

마그네슘 합금 판재의 구성식 개발: 스프링백에의 응용

이명규¹·김성준¹·김현영²

Modeling Constitutive Behavior of Mg Alloy Sheets for the Prediction of Sheet Springback

M. G. Lee, S.J. Kim, H. Y. Kim

Abstract

Unusual mechanical constitutive behavior of magnesium alloy sheets has been implemented into the finite element program ABAQUS via user material subroutine. For the verification purpose, the springback of AZ31B magnesium alloy sheet was measured using the unconstrained cylindrical bending test of Numisheet'2002. In addition to the developed constitutive models, the other two models based on isotropic constitutive equations with tensile and compressive properties were also considered. Preliminary comparisons have been made between simulated results by the finite element analysis and corresponding experiments and the newly proposed model showed enhanced prediction capability in springback prediction.

Key Words : Magnesium Alloy Sheet (마그네슘 합금 판재), Asymmetry (비대칭성), Constitutive Equations (구성방정식), Springback (스프링백), Unconstrained Cylindrical Bending Test (비구속 원통 굽힘 실험)

1. 서론

마그네슘 판재는 경량성 이외에도 높은 비강도, 우수한 용접성 그리고 부식저항성 또한 우수한 것으로 알려져 있어 자동차 산업뿐만 아니라 통신장비 등 전자산업에 있어서도 그 응용범위를 넓혀가고 있다 [1]. 하지만 마그네슘 합금 판재의 낮은 성형성과 특이한 기계적 성질에 대해서는 연구가 지금까지도 미흡한 실정이다. 마그네슘 합금 판재는 상온에서 인장과 압축시의 항복응력이 매우 상이하고 항복 이후의 거동 또한 상당한 차이를 보이는 비대칭성 재료라고 알려져 있다. 또한 판재의 이방성도 다른 재료에 비해서 상당하다고 보고된다 [2].

비록 철 및 알루미늄합금 등의 비철금속 판재의 일반적인 기계적 성질을 묘사할 수 있는 구성

식이 최근 들어 많이 개발되고 있지만 마그네슘 합금 판재와 같이 큰 비대칭성을 효과적으로 구현할 수 있는 구성방정식 (constitutive equations)에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 연속체 소성역학에 기초, 마그네슘 합금 판재의 이방성 및 비대칭성 구현 모델 [3]을 이용한 응용연구로써 스프링백을 해석하였다. 스프링백은 성형 후 발생하는 잔류응력에 의한 탄성복원 현상으로 공정최적화에 있어 매우 중요한 인자로 작용한다. 그러므로 본 연구에서는 스프링백 특성을 효과적으로 해석할 수 있는 예제로 Numisheet 2002 벤치마크 문제인 Unconstrained cylindrical bending 실험을 채택하여 제안된 구성방정식을 검증하였다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
2. 강원대학교 기계 메카트로닉스 공학부

2. 이론

본 연구에서의 경화거동은 이항복함수(two-surface) 모델에 기초한다. 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [3, 4]에 잘 나타나 있다.

마그네슘 합금 판재의 변형은 슬립(slip), 쌍정(twinning), 역쌍정(untwinning) 세가지 모드로 구성된다. 그러므로, 거리함수 $\bar{\delta}$ 는 기존의 초기 거리의 함수뿐만 아니라 변형내력의 함수로서 위의 세가지 변형 모두를 적절히 표현할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 다음의 거리함수를 도입한다.

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}(\bar{\delta}_{in}, \mathbf{c}_{old}, \mathbf{c}_{new}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{c}_{old} 와 \mathbf{c}_{new} 는 각각 변형 전후의 c-축 나타낸다. 식 (1)는 새로운 거리함수가 초기 거리, 소성변형정도 그리고 변형이력(텍스처 변화 이력)의 함수임을 나타낸다.

거리함수는

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \Phi(\Sigma_{xx} - \sigma_{xx}) = \Sigma_{xx} - \sigma_{xx} = \bar{\Sigma} - \bar{\sigma} \\ &= \bar{\Sigma} - (\bar{\sigma}_i + \mathcal{G}(\bar{\Sigma} - \bar{\sigma}_i)) = (1 - \mathcal{G})(\bar{\Sigma} - \bar{\sigma}_i) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Σ_{xx} 와 σ_{xx} 는 내부 및 외부함수위의 응력상태를 나타낸다. 또한 $\bar{\sigma}_i$ 와 \mathcal{G} 는 쌍정과 역쌍정 곡선을 적절히 표현할 수 있는 함수이다.

