

스테인레스 304의 열간동적재결정과 미세조직 예측

권영표* · 조종래** · 이성열***

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

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

Abstract

The flow stress of 304 stainless steel during high 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. Based on the observed phenomena, a constitutive model of flow stress was assumed as a function of strain, strain rate, temperature. Dynamic recrystallization was found to be the major softening mechanism with this conditions as previous studies. A finite element analysis was performed to predict the recrystallized volume fraction and the mean grain size in hot compression of 304 stainless steel.

Key Words : 304 Stainless steel, Hot deformation, Dynamic recrystallization, Grain size, Finite element method

1. 서론

소성가공의 한 형태인 열간가공공정의 경우에는 재결정 온도 이상에서 가공이 실시되므로 강도가 높거나 큰 제품의 가공이 용이하며 공정 중에 풀림(annealing)작용에 의해 가공시에 발생하는 내부응력이 감소되어 냉간가공공정에 비해 유리하다. 그러나 열간가공공정에서는 미세조직의 변화를 제어하기가 어려우므로 열간가공의 공

정변수인 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 스테인레스강의 열간가공공정에서 유동응력과 미세조직의 변화양상을 규명하기 위해 연구가 진행되어오고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 많은 연구자들은 스테인레스강의 고온변형거동에 대한 금속학적 모델식에 대해

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 한국해양대학교 기계정보공학부

*** 한국해양대학교 기계소재공학부

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

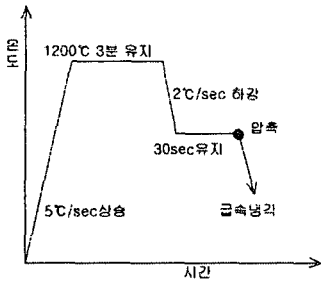


Fig. 1 Diagram of experimental condition

명확한 규명이 이루어지지 않았으며, 실제 실험한 결과와 모델식을 이용한 시뮬레이션 수행결과를 비교한 예를 그리 많지 않은 실정이다.⁽⁴⁾

따라서 본논문에서는 대표적인 오스테나이트계 스테인레스강인 스테인레스 304의 고온변형거동⁽⁵⁾을 파악하고 변형조건에 따른 유동응력식⁽⁶⁻⁷⁾을 사용하여 고온변형시 미세조직의 변화를 예측할 수 있는 수학적모델식을 제시하고 실험된 결과와 시뮬레이션에 의해 수행된 결과를 비교하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 기초실험

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

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

2.2 열간등속 실험

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온유동곡선

Fig. 2와 같이 스테인레스 304의 고온유동곡선은 변형 초기에는 유동응력이 증가하여 최대응력에 이르고 계속 변형하면 유동응력은 감소하여 일정 변형량 이후에는 더 이상의 응력저하가 없는 정상상태응력에 도달하게 된다. 미세조직의 관찰결과 최대응력에 도달하였을 때의 변형률값(ϵ_p) 이전에 이미 동적재결정이 일어난다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 임계변형률값을 결정하기 위해 일반적으로 사용되는 방법인 변형경화율(θ)-유동응력 관계에서 변곡점이 발생하는 점들로부터 임계변형률값을 구할 수 있었으며 식(1)과 같이 정의할 수 있었다.

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

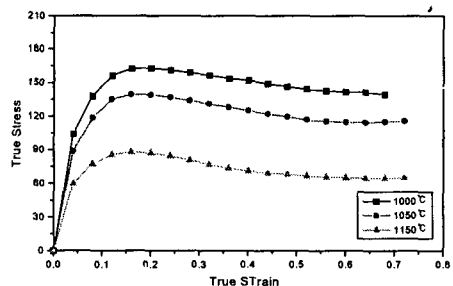


Fig. 2 Stress-strain curves at various temperature

고온변형거동에서 온도, 변형률속도에 따른 유동응력의 변화양상을 나타내기 위해 일반적으로 사용되는 Arrhenius식을 이용하였다.⁽⁸⁾

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

식(2)에서 A는 1.586×10^{15} , α 는 0.01, n은 4.35의 값을 갖는다는 것을 실험에서 얻은 데이터들로부터 알 수 있었다. 그리고 활성화에너지인 Q값은 403 kJ/mol로서 스테인레스 304에 대해 이미 연구된 활성화에너지값과 유사함을 알 수 있었다.

조직현미경을 이용한 관찰결과로 동적재결정(X_{dyn})과 재결정된 결정립의 크기(d_{dyn})를 수식화할 수 있었다.

