

## 재결정제어압연용 저탄소강의 연속냉각 상변태거동에 미치는 Nb 첨가효과

이상우 · 주용용\*

금오공과대학교 신소재시스템공학부  
\*포항제철(주) 기술연구소 후판연구그룹

### Effect of Nb Addition on Phase Transformation Behavior during Continuous Cooling in Low Carbon Steels for Recrystallization Control Rolling

Sang Woo Lee and Wung Yong Choo\*

Division of Advanced Materials and Systems Engineering, Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701  
\*Plate, Rod & Welding Research Group, Technical Research Laboratories, POSCO, P.O.Box 36, Pohang 790-600

**Abstract** Effect of Nb addition on the phase transformation behavior was studied through continuous cooling transformation tests after reheating(reheating CCT) and deforming(deforming CCT) the 0.07%C-1.3%Mn-0.015%Ti-(0-0.08)%Nb steels. Transformation temperatures for deforming CCT were lower than those for reheating CCT, and the critical cooling rate for bainite transformation during deforming CCT was lower than that during reheating CCT. These enhanced hardenability for deforming CCT was considered to come from the sufficient solid solution of Nb in austenite during high temperature reheating before deformation. With Nb addition, the phase transformation temperature decreased, the bainite formation was enhanced, and the hardness of steel increased. Furthermore, these phenomena were more remarkable for deforming CCT than for reheating CCT. From the results, Nb-Ti bearing low carbon steel was considered to be a very favorable alloy system with good strength/toughness balance by recrystallization control rolling process.

(Received July 24, 2000)

**Key words:** Low carbon steel, Microalloyed steel, Recrystallization control rolling, Continuous cooling transformation, Hardenability, Microstructure

#### 1. 서 론

최근 들어 국내의 산업이 발달함에 따라 고강도 구조용 강판의 수요는 꾸준히 증가하고 있으며, 또한 강판의 품질에 대한 수요가의 요구는 점점 까다로워지고 있다[1]. 이러한 변화에 대응하기 위하여 철강 제조업계는 보다 품질 좋은 강판을 생산하기 위한 연구개발을 지속적으로 하고 있다. 우수한 품질의 구조용 강판을 제조하는 대표적인 압연 방법으로는 제어압연(CR: controlled rolling)을 들 수 있다. 하지만 CR은 저온에서 많은 압하를 주어 오스테나이트(austenite)를 미재결정 상태로 해야 하기 때문에 압연 시간이 길어지므로 생산성 측면에서는 불리하다. 재결정제어압연(RCR: recrystallization control rolling)은 오스테나이트가 재결정되는 높은 온도에서 큰 압하를 가하여 오스테나이트 재결정립을 미세화시킴으로써 CR과 대등한 페라이트

(ferrite) 핵생성자리를 만들어 냉각 중에 생성되는 페라이트를 미세화시키는 방법이다[2-4]. RCR에서는 재가열할 때와 압연 중에 일어날 수 있는 결정립 성장을 억제해야 하는 것이 필수적이다. 일반적으로 탄소강에서 재가열이나 압연 중의 입성장을 막는 데는 Ti 단독 첨가가 가장 효과적인 것으로 알려져 있다[2-4]. 그러나 Nb을 Ti와 함께 첨가하는 경우에도 입성장 억제효과가 큰 것으로 보고되고 있다[5-7]. 지금까지 Nb은 주로 저온 제어압연에서 미재결정 압하를 줄 수 있는 온도구간을 넓히는 데 이용되어 왔다. Nb이 첨가되면 재결정온도는 상승하여 미재결정 압연을 하기가 수월해지기 때문이다. 재결정온도 이하에서 압연하면 오스테나이트가 재결정되지 못하고 압연방향으로 연신된 상태로 존재하게 되고, 또한 오스테나이트 내부에 변형대(deformation band) 등의 결함(defect)이 많이 증가하게 되고 따라서 페라이트의 핵생성수가 급증하게 된다. Nb이 0.02% 정

