

## Mo첨가 열연강판의 반복 열처리 제어압연에 관한 연구

이정훈 · 홍승찬 · 이경섭  
한양대학교 공과대학 금속공학과

### A Study on Repeat Heat Treating and Controlled Rolling of Mo-alloyed Plate Steels

Jung Hoon Lee, Seung Chan Hong and Kyung Sub Lee  
Dept. of Metallurgical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

(1999년 4월 17일 받음, 1999년 6월 3일 최종수정본 받음)

**초 록** 결정립 미세화는 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있는 유일한 방법이다. 제어압연과 가속냉각은 공정 중에 재결정과 결정립 조대화 거동을 조절함으로써 기계적 성질을 향상시키는 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 반복열처리에 의한 반복상변태는 결정립 미세화 방법 중의 하나이다. 본 연구에서는 제어압연과 반복열처리를 복합 적용하여 그 효과를 관찰하였다. Mo 첨가효과와 공정변수의 효과를 관찰하기 위해 Mo이 첨가된 저탄소강 시편을 준비하여 Gleeble로 가공열처리 모의실험을 하였다.

Mo첨가는 결정립 조대화 온도를 상승시키고, 오스테나이트 재결정을 억제하는 효과를 나타내었다. 오스테나이트 결정립 미세화에 가장 효과적인 공정조건은 반복 열처리 제어압연을 두번 실시하는 것이고, 첫번째보다 두번째 압연율을 더 크게 하는 것이었다.

**Abstract** Grain refinement is the only strengthening mechanism that improves both strength and toughness. Controlled rolling and accelerated cooling techniques have been known to be effective method to improve the mechanical properties by controlling the recrystallization and/or grain coarsening during processing. Repeat phase transformation( $\gamma/\alpha$ ) by repeat heat treating is another way of grain refinement. In this study, a combined effect of controlled rolling and repeat heat treating was investigated. To study the effects of Mo addition and process parameters, Mo alloyed low carbon steels were prepared and thermomechanical controlled processes were simulated in the Gleeble system.

The Mo addition resulted in an increase of the grain coarsening temperature and suppress austenite recrystallization. The optimum condition for the refinement of austenite was obtained when the controlled rolling was performed twice with the same heat treatment condition, and reduction ratio of second pass was higher than that of first pass.

### 1. 서 론

결정립의 미세화는 Hall-Petch<sup>1)</sup> 관계에 의해 항복 강도를, Heslop-Petch 관계에 의해 인성을 증가시키며, 두 관계에서 항복 강도와 인성은 결정립도  $d^{-1/2}$ 에 비례한다. 결정립 미세화는 미량 합금 원소의 첨가, 가공 열처리법, 강냉 혹은 직접 소입 등의 방법, 그리고 반복적인 열처리방법에 의해  $\gamma/\alpha$  상변태를 여러번 반복하는 방법등에 의해 가능하다고 알려져 있다. 이러한 기존의 방법으로 얻을 수 있는 최종 페라이트 입도는 약 10 $\mu$ m 정도이다.<sup>2)</sup>

1950년대부터 강의 가공열처리법에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 많은 방법들이 제시되었다.<sup>2~6)</sup> 그중 제어압연과 냉각속도의 제어를 통한 방법이 실용적으로 인정받고 있다. 특히 제어압연은 HSLA 강의 발전에 큰 역할을 하고 있다. 초기 제어압연의 발전은 1960년대에 유럽에서, 1970년대에는 일본에서 많은 연구가 이루어졌다.

제어압연과 가속냉각을 통한 결정립 미세화는 페라이트로의 변태 전 오스테나이트 결정립의 크기와 모양의 제어에 의해 가능하다. 탄질화물의 석출은 고온 압연시 오스테나이트

재결정과 성장을 억제하여 마무리 압연 전의 오스테나이트 결정립을 최소화하고, 마무리 압연을 통해 페라이트로의 변태전에 미세하고 길게 연신된 오스테나이트 결정립을 얻게 된다. 이렇게 되면 페라이트 변태 시 페라이트 핵생성에 매우 유리한 조건을 만들어 미세한 페라이트 조직을 얻게 되는 것이다.<sup>7,9)</sup> 반복 열처리를 통한 결정립 미세화는 반복적인 상변태중의 페라이트 핵생성이 오스테나이트 입계 및 입내 변형밴드 등에서 이루어져 오스테나이트 결정립 하나에서 여러개의 페라이트 핵이 생성되어 변태 전 오스테나이트 결정립보다 미세한 페라이트를 얻는 것이다. 그러나 현재까지 제어압연과 가속냉각, 반복 열처리법 등을 복합 적용한 공정은 연구되지 않았으며, 이에 대한 효과도 밝혀지지 않은 실정이다. 또한 Mo은 열간압연시 오스테나이트 재결정을 억제하고 탄질화물을 형성하여 결정립 미세화를 돕는 원소로 알려져 있으나 많은 연구는 진행되지 않고 있다.<sup>9)</sup>

따라서 본 연구는 Mo이 재가열시 결정립 성장에 미치는 영향, 재가열 후 조압연시의 오스테나이트 재결정 거동, 반복 열처리 제어압연시 결정립 미세화에 미치는 오스테나이트 재결정과  $\gamma/\alpha$  상변태의 효과, 제어압연시 압연율의 영

향등의 상관관계를 규명하여, 미세 결정립 강재의 개발에 기여코져 하였다.

