

변형률 의존성 연성파괴이론과 유한요소법에 의한 AZ31합금 판재의 드로잉 성형공정시 파단발생 예측

김상우*, 이영선*, 김대용*
*재료연구소 변형제어연구그룹
e-mail: kimsw@kims.re.kr

Fracture Prediction in Drawing Processes of AZ31 alloy Sheet by the FEM combined with a Ductile Fracture Criterion considering Strain Rate Effect

Sang-Woo Kim*, Young-Seon Lee*, Daeyong Kim*
*Materials Deformation Group, Korea Institute of Materials Science

요 약

본 연구에서는 유한요소법과 변형률 의존성 연성파괴이론을 이용하여 드로잉 공정에서의 AZ31 마그네슘 합금 판재의 파단 발생을 예측 하였다. 다양한 온도에서의 사각컵 드로잉 실험을 수행하여, 각 온도조건에서의 파단깊이를 측정하였으며, 고온 인장시험을 통해 연성파괴상수를 온도 및 변형률 속도에 의존적인 값으로 표현하고, 실험과 동일하게 모사된 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과 얻어진 각 요소의 온도 및 변형률 속도에 따른 연성파괴상수를 이용하여 파단발생을 예측하였으며, 실험결과와 검증하였다.

1. 서론

최근 자동차, 항공기 등 수송기기류의 경량화 추세에 힘입어 최근 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 이루어 지고 있다.[1-14]

본 연구에서는 유한요소법과 변형률 의존성 연성파괴이론을 이용하여 드로잉 공정에서의 AZ31 마그네슘 합금 판재의 파단 발생을 예측 하였으며, 다양한 온도에서의 사각컵 드로잉 실험을 수행하여, 각 온도조건에서의 파단깊이를 측정하였다. 고온 인장시험을 통해 연성파괴상수를 온도 및 변형률 속도에 의존적인 값으로 표현하고, 실험과 동일하게 모사된 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과 얻어진 각 요소의 온도 및 변형률 속도에 따른 연성파괴상수를 이용하여 파단발생을 예측하였으며, 실험결과와 검증하였다.

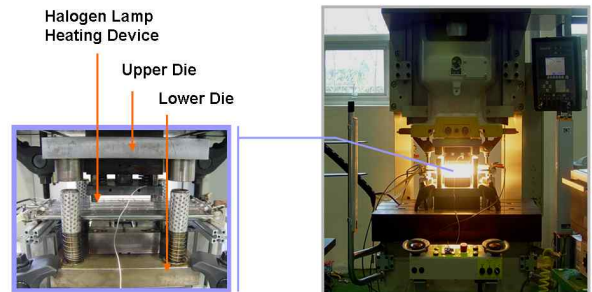
2. AZ31 합금 판재의 드로잉 실험

본 연구에서는 두께 0.8mm인 AZ31 마그네슘 합금 판재를 이용하여 상온, 100, 200, 300°C 에서의 사각컵 드로잉 성형을 수행하였다. 그림 1과 같이 상·하형 금형 사이에 온도제어가 가능한 평판형 할로겐램프 가열장치를 삽입하여

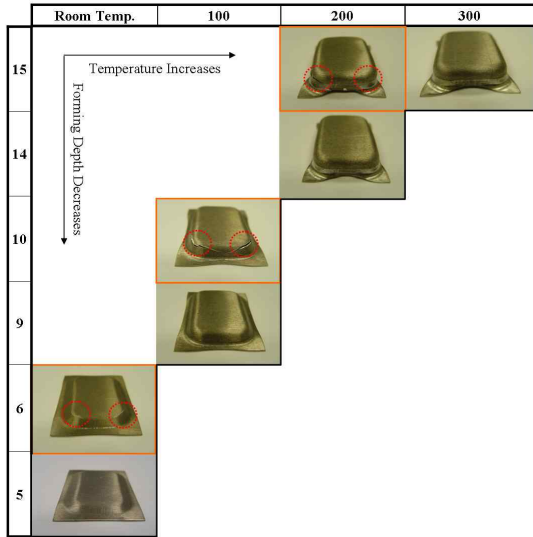
금형을 각각의 온도까지 가열하였으며, 소재는 별도의 가열로 내에서 동일한 온도까지 가열한 후 드로잉 성형을 수행하였다. 서보모터프레스를 이용하였으며, 성형속도는 3.4mm/sec로 모든 온도조건에서 동일하게 제어되었다. 성형결과 그림 2에서와 같이 온도가 증가함에 따라 최대 성형깊이가 증가하는 경향을 보였으며, 상온, 100, 200°C에서는 각각 6, 10, 15mm에서 모서리부 파단이 발생하였으며, 300°C에서는 최대 성형깊이인 15mm까지 파단이 발생하지 않았다.

