

# 유한요소해석을 이용한 마그네슘 합금 판재 성형한계도의 실용적 작성 방법

김경태<sup>1</sup>· 이형욱<sup>2</sup>· 김세호<sup>3</sup>· 송정한<sup>4</sup>· 이근안<sup>4</sup>· 최석우<sup>4</sup>· 이용신<sup>#</sup>

## Practical Method for FLD of Mg Alloy Sheet using FEM

K.T. Kim, H.W. Lee, S.H. Kim, J.H. Song, G.A. Lee, S. Choi, Y.-S. Lee

### Abstract

Forming Limit Diagram(FLD) is a representative tool for evaluating formability of sheet metals. This paper presents a methodology to determine the FLD using Finite Element Method. For predicting the forming limits numerically, previous methods such as using the thickness strain or the ductile fracture criterion are limited at plane strain domain. These results suggest that behavior of the void growth in sheet metals is different from real one. In contrast to previous methods, a more exact model which takes void growth into account is used. This result agrees with the experimental result qualitatively.

**Key Words** : Forming Limit Diagram, Sheet metal, Magnesium Alloy, Finite Element Method, Void Growth Model

### 1. 서론

성형한계도를 작성하기 위한 방법은 크게 실험적, 이론적 그리고 수치해석적인 것의 3가지로 나눌 수 있다. 우선, 실험을 통해 성형한계를 수립하는 방법은 가능한 많은 변형률 영역을 포함하기 위한 목적으로 다양한 방법으로 최적화되어 왔다. 실험을 통해 성형한계를 측정하는 방법은 그 정확성에 반해 시간과 비용의 소모가 많다는 단점이 있다. 한편, 이론적으로 성형한계도를 작성하기 위한 방법은 Swift(1952)와 Hill(1952)에 의해 처음 제안된 이후 여러 연구자들에 의해 실험적으로 측정된 결과와 일치시키기 위해 개선되어 왔다[1]. 그러나 이론적 모델은 재료에 따라 실험결과와 항상 일치하지 않고 정확성에 비례해 더 복잡하고 깊은 연속체 역학과 수학적 지식을 요구한다. 이러한 실

험적, 이론적 모델의 대안으로 최근 십여년간 수치해석적으로 성형한계를 예측하기 위한 연구가 시작되었다. 본 논문에서는 유한요소 해석 결과를 기반으로 성형한계를 예측하기 위하여 기존의 두께변형률과 연성파괴조건을 적용한 방법 외에 결합성장을 고려한 모델을 적용하여 성형한계를 획득한 후 실험결과와 비교하였다.

### 2. 유한요소 해석

#### 2.1 유한요소 해석 모델

수치해석적으로 성형한계를 예측하기 위해 필요한 응력, 변형률 및 두께변형률 이력은 유한요소해석을 통해 도출될 수 있다. Fig. 1은 상용 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard 를 사용하여 수행된 유한요소 해석 모델을 나타낸다. Kim 등[2]이 수행한 실험과 동일하게 면외변형

1. 국민대학교 기계설계학과, 한국생산기술연구원  
2. 충주대학교 에너지시스템공학과  
3. 대구대학교 자동차·산업·기계공학부  
4. 한국생산기술연구원 디지털성형공정팀  
# 교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부  
E-mail: yslee@kookmin.ac.kr

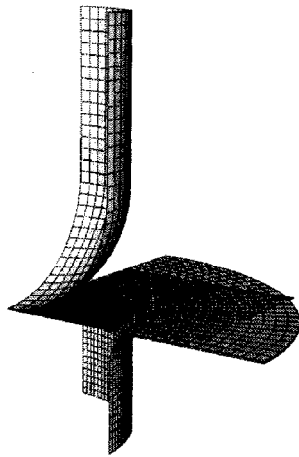


Fig. 1 FE model of the out-of plane test

실험을 적용하였으며, 요소망은 해석의 정확성 및 소요시간을 고려하여 블랭크는 4절점 감차 적분(reduced integration) 쉘 요소(S4R of ABAQUS library)를, 다이, 블랭크 홀더 및 펀치는 강체 요소(R3D4 of ABAQUS library)를 사용하였다.

