

## 금형강의 동적 및 정적 재결정 거동과 미세조직 변화 예측에 관한 연구

정호승\* · 조종래\*\* · 차도진\*\*\* · 배원병\*\*\*\*

(2001년 4월 2일 접수)

### A Study on Dynamic and Static Recrystallization Behaviors and Microstructure Evolution Prediction of a Die Steel

H. S. Jeong, J. R. Cho, D. J. Cha and Y. B. Bae

#### Abstract

Evaluation of microstructural changes is important for process control during open die forging of heavy ingots. The control of forging parameters, such as shape of the dies, reduction, temperature and sequence of passes, is to maximize the forging effects and to minimize inhomogeneities of mechanical properties. The hot working die steel is produced by using the multistage open die forging. The structure is altered during forging by subsequent processes of plastic deformation, recrystallization and grain growth. A numerical analysis using an rigid visco-plastic finite element model was performed to predict microstructural evolution of hot working die steel.

**Key Words :** Dyanmic Recrystallization, Static Recrystallization, Grain Growth, Mean Grain Size, Finite Element Method, Softening, Microstructural Evolution

#### 1. 서 론

대형 기계 제품의 소재로 사용되는 금형강은 주조(casting)에 의해 제조된 대형 강괴(ingot)를 자유 단조(open die forging) 작업을 통해서 만들어진다. 열간 가공에서는 변형률 속도( $\dot{\epsilon}$ ), 온도(T), 변형률( $\epsilon$ )에 의해 변형하는 동안 가공경화, 동적 회복, 동적 재결정이 일어

나고, 각각의 초기 변형량과 단조 공정간의 소요시간과 온도 변화에 의해 정적, 준동적 재결정, 입자 성장이 일어난다. 그러나 공정 변수들이 적절히 사용되지 못하면 조직이 불균일하게 되므로 이러한 공정 변수들의 최적 제어에 의해 균질하고 미세한 조직(structure)을 얻으며 기계적 특성을 향상시키고 공정 시간을 단축시킬 수 있다.

\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부

\*\*\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부

Table 1 Chemical composition of die steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
Composition(wt%)	0.36	0.26	1.10	0.006	0.003	0.07	1.21	0.26	0.027	0.025

대형 강괴를 열간 가공으로 자유 단조 하는 동안 금속 내 미세 조직 변화가 공정에 따라서 다양하게 발생하며 이러한 현상 때문에 공정 제어가 중요시된다.

미세 조직을 연구함에 있어서 실험적인 방법은 시간과 비용, 노력이 많이 소요된다. 이러한 방법을 개선하기 위해 기초 실험과 해석적인 방법을 병행하여 미세 조직을 예측하고, 업세팅(upsetting)으로 실험된 시편과 해석적인 방법으로 예측된 결과를 비교하여 타당성을 검증하고 해석 결과의 문제점을 개선하여 공정 변수의 최적화를 가능하게 할 것이다.

미세 조직 변화를 예측 및 제어에 의해 기계적 특성을 향상시키려는 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다. 지금까지 많은 연구자들이 고온 변형시 여러 소재들의 변형거동을 연구하였고 미세 조직의 정적 재결정, 동적 재결정, 입자 성장을 수학적 모델링을 하였으며,<sup>(1~6)</sup> 또한 고온 변형시 여러 변수를 이용하여 유동응력을 예측하기 위한 기법이 제안되었으며 수학적 모델링을 수치 해석적 방법인 유한요소법을 적용하여 미세 조직의 변화, 즉 재결정 입자 크기, 재결정 분율, 입자 성장, 평균 입자 크기와 유동 응력 등을 예측하는 시뮬레이션을 수행하기도 하였다.<sup>(7~8)</sup>

C-Mn 강에 대한 고온 변형시 미세조직에 대한 연구는<sup>(2~7)</sup> 많이 발표되었으나 금형강의 고온 변형시 미세조직 변화에 대한 일반적인 모델식 제시는 없으며 2단 변형시 공정변수들의 변화에 대한 영향을 연화비율(fractional softening)로써 비교 및 동적, 정적 재결정과 입자 성장을 모두 고려하여 실제 실험한 결과와 모델식을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교한 예는 찾아보기 힘든 실정이다.

본 논문은 기초실험으로부터 동적 재결정 입자크기, 재결정 분율, 고온 유동응력식을 유도하고, 정적 및 준동적재결정 완료 후 입자성장을 수학적 모델식을 유도하며, 공정 변수에 따른 연화 현상을 연화 비율로써 비교하였다.

기초 실험에 의해 금형강 내부의 미세 조직의 변화를 예측할 수 있는 수학적 모델식을 제시하고 이것을 수치 해석적 방법인 강소성 유한요소법에 적용하여 금형강의 미세 조직과 기계적 특성을 예측하고 그 타당성을 검증]

하는 것을 목적으로 실험과 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 금형강의 성분은 Table 1에 나타내었고 시편은 직경 8mm, 높이 12mm인 원통형이다.