## 2. 실험 방법

### 시편제작

기존의 강재(ATOS55-자동차 구조용 열간압연 강판)와 유사한 합금에 Mo의 효과를 조사하고자 Mo이 첨가되지 않은 시편과 Mo석출물이 효과적으로 분포할 수 있는 함량으로 Mo 0.2wt%를 첨가한 시편을 설계하였다. 강도와 인성, 용접성 등의 향상을 위해 저탄소강을 기본으로 하며 오스테나이트 결정립 미세화에 효과가 있는 Nb을 0.05% 첨가하였다. 잉곳은 용해시의 산화 방지 및 고순도 유지를 위해 고주파 진공 유도 용해로 에서 용해하였다. 이 때 용해 순서는 Fe와 C를 장입하여 용해시킨 후 각각의 합금원소를 용탕에 투입하는 형식으로 하였으며, Mo을 마지막에 투입하였다. 조성은 잉곳의 중앙부에서 시편을 채취하여 분광분석하였다. 또한 균질화처리는 합금원소의 용해도를 고려하여 1200℃에서 1시간동안 유지하였다. 표 1은 시편의 화학조성이다.

### 결정립 성장 실험

재가열시 초기 오스테나이트 결정립의 성장을 최소화하기 위하여 결정립 성장실험을 실시하였으며, 이의 신뢰도를 높이기 위하여 각 온도별 XRD측정을 동시에 행하였다. 또한 Mo첨가에 따른 석출물의 석출을 TEM을 통해 확인하였다. 결정립 성장실험은 950℃~1200℃까지 50℃간격으로 각각 1분간 유지 후 소입하였으며, 3% nital로 5~6초간 에칭 후 금속광학현미경으로 사진 촬영 후 선형교차(ASTM E-112)으로 결정립 크기를 측정하였다.

### 재결정 거동 분석 및 재결정 정지온도 측정

제어압연의 조건을 설정하기 위해 재결정거동을 조사하였다. 부분재결정영역에서의 압연은 균일하지 못한 오스테나이트 결정립 크기를 갖게되므로 기계적 성질에 매우 나쁜 영향을 미치게된다. 따라서 재결정 정지온도의 측정은 매우 중요하다.

합금원소의 용해도를 고려하여 재가열 온도를 결정하였다. 1100℃로 재가열하여 5분간 유지하여 오스테나이트 처리를 행한 후 1100, 1050, 1000, 950, 900℃까지 냉각속도 1℃/s로 냉각 하여 각각의 온도에서 30%의 압연율로 압연을 실시하였으며 압연 후 정적 재결정을 위해 1℃/s로 50초간 냉각하고 급냉하였다. 광학 현미경을 이용하여 재결정 거동을 조사하였으며, 화상분석기를 이용하여 재결정 분율을 측정, 90%이상 재결정이 이루어지는 최종온도를 재결정 정지온도로 결정하였다.

### $\gamma/\alpha$ 변태 거동 분석

열팽창분석기를 이용하여 연속냉각 공정에서의  $\gamma/\alpha$  변태 시작 온도(Ar3)와  $\gamma/\alpha$  변태 종료 온도(Ar1)를 측정하고 완전 변태가 일어나는 온도와 시간을 측정하였다. 1100℃에서 5분간 유지하여 오스테나이트 처리를 행하고 900℃까지 공냉(냉각속도 1℃/s)한 후 강냉(냉각속도 30℃/s)하여 650℃까지 냉각하였다. 650℃에서 500℃까지 서냉(냉각속도 0.5℃/s)하여  $\gamma/\alpha$  변태가 일어나도록 하였다.

### 최적의 반복 열처리 제어압연 조건 설정

① 초기 제어압연을 통한 오스테나이트 결정립 미세화 효과를 고찰하기 위해 시편을 1100℃로 재가열하여 5분간 오스테나이트 처리를 행한 후 1℃/s의 속도로 냉각하면서 재결정 정지온도까지 각 패스 당 최초 시편 길이를 기준으로 공칭변형률 20%씩 1s<sup>-1</sup>의 변형속도로 3 패스압연 후 급냉하여 오스테나이트 결정립도를 측정하였다.

② 반복 열처리 제어압연의 효과를 고찰하기 위해 시편을 재가열하여 ①과 같은 방법으로(패스 당 압연율은 10%) 조압연을 실시 후 30℃/s의 냉각속도로 변태시작온도로 냉각하였고,  $\gamma/\alpha$  변태가 완전히 일어나도록 유지 후 다시 재가열(300℃/s)하여 오스테나이트 재결정이 일어나도록 한 후 초기 조압연을 반복 실시하였다. 최종 압연율은 60%를 유지하였다. 조압연 종료온도인 950℃에서 급랭 후 오스테나이트 결정립도를 측정하였다.

③ 2회 반복 열처리 제어압연시 압연율의 효과를 고찰하기 위하여 1차 압연시 40% (15%→15%→10%)의 조압연을 실시하였고, 재가열하여 2차 압연시 20% (10%→5%→5%)의 조압연을 실시하여 급냉 후 오스테나이트 결정립도를 측정하였다.

