

AZ31 Mg 합금의 고온 변형 시의 동적 연화 현상

이병호¹·N. S. Reddy¹· 염종택²· 이종수[#]

Flow Softening Behavior during the High Temperature Deformation of AZ31 Mg alloy

Byoung Ho Lee, N. S. Reddy, Jong Teak Yeom, Chong Soo Lee

Abstract

In the present study, the flow-softening behavior occurring during high temperature deformation of AZ31 Mg alloy was investigated. Flow softening of AZ31 Mg alloy was attributed to (1) thermal softening by deformation heating and (2) microstructural softening by dynamic recrystallization. Artificial neural networks method was used to derive the accurate amounts of thermal softening by deformation heating. A series of mechanical tests (High temperature compression and load relaxation tests) was conducted at various temperatures (250°C~500°C) and strain rates (10⁻⁴/s ~ 100/s) to formulate the recrystallization kinetics and grain size relation. The effect of DRX kinetics on microstructure evolution (fraction of recrystallization) was evaluated by the unified SRX/DRX (static recrystallization/dynamic recrystallization) approaches

Key Words : AZ31 Mg alloy, Hot-forging, Finite Elements Method, Dynamic recrystallization, Neural network

1. 서론

최근 에너지 가격의 상승과 환경 문제의 대두로 인해 자동차 산업에서 연비 향상에 대한 관심이 크게 증가하고 있는 실정이다. 자동차의 연비를 줄이는 방법은 차체 디자인의 최적화, 엔진 설계의 최적화, 경량 구조재료의 사용 등이 있으나, 그 중 경량 구조재료를 자동차 차체에 사용하여 차체의 무게를 감소시키는 방법이 가장 효율적이라고 알려져 있다. 그리하여 최근 자동차 차체용 구조용 소재로 경량 금속을 이용하려는 많은 움직임이 있어왔다.

특히 사용 가능한 구조용 금속 중 가장 밀도가 낮은 마그네슘 합금은 경량 구조용 재료로서 자동차의 차체 무게 감소를 위한 많은 가능성을 갖고 있는 재료이다.

지금까지 대부분의 Mg 합금을 이용한 자동차

부품은 die-casting 이나 thixoforming 등을 이용하였으나 이런 방법으로 제조된 부품은 wrought material 에 비해 기계적 성질이 떨어진다는 단점이 있다. 일반적으로 마그네슘 합금은 그 슬립 계의 제한으로 인해 상온에서 성형성이 좋지 못하지만 성형 온도를 높일수록 작용하는 슬립 계의 수가 많아져 성형성이 좋아지는 특성을 가진다[2]. 따라서, 최근 마그네슘 합금의 고온 성형성을 향상시키고 고온에서의 변형 기구를 밝히려는 많은 노력이 있어 왔다. 특히 마그네슘 합금의 고온 성형 시에 일어나는 동적 연화 현상에 대한 연구는 성형 시의 소재의 성형성을 향상시키는 좋은 방안일 수 있다[1].

마그네슘 합금의 고온 변형 시에 일어나는 동적 연화는 크게 열적 연화와 미세조직적 연화로 나눌 수 있다. 열적 연화란, 상대적으로 빠른 속도와 낮은 변형 온도에서 고온 변형이 일어날 경

1. 포항공과대학교 신소재공학과
2. 한국기계연구원 소재성형연구센터
포항공과대학교 신소재공학과, E-mail: cslee@postech.ac.kr

우 일어나는 것을 실제 목표 온도보다 소재의 온도가 상승하는 가공 발열 현상에 기인한다[2]. 이러한 가공 발열이 나타나면 바깥으로 보여지는 소재의 응력이 실제의 응력보다 낮아지게 되어 소재의 가공 조건에 따른 정확한 응력 값을 구하기 힘들어진다는 단점이 있다. 그리하여 많은 연구자들이 이러한 가공 발열 현상을 보정하기 위한 모델을 제시한 바 있으나 각각의 모델이 가지는 단점이 존재하는 것이 사실이다. 본 연구에서는 인공 신경망 모델링을 사용하여 보다 정확한 열적 연화 보정을 수행하였다[3].

