

304 스테인리스강의 열간동적재결정과 미세조직 예측

권영표* · 조종래** · 이성열*** · 이정환****

(2001년 10월 17일 접수)

The Prediction of Dynamic Recrystallization and Grain Size of 304 Stainless Steel during Hot Deformation

Y.P. Kwon, J.R. Cho, S.Y. Lee and J.W. Lee

Abstract

The flow stress of 304 stainless steel during hot forming process were determined by conducting hot compression tests at the range of 1273 K~1423 K and 0.05 /s~2.0 /s as these are typical temperature and strain rate in hot forging operation. In this material, Dynamic recrystallization was found to be the major softening mechanism with this conditions as previous studies. Based on the observed phenomena, a constitutive model of flow stress was assumed as a function of strain, strain rate, temperature. In the constitutive model, the effects of strain hardening and dynamic recrystallization were taken into consideration. A finite element method connected to constitutive model was performed to predict the dynamic recrystallization behaviors and also stress-strain curves in hot compression of 304 stainless steel.

Key Words : 304 Stainless Steel, Hot Deformation, Dynamic Recrystallization, Grain Size, Finite Element Method

1. 서 론

소성가공의 한 형태인 열간가공공정의 경우에는 재결정온도 이상에서 가공이 실시되므로 강도가 높거나 큰 제품의 가공이 용이하며 공정 중에 풀림(annealing)작용에 의해 가공시에 발생하는 내부응력이 감소되어 냉간가공공정에 비해 유리하다. 그러나 열간가공공정에서는 미

세조직의 변화를 제어하기가 어려우므로 열간가공의 공정변수인 가공온도, 변형률속도, 변형률의 변화에 대해 동적연화기구인 동적회복(dynamic recovery, DRV)과 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)의 영향을 정확히 이해하여 유동응력과 미세조직을 예측할 수 있어야 하겠다. 지금까지 스테인리스강의 열간가공공정에서 유동응력과 미세조직의 변화양상을 규명하기 위해 연구가

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과
** 한국해양대학교 기계정보공학부
*** 한국해양대학교 기계소재공학부
**** 한국기계연구원 재료공정부

Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel

Element	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Co
Composition(wt%)	0.026	1.66	0.48	0.027	0.028	10.4	18.12	0.36	0.35	0.05	0.13

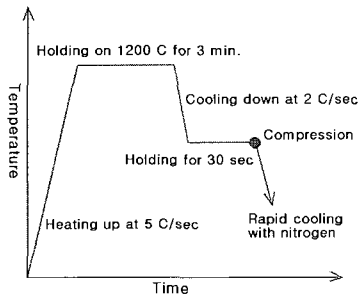


Fig. 1 Diagram of experimental condition

진행되어오고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 많은 연구자들은 스테인레스강의 고온변형거동에 대한 금속학적 모델식에 대해 명확한 규명이 이루어지지 않았으며, 실제 실험한 결과와 모델식을 이용한 시뮬레이션 수행결과를 비교한 예가 그리 많지 않은 실정이다.⁽⁴⁾

따라서 본 연구에서는 대표적인 오스테나이트계 스테인레스강인 304 스테인레스강의 고온변형거동⁽⁵⁾을 파악하여 변형조건에 따른 유동응력모델식⁽⁶⁻⁷⁾을 만들고 고온변형시 미세조직의 변화를 예측할 수 있는 수학적모델식을 제시하며 이를 이용하여 시뮬레이션한 데이터와 실제 실험 데이터를 비교하여 그 타당성을 검증하고자 이 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 기초실험

본 실험에 사용된 소재인 304 스테인레스강의 화학조성을 Table 1에 나타내었으며, 이 소재의 초기 결정립크기를 균질화 시키기 위해 1000℃에서 30분간 노말라이징 처리(normalizing treatment)를 수행한 후 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편으로 가공하였다. 본 실험은 등온압축장치(Thermecmaster)를 사용하여 Fig 1.에 나타난 실험조건으로 온도 1000℃, 1050℃, 1150℃에서 각각 0.05s⁻¹, 0.1s⁻¹, 0.5s⁻¹, 2s⁻¹의 변형률속도($\dot{\epsilon}$)로 30%, 40%, 50%의 높이감소율로 압축을 실시하였다.