④ 반복 압연시 압연율을 1차 20%, 2차 40%로 하여 ③실험을 반복 실시하였다.

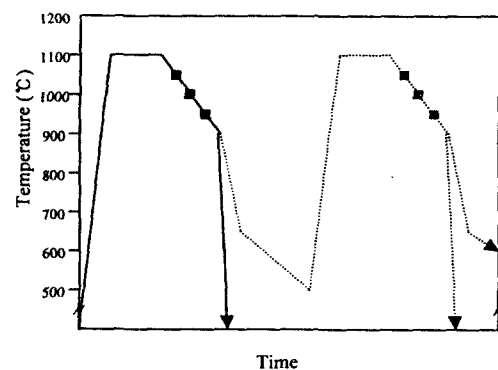


Fig. 1. Schematic diagram of the process.

Table 1. Chemical compositions of steels (wt.%)

Element Specimen	C	Si	Mn	P	S	Mo	Al	Nb
# 1	0.175	0.40	1.61	0.003	0.002	0.00	0.002	0.05
# 2	0.179	0.39	1.63	0.001	0.002	0.21	0.002	0.05

⑤ 최적의 반복 열처리 제어압연 횟수를 고찰하기 위해 위의 ②번 공정을 반복하여, 결정립도를 측정하고, 정상상태에 이르는 시기를 결정립도의 변화로 구하였다. 그림 1은 반복 열처리 제어압연의 경로를 나타낸 것이다.

일반 제어 압연 강판과 반복 열처리 제어압연 강판의 비교

같은 조성을 가진 시편으로 기존의 일반적인 제어압연과 반복 열처리 제어압연을 각각 실시하여 미세조직과 기계적 성질을 비교하였다.

일반적인 제어압연 공정은 1100℃에서 5분간 오스테나이트화 처리 후 1000℃와 950℃에서 각각 최초 시편길이 기준의 공칭변형률 30% (변형속도 1s<sup>-1</sup>)의 조압연을 실시하고 750℃와 700℃에서 각각 10%의 마무리 압연을 실시한 후 650℃까지 강냉 한 후 650℃에서 530℃까지 서냉 (냉각속도 0.5℃/s) 하여  $\gamma/\alpha$ 변태가 일어나도록 한 후 급냉하였다.

반복 열처리 제어압연 공정은 1100℃에서 5분간 오스테나이트화 처리 후 1000℃와 950℃에서 각각 10% (변형속도 1s<sup>-1</sup>)의 조압연을 실시하고 650℃까지 강냉한 후 650℃에서 500℃까지 서냉 (냉각속도 0.5℃/s) 하여  $\gamma/\alpha$ 변태 시킨 다음 재가열하여 1100℃에서 5분간 유지 후 다시 1000℃와 950℃에서 각각 20% (변형속도 1/s)씩 조압연을 실시하고 750℃와 700℃에서 각각 10%의 마무리 압연을 실시한 후 같은 방법으로  $\gamma/\alpha$ 변태가 일어나도록 한 후 소입하였다.

광학사진으로 이들 시편의 최종 페라이트 결정립도를 관찰 후 측정하였으며, Rockwell 경도기(B scale)로 경도 시험을 실시하였다. ABI(Automated Ball Indentation) 측정기<sup>20-23)</sup>를 통해 모의 인장 시험을 실시하여 UTS, YS 값을 비교 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 결정립 성장 실험

그림 2와 같이 Mo이 첨가되지 않은 시편은 1100℃에서, Mo이 0.2wt.% 첨가된 시편은 1150℃에서 각각 오스테나이트 결정립이 급격히 성장하였다. 결정립 조대화가 일어나기전의 평균 결정립 크기는 25 $\mu$ m였고, 조대화가 일어난 후의 평균 결정립 크기는 39 $\mu$ m였다. 이러한 급격한 오스테나이트 결정립의 조대화는 온도에 따른 석출물의 용해도차로 인한 결정립계의 고정효과가 소멸된 결과로 사료되며, 그림 3과 같이 각 온도별로 급냉한 시편의 XRD 측정결과와도 일치하였다. Mo이 첨가되지 않은 시편은 1100℃ 이상에서 Nb 탄질화물의 피이크가 사라졌으며, Mo이 첨가된 시편은 1100℃ 이상에서 Nb 탄질화물의 피이크가, 1150℃ 이상에서 Mo 탄질화물의 피이크가 사라졌다. 따라서, 0wt.%Mo강의 결정립 조대화온도 1100℃였으며, 0.2wt.%Mo강의 결정립 조대화온도는 1150℃였다. 이러한 결과들로부터 재가열시 결정립의 조대화를 억제할 수 있는 재가열 온도를 1100℃로 결정하였다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 Mo석출물이 용해되지 않는 온도범위인 1100℃ 시편에서 30nm크기의 미세하게 분포된 MoN을 TEM을

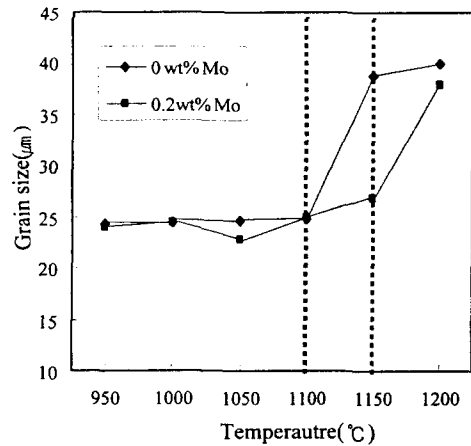


Fig. 2. Austenite grain size as a function of the austenitizing temperature.