그리고 마그네슘 합금의 고온 변형 시 일어나는 동적 연화 중 미세조직적 연화는 일반적으로 고온 변형 시 활발하게 일어나는 동적 재결정 현상에 기인한다고 알려져 있다. 특히 마그네슘 합금은 변형을 가할 때, 동적 재결정이 완전하게 일어나지 않는 부분이 존재하게 되어 물성에 많은 영향을 끼치게 된다는 보고가 있어왔다. 본 연구에서는 마그네슘 합금의 동적 변형 시 미세 조직적인 연화 현상을 정량화 하기 위하여 동적 재결정이 일어난 후의 동적 재결정의 속도식을 제시할 것이다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 Mg 합금은 3.8wt%Al-1.0wt%Zn-0.5wt%Mn의 조성을 가진 상용 AZ31 Mg 합금이다. 이 마그네슘 합금의 평균 결정립 크기는 12 μ m였다. 본 연구에서는 AZ31 마그네슘 합금의 동적 재결정 모델링과 열적 연화에 대한 해석을 위해, 다양한 온도구간(250 $^{\circ}$ C~500 $^{\circ}$ C)과 변형 속도구간(0.0001/s~100/s)에서 Gleeble3500 고온 압축 시험기를 이용하여 압축실험을 수행하였다. 시편은 직경 10mm, 높이 12mm의 원통 모양이었으며, 진공 chamber 안에서 전기 저항에 의해 목표 온도까지 가열되고 열적 평형을 위해 1분 동안 유지한 후 0.6의 변형율까지 압축실험을 수행하였다. 응력-변형율의 변화는 Gleeble-3500 machine에 장착된 컴퓨터를 통해 연속적으로 측정되었으며, 실제 시편의 온도도 시편에 장착된 Thermocouple을 이용하여 실시간으로 측정하였다. 실험 후의 미세조직을 보존하기 위해 실험을 마친 직후 수냉 하였다.

또한 고온 변형 시 동적 재결정의 분율에 대한 모델링을 위해 200~500 $^{\circ}$ C의 온도 구간에서 응

력 이완 실험을 수행하였다. 응력 이완 실험은 Instron1361 Machine을 이용하였으며, 시편은 직경 10mm, 높이 18mm였다. 일반적으로 고온 압축 시 나타나는 베럴링 현상을 방지하기 위해 본 실험에서는 시편에 베럴링을 최소화 할 수 있는 V-자 홈을 시편에 내어 고온 압축 실험시의 시편 형상 인자를 최소화 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Mg 합금의 고온 변형 시 가공 연화

다음의 그림 1은 다양한 온도와 변형 속도 범위에서 고온 압축 실험을 통해 도출된 AZ31 Mg 합금의 가공 연화와 가공 경화를 나타낸다. 즉, 일반적으로 가공이 가해지는 온도 범위와 변형 속도에서 AZ31 Mg 합금은 가공 연화 현상을 일으키는 것을 알 수 있다. 이러한 가공 연화 현상은 크게 열적 연화와 미세조직의 변화에 의한 연화로 나뉜다.

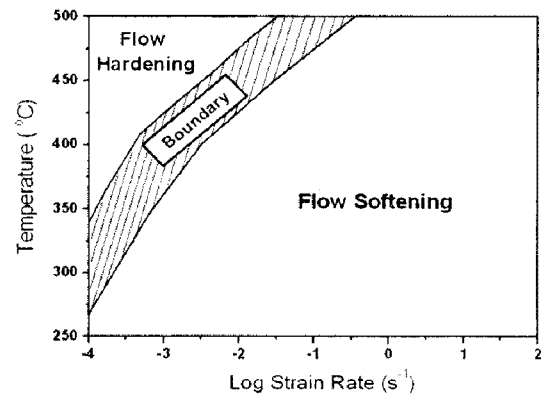


Fig.1. Processing conditions showing regions of flow softening or flow hardening in AZ31 Mg alloy

3.2 AZ31 Mg 합금의 열적 연화

열적 연화는 일반적으로 유사연화라고도 하며, 온도가 낮고 변형률 속도가 빠른 구간에서 변형 열이 발생하여 실제 재료가 목표보다 높은 온도에서 변형되어 일어나는 현상이다. 이러한 열적 연화의 보정은 소성일이 변형열로 바뀐다는 가정에 의해 소성일을 구하고 이를 변형열로 바꾼 후 다음의 식 (1)에 의해 실제 온도와 그때의 응력을 구하는 방법이 많은 연구자들에 의해 제시된 바 있다.

$$\sigma = A \exp \left[\frac{Q}{R(T_0 + \Delta T)} \right]_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \quad (1)$$

