

# 유한요소법을 이용한 Al-5wt%Mg합금의 미세조직 크기 예측

황원주\* · 조종래\*\* · 배원병\*\*\*

## The grain size prediction of Al-5wt%Mg alloy by FEM

Won-Joo Hwang\*, Jong-Rae Cho\*\* and Won-Byung Bae\*\*\*

### Abstract

A numerical analysis was performed to predict flow curves and dynamic recrystallization behaviors of Al-5wt%Mg alloy on the basis of results of hot compression tests. The hot compression tests were carried out in the ranges of 350~500°C and  $5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^0$ /sec to obtain the Zener-Hollomon parameter Z. The modelling equation for flow stress was a function of strain, strain rate and temperature. The influence of these variables was quantified using the Zener-Hollomon parameter. In the modelling equation, the effects of strain hardening and dynamic recrystallization were taken into consideration. A model for predicting the evolution of microstructure in Al-5wt%Mg alloy during thermomechanical processing was developed in terms of dynamic recrystallization phenomena. The microstructure model was combined with finite element modeling(FEM) to predict microstructure development. Model predictions showed good agreement with microstructures obtained in compression tests.

key words : Al-Mg alloy, Hot deformation, Recrystallization, Zener-Hollomon Parameter, Grain size, Finite Element Method

### 1. 서론

소성가공은 재료의 손실을 최대한으로 줄이면서 목적하는 형상으로 가공성형할 수 있다는 이점 이외에도 대량생산과 고속 가공성에 의한 제조비용의 절감효과 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나 열간 성형시에는 소재 내부의 조직변화가 크고 불균일 할 수 있으므로 열간 변형의 파라미터인 온도(T), 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ ), 응력( $\sigma$ ) 등이 적절히 조합되어야 균일한 재질을 유지할 수 있다.<sup>(1)</sup> 고온 소성가공시 소재 내부의 온도, 변형률, 변형률속도 등의 분포에 따라서 각 부위의 변형이 균일하지 못한 경우가 있는데 이것은 조직의 불균일로 이어지고 이렇게 되면 상온 기계적 특성의 균질

성을 보장하기 어렵다. 이와 같이 되는 이유는 동적회복(dynamic recovery, DRV)과 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)에 따른 동적연화(dynamic softening)에 의해서 미세조직의 크기와 변형저항이 결정되기 때문으로 이 과정을 제어할 수 있다면 최종제품의 특성까지도 결정할 수 있다고 하겠다.

여기서, 소재가 열간 변형을 거치는 동안 온도, 변형률, 변형률속도 등의 공정변수들이 미세조직의 변화에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고 최적의 공정변수값을 찾기 위해서는 수치해석적인 방법이 가장 효율적이며 열적·기계적 변수들과 미세조직과의 상관관계를 파악하기 위해 재료의 응력해석과 열전달 해석이 연계된 강점소성 유한요소법의 이용이 요구된다.<sup>(2)(3)</sup>

### 2. 실험방법

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 한국해양대학교 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

Table 1 Chemical compositions of Al-5wt%Mg alloy.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al
Composition(wt%)	0.08	0.27	0.3	0.366	5.0	0.03	0.002	0.037	0.0007	bal.

### 2.1 기초실험

실험에 사용된 소재는 균질화 처리하여 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편으로 가공하였다. 시편의 화학성분은 Table 1과 같다.

Fig.1에 실험장치의 개략도를 나타내었으며 시편은 진공속에서 유도가열방식에 의해 5°C/sec의 속도로 가열한 후 5분간 유지하여 350°C, 400°C, 450°C, 500°C의 온도에서 0.005~3/sec의 변형률 속도로 높이감소를 50%까지 압축하였으며 압축 완료 후 시편내부의 동적재결정립을 관찰하기 위해 질소가스를 사용하여 급냉하였다.