### 2.2 유한요소 해석의 물성 적용

본 논문에서 사용된 마그네슘 합금은 소재 경량화나 높은 비강도 등 기능적 측면의 장점에 반해 상온 성형성이 불량하다는 단점을 지니고 있다. 따라서 성형성이 향상되는 150~250 °C 의 온간 영역에서 성형하게 되는데 이 경우 성형 온도가 높아질수록 변형 연화(strain softening)가 크게 일어난다. 따라서 균일연신 범위를 벗어난 네킹(necking) 이후 실제 재료의 거동을 파악하는 것이 어려우며, 이는 마그네슘 합금의 성형 해석을 어렵게 하는 주된 원인으로 지적된다[2].

본 연구에서는 우선 변형연화가 거의 없는 성형온도 100 °C 에서 마그네슘 합금의 성형한계의 예측하고자 하였다. 유한요소 해석에 적용된 물성은 시험온도 100°C, 0.001 s<sup>-1</sup> 의 변형률속도에서 획득한 진응력-변형률 선도이며, 그 외 재료의 물성은 Table 1 과 같다. 100 °C 에서 마그네슘 합금은 이방성을 나타내므로 Hill(1948)의 이방성 항복조건을 적용하였다.

Table 1 Mechanical properties of the used material

| E      | ν    | R-values        |                  |                  |
|--------|------|-----------------|------------------|------------------|
|        |      | R <sub>0°</sub> | R <sub>45°</sub> | R <sub>90°</sub> |
| 45 GPa | 0.35 | 1.44            | 2.31             | 2.97             |

### 3. 성형한계 예측

본 논문에서는 일반적으로 적용되는 파괴시 성형한계도(Forming Limit Curve at Fracture; FLCF) 대신 네킹 기반의 성형한계도(Forming Limit Curve at Necking; FLCN)를 수립하고자 하였다. 여기서, FLCF 는 주변형률장에서 파괴시 변형률의 조합을, FLCN 은 확산 네킹이 시작될 때 주변형률의 조합을 나타낸다.

#### 3.1 과거 모델의 적용

성형한계도 작성을 위한 한계변형률의 결정 조건으로써 Pepelnjak 등[3]은 유한요소해석을 통해 도출되는 두께변형률(thickness strain)을 적용하였다. 이는 변형 국소화에 의해 임계 영역의 두께가 급속히 감소하는 영역에서 국부네킹이 시작된다는 가정과 함께 입력된 물성 데이터에 의한 유한요소 해석 결과를 신뢰한다는 가정을 포함한다.

Ozturk 등[4]은 다양한 연성파괴조건(ductile fracture criteria)을 이용하여 한계변형률을 결정하였다. 본 논문에서는 Eq. (1)과 같이 표현되는 Oh 등(1979)이 제시한 수정 Cockcroft-Latham의 파괴조건을 사용하여 한계변형률을 구하였다.

