

평면이방성 알루미늄 재료의 귀발생 예측에 있어서 항복함수와 초기 Back-Stress의 영향

윤정환(1), F. Barlat(2), 정관수(3), 양동열(4), 장성기(1)

(1) LG 생산기술원 CAE Group, (2) Alcoa Technical Center, (3) 서울대 섬유고분자 공학과,
(4) 한국과학기술원 기계공학과

Influence of yield functions and initial back stress on the earing prediction of drawn cups for planar anisotropic aluminum alloys

J.W. Yoon(1), F. Barlat(2), K. Chung(3), D.Y. Yang(4), S.K. Chang(1)

(1) CAE Group, LG Production engineering Research Center, (2) Alcoa Technical Center, (3) Dept. of Fiber and Polymer Science, Seoul National University, (4) Dept. of Mechanical Eng., KAIST

Abstract

Anisotropy is closely related to the formability of sheet metal and should be considered carefully for more realistic analysis of actual sheet metal forming operations. In order to better describe anisotropic plastic properties of aluminum alloy sheets, a planar anisotropic yield function which accounts for the anisotropy of uniaxial yield stresses and strain rate ratios simultaneously was proposed recently [1]. This yield function was used in the finite element simulations of cup drawing tests for an aluminum alloy 2008-T4. Isotropic hardening with a fixed initial back stress based on experimental tensile and compressive test results was assumed in the simulation. The computation results were in very good agreement with the experimental results. It was shown that the initial back stress as well as the yield surface shape have a large influence on the prediction of the cup height profile.

Keywords : Planar anisotropy; Initial back stress; Earing simulation; Sheet metal forming

1. 서론

모든 박판은 평면이방성을 가지고 있으므로, 박판 성형 공정을 위한 적절한 이방성 항복 함수의 사용은 재료의 거동을 정확하게 묘사하는데 매우 중요하다. 또한, 이방성은 박판 성형 공정의 변형률에 영향을 미칠 뿐 아니라, 성형성에도 깊이 연관되어 있기 때문에, 박판 성형 공정에서 재료의 이방성은 실제 공정의 해석에 있어서, 주의 깊게 다루어 져야 한다.

지금까지 제안된 많은 항복함수 중에서, Hill [2]의 2차 항복식은 평면이방성을 시뮬레이션하기 위한 가장 일반적인 선택이 되어 왔고, 이 항복식은 지금까지도 steel에 대해서는 이방성 소성이론에 연관된 현상을 설명하기 위해서 유용한 것으로 알려져 있다.

최근에 Barlat등[1]은 알루미늄과 같은 비철금속에 적합한 개선된 항복함수를 제안하였다. 이 항복함수는 인장 항복응력과 r-value를 입력 값으로서 동시에 고려하기 때문에 알루미늄 재료의 이방성을 묘사하기에 적절한 것으로 보고 되었다. 이 항복함수는 결정체에 기초한 항복면과 일맥 상통하고,

polycrystalline 모델에 기초한 수식화 보다 비교적 간단하다.

새로운 평면 이방성 함수를 평가하기 위하여, 알루미늄 2008-T4를 대상으로 디프드로잉 동안의 귀발생을 시뮬레이션 하였고, 초기 back-stress (응력장에서 항복면의 이동)을 시뮬레이션에 고려하였다. 이때 초기 back-stress는 박판의 인장 및 압축 시험 결과에 기초하여 추측하였다. 시뮬레이션 결과는 실험 결과 및 Hill(1948)의 항복함수[2]를 사용한 결과와도 비교하였다. 개발된 프로그램[3]은 탄소성 updated Lagrangian, continuum-based shell 및 변형증분이론(incremental deformation theory)에 기초하여 수식화 하였고, 내연적 방법(implicit method)으로 해석을 수행하였다.

