

미량원소첨가강의 석출 및 재결정에 의한 제어변형

조상현* · 김성일* · 유연철*

(1996년 9월 12일 접수)

Controlled Deformation of Microalloyed Steel by Precipitation and Recrystallization

Sang-Hyun Cho, Sung-Il Kim and Yeon-Chul Yoo

Abstract

The multistage deformation and stress relaxation were carried out to investigate the strain induced precipitation by torsion tests in the range of 1000~800°C, 0.05~5/sec for V-microalloyed steel. The starting temperature and time for the initiation of precipitation were determined by stress relaxation tests. The distribution of precipitates increased, as the strain rate increased and the mean size of precipitates was found to be about 10~30 nm. The precipitation starting time(P_s) decreased with increasing strain rate and the amount of pre-strain. The effect of deformation conditions on the no-recrystallization temperature(T_{nr}) was also determined in the multistage deformation. T_{nr} , T_{nr} decreased with increasing the strain and strain rate. In the controlled rolling simulation, grain refinement and precipitation hardening effects could be achieved by the alternative large pass strain at the latter half pass stage under the condition of low temperature and high strain rate.

Key Words : Strain Induced Precipitation, Precipitation Starting Time P_s , No-recrystallization Temperature T_{nr} , Controlled Rolling, Grain Refinement

1. 서론

재료의 기계적 특성은 화학조성 이외에 변형온도(T) 변형량(ϵ) 및 변형속도($\dot{\epsilon}$) 등과 같은 열간가공변수에 크게 영향을 받는다. 열간변형중의 가공경화와 동적연화(동적회복 dynamic recovery DRV, 동적재결정 dynamic recrystallization DRX)는 동시에 일어나며 궁극적으로 고온 유동응력은 이들 두 기구사이의 균형에 의해 조절된다. 따라서 열간압연이나 열간단조등의 공정에 대한 연구

는 강재의 기계적특성 향상을 목표로 다각적으로 이루어지고 있으나 아직 많은 이론적 기술적 문제점이 해결되지 않고 있다.⁽¹⁻³⁾ 또한 실제 압연공정과 같은 다단변형은 위에 언급한 공정변수외에도 패스간 유지시간(t_i) 및 단속 변형량(ϵ_i) 등에 따라서 동적연화(dynamic softening) 뿐만아니라 정적연화(static softening)까지 발생하므로 이에 대한 정량적인 연구는 필수적이다.

V 첨가강은 상온 항복강도가 우수하며 기계구조용 강재로서 일반 구조용 강을 대신해서 수요가 증대되는 재료로

* 인하대학교 금속공학과

서 제조 및 석출현상과 관련하여 주로 연구가 이루어져 왔으며 고온 연화과정에서는 V 첨가로 인한 결정립 미세화 효과를 크게 얻는 것이 주요 압연공정변수의 하나로 알려져 있다.^(4,5) 특히 V은 열간가공중 오스테나이트에서 페라이트로 변태하기 전후에 VC, V(C,N) 로 석출하여 재결정을 방해할 뿐아니라 오스테나이트의 결정립 성장을 억제하여 페라이트 결정립을 작게 할 수 있기 때문에 상온강도를 높일 수 있다.⁽⁶⁾ 이러한 미량첨가원소의 효과를 극대화시키려면 고온압연중에 용질원자가 입계등에서 짧은 시간에 대단히 미세하게 석출하는 동적변형유기석출^(7,8)(dynamic strain induced precipitation)을 압연공정에 연관시켜 연구하는 것이 중요하다. 그러나 이 동적변형유기석출에 의한 강도증가는 변형량이 동적재결정(DRX)을 일으키는 임계변형량(critical strain, ϵ_c)을 상당히 초과하게 되면 변형중이라도 석출물의 성장으로 그 효과가 감소하게 된다는 보고⁽⁹⁾가 있으나 아직 이에 대한 기구는 정확히 규명되지 못하고 있다.

본 연구에서는 V 첨가강(0.045wt%V)에 대해서 첨가원소에 따른 결정립 미세화등의 조직학적인 측면과 고온 연화기구 등에 관한 연구^(10,11)와 연관하여 열간변형중에 발생하는 변형유기석출현상과 고온단변형시에 발생하는 재결정현상을 정량적으로 구명하여 결정립도를 보다 효과적으로 미세화시킬 수 있는 제어압연공정에 적용하고자 하였다.