### 2.1 동적 재결정 실험

Fig. 1과 같은 방법으로 5°C/sec의 속도로 목표온도까지 상승시키고 3분간 유지시킨 후 0.01/s, 0.1/s, 1.0/s의 변형률 속도와 950°C, 1050°C, 1150°C의 목표온도와 35%, 50%의 압축에 의한 실험 조건에 따라 등온 압축을 실행하고 압축 완료 후 동적 재결정 상태를 유지하기 위해서 질소 가스로 금냉을 하였다.

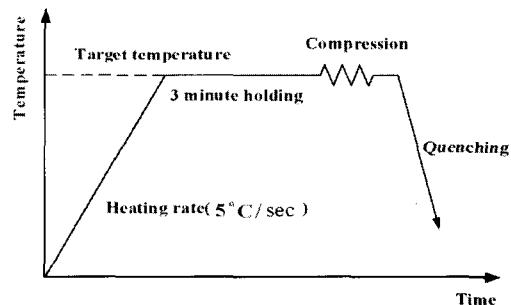


Fig. 1 Experimental method of single compression

### 2.2 입자 성장 실험

0.01/s, 1.0/s의 변형률 속도와 950°C, 1150°C의 목표온도와 10%, 20%, 30%의 압축에 의한 실험 조건에 따라 등온압축을 실행하고 압축 완료 후 하중을 제거하고, 입자 성장에 따른 입자 크기의 변화를 관찰하기 위해 변형률 속도 0.01/s에서는 5sec, 10sec, 100sec, 600sec와 변형률 속도 1.0/s에서는 5sec, 20sec, 100sec, 600sec 동안 목표온도로 등온유지 한 후 질소 가스로 금냉을 하였다.

### 2.3 연화 실험

Fig. 2와 같은 방법으로 0.01/s, 0.1/s의 변형률 속도와 950°C, 1150°C의 목표온도와 10%, 20%의 압축조건에 의

해 등온 압축을 실행하고 압축 완료 후 하중을 제거하고, 정적, 준동적 변화를 발생시키기 위해 변형률 속도 0.01/s에서는 5sec, 10sec, 100sec, 600sec와 변형률 속도 0.1/s에서는 5sec, 20sec, 100sec, 600sec동안 각각의 온도로 등온 유지시킨 후 다시 50%까지 압축한 후 질소 가스로 급냉을 하였다.

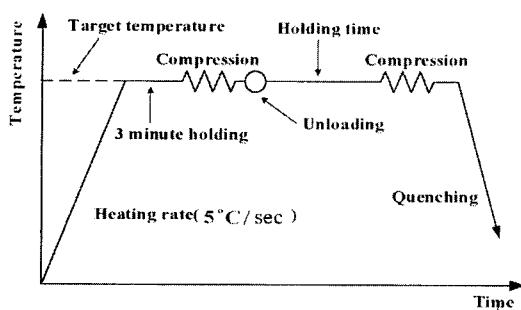


Fig. 2 Experimental method of double compressions

#### 2.4 등속 압축 실험

기초 실험에서 구한 수학적 모델식을 이용하여 시뮬레이션한 결과와 등속 압축 실험 결과를 비교하기 위해서 등속 압축 실험을 수행하였다.

실험 방법은 Fig. 2와 같이 기초 실험과 동일하며 실험 조건은 950°C, 1150°C의 목표온도와 1mm/s의 등속으로 16.7% 등온압축을 실행하고, 하중을 제거한 다음 각각 100sec, 600sec의 유지 시간동안 유지한 후 다시 20% 등온 압축을 실행한 후 급냉하였다.

등속 압축 실험으로 다양한 변형률 속도와 변형률에서 동적 재결정을 시편에 발생시키며, 초기 변형 후 유지시간 동안 유지하는 것은 정적, 준동적 변화와 입자 성장을 발생시키기 위함이며, 다시 등온 압축을 실행한 후 급냉하는 것은 입자 성장 후 다시 동적 재결정을 발생시켜서 기초 실험 범위 내에서의 온도, 변형률 속도, 변형률에서 평균 입자 크기 및 하중을 시뮬레이션에서의 결과와 비교하기 위함이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 고온 유동 곡선

고온 유동 곡선에서 공정변수인 변형률, 온도, 변형률 속도, 활성화에너지로 표현하며, 활성화에너지는 Zener-Hollomon 파라미터와 Arrhenius 형태인 하이퍼볼릭 사인 법칙의 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp(Q/RT) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

여기서, Z은 Zener와 Hollomon에 의해 처음 제시되었으며<sup>(5)</sup>, 유동응력을 하나의 식으로 표현하는데 매우 유용한 식이며, Q는 열간 변형동안의 활성화에너지(activation energy, J/mol)이며, T는 절대 온도(K), R은 가스상수(gas constant, 8.314 J/mol · K)이다.

