

유한요소법과 연성파괴이론에 의한 AZ31합금 판재의 온간 드로잉 공정에서의 파단예측

김상우[#] · 이영선¹

Failure Prediction for an AZ31 Alloy Sheet during Warm Drawing using FEM Combined with Ductile Fracture Criteria

S. W. Kim, Y. S. Lee

(Received April 25, 2012 / Revised May 17, 2012 / Accepted May 29, 2012)

Abstract

The forming failure of AZ31 alloy sheet during deep drawing processes was predicted by the FEM and ductile fracture criteria. Uniaxial tensile tests of round-notched specimens and FE simulations were performed to calculate the critical damage values for three ductile fracture criteria. The critical damage values for each criterion were expressed as a function of strain rate at various temperatures. In order to determine the best criterion for failure prediction, Erichsen cupping test under isothermal conditions at 250°C were conducted. Based on the plastic deformation histories obtained from the FE analysis of the Erichsen cupping tests and the critical damage value curves, the initiation time and location of fracture were predicted under bi-axial tension deformation. The results indicate that the Cockcroft-Latham criterion had good agreement with the experimental data. In addition, the FE analysis combined with the criterion was applied to another deep drawing process using an irregular shaped blank and these additional results were verified with experimental tests.

Key Words : Ductile Fracture, FEM, AZ31, Magnesium, Deep Drawing, Sheet Forming, Erichsen Cupping Test

1. 서론

최근 자동차, 항공기 등 수송기기의 경량화 추세에 힘입어 마그네슘과 같은 경량소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 마그네슘은 경량성, 우수한 절삭성, 전자파 차폐성 등 다양한 이점으로 인해 산업적 수요가 늘어가고 있으나, 육방정계 결정구조로 인해 상온 성형성이 열악함에 따라 온간 성형에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다[1~7].

금형의 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. 이를 위한 예측기법으로 판재 성형의 경우, 성형한계도가 널리 활용되고 있으며, 단조, 압출, 인발 등 벌크 재료 성형의 경우, 다양한 형태의 연성파괴이론이 제안되었고, 이를 활용한 파단예측에 관한 많은 연구가 진행 중에 있다[8~13].

본 연구에서는 판재 두께 방향으로의 변형을 무시하고, 2차원 변형률 공간내에서 표현되어지는 기존의 성형한계도의 적용이 제한적인 3mm 두께의 AZ31 합금 판재의 온간 성형공정에서의 연성

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,
E-mail: kimsw@kims.re.kr

파괴현상을 예측하기 위하여 유한요소법과 세 가지 형태의 연성파괴이론을 이용하였다. 중심부에 원형 노치(notch)를 갖는 시편을 이용하여 250℃에서의 단축인장시험을 통해 세 가지 형태의 연성파괴이론에 의한 임계손상지수를 변형률 속도의 함수로 표현하였다. 변형률 속도 의존성 임계손상지수 및 유한요소해석을 통하여 250℃ 등온 에릭슨 공정에서의 파단 발생을 예측하고, 실험을 통해 각 연성파괴이론에 의한 예측 결과를 비교함으로써 각 이론의 예측 정밀도를 분석하였다. 또한, 실제 다양한 형상을 가지는 성형공정에서의 적용가능성을 검토하기 위하여 비정형 형상의 블랭크(blank)를 이용한 드로잉 실험이 수행되었으며, 동일한 조건하에서의 유한요소해석을 통해 비교·분석함으로써 파단 발생 없는 실험상의 제품 성형공정 설계를 위한 상기 접근방법의 타당성을 검증하였다.

2. 변형률 의존성 임계손상지수 측정

2.1 노치인장시험

조기파단을 유도하고, 다양한 변형률 속도에서의 임계손상지수를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 3mm 두께의 AZ31합금 판재를 이용하여 압연방향으로 중앙부에 3,5,10mm 반경의 원형노치를 갖는 단축인장시편을 가공하였다. 고온용 챔버를 이용하여 250℃ 등온공정조건에서 0.015, 0.15, 1.5mm/sec의 세 가지 속도로 인장시험을 수행하였으며, 그 결과 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 하중이 급격한 기울기로 감소하는 지점을 파단 발생 시작점으로 가정하였다. 그 결과 Fig. 2에서와 같이 노치 반경이 작을 수록, 크로스헤드(crosshead) 속도가 증가할 수록 파단발생변위는 작은 것으로 나타났다.

