

# 마그네슘 합금의 온도 및 변형률 의존성 임계손상지수 결정 및 파단 예측

## Determination of critical damage value dependent on temperature and strain rate of magnesium alloy and its application to failure prediction

\*#김상우<sup>1</sup>, 이영선<sup>1</sup>

\*#S. W. Kim<sup>1</sup>, Y. S. Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>재료연구소 변형제어연구실

Key words : Magnesium, Damage, Fracture, FEM, Deep Drawing, Warm Forming

### 1. 서론

기하학적 형상, 원소재의 기계적 특성, 공정변수의 영향 등 다양한 원인에 의해 발생 할 수 있는 공정 중 파단현상은 성형공정 설계시 고려되어야 하는 다양한 설계목표 중에서 가장 우선적으로 검토되어야 한다. 유한요소법과 연계한 파단예측 기법으로 판재성형의 경우, 성형한계도가 널리 활용되고 있으며, 단조, 압출, 인발 등 벌크재료 성형의 경우 다양한 형태의 연성파괴이론이 제안되어 있다[1-2].

본 연구에서는 최근 경량성, 우수한 절삭성, 전자파 차폐성 등 다양한 이점으로 인해 산업적 수요가 증가하고 있으나, 육방정계 결정구조로 인해 성형 중 파단발생이 빈번하게 발생하고 있는 마그네슘 합금 판재의 온간 성형공정에서의 연성파괴현상을 예측하기 위해 온도 및 변형률 의존성 연성파괴이론을 적용한 유한요소해석을 수행하였으며, 동일 조건하에서의 실험을 통해 상기 접근법의 적용 가능성을 검증하였다.

### 2. 온도 및 변형률 의존성 임계손상지수 측정

298, 373, 423, 473, 523, 573K의 온도범위와 0.001, 0.01, 0.1/s의 변형률 속도에서의 등온인장시험과 동일한 조건하에서의 강소성 유한요소해석을 통해 식(1)의 Cockcroft-Latham[1]이 제안한 연성파괴이론의 임계연성파괴상수를 온도 및 변형률 속도의 공간내에 표현하고, 이에 대한 3차원 곡면으로 근사하였다. 그 결과 Fig. 1과 같이 임계연성파괴지수는 온도가 증가함에 따라 증가하는 반면, 변형률 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을

보임으로써, 온도 및 변형률 속도에 매우 의존적인 것으로 나타났다. 이는 비등온 성형공정해석시 소재의 국부적인 온도 및 변형률 속도변화를 고려하여 임계연성파괴기준이 달리 적용되어야 예측오차를 최소화할 수 있음을 의미한다.

$$CDV = \int^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad \text{식(1)}$$

### 3. 비등온 드로잉 공정 실험

온도 및 변형률 속도 의존성 연성파괴상수의 적용 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 비정형 형상의 드로잉 실험을 수행하였다. 실험은 각각 독립적으로 제어 가능한 두 개의 실린더로 구성된 유압프레스를 이용하여, 펀치(punch) 및 블랭크 홀더(blank holder)의 개별제어가 가능하도록 하였다. 홀더와 다이(die)는 각각 카트리리지히터(cartridge heater) 및 온도제어장치를 이용하여 성형공정 동안 250℃를 유지할 수 있도록 직접 가열하였다. 3mm 두께의 AZ31 마그네슘 합금 판재는 로내에

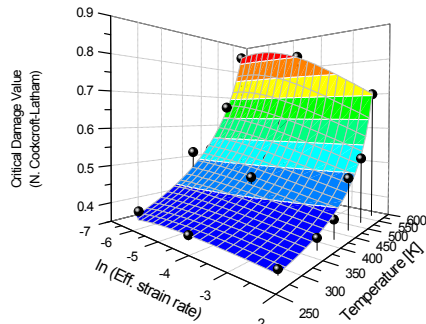


Fig. 1 Surface-fitted CDV with respect to temperature and effective strain rate

서 250℃로 가열되어 일정시간 유지한 후 금형으로 이송되었으며, 블랭크 홀딩하중은 30kN, 펀치속도는 1mm/s로 일정하게 제어하였다. 실험 결과 Fig. 3에서와 같이 펀치의 이송거리에 따라 파단여부가 결정 되었는데, 최종 24.6mm에서는 하단 코너부에서 내·외측을 관통하는 파단이 발생하였으며, 22.6mm에서는 외측 하단의 코너부에서 표면 크랙(crack)만 발생하였다. 또한, 17.6mm에서는 내외측 모두 파단이 발생되지 않았다.