2. 실험방법

시료는 아르헨기로 제강법으로 제강하여 빌렛으로 연속 주조한 후 가열로에서 1200℃로 재가열하여 약 1시간 유지한 후 열간압연한 V첨가강 봉재로서 화학조성은 Table 1과 같았다. 시험편은 10 mmφ x 20 mm인 고체형 비틀림시험편이었으며 석출에 미치는 변형속도와 변형온도의 영향을 분석하기 위해서 변형률을 300%로 고정하고 변형속도 5x10⁻² ~ 5x10⁰/sec, 변형온도 800~1000℃ 범위에서 연속변형을 하였다.

Table 1 The chemical composition of V-microalloyed steel(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
0.267	0.248	1.115	0.027	0.059	0.103	0.021
V	Cu	Co	Cr	Sn	Ti	
0.045	0.413	0.007	0.166	0.023	0.006	

각 변형조건에서 석출이 시작되는 시점을 분석하기 위한 응력이완 실험은 변형온도 800~1000℃, 변형속도 5x10⁻²~5x10⁰/sec 이었고 변형량은 3%~9% 범위로 조절하였으며 이러한 변형조건을 Table 2에 나타내었다.

조직변화를 관찰하기 위해 미세연마하여 2%Nital 과 Pical로 부식하여 광학현미경으로 관찰하였으며 석출물 관찰은 표면형태복제법(replica method)을 이용하여 STEM(Joel STEM(200kV))과 EDX를 사용하여 분석하였다. 전해용액은 과염소산(perchloric acid) 10% + methanol 90%용액을 사용하였고 음극은 백금선을 사용하였다.

Table 2 The conditions of continuous deformation and stress relaxation tests

continuous deformation	temperature(℃)	800	900	1000
	strain rate(/sec)	5x10 ⁻²	5x10 ⁻¹	5x10 ⁰
	strain	3		
stress relaxation	temperature(℃)	800	900	1000
	strain rate(/sec)	5x10 ⁻²	5x10 ⁻¹	5x10 ⁰
	pre-strain	0.03	0.06	0.09

3. 실험결과 및 고찰

- 열간가공변수가 석출에 미치는 영향

Fig. 1은 변형온도 900℃에서 변형속도를 5x10⁻²/sec ~ 5x10⁰/sec 로 변화시키면서 얻은 응력-변형률 곡선인

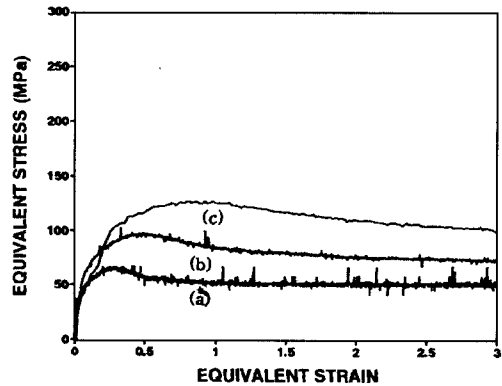


Fig. 1 Typical stress-strain curves for V-microalloyed steels at the temperature condition of 900℃ with various strain rate (a) 0.05 (b) 0.5 (c) 5/sec

데 변형량을 300%로 일정하게 하고 여러 변형조건에서 변형온도와 변형속도만의 영향을 도기한 것이다. 변형량이 300% 이면 유동곡선상에서 최대응력(peak stress, σ_p)을 초과하여 정상상태 응력(steady state stress, σ_s)을 나타내는 시점이므로 변형량의 영향을 배제하면서 다른 공정 변수의 영향을 조사하기 위한 충분한 변형이 가하여 졌다고 판단된다. 각 유동응력(flow stress)은 같은 변형속도에서 온도가 낮을수록 높은 값을 나타내고 또한 일정 온도에서 변형속도가 빨라질수록 커지는 것을 관찰할 수 있었는데 이로써 유동응력은 변형속도와 온도에 크게 의존한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 조건에서 석출 현상이 어떻게 변하는가를 알아보기 위해 변형후 급냉하여 석출물의 분포를 조사하여 이를 Fig. 2~3에 나타내었다. 표면 형태복제법(replica method)을 이용하였기 때문에 결정립계 또는 전위등의 형태를 정확하게 관찰할 수 없어 석출물이 우선적으로 결정립계나 전위들이 고착되어있는 부분에서 생성되었다고 할 수 없었으나 변형속도가 증가할수록 10~30 nm정도의 미세한 석출물이 발생하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 2는 변형속도를 $5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 로 같게 하고 변형온도의 영향을 도기한 것으로서 900℃ 에서 가장 많

은 석출물이 관찰되었다. V 석출물의 석출온도범위는 일반적으로 850℃ 정도로 알려져 있는데⁽⁶⁾ 본 실험에서 석출온도 구간보다 약간 높은 변형온도에서 석출이 가장 많았던 것은 열처리등과 같은 정적(static)인 상태와는 달리 높은 온도에서 빠른 속도로 변형을 받는 동적(dynamic)인 상태이기 때문에 석출온도가 다소 높아진 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 이미 알려진 변형유기석출(strain induced precipitation) 현상^(7,8)과 일치하는 것이기도 하다. Fig. 3은 변형온도 900℃조건에서 석출에 미치는 변형속도의 영향을 나타낸 것으로 변형속도가 빨라짐에 따라서 석출물이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