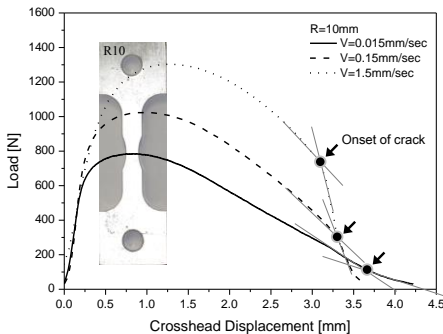


Fig. 1 Load-displacement curves after tensile tests of round-notched specimens

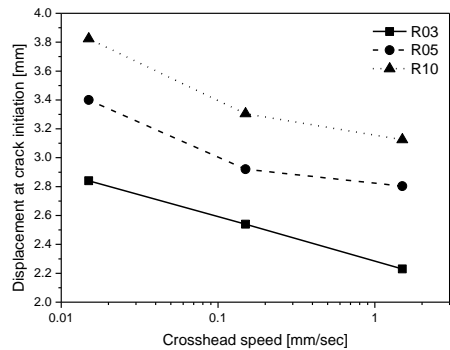


Fig. 2 Fracture displacement for various crosshead speed and notch roundness

2.2 연성파괴이론

소성가공공정 중 파단발생을 예측하기 위한 다양한 이론적 근거에 의한 연성파괴기준이 제시되어 있는데, 본 연구에서는 최대 인장변형 에너지밀도에 근거한 Cockcroft-Latham의 이론과, 응력삼축도(stress triaxiality)에 근거한 Ayada의 모델 및 두 가지 개념을 복합적으로 고려한 Brozzo의 모델이 사용되었으며, 각각의 이론에 의한 연성파괴조건은 다음과 같다.

- Normalized Cockcroft - Latham[8]

$$C = \int \bar{\epsilon}_f \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

- Ayada et al.[9]

$$C = \int \bar{\epsilon}_f \frac{\sigma_{\text{mean}}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

- Brozzo et al.[10]

$$C = \int \bar{\epsilon}_f \frac{2\sigma_{\max}}{3(\sigma_{\max} - \sigma_{\text{mean}})} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

여기서, $\bar{\epsilon}$ 는 파단시 상당변형률, σ_{\max} 는 최대 인장응력, $\bar{\sigma}$ 유효응력, σ_{mean} 는 평균응력, C 는 임계손상지수이다.

2.3 임계손상지수 측정

식(1)~(3)의 임계손상지수를 측정하기 위하여 노치시편의 인장시험을 모사한 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 상용해석코드인 Deform-3D를 사용하였으며, 사용자 부프로그램을 이용하여 세 가지 연성파괴이론의 우측 적분항을 매 시간증분

마다 계산하였다. 해석모델의 그립(grip)은 강제로 고정하고 소재와의 접촉면은 경계조건을 부여하여 상대운동을 제한함으로써 그립의 강제 운동을 통해 인장하중을 부과할 수 있도록 하였으며, 대칭성을 고려하여 1/8모델을 사용하여 대칭조건을 적용하였다. 해석은 0.015, 0.15, 1.5mm/s의 속도별로, R=3, 5, 10mm의 세 종류 시편에 대해 모두 수행되었으며, Fig. 2에서의 파단변위까지 인장해석을 수행하였다. 그 결과 각 연성파괴이론으로부터 누적 계산되어진 적분값은 Fig. 3과 같이 시편의 중앙부에서 최대값을 보였으며 이를 임계손상지수로 고정하였다.