이때 변형 열을 소성일로 구하는 것은 소성 가공 도중 시편의 정확한 온도를 알 수 없기 때문인데, 본 연구에서 사용한 Gleeble3500 은 시편에 장착된 Thermocouple 을 이용하여 실시간으로 온도를 측정가능하며, 가공 열 발생 시 시편의 온도가 비단열적으로 계속 증가하는 것이 아니라 어느 정도 기계적인 보정을 한다. 또한 식(2)를 이용한 온도 보정은 결국 변형 열을 구한 후에 $\log(\sigma)-1/T$ 의 fitting 방법을 사용하여, 구한 응력의 오차가 클 수 밖에 없다는 단점이 존재한다. 그리하여 본 연구에서는 인공 신경망 (Artificial Neural Network)이라는 모델링 방법을 이용하여 열적 연화를 보정하였다[3]. 다음의 그림 3 은 이렇게 얻어진 온도 보정의 결과를 나타낸다. 이 그림을 보면 가공 열에 의해 온도가 올라감에 따라 응력 값이 떨어지며, 그 값은 기계적인 보정에 의해 점점 작아져 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 이렇듯 인공신경망 모델을 이용하면 열적 연화 보정을 효과적으로 수행할 수 있다. 이는 다른 연구자들이 제시한 열적 연화 보정 방법에 비해 효과적이며 실제적인 방법이다.

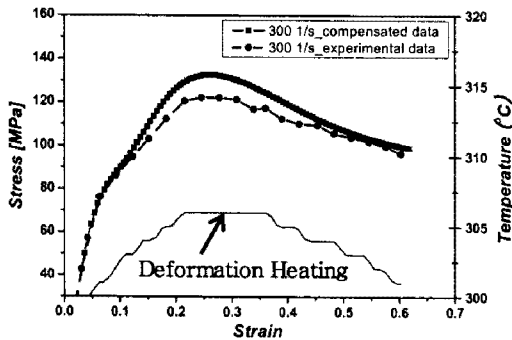


Fig.2. Temperature compensated stress-strain curve by artificial neural network

3.3 AZ31 Mg 합금의 미세조직적 연화

일반적으로 AZ31 Mg 합금의 미세조직적 연화는 동적 재결정에 의해 일어난다고 알려져 있다. 동적 재결정 된 결정립 내의 전위 밀도가 동적 재결정의 구동력으로 작용하면서 낮아진 전위 밀도로 인해 연화 현상이 일어나는 것이다. 이러한 동적 재결정 현상을 정량화 하기 위해 C. M. Sellars 등은 다음의 식과 같은 동적 재결정의 속

도론 모델을 제시한 바 있다.

$$X_{drx} = 1 - \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

여기서 X_{drx} 는 동적 재결정이 일어난 분율, ϵ 는 변형율, ϵ_c 는 동적 재결정이 일어나기 시작하는 임계 변형량, $\epsilon_{0.5}$ 는 동적 재결정이 50%일어나는 변형율을 나타내는 것이다. 이러한 동적 재결정 모델을 이용하기 위해서는 ϵ_c , $\epsilon_{0.5}$ 등의 변형 중의 파라미터를 구해야 하는 단점이 있어 정확한 동적 재결정의 속도식을 구하기 어려웠다. 하지만 최근 M. R. Barnett 등은 동적 재결정의 속도론을 정적 재결정이 일어나는 초기의 재결정 현상으로 보고 동적 재결정의 임계 변형율을 정적 재결정 식을 이용하여 제시한 바 있다[4]. 다음의 식 (4)는 Avrami equation 으로 알려진 정적 재결정의 속도식이다.

$$X_s = 1 - \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

그리고 널리 알려진 다음의 식 (5)를 이용하여 50%재결정이 일어나는 시간을 변형량의 함수로 나타내었다.

$$t_{0.5} = A \epsilon^a \quad (5)$$

이러한 식을 식(4)에 적용한 정적 재결정과 동적 재결정의 통합론적 속도론 식은 다음의 식 (6)과 같다.

$$X = 1 - \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{\epsilon^{1-a}}{A(1-a)\dot{\epsilon}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

이때 식(5)의 파라미터인 A 와 a 를 구하기 위해 본 연구에서는 고온 압축 응력 이완실험을 실시하였다. 다음의 그림 3(a)는 AZ31 Mg 합금의 초기 변형량을 달리하여 300℃에서 압축 응력 이완실험을 실시한 것이다. G. Mateo 등은 재결정이 활발하게 일어나는 재료에서 압축 응력 이완 시 곡선이 세가지 지역으로 나뉘며 이때 지역 2 의 응력 이완은 재결정에 의한 것이라는 보고를 하였다[5]. 이를 정량화하여 재결정 분율을 구한 것이 다음의 식 (7)과 같다. 이식 (7)에 의해 재결정 분율을 시간에 따라 나타낸 것이 그림 3 (b)이다.

$$\sigma = (1-X)\sigma_1 + X\sigma_3 = (1-X)(\sigma_{01} - \alpha_1 \log t) + X(\sigma_{03} - \alpha_3 \log t) \quad (7)$$