3. 연성파괴이론

성형공정중 발생하는 소재의 파단현상을 예측하기 위한 다양한 형태의 연성파괴이론이 제시되어있다.[15-18] 본 연구에서는 식(1)과 같이 최대 인장변형에너지가 한계값 C_1 에



[그림 1] 온간 드로잉 성형 금형



[그림 2] 사각컵 드로잉 성형 결과

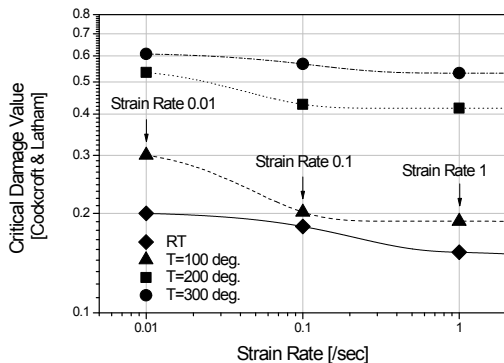
도달할 때 파단이 발생할 것으로 예측하는 Cockcroft & Latham[15]의 이론을 도입하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad \text{식(1)}$$

한계값 C_1 은 상온의 경우, 재료의 변형거동이 변형률 속도에 크게 의존적이지 않으므로, 상수로 표현되어 사용되어 왔으나, 고온 성형의 경우, 온도 및 변형률 속도의 영향이 매우 크므로 이를 고려하여 표현되어야 한다. 본 연구에서는 소재의 유동응력을 측정하기 위한 단축 인장시험 결과를 이용하여, 그림 3과 같이 한계값 C_1 을 온도 및 변형률 속도에 의존적인 값으로 표현하였다. 3개의 변형률 속도 (0.01, 0.1, 1/sec) 및 4개의 온도 조건 (상온, 100, 200, 300°C)에서 얻어진 결과를 바탕으로 내삽법을 이용하여 구간에서의 연속적인 곡선으로 표현하였다.

3. 유한요소해석

온도 및 변형률 속도 의존성 연성파괴한계값을 이용하여 드로잉 성형공정에서의 파단을 예측하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS-Explicit을 이용하여 해석

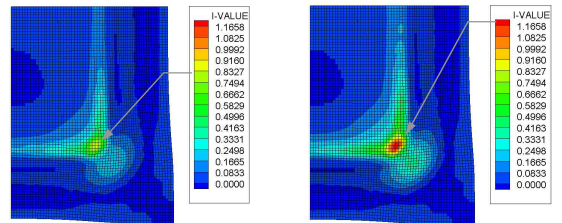


[그림 3] 온도 및 변형률 속도 의존형 연성파괴 한계값

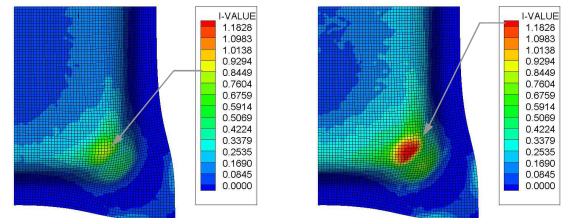
을 수행하였다. 상·하형 금형은 강체로 가정되었으며, 소재는 탄소성체로 가정하고, 3차원 육면체 요소를 이용하여 메쉬하였다. 최대 성형깊이에 비해 성형속도가 빠르므로, 충분한 금형가열을 통해 성형공정 중 외부로의 열전달은 매우 적다는 가정하에 각 온도별로 등온공정해석이 수행되었다. 유한요소해석결과 얻어진 변형률, 응력결과를 이용하여 연성파괴를 발생여부를 예측하기 위하여 식(1)은 식(2)의 형태로 수정되었으며, 이때 $I=1.0$ 을 만족하면 파단이 발생한 것으로 예측할 수 있다.

