

변형률속도 효과를 고려한 AZ31B 판재의 온간 성형한계도 예측

최선철¹, 김형종[#]

Prediction of the Forming Limit Diagram for AZ31B Sheet at Elevated Temperatures Considering the Strain-rate Effect

S. C. Choi, H. J. Kim

Abstract

The purpose of this study is to predict the forming limit diagram (FLD) of strain-rate sensitive materials on the basis of the Marciniak and Kuczynski (M-K) theory. The strain-rate effect is taken into consideration in such a way that the stress-strain curves for various strain-rates are inputted into the formulation as point data, not as curve-fitted models such as power function. To solve the nonlinear system of equations derived from the equilibrium and constraints in the groove region and the safe zone, the Newton-Raphson method is used. The theoretical FLDs using four different yield criteria, that are von Mises, Hill (1948), Hill (1979), Logan and Hosford, are compared with the experimental, numerical (FEA) and other theoretical results. A new trial is made where a modified M-K model having n -step grooves is introduced to describe a real localized neck.

Key Words : AZ31B sheet (AZ31B 판재), Forming limit diagram (성형한계도), M-K theory (M-K 이론), Strain-rate (변형률 속도)

1. 서론

성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 Keeler와 Goodwin에 의해 처음으로 소개된 이래 판재의 성형한계를 평가하는 가장 보편적인 방법으로 인정 받아왔다. 실험적으로는 보통 지름 100mm 정도의 반구형 펀치로 여러 가지 폭을 가진 시편들을 신장성형하여 다양한 변형모드에서의 파단한계를 측정하는 방법으로 성형한계도를 구하나, 그 작업에 많은 비용과 시간이 소모되고 때로는 기술적 어려움도 따르므로 이론이나 유한요소해석과 같은 비실험적 방법으로 통하여 성형한계도를 예측하고자 하는 연구가 많이 수행되었다.

Marciniak과 Kuczynski (M-K)[1]는 부변형률(양($\epsilon_2 > 0$))인 영역에서의 성형한계를 예측하기 위해 편평한 판재의 일부에 주변형률 방향에 수직

으로 설정한 홈(groove)에 걸쳐 두께 또는 강도 상의 초기 결함이 존재하고, 판재가 2축 인장 하에서 변형됨에 따라 국부 neck을 야기한다고 가정하여 성형한계를 예측하였다. 이러한 M-K 이론은 이후 여러 학자들에 의해 성형한계에 미치는 변형률속도민감성지수(m), 재료 이방성(R -value), 이방성 항복조건, 초기 재료결함(f_0) 형태 등의 영향을 고려할 수 있도록 수정되었고, 주응력축에 직각이 아닌 방향의 홈을 가정함으로써 부변형률이 음($\epsilon_2 < 0$)인 영역까지 확장되었다. 최근에는 다양한 이방성 항복조건을 사용한 예측 결과를 실험값과 비교·분석한 연구가 많이 보고되고 있다[2-5].

본 연구에서는 일반적인 가공경화식으로 곡선 근사(curve fitting)하기 어려운 마그네슘 합금재료의 온간 응력-변형률 데이터를 변형률속도별로 직접 입력하여 성형한계도를 예측하고자 한다. M-K

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과
교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부,
E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

모델은 국부 넥을 표현하기 위한 모델이므로, 변형률속도에 민감한 재료에서 나타나는 확산 넥을 더 잘 구현하기 위하여 기존의 단일 홈 대신 계단식 홈(*n*-step groove)을 가진 모델을 제안하고 그 유용성을 확인해보고자 한다. 이에 앞서 본 연구의 신뢰성을 평가하기 위하여 강판재의 냉간 성형한계도를 예측하고 다른 연구 결과들과 비교하였다.

2. M-K 이론 및 수식화

M-K 이론은 Fig. 1(a)와 같이 결함이 없는 영역(A)과 두께방향 결함이 존재하는 영역(B)이 있다고 가정하고, 제 1 주응력방향(1-축)의 힘 평형식과 제 2 주응력방향(2-축)의 변형을 적합조건식으로부터 그 수식화 과정이 전개된다. 즉,

$$F_1^A = F_1^B \quad (1)$$

$$d\varepsilon_2^A = d\varepsilon_2^B \quad (2)$$

먼저 A 영역에서의 상당소성변형률증분($d\bar{\varepsilon}^A$)을 결정하면, 유동응력식으로부터 항복응력을 계산할 수 있다. 응력 비($\alpha = \sigma_2^A / \sigma_1^A$)를 일정한 값으로 놓고, 상당응력을 항복응력으로 대체하면 항복함수로부터 1, 2 방향 응력(σ_1^A, σ_2^A)을 계산할 수 있다. 그리고 유동법칙(flow rule)에 의해 각 방향 변형률증분($d\varepsilon_1^A, d\varepsilon_2^A$)을 결정할 수 있다. 1, 2 방향 응력과 변형률증분은 텐서 변환법칙에 따라 홈에 수직(normal) 방향(n) 및 평행(tangential) 방향(t)의 성분들로 변환할 수 있다.