식 (1)과 (2)에 의해 식 (3)과 같이 표현하고, 실험 조건에 의한 유동 응력 곡선에서 임의의 변형률에서의 응력을 식 (4)에 대입하여 기울기인 변형률 속도 민감도 n값을 계산할 수 있다.

$$\ln \dot{\varepsilon} = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] + C \quad (4)$$

Fig. 3에서는 응력과 변형률 속도에 대한 각각의 온도로부터 기울기인 n값을 구한 후 평균값으로 나타내었고, 각각의 기울기가 실험 온도 조건 범위 안에서는 일정함을 나타내고 있다. Fig. 4는 변형량에 따른 평균 기울기 n값을 도시하였으며 어느 변형률 이후부터는 일정한 n=4.05를 나타내었다.

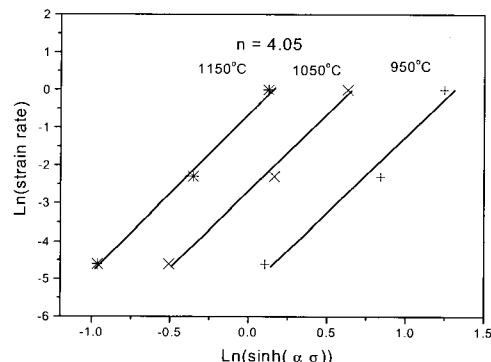


Fig. 3 Stress vs Strain rate at various temperature by hyperbolic law

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{Q}{nRT} + C \quad (5)$$

식 (3)에 ln를 취하면 식 (5)로 얻어져 앞에서 구한  $\alpha$ , n, R을 식에 대입하면 각각의 변형률 속도에서 온도에 대한 기울기로부터 활성화 에너지 Q를 구할 수 있다.

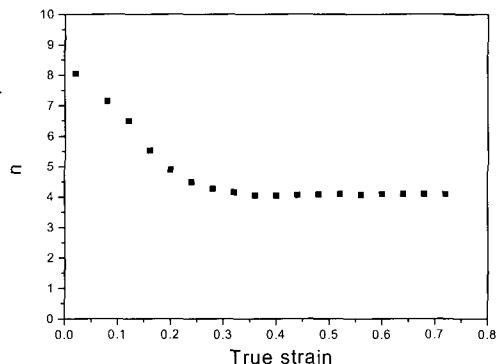


Fig. 4 Strain dependence of strain rate sensibility( $n$ )

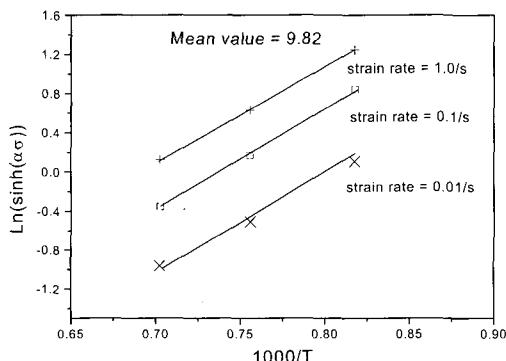


Fig. 5  $\sinh(\alpha\sigma)$  vs temperature at various strain rate

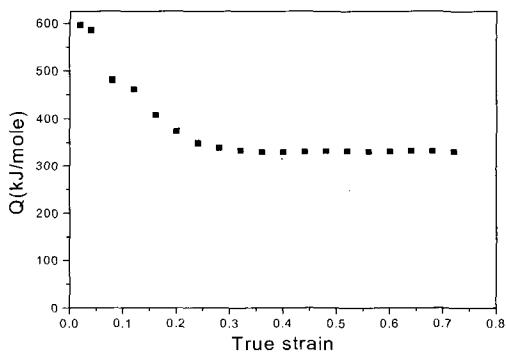


Fig. 6 Strain dependence of activation energy( $Q$ )

Fig. 6을 보면 어느 변형률 이후부터 즉, 동적 재결정이 일어날때의 활성화 에너지 값은 일정한 상태의 값을 나타내며, 이 때의 활성화 에너지 값은  $Q=330.4(\text{kJ/mol})$ 이다. 그리고, 이미 구한 값을 식 (2)에 대입하여 A값을 구할 수 있고, A값은  $6.956 \times 10^{11}$ 이다.

열간 변형시 발생하는 가공경화와 회복, 동적 재결정의

현상을 고려하여 유동 응력 곡선을 식 (6)과 같이 모델링하였다.<sup>(5)</sup>

$$\sigma = \sigma_p [1 - \exp(-C\varepsilon)]^m$$

$$- (\sigma_p - \sigma_s) [1 - \exp(-k(\frac{\varepsilon - \alpha\varepsilon_p}{\varepsilon_p})^{m'})] \quad (6)$$