도 첨가된 저탄소강의 경우 약 990°C 이하에서는 미세 결정되는 것으로 알려져 있다[8]. 즉, Nb은 압연 중에 고용 상태로 오스테나이트 계면에 존재하거나 질소와 결합하여 수 나노미터(nm)로 미세한 변형유기 석출물(strain-induced precipitate)를 생성한다. 고용 상태의 Nb과 미세한 석출물은 압연 후에 일어나는 재결정을 억제하여, 오스테나이트를 pan-cake형태로 유지하고, 이로부터 생성하는 페라이트를 미세화 시키는 역할을 한다. 또한 일반적으로 Nb은 오스테나이트-페라이트 변태를 지연시키는 것으로 알려져 있으나, 연구자에 따라 변태에 미치는 Nb의 역할에 대한 상세 이론은 각각 다르다[9-10]. Ohtsuka 등[9]은 Nb이 탄소의 활동도(activity)를 감소시켜 페라이트 변태를 지연시켜 Ar<sub>3</sub> 온도를 낮추는 것으로 보고하고 있다. 반면 Thomas 등[10]은 Nb 원자가 오스테나이트/페라이트 계면에 편석되어 계면의 이동속도를 늦춤으로써 변태가 지연된다고 하였다(solute drag like effect). 이와 같이 Nb이 탄소강의 상변태에 미치는 효과에 대해서는 많이 연구되어 있지 않으며, 다소 상이한 이론들이 존재한다. 따라서 탄소강에서 Nb 첨가가 상변태 거동에 미치는 효과를 명확히 하는 것은 경제적이고 품질이 우수한 고강도 강판을 제조하기 위해서 필요하다. 위에서 언급하였듯이 RCR에서는 압연을 재결정 영역인 고온에서 진행되므로, 열간압연 중에 석출물로 존재하는 Nb의 양은 매우 적을 것으로 기대된다. 따라서 RCR에서는 Nb을 미세결정 영역을 확대하는 데에 이용하는 것이 아니라, 고용 상태로 존재하는 Nb이 상변태에 미치는 효과를 이용하여 미세조직을 적절하게 제어하는 데에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 Ti을 함유한 0.07%C-1.3%Mn-0.015%Ti의 저탄소강에 Nb 양을 0~0.08%의 범위로 첨가량을 바꾼 4종류의 강들에 대한 연속냉각변태(CCT: continuous cooling transformation temperature) 시험을 통하여, 미세조직과 상변태 온도 및 경도값을 측정하고 CCT도를 작성함으로써, Ti을 함유한 저탄소강에서 상변태 거동에 미치는 Nb의 효과를 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 소재준비

30 kg 용량의 진공용해로를 이용하여 Table 1의 조성을 갖는 강괴(ingot)를 준비하였다.

**Table 1.** Chemical compositions of specimens used in this study

Symbol of Steel	Chemical composition(wt%)					
	C	Si	Mn	Ti	Nb	Fe
A	0.072	0.26	1.32	0.015	tr	bal.
C	0.075	0.25	1.31	0.015	0.025	bal.
D	0.070	0.25	1.32	0.015	0.039	bal.
F	0.071	0.25	1.33	0.016	0.078	bal.

\* P : 0.002~0.003, S : 0.005  
soluble Al : 0.032~0.040

### 2.2. 재가열 CCT 시험

강괴를 1250°C에서 1시간 가열한 후 상온까지 냉각하고, 이로부터 가공한 10Φ\*110 mm의 봉상 CCT시편을 열간변형모사시험기(hot deformation simulator)인 Gleeble 1500에서 10°C/s의 승온속도로 980°C로 가열하고 3분간 유지한 후, 1, 3, 7, 12, 20, 30°C/s로 상온까지 냉각하면서, C-스트레인 게이지(strain gage)로부터 측정되는 온도에 따른 시편의 직경변화를 DA(Data Aquisition) 시스템을 이용하여 기록하고, 이로부터 변태온도를 측정하였다. 또한 광학현미경 조직을 관찰하고, 10 kgf의 하중으로 비커스(Vickers) 경도값을 측정하여 CCT도 작성에 이용하였다.

