

AZ31 마그네슘 합금의 온간 후방압출에서 변형특성과 결합성장에 관한 유한요소해석

윤덕재¹, 김응주¹, 이용신[#]

Finite Element Study on Deformation Characteristics and Damage Evolution in Warm Backward Extrusion of AZ31 Mg Alloys

D-J Yoon, E-Z Kim, Y-S Lee

(Received October 5, 2007)

Abstract

Deformation characteristics and damage evolution during warm backward extrusion of bulk AZ31 Mg alloy were investigated using finite element analyses. AZ31 Mg alloy was assumed as a hardening viscoplastic material. The tensile tests of AZ31 Mg alloy in previous experimental works showed the ductile fracture even at the warm temperature of 175 °C. In this study, damage evolution model proposed by Lee and Dawson, which was developed based on the growth of micro voids in hardening viscoplastic materials, was combined into DEFORM 2D. Effects of forming temperature, punch speed, extrusion ratio and size of work piece on formability in warm backward extrusion as well as on mechanical properties of extruded products were examined. In general, finite element predictions matched the experimental observations and supported the analyses based on experiments. Distributions of accumulated damage predicted by the finite element simulations were effective to identify the locations of possible fracture. Finally, it was concluded that the process model, DEFORM2D combined with Lee & Dawson's damage evolution model, was effective for the analysis of warm backward extrusion of AZ31 Mg alloys.

Key Words : AZ31 Mg Alloy, Finite Element Method, Damage Evolution, Warm Backward Extrusion

1. 서 론

AZ31 마그네슘 합금은 고강도, 고강성, 용접성 및 부식저항성을 갖춘 경량의 구조재료 자동차 산업뿐만 아니라 통신장비 등 전자산업에 있어서도 그 응용범위를 넓혀가고 있는 추세이다[1]. 이러한 장점에도 불구하고 마그네슘 합금은 냉간 가공성이 취약하고, 온간 및 열간 성형시에도 마그네슘의 난소성성과 친산화성 등의 까다로운 성

형조건 때문에 성형기술의 확보가 미흡한 편이다.

종래에는 AZ31 마그네슘 합금 제품의 대량생산은 반용융 성형이나 주조에 의해 이루어졌다. 그러나 주조결합 또는 환경오염의 문제 등이 대두되어 왔다. 이에 환경문제의 해결과 생산성을 갖추며, 기계적 성질이 우수한 마그네슘 합금 제품을 생산할 수 있는 성형공정기술의 개발이 요구되어 왔다.

최근에는 AZ31 마그네슘 합금의 고온 및 온간

1. 한국생산기술연구원

교신저자: 국민대학교 기계·자동차 공학부,

E-mail: yslee@kookmin.ac.kr

성형공정개발을 위하여, 고온 성형특성 조사, 미세조직의 변화와 기계적 성질, 온간 및 열간 성형을 위한 기초 물성 평가에 관한 연구들이 진행되어왔다[2~8].

최근의 활발한 실험적 연구에도 불구하고 보완되어야 할 연구 내용이 적지 않은 실정이다. 이는 실험으로는 조사가 불가능하여 측정되거나 관측된 현상에 근거한 논리의 검증이 필요하거나 과다한 연구비용이 요구되는 분야가 있기 때문이다. 이는 유한요소법과 같은 공정해석 모델을 통하여 효율적으로 개선될 수 있다.

이에 본 연구에서는 실험연구의 분석을 검증하는 외에 실험으로 측정하기 어려운 시편 내부의 변형특성을 이해할 수 있도록, 성형온도, 편치속도 및 소재크기 등의 다양한 공정조건이 성형특성에 미치는 영향을 DEFORM 2D[9]를 이용한 유한요소해석을 통하여 조사한다. 더불어 Lee & Dawson의 결합성장 모델을 DEFORM 2D에 결합하여 결합성장에 관한 예측을 수행하고, 실험에서 관찰된 파괴현상과 비교 분석을 수행하여 궁극적인 성형공정 설계를 위한 공정해석 모델을 제시하고자 한다.

2. 결합 성장 모델

본 연구에서 이용하는 변형경화, 점소성 해석에 관한 유한요소해석의 수치해석모델에 관하여는 표준화된 과정으로 참고문헌 등에 상세히 주어진다. 여기서는 본 연구에서 사용하는 결합성장에 관한 모델에 관하여 논의한다.