변형온도가 1000℃로 비교적 고온인 경우는 석출이 거의 되지 않는 것을 알 수 있었는데 이러한 조건에서의 변형은 미량원소의 첨가효과를 거의 기대할 수 없는 조건이라고 판단된다. 그러므로 이러한 가공조건에서는 패스변형량 및 단속시간등을 조절하여 결정립미세화 효과를 극대화시키는 동적재결정제어압연(dynamic recrystallization controlled rolling, DRCR)과 같은 압연공정을 적용하는 것이 미량원소를 첨가하는 것 보다 유리하다. 그러나 변형온도가 800℃에서는 석출이 상당히 발생하였는데 변형온도가 낮기때문에 어느정도의 가공경화효과등도 함께 얻을 수 있어 결정립미세화에 도움이 될것으로 판단된다.

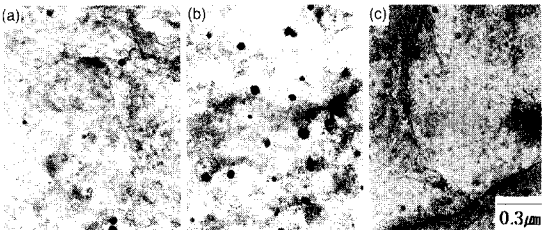


Fig. 2 Extraction replicas showing V(C, N) precipitates at the temperature of (a) 1000℃ (b) 900℃ (c) 800℃ with strain rate of $5 \times 10^{-1}/\text{sec}$

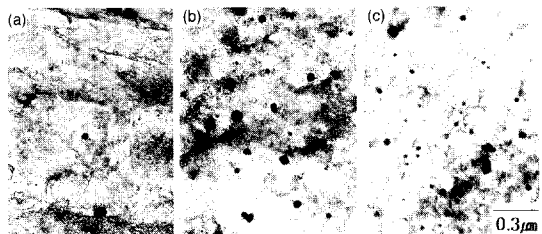


Fig. 3 Extraction replicas showing V(C, N) precipitates at the various strain rate of (a) $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ (b) $5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ (c) $5 \times 10^0/\text{sec}$ with temperature of 900℃

• 응력이완(stress relaxation)에 따른

PTT(preciation-time-temperature) 곡선

Fig. 4 는 900℃, pre-strain 6%, 변형속도를 $5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 로 하여 얻은 응력이완곡선으로써 응력이완화중 응력의 시간에 대한 의존성을 나타내고 있다. 응력은 시간이 지남에 따라

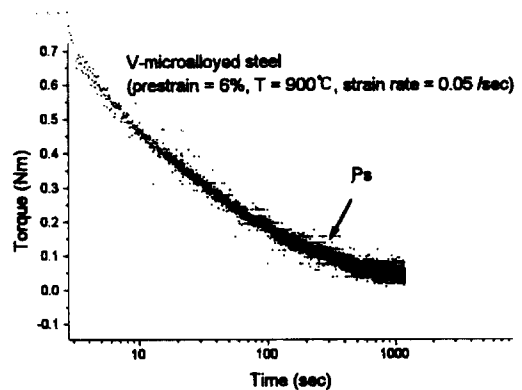


Fig. 4 The stress relaxation curve for V-microalloyed steel in the condition of 900℃, 6% and strain rate was $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$

서 거의 일정하게 감소하다가 어떤점에서 편차가 발생하게 되는데 이러한 곡선으로부터 석출 시작 시간인 P_s (precipitation start)를 결정할 수 있었다.

고온에서 행하는 응력이완실험에서 그림과 같이 시간에 따라 응력저하 수준이 어떤 시점을 기준으로 달라지는 것은 재결정 및 석출과 관련이 있다. 변형을 멈춘후 재결정이 발생하면서 응력이 점차 감소하다가 어느 시점에 도달하여 석출이 발생하면 석출이 재결정을 지연시키게 되고 이로 인해 석출발생 시점에서 응력은 완만하게 감소하게 된다.⁽¹²⁾ 또한 일반 탄소강의 응력이완곡선을 분석해보면 V첨가강과는 달리 응력-시간의 곡선에서 편기점이 발생하지 않고 거의 직선적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 이러한 응력이완곡선으로부터 석출시작점을 결정하는 것은 타당한 것이다.