Fig. 4는 노치인장시험 및 해석을 기반으로 얻어진 250℃ 등온공정에서의 변형률 속도에 따른 임계손상지수를 보여주고 있다. 단축인장의 경우, 식(1)과 (3)은 동일하므로, 모든 조건에서 Cockcroft-Latham 및 Brozzo에 의한 이론은 동일한 값을 보였으며, 다양한 변형률 속도 및 노치형상으로부터 계산된 임계손상지수를 식(4)의 변형률 속도에 대한 2차 다항 함수로 단순 근사하면 상수는 A=1.28, B=-3.61, C=3.79이며, 보수적인 예측을 위하여 실험결과의 하한값을 기준으로 오프셋(offset) 할 경우, A'=1.11이 된다. 또한, Ayada의 경우에도 동일한 방법으로 근사함으로써 A=0.59, A'=0.50, B=-1.85, C=1.91가 된다.

$$CDV(\dot{\epsilon}) = A + B\dot{\epsilon} + C\dot{\epsilon}^2 \quad (4)$$

3. 에릭슨 커핑 실험 및 유한요소해석

본 연구에서 고려되었던 세 가지 연성파괴이론 및 노치인장실험을 통해 도출된 임계손상지수의 파단예측을 위한 적용 가능성을 검토하기 위하여 에릭슨 커핑 실험을 수행하였다. 인장시험기의 고온용 챔버내에 에릭슨 커핑 실험 장치를 장착함으로써 250℃ 등온조건하에서의 실험이 가능하도록 하였으며, 두께 3mm, 직경 50mm의 AZ31 시편을 이용하여 0.5mm/sec의 속도로 실험을 수행하였다. 실험결과 펀치의 수직변위가 8.3mm에서 시편의 중심부 아래쪽에서 파단이 발생함으로써 하중이 감소하는 경향을 보였다. 본 실험결과를 근거로 변형률 속도 의존형 임계파단지수를 이용하여 2축 인장하에서의 파단현상을 예측하기 위하여 동일한 조건하에서 유한요소해석이 수행되었다.

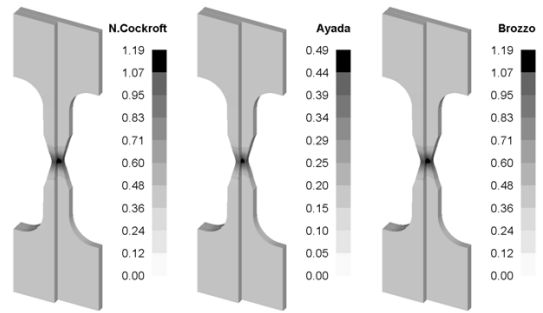
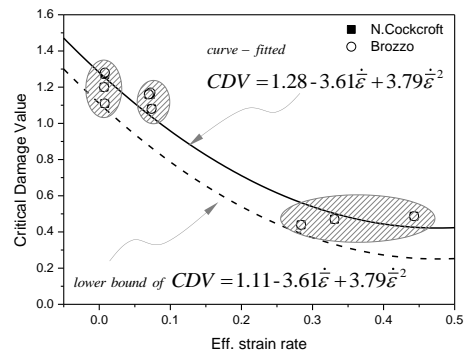
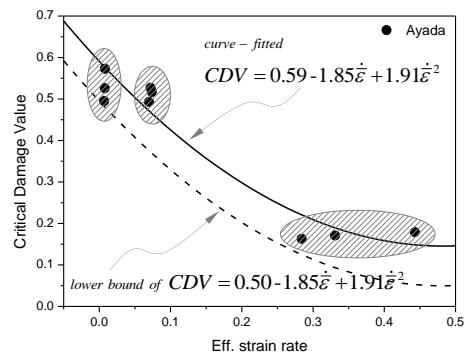


Fig. 3 Distribution of damage values based on various ductile fracture criteria (R=10mm, V=0.015mm/sec)



(a) Cockroft's and Brozzo's criterion



(b) Ayada's criterion

Fig. 4 Critical damage value curves with effective strain rate

해석동안 매 시간증분마다 계산되어진 모든 요소의 변형률 속도를 이용하여 식(4)의 임계손상지수가 결정되고, 식(1)~(3)의 연성파괴조건은 식(5)와 같이 변형되어 사용자 부프로그램에 의해 매 시간증분마다 모든 요소에서의 적분값 I 가 계산된다.

