

Combined Isotropic-Kinematic 경화규칙에 기초한 자동차용 알루미늄합금 및 Dual-Phase 강 판재의 스프링백 예측

이명규* · 김대용* · 정관수* · Chongmin Kim** · Michael L. Wenner***

Spring-back Evaluation of Automotive Sheets Based on Combined Isotropic-Kinematic Hardening Rule

M. G. Lee* · D. Kim* · K. Chung* · C. Kim** · Michael L. Wenner***

Abstract

In order to evaluate spring-back behavior in automotive sheet forming processes, a panel shape idealized as a SS-rail has been investigated. After spring-back has been predicted for SS-rails using the finite element analysis, results has been compared with experimental measurements for three automotive sheets. To account for hardening behavior such as the Bauschinger and transient effects in addition to anisotropic behavior, the combined isotropic-kinematic hardening law based on the Chaboche type single-surface model and a recently developed non-quadratic anisotropic yield function have been utilized, respectively.

Key Words : Spring-back, Bauschinger effect, Isotropic-kinematic hardening, Anisotropic yield function

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 일반적인 고강도 판재를 더 가볍고, 에너지 효율성이 뛰어난 알루미늄 합금이나 2 상 강 판재(DP-Steel)로 대체하려는 노력이 많이 시도 되고 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고, 이 두 재료는 기존의 재료에 비하여 큰 스프링백을 가지는 단점 또한 가진다. 이러한 단점을 극복하려는 노력으로 유한요소해석에 기초한 수치적인 방법이 성형해석을 위한 디자인 단계에서 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 본 연구에서는, 스프링백을 정확히 예측할 수 있는 능력을 향상시키기 위하여, unloading 시 관찰되는 Bauschinger 및 transient 효과

를 설명할 수 있는 Chaboche 형의 단표면(single-surface) 모델에 기초한 구성방정식을 도입하였다⁽¹⁾. 또한 판재의 비등방성을 고려하기 위하여 최근에 개발된 Barlat 의 Yld2000-2d 함수도⁽²⁾ 함께 이용하였다. 판재에 대한 이방성을 측정하기 위한 실험으로 일축 신장, 등이축 신장 실험이, unloading 시 발생하는 Bauschinger 효과를 측정하기 위해서는 일축 인장/압축 및 압축/인장 실험이 수행되었다. 이 때, 압축시 발생하는 좌굴을 방지하기 위한 도구가 개발되었으며 그 결과 약 10%의 압축 변형을 얻을 수 있었다. 새로운 구성방정식을 검증하기 위하여 SS-rail 이 디자인 되었으며, 두 가지의 알

* 서울대학교 재료공학부

** Materials & Processes Lab., General Motors

*** Manufacturing Systems Research Lab., General Motors

루미늄 합금(AA5754-O, AA6111-T4)과 2 상 고강도 판재에 대한 수치모사 결과가 실험과 비교되었다.

2. 이론

2.1 경화 규칙

Bauschinger 효과 및 transient 거동을 나타내기 위하여 Chaboche 형의 단표면 모델에 기초한 혼합 isotropic-kinematic 경화 규칙을 이용하였다.

$$f(\sigma - \alpha) - \bar{\sigma}_{iso} = 0 \quad (1)$$

위의 식에서 σ 는 Cauchy 응력, α 는 이동응력(back stress), $\bar{\sigma}_{iso}$ 는 유효응력 그리고 f 는 항복함수를 나타낸다. 이동 응력의 증가량은 다음과 같이 두 부분으로 나누어 진다.

$$d\alpha = d\alpha_1 - d\alpha_2 = \frac{1}{\bar{\sigma}_{iso}} h_1 d\bar{\epsilon} (\sigma - \alpha) - h_2 d\bar{\epsilon} \alpha \quad (2)$$

여기서, h_1 과 h_2 는 각각 $\frac{d\bar{\alpha}_1}{d\bar{\epsilon}}$ 와 $\frac{d\alpha_2}{d\bar{\epsilon}}$ 를 나타낸다.