$$I = \frac{1}{C_1} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad \text{식(2)}$$

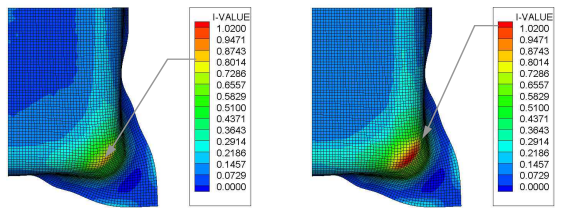
각각의 온도조건에서의 유한요소해석 중 매 시간증분마다 모든 요소에서의 변형률 속도를 계산하고, 그림 3을 이용하여 동일한 온도 및 변형률 속도에서의 한계값 C_1 을 적용하여 식(2)의 적분치 I 값을 계산함으로써, 한계값 C_1 의 온도 및 변형률 의존성을 고려하였다.



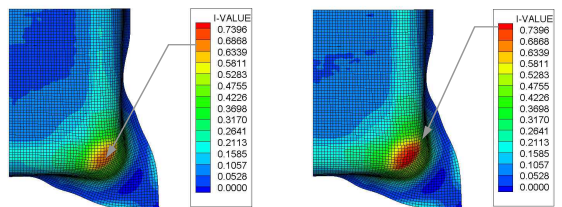
(a) Room Temp.