### 2.3. 가공 CCT 시험

강괴를 1250°C에서 1시간 가열한 후 상온까지 냉각하고, 이로부터 가공한 10Φ\*110 mm의 양끝에 나사를 가공한 봉상 CCT시편을 Gleeble 1500에서 10°C/s의 승온속도로 1250°C로 가열하고 3분간 유지한 후, 2°C/s로 1100°C까지 냉각하여, 이 온도에서 공칭변형을 30% 압축변형을 가하고, 다시 2°C/s로 냉각하여 시편의 온도가 980°C에 이르면 재차 30%의 압축변형을 가하였고, 압축 후 10초간 유지한 후, 1, 3, 7, 12, 20, 30°C/s로 상온까지 냉각하여 변태온도를 측정하였으며, 시험 후 광학현미경조직을 관찰하고 비커스 경도값을 측정하여 CCT도를 작성하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1. 재가열냉각시 미세조직변화

Figs. 1~2는 각각 A강 및 D강의 재가열CCT 시편의 광학현미경 조직사진이다. Fig. 1은 A강의 경우로서, 1°C/s의 경우에는 다각형(polygon)에 가까운 형태의 페

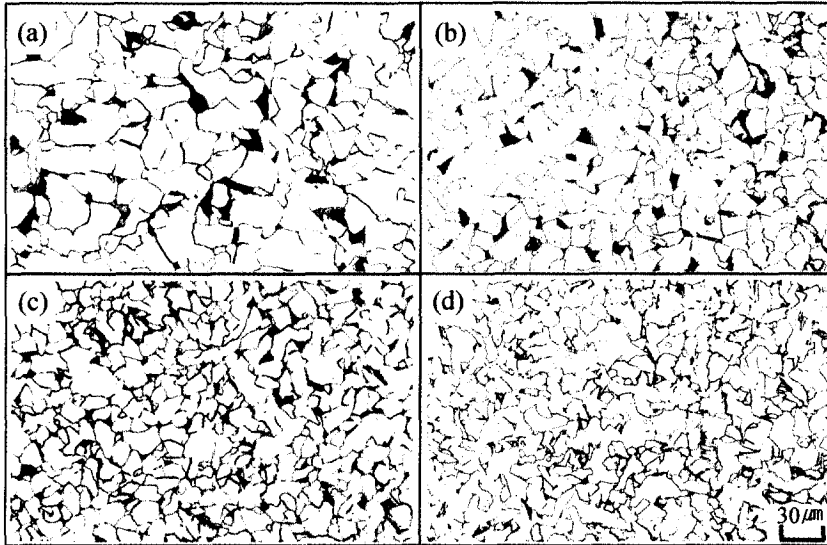


Fig. 1. Optical micrographs showing the change of microstructure with cooling rate when the steel A was reheated at 980°C and then cooled to room temperature at 1°C/s (a), 3°C/s (b), 7°C/s (c) and 20°C/s (d).

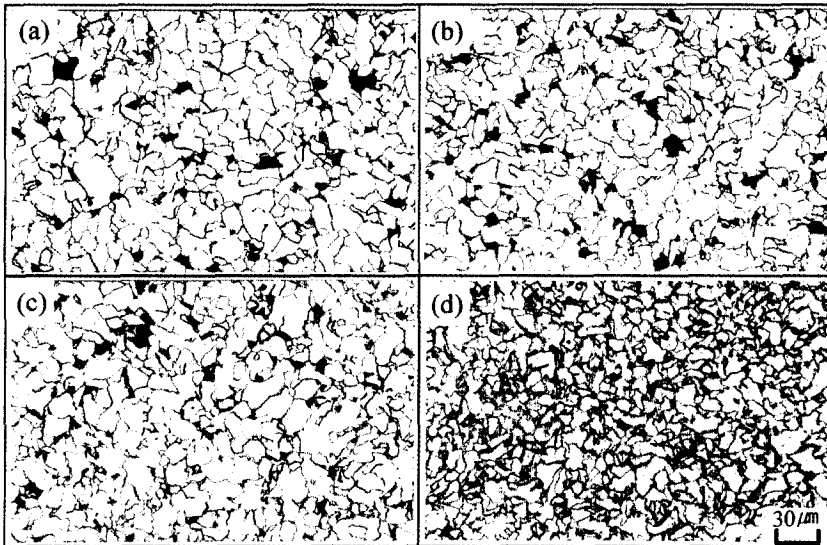


Fig. 2. Optical micrographs showing the change of microstructure with cooling rate when the steel D was reheated at 980°C and then cooled to room temperature at 1°C/s (a), 3°C/s (b), 7°C/s (c) and 20°C/s (d).