압축완료 후 시편내부의 동적재결정을 관찰하기 위해 질소가스를 사용하여 급냉하였으며, 조직현미경을 통한 관찰로 재결정분율과 재결정립의 크기를 각각 측정하였다.

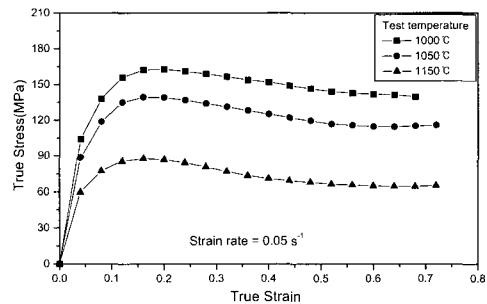
2.2 열간등속실험

기초실험에서 구한 모델식을 이용하여 시뮬레이션한 결과의 타당성을 입증하기 위해 기초실험에서와 같은 크기의 시편과 같은 실험장치로 열간등속실험을 실시하였다. 실험조건은 기초실험과의 비교를 위해 기초실험과 동일한 온도인 1050℃, 1150℃에서 등온을 유지한 상태에서 50%의 높이감소율로 실험을 수행하였다. 실험이 끝난 시편은 조직관찰을 통해 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 실험된 시편의 조직사진을 중심부에서 축방향으로 3개, 중심부에서 반경방향으로 3개씩 관찰하였다.

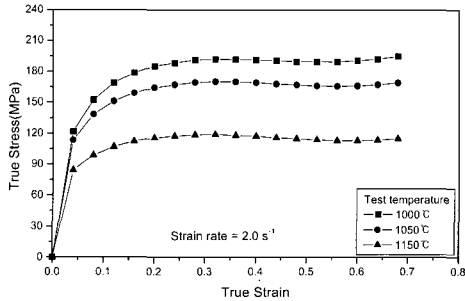
3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온유동곡선

Fig. 2와 같이 304 스테인레스강의 고온유동곡선은 변형초기에는 유동응력이 증가하여 최대응력에 이르고 계속 변형하면 유동응력은 감소하여 일정 변형량 이후에는 더 이상의 응력 저하가 없는 정상상태응력에 도달하게 된다. 미세조직의 관찰결과 최대응력에 도달하였을 때의 변형률값(ϵ_p) 이전에 이미 동적재결정이 일어난다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 Fig. 3에서와 같이 임계변형률값을 결정하기 위해 일반적으로 사용되는 방법인 변형



(a) Stress-strain curves at $\dot{\epsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$



(b) Stress-strain curves at $\dot{\epsilon} = 2.0 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 Stress-strain curves at various temperature and various strain rate

경화율(θ)-유동응력 관계에서 변곡점이 발생하는 점, 즉 아결정립의 생성이 종료되는 지점에서 임계변형률값을 구할 수 있었으며 식(1)과 같이 정의할 수 있었다.

$$\epsilon_c = 0.7 \times \epsilon_p \quad (1)$$

실험에서 얻어진 데이터를 이용하여 고온변형거동에서 온도, 변형률속도에 따른 유동응력의 변화양상을 나타내기 위해 Arrhenius식을 이용하여 구성식을 정량화 하였다.⁽⁸⁾

식(2)에서 A는 $1.586 \times 10^{15} (\text{s}^{-1})$, α 는 $0.01 (\text{MPa}^{-1})$, n은 4.35의 값을 갖는다는 것을 실험에서 얻은 데이터들로부터 알 수 있었다. 그리고 활성화에너지 Q값은 403.5 kJ/mol로서 304 스테인레스강에 대해 이미 연구된 활성화에너지값과 유사함을 알 수 있었다.