(b) T=100°C



(c) T=200°C



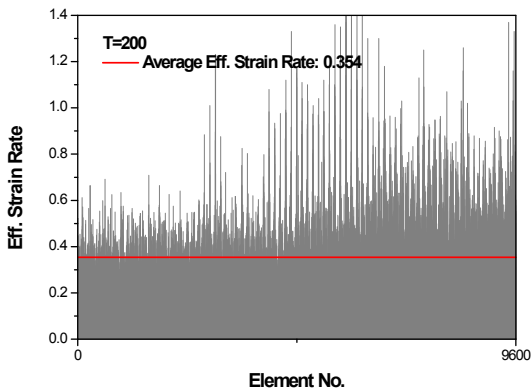
(d) T=300°C

<온도만 고려>

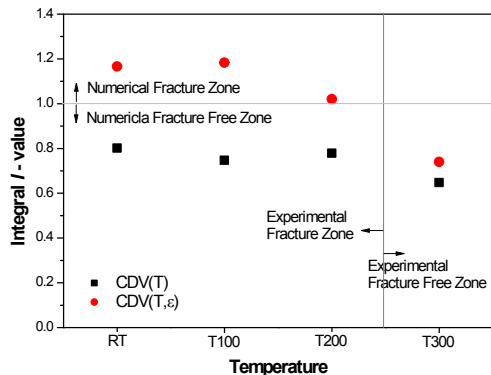
<온도/변형률 속도 고려>

[그림 4] 성형온도별 적분치 I 분포

해석은 한계값 C_1 의 온도 및 변형률 의존성의 영향을 분석하기 위하여 온도만 고려한 경우와 두 가지 모두 고려한 경우에 대하여 각각의 성형온도조건에서의 해석이 수행되었다. 그 결과 그림 4의 적분치 I 분포를 통해 알 수 있는 바와 같이 온도만 고려했을 경우에는 상온에서 300°C까지 모든 온도조건에서 적분치 I 가 1.0 미만의 값을 가짐으로써 파단이 발생하지 않을 것으로 예측함으로써 실험과 상이한 결과를 보였다. 반면, 온도 및 변형률 속도를 모두 고려한 한계값 C_1 을 사용한 경우 200°C까지는 모서리부에서 모두 1.0 이상의 값을 가짐으로써 파단이 발생할 것으로 예측하였고, 300°C에서는 적분치 I 값이 최대 0.74를 보임으로써 파단발생이 없을 것으로 예측함으로써 실험결과와 일치하는 경향을 보였다. 그림 4는 200°C 해석 결과, 모든 요소에서의 유효변형률 속도를 보여주고 있는데, 소재의 위치별로 상이한 변형률 속도를 보이고 있으며, 평균 변형률 속도는 0.354/sec 이다. 그림 3을 참고하면, 온도 200°C, 변형률 속도 0.354에서의 연성파괴 한계값은 0.416인 반면, 변형률 속도 의존성을 고려하지 않을 경우 0.01/sec에서의 한계값은 0.534로 지나치게 높게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6에는 이상의 예측 및 실험 결과를 도시하였다.



[그림 5] 각 요소에서의 변형률 속도 분포



[그림 6] 파단예측 및 실험 결과

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 온간 성형에서의 파단발생을 예측하기 위하여 온도 및 변형률 속도 의존형 연성파괴한계값을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 온도 및 변형률 속도를 모두 고려한 경우에는 실험과 일치하는 경향을 보였으며, 온도만 고려한 경우 상이한 결과를 보였다. 따라서, 고온 성형시 발생하는 연성파괴의 정확한 예측을 위해서는 연성파괴이론의 한계값은 온도 및 변형률 속도에 의존적인 값으로 표현되어야 한다.

후기

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

참고문헌

- [1] A.W. El-Morsy, K.I. Manabe: Materials Letters, Vol.60 (2006) p. 1866-1870
- [2] T. Walde, H. Riedel: Acta Materialia Vol.55 (2007) p. 867-874
- [3] K.F. Zhang, D.L. Yin, D.Z. Wu: Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.46 (2006) p. 1276-1280
- [4] G. Palumbo, D.Sorgente, L. Tricarico, S.H. Zhang, W.T. Zheng: J. Mater. Process. Technol. (2007)
- [5] Q.F. Chang, D.Y. Li, Y. H. Peng, X. Q. Zeng: Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.47 (2007) p. 436-443
- [6] S.H. Zhang, K. Zhang, Y.C. Xu, Z.T. Wang, Y. Xu, Z.G. Wang: J. Mater. Process. Technol. Vol.185 (2007) p. 147-151
- [7] F.K. Chen, T.B. Huang, C.K. Chang: Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.43 (2007) p. 1553-1559
- [8] H. Palaniswamy, G. Ngaile, T. Altan: J. Mater. Process. Technol. Vol.146 (2004) p. 52-60
- [9] F.K. Chen, T.B. Huang: J. Mater. Process. Technol. Vol.142 (2003) p. 643-647
- [10] S. Lee, Y.H. Chen, J.Y. Wang: J. Mater. Process. Technol. Vol.124 (2002) p. 19-24
- [11] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta: J. Mater. Process. Technol. Vol.89-90 (1999) p. 135-140
- [12] H. Takuda, T. Enami, K. Kubota, N. Hatta,: J. Mater. Process. Technol. Vol.101 (2000) p. 281-286
- [13] E. Doege, K. Dröder: J. Mater. Process. Technol. Vol.115 (2001) p. 14-19
- [14] S. Yoshihara, B.J. MacDonald, H. Nishimura, H. Yamamoto, K. Manabe: J. Mater. Process. Technol. Vol.153-154 (2004) p. 319-322
- [15] M.G. Cockcroft, D.J. Latham: J. Inst. Met. Vol.96 (1968) p. 33-39
- [16] S.E. Clift, P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G.W. Rowe: Int. J. Mech. Sci. Vol.32 (1990) p. 1-17
- [17] P. Brozzo, B. deLuka, R. Rendia: IDDRG (1972).
- [18] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima: J. Mech. Work. Tech. Vol.4 (1980) p. 65-81.