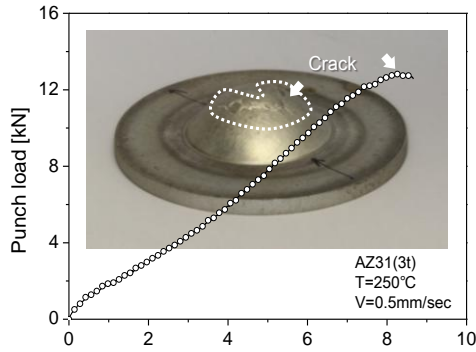
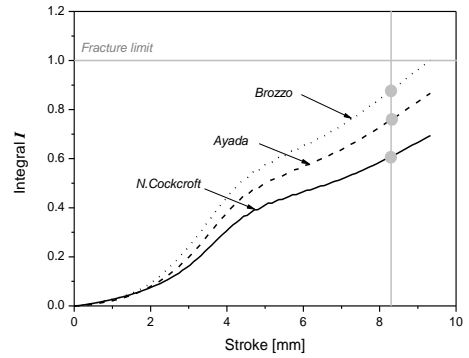
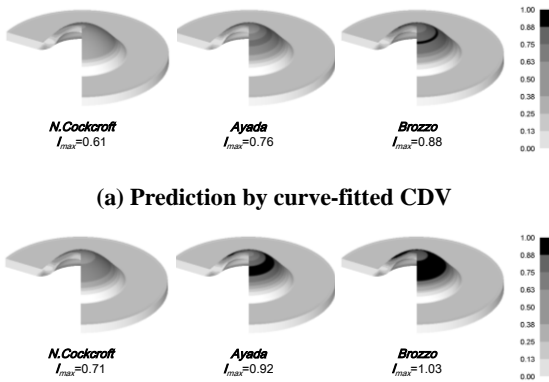


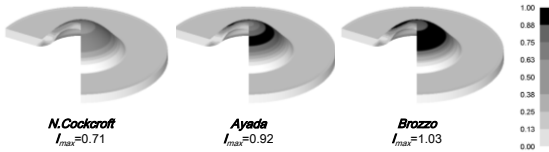
Fig. 5 Erichsen cupping test result



(a) Prediction by curve-fitted CDV



(a) Prediction by curve-fitted CDV



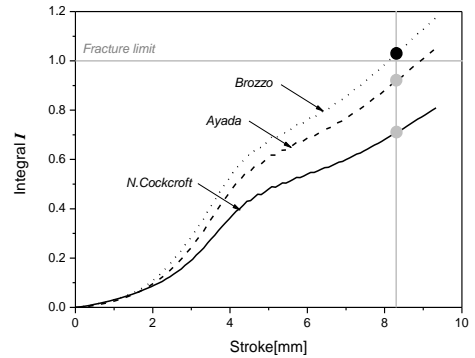
(b) Prediction by lower bound of CDV

Fig. 6 Distributions of I -value calculated by the FEM and various ductile fracture criteria

적분값 I 는 매 시간증분마다 누적되어 1.0에 달하면 파단이 발생하는 것으로 예측된다.

$$I = \frac{1}{CDV(\dot{\epsilon})} \int_{\bar{\epsilon}_f} f(\sigma_{ij}) d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

Fig. 6은 파단발생까지 해석을 수행한 후에 세 가지 연성 파괴이론에 의해 구해진 적분값 I 의 분포를 보여주고 있다. 식(4)의 2차 다항식으로 직접 근사한 경우, 세 가지 이론 모두 최대 I 값이 1.0미만으로 파단발생을 예측하지 못하는 경향을 보였다. 반면, 실험 하한치를 기준으로 오프셋하여 적용하였을 경우에는, Cockcroft-Latham과 Ayada의 이론은 각각 최대 $I=0.71$, 0.92 를 보임으로써 파단이 발생하지 않을 것으로 예측하였으나, Brozzo의 이론은 최대 $I=1.03$ 를 보임으로써 실험과 동일하게