#### 4. 비등온 드로잉 공정에서의 파단예측

상기 실험에서 나타난 파단현상을 예측하기 위하여 상용유한요소해석 코드인 Deform-3D를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 소재는 초기 온도 250℃에서, 공정 중 강소성 변형과 함께 주변부로의 열전달을 고려하였으며, 금형은 가열장치에 의해 일정온도가 유지된다는 가정하에 온도변화가 없는 강체로 해석하였다. 매 시간증분마다 사용자 부프로그램에 의해 모든 요소에 대해 식(1)의 우측 적분항이 계산되고, 각 요소에서의 변형률 속도 및 온도에 따라 임계파단상수가 결정되어 식(2)에 의해  $I$  값이 결정된다. 이때,  $I=1$ 을 만족할

경우, 파단이 발생할 것으로 예측된다. 해석결과, Fig. 4에서와 같이 실험에서와 동일하게 17.6mm에서는 소재 전체에서  $I$  값이 1.0 미만으로 나타남으로써 파단이 발생하지 않을 것으로 예측하였으며, 22.6mm 및 24.6mm에서는 하단 코너부의 외측면에서  $I$  값이 각각 1.07, 1.18로 표면에서의 크랙 발생을 예측하였다. 이는 Fig. 3에서의 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보여주고 있으며, 21.8mm에서  $I=1.0$ 을 만족함으로써 파단발생시점을 예측하였다.

$$I = \frac{1}{CDV(T, \dot{\epsilon})} \int \bar{\epsilon}_f \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} d\bar{\epsilon} \quad \text{식(2)}$$

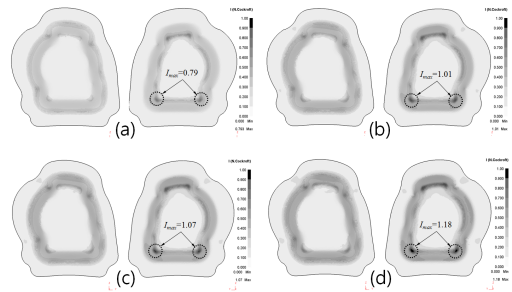


Fig. 4 Distributions of  $I$ -value at various punch strokes a)17.6mm, b)21.8mm, c)22.6mm, d)24.6mm

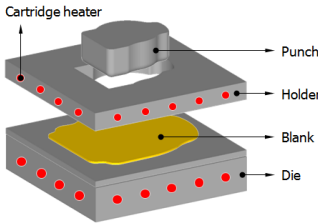


Fig. 2 Schematic illustration of drawing test die set

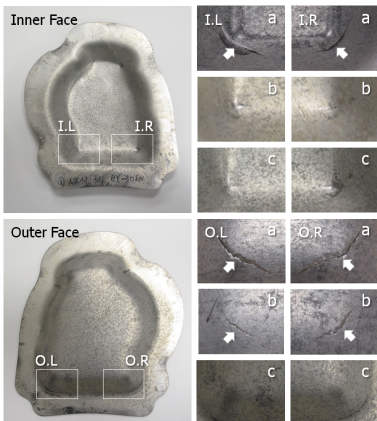


Fig. 3 Deep drawing test results for various punch strokes; a)17.6mm, b)22.6mm, c)24.6mm

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 연계한 연성과파괴 이론에 의해 AZ31 마그네슘 합금 판재의 온간 드로잉 성형시 발생하는 파단현상을 예측하였다. 변형률 속도 및 온도 의존성 임계파단상수를 이용한 해석결과, 동일한 조건에서의 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보임에 따라 마그네슘 합금의 파단발생예측을 위한 유용한 수단으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업(B551179-11-02-00)의 지원으로 수행된 결과임.

#### 참고문헌

1. Cockcroft, M.G. and Latham, D.J., "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals, **96**, 33-39, 1968.
2. McClintock, F.A., "A criterion for ductile fracture by the growth of holes", Trans. ASME J. Appl. Mech., **17**, 363, 1968.