먼저 DEFORM 2D에 주어진 Cockcroft & Latham 모델 식은 다음과 같다.

$$D_f = \int \left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

여기서 D_f 는 결합변수이고, 일정치에 도달하면 파괴에 이른 것을 의미한다. $\bar{\epsilon}$ 은 유효변형률이고, σ_1 과 $\bar{\sigma}$ 는 제 1 주응력과 유효응력을 의미한다. 따라서 결합 성장은 제1 주응력의 유효응력의 비에 관계된다.

한편, Lee & Dawson[10]의 결합 성장 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = C_0 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp} \left(C_1 \frac{\sigma_m}{\sigma^*} \right) \cdot d_e \quad (2)$$

여기서 C_0, C_1 은 재료고유의 상수이고, σ_m 와 σ^* 는 각각 평균응력과 변형경화를 모사하는 상태변수이다. Cockcroft & Latham의 모델에서는 유효응력으로 나누어져 변형이 시작되는 시기에 또는 소성변형이 작은 지역에서는 과대 예측되는 경향을 보일 수 있다. 반면에 Lee & Dawson의 모델에서는 평균응력은 변형경화 상태변수로 나누어져 그러한 문제점을 해결할 수 있었으며[10], 평균응력은 지수함수의 형태로 결합성장속도에 영향을 주며, 변형률 속도의 결합성장속도에 미치는 영향은 상대적으로 작게 모사되고 있다. Lee & Dawson의 모델은 미세기공의 생성은 반영하지 않으며 결합의 초기치(ϕ_i)를 필요로 한다. 본 연구에서는 공학재료의 초기치로 Lee & Dawson이 제시한 0.0011을 사용하였다. C_0 와 C_1 은 참고문헌 [8]에 주어진 인장실험의 응력-변형률 선도와 파괴를 고려하여 각각 5와 0.5를 사용하였다.

3. 결과 및 분석

AZ31 Mg 합금의 온간 후방압출의 개략도와유한요소해석에 사용된 유한요소격자의 하나가 Fig. 1에 주어진다. 소재의 크기에 따라 소재의벽과 다이 내벽과의 간격 t_1 은 변수로 된다.

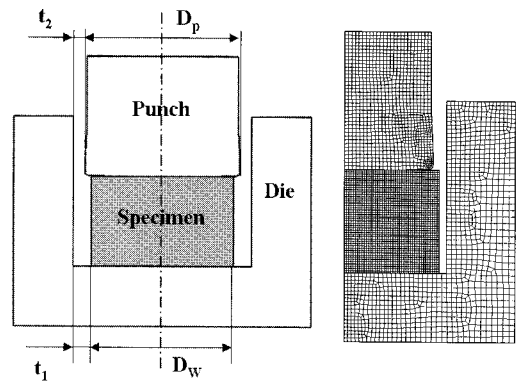


Fig. 1 Schematic of backward extrusion and a typical finite element mesh.

3.1 압출하중

유한요소해석의 결과와 비교하기 쉬운 실험에서의 측정치는 편치하중이다. 먼저, 성형온도가 온간 성형의 상한인 200°C에서 편치속도에 따른 편치하중의 유한요소예측과 실험에서의 측정치

가 Fig. 2에 주어진다. 탄성영역에서 실험에서의 측정치와 유한요소해석에 의한 성형하중 예측치의 커다란 차이는 압출장치 자체의 탄성계수를 실험측정치에서 배제하지 못한 것에 기인하며 정상상태에서의 비교는 매우 타당한 것으로 사료된다.

실험에서는 펀치속도가 2mm/s에서 정상상태의 펀치하중은 약 55톤, 10mm/s에서는 48톤, 20mm/s에서는 45톤으로 측정되었다. 유한요소해석에 의한 성형하중은 실험에서와 같이 펀치속도의 증가에 따라 성형하중의 감소가 예측되었으며 펀치속도가 2mm/s에서 펀치하중은 약 55톤, 10mm/s와 20mm/s에서는 비슷하게 44톤으로 예측되었다.