이 때, $d\bar{\alpha}_1 = f(d\alpha_1)^m$ 이고, $d\alpha_2$ 는 유효변형을 $\bar{\epsilon}$ 의 함수이다. 구성방정식을 완성하기 위하여서는, 항복함수의 크기와 위치이동을 묘사하는 경화규칙을 측정해야만 하는데, 이는 단순 인장/압축 또는 압축/인장 실험에 의하여 효과적으로 구할 수 있다.

2.2 비이차 비등방성 항복 함수

항복함수의 초기 이방성을 설명하기 위하여, Barlat 등에 의해서 최근 개발된 Yld2000-2d 가 평면응력 가정하에서 이용되었다. 새로운 직교이방 항복함수는 두개의 비이차 등방성 항복함수의 합으로 구성되어 있으며, 알루미늄 합금등의 이방성을 잘 묘사할 수 있다고 알려져 있으며, 8 개의 이방성 계수를 지닌다. 이방성 계수는 세 방향으로의 단순 인장 실험과 등이축 인장 실험을 통하여 얻어 질 수 있다. Yld2000-2d 에 대한 자세한 내용은 다음의 참고문헌에 잘 설명되어있다⁽²⁾.

2.3 변형증분이론에 의한 수식화

개발된 조성방정식을 유한요소법에 응용하기 위하여서는 주어진 시간중분 동안 요소의 변형경로를 가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 흐름이론(flow

theory)으로부터 이러한 특별한 경로를 따르는 $\dot{\gamma}$ 성방정식의 적분은 변형증분이론⁽³⁾ (incremental deformation theory)에 기초하였다. 변형증분이론에 따라 주어진 변형증분 $\Delta\epsilon$ 에 대하여, 경화규칙 및 주어진 항복함수를 이용하여 응력의 증분을 구할 수 있다. 즉 미지수가 $\Delta\bar{\epsilon}$ 인 아래의 비선형 방정식이 얻어지게 된다.

$$f^{\frac{1}{m}}(\sigma_0 - \alpha_0 + \Delta\sigma - \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) = \bar{\sigma}_{iso}(\bar{\epsilon}_0 + \Delta\bar{\epsilon}) \quad (3)$$

이 식에서 첨자 "0" 은 초기상태를 의미하며, 오른쪽 항의 값은 측정된 경화 곡선으로부터 얻어질 수 있다. 위의 식에서 새로운 radial 응력 $\sigma - \alpha$ 는 경화곡선 $\bar{\sigma}_{iso}(\bar{\epsilon})$ 위에 있어야 하며 이러한 응력 적분과정을 그림 1 에 나타내었다.

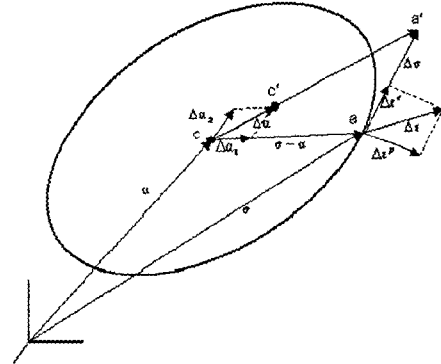


Fig. 1 A schematic view of the stress update

3. 실험

본 연구에서는 세 종류의 자동차용 판재가 사용되었다. 1.5mm 의 AA5754-O, 1.25mm 의 AA6111-T4 및 1.2mm 2 상 강판재. 세 가지 판재의 경화 거동을 측정하기 위한 인장실험과 Bauschinger 및 transient 거동을 얻기 위한 일축 인장/압축과 압축/인장 실험이 수행되었다. 이 때 압축 실험시 발생하는 판재의 좌굴을 방지하기 위하여 기존의 방법⁽⁴⁾을 응용하여 판재의 옆면에서 클램핑 힘을 가할 수 있는 특별히 제작된 도구를 제작하였다. 이와 같은 방법에 의하여 얻어진 인장/압축 곡선은 파찰 및 이축응력 상태에 의한 오차가 존재하기 때문에 이론적인 방법에 의하여 두 오차를 보정하였다. 그림 2 은

실험에 의하여 얻어진 인장/압축 및 압축/인장실험 결과이다. 이 그림에서 압축/인장 곡선은 원점에 대하여 180° 회전 후 아래부분을 위로 이동시킨 그림이다. 이 그림에서 보듯이 reverse 곡선은 항복이 더 빨리 일어났으며(Bauschinger effect) 빠른 경화속도 변화율을(transient 거동) 나타냄을 알 수 있었다.