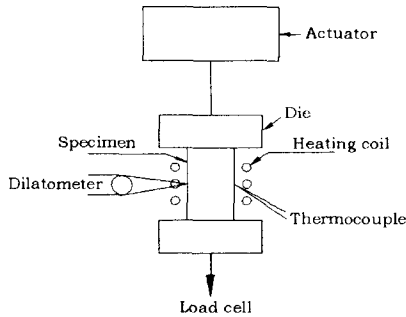


Fig. 1 Testing equipment

### 2.2 업세팅 실험

기초실험에서 구한 모델식을 사용하여 시뮬레이션한 결과와 실험결과를 비교하기 위해 직경 50mm, 높이 60mm의 소재로 200t 유압프레스를 사용하여 높이 감소율 50%까지 비등온 압축실험을 수행하였다. 전기로를 이용하여 소재 초기온도를 380°C, 420°C, 460°C로 설정하고 급형은 열선 카트리지를 이용하여 250°C, 300°C, 420°C까지 각각 가열하여 실험하였다. 변형중 소재 내부의 온도변화를 보기 위해 소재에 직경 약 1.6mm 정도의 구멍을 뚫어 열전대(thermocouple)를 꽂아 측정하였고 급형의 온도는 열전대를 점용접(spot welding)하여 시간의 변화에 따른 온도변화를 조사하였다.

### 3.1 동적재결정 거동 모델링

Fig.2의 유동응력곡선에서 볼 수 있듯이 아주 작은 변형률(약 0.01)에서 최대응력을 나타낸 후 감소하여 정상상태에 도달하고 있다. 그러나 미세조직사진 촬영 결과 이처럼 작은 변형률값 근처에서는 동적재결정립의 형성이 관찰되지 않았다. 따라서 단순히 최대응력에 도달하였을 때의 변형률( $\epsilon_p$ : 최대변형률)값 근처에서 동적재결정이 시작된다고 단정짓기란 곤란하였으며 다른 방법을 모색할 필요가 있었다.

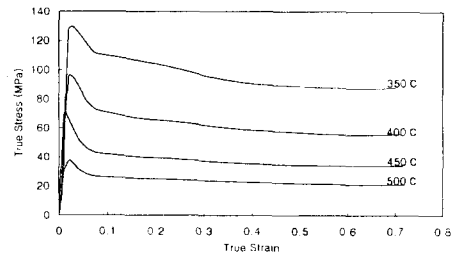


Fig. 2 Experimental stress-strain curves at various temperature

고온에서의 유동응력 상태를 표현할 때 주로 사용되는 Arrhenius식을 Zener-Hollomon 파라미터를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(4)(5)</sup>

$$\sigma = C Z^{1/n} \quad (C = const) \quad (1)$$

따라서 n값이 소재의 경화 혹은 연화속도와 관계되는 파라미터임을 알 수 있으며 변형률에 따른 n값의 변화를 Fig.3과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

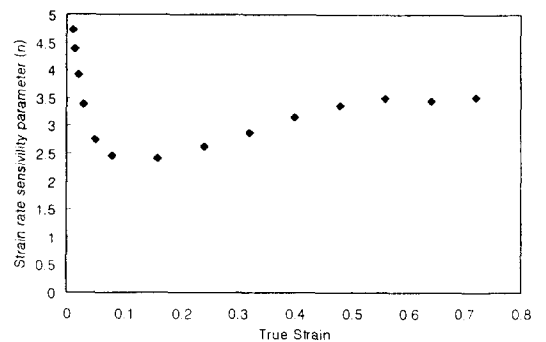


Fig. 3 Strain dependence of strain rate sensitivity(n)

## 3. 실험결과 및 고찰

여기서, 가공경화에 의해  $n$ 값이 감소하다가 그 속도가 둔화되고 동적재결정에 의해 값이 증가하는 경향을 보인 후 경화속도와 연화속도가 균형을 이루는 정상상태에 도달한다고 보면  $n$ 값이 최소값을 보일 때가 동적재결정이 시작되는 시점( $\epsilon_c$ )이라고 할 수 있다. 따라서 다음과 같이 온도에 대한 함수식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_c = 6.865 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{1951}{T}\right) \quad (2)$$