이와 같은 현상은 보통의 점소성 공학재료에서 나타나는 현상과 다른 것으로 마그네슘 합금의 경우에 펀치속도가 빨라짐에 따라 변형률 속도의 증가가 소성일 이산 (plastic work dissipation)을 크게 하며, 마그네슘 합금의 비교적 작은 비열로 인하여 온도 증가가 뚜렷하게 나타나고, 유동응력의 저하가 발생하여 성형하중이 작아지는 것으로 분석한 것이 몇몇 논문에서 보고되어 왔다[6-7]. 이러한 분석의 입증은 압출되는 소재 내부의 온도변화에 대한 자료를 필요로 한다.

Fig. 3에서는 성형온도 180℃, 200℃, 펀치속도 2mm/s, 20mm/s, 압출비 2.16, 4, 7.75 등의 다양한 공정조건하에서 유한요소해석에 의한 정상상태 펀치하중을 실험에서 측정한 값들과 비교하여 보여준다. 전반적으로 공정조건의 변화에 따른 펀치하중의 크기와 변화의 경향을 올바르게 예측하고 있는 것으로 판단된다.

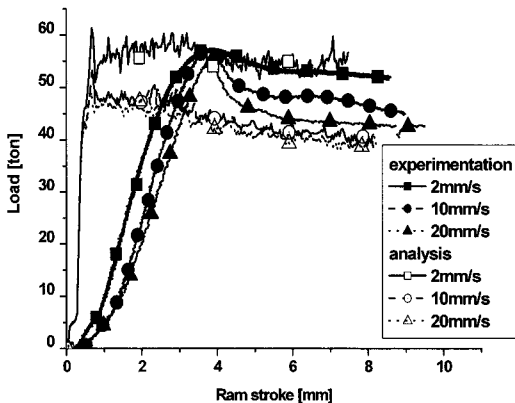


Fig. 2 Variation of punch loads for several punch velocities : extrusion ratio 7.75, temp. 200℃

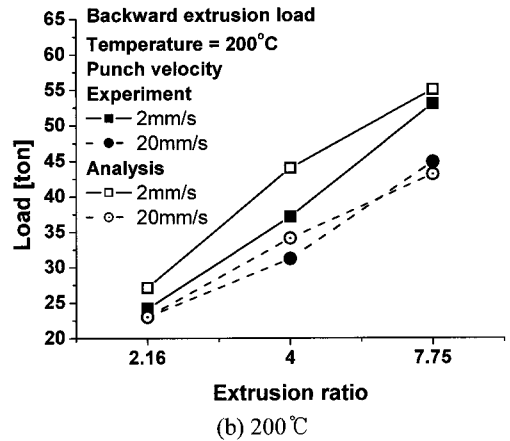
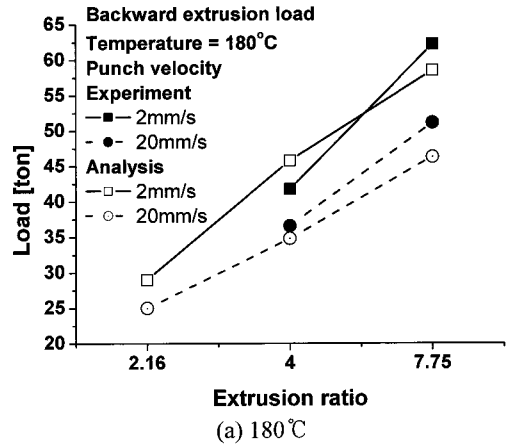


Fig. 3 Steady state punch loads under various extrusion conditions

3.2 공정조건에 따른 성형특성

앞서 언급한 바와 같이 소재 내부에서의 변형은 실험으로 측정이 불가능한 상태이나 유한요소해석에 의한 예측으로 성형특성에 대한 이해를 높이고 공정설계의 자료를 추출할 수 있다

본 연구에서 고려하는 AZ31 Mg 합금의 온간후방 압출의 공정조건 범위, 즉 펀치 속도 2mm/s에서 20mm/s, 압출비 2.16에서 7.75, 성형온도 180℃에서 200℃에서는 유한요소 해석에 의한 유효응력, 유효변형률, 유효 변형률 속도 및 온도의 분포에 있어서 변수들의 크기에는 공정조건에 따른 차이가 있으나 분포의 특성에는 큰 차이가 없는 것으로 예측 되었다.