(b) Prediction by lower bound of CDV

Fig. 7 Histories of I -value at fracture region

파단발생을 예측하였다. 또한, 파단발생이 예측되는 위치 역시 실험과 정확하게 일치하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 최대 I 값을 보이는 파단 발생부에 위치하는 요소의 변형에 따른 I 값의 이력을 보여주고 있는데, 변형이 진행됨에 따라 I 값은 동일한 경향을 가지고 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 단순 피팅에 의한 임계손상지수로 예측할 경우, 소재내부에 누적된 손상을 과소 예측하는 경향을 보인 반면, 실험 하한치로 예측할 경우, Brozzo의 이론만 실험과 정확하게 일치하는 경향을 보였다.

4. 드로잉 공정 해석 및 실험

앞선 에릭슨 컵핑 실험 및 유한요소해석을 통해 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 공정에서의 파단예측결과 2축 인장하에서는 Brozzo의 이론이 가장 잘 일치하는 경향을 보였으나, 다양한 형상

의 제품 성형공정에서의 적용을 위해서는 비정형 형상에 대한 적용 가능성 여부를 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 다양한 형태의 곡선 및 직선의 조합으로 구성된 임의 형상의 금형 및 소재를 이용하여 실 제품의 드로잉 성형공정에 대한 적용 가능성 여부를 검토하였다. 상부 홀더(holder)와 하부 다이(die)는 각각 카트리지히터(cartridge heater) 및 제어장치를 이용하여 성형공정 동안 250℃를 유지할 수 있도록 직접 가열하였으며, 펀치(punch)는 초기 다이와 접촉한 상태에서 금속간의 열전달에 의해 간접적으로 가열될 수 있도록 하였다. 홀더와 다이가 목표온도에 도달한 뒤 펀치가 충분히 가열될 수 있도록 1시간 동안 유지하였으며, 실험 시작 전 펀치 표면온도는 250℃로 측정되었다. AZ31 3t 판재는 로내에서 250℃로 가열되어 일정시간 유지하였으며, 다시 금형에 안착 후 10분간 홀더에 의해 1kN으로 가압됨으로써 소재 이송에 의한 냉각효과가 최소화될 수 있도록 하였다. 이후, 소재는 홀더에 의해 30kN의 일정한 하중으로 가압되었으며, 펀치는 1mm/sec의 일정속도로 소재와의 접촉지점으로부터 25mm까지 하강하였다. 드로잉 실험 결과 Fig. 9에서와 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 상하면 모두 파단이 발생되지 않았다. 따라서, 파단 발생은 17.6mm와 22.6mm사이에서 시작되었을 것으로 추측된다.

상기의 파단현상을 예측하기 위해 250℃ 등온 공정에서의 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과 얻어진 식(5)의 적분값 I 의 분포를 Fig. 10에 도시하였다. 해석결과 실험에서와 동일하게 17.6mm에서는 소재 전체에서 I 값이 1.0 미만으로 나타남으로써 파단이 발생하지 않을 것으로 예측하였으며, 22.6mm에서는 하단 코너부의 외측면에서 I 값이 1.0이상을 만족하면서 표면에서의 크랙발생을 예측하였다. 특히, 펀치 행정거리가 24.6mm인 경우에는 실험에서는 하단 코너부에서만 관통 크랙이 발생하였으나, 해석결과 상·하부 코너부에서 모두 I 값이 1.0을 초과함으로써 상이한 예측결과를 보였다. 이는 실제 성형 공정시 하단 코너부의 크랙 발생 및 진전으로 인해 상부코너부의 응력상태가 완화되었음에도 불구하고, 해석시 파단부