2. Barlat's(1996) 항복함수와 재료적 특성

Barlat는 다양한 알루미늄 재료에 적합한 일반적이고 새로운 평면이방성 항복함수를 제안하였다. 이 항복함수에 사용되는 이방성 계수들은 인장응력 및 r-value 들의 방향성으로부터 계산된다.

평면응력 상태에서 항복함수는 다음과 같이 정의된다.[1]

$$\begin{aligned} \psi &= \alpha_3 |S_1 - S_2|^m + \alpha_1 |S_2 - S_3|^m + \alpha_2 |S_3 - S_1|^m \\ &= 2\bar{\sigma}^m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $S_{i=1,2,3}$ 는 Cauchy 응력의 성분으로 정의되는 대칭행렬 $S_{\alpha\beta}$ 의 주값(principal value)들로서 다음과 같은 표현식을 갖는다.

$$S_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & 0 \\ S_{xy} & S_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_3(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) + C_2\sigma_{xx}}{3} & C_6\sigma_{xy} & 0 \\ C_6\sigma_{xy} & \frac{C_1\sigma_{yy} - C_3(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -S_{xx} - S_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고

$$S_{1,2} = \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{S_{xx} - S_{yy}}{2}\right)^2 + S_{xy}^2} \quad (3)$$

이때 $S_{\alpha\beta}$ 의 deviatoric 성질을 고려하면 $S_3 (= S_{zz}) = -S_1 - S_2 = -S_{xx} - S_{yy}$ 로서 정의된다. 또한 α_1, α_2 , and α_3 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_x \cos^2 2\theta + \alpha_y \sin^2 2\theta \\ \alpha_2 &= \alpha_x \sin^2 2\theta + \alpha_y \cos^2 2\theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \alpha_{z0} \cos^2 2\theta + \alpha_{z1} \sin^2 2\theta$$

여기서

$$\alpha_{z0} = 1 \text{ and } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 - S_{xx}}{S_{xy}} \right). \quad (5)$$

식 (2)에서 이방성을 표현하는 국부 직교축 (x,y,z)는 초기 브랭크의 압연방향, 횡(transverse) 방향 및 평판에 수직인 방향으로 일치시킨 후, 성형과정 중 그 축의 회전을 추적하게 된다.

식(2)에서 계수 $C_{i=1-6}$ 와 식(4)에서의 α_x, α_y and α_z 는 재료의 이방성을 표현하는 계수들이다. 만약, α_x, α_y and α_z 가 모두 "1"이면, Barlat(1996) 항복식은 Barlat(1991) 항복식이 되며, 이와 함께 $C_{i=1-6}=1$ 이면, 항복식은 Hosford 등방성 항복식으로 축소되게 된다(이때 $m=1$ or ∞ 이면 Tresca항복식, $m=2$ or 4이면 von-Mises항복식). 계수 m 은 재료의 결정체 구조에 연관된다. 즉, m 값이 크면 단축과 양축응력 상태에서의 항복면의 곡률반경이 줄어들게 된다. 일반적으로 FCC 재료에 대해서는 $m=8$, BCC구조에 대해서는 $m=6$ 이 추천 값이다.

그림 1 과 그림 2는 알루미늄 2008-T4에 대해 normalize된 항복 응력과 r-value분포를 보여주고 있다. 이 그림들에 Hill(1948) 항복함수로부터 얻은 결과도 비교관점에서 포함하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 Hill(1948) 항복식이 r-value분포는 실험과 잘 일치하나, 항복응력 분포는 과장되게 예측 함을 알 수 있다.

3. 초기 Back-Stress

그림 3은 압연방향과 loading축과의 각도에 대해서 인장 응력과 압축 응력의 실험치를 보여주고 있다. 단축 인장과 단축 압축의 응력이 다르기 때문에 인장과 압축 테스트의 데이터를 수용한 항복함수를 사용하는 것이 적절할 것이다. 항복면을 이동시키는 것은 이러한 효과를 고려할 수 있는 간단한 방법중의 하나이다. 이를 위하여 초기 back-stress를 그림 3의 결과를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

본 연구에서는 초기 back-stress중 β_x 와 β_y 를 "0"이 아닌 값으로 가정하였다. 시행착오법을 이용하여, 초기 back-stress값과 항복함수의 계수들이 재료의 인장, 압축 응력 및 r-value분포를 가장 잘 묘사할 수 있도록 결정되었다.