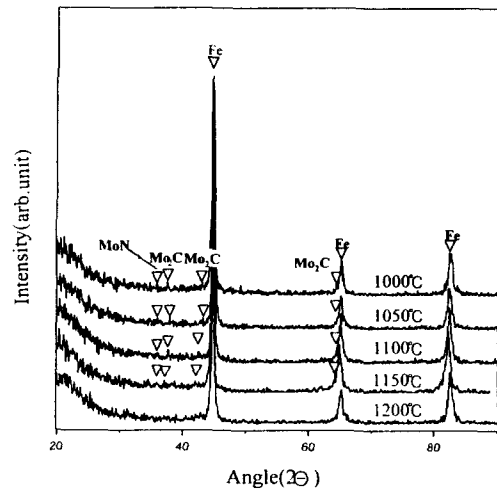


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Mo alloyed steels as a function of the austenitizing temperature.

통해 확인하였다.

#### 재결정 거동 분석 및 재결정 정지온도 측정

그림 5는 압연온도에 따른 오스테나이트 재결정 분율을 나타낸 것이다. 연속 냉각 공정에서 Mo이 첨가되지 않은 시편은 950℃ 이상에서 압연한 경우 재결정이 완전히 이루어졌으며, 900℃에서는 75% 재결정이 이루어졌다. Mo이 0.2wt.% 첨가된 시편은 1000℃ 이상에서 압연한 경우 재결정이 완료되었으며, 950℃에서는 91%가 재결정되었다. 그러나 900℃에서 압연시에는 52%만이 재결정되어 부분 재결정 영역이 존재한다는 것을 알 수 있었고, 그림 6에서와 같이 950℃에서 Mo이 첨가되지 않은 시편과 Mo 0.2wt.% 첨가된 시편을 비교해 보면 Mo 첨가 시편에서 부분 재결정 영역을 관찰할 수 있었고, 이 결과는 Mo이 오스테나이트 재결정을 억제하기 때문으로 사료된다. Mo에 의해 재결정 정지 온도가 증가하게 되면 미세결정 영역에서 압연이 이루어지게 되어 결정립 연신과 변형대와 같은 입내 새로운 페라이트 핵생처가 생성되어 페라이트 결정립 미세화에 유리한 조건이 된다. 따라서 본 연구에서는 Mo 첨가강의 재결정 정지 온도를 950℃로 정하였다.

