

유한요소법을 이용한 Al-5wt%Mg합금의 미세조직 크기 예측

황원주* · 조종래** · 배원병***

(1999년 8월 25일 접수)

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

Won-Joo Hwang, Jong-Rae Cho and Won-Byong Bae

Abstract

A finite element analysis is performed to predict the recrystallized volume fraction and the mean grain size in hot compression of Al-5%Mg alloy. In the analysis, a modeling equation of flow stress is assumed as a function of strain, strain rate, and temperature. And the influence of above variables on flow stress is quantified by using Zener-Hollomon parameter. In the modeling equation, effects of strain hardening and dynamic recrystallization on microstructure of Al-5%Mg alloy are investigated. The predicted results of recrystallized volume fraction and mean grain size are in good agreement with those of microstructures obtained from hot compression tests.

Key Words : Al-Mg Alloy, Zener-Hollomon Parameter, Recrystallization, Grain Size

1. 서 론

지금까지 많은 연구자들이 고온변형시 소재의 변형거동을 연구하고 미세조직의 회복과 재결정, 결정립 성장을 표현하는 수학적 형태의 금속학적 모델을 개발하였다. 또한 고온변형시의 유동응력을 예측하기 위한 기법이 제안되었으며 유한요소모델과 금속학 모델을 결합하여 미세조직의 변화를 예측하는 시뮬레이션을 수행하기도 하였다.⁽¹⁻²⁾ 특히 철강산업쪽에서는 공정조건의 최적화에 수학적 모델을 이용하여 미세조직구조를 예측하는 기법이 정착단계에 와 있다.⁽³⁾ 그러나 Al합금의 경우는 아직 개발의 초기단계에 있으며, 주 연화현상이 합금원소의 첨가량에 따라 동적회복(dynamic recovery, DRV)과 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)으로 나누어지기 때문에 연구에 많은 어려움을 겪어왔다. 따라서 고온변형특

성에 대한 연구⁽⁴⁻⁵⁾는 많이 발표되었으나, 열간변형시 재료의 미세조직의 변화에 대한 일반적인 모델식은 명확히 확립되지 않았고, 실제 실험한 결과와 모델식을 이용한 시뮬레이션 수행결과를 비교한 예는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 논문에서는 질량비 5%의 Mg이 첨가된 Al합금의 고온변형거동을 파악하고 변형조건에 따른 변형저항을 표현하는 유동응력식⁽⁶⁾을 사용하여 고온변형시 소재내부 미세조직의 변화를 예측할 수 있는 수학적모델을 제시하고 그 타당성을 검증하는 것을 목적으로 실험과 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 기초실험

실험에 사용된 소재는 Fig. 1과 같이 구조후 440℃에서

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 해양대학교 공과대학 기계시스템공학부
*** 부산대학교 공과대학 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.

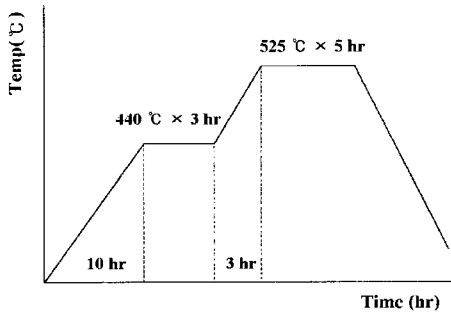


Fig. 1 Diagram of normalizing treatment

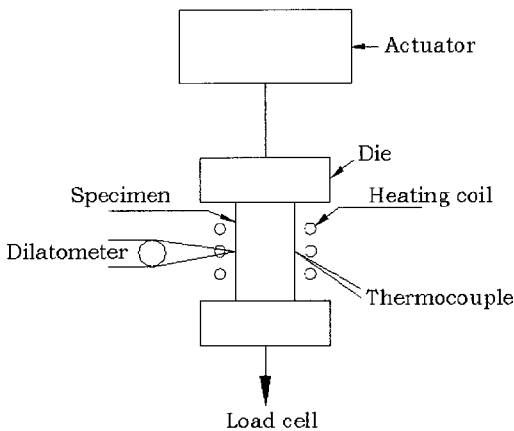


Fig. 2 Testing equipment

3시간, 525°C에서 5시간 균질화 처리하여 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편으로 가공하였다. 시편의 화학성분은 Table 1과 같다.

Fig. 2에 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 변형률속도로 높이감소를 50%까지 압축하였다.