라이트가 약 20  $\mu\text{m}$ 의 크기로 석출해 있고 2차상은 완전한 펄라이트(사진에서 검게 보이는 상)이다. 냉각속도가 증가하면 페라이트의 입도는 작아져서 10  $\mu\text{m}$  이하로 미세해지며, 12°C/s까지의 2차상은 모두 펄라이트이다. 냉각속도가 20°C/s에 이르면 페라이트의 형태는 계면이 다소 직선이 아닌 불규칙한 형태로 바뀌며, 2차상

은 대부분은 베이나이트(사진에서 작은 판상이 모여 구성된 상)였으나 아직도 펄라이트가 혼재하고 있었다. 전반적으로 A강의 2차상의 양은 냉각속도가 빨라져도 크게 증가하지 않으며 대략 10% 수준이었다. 이는 A강이 저탄소-저망간에 Ti만 0.015% 첨가된 강이기 때문에 경화능이 매우 작아 그림과 같은 조직이 나온 것

로 판단된다.

Fig. 2는 A강의 조성에 Nb이 0.039% 더 첨가된 D강의 경우 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를 보여주고 있다. A강과 같이 1°C/s의 경우의 페라이트 형태는 다각형인 반면, 입도는 A강에 비해 다소 미세하게 나타난다. 이 경우의 2차상은 역시 완전한 펄라이트이다. 냉각속도가 7°C/s로 증가하면 페라이트의 입도는 약 8µm 정도로 미세해지며, 페라이트의 형태도 불규칙해질 뿐만 아니라 베이나이트도 나타나고 있다. A강의 경우 냉각속도가 7°C/s이하에서는 페라이트 결정립이 다각형 형태이고 베이나이트가 석출하지 않았던 사실에 비추어 볼 때, 경화능이 증가했음을 시사하고 있다. 한편 20°C/s에 이르면 페라이트의 형태는 완전히 우모형(acicular) 형태가 되고 2차상은 모두 베이나이트였으며, 베이나이트의 양은 A강에 비해 상당히 증가하였다. 전반적으로 D강의 2차상의 양은 냉각속도가 빨라질수록 증가하였다. 이는 D강이 A강에 비해 Nb이 0.039%첨가됨으로써 경화능이 증대되었다는 것을 보여주고 있다.

### 3.2. 가공후 냉각시 미세조직변화

Figs. 3~4는 각각 A강 및 D강의 가공CCT 시편의 광학현미경 조직사진이다. Fig. 3은 A강의 경우로서, 1°C/s의 경우에는 다각형 형태의 페라이트가 약 25µm의 크기로 조대하게 석출해 있고 2차상은 완전한 펄라이트이다. 냉각속도가 증가하면 페라이트의 입도는 작아져서 15µm 이하로 미세해지며, 7°C/s까지의 2차상은

모두 펄라이트이다. 냉각속도가 20°C/s에 이르면 페라이트의 형태는 계면이 직선이 아닌 불규칙한 형태로 바뀌며, 2차상은 대부분이 베이나이트였다. 이러한 석출거동은 980°C 재가열CCT 조직과 다소 상이한 바, 재가열CCT에서는 20°C/s에서도 펄라이트가 석출하였었다.

Fig. 4는 Nb이 0.039% 첨가된 D강의 경우 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를 보여주고 있다. A강과 같이 1°C/s의 경우의 페라이트 형태는 다각형에 가깝고 2차상은 역시 완전한 펄라이트이다. 7°C/s에서는 펄라이트의 석출은 없고 베이나이트가 나타난다. 재가열CCT조직에 비해 베이나이트의 양이 상당히 증가하였고 그 정도는 냉각속도가 증가할수록 커지고 있다. 가공CCT의 결과는 재가열CCT 결과와 미세조직 측면에서 다소 다르다. 즉, 각 강들에서 베이나이트가 석출되는 냉각속도가 재가열CCT의 경우보다 느린 냉각속도 쪽으로 이동하였으며, 베이나이트의 양이 증가하고 있다. 한편 가공CCT 조직은 재가열CCT 조직보다 크게 나타났는데, 이러한 결과는 가공CCT의 경우 처음에 시편을 1250°C로 가열하였고, 따라서 초기에 980°C로 가열한 재가열CCT 시편보다 오스테나이트 결정립이 매우 컸기 때문이라고 판단된다. 비록 가공CCT의 경우 1100°C와 980°C에서 30%의 압하율로 가공을 하였기 때문에 오스테나이트 결정립 크기는 작아졌을 것이지만, 이 때 생긴 재결정립의 크기는 단순히 980°C로 가열한 재가열CCT 시편의 경우보다 더 컸던 것으로 사료된다.