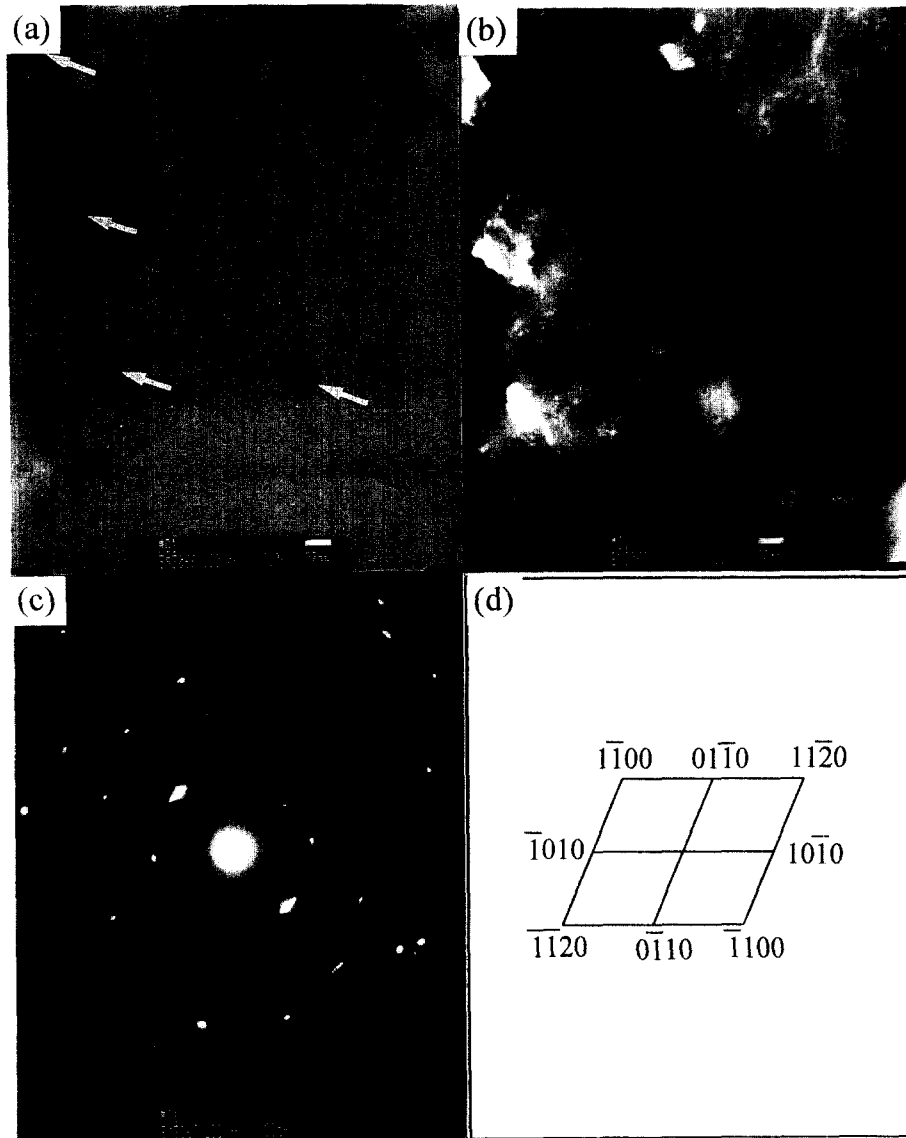


Fig. 4. TEM photograph showing MoN austenitized at 1100 (a) a bright field image (b) a dark field im (c) diffraction pattern (d) indexing of SADP(zone axis:[0002])

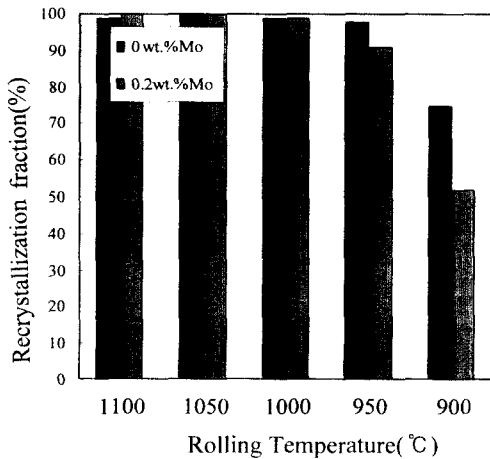


Fig. 5. The austenite recrystallization fraction as a function of rolling temperature.

**$\gamma/\alpha$  변태 거동 분석**

그림 7과 같이 열팽창 분석기를 이용하여 측정한 평균 변태 시작 온도 ( $Ar_3$ )는 620°C였으며, 변태 종료 온도 ( $Ar_1$ )는 530°C였다. 또한 광학현미경을 통한 미세조직 관찰결과 530°C 이하에서 완전변태가 일어났다. Mo는 페라이트 안정화원소로써, Mo의 첨가는  $\gamma/\alpha$  변태온도 ( $A_3$ )를 높이는 역할을 하는 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 오히려 변태온도가 낮아졌다. 이는 오스테나이트 안정화원소인 Mn(1.63wt%)에 비하여 Mo의 함량이 0.2wt%로 상대적으로 적었고, 오스테나이트가 페라이트와 펄라이트로 분해될 때 Mn, Mo, Si 등의 치환형 원소들로 인하여 평형분배 (equilibrium partitioning) 하는데 확산이 느리게 일어났기 때문으로 사료된다. 이 결과로부터 반복 열처리시 530°C를 재가열 시작온도로 하였다.

**최적의 반복 열처리 제어압연 조건 설정**

그림 8은 반복 열처리 횟수에 따른 오스테나이트 결정립

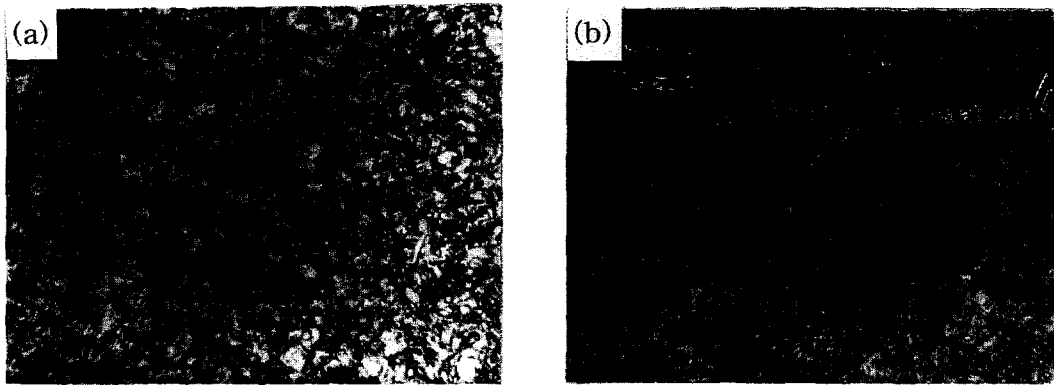


Fig. 6. Optical micrographs showing austenite recrystallization after rolling at 950°C (a) Mo 0% (b) Mo 0.2%

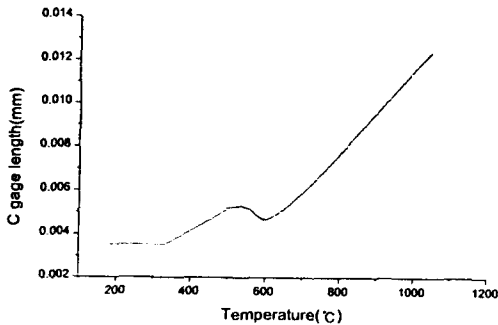


Fig. 7. The diagram showing  $\gamma/\alpha$  phase transformation temperature of Mo alloyed steel.