$$C = 15.83 \varepsilon^{-0.2248} \exp(-0.0277Q/RT)$$

$$m = 0.478 \varepsilon^{-0.0449} \exp(-0.00871Q/RT)$$

$$k = 0.93 + 0.136(Z/A)$$

$$m' = 0.202 \varepsilon^{0.174} \exp(-0.0955Q/RT)$$

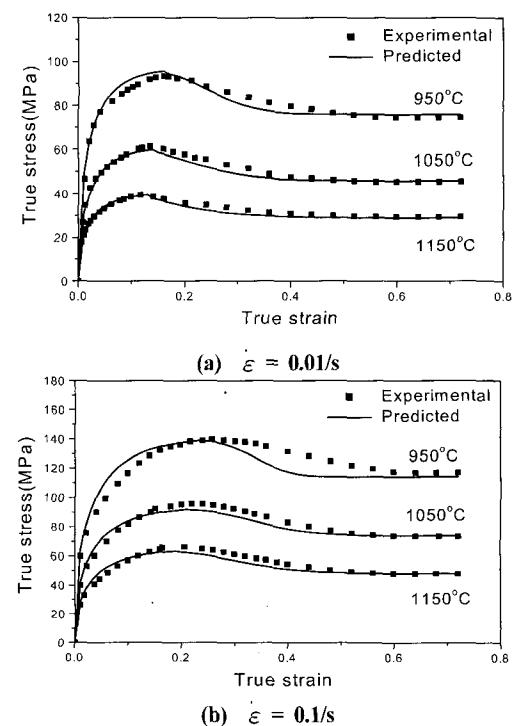
$$\varepsilon_p = 0.07 \varepsilon^{0.176} \exp(-0.0513Q/RT)$$

$$\sigma_p = 0.66 \varepsilon^{0.37} \exp(-5.62\varepsilon_p) \exp(0.234Q/RT)$$

$$\sigma_s = 67.3 + 13.35 \ln(Z/A) + 0.92(\ln(Z/A))^2$$

모델링된 하나의 고온 유동 곡선과 실제 실험에서 구한 데이터를 비교하여 Fig. 7에 도시하였으며, 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

실험에 의해 동적 재결정 분율( $X_{dyn}$ )과 동적 재결정 크기( $d_{rex}$ )를 미세조직 관찰하여 식을 구하였다. Fig. 8은 동적 재결정 실험에서의 미세조직 사진이다.



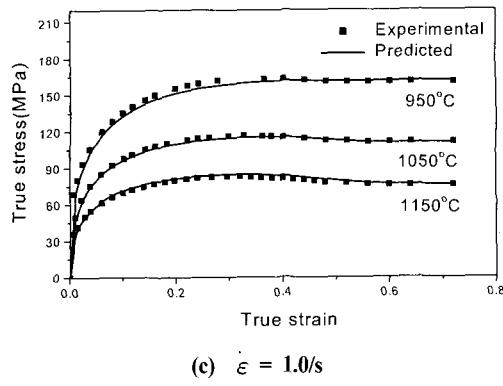


Fig. 7 Flow curves, experimental and predicted in various strain rate

$$X_{dyn} = [1 - \exp(-k(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c})^{m'})] \quad (7)$$

$$k = 0.654 + 0.146 \log(Z/A)$$

$$m' = 1.4737 - 0.1107 \log(Z/A)$$

$$\varepsilon_c = 0.8\varepsilon_p$$

$$d_{rex} = 1.2 \times 10^4 Z^{-0.21} \quad (8)$$

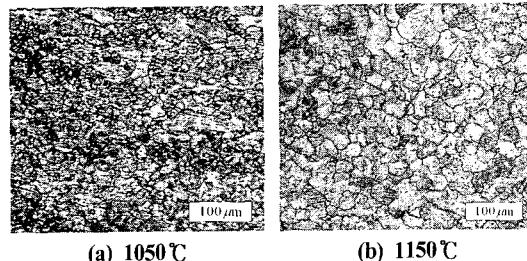


Fig. 8 Microstructure of 50% compressed at  $\varepsilon=1.0/s$

### 3.2 정적 및 준동적 재결정

Sellars<sup>(2)</sup>는 C-Mn 강에 있어서 정적 재결정 분율을 아래와 같이 표현하였고, 동적 재결정이 끝난 후 유지 시간동안 정적 및 준동적 재결정이 발생하며, 이것을 표현하기 위해서식 (9)를 시뮬레이션에 적용하였다.

$$X = 1 - \exp[-\ln 2(\frac{t}{t_{0.5}})^2] \quad (9)$$

$$t_{0.5} = 2.5 \cdot 10^{-19} d_{ini}^2 \varepsilon^{-4} \exp(300000/RT), \\ (\varepsilon \leq 0.8\varepsilon_p)$$

$$t_{0.5} = 1.06 \cdot 10^{-5} Z^{-0.6} \exp(300000/RT), \\ (\varepsilon \geq 0.8\varepsilon_p)$$

X는 정적 재결정 분율을 나타내고,  $t_{0.5}$ 는 50% 재결정이 일어나는데 걸리는 시간이다.