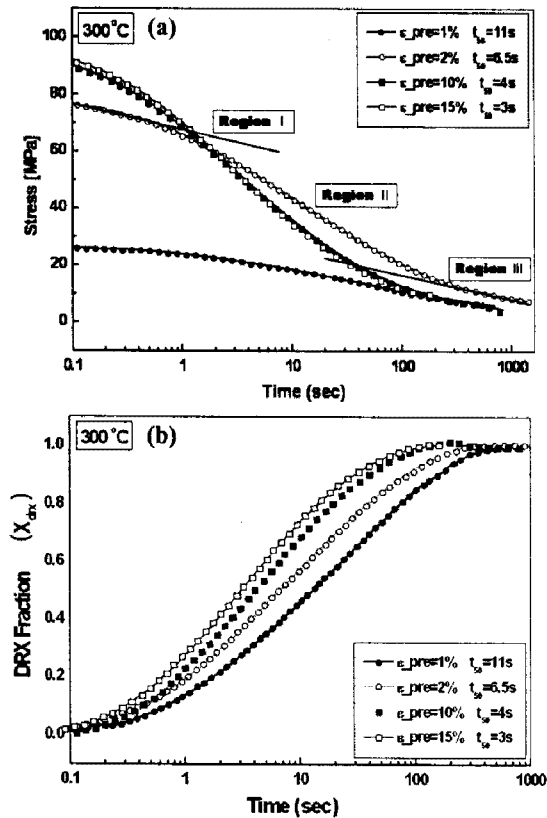


Fig.3. (a) Stress relaxation curves with time and (b) corresponding volume fractions of DRX.

이때 50% 재결정이 일어나는 시간을 다양한 온도 대해 표시한 것이 다음의 그림 4 이다. 이를 통해 식(5)의 파라미터인 A 와 a 를 도출할 수 있었으며 이는 다음의 식 (8)과 같다.

$$A = 0.15 \times \exp\left(\frac{10,000}{RT}\right), \quad a = -0.500 \quad (8)$$

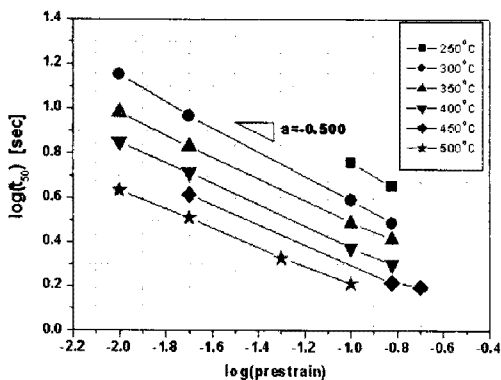


Fig.4. Time for 50% recrystallization as functions of prestrain and temperature.

위 식 (8)을 이용하여 식(6)에 대입하면, AZ31 Mg 합금의 동적 재결정 속도식을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 동적 재결정 속도식을 실제 단조 프로세스를 모사하는 FEM 코드에 적용하여, 식의 타당성을 비교해보았으며 실제 단조 프로세스의 동적 재결정 분율과 매우 일치하는 값을 얻을 수 있었다.

4. 결론

AZ31 Mg 합금의 고온 변형 시 일어나는 가공 연화 현상은 크게 변형 열에 의해 일어나는 열적 연화와 동적 재결정에 의해 일어나는 미세조직적 연화로 나눌 수 있다. 열적 연화는 인공 신경망 방법에 의해 효과적으로 보정할 수 있었으며, 미세조직적 연화의 정량화를 위해 정적/동적 재결정의 통합론적 속도식을 적용하여 효과적인 동적 재결정 속도식을 제시함으로써 미세조직적 연화의 정량화를 효과적으로 수행하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 2003 년 국가지정연구실 사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] I. Poschmann and H. J. McQueen, 1996, Flow Softening and Microstructural Evolution of Al-5mg During Hot Working, Scripta Mater., Vol. 35, pp. 1123-1128.
- [2] S. L. Semiatin, P. B. Berbon, and T. G. Langdon, 2001, Deformation Heating and Its Effect on Grain Size Evolution During Equal Channel Angular Extrusion, Scripta Mater., Vol. 44, pp. 135-140.
- [3] E. Masson and Y.-J. Wang, 1990, Introduction to Computation and Learning in Artificial Neural Networks, European J. of Operational Research, Vol. 47, pp. 1-28.
- [4] M. R. Barnett, G. L. Kelly, and P. D. Hodgson, 2000, Predicting the Critical Strain for Dynamic Recrystallization Using the Kinetics of Static Recrystallization, Scripta Mater., Vol. 43, pp. 365-369.
- [5] C. Garcia-Mateo, B. Lopez, and J. M. Rodriguez-Ibabe, 2001, Static Recrystallization Kinetics in Warm Worked Vanadium Microalloyed Steels, Mater. Sci. and Eng. A, Vol. 303, pp. 216-225.