그림 4는 초기 back-stress를 포함한 항복면을 보여주고 있다. 또한 아래의 데이터는 초기 back-stress를 고려했을 때 Barlat(1996) 항복함수의 계수들이다.

Anisotropic coefficients for Al 2008-T4 :
 $m=8$, $C_1 = 0.956$, $C_2 = 0.964$, $C_3 = 0.993$, $C_6 = 0.903$,
 $\alpha_x = 2.8$, $\alpha_y = 1.4$, $\alpha_{z1} = 1.3$

Initial back stress ($\beta / \bar{\sigma}$) :

$$\beta_x = 0.04, \beta_y = 0.00, \beta_{xy} = 0.00$$

4. 결과 및 토론

새로운 항복함수의 성능과 초기 back-stress효과를 입증하기 위하여 알루미늄 2008-T4에 대하여 디프드로잉 과정에서 귀발생 현상을 관찰하였다. 금형의 dimension과 공정변수 값들은 참고문헌[4]에 주어진 값들을 이용하였다.

재료의 직교 대칭성을 이용하여 1/4만을 해석하였고, continuum based shell요소[3]로 탄소성 해석을 하였다. 또한, 항복면은 초기 back-stress만큼 이동된 상태에서 등방성 가공경화를 한다는 가정하에 시뮬레이션 하였다.

그림 5과 그림 6에서 측정된 컵의 높이 분포를 시뮬레이션에 의해 예측된 높이와 비교하였다. 그림 5은 back-stress를 고려하지 않은 상태에서 Barlat(1996)와 Hill(1948) 항복식에 기초한 결과들을 비교하였고, 그림 6은 Barlat (1996) 항복식에 대해, back-stress를 고려한 결과와 고려하지 않은 결과를 비교하였다. 우선 그림 5 에서 볼 수 있듯이 Hill (1948) 항복식으로 예측된 결과는 귀발생 경향은 맞게

예측되나, 그 크기는 Barlat(1996) 항복식에 비해 크게 과장되었음을 알 수 있다. 그 원인중의 하나는 항복응력의 상대적 차이가 귀(earing)의 크기를 결정하는데, Hill(1948)항복식의 경우 그림 1에서 항복응력의 크기가 과장되었기 때문이다. 그림 6에서는 Barlat(1996) 항복식에 초기 back-stress가 고려되었을 때 실험치와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이는 실제 컵의 디프드로잉 공정에서 인장과 압축변형이 같이 일어나기 때문에, 이와 같은 다른 인장과 압축거동을 back-stress 개념을 통해 시뮬레이션에 반영했기 때문이다.

정성적으로 간단한 모델과 실험에 기초한 참고문헌 [5]에 의하면 항복응력 이방성과 귀발생과는 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려졌다.

$$\begin{aligned} \text{case1) if } \sigma_0 < \sigma_{90}, \quad h_0 > h_{90} \\ \text{case2) if } \sigma_0 > \sigma_{90}, \quad h_0 < h_{90} \end{aligned} \quad (6)$$

where h is the cup height.

본 논문의 Al 2008-T4에 대한 귀발생 경향도 위의 Barlat의 모델과 일치하고 있음을 알 수 있다.

끝으로 그림 7은 초기 back-stress를 고려한 상태에서 압연방향과 횡방향에 대해서 두께 변형률 분포를 도시하였는데, 실험치와 아주 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

평면이방성을 묘사하는 새로운 Barlat(1996) 항복함수를, 초기 back-stress를 고려하여 내연적(implicit) 탄소성 쉘 코드에 성공적으로 구현하였다. 이 항복함수를 Al2008-T4 대해 항복면 및 항복응력과 r-value 방향성을 검증하였으며, Hill(1948) 항복식과도 비교하였다.