$$\int \frac{\sigma_1}{\sigma_e} d\epsilon_e = C \quad (1)$$

Fig. 2 는 상기 2가지 방법을 이용하여 성형온도 100 °C에서의 마그네슘 합금 판재에 대한 성형한계를 예측한 것이다. 여기에서 실선으로

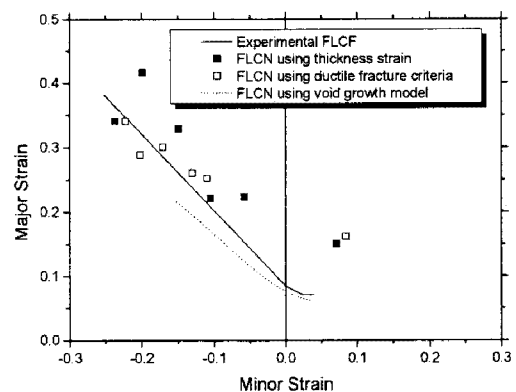


Fig. 2. Forming Limit Diagram at Necking

표시된 선도는 실험적으로 구한 파괴시 성형한계도(FLCF)를 나타낸다. 우선, 두께변형률을 이용한 성형한계도는 성형한계도의 전 영역에 걸쳐 잘 일치하지 않는 결과를 나타내었다. 이는 Hill의 이방성 항복조건이 R값의 영향을 과대하게 평가하여 두께 변형률이 실제와 다르기 때문으로 생각된다. 연성파괴모델을 이용한 성형한계도는 두께변형률을 적용한 것보다는 개선되었지만 평면변형률 영역에서 불일치한 결과를 나타내었다. 이것은 관재의 평면변형률 영역에서 연성파괴 모델을 통해 예측되는 결함의 성장 거동이 실제와 다르다는 사실을 시사한다.

### 3.2 결함성장을 고려한 모델의 적용

물성을 정의하기 위한 항복이론이 정확하다면 수치 예측의 정확도는 높아지지만 식이 복잡해지고 경우에 따라 추가적인 실험 데이터를 요구하게 된다. 따라서 물성의 정의에 덜 의존적인 연성파괴 모델을 적용한 성형한계 예측이 보다 현실적이다. 그러나 Oh 등의 연성파괴모델을 적용한 방법 또한 평면변형률 영역에서 성형한계 예측이 어렵다는 한계를 지니고 있다.

Lee and Dawson[5]은 Eq. (2)와 같이 평균응력을 상태변수로 나눈 비를 지수함수의 형태로 반영하였고, 결함성장 속도가 현재의 결함 크기에 의존하는 형태로 제시하였다. Lee and Dawson의 모델은 결함의 성장거동이 지수함수의 형태이기 때문에 기존의 연성파괴조건과 달리 실제에 가까운 것으로 알려져 있다.

$$d\phi_{Lee} = C_1 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp} \left[ C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right] d\varepsilon_e \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_m$ 은 평균응력,  $\sigma_e$ 는 유효응력,  $\varepsilon_e$ 는 유효변형률을 나타내고, 초기 결함값  $\phi$ 는 0.0011(0.11%)을 부과하였다.

Lee and Dawson의 모델을 적용하여 수립한 성형한계도를 Fig. 2에 점선으로 나타내었다. 계산결과는 네킹 기반의 성형한계(FLCN)를 예측한 것으로 실험적으로 구한 파괴시 성형한계(FLCF)와 비교하여 근소한 차이를 보이고 있다. 성형온도 100 °C에서 마그네슘 합금이 변형 연화(strain softening)를 거의 보이지 않고 파괴에

이른다는 것을 감안한다면 타당한 결과로 사료된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 수치해석적으로 성형한계도를 작성하기 위한 연구를 수행하였다. 수치해석시 한계변형률을 결정하기 위해 기존의 두께변형률과 연성파괴모델을 적용한 방법은 임계파단 영역의 예측에 한계를 지닌 것으로 나타났다. 그 주된 이유는 파괴를 이끄는 결함의 성장 거동이 평면변형률 영역에서 실제와 다르기 때문이다. 이와 비교하여 결함성장을 고려한 Lee and Dawson 모델을 적용하는 경우, 기존 방법보다 정확하고 합리적인 성형한계 예측이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 관계자분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu and T. Kuwabara, 2007, Anisotropy and Formability, Advances in Material Forming - Esaform 10 years on, pp. 147-173
- [2] 김세호, 박기동, 장정호, 김경태, 이형욱, 이근안, 최석우, 2008, AZ31B 합금판재 성형관련 기초물성 시험 및 해석 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 366-369
- [3] T. Pepelnjak, K. Kuzman, 2007, Numerical Determination of the Forming Limit Diagrams, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 20, pp. 375-378
- [4] F. Ozturk, D. Lee, 2004, Analysis of Forming Limits using Ductile Fracture Criteria, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, pp. 397-404
- [5] Y.-S. Lee, P.R. Dawson, 1993, Modeling Ductile Void Growth in Viscoplastic Materials. Part 1. Void growth model, Mechanics of Materials, Vol. 15, pp. 21-34