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

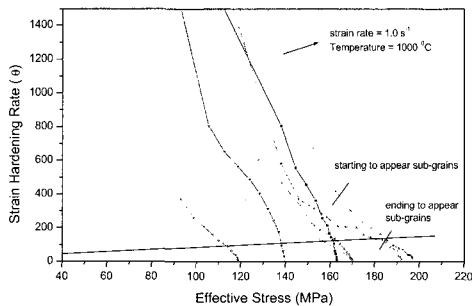


Fig. 3 The graph of effective stress and strain hardening rate

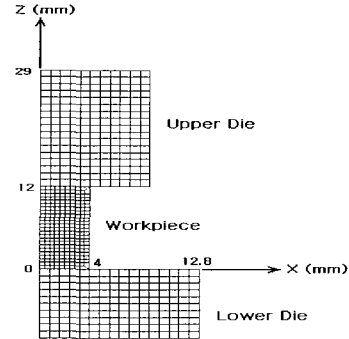


Fig. 4 Initial finite element mesh for the simulation

조직현미경사진에서 이미지 아날라이징 방법을 통해 동적재결정(X_{dyn})과 재결정된 결정립의 크기(d_{dyn})를 식(3)~(6)와 같이 수식화 할 수 있었다.

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

$$\text{단, } k = 0.028 \dot{\epsilon}^{1.460} \exp(48.10 Q/RT) \quad (4)$$

$$m' = 1.17 \dot{\epsilon}^{-0.194} \exp(1.10 Q/RT) \quad (5)$$

$$d_{dyn} = 7.22 \dot{\epsilon}^{0.22} \exp(-1.67 Q/RT) \quad (6)$$

식(6)은 동적재결정이 일어났을 때의 결정립의 크기를 말하며 재결정에 의해 평균결정립 크기가 감소하는 것을 고려한 평균결정립 크기를 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\overline{D} = 46(1 - X_{dyn}) + d_{dyn} \cdot X_{dyn} \quad (7)$$

3.2 시뮬레이션

열간가공공정에서 재료의 변형양상을 동적재결정 모델과 강점소성유한요소해석을 연계시켜 본 논문의 타당성을 입증하기 위해 강열점소성 유한요소법에 미세조직의 변형양상을 접목하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 초기 입력값을 Table 2에 나타내었으며 소재, 상·하부 금형의 요소는 Fig. 4에서와 같이 각각 238개, 187개, 160개로 초기격자를 구성하고 축대칭으로 해석을 수행하였다. 식(8)~(10)은 시뮬레이션에서 사용한 유동응력식으로서 동적연화에 의한 응력감소를 고려하여 Fig. 5와 같이 모델링하여 사용하였다.

Table 2 The condition of process parameters for FEM

Process parameter	Value
Friction coefficient	0.7
Thermal conductivity of w.p	14.9 (N/s · K)
Thermal conductivity of dies	28.4 (N/s · K)
Heat capacity of w.p	3.77 (N/mm ² · K)
Heat capacity of dies	4.0 (N/mm ² · K)

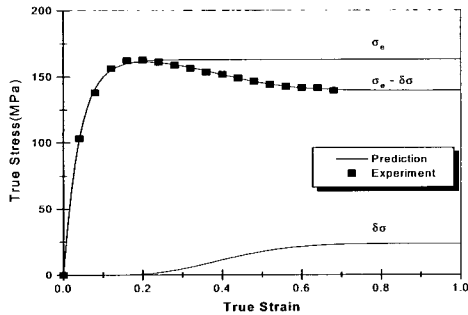


Fig. 5 Stress-strain curves predicted and experimental data at 1000°C and 0.05/s

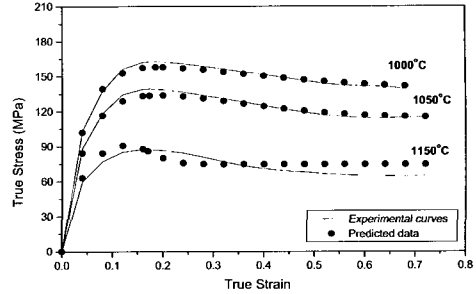
$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad (8)$$