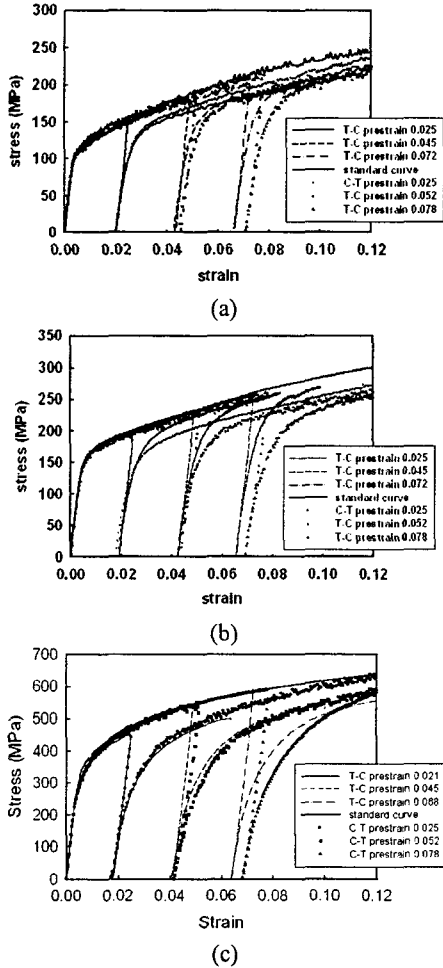


Fig. 2 Tension/compression and compression/tension curves for (a) AA5754-O (b) AA6111-T4 (c) DP-Steel

위의 실험 곡선으로부터 등방 및 이동 경화 부분이 분리되었으며 Chaboche 형 이동경화규칙의 인자들이 계산되었다.

세 가지 판재에 대한 비등방성을 고려하기 위하여 최근에 개발된 Yld2000-2d 가 이용되었는데, 이를 위하여 세 방향 (0°, 45°, 90°)의 인장 실험을 통하여 각 방향의 항복응력과 r 값을 구하였으며, hydraulic 별지

실험을 통하여 등이축 항복응력을 구하였다. 이 들로부터 7 개의 연립 비선형 방정식을 풀어 Yld2000-2d 의 계수들을 구하였으며, 이때 항복함수의 지수(m)는 알루미늄합금은 m=8, 2 상 강판은 m=6 으로 가정하였다.

유한요소해석에 의한 스프링백거동의 실험적 검증을 위하여 실제 산업용 부품을 변형시킨 SS-rail 이 새로이 디자인 되었으며 이를 그림 3 에 나타내었다. 서로 다른 블랭크힘(BHF) 과 마찰조건에서 성형된 성형품의 스프링백 양은 광학 좌표 측정 장치(CMM)에 의하여 측정되었으며, 얻어진 결과는 유한요소해석의 결과와 비교되었다. 성형 후 다이로부터 분리된 성형품은 sidewall, wall opening 을 포함하는 스프링백 뿐만아니라 비틀림 현상도 함께 나타났다.