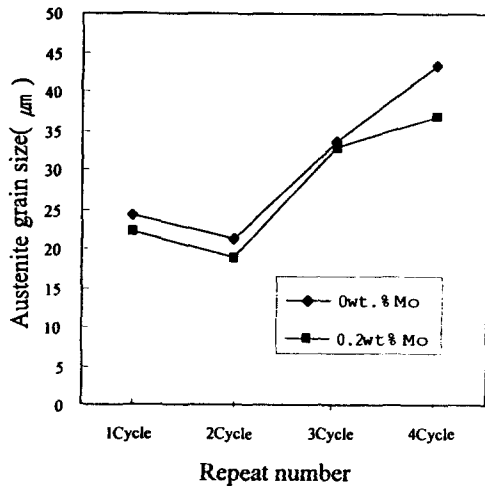


Fig. 8. Austenite grain size as the number of heat treatment cycle.

크기의 변화를 보여준다. 반복 열처리 제어압연 횟수에 따라 결정립 크기가 가장 작아지는 구간이 존재하였다. 이 실험치는 반복 열처리 (Repeated austenitizing) 효과만을 측정한 M.A.Hansen<sup>13)</sup>의 결과와도 일치하였다. 1회의 조압연을 통해 얻어진 오스테나이트 결정립의 크기는 0wt.% Mo강에서 24 $\mu$ m, 0.2wt.%Mo강에서 22 $\mu$ m였다. Mo첨가가 제어압연시 재결정 및 결정립 성장을 억제하였기 때문에 결정립 크기의 차이를 보이는 것으로 사료된다. 반복 열처리

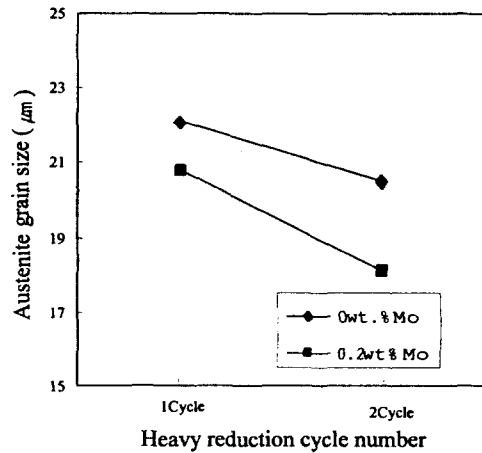


Fig. 9. Austenite grain size with a heavy reduction.

제어압연을 2회 실시한 경우 오스테나이트 결정립 크기가 각각 21 $\mu$ m, 19 $\mu$ m로 미세화되었다. 이 결과는 오스테나이트의 재결정 효과, 그리고, 상변태 효과가 복합적으로 작용했기 때문이다. 그러나 반복 열처리 제어압연을 3회 실시한 경우 오스테나이트 결정립 크기가 각각 33 $\mu$ m, 31 $\mu$ m로 조대화 되었으며, 4회 경우는 각각 43 $\mu$ m, 36 $\mu$ m로 더욱 조대화 되었다. 반복적으로 열처리와 압연을 실시하였음에도 불구하고 이와 같이 오스테나이트 결정립의 조대화가 일어난 이유는 반복 횟수가 늘어남에 따라 횟수 당 압연율이 작아져서 재결정 효과가 줄어들었고, 또한 높은 재가열 온도와 긴 열처리로 인해 결정립이 성장할 충분한 여유가 있었기 때문으로 생각된다. 따라서 제어압연을 실시할 때 압연율과 압연 횟수는 결정립 크기에 큰 영향을 미치는 인자로 작용한다. 이 결과는 압연율의 변화에 따른 미세조직을 관찰한 Lu Wenzeng<sup>12)</sup>의 실험치 와도 일치하였다.

2회 반복 제어압연 시 압연율을 달리한 시편은 1회의 압연율을 더 높게 했을 때 오스테나이트 결정립 크기가 각각 21 $\mu$ m, 20 $\mu$ m였으며, 2회의 압연율을 더 높게 했을 때 오스테나이트 결정립 크기가 각각 20 $\mu$ m, 18 $\mu$ m였다. 이 결과를 그림 9에 나타내었으며, 이 결과는 1차 압연시 보다 2차 압연 시에 압연 전 오스테나이트 결정립이 더 미세하여 재