Fig. 4와 같은 응력이완곡선으로부터 변형속도, 변형온도 및 변형량(pre-strain)에 따른 석출-시간-온도(precipitation-time-temperature, PTT)곡선을 구해서 이를 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 5는 변형량 변화에 따른 PTT 곡선을 나타내었는데 기본적으로 변형량이 증가할수록 PTT 곡선의 nose부분이 당겨지는 것을 알 수 있었다. 변형유기석출에 관한 많은 연구에서도 이미 밝혀진 바와 같이 석출은 변형량이 큰 경우 변형에너지가 증가하여 현저하게 발생한다고 하였다.^(7,8) 그러나 pre-strain을 주어 응력이완곡선으로부터 석출현상을 연구하는 것은 대단히 편리한 방법임에도 불구하고 어느정도의 한계가 존재한다. 왜냐하면 변형량이 많을 경우, 특히 동적재결정을 일으키는 임계변형량을 지나게 되면 변형중에 이미 동적

재결정(dynamic recrystallization)이 발생하여 변형을 멈추더라도 재결정이 어느정도 완료되어 응력이 거의 직선적으로 급격하게 감소하게 된다. 그리고 석출 또한 변형중에 어느정도 발생하기 때문에 응력이완곡선으로부터 편기되는 점을 쉽게 발견할 수 없게 된다. 따라서 이러한 평가방법은 변형량증가에 따른 석출 시작점을 정확하게 평가하기보다는 변형량 증가에 따른 석출물 증가의 경향을 잘 나타낸다고 할 수 있었다.

Fig. 6은 변형속도가 석출에 미치는 영향을 조사하고자 pre-strain을 3%로 고정하고 변형속도를 $5 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 에서 $5 \times 10^0/\text{sec}$ 까지 증가시키면서 얻은 PTT곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 석출이 시작되는 점은 변형속도가 증가함에 따라 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 변형속도가 $10^2/\text{sec}$ 빨라짐에 따라 석출시간은 900°C 에서 약 100초 이상 빨라지는 것을 알 수 있었는데 이는 석출에 필요한 구동에너지 또는 석출을 위한 핵생성자리(nucleation site)가 변형속도가 빨라짐에 따라 증가하는 것으로 판단된다.

변형유기석출은 보통 열간 압연의 최종 단계에서 오스테나이트의 재결정을 지연시키는 중요한 역할을 하므로 석출 발생시기를 안다는 것은 실제 생산에 있어 중요하다. 석출을 위한 핵생성은 다음과 같은 3가지 위치에서 우선적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 첫째, 기존의 결정립계 둘째, 전위응집(tangled dislocation) 부분, 마지막으로 이미 석출되어 있는 석출물 주위등이다. 따라서 변형속도가 증가함으로써 결정립미세화 뿐만아니라 전위응집이 심화되므로 석출이 발생할 수 있는 자리가 많이 제공

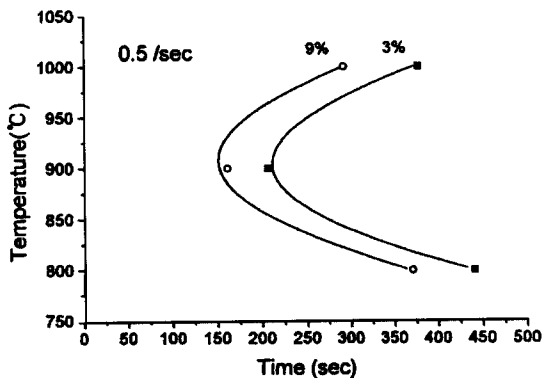


Fig. 5 The precipitation-time-temperature curves for V-microalloyed steel at the condition of $5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ and pre-strain was varied with 3% ~ 9%

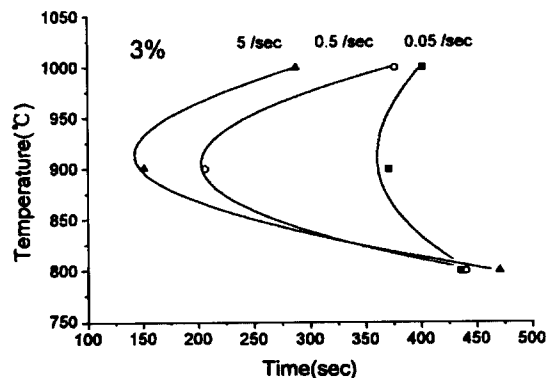


Fig. 6 The precipitation-time-temperature curves for V-microalloyed steel at the various strain rate condition of $5 \times 10^{-2}/\text{sec} \sim 5 \times 10^0/\text{sec}$

된다고 하겠다.