한편 압축 또는 쌍정 모드의 경화거동은 비대칭성을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\delta} = \frac{\sigma_{xx,0}}{\sigma_{xx,0}^C} \cdot \delta^C \left(\boldsymbol{\varepsilon}^{p,C} = \frac{\sigma_{xx,0}^C}{\sigma_{xx,0}^T} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \right) \quad (3)$$

여기서 δ^C 는 쌍정 시의 거리함수이며, $\frac{\sigma_{xx,0}}{\sigma_{xx,0}^C}$ 는 인장 및 압축의 비대칭성비를 나타낸다.

식 (2)은 다음과 같이 재 표현 될 수 있다.

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \frac{d\mathcal{G}}{d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}} \cdot (\bar{\Sigma} - \bar{\sigma}_i) + (1 - \mathcal{G}) \cdot \frac{d\bar{\sigma}_i}{d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}} + \mathcal{G} \cdot \frac{d\bar{\Sigma}}{d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}} \quad (4)$$

함수 $\bar{\sigma}_i$ 와 \mathcal{G} 의 기계적 상수는 연속적 인장/압축 실험에 의해서 얻어진 응력-변형을 곡선으로부터 구해진다. 두 함수의 일반적인 표현은 아래

와 같다.

$$\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i(\bar{\delta}_{in}, \mathbf{c}_{old}, \mathbf{c}_{new}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (5)$$

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}(\bar{\delta}_{in}, \mathbf{c}_{old}, \mathbf{c}_{new}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (6)$$

재료의 이방성 및 초기 항복응력의 비대칭성은 드러커-프라거의 항복함수에 이방성 계수를 도입하여 아래와 같이 변형되었다 [3,4].

$$\begin{aligned} \Phi &= p(\sigma_{xx}^2 - \beta_2 \sigma_{xx} \sigma_{yy} + \beta_2^2 \sigma_{yy}^2 + 3\beta_3^2 \sigma_{xy}^2)^{1/2} \\ &+ q(\sigma_{xx} + \beta_4 \sigma_{yy}) - \bar{\sigma}_{iso} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, p , q , β_2 , β_3 , β_4 는 실험적으로 구해지는 상수들이다.

식 (2), (5), (6) 및 (7) 에 필요한 거리 함수 및 항복함수 계수들은 본 연구의 선행연구인 참고문헌 [3,4]에 나타나 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. 결과

개발된 구성식을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 UMAT을 이용하여 구현하였다. 4 절점을 갖는 쉘 (Shell) 요소를 사용하여 일차원 인장-압축-인장 시뮬레이션을 수행하였다(Fig. 1). 시뮬레이션 결과, 초기 인장시 발생하는 슬립모드, 그리고 인장 후 압축시 발생하는 쌍정 모드 그리고 쌍정 후 재 인장시 일어나는 역쌍정 모드를 개발된 구성식이 잘 모사할 수 있었다. 또한, 쌍정시 발생하는 항복함수의 수축과 그 후 변형에 따른 항복 함수의 증가 또한 잘 모사되었다.

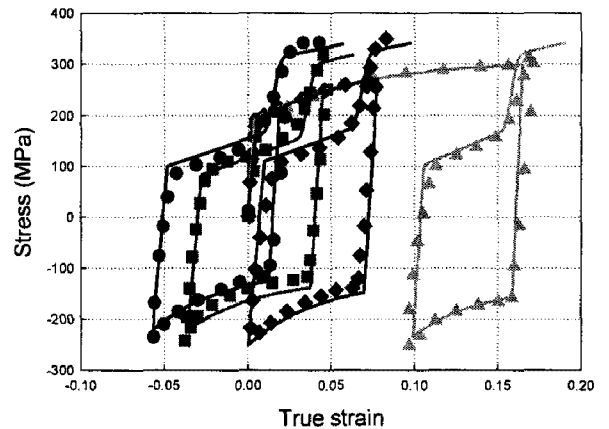


Fig. 1 Comparisons of calculated uni-axial T-C-T curves (lines) with measurements.

용했을 경우 스프링백이 실험값과 상당한 차이를 보임을 나타내고 있다.