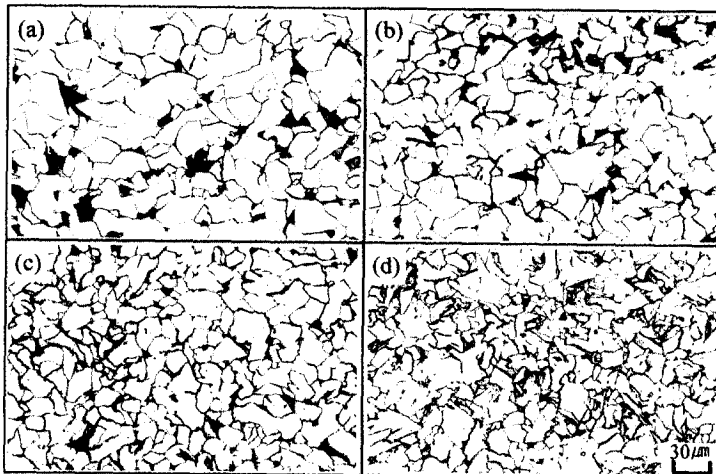


Fig. 3. Optical micrographs showing the change of microstructure with cooling rate when the steel A was deformed at 980°C and then cooled to room temperature at 1°C/s (a), 3°C/s (b), 7°C/s (c) and 20°C/s (d).

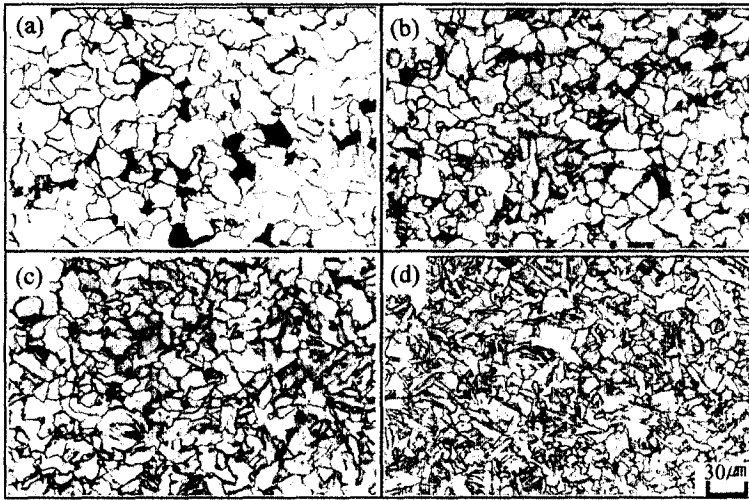


Fig. 4. Optical micrographs showing the change of microstructure with cooling rate when the steel D was deformed at 980°C and then cooled to room temperature at 1°C/s (a), 3°C/s (b), 7°C/s (c) and 20°C/s (d).

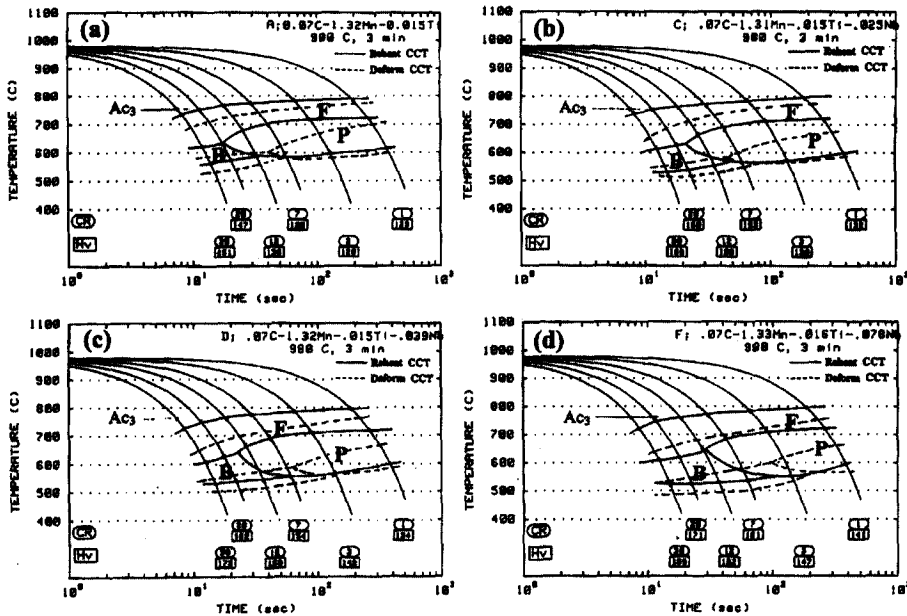


Fig. 5. CCT diagrams in the cases of reheating at 980°C (solid line) and deformation at 980°C (dotted line).