### 3.3 입자 성장

고온변형 후 잔류 변형률에 의해서 정적 및 준동적 재결정이 발생하고 완료 후 입자가 성장한다. 입자 성장은 식 (10)과 같이 유도하였고 Fig. 9은 입자 성장식과 실험에서 구한 데이터를 비교하여 도시하였다. Fig. 10은 입자 성장 실험의 미세조직 사진이다.

$$\bar{D}^3 = D_o^3 + 1.8 \cdot 10^{16} t \exp(-Q/RT) \quad (10)$$

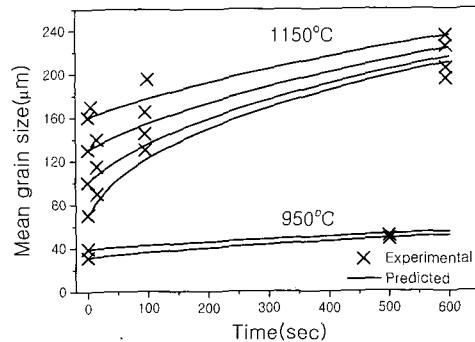


Fig. 9 Grain growth curve, experimental and predicted for 950°C, 1150°C

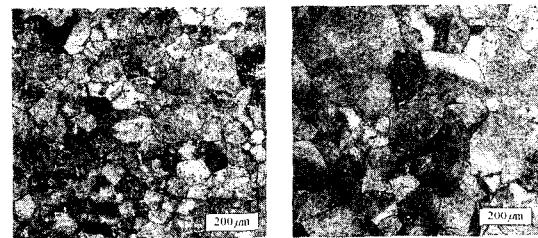


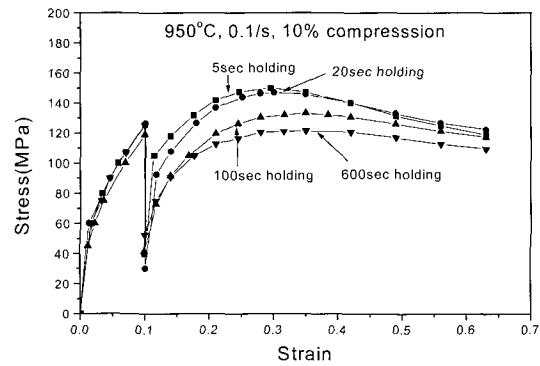
Fig. 10 Microstructure of 20% compressed at 1150°C,  $\varepsilon = 1.0/s$

### 3.4 연화 현상

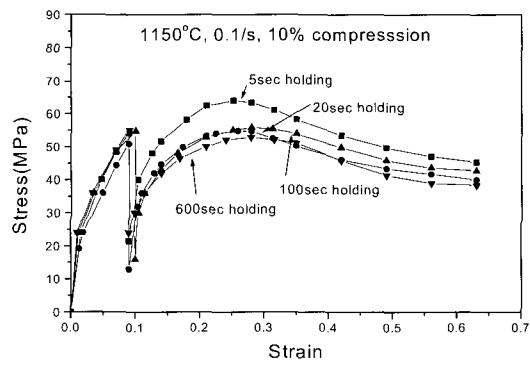
2단 압축실험에서 얻은 유동곡선으로 공정 변수인 온도, 변형률 속도, 변형률, 유지시간에 따른 응력 감소 현상을 연화 비율로 고찰하였다.

$$FS = \frac{\sigma_m - \sigma_{y2}}{\sigma_m - \sigma_{yl}} \quad (11)$$

여기서,  $\sigma_m$ 은 첫 번째 패스변형 직후의 응력값이고,  $\sigma_{y1}$ 과  $\sigma_{y2}$ 는 각각 첫 번째 변형에서의 항복 응력과 두 번째 변형에서의 항복 응력값이다.

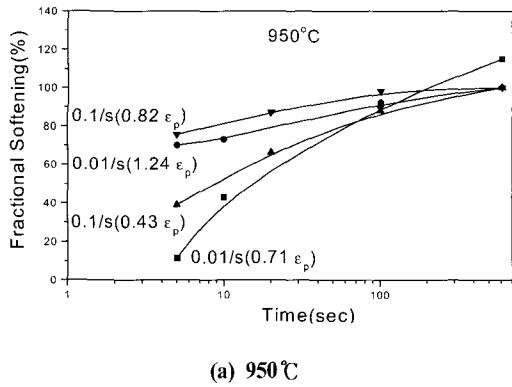


(a) 950°C

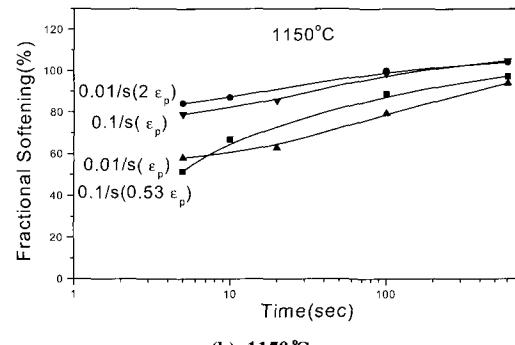


(b) 1150°C

Fig. 11 Flow curves obtained from interrupted compression test



(a) 950°C



(b) 1150°C

Fig. 12 Strain effect on the rate of softening

Fig. 11은 실험에서 얻은 유동곡선으로써 (a)에서는 시간이 많이 지나서 응력 감소가 발생하였고 (b)에서는 950 °C에서보다 응력 감소가 빨리 발생함을 알 수 있었다. 이것은 온도가 높을수록 연화가 빨리 진행됨을 알 수 있었다. Fig. 12에서는 각각의 온도에서 변형이 많을수록 연화 비율이 높음을 알 수 있다.