디프드로잉중 귀발생 현상을 검증하기 위해, Al 2008-T4를 모델로 원형컵 성형 시뮬레이션을 실시하였다. 인장응력과 압축응력의 차이를 고려하기 위하여, 초기 back-stress개념을 도입하여 소성변형이 일어나기 전에 항복면을 이동을 고려하였다. 인장 및 압축 데이터에 기초한 새로운 항복함수 계수와 초기 back-stress를 고려한 귀발생 예측이 실험치와 아주 잘 일치하고 있음을 보였다. 따라서, 적절한 항복함수의 사용과 항복응력 및 r-value방향성이 컵 드로잉 과정에서 귀발생 예측에 있어서 필수적인 요소들임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] F. Barlat, Y. Maeda, K. Chung, M. Yanagawa, J.C. Brem, Y. Hayashida, D.J. Lege, K. Matsui, S.J. Murtha, S. Hattori, R.C. Becker and S. Makosey, Yield function development for aluminum alloy sheet, *J. Mech. Phys. Solids*, **45**, 1727 (1997).

[2] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Roy. Soc. London*, **193A**, 281 (1948).

[3] J.W. Yoon, Ph.D thesis, Finite element formulation based on incremental deformation theory for sheet metal forming of planar anisotropic materials (1997).

[4] K. Chung and K. Shah, Finite element simulation of sheet metal forming for planar anisotropic metals, *Int. J. Plasticity*, **8**, 453 (1992).

[5] F. Barlat, S. Panchanadeeswaran and O. Richmond, Earing in cup drawing face-centered cubic single crystals and polycrystals, *Metallurgical Transaction A*, **22**, 1525 (1991).

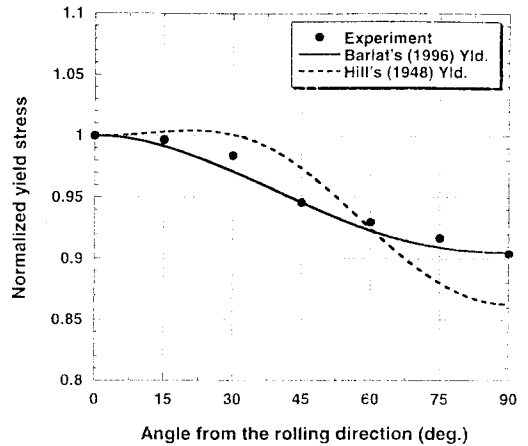


Fig.1 Normalized yield stress plot of an Al 2008-T4 for Barlat's (1996) and Hill's (1948) yield functions

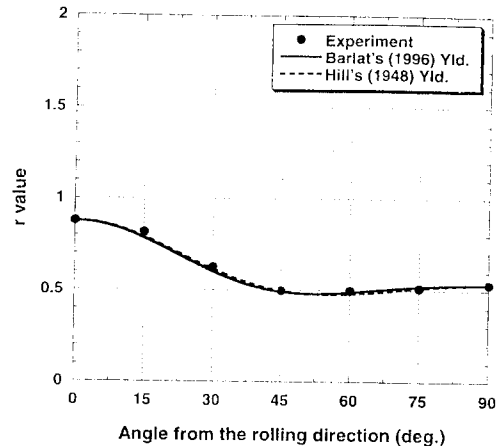


Fig.2 r-value plot of an Al 2008-T4 for Barlat's (1996) and Hill's (1948) yield functions