석출에서 요구되는 시간을 변형량 및 변형속도와 연관하여 Fig. 7에 나타내었다. 이때 변형온도는 석출이 가장 잘 일어나는 900℃이었고 변형량이 증가함에 따라 석출에 필요한 시간은 역시 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 압연이나 압출과 같은 고온변형공정에서 발생하는 변형유기석출 현상에 미치는 공정변수들의 영향을 Fig. 7에서 잘 알 수 있었다.

석출에 요구되는 시간은 변형량이 증가할수록, 변형속도가 빨라질수록 감소하였는데 이는 앞서 밝힌 바와 같은 이유이며 이러한 자료로써 모든 공정변수의 영향을 종합적으로 잘 나타낼 수 있었다.

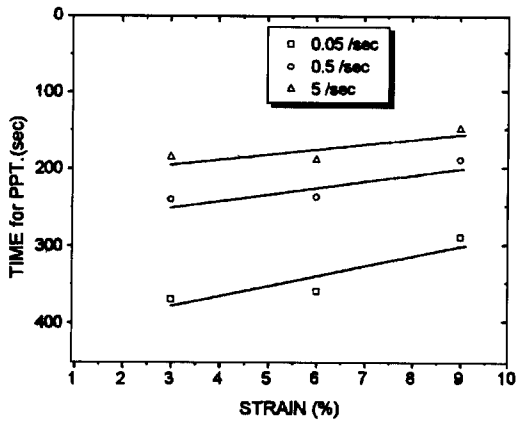


Fig. 7 Time for precipitation vs. strain curves of V-microalloyed steel showing the effects of strain rate at the temperature condition 900 °C

• 제어압연을 이용한 결정립 미세화

재결정 제어압연을 적용하여 결정립미세화를 극대화하고자 하여 Fig. 8과 같이 재결정이 더 이상 일어나지 않는 온도(T_{nr} , no recrystallization temperature)를 다단변형을 통해 구했으며 또한 패스변형량이 재결정이 발생하지 않는 온도(T_m)에 미치는 영향을 분석하여 Fig. 9에 나타내었다.

이러한 재결정이 멈추는 온도⁽¹⁴⁾를 아는 것은 실제 고온 가공중에 변형이 팬케이킹 변형량(pancaking strain)에 달하는 온도를 결정할 수 있게 하므로 제어압연 공정설계에 있어서는 주요변수이다. 그림에서 나타나듯이 변형량이 증가함에 따라 재결정이 발생하는 온도가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 변형량이 10%에서 50%로 증가함에 따

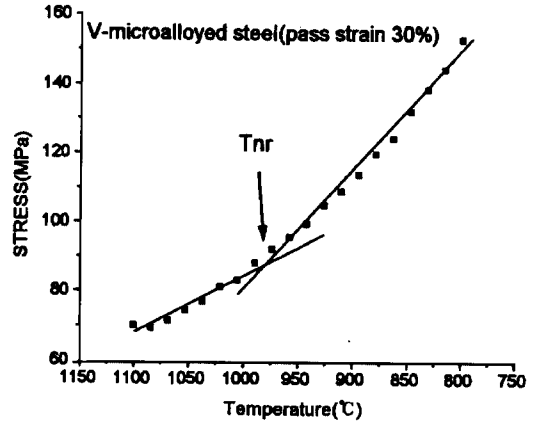


Fig. 8 Dependence of the pass stress on pass temperature during the multistage deformation

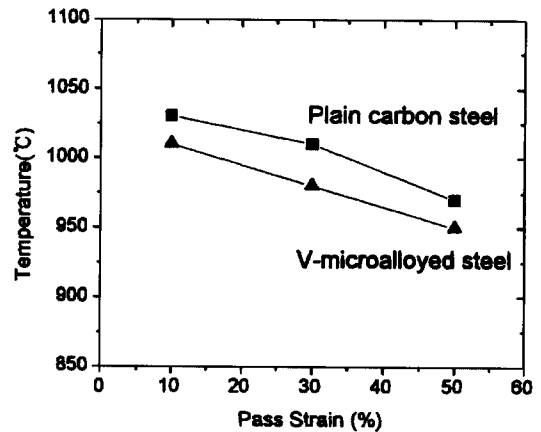


Fig. 9 Dependence of the T_{nr} on pass strain for carbon and V-microalloyed steels

라서 재결정이 발생하는 온도는 70℃정도 낮아져 온도범위는 넓어졌다. 다단변형시 온도가 70℃ 떨어지면 패스수는 3~5 패스가 진전되는 결과와 유사한데, 이는 동적인 상태에서 변형을 많이 받게 되면 동적재결정 뿐만아니라 정적연화정도가 증가하게 되기 때문이다. 패스와 패스의 단속시간중에 발생하는 정적연화정도는 주로 연화비율(fractional softening)을 통해서 구하는데 연화비율은 단속시간 변형온도 및 단속변형량에 영향을 받게 된다.⁽¹⁵⁾ 그러므로 패스변형량이 증가하면 T_{nr} 이 낮아지는 것은 동적인 변형 뿐만아니라 패스변형량의 증가에 따른 정적연화증가 또한 무시할 수 없는 영향이었다.