광학현미경과 이미지 분석기(Image Analyzer)를 사용하여 동적재결정분율( $X_{dyn}$ )과 재결정된 결정립 크기( $d_{dyn}$ )를 다음과 같이 수식화하였다.

$$X_{dyn} = 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_c}\right)^m\right] \quad (3)$$

$$d_{dyn}(\mu m) = 14.834 - 9.96 \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \quad (4)$$

평균 결정립 크기( $\bar{D}$ )는 원래의 결정립 크기( $D_0$ )이 재결정립의 생성으로 인해 그 크기가 감소되는 현상을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\bar{D} = D_0(1 - X_{dyn})^2 + d_{dyn} \cdot X_{dyn}^{(3/4)} \quad (5)$$

### 3.2 시뮬레이션

열간 성형가공시 열적·기계적 공정변수의 이력을 고려하기 위해 강열점소성 유한요소법과 동적 재결정기동 모델을 연계하여 해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위한 소재와 금형의 초기격자는 Fig.4에 보인 바와 같다.

유동응력식은 동적연화에 의한 응력감소를 고려하여 Fig.5와 같이 모델링하여 사용하였다.<sup>(8)</sup>

$$\Delta\sigma = (\sigma_p - \sigma_s)\left\{1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - a\epsilon_p}{\epsilon_p}\right)^m\right]\right\} \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad (7)$$

$$\sigma_e = \sigma_p[1 - \exp(-C\epsilon)]^m \quad (8)$$

위의 식에서 (7)식은 가공경화, (8)식은 동적연화에 의한 영향이 각각 고려된 식이다. 전기로에서 소재를 꺼내어 금형에 올려놓게 되면 금형과 소재 사이에서 열전달이 빠르게 진행된다. 소재온도 380℃, 금형온도 250℃의 조건에서 압축한 경

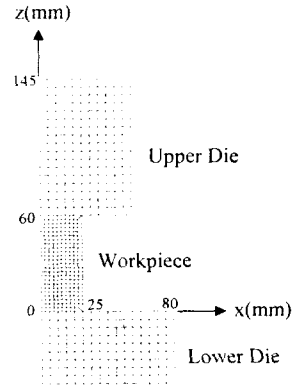


Fig. 4 Initial finite element mesh

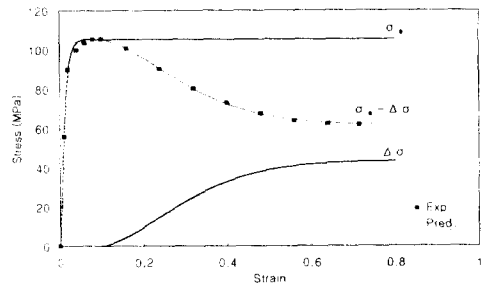


Fig. 5 Stress-strain curves predicted in accordance with the model and experimental data at 450℃ and 0.1/s

우에는 소재에서 금형으로 열전달이 빠르게 진행되어 재결정이 일어나기 위한 온도조건을 만족할 만큼 온도가 충분치 않았기에 재결정없이 한 방향으로 연신된 조직만을 볼 수 있었다. 소재온도 420℃, 금형온도 300℃의 경우에는 업세팅 실험 후 시편의 미세조직을 반경방향으로 비교해보면 중심부쪽에서 재결정이 활발하게 일어났고 이에 따라 상대적으로 미세조직의 크기가 더 작다는 것을 알 수 있었다. 성형후 미세조직사진으로 관찰한 결과와 시뮬레이션으로 얻은 변형 후 재결정분율과 입자크기분포를 반경방향으로 비교하여 Fig.6에 나타내었다. Fig.7에서도 볼 수 있듯이 성형완료후에도 재결정율이 다소 낮음으로 인해 중심부와 표면부의 평균 결정립 크기가 크게 차이나지는 않지만 동적재결정율이 높을수록 결정립 미세화의 정도가 빠르게 일어나므로 중심부의 결정립 크기가 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있으며, 중심부에서 시뮬레이션으로 예측한 값보다 실험으로 확인한 값이 다소 크게 나타나

는 점은 측정오차의 영향과 함께 입자성장파 초기 결정립 크기의 영향을 고려하지 못한 때문으로 생각된다.