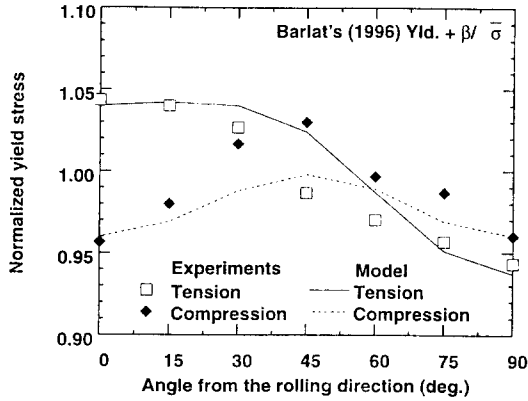


Fig.3 Variation of tensile and compressive yield stresses of an Al 2008-T4

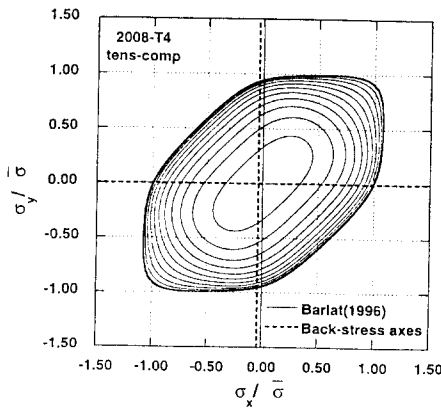


Fig.4 Yield surface plot of an Al 2008-T4 with initial back stress

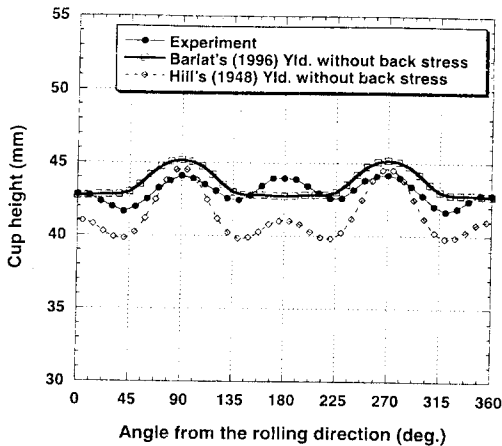


Fig.5 Comparison of predicted and measured cup heights of an Al 2008-T4 : results based on Barlat's (1996) and Hill's (1948) yield functions without initial back stress

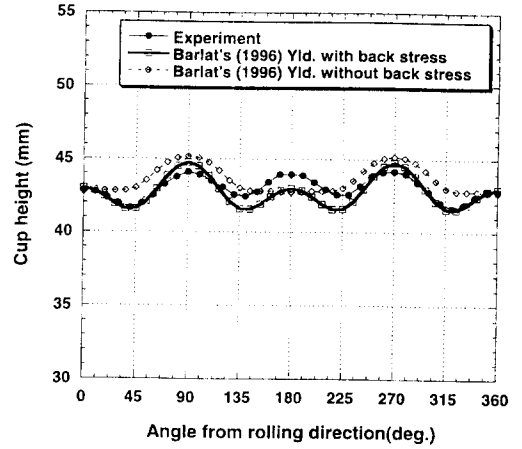


Fig.6 Comparison of predicted and measured cup heights of an Al 2008-T4 : results based on Barlat's (1996) yield function with and without initial back stress

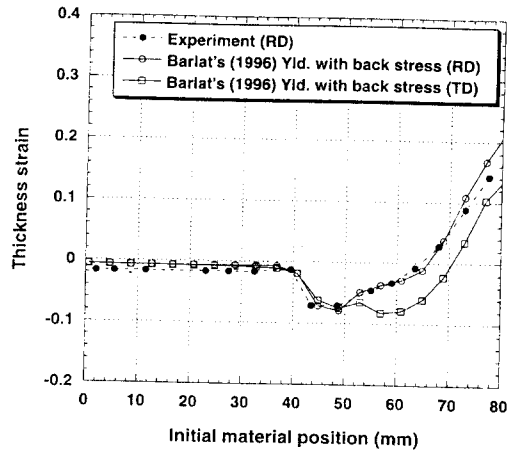


Fig.7 Comparison of predicted measured thickness strain of an Al 2008-T4 : results based on Barlat's (1996) yield function with initial back stress