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

$$\text{단, } k = 0.028 \dot{\epsilon}^{1.46} \exp(2334.41/T) \quad (4)$$

$$m' = 1.17 \dot{\epsilon}^{-0.194} \exp(53.48/T) \quad (5)$$

$$d_{dyn} = 7.22 \dot{\epsilon}^{0.22} \exp(-80.98/T) \quad (6)$$

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

$$\bar{D} = D_0(1 - X_{dyn}) + d_{dyn} \cdot X_{dyn} \quad (7)$$

3.2 시뮬레이션

열간가공공정에서 재료의 변형양상을 동적재결정 모델과 강점소성유한요소해석을 연계시켜 본 논문의 타당성을 입증하기 위해 강열점소성 유한요소법에 미세조직의 변형양상을 접목하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된

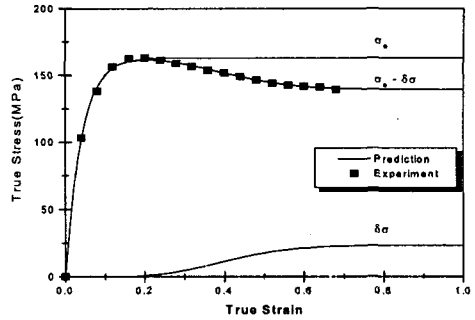
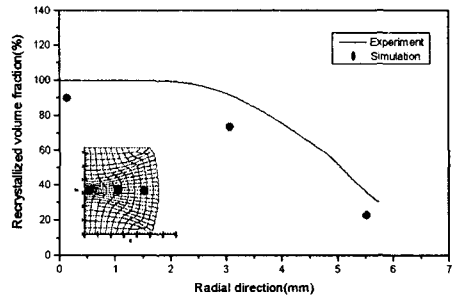


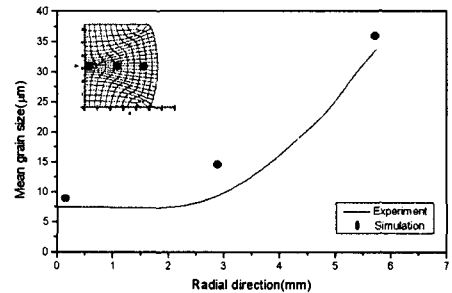
Fig. 3 Stress-strain curves predicted and experimental data at 1000 °C and 0.05/s

초기 입력값을 Table 2에 나타내었으며 소재, 상·하부 금형의 요소갯수는 각각 238개, 187개, 160개로 초기격자를 구성하고 축대칭으로 해석을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용한 유동응력식은 동적연화에 의한 응력감소를 고려하여 Fig. 3과 같이 모델링하여 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_p [1 - \exp(-C\epsilon)]^m - (\sigma_p - \sigma_s) \left\{ 1 - \exp\left[-k\left(\frac{\epsilon - \alpha\epsilon_p}{\epsilon_p}\right)^{m'}\right] \right\} \quad (8)$$



(a) Recrystallized volume fraction



(b) Mean grain size

Fig. 4 Comparison of measured and simulated result

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)

식(8)에서 앞부분은 가공경화, 뒷부분은 동적연화에 의한 영향이 각각 고려된 식이다. 실험에서 구한 값들을 이용하여 위 식(8)에 사용되는 매개변수 값들 ($\sigma_p, \sigma_s, C, m, k, m', \epsilon_p$)을 결정하여 유동응력에 대한 모델식을 만들었다.

성형중 동적재결정 거동이 부분적으로 일어나는 경우, 재결정이 일어난 영역(X_{dm})과 일어나지 않는 영역($1-X_{dm}$)으로 각각 구분하고, 성형과정동안 각 체적분율과 증분변형률을 감안하여 평균변형률을 계산하여 다음 단계의 초기 변형률로 사용하였다.

로내의 온도를 1050°C로 하고 3mm/s의 속도로 등속압축실험한 결과와 시뮬레이션한 결과를 비교하기 위해 반경방향으로 3개의 지점에서 실제로 측정된 값과 시뮬레이션으로 얻은 값들을 Fig. 4의 (a), (b)에 나타내었으며, Fig. 5에서는 시뮬레이션으로 얻은 시편의 평균결정립 크기를 나타낸다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 예측하중은 실험치에 근접함을 알 수 있었고, 평균결정립 크기가 중심부에서 시뮬레이션한 값보다 실험에 의한 값보다 다소 크게 차이가 나는 것은 측정오차의 영향과 초기 결정립크기의 영향을 고려하지 못한 때문으로 생각된다.

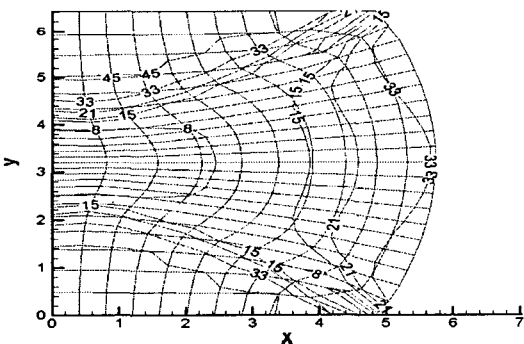


Fig. 5 Distribution of mean grain size

4. 결론

스테인레스 304의 열간성형실험을 통해 동적재결정 거동을 이해하고 강점소성 유한요소해석을 통해 시뮬레이션하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 스테인레스 304의 열간성형공정에서도 다른 소재와 마찬가지로 동적재결정의 영향으로 임계변형률 이상에서 유동응력의 감소가 일어난다.
- (2) 열간압축실험에서 유동응력곡선은 임계변형률속도

를 기준으로 하여 다른 양상을 나타내므로 변형률속도에 따른 유동응력곡선의 모델식을 필요로 한다.

(3) 강점소성유한요소해석의 타당성을 입증하기 위해 열간등속실험을 수행한 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

(4) 열간성형공정에서 공정변수인 온도, 변형률속도, 변형률을 제어하여 미세조직의 변화를 조절할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (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.