4. 결론

상온에서 나타나는 마그네슘합금 판재의 특이한 기계적 성질인 비대칭성과 비등방성을 효과적으로 나타낼 수 있는 구성방정식을 개발 이를 유한요소해석에 도입하였다. 개발된 구성방정식을 검증하기 위하여 Numisheet 2002에서 제안된 Unconstrained Cylindrical Bending 에 의한 스프링백 실험을 수행 이를 유한요소 해석에 의한 결과와 비교하였다. 그 결과 개발된 비대칭형 구성방정식은 실험에 의한 스프링백 형상을 매우 잘 묘사할 수 있었지만 통상적으로 사용되는 등방 항복함수 및 등방 경화곡선을 이용한 해석과는 매우 차이가 있음이 확인되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 국제공동기술개발사업과 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 '차세대소재성형기술개발사업단'의 일부 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. S. Roberts, 1960, Magnesium and its alloys, New York: John Wiley.
- [2] X. Y. Lou, M. Li, R.K. Boger, S.R. Agnew, R.H. Wagoner, 2007, Hardening Evolution of AZ31B Mg Sheet, Int. J. Plast. Vol. 23, p. 44.
- [3] M.G Lee, R.H. Wagoner, K. Chung, J.K. Lee, H.Y. Kim, 2007, Constitutive Modeling for Anisotropic/Asymmetric Hardening Behavior of Magnesium alloy sheets, Int. J. Plast., (in press)
- [4] 이명규, 정관수, 김현영, 2007, AZ31B 마그네슘 합금 판재의 구성식 개발, 한국소성가공학회지, Vol. 16, p. 234.
- [5] Numisheet'2002 Benchmark Problem, 2002, In: Yang, D.Y., Oh, S.I., Huh, H., Kim, Y.H. (Eds.), Proceedings of 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes, Jeju, Korea

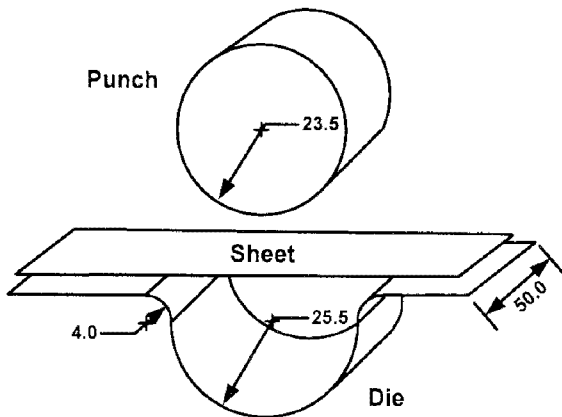


Fig. 2 Schematic drawing of unconstrained cylindrical bending test.

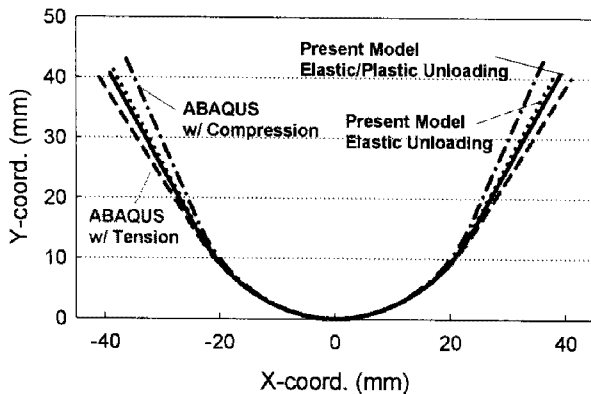


Fig. 3 Springback profiles of unconstrained cylindrical bending with three different constitutive models.

제안된 구성방정식의 검증을 위하여 Numisheet 2002 벤치마크 문제인 Unconstrained Cylindrical Bending (Fig. 2) 문제가 이용되었다. 자세한 실험 방법은 참고문헌 [5] 에 나타나 있다. 비교를 위하여 본 연구에서 개발된 구성방정식 외에 ABAQUS에서 제공하는 등방 항복함수 및 등방경화거동을 이용한 예측값도 함께 고려되었다. 이 때 마그네슘 합금의 비대칭성으로 인해 인장 물성 및 압축물성을 기초로 하는 두 가지 경우를 고려하였다. Fig.3에 세가지 구성식에 의한 스프링백 후 형상이 실험값과 비교되었다. 비교 결과 본 연구에서 제안된 비대칭성 구성방정식이 실험값과 가장 잘 일치됨을 알 수 있으며, 일반적으로 이용되는 등방 물성에 기초한 구성식을 사