$$\sigma_e = \sigma_p [1 - \exp(-C\varepsilon)]^m \quad (9)$$

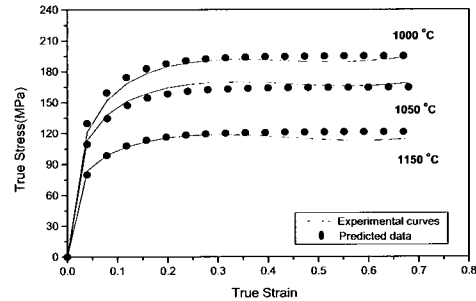
$$\Delta\sigma = (\sigma_p - \sigma_s) \left\{ 1 - \exp\left[-k \left(\frac{\varepsilon - \alpha\varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right)^{m'}\right] \right\} \quad (10)$$

식(9)는 가공경화영역을 나타내는 식이고, 식(10)은 동적연화에 의한 영향을 각각 고려한 식이다. 여기서 임계 변형률속도 0.5 s^{-1} 를 기준으로 서로 다른 유동응력양상이 나타나므로 서로 다르게 유동응력곡선을 모델링하였으며, 임계변형률속도 이상에서는 동적연화가 일어나고 있음에도 불구하고 유동응력이 감소하는 현상이 나타나지 않으므로 식(10)의 $\Delta\sigma$ 를 0으로 하여 모델링하였다. 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 위 식(8)에 사용되는 매개변수 값들(σ_p , σ_s , C , m , k , m' , ε_p)을 각각 결정하여 유동응력곡선에 대한 모델식을 만들었다. Fig. 6은 이러한 유동응력곡선모델식을 이용하여 예측된 유동응력곡선과 실험에서 얻은 유동응력곡선을 비교한 것으로서 예측된 값이 실제 실험 데이터에 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

성형중 동적재결정 거동이 부분적으로 일어나는 경우



(a) $\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$



(b) $\dot{\varepsilon} = 2.0 \text{ s}^{-1}$

Fig. 6 Flow curves of experiment and prediction at various temperatures

재결정이 일어난 영역(X_{dyn})과 일어나지 않은 영역($1 - X_{dyn}$)으로 각각 구분하고, 성형과정 동안 각 체적분율과 증분변형률을 감안하여 평균변형률을 계산하여 다음 단계의 초기 변형률로 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션에 대한 타당성을 평가하기 위하여 실험에서 측정된 시편의 변위와 다이하중에 대한 그래프를 시뮬레이션된 결과와 비교해보았을 때, Fig. 7에서와 같이 시뮬레이션된 결과가 실험에서 얻은 데이터에 근사함을 알 수 있었다.

로내의 온도를 1150°C로 하고 6mm/s의 속도로 등속압축실험한 결과와 시뮬레이션한 결과를 비교하기 위해 가공된 시편의 반경방향으로 각 3개의 지점에서 측정. 분율과 평균 결정립크기를 시뮬레이션으로 얻은 값들과 비교한 것을 Fig. 8의 (a), (b)에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있는 것과 같이 예측된 값과 실험값에 약간의 차이가 있으나 대체적으로 잘 맞는 것을 알 수 있었다. Fig. 9에서는 시편의 중심에서 반경방향으로 각각 촬영한 조직현미경 사진들로서 변형량이 많은 중심부에서 재결정 현상이 현저히 관찰되며, 바깥쪽으로 갈수록 재결정 현상이 미약하다는 것을 알 수 있었다. 그리