### 3.3. 강종에 따른 CCT도

CCT시험에서 얻은 상변태온도와 미세조직을 이용하여 강종에 따른 재가열CCT도와 가공CCT도를 Fig. 5와 같이 얻었다. 그림에서 실선은 980°C 재가열CCT도이며, 점선은 980°C 가공 CCT도이다. 한편 그림에 기록된 “CR”은 냉각속도, “Hv”는 재가열CCT 시편의 경도값,

그림 안에 쓰여진 “F”는 페라이트 영역을, “P”는 펄라이트 영역을, “B”는 베이나이트 영역을 나타낸다.

Fig. 5(a)에 도시된 A강의 CCT도를 보면, 재가열 CCT에서는 12°C/s보다 늦은 경우에는 (페라이트+펄라이트)의 조직을 가지며, 20°C/s보다 빠른 경우에는 (페라이트+베이나이트)의 미세조직을 보인다. 반면 가공

CCT에서는 베이나이트가 석출하는 냉각속도가 낮은 냉각속도 쪽으로 이동하여 12°C/s에서도 베이나이트가 석출한다.

Fig. 5(b)는 C강의 CCT도이다. 재가열CCT에서는 7°C/s보다 낮은 경우에는 (페라이트+펄라이트)의 조직을 나타내며, 12°C/s에서는 (페라이트+펄라이트+베이 나이트)의 조직이며, 20°C/s보다 빠른 경우에는 (페라이트+ 베이 나이트)의 미세조직을 보인다. 반면 가공CCT에서는 7°C/s이면 베이 나이트가 석출하기 시작하고 12°C/s에서는 펄라이트의 석출이 억제된다.

Fig. 5(c)는 D강의 CCT도이다. 재가열CCT에서는 7°C/s보다 낮은 경우에는 (페라이트+펄라이트)의 조직을 가지며, 12°C/s에서는 (페라이트+펄라이트+베이 나이트)의 조직이며, 20°C/s보다 빠른 경우에는 (페라이트+베이 나이트)의 미세조직을 보인다. 반면 가공CCT에서는 3°C/s 이하에서는 (페라이트+펄라이트)이나 7°C/s보다 빠 르면 펄라이트의 석출이 억제되어 (페라이트+베이 나이트)의 조직을 갖는다.

F강의 CCT도는 Fig. 5(d)에 도시되어 있다. 재가열 CCT에서는 3°C/s보다 낮은 경우에는 (페라이트+펄라이트)의 조직을 가지며, 7°C/s에서는 (페라이트+펄라이트 +베이 나이트)의 조직이며, 12°C/s보다 빠른 경우에는 (페라이트+베이 나이트)의 미세조직을 보인다. 반면 가공 CCT에서는 3°C/s이면 베이 나이트가 석출하기 시작하여 (페라이트+펄라이트+베이 나이트) 조직을 나타내며, 7°C/s보다 빠른 냉각속도에서는 펄라이트의 석출이 억제된다.

이상 재가열CCT 및 가공CCT 결과에서 보면 재가열 CCT보다 가공CCT의 경우에 베이 나이트의 석출이 촉진 되고, Nb이 첨가될수록 베이 나이트의 석출이 보다 낮은 냉각속도에서 생긴다. 또한 변태온도는 가공CCT의 경우가 더 낮으며, 두 경우의 CCT에서 모두 Nb의 함량이 증가할수록 변태온도는 낮아지고 있다.