### 3.5 시뮬레이션

수치 해석적인 방법으로 미세조직 예측을 위해 식 (12)를 적용한 강소성 유한요소법을 이용하였고, Fig. 13은 축대칭 해석을 위한 초기 유한요소 형상이며 마찰 계수는 0.6을 사용하였다.

$$\int_v \bar{\sigma} \delta \bar{e} dV + K \int_v \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (12)$$

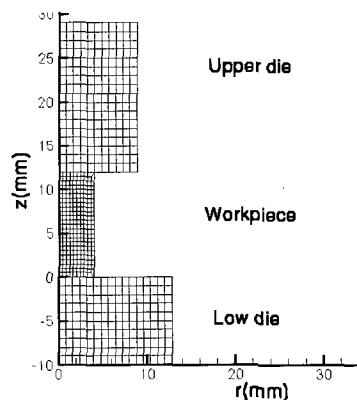


Fig. 13 Initial finite element mesh for the simulation

하나의 요소에 대해서 재결정이 일어나는 부분을 부영역( $X_j$ )으로 하면 다음 스텝에서의 동적 재결정 분율은

$X_i = (1 - X_j) \times X_{dyn}$ 으로 재정의한다. 각 스텝에서의 분율은 ( $X_j = \sum X_i$ ) 영역과  $(1 - \sum X_i)$  영역으로 나누고 다시 변형률을 계산한다.

실험은 16.7% 압축 후 유지시간동안 유지 후 다시 20% 압축을 하였고, 조직사진은 Fig. 14와 3에 나타내었다. 중심부분에서는 재결정이 많이 관찰되었으며, 중심에서 반경방향과 축방향의 바깥으로 갈수록 재결정이 적게 나타났다. 축방향의 바깥부분은 다이아의 마찰에 의해 변형이 많이 되지 않았고, 그 밑부분에서는 입자 성장만이 보였으며, 반경 방향의 바깥부분에서는 변형이 적어 재결정이 적게 발생하였다.

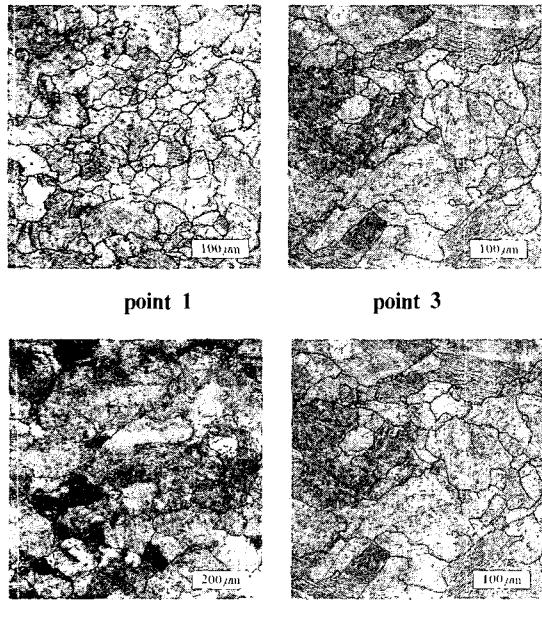


Fig. 14 Microstructure of interrupted double compression at  $v=1\text{mm/s}$ ,  $1150^\circ\text{C}$  and  $100\text{s}$  holding