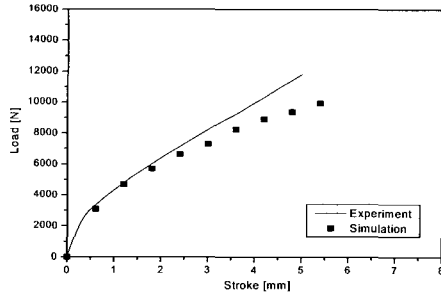
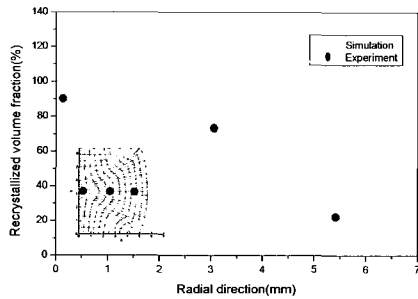
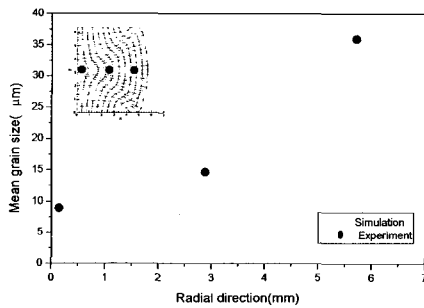


Fig. 7 Comparison of load between experiment and simulation



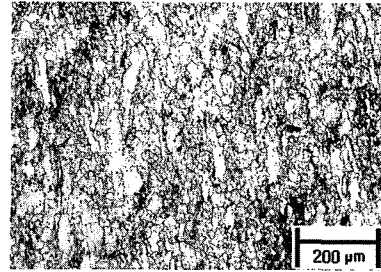
(a) Recrystallized volume fraction



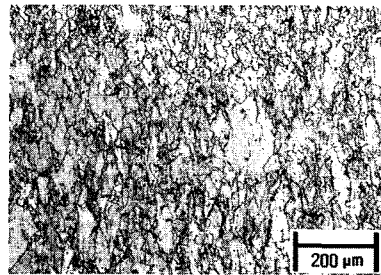
(b) Mean grain size

Fig. 8 Comparison of measured and simulated result

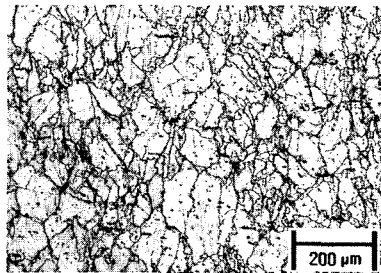
고 Fig. 10~13에서는 각각 시뮬레이션으로 얻은 시편내부의 변형률, 변형률속도, 재결정분율, 평균결정립크기의 분포를 나타내고 있다. 조직현미경 관찰결과를 바탕으로 시뮬레이션 결과와 비교해본 결과 재결정분율과 평균결정립크기에서 실험치와 예측치에 다소 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 압축과정에서 발생하는 마찰력의 변화를 정확히 반영하지 못하였으며 그 밖의 여러 가지 측정오차의 영향으로 생각된다. 그러나 전반적으로 예측치가 실험치에 잘 따라가고 있음을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Microstructure of hot compressed specimen to radial direction (temp. = 1150°C, die speed = 6 mm/s)