Fig. 4에서는 성형온도 200℃, 압출비 7.75의 경우에 펀치속도의 증가에 따른 유효응력, 유효변형

를 속도 및 온도 등의 상태변수들의 분포를 보여 준다. 후방압출의 경우에는 펀치에 접하여 있는 부분의 소재가 펀치모서리를 따라 소성유동이 일어나는 것으로 보고되어 왔다. 본 연구의 그림에서도 펀치 모서리에서 벗어나 압출이 발생하는 변형구역에서 변형률 속도가 다른 지역보다 월등하게 크며, 거의 모든 변형이 이곳에서 이루어지는 것을 보여주고 있다. 이에 따라 펀치 모서리 부근의 변형구역에서 최대온도가 나타나고 있다 (Fig. 4(c)).

Fig. 4(a)의 유효응력의 분포에서 보아 펀치와 다이 바닥 사이에서는 소재의 압축이 주된 변형기구이고, 이에 대한 보상으로 압출이 된 소재는 다이 벽을 타고 올라가며 다이 내벽과 접하는 부분에서 인장 변형이 이루어진 후에 강제 운동으로 움직여지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 4(c)에서 보여지는 바와 같이 압출된 소재가 비교적 빠르게 온도가 저하되어도 그 곳에서 유동응력의 증가가 없는 것이 Fig. 4(a)에서 보여지며, 이러한 현상은 변형이 거의 없이 강제 운동으로 소재가 이동하는 것을 뒷받침 한다.

펀치속도의 증가에 따라 변형률 속도의 증가는 소성일 발산을 빠르게 하여 비열의 크기가 비교적 작은 마그네슘 합금의 온도 증가가 뚜렷하게 나타나게 한다. Fig. 4(c)에서는 펀치속도가 2mm/s에서 20mm/s로 증가할 때 최고온도의 증가는 30℃가 약간 넘는 것으로 보여주고 있다. 이러한 온도의 증가는 유효응력의 감소를 일으켜 실험에서 측정되는 바와 같은 펀치하중의 감소를 야기시키는 주된 원인이다.

온간에서 후방 압출된 AZ31 Mg 시편의 단면을 절단하여 측정한 Vickers 경도를 측대칭 유한요소 해석으로 얻은 유효변형률 분포와 비교한 것이 Fig. 5에 주어진다. 실험에서는 압출비는 7.75인 경우에 소재와 다이의 온도는 200℃로 유지하였으나, 펀치의 온도는 상온으로 하여 압출을 수행하여 해석조건도 실험과 같이 하였다. 펀치속도는 2mm/s와 20mm/s의 경우에 조사하였다. 초기에 비교적 작은 소성변형 후에 강제 운동으로 이송되는 얇은 벽의 윗부분을 제외하면, 성형속도의 증가는 실제의 소성변형을 겪는 부분에서 약간의 온도 증가를 보여주고 있다.

Fig. 6에서 다이와 소재의 온도는 180℃, 200℃를 유지하고 펀치의 온도를 상온으로 하여 측정한 Vickers 경도와 측정된 지점의 유한요소법에