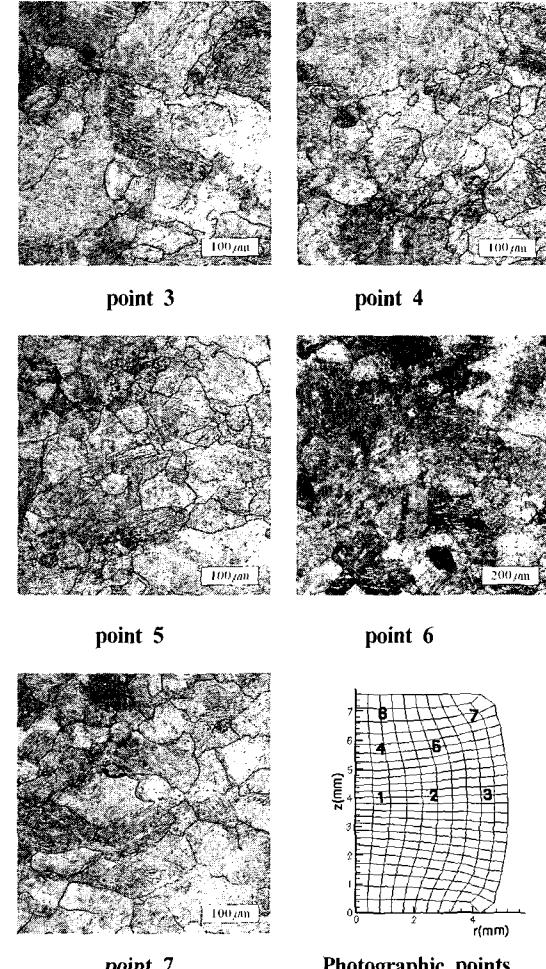
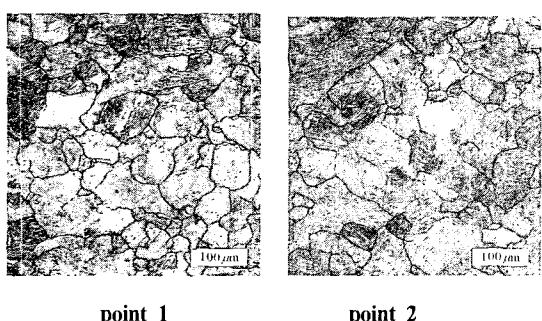
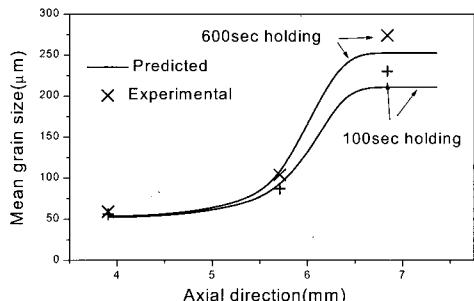


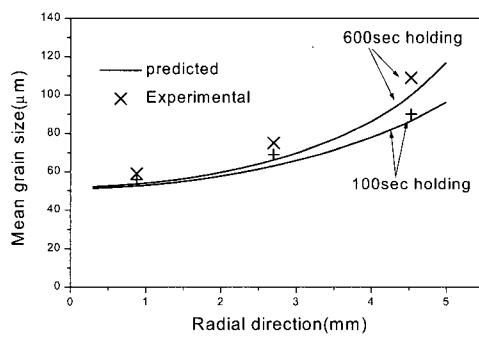
Fig. 15 Microstructure of interrupted double compression at  $v=1\text{mm/s}$ ,  $1150^\circ\text{C}$  and  $600\text{s}$  holding

유지시간이 길어질수록 입자 성장이 많이 일어나서 평균 입자 크기도 커졌다. Fig. 16은 실험과 시뮬레이션 결과를 축방향과 반경방향으로의 평균 입자 크기를 도시하였다. Fig. 17은 시뮬레이션에 의해 전체 공정단계에서 시편 각 지점의 평균 입자 크기 분포를 도시하였고, Fig. 18은 공정 단계에 따른 평균 입자 크기 분포를 시뮬레이션 결과로써 도시하였다. Fig. 19는 시뮬레이션과 실험 결과의 하중을 도시하였다.

동적 재결정이 변형을 구동력으로 해서 발생하는 현상이기 때문에 변형이 심할수록 재결정분율이 커진다는 것을 보여주고 있으며, 동적, 정적 임계 변형률에 못 미치게 변형을 받은 곳은 입자 성장만을 보였다.

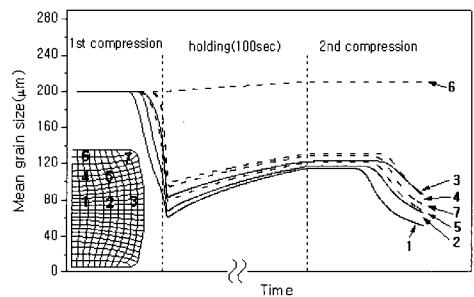


(a) Axial direction

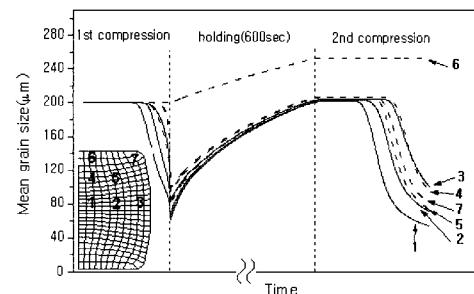


(b) Radial direction

Fig. 16 Comparison of grain size between experimental and predicted results after interrupted double compression