압축완료 후 시편내부의 동적재결정립을 관찰하기 위해 질소가스를 사용하여 급냉하였다.

2.2 업세팅 실험

기초실험에서 구한 모델식을 사용하여 시뮬레이션한 결과와 실험결과를 비교하기 위해 직경 50mm, 높이 60mm의 소재로 200t 유압프레스를 사용하여 높이 감소를 50%까지 비등은 압축실험을 수행하였다. 전기로를 이용하여 소재 초기온도를 380°C, 420°C, 460°C로 설정하고 금형은 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 금형의 온도는 열전대를 점용접(spot welding)하여 시간의 변화에 따른 온도변화를 조사하였다. 소재는 0.6mm/sec의 다이속도로 높이감소를 50%까지 압축한 후 물에 급랭하여 내부의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동적재결정 거동 모델링

Fig. 3의 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(ϵ_p)값 근처에서 동적재결정이 시작된다고 단정짓기란 곤란하였으며 다른 방법을 모색할 필요가 있었다.

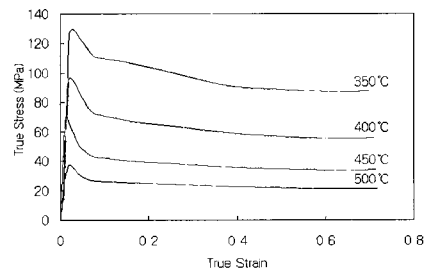


Fig. 3 Experimental stress-strain curves at various temperatures

아래의 Arrhenius식은 고온에서 변형률속도($\dot{\epsilon}$), 유동 응력(σ), 온도(T)의 상관관계를 표현할 때 자주 사용되는 식이다.⁽⁵⁾

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

위의 식을 Zener-Hollomon 파라미터를 이용하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 활성화에너지 Q 값과 Zener-Hollomon 파라미터 값을 구하는 과정은 이전의 연구⁽⁶⁾에서 사용한 방법을 적용하였다.

$$\sigma = CZ^{1/n} \quad (2)$$

여기서, C 는 상수이고, n 값이 소재의 경화 혹은 연화속도와 관계되는 파라미터임을 알 수 있으며 변형률에 따른 n 값의 변화를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

Fig. 4에서 보면 변형의 증가에 따라 n 값이 급격히 감소하다가 동적재결정에 의해 값이 증가하는 경향을 보인 후 경화속도와 연화속도가 균형을 이루는 정상상태에 도달한다. 그러므로 n 값이 최소일 때가 동적재결정이 시작되는 시점이라고 할 수 있고, 그때의 변형률은 다음과 같이 온도에 대한 함수식으로 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

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

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

$$X_{dyn} = 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_c}\right)^{m'}\right] \quad (4)$$

$$\text{단, } k = 8 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-4} \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \quad (5)$$

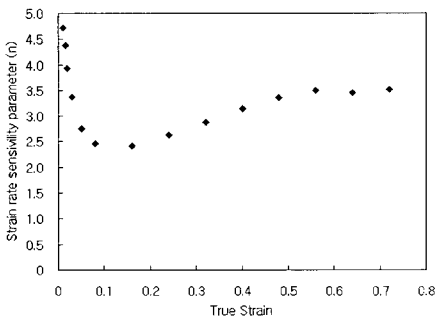


Fig. 4 Strain dependence of strain rate sensitivity (n)

$$m' = 3.3123 - 0.0792 \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \quad (6)$$

$$d_{dyn}(\mu m) = 14.834 - 9.96 \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \quad (7)$$

평균 결정립 크기(\bar{D})는 원래의 결정립 크기(D_0)가 재결정립의 생성으로 인해 그 크기가 감소되는 현상을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$\bar{D} = D_0(1 - X_{dyn})^2 + d_{dyn} \cdot X_{dyn}^{(3/4)} \quad (8)$$

3.2 시뮬레이션

열간 성형시 열적·기계적 공정변수의 이력을 고려하기 위해 강열점소성 유한요소법과 동적 재결정거동 모델을 연계하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 초기입력값은 Table 2에 나타내었으며 유한요소해석을 위한 소재와 금형의 초기격자는 Fig. 5에 보인 바와 같으며 해석에 사용한 다이와 금형의 마찰조건은 $f=mk$ (단, $m=0.6$)이다.