석출 및 재결정 정도를 조사한 후 이를 이용하여 모의압

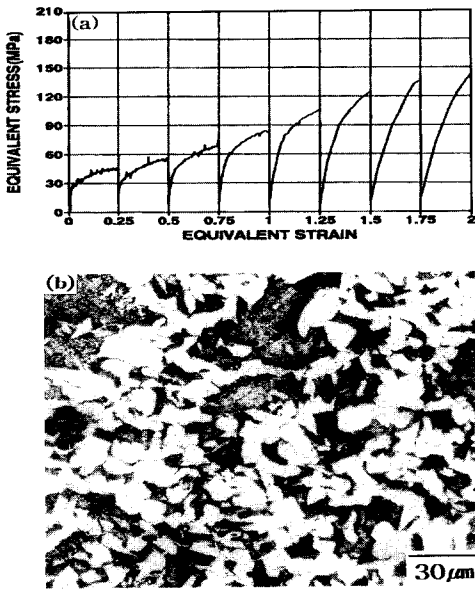


Fig. 10 Multistage stress - strain curve (a) and optical microstructure (b) for V-microalloyed steel with strain (ϵ_t) of 0.25. The decline is approximately 5°C/sec from 1000°C to 800°C for 10 sec intervals. The strain rate rises gradually from 0.1 to 3.0/sec

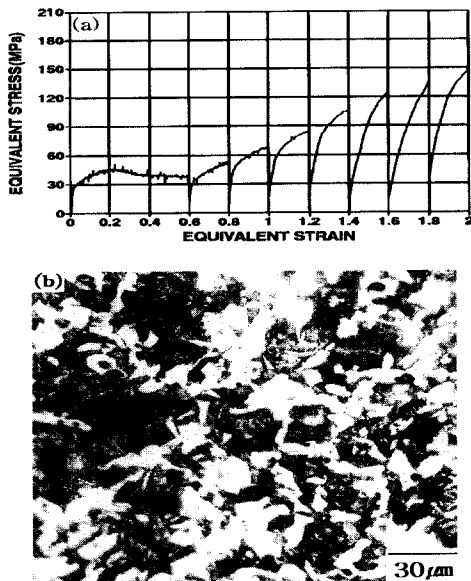


Fig. 11 Multistage stress - strain curve (a) and optical microstructure (b) for V-microalloyed steel with strain (ϵ_t) of 0.2 and $\epsilon_t = 0.6$. The decline is approximately 5°C/sec from 1000°C to 800°C for 10 sec intervals. The strain rate rises gradually from 0.1 to 3.0/sec

연실험한 결과를 Fig. 10~13에 나타내었다. 전 온도범위 구간에서 석출 및 재결정을 조절할 수 있도록 총 변형량, 변형온도 및 패스간 단속시간을 고정하고 패스 변형량을 조절하여 결정립미세화 효과를 얻고자 하였으며 제어 압연은 최종압연온도를 800°C로 정하고 총 변형시간을 5분으로 하였다. Fig. 10은 일반압연공정으로써 패스간 단속변형량의 변화없이 변형량을 일정하게 25%로 한 경우이다. 변형량이 고정되면 공정변수는 압연온도정도인데 변형온도가 고정되어 있으므로 최종압연후 결정립도가 미세화 되기에는 어느정도 한계가 있었다. Fig. 10 (b)에서 알 수 있듯이 이러한 공정에서의 최종 결정립도는 약 50 μm 였다.

Fig. 11에는 변형 초기에 임계변형량을 초과하는 큰 변형을 가한 공정을 나타내었다. 이 공정에서는 변형초기에 많은 변형을 주어 재결정을 발생시켜 초기 공정에서 이미 미세한 결정립을 만든 후 변형후반에 작은 변형만으로 결정립을 미세화 하고자 하였다. 이러한 공정에서는 패스초기 즉, 변형온도가 높고 변형속도가 느린 공정에서 변형이 많은데 이때는 패스변형량이 많더라도 그리 큰 압하력이 필요치 않다. 이러한 공정에서는 일반압연 공정과 유사한 조대한 결정립을 얻었는데 이는 석출온도보다 높은 온도에서의 가공으로 인해 첨가원소의 석출효과를 얻지 못하는 것 뿐만아니라 가공초기에 만들어진 재결정립이 패스와 패스사이의 단속시간에 성장하였기 때문이라고 판단되었다.