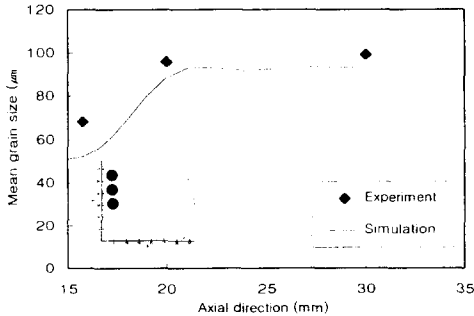


Fig. 6 Comparison of measured grain size and simulation results

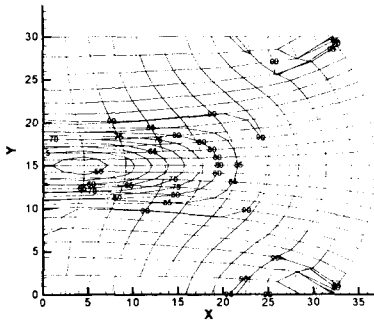


Fig. 7 Distribution of mean grain size

#### 4. 결론

Al-5wt%Mg합금의 열간압축실험을 통해서 동적재결정 거동을 모델링하고 이를 강점소성유한요소해석과 연계하여 시뮬레이션 수행 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동적재결정의 발생은 최대응력을 지나서 어느 정도의 변형에너지가 축적된 후 시작되었으며 이때의 임계변형률( $\epsilon_c$ )을 가공경화속도의 감소에 근거하여 수식으로 모델링할 수 있었다.
2. 동적재결정된 결정립의 크기 변화를 성형조건에 대해 수식으로 모델링하였다.
3. 열간 성형공정동안 재료의 미세조직변화를 예측하기 위해 강점소성 유한요소법을 이용한 미세조직 예측 프로그램을 개발하였다.

4. 개발된 프로그램의 타당성을 입증하기 위해 비등온 열간압축 실험을 수행하였으며 그 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.
5. 동적재결정된 결정립의 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률속도가 낮을수록 증가하였다.
6. 소재나 금형의 온도, 혹은 성형속도를 제어함으로써 미세조직의 변화를 조절할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 고병철, 김종현, 유연철, "AA5083합금의 고온 변형시 유동응력 및 연신율에 미치는 온도와 변형속도의 영향," 한국소성가공학회지, Vol.7, No. 2, pp. 168~176, 1998.
2. 곽우진, 이경중, 권오준, 황상무, "열간단조공정 중 강의 재결정거동 유한요소해석," 한국소성가공학회지, Vol. 5, No. 4, pp. 305~319, 1996.
3. 최민식, 강범수, 염종택, 박노광, "유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적재결정거동 예측," 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 197~206, 1998.
4. K.P.Rao, E.B.Hawbolt, "Development of Constitutive Relationships Using Compression Testing of a Medium Carbon Steel," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.114, pp. 116~123, 1992.
5. 조상현, 김유승, 유연철, 임성한, 오수익, "Al 6061합금의 고온변형시 변형저항 예측," 대한금속학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 502~508, 1998.
6. F.R.Castro-Fernandez, C.M.Sellers, J.A. Whiteman, "Changes of flow stress and microstructure during hot deformation of Al-1Mg-1Mn," Materials Science and Technology, Vol.6, pp. 453~460, 1990.
7. C.A.Hernandez, S.F.Medina, J.Ruiz, "Modeling Austenite Flow Curves In Low Alloy and Microalloyed Steels," Acta mater, Vol. 44, No. 1, pp. 155~163, 1996.
8. John H. Beynon and C. Michael Sellers, "Modeling Microstructures and Its Effects during Multipass Hot Rolling," ISIJ International, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367, 1992.