축대칭 형상이므로 1/2단면만을 해석하였으며, 소재의 요소 수는 238개, 상·하부 금형의 요소 수는 각각 187개, 160개로 초기격자를 구성하였다. 시뮬레이션에서 사용한 유동응력식은 동적연화에 의한 응력감소를 고려하여 Fig. 6과 같이 모델링하여 사용하였다.⁽⁹⁾

$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad (9)$$

Table 2 The condition of process parameters for FE-simulation

Process parameter	Value
Friction coefficient	0.6
Thermal conductivity of w.p.	146.24 N/(s · k)
Thermal conductivity of dies	28.4 N/(s · k)
Heat capacity of w.p.	2.4345 N/(mm ² · k)
Heat capacity of dies	4.0 N/(mm ² · k)
Heat transfer coef. (between w.p. and dies)	0.7 N/(s · mm · k)
Convective heat transfer coef.	0.0029 N/(s · mm · k)
Emissivity	0.15

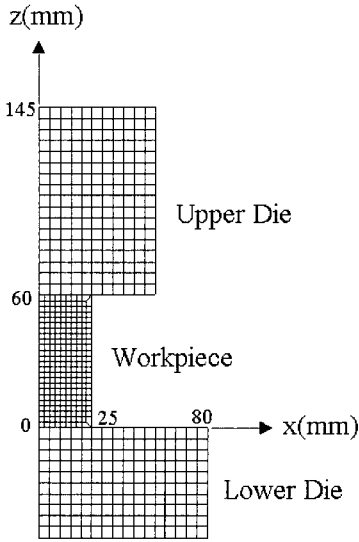


Fig. 5 Initial finite element mesh

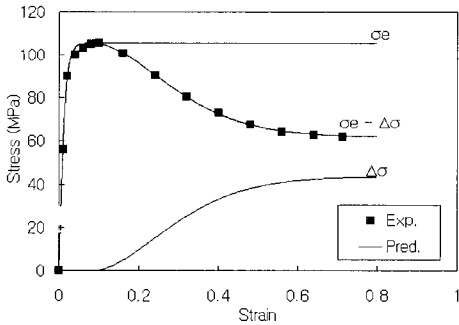


Fig. 6 Stress-strain curves predicted in accordance with the model and experimental data at 450 °C and 0.1/s

$$\sigma_e = \sigma_p [1 - \exp(-C\varepsilon)]^m \quad (10)$$

$$\Delta\sigma = (\sigma_p - \sigma_s) \left\{ 1 - \exp\left[-k \left(\frac{\varepsilon - \alpha\varepsilon_p}{\varepsilon_n}\right)^{m'}\right] \right\} \quad (11)$$

여기서, $\sigma_p = 17.75 \ln(Z/A) + 80.189$ (12)

$$C = 245.15(Z/A)^{-0.0491} \quad (13)$$

$$m = 4.263(Z/A)^{0.2882} \quad (14)$$

$$\sigma_s = 42.906(Z/A)^{0.2898} \quad (15)$$

$$k = 0.3081(Z/A)^{-0.1873} \quad (16)$$

$$m' = 0.6789(Z/A)^{0.0972} \quad (17)$$

$$\varepsilon_p = 0.0178(Z/A)^{0.1094} \quad (18)$$

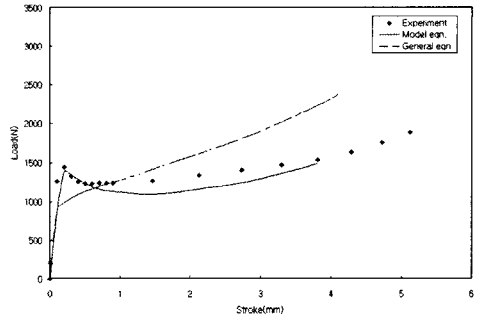


Fig. 7 Comparison of load between theory and experiment

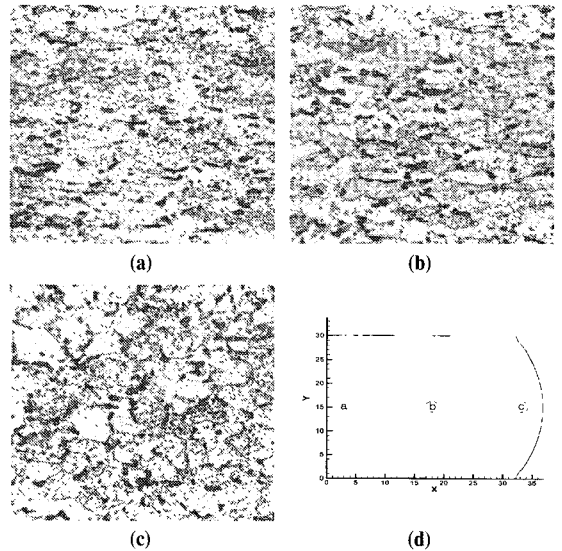


Fig. 8 Microstructures of 50% compressed specimens

위의 식에서 (9)식은 가공경화, (11)식은 동적연화에 의한 영향이 각각 고려된 식이다.