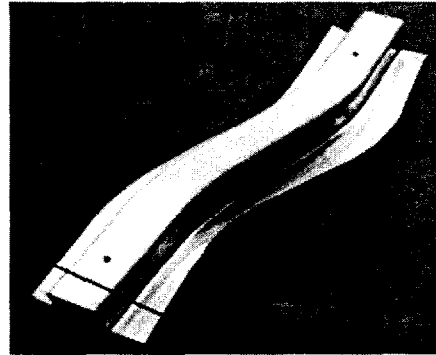


Fig. 3 SS-rail part

4. 결 과

본 연구에서 개발된 경화 규칙 및 비이차 비등방성 항복 함수의 검증을 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 가 사용되었다. 스탬핑 공정은 외연적 코드인 ABAQUS/explicit 와 사용자 서브루틴 VUMAT 이, 스프링백 해석은 내연적 코드인 ABAQUS/standard 와 사용자 서브루틴 UMAT 이 사용되었다. 그림 4 에 단면 A-A' 에서의 유한요소해석에 의해 예측된 스프링백량과 실험값을 비교하였다. 이 때, 블랭크힘과 마찰계수는 알루미늄 합금은 25kN, 0.1 이고 DP-steel 은 42kN, 0.1 이었다. 그림에서 세 판재 모두 sidewall curl 과 플랜지 스프링백을 나타내었으며,

수치해석과 실험결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

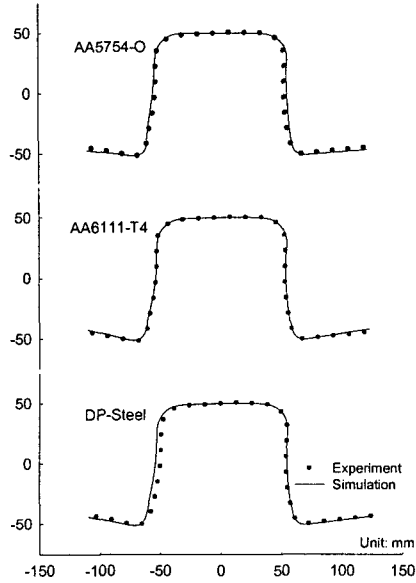


Fig. 4 Spring-back profiles at cross-section A-A'

그림 5 은 수치해석과 실험에서 측정된 비틀림을 보여주고 있다. 비틀림은 SS-rail 의 왼쪽과 오른쪽 끝부분의 상대적인 비틀림 각 차이로 정의되었다. 그림에서 유한요소해석에 의한 비틀림 값은 실험값과 상대적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

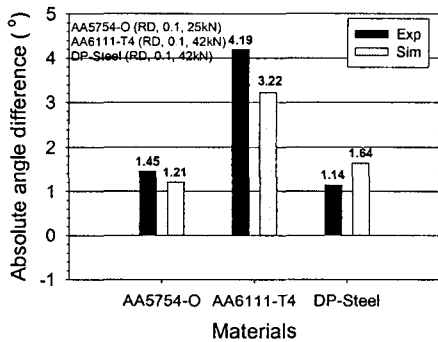


Fig. 5 Comparison of twist angles

4. 요약

본 연구에서는 자동차용 판재 성형시 발생하는 스프링백을 정확히 예측하기 위하여, Chaboche 형의 단표면 이론에 기초한 혼합형 등방-이동경화규칙이 개발되었다. 또한 판재의 이방성을 위하여 최근 개발된 Barlat 의 Yld2000-2d 비이차 비이방성 항복함수가 이용되었다. 단순인장실험과 인장/압축(압축/인장) 실험에 의하여 Bauschinger 및 transient 거동 과 비이방성 이 측정되었으며, 유한요소해석에 의한 구성방정식의 검증을 위해 SS-rail 이 제작되었다. 유한요소해석에 의한 수치해석의 결과는 스프링백과 비틀림양에 있어서 실험과 잘 일치함을 알 수 있었다.

후기

This work has been performed under the joint project between GM and SNU, while ALCAN and US steel supplied materials. ALCAN also provided bulge tests. The authors greatly appreciate their support.

참고 문헌

- (1) Chaboche, J. L., 1986, "Time independent constitutive theories for cyclic plasticity", Int. J. Plasticity, Vol. 2, p. 149.
- (2) Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Choi, S-H, Pourboghra, F., Chu, E. and Lege, D.J., 2003, "Plane stress yield function for aluminum alloy sheets-Part I: Theory," Int. J. Plasticity, Vol. 19, pp.1297-1319
- (3) Chung, K. and Richmond, O., 1993, "A deformation theory of plasticity based on minimum work paths", Int. J. Plasticity, Vol. 9, p. 907.
- (4) Balakrishnan, V., 1999, "Measurement of in-plane Bauschinger effect in metal sheets", Master's thesis, The Ohio State University.