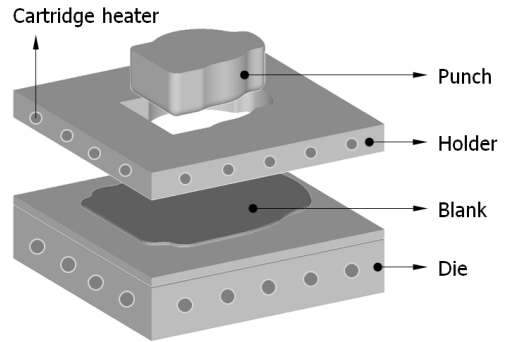


Fig. 8 Schematic illustration of drawing test die set

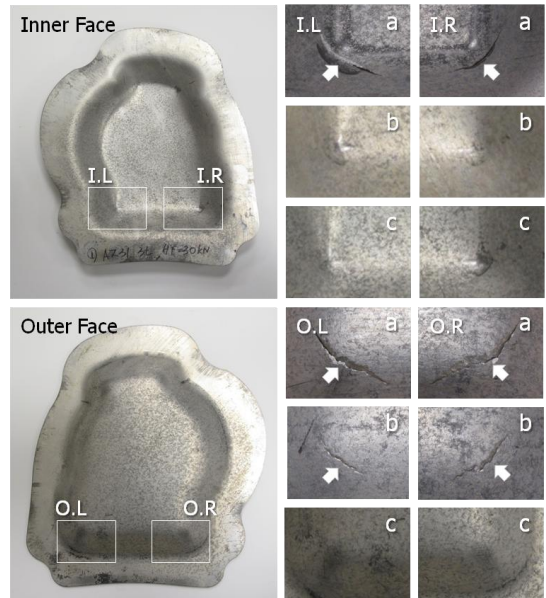


Fig. 9 Deep drawing test results for various punch strokes; a) $d=17.6\text{mm}$, b) $d=22.6\text{mm}$, c) $d=24.6\text{mm}$

의 크랙 진전에 의한 주변효과를 고려하지 않음에 따른 오차로 판단된다.

Fig. 11은 해석 및 실험결과 드로잉 하중을 비교한 결과 이다. 해석결과 드로잉 하중은 3회의 실험 오차 범위 안에서 매우 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이는 공정 중 홀더와 다이를 일정 온도로 유지하고, 실험 시작 전 펀치의 표면온도를 250℃로 승온한 뒤, 소재를 일정시간 안착시킨 후 실험을 수행한 결과, 약 30초 내외의 성공 공정 시간 동안 소재의 냉각이 거의 이루어지지 않

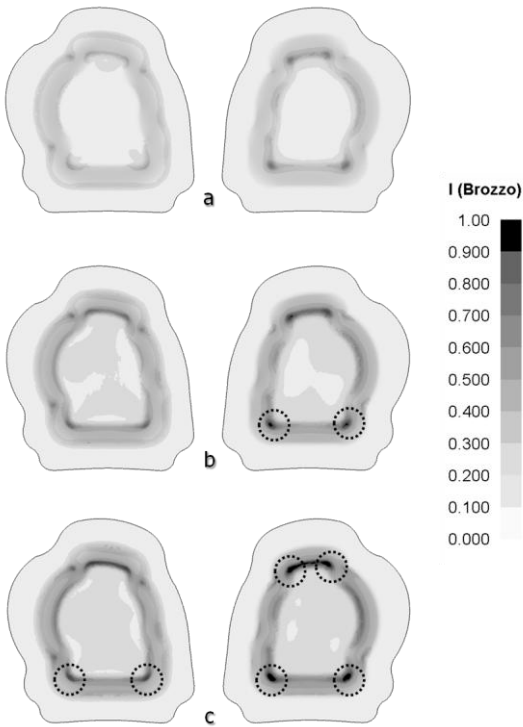


Fig.10 Distributions of *I*-value at various punch strokes a) *d*=17.6mm, b) *d*=22.6mm, c) *d*=24.6mm

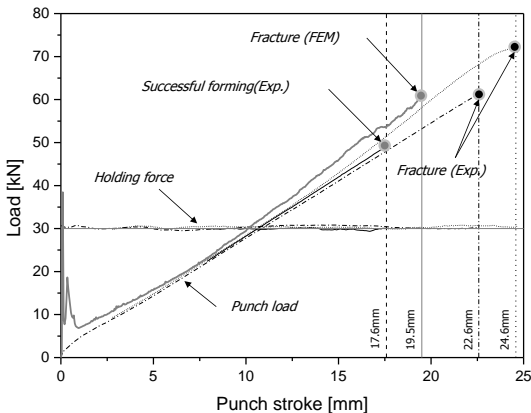


Fig.11 Comparison of loads-strokes between experimental results and FEM simulations