이와 같이 모델링된 유동응력식은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 하중의 예측에 있어서 최대응력값을 이용하여 구한 유동응력식보다 실험치에 더 근접한 결과를 얻을 수 있다.

성형중 동적재결정 거동이 부분적으로 일어나는 경우, 재결정이 일어난 영역 (X_{dyn})과 일어나지 않는 영역 ($1 - X_{dyn}$)으로 각각 구분한다. X_{dyn} 의 경우에는 변형률회복만이 발생하므로 스텝의 시간증분 후 증분변형률만을 고려하고, $(1 - X_{dyn})$ 의 경우에는 현재의 변형률에 증분변형률을 더하는 방법을 사용하였다. 다시 재결정이 일어날 경우 작은영역으로 나누어 X_{dyn} 영역과 $1 - X_{dyn}$ 영역에서 각각 체적분율과 증분변형률을 감안하여 평균 변형률을 계

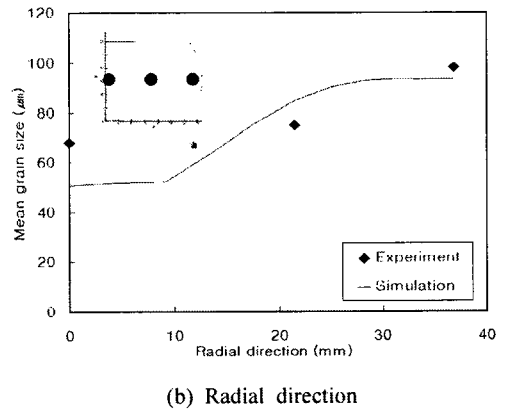
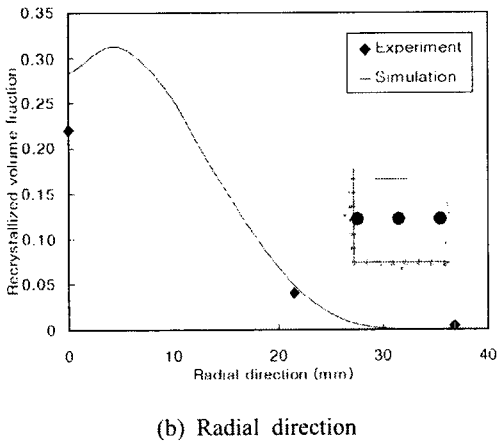
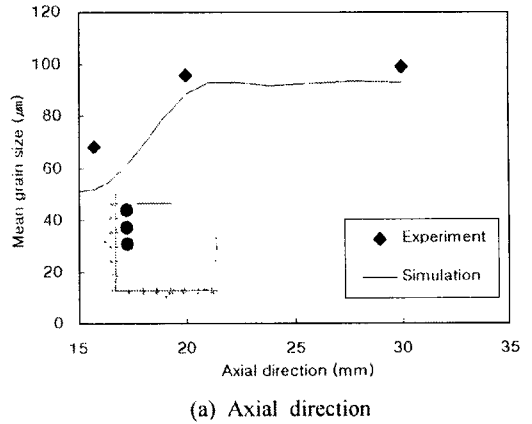
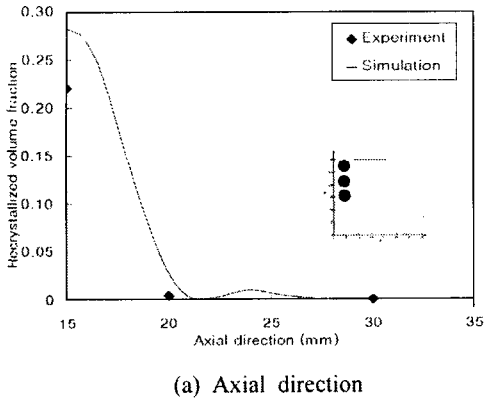


Fig. 9 Comparison of measured recrystallized volume fraction and simulation results

Fig. 10 Comparison of measured grain size and simulation results

산하고, 이 값을 다음 스텝의 초기 변형률로 사용하였다.