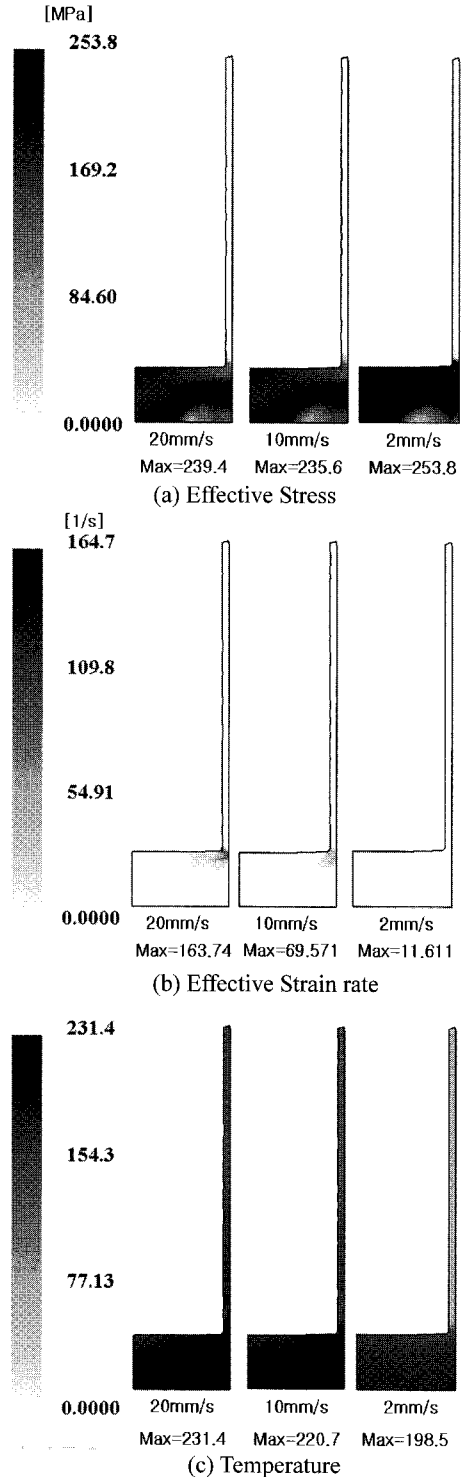
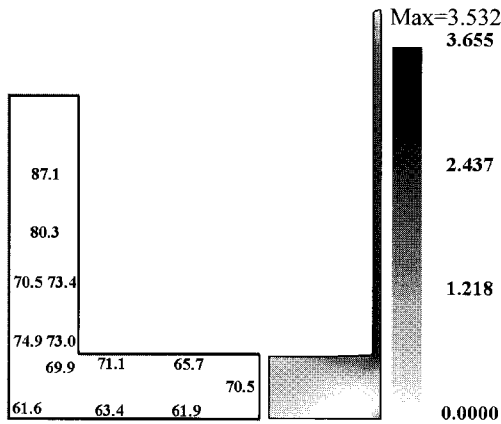
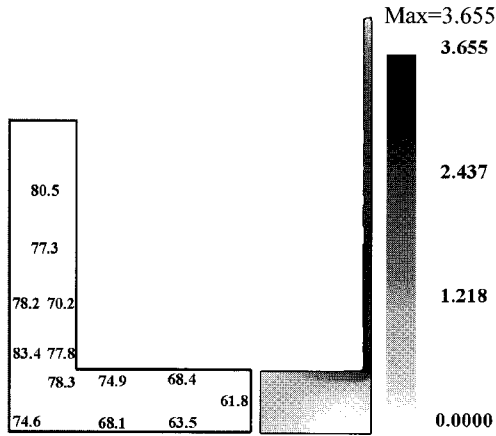


Fig. 4 Distribution of state variables



(a) 2 mm/s



(b) 20 mm/s

Fig. 5 Distribution of Vickers hardness and effective strain

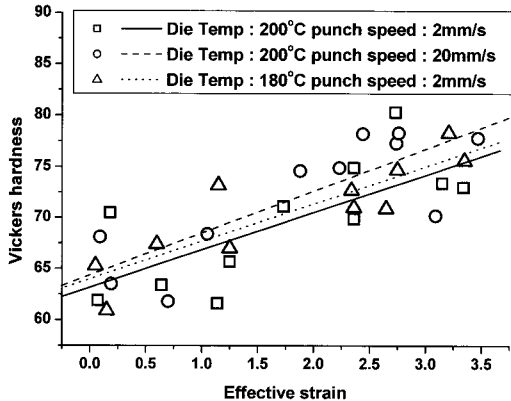


Fig. 6 Correlation between Vickers hardness and effective strain

의한 유효 변형률 예측치의 관련성을 보여주고있다. 구체적인 관계식을 결론으로 제시하기에는 많은 실험 데이터와의 비교를 필요로 하여 후일 과제로 남겨둔다.

3.3 결함 성장

일반적인 후방압출의 경우에 펀치 머리 코너 부근에서 베어링부를 통과하는 소재의 유동이 펀치 하강속도보다 커서 펀치머리 아래 소재의 압축을 보상하는 인장응력이 베어링부를 통과하여 압출되는 얇은 벽의 소재에 나타나게 된다. 이러한 인장응력이 성형공정을 제한하는 결함의 성장을 일으키는 요인이다. 펀치의 온도 및 속도, 다이 온도 및 시편의 크기 등은 압출된 얇은 벽의 인장응력 크기에 영향을 끼쳐 궁극에는 성형조건을 제한하게 된다.