Fig. 11 공정과 정반대인 공정을 모의실험하여 Fig. 12에 나타내었다. 이는 변형후기에 가공경화효과 및 석출구간에서 큰 변형을 가함으로써 석출효과 또한 얻고자 함이었다. Fig. 10의 공정보다는 결정립도가 약간 미세하였고 따라서 이러한 공정은 어느정도의 효과를 거둘 수 있다고 판단되었다. 그러나 이러한 공정은 기존의 연구¹⁵⁾에서 밝힌바와 같이 동적재결정제어압연 공정보다는 결과가 만족스럽지 않았다.

변형이 진행하면서 변형량을 점진적으로 늘린 공정을 Fig. 13에 도시하였다. 변형이 공정 후반에 집중됨으로써 초반부에서의 재결정을 최대한 억제하고 공정 중반에서부터 시작되는 석출물 및 가공경화 효과를 최대한으로 얻을 수 있기 때문에 본 실험에서 가장 좋은 결정립미세화 효과를 얻었다. 재결정이 더이상 발생하지 않는 온도(T_m)와 석출이 시작하는 온도가 어느 정도 일치하였기 때문에 재결정이 일어나는 온도구간에서는 변형을 작게하고 석출발생 시점에서부터 점차적으로 변형량을 증가함으로써 결정

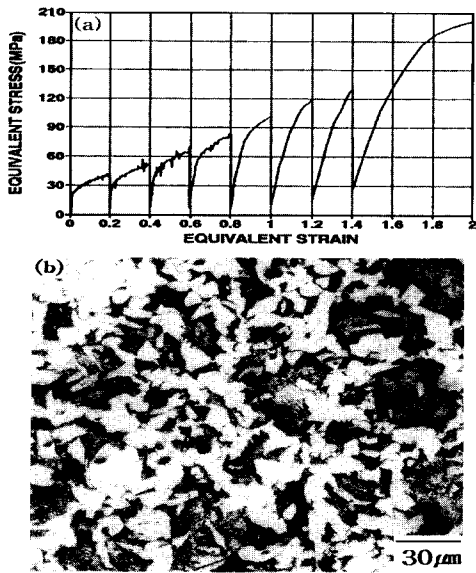


Fig. 12 Multistage stress - strain curve (a) and optical microstructure (b) for V-microalloyed steel with strain (ϵ_s) of 0.2 and $\epsilon_s = 0.5$. The decline is approximately 5°C/sec from 1000°C to 800°C for 10 sec intervals. The strain rate rises gradually from 0.1 to 3.0/sec

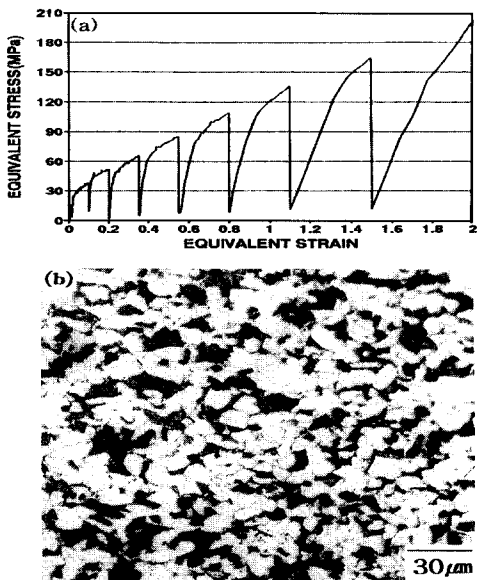


Fig. 13. Multistage stress - strain curve (a) and optical microstructure (b) for V-microalloyed steel with strain (ϵ_s) of 0.2 or 0.5. The decline is approximately 5°C/sec from 1000°C to 800°C for 10 sec intervals. The strain rate rises gradually from 0.1 to 3.0/sec

립미세화에 필요한 공정변수의 영향을 최대화 하였다. 공정후반에서 얻는 가공경화효과 및 석출효과로 인하여 결정립이 늘어나는 펜케이크(pancake)형태의 결정립이 페 라이트 및 필라이트 변태시 대단히 미세하게 되고 가공시에 발생한 석출물 또한 이러한 상변태시 핵생성자리를 제공하기 때문에 Fig. 13 (b)에서 알 수 있듯이 약 10 μm 의 미세한 결정립을 얻을 수 있게 된다.

이상의 실험결과에서 알 수 있듯이 고온변형공시 발생하는 재결정 석출 및 상변태등을 가공공정변수 즉 변형량 변형온도등으로 조절한다면 궁극적으로 원하는 재료의 특성을 얻을 수 있다고 판단된다.