소재온도를 465℃, 금형온도를 420℃로 하여 실험한 소재의 미세조직 사진을 Fig. 8에 나타내었다. 반경방향으로 비교해보면 중심부쪽에서 재결정이 활발하게 일어났고 이에 따라 상대적으로 미세조직의 크기가 더 작다는 것을 알 수 있다.

성형후 시편내부에서 반경방향, 축방향으로 각 3개의 지점에서 실제로 측정된 값과 시뮬레이션으로 얻은 값들을 비교하여 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11에서도 볼 수 있듯이 성형완료 후에도 재결정분율이 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 있다. 중심부에서 시뮬레이션으로 예측한 값보다 실험으로 확인한 값이 다소 크게 차이

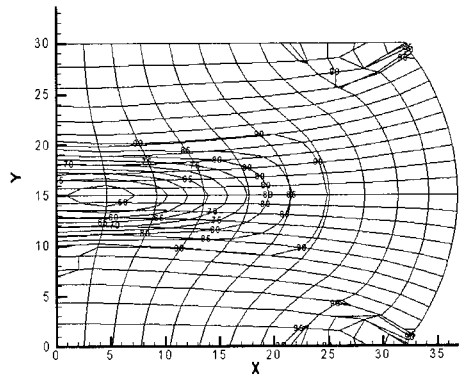


Fig. 11 Distribution of mean grain size

가 나는 것은 측정오차의 영향과 함께 입자성장과 초기 결정립 크기의 영향을 고려하지 못한 때문으로 생각된다.⁽¹⁰⁾

4. 결 론

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 시작되며 이때의 임계변형률을 가공경화속도의 감소에 근거하여 수식으로 모델링할 수 있었다.

(2) 열간 성형공정동안 재료의 미세조직변화를 예측하기 위해 강점소성 유한요소법을 이용한 미세조직 예측 프로그램을 개발하였다.

(3) 개발된 프로그램의 타당성을 입증하기 위해 비등온 열간압축 실험을 수행하였으며 그 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

(4) 동적재결정된 결정립의 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률속도가 낮을수록 증가하였다.

(5) 소재나 금형의 온도, 혹은 성형속도를 제어함으로써 미세조직의 변화를 조절할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) 곽우진, 이경중, 권오준, 황상무, 1996, "열간단조 공정중 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, Vol. 5, No. 4, pp. 305~319.
 (2) 최민식, 강범수, 염종택, 박노광, 1998, "유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적재결정거동 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 197~206.

(3) Hans Erik Vante and Erik Nes, 1996, "A model for recrystallization kinetics, texture and grain size applied to multipass hot rolling of an AlMgMn aluminum alloy", Materials Science, Vol. 7, pp. 5~10.
 (4) 고병철, 김종현, 유연철, 1998, "AA5083합금의 고온 변형시 유동응력 및 연신율에 미치는 온도와 변형속도의 영향", 한국소성가공학회지, Vol.7, No. 2, pp. 168~176.
 (5) 조상현, 김유승, 유연철, 임성환, 오수익, 1998, "Al6061합금의 고온변형시 변형저항 예측", 대한금속학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 502~508, .
 (6) 황원주, 조종래, 배원병, 강석봉, 1999, "Al-5wt%Mg 합금의 고온변형특성과 동적재결정 거동에 관한 연구", 한국정밀공학학회지, Vol. 16, No. 6, pp. 183~189.
 (7) F.R.Castro-Fernandez, C.M.Sellars, J.A. Whiteman, 1990, "Changes of flow stress and microstructure during hot deformation of Al-1Mg-1Mn", Matreials Science and Technology, Vol.6, pp. 453~460.
 (8) C.A.Hernandez, S.F.Medina, J.Ruiz, 1996, "Modeling Austenite Flow Curves In Low Alloy and Microalloyed Steels", Acta mater, Vol. 44, No. 1, pp. 155~163.
 (9) John H. Beynon and C. Michael Sellars, 1992, "Modeling Microstructures and Its Effects during Multipass Hot Rolling", ISIJ International, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
 (10) J.P.Sah, G.J.Richardson and C.M.Sellars, 1974, "Grain Size Effects during Dynamic Recrystallization of Nickel", Metal Science, Vol. 8, pp. 325~331.