한편, B 영역에서의 힘평형 식을 n, t 방향으로 나타내면,

$$\sigma_m^A = \sigma_m^B \exp(\varepsilon_3^B - \varepsilon_3^A) t_0^B / t_0^A = f \sigma_m^B \quad (3)$$

$$\sigma_n^A = \sigma_n^B \exp(\varepsilon_3^B - \varepsilon_3^A) t_0^B / t_0^A = f \sigma_n^B \quad (4)$$

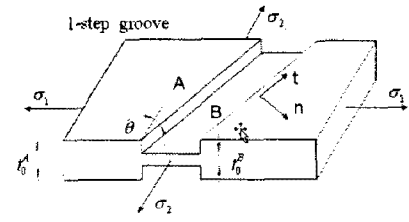
여기서 영역 A 와 B 의 두께 비(t^B / t^A)로 표현되는 재료 결함은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = f_0 \exp(\varepsilon_3^B - \varepsilon_3^A) \quad (5)$$

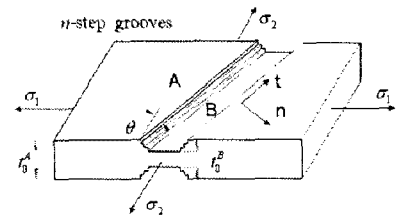
그리고 B 영역에서의 상당소성변형률증분($d\bar{\varepsilon}^B$)은 상당응력($\bar{\sigma}$)과 함께 등가 소성일의 원리(principle of equivalent plastic work)를 만족한다. 즉,

$$d\bar{\varepsilon}^B \bar{\sigma} = d\varepsilon_m^B \sigma_m^B + d\varepsilon_n^B \sigma_n^B + d\varepsilon_t^B \sigma_t^B \quad (6)$$

여기서 상당응력은 유동응력으로부터 구할 수 있으므로 식(6)은 총 7 개의 미지수를 갖게 된다. 그러나 변형률증분은 유동법칙에 의해 응력의 함수로 나타낼 수 있으므로, 결국 B 영역의 미지수는



(a) Conventional 1-step groove



(b) N-step groove

Fig. 1 M-K model in determination of the FLD

다음과 같이 4 개로 줄일 수 있다.

$$\mathbf{x} = [\sigma_m^B \quad \sigma_n^B \quad \sigma_t^B \quad d\bar{\varepsilon}^B]^T \quad (7)$$

이 4 개의 미지수는 4 개의 비선형방정식 (2), (3), (4) 및 (6)으로부터 Newton-Raphson 법을 사용하여 계산할 수 있다. 계단식 홈의 경우에는 맨 바깥쪽 홈에서부터 이 비선형연립방정식을 풀어 한 계단씩 진행하여 가장 안쪽 홈에서의 미지수를 구함으로써 한 단계 변형률증분에 대한 계산이 끝난다.

미지수들의 초기값은 미리 계산한 A 영역의 값들을 사용하였으며, 반복 계산 시 해의 수렴 기준으로 10^{-9} 을 사용하였다. 한계변형률은 두 영역의 상당소성변형률증분 비($d\bar{\varepsilon}^B / d\bar{\varepsilon}^A$)가 임계값 이상일 때의 A 영역 변형률로 결정하며, 보통 이 임계값으로 10 을 사용한다.

부변형률이 양인 영역에서는 홈의 각도(θ)가 항상 0° 이므로 전단응력(σ_m^B)이 존재하지 않기 때문에 식(4)와 함께 미지수 σ_m^B 는 제거된다. 부변형률이 음인 영역에서는 일정한 응력 비에서 홈의 각도에 따른 주변형률 및 부변형률을 계산하고 주변형률이 최소가 되는 변형률을 한계변형률로 정한다.

3. 해석 결과

전 절의 알고리즘과 프로그램을 검증하기 위하여 NUMISHEET 2008 Benchmark[6] 문제에 제시된 재료(HC220YD, 두께 0.8mm)에 대한 성형한계도를 구하고, 발표된 실험 데이터 및 타 연구자의 결과

들과 비교하였다. 이 재료의 단축인장시험 결과 및 곡선근사된 경화식은 Fig. 2 와 같다. 본 연구에서는 Ghosh 및 Hockett-Sherby 모델을 혼합한 조합(combination)모델을 이용하였으며, 이방성 항복조건으로는 Hill '48 과 Logan and Hosford 식을 사용하였다. 변형률증분($d\epsilon_1^A$)은 0.0001, 초기 재료 결함(f_0)은 0.998 로 설정하였다.