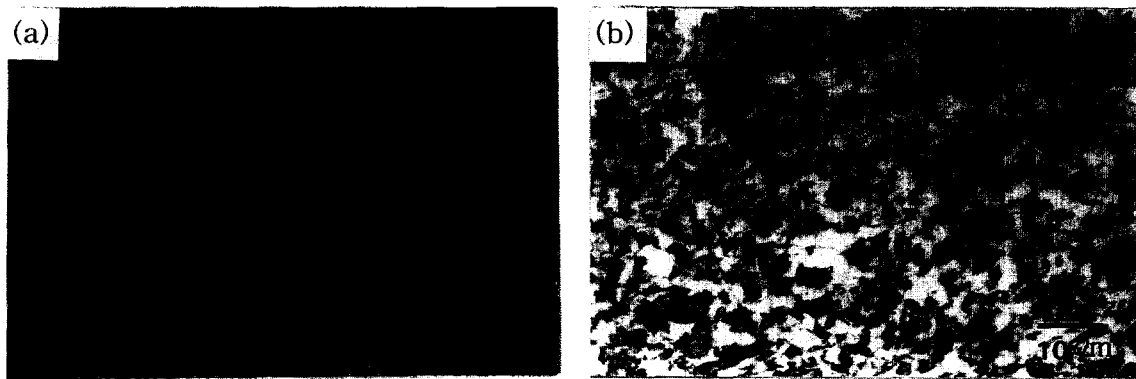


Fig. 10. Optical micrographs showing ferrite grain size ( $\times 400$ ) (a) Conventional controlled rolling (b) Repeat heat treated controlled rolling.

결정 효과가 더 크게 나타났기 때문이다.

재결정의 구동력은 변형에 의한 에너지가 결정격자 내부에 결함의 형태로 저장된 축적에너지이다. 상온에서 소성변형에 의해서 형성된 가장 중요한 두 가지 결함은 전위와 공공인데, 전체 내부에너지의 80-90%는 일반적으로 전위의 형성에 기인한다. 따라서 결정립도가 감소함에 따라 재결정 효과가 증가하는 이유는 결정립계의 증가에 따라 입계와 전위와의 반응이 촉진되어 전위가 많이 생성되어 재결정 구동력을 증가시키기 때문이다.<sup>13)</sup>

따라서 본 실험을 통해 결정된 최적의 반복 열처리 제어압연 조건은 반복횟수 2회, 압연율은 1회보다 2회때 높게 설정하는 것이 재결정효과를 증대시킬 수 있어 오스테나이트 결정립 미세화에 좋을 것으로 생각된다.

일반 제어압연과 반복 열처리 제어압연의 비교

같은 총 압연율로서 일반 제어압연과 반복열처리 제어압연을 비교하여 미세조직을 관찰 하였다. 그림 10과 같이 광학현미경 관찰결과 반복열처리 제어압연한 시편이 보다 더 미세한 조직을 나타내었다. 최종 페라이트의 평균 결정립 크기는 일반 제어 압연으로 제조된 시편에서는 5.6 $\mu\text{m}$ 였으나, 반복 열처리 제어압연을 실시한 경우는 4.8 $\mu\text{m}$ 였다.

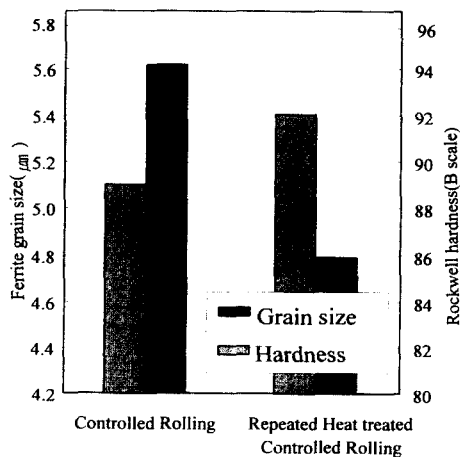


Fig. 11. Ferrite Grain Size and Rockwell hardness as a function of the process.

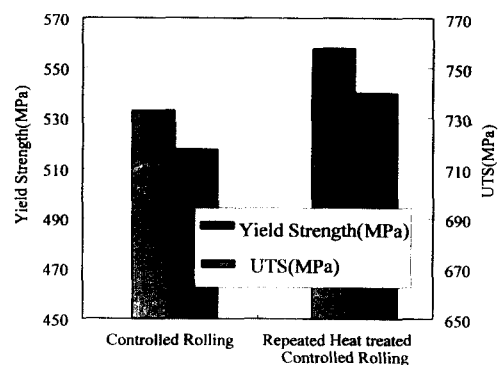


Fig. 12. YS and UTS of Mo alloyed steel measured by ABI.

그림 11에 두 공정에 의한 페라이트 결정립과 경도치를 나타내었는데, 결정립 크기가 감소할수록 경도치가 증가 하였음을 보여준다. Rockwell 경도기로 측정된 각각의 시편의 경도값은 Rockwell B scale로 일반적인 제어압연으로 제조된 시편의 경우 89였으며, 반복 열처리 제어압연으로 제조된 경우 92였다. 반복열처리 제어압연을 통해 반복된 오스테나이트 재결정과 상변태 효과로 인하여 페라이트로의 변태 전 오스테나이트의 결정립이 일반 제어압연의 오스테나이트 결정립보다 미세화 되었기 때문으로 사료된다. 이는 기존의 반복 열처리 혹은 제어압연의 단독 공정보다 본 연구에서 복합 적용된 공정이 결정립 미세화에 더 효과적임을 보여준다. 두 시편의 화학조성은 같았으며, 미세조직도 페라이트-펄라이트 구조로 동일하였기 때문에 두 시편의 기계적 성질 값의 차이는 페라이트 결정립 크기에 의한 결과임을 알 수 있다.