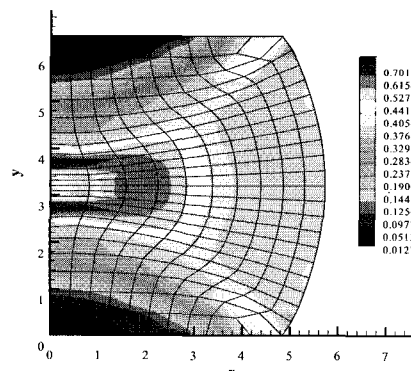


Fig. 10 Distribution of retained strain

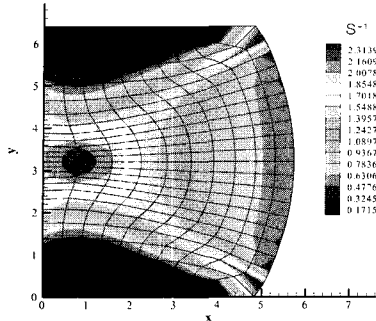


Fig. 11 Distribution of strain rate

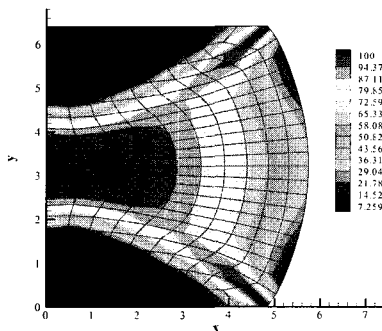


Fig. 12 Distribution of recrystallized volume fraction

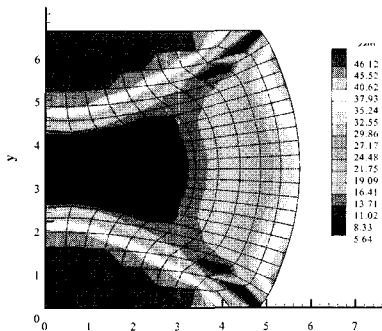


Fig. 13 Distribution of mean grain size

4. 결 론

304 스테인레스강의 열간성형실험을 통해 동적재결정 거동을 이해하고 강점소성 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고온변형실험을 통해 304 스테인레스강의 주된 연화기구가 동적재결정이라는 것을 알 수 있었으며, 동적재결정에 대한 모델을 제시하였다.

(2) 임계변형률속도 진후에서 유동응력 양상이 다르게 나타나므로 변형률속도에 적합한 각각의 열간유동응력 모델식을 제시하였으며, 이를 통하여 고온변형에서 응력

과 변형률의 관계를 예측할 수 있었다.

(3) 강점소성 유한요소법을 이용한 미세조직 예측 프로그램을 개발하였으며, 이에 의한 시뮬레이션 결과는 열간등속실험의 결과와 비교할 때 근사하고 있음을 알 수 있었다.

(4) 소재의 가공온도와 가공속도를 제어하여 열간동적재결정 현상과 미세조직의 변화를 조절할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) 한형기, 김성일, 유연철, 1999, "304 스테인리스강의 고온 유동응력곡선과 미세조직의 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 72~79.
- (2) 조상현, 김성일, 유연철, 로광섭, 이경중, 권오준, 1997, "304 오스테나이트계 스테인레스강의 고온연화", 대한금속학회지, Vol. 35, No. 6, pp. 681~688.
- (3) N. D. Ryan and H. J. McQueen, 1989, "Dynamic softening mechanisms in 304 austenitic stainless steel", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 29, No. 2, pp. 147~162.
- (4) 최민식, 강범수, 염종택, 박노광, 1998, "유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적재결정거동 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 197~206.
- (5) Imao Tamura, 1987, "Some fundamental step in thermomechanical processing", Transactins ISIJ, Vol. 27, pp. 763~779.
- (6) C. A. Hernandez, S. F. Medina and J. Ruiz, 1996, "Modelling austenite flow curves in low alloy and microalloyed steels", Acta mater, Vol. 44, No. 1, pp. 155~163.
- (7) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "Modelling of the dynamic recrystallization of austenite in low alloy and microalloy steels", Acta mater, Vol. 44, No. 1, pp. 165~171.
- (8) S. F. Medina and C. A. Hernandez, 1996, "General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low ally and microalloyed steels", Acta mater, Vol. 44, No. 1, pp. 137~14.
- (9) 황원주, 조종래, 배원병, 1999, "유한요소법을 이용한 Al-5wt%Mg합금의 미세조직 크기 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 620~625.