AZ31 Mg 합금 시편의 크기가 온간 후방 압출 공정 성형성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 예측하여 보았다. 실험에서는 Fig. 1에서 보여지는 소재의 직경 D_w 를 펀치 직경보다 작게하여 처음에는 압축성형이 이루어지고, 이어서 압출성형이 수행되도록 하여 소재의 크기가 성형성에 미치는 영향을 조사하였다. 실험에서는 다이의 내경은 30mm 로 고정하고 소재의 직경을 29.7mm, 28mm, 26mm 로 변화시켰고, 펀치, 다이 및 소재의 성형온도는 모두 같게 하였으며, 펀치속도는 20mm/s 로 하였다. 성형온도가 200°C인 경우보다는 180°C에서 성형성이 나쁘게 나타났고, Fig. 7에 실험결과가 보여진다. 소재의 직경이 28mm 인 경우에는 외벽에서 파괴가 발생하였고, 26mm 인 경우에는 내벽과 외벽 모두에서 파괴가 발생하였다. 사진의 결과로부터 외벽에서 최초의 결함이 발생하여 성형성을 제한하는 것으로 판단된다.

공정설계를 위한 해석도구는 위와 같은 결함성장애 의한 파괴를 모델링하는 기능이 요구된다. 본 연구에서는 DEFORM 2D 에 내재되어 있는 Cockroft & Latham 모델에 의한 결함의 분포와 Lee & Dawson 결함성장 모델을 이용한 결함분포를 구하여 각각 Fig. 8 과 Fig. 9 에 보여준다.

Cockroft & Latham 의 결함변수(D_f)는 초기값은 통상 0 으로 주어지며 1 보다 작은 값을 갖게되고, 파괴시의 결함변수 값은 실험으로부터 결정되는 재료고유의 상수이다. 결함변수의 최대치는 외벽에서 발생하는 것은 실험과 일치하는 현상이다. 그러나 실험에서 파괴가 발생치 않는 직경 29.7mm,

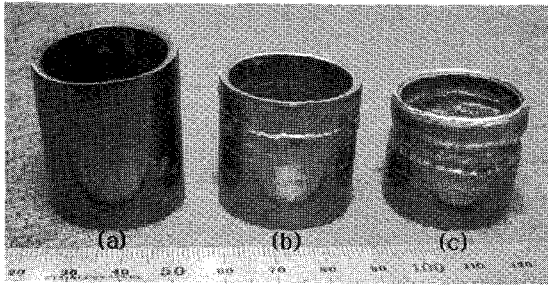


Fig. 7 Effect of specimen diameter on forming limit in sequential upset-extrusion : (a) $\phi 29.7$ (b) $\phi 28.0$ (c) $\phi 26.0$

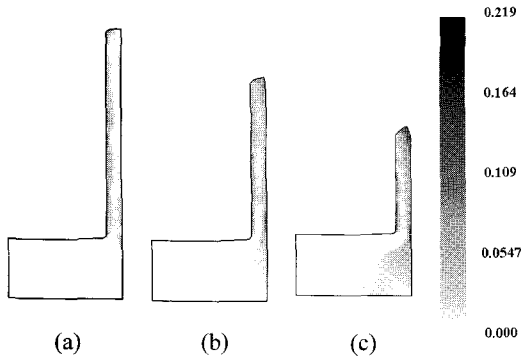


Fig. 8 Accumulated damage in sequential upset-extrusion: Cockcroft-Latham model, (a) $\phi 29.7$ (b) $\phi 28.0$ (c) $\phi 26.0$

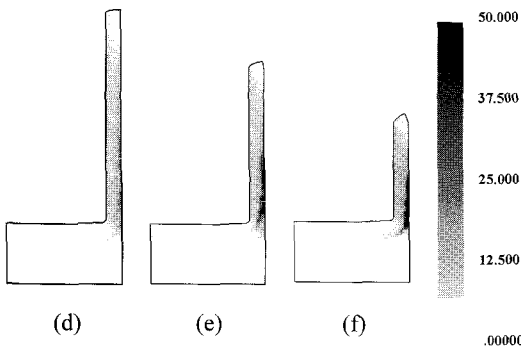


Fig. 9 Accumulated damage in sequential upset-extrusion: Lee-Dawson model, (a) $\phi 29.7$ (b) $\phi 28.0$ (c) $\phi 26.0$

28mm 소재의 압출된 내벽에서도 상당히 큰 값으로 파괴를 예측하여 실험과의 불일치를 보여준다.