았음을 의미한다. 따라서, 등온공정으로 가정한 해석이 큰 오차를 포함하지 않았던 것으로 판단된다. 또한, 최대 *I*값을 보이는 외측 하단 오른쪽

코너부에 위치한 요소의 *I*값 이력을 추적한 결과, 펀치 이송거리 17.6mm와 22.6mm 사이인 19.5mm에서 1.0을 만족함으로써 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 연계한 연성과괴이론에 의해 3mm 두께의 AZ31 마그네슘 합금 판재의 온간 성형시 발생하는 파단현상을 예측하였으며, 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 250℃ 등온공정 2축 인장 하에서의 파단현상을 예측하는데 있어서 본 연구에서 도입한 세 가지 연성과괴이론 중 Brozzo의 이론이 실험과 가장 잘 일치하는 경향을 보였으며, Cockcroft-Latham 과 Ayada의 이론은 소재 내부의 손상 정도를 과소 예측하는 경향을 보였다.

(2) 임계손상지수를 변형률 속도에 대한 2차 다항함수로 단순 근사할 경우보다, 하한치를 포함하도록 오프셋한 경우 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보였다.

(3) 본 연구에서 제시한 유한요소법과 변형률 속도 의존성 임계파단상수를 이용한 연성과괴예측방법은 임의 형상의 드로잉 성형공정에서도 실험과 잘 일치하는 경향을 보였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] S. W. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2008, A Study on Warm Incremental Forming of AZ31 Alloy Sheet, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 5, pp. 373~379.
- [2] A. W. El-Morsy, K. I. Manabe, 2006, Finite Element Analysis of Magnesium AZ31 Alloy Sheet in Warm Deep-drawing Process Considering Heat Transfer Effect, *Mater. Lett.*, Vol. 60, No. 15, pp. 1866~1870.
- [3] T. Walde, H. Riedel, 2007, Simulation of Earing during Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31, *Acta Mater.*, Vol. 55, No.3, pp. 867~874.

- [4] K. F. Zhang, D. L. Yin, D. Z. Wu, 2006, Formability of AZ31 Magnesium Alloy Sheets at Warm Working Conditions, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, No.11, pp. 1276~1280.
- [5] Q. F. Chang, D. Y. Li, Y. H. Peng, X. Q. Zeng, 2007, Experimental and Numerical Study of Warm Deep Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Sheet, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 47, No.3-4, pp. 436~443.
- [6] S. H. Zhang, K. Zhang, Y. C. Xu, Z. T. Wang, Y. Xu, Z. G. Wang, 2007, Deep-drawing of Magnesium Alloy Sheet at Warm Temperatures, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.185, No. 1-3, pp. 147~151
- [7] F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang, 2007, Deep Drawing of Square Cups with Magnesium Alloy AZ31 Sheets, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol.43, No.15, pp. 1553~1559.
- [8] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the Workability of Metals, *J. Inst. Metals*, Vol. 96, pp. 33~39.
- [9] M. Ayada, T. Higashino, K. Mori, 1987, Central Bursting in Extrusion of Inhomogeneous Materials, *Adv. Technol. Plast.*, pp.553~558.
- [10] P. Brozzo, B. deLuka, R. Rendia, 1972, Proceedings of the Seventh Biennial Conference on Sheet Metal Forming and Formability, International Deep Drawing Research Group.
- [11] F. A. McClintock, 1968, A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes, *J. Appl. Mech.*, Vol. 35, No. 2, pp. 363~371.
- [12] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, 1980, Criteria for Ductile Fracture and Their Applications, *J. Mech. Working Technol.*, Vol. 4, pp. 1507~1513.
- [13] S. W. Kim, Y. S. Lee, B. S. Kang, 2011, Failure Prediction in Drawing Processes of Mg Alloy Sheet by the FEM and Ductile Fracture Criterion, *Adv. Mater. Res.*, Vol. 264-265, pp. 813~818.