4. 결론

V첨가구조용강의 변형유기석출 및 재결정현상을 이용하여 결정립을 미세화 시킬 수 있는 압연공정에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 석출은 열간가공변수 즉, 변형온도 변형속도 및 패스간 유지시간에 따라서 그 분포가 달라졌으며 이때 변형속도는 빨라질수록, 변형량은 증가할수록 많아졌고, 변형온도가 900°C일 때 석출물 분포는 최대가 되었다.

(2) 응력이완(stress relaxation) 곡선에서 석출이 시작되는 시간(P_s)으로 부터 얻은 PTT(precipitation-time-temperature)곡선은 전형적인 C 형태의 곡선이었고 이때 석출개시 시간은 변형량이 증가하고 변형속도가 빨라졌을 때 짧아졌다.

(3) 다단변형시 재결정을 일으키는 구간인 재결정영역은 패스변형량이 커지면 낮은 온도까지 넓힐 수 있었으며 따라서 제어압연에 적용이 용이하였다.

(4) 석출 및 재결정 현상을 이용하여 강재의 기계적특성을 향상시킬 수 있는 압연공정을 제안할 수 있었다. 최적의 공정은 변형초기에서는 재결정을 최소화하고 변형후기에 변형을 많이 주어 석출효과 및 결정립미세화를 극대화 시키는 공정으로서 결정립을 10 μm 이하까지 미세화시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 1994년도 포항종합제철 주식회사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H. J. McQueen and J. J. Jonas, "Role of Dynamic and Static Softening Mechanisms in Multistage Hot Working", 1985 ASM, 410~419.
- (2) J. G. Speer and S. S. Hansen, "Austenite recrystallization and carbonitride precipitation in microalloyed steels", 1989, Met. Trans. A, 20, 1, 25~38.
- (3) E. Valdes and C. M. Sellars, "Influence of roughing rolling passes on kinetics of strain induced precipitation on Nb(C, N)", Materials Science and Technology, 1991, July Vol. 7, 622~630.
- (4) J. M. Silveria e Silva and R. Barbosa, 1993, "Measurement of Kinetics of Nb(C,N) Precipitation Using Hot Torsion Testing", Scripta M. M, 29, 881~884.
- (5) K. Tiitto, G. Fitzsimons and A. J. Deardo, 1983, "The Effect of Dynamic Precipitation and Recrystallization on The Hot Flow Behavior of A Nb-V Microalloyed Steel", Acta Metall. 31, No. 8, 1159~1168.
- (6) W. J. Liu and J. J. Jonas, "Nucleation kinetics of Ti carbonitride in microalloyed steel", 1989, Met. Trans. A, 20, 4, 689~697.
- (7) K. A. Taylor and S. S. Handen, "The boron hardenability effect in thermomechanically processed, direct-quenched 0.2 pct C steel", 1990, Met. Trans. A, 21, 6, 1697~1709.
- (8) A. H. Advani, L. E. Murr and D. K. Matlock etc. "Deformation-induced microstructure and martensite effects on transgranular carbide precipitation in type 304 stainless steel", 1993, Acta metall., 41, 9, 2589~2600.
- (9) W. P. Sun, W. J. Liu and J. J. Jonas, "A Creep Technique for Monitoring MnS Precipitation in Si Steels", 1989, Met. Trans. A, 20, 12 2707~2715.
- (10) 조상현, 이성노, 권용환, 유연철, 1994, "V첨가구조용강의 동적재결정제어압연후 제어냉각에 관한 연구", 제8회 재료강도 심포지엄 33~43.
- (11) R. K. Amin, M. Kotchynsky, F. B. Pickering, "Effects of rolling variables on precipitation strengthening in high-strength low-alloy steels containing vanadium and nitrogen", 1981, Metals Tech., 6, 250~262.
- (12) W. J. Liu and J. J. Jonas, 1988, "A Stress Relaxation Method for Following Carbonitride Precipitation in Austenite at Hot Working Temperatures", Met. Trans. A, 19, June, 1403~1413.
- (13) V. Perovic, G. C. Weatherky and M. Leger, "The influence of prior deformation on hydride precipitation in zircaloy", 1992, Acta metall., 40, 2, 363~372.
- (14) D. Q. Bai, S. Yue, W. P. Sun and J. J. Jonas, 1993, "Effect of Deformation Parameters on The No-Recrystallization Temperature in Nb-Bearing Steels", Metall. Trans. A, 24, 2151~2159.
- (15) 권용환, 조상현, 유연철, 1995, "고온단속변형량이 단상Cu-Zn합금의 정적연화에 미치는 영향", 한국소성가공학회지, 4, 2, 169~179.