Lee & Dawson의 결합변수는 초기치로 나눈 값의 분포가 보여진다. 결합변수의 최대치는 초기치

의 약 50 배 정도이고, 실험에서 파괴가 발생하는 외벽에서 나타난다. 직경 28mm 소재의 압출된 내벽에서는 결합변수의 값은 매우 작고, 직경 26mm 소재의 압출된 내벽에서는 결합변수의 값이 초기치의 25 배 이상이 되는 것을 보여주고 있다. 이것은 Cockcroft & Latham 모델과 달리 세 경우 모두에서 실험결과와 일치하는 현상이다. AZ31 Mg 합금의 온간 후방압출성형의 해석에서는 Lee & Dawson의 결합성장 모델을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

4. 결론

AZ31 Mg 합금의 온간 후방압출공정의 유한요소 해석을 DEFORM2D를 이용하여 수행하였다.

유한요소해석에 의한 압출하중의 실험에서 측정된 압출하중과의 비교는 해석의 타당성을 보여주었다. 압출비, 성형온도, 펀치속도 및 시편크기의 변화에 따른 성형특성과 경도변화를 조사하였으며, 실험에서 측정할 수 없는 소재내부의 변형특성에 관한 유한요소해석의 예측은 실험에서의 분석을 입증할 수 있었다.

실험에서 측정된 Vickers 경도와 유한요소해석에 의한 유효변형률 분포의 비교로부터 Vickers 경도와 변형경화가 관계가 있음을 확인하였다.

온간 성형 중인 소재의 결합성장을 예측하기 위하여 Lee & Dawson의 결합성장모델을 이용하였으며, 시편의 크기가 성형성에 미치는 영향을 조사한 실험결과와 일치함을 확인하였다.

궁극적으로 DEFORM2D에 Lee & Dawson의 결합성장모델을 결합한 공정해석모델이 AZ31 Mg 합금의 온간 후방압출공정의 해석에 유효함을 입증하였다.

후 기

본 연구는 국민대학교 2006년도 교내연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. S. Roberts, 1960, Magnesium and its alloys, New York: John Wiley.
- [2] H. Friedruch, S. Schumann, 2001, Research for a

- new age of Mg in the automotive industry, J. Mater. Process. Tech. Vol. 117, pp. 276~281.
- [3] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, 2002, Forming Limit of Mg Alloy at Elevated Temperatures for Precision Forging, Int. J. Mach. Tool. Manfac., Vol. 42, pp. 607~614.
- [4] D. J. Yoon, Y. W. Seo, C. Cho, H. J. Choi, K. H. Na, 2005, Characteristic of Hydrostatic Extrusion for Mg Alloy AZ31, Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of 8th ICTP, pp. 691~692.
- [5] P. Maier, K. U. Kainer, 2005, Extension of the Range of Applications for Mg Alloys, 62th Annual World Conference Proceedings, pp. 99~104.
- [6] 이병호, 신광선, 이종수, 2004, AZ31 Mg 합금의 가공조건에 따른 고온 성형성 연구, 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 80~83.
- [7] D. J. Yoon, E. Z. Kim, C. Cho, Y-S Lee, 2007, A study on forming characteristics in warm backward extrusion of AZ31 Mg alloys, Proceedings of ICPNS 2007(To appear).
- [8] D. J. Yoon, 2007, 마그네슘 합금의 온간 전후방 압출의 성형특성에 관한 연구, 인하대학교 박사학위 논문.
- [9] DEFORM 2D manual, SFTC.
- [10] Y-S Lee, P. R. Dawson, 1993, Modeling ductile void growth in viscoplastic materials, Mechanics of Materials, Vol. 15, pp. 21~34.