### 3.4. 재가열 및 가공조건에 따른 경도변화

Fig. 6은 재가열CCT 시편의 비커스 경도값의 변화를 냉각속도에 대해 보여주고 있다. 냉각속도가 증가할수록 경도값은 증가하며, 냉각속도가 같을 경우에는 Nb 첨가 한 강도의 경도값이 더 크다. 이러한 경향은 Figs. 1~2에서 보여준 A강과 D강의 미세조직 변화와 일치하고 있다. 즉 강종에 관계없이 냉각속도가 증가하면 CCT도에서도 보았듯이 변태온도가 낮아지고 이에따라 페라이트가 미세화되며, 펄라이트 또는 베이 나이트 등의 경질

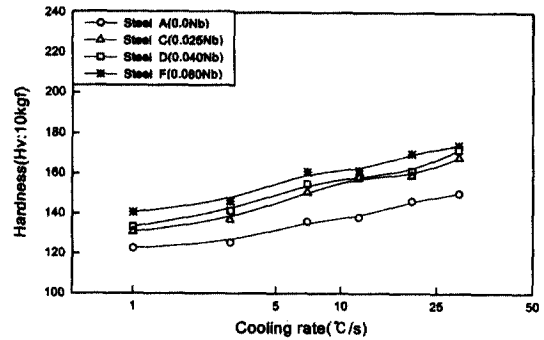


Fig. 6. Variation of hardness with cooling rate when the steels were continuously cooled to room temperature after reheating at 980°C.

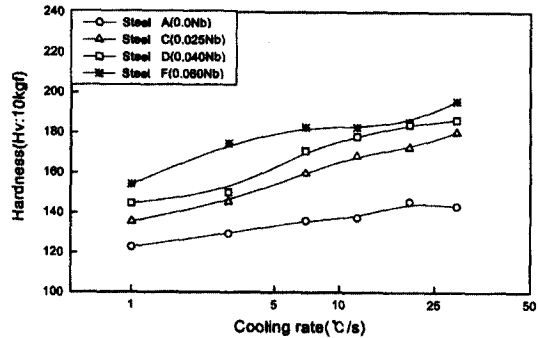


Fig. 7. Variation of hardness with cooling rate when the steels were continuously cooled to room temperature after deformation at 980°C.

상의 분율이 증가하므로 경도가 증가하는 것이다. 한편 Nb이 첨가되면 베이 나이트의 함량이 증가하므로 경도가 증가하게 된다.

Fig. 7은 가공CCT 시편의 비커스 경도값의 변화를 냉각속도에 대해 도시한 것이다. 이 경우도 앞서 본 재가열냉각 시편과 마찬가지로 냉각속도가 증가할수록 경도값은 증가하며, 냉각속도가 같을 경우에는 Nb 첨가한 강도의 경도값이 더 크다. Nb함량에 따른 경도값의 변화는 재가열냉각시편의 경우와 다른 경향을 보이는 데, Nb함량에 따른 경도값의 증가량이 재가열냉각시편에 비해 크게 나타난다.

Fig. 8은 냉각속도가 7°C/s일 때 Nb함량에 따른 980°C에서의 재가열냉각시편(재가열CCT)과 가공후 냉각시편(가공CCT)의 경도값을 보여주는 것이다. 재가열 시편에서는 Nb첨가에 따른 경도값의 차이가 크지 않은 데 비해, 가공후 냉각시편의 경우에는 Nb양이 증가하면 점

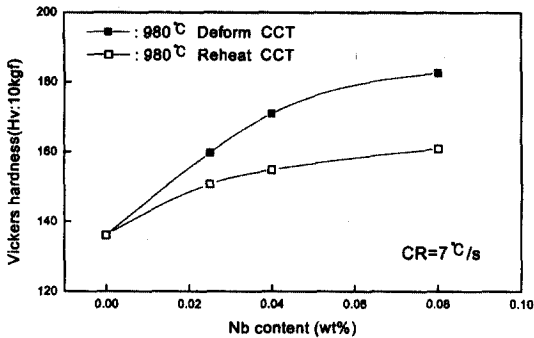


Fig. 8. Variation of hardness with Nb content when the steels were reheated or deformed at 980°C and then cooled to room temperature at 7°C/s.

차 둔화되긴 하지만 지속적으로 경도값이 증가하고 있다. 이로써 Nb이 첨가되지 않은 A강에서는 두 경우의 경도값이 동일하지만, Nb함량이 증가되면 두 경우의 값 차이가 점점 커지고 있다. 이러한 경향은 Figs. 3~4의 A강과 D강의 미세조직 변화에서 보았듯이 가공CCT 시편에서는 냉각속도가 같을 경우라도 Nb함량이 많은 강 of 베이나이트