Fig. 3 은 이론, 해석 또는 실험을 통한 타 연구자의 결과들과 본 연구 결과를 비교한 그림이다. 드로잉 및 평면변형 모드에서는 2 가지 항복조건을 사용한 본 연구 결과는 거의 일치하며 M-K 모델을 사용한 Eyckens 등의 결과와도 차이가 없으나, 실험값보다는 낮은 한계변형률을 주는 것으로 나타났다. 등축변형으로 갈수록 항복조건에 따라 다소 차이를 보였고, 실험값과는 Logan and Hosford 항복조건이 더 잘 맞는 결과를 나타내었다.

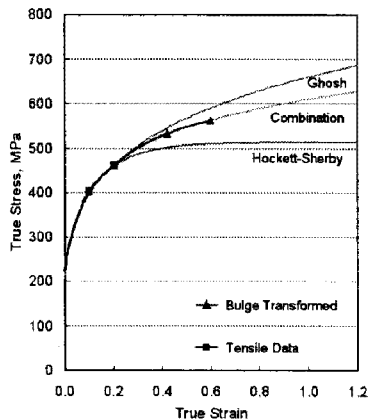


Fig. 2 True stress-strain data and hardening model of HC220YD steel

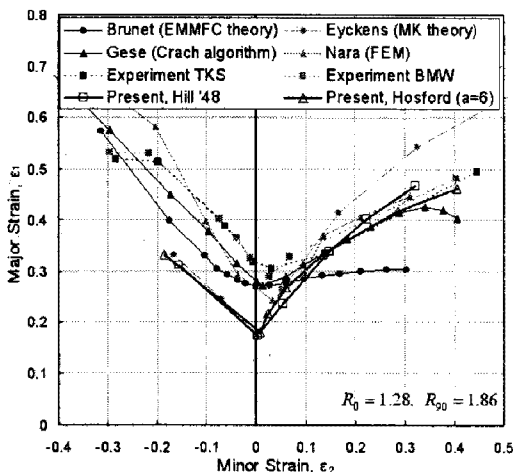


Fig. 3 Comparison of theoretical and experimental results for HC220YD steel

AZ31B 마그네슘 판재의 온간 성형한계도를 예측하기 위해 Fig. 4 와 같이 250°C의 속도별 인장 시험 데이터를 사용하였다. 마그네슘 판재는 온간에서 연화(softening) 거동을 나타냄으로 기존의 경화식으로 곡선근사를 하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 변형률속도별 유동응력 데이터를 직접 입력하여 변형률속도가 고려된 성형한계도를 예측하였다. 우선 Fig. 4 에서와 같이 연화 거동을 보이는 데이터를 그대로 사용한 경우(Case A)와 응력 최대점 이후에는 응력을 그대로 유지하는 경우(Case B, 점선으로 표시)에 대해서 살펴보았다.

변형률증분($d\epsilon_1^A$)은 0.002, 초기 재료 결함은 0.95, 0.99, 0.995 를 사용하여 결함 크기에 따른 성형한계곡선을 Fig. 5 에 비교하였다. 이방성 항복조건은 Hill '79 식을 사용하였다. 초기 재료 결함에 따라 성형한계곡선의 차이가 크게 나타났으며, 이는 M-K 이론의 근본적인 문제점이기도 하다. 한편, 재료물성 표현의 차이에 따라서도 성형한계곡선의 차이가 크게 나타났다.

Fig. 6 은 von Mises, Hill '48, Hill '79 및 Logan and Hosford 항복조건을 사용한 성형한계도 예측 결과를 선행 연구를 통해 확보한 온간 성형한계도 실험 결과와 비교한 것이다. 재료물성은 Case B, 초기 재료 결함은 0.99 를 사용하였다. 평면변형에서는 항복조건에 관계없이 실험과 유사한 결과를 보이고 있으며, 드로잉 모드에서는 실험값보다 낮게 나타났다. 등축 변형에서는 Hill '79 식이 실험값에 상당히 접근하고 있으나, 1 사분면에서 전반적으로 실험 결과와 차이를 보이고 있다.