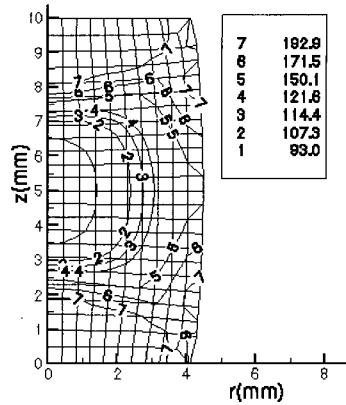


(a) 100sec holding

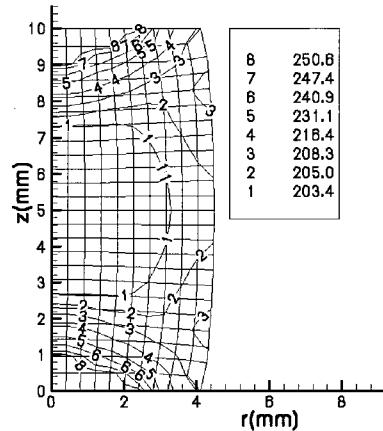


(b) 600sec holding

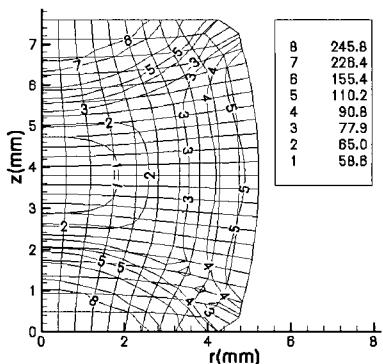
Fig. 17 Mean grain size from predicted result at each position for processing,  $v=1\text{mm/s}$ ,  $1150^\circ\text{C}$



(a) 16.7% first compression



(b) 600sec holding



(c) 36.7% second compression

Fig. 18 Distribution of mean grain size of each processs at  $v=1\text{mm/s}$ ,  $1150^\circ\text{C}$

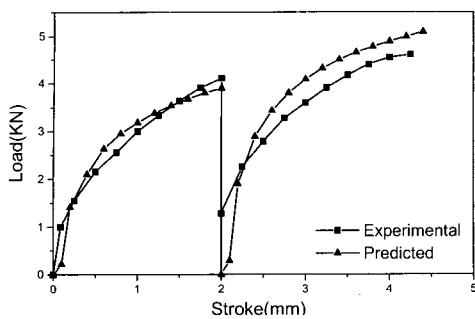


Fig. 19 Comparison of experimental and predicted load,  $v=1\text{mm/s}$ ,  $1150^\circ\text{C}$

#### 4. 결 론

금형강의 열간 압축실험을 통해서 동적, 정적 재결정과 입자 성장을 관찰하여 수학적 모델링을 하였다. 2단 변형에 의한 연화 곡선으로부터 연화 정도를 변형률, 온도와 변형률 속도에 따른 연화비율로써 비교하였다. 수학적 모델링을 이용하여 고온 변형시 미세조직 변화를 시뮬레이션하고 결과를 실험에서 얻은 값과 비교하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형강의 고온 유동곡선을 공정변수 파라미터인 온도, 변형률, 변형률 속도로 수학적 모델링을 하였고 실험 결과와 잘 일치하였다.

(2) 본 연구로부터 금형강의 동적 재결정과 입자 성장의 입자 크기 변화를 공정 변수들에 의하여 수학적 모델링으로 표현할 수 있다.

(3) 고온 변형에서는 입계 변형률을 지나 변형이 많을 수록 재결정이 많이 발생함을 관찰하였고 동적 재결정된 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률 속도가 낮을수록 증가하였다.

(4) 유지 시간동안 입자 성장에 의한 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률이 낮을수록 증가하였다.

(5) 2단 변형에서 변형 사이의 유지시간은 다음 단계의 항복 응력의 변화를 초래하였고, 유지시간이 길어질수록 항복 응력이 감소하였다.

(6) 온도, 변형률 속도가 일정할 때는 변형이 많을수록 연화율이 높았고, 온도, 변형률이 일정할 때는 변형률 속도가 클수록 연화율이 높았다.

(7) 수치 해석적인 방법으로 미세조직 예측을 위해 강소성 유한요소법을 이용하였고 다단 등속 압축 실험에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 그 결과는 본 논문에서

제안한 수학적 모델을 적용한 새로운 프로그램을 개발하여 타당성을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) C. M. Sellars, 1979, "The physical metallurgy of hot working", International Conference on Hot Working and Forming Process, University of Sheffield, pp. 3~47.
- (2) C. M. Sellars and J. A. Whiteman, 1979, "Recrystallization and grain growth in hot rolling", Metal Science, Vol. 13, pp. 187~194.
- (3) C. M. Sellars, 1990, "Modelling microstructural development during hot rolling", Materials Science and Technology, Vol. 6, pp. 1072~1081.
- (4) John H. Beynon and C. Michael Sellars, 1992, "Modelling microstructure and its effects during multipass hot rolling", ISIJ International, Vol. 32, No. 3, pp. 359~367.
- (5) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels", Acta Mater, Vol. 44, No. 1, pp. 137~148.
- (6) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "The influence of chemical composition on peak strain of deformed austenite in low alloy and microalloyed steels", Acta Mater, Vol. 44, No. 1, pp. 149~154.
- (7) C. A. Dandre, S. M. Roberts, R. W. Evans and R. C. Reed, "Prediction of microstructural evolution during cogging of Inconel 718: Process Modelling and Validation", Confidential Report
- (8) J. R. Cho, W. B. Bae, W. J. Hwang, 2000, "A study of the hot deformation behaviour and dynamic recrystallization of Al-5wt%Mg alloy", accepted J. of Mat. Processing Technology.