기계적 성질은 ABI(Automated Ball Indentation) 시험으로 일축인장값을 측정하였는데, 그림 12와 같이 UTS값은 734MPa에서 759MPa로 증가하였고, YS값은 518MPa에서 540MPa로 증가하였다. 변<sup>19)</sup> 등에 의하면 ABI값으로부터 계산된 인장강도 값과 실제 일축인장시험의 인장강도 값의 오차는 약 6% 미만인 것으로 보고되었다.

반복적으로 오스테나이트 정 과 제어압연을 실시하는 공정은 실제 조업에서 강판이 냉각 존을 지난 후 잠열에 의해

온도가 복원되어 상승하므로 2회 반복까지는 적용이 가능하다고 사료되지만, 강판의 크기에 제한이 있고, 정확한 온도제어가 쉽지 않아서 기술적용에 대한 연구가 병행 되어야 할 것이다. 그러나 반복 열처리 제어압연의 모의 실험을 통하여 그 가능성이 확인 되었고, 기존의 공정에 의한 조직보다 약 14% 미세한 페라이트 결정립을 얻을 수 있었으며 강도 역시 약 3%가 향상되었다.

#### 4. 결 론

1) Mo첨가로 인해 형성된 Mo-탄질화물은 결정립계 고정효과로 결정립 조대화 온도를 높이고, 오스테나이트 재결정을 억제하였다.

2) 반복열처리 제어압연을 실시한 결과 2회까지는 초기 오스테나이트 결정립이 미세하여졌으나, 3회부터는 조대화를 보였다.

3) 반복열처리 제어압연시 압연율을 달리한 결과 첫 번째 공정에서보다 두 번째 공정에서 압연율을 높였을 때 더 미세한 오스테나이트 결정립을 얻을 수 있었으며 이는 미세한 오스테나이트에서 재결정효과가 더 커지기 때문이다.

4) 오스테나이트 결정립 미세화에 최적의 공정은 반복열처리 제어압연을 2회 반복하고 첫 번째 압연시 압연율 보다 두 번째 압연율을 더 높게 실시 하였을 때였다.

5) 반복열처리 제어압연으로 제조된 시편의 평균 페라이트 결정립 크기는 약  $4.8\mu\text{m}$  로 일반적인 제어압연 공정 ( $5.6\mu\text{m}$ )으로 제조된 경우보다 약 14% 미세해 졌고, 기계적 성질은 인장강도가 약 3% 향상되었다.

#### 참 고 문 헌

1. S.S. Hansen : Fundamentals of Microalloying Forging Steels, 155, Warrendale, PA, Metallurgical Society of AIME, (1987)
2. K.J. Irvine, F.B. Pickering and T. Gladman : JISI **205**, 161 (1967)
3. H. Nordberg and B. Aronsson : JISI **206**, 1263 (1968)
4. R.P. Smith : Trans. Met. Soc. of AIME **224**, 190 (1962)
5. T. Gladman : Proc. Roy. Soc. **294**, 298 (1966)
6. M. Fukuda, T. Hashimoto and K. Kunishige : Microalloying 75-History and Theory, 115, Unicon Carbide Co., New York, (1973)
7. G. Krauss : "Principles of Heat Treatment of Steels" ASM, Metals Park OH, (1980)
8. 이정훈, 안병규, 이정섭, 대한금속학회지, **36** (8), 1338, (1998)
9. L.J. Cuddy : Metall. Trans, **12A**, 1313 (1981)
10. Tadeusz Siwecki, Stanislaw Zajac and Bertil Ahlstrom : "Physical Metallurgy of Direct-Quenched Steels", **213 TMS**, (1993)
11. M.A. Hansen, R.K. Weiss, and S.W. Thompson : Physical Metallurgy Direct-Quenched Steels, **279 TMS**, (1992)
12. Lu Wenzeng and Zhang Weidong : HSLA Steels, **155 TMS**, (1990)
13. J.D. Verhoeven : Fundamentals of physical metallurgy, **328** (1975)
14. I. Kozasu : "HSLA Steels. Technology and Applications" **593**, A.S. M., Metals Park, Ohio, (1984)
15. L.J. Cuddy : Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite, 129 A.J. DeArdo et al., Ed., The Metallurgical Society of AIME, (1982)
16. G.R. Speich, L.J. Cuddy, C.R. Gordon, and A.J. DeArdo : Phase Transformations in Ferrous Alloys, A Marder and J. Goldstein, Ed., 341 The Metallurgical Society of AIME, (1984)
17. B.K. Ahn, K.S. Lee : Bull. Kor. Inst. Met. & Mater., **9**, 255 (1996)
18. W.Y. Joo : Bull. Kor. Inst. Met. & Mater., **10**, p636 (1997)
19. T.S. Byun : Proc. of the tenth conference on mechanical behaviors of materials Ansan, Korea, October, **11-12** (1996)
20. F.M. Haggag, T.S. Byun, J.H. Hong, P.Q. Miraglia : Scripta Materialia, **38**, 645 (1998)
21. T.S. Byun, J.W. Kim, J.H. Hong : Journal of nuclear materials, **252**, 187 (1998)
22. J.H. Lee, D.I. Kwon : J of the Korean Inst. of Met. & Mater. **35** (12), 1616 (1997)