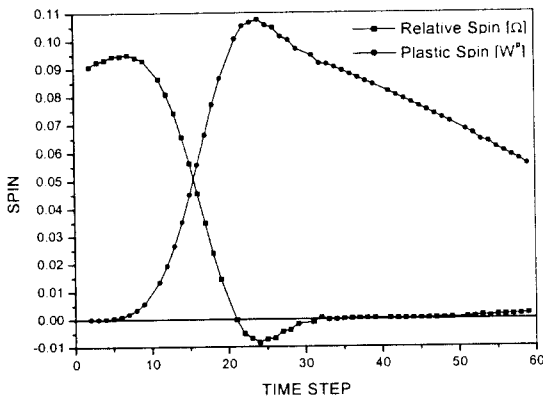


Fig. 5 Variation of spin at edge point (at point B)

Fig. 5의 경우 상대 스핀(relative spin)과 소성 스핀을 진행 단계에 따라 보여 주고 있다. 상대 스핀을 살펴보면, 국부화 진행이 심화됨에 따라 0이 되는 현상을 발견

할 수 있는데 이는 연속체 스핀(continuum spin)의 대부분이 소성 스핀으로 대체 되는 것으로 기존의 국부화 이론에 일치한다고 할 수 있다. 반면 소성 스핀은 전단 밴드 생성 후 점차 작아 지는 것으로 알려져 있는데 Fig. 3, Fig. 4을 참고로 하면, 진행 단계 20-30사이에서 급격한 경사가 발생하는 것으로 보아 B점에 국부화가 나타나는 것으로 살펴 볼 수 있으므로 소성 스핀의 거동 또한, 기존의 이론과 일치하는 것으로 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 그 동안 이론적이고, 기초적 연구로만 진행되었던 소성 스핀 문제를 소성 가공에 적용하여 보았다. 소성 스핀을 고려한 이동경화를 적용하였을 경우 국부화 진행의 설명이 가능하며, 이를 통한 결함의 발생 시 예측이 가능한 기초 연구를 실시하였다. 이를 통하여 자유 단조의 경우에도 국부화 진행이 이루어짐을 확인 할 수 있었으며 형상에까지 약간의 영향을 미침을 살펴 볼 수 있다. 그러나, 현재의 연구는 아직 정성적 해석일 뿐이고 추후에 정량적 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Mandel, J., 1973, "Equations constitutive et directeurs dans les milieux plastiques et viscoplastiques", Int. J. of Solids Structures, Vol. 9, p. 725.
- (2) Dafalias, Y.F., 1985, "The plastic spin", ASME, J. of Applied Mechanics, Vol. 52, p. 865.
- (3) Paulun, J.E., 1987, "On the application of the plastic spin concept for the description of anisotropic hardening in finite deformation plasticity", Int. J. of Plasticity, Vol. 3, p. 303
- (4) Asaro, R.J., 1985, "Material modelling and failure modes in metal plasticity", Mechanics of Materials, Vol. 4, p. 343.
- (5) Cherukuri, H.P., & Shawki, T.G., 1995, "An energy based localization theory : 1. Basic framework, 2. Effects of the diffusion, inertia and dissipation numbers", Int. J. Plasticity, Vol. 11, p. 15.
- (6) 정동택, 유요한, 1994, "4340강의 단열전단 밴드 생성에 대한 유한요소 해석 및 실험적 고찰", 대한기계학회논문지, 13권 5호, p. 1143.
- (7) 황두순, 이병섭, 윤수진, 홍성인, 1999, "고속변형률

조건을 고려한 단열전단밴드의 해석에 관한 연구”,
대한공업교육학회지, 24권 2호, p. 107.

- (8) 김완수, 이병섭, 황두순, 홍성인, 1999, “엷은 단조의 좌굴 및 소성 불안정 유동에 관한 연구”, 한국소성
가공학회지, 8권 4호, p. 393.