한편, Fig. 1(b)와 같은 계단식 흠을 가진 모델로부터 계산한 성형한계선은 Fig. 7 과 같이 계단 수가 증가할수록 낮게 나타났다. 온간성형의 경우

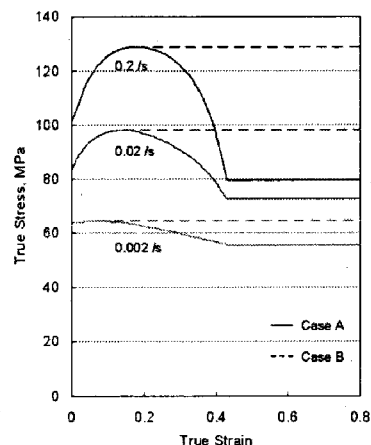


Fig. 4 True stress-strain data of AZ31B Mg sheet

재료가 변형률속도에 민감해져서 네킹이 국부적으로 진전되는 대신 넓은 영역으로 확산되므로, 이 현상을 잘 구현하기 위하여 계단식으로 여러 개의 흠을 가진 모델을 제안하고 성형한계를 예측을 시도하였으나, 의미있는 결과를 도출하기까지는 더욱 정교한 연구가 필요할 것으로 보인다.

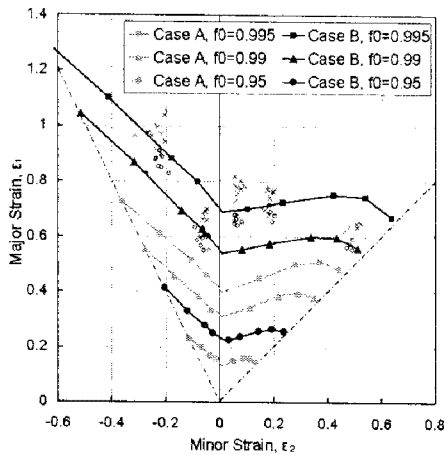


Fig. 5 Comparison of the FLC between Case A and B

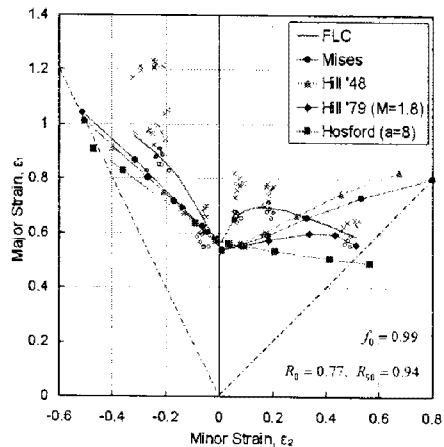


Fig. 6 The effect of yield criteria on FLC for AZ31B

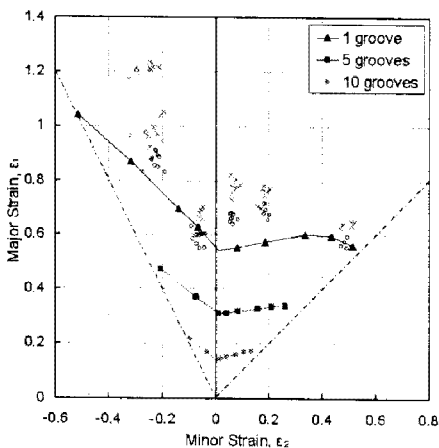


Fig. 7 The effect of the number of grooves on FLC

4. 결론

M-K 이론을 바탕으로 변형률속도를 고려한 성형한계도 예측을 위한 알고리즘과 프로그램을 개발하고, HC220YD 강판과 AZ31B 마그네슘 합금판재에 적용하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 여러 가지 이방성 항복조건을 선택적으로 사용할 수 있고, 변형률속도에 따른 응력-변형률 데이터를 직접 입력하여 성형한계를 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

(2) HC220YD 강판에 대하여 이론, 해석 또는 실험을 통한 타 연구자의 결과들과 비교하여 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

(3) AZ31B 마그네슘 합금 판재의 온간 성형한계 예측 결과는 실험값과 다소 차이를 나타냈으나, 이론 및 실험 양면으로부터 보다 정확한 접근이 필요한 것으로 판단된다.

(4) 확산 넥을 구현하기 위하여 계단식 흠을 가진 모델을 제안하였으나, 이에 대한 효과를 입증하기 위해서는 지속적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967, Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal, I. J. Mech. Sci., Vol. 9. pp. 609-620.
- [2] M. C. Butuc, A. B. Rocha, J. J. Gracio, J. F. Duarte, 2002, A more general model for forming limit diagrams prediction, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 125-126, pp. 213-218.
- [3] A. F. Avila, E. L. S. Vieira, 2003, Proposing a better forming limit diagram prediction a comparative study, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 141, pp. 101-108.
- [4] M. Ganjani, A. Assempour, 2007, An improved analytical approach for determination of forming limit diagrams considering the effects of yield functions, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 182, pp. 598-607.
- [5] S. Ahmadi, A. R. Eivani, A. Akbarzadeh, 2009, An experimental and theoretical study on the prediction of forming limit diagrams using new BBC yield criteria and M-K analysis, Com. Mat. Sci., Vol. 44, pp. 1272-1280.
- [6] NUMISHEET 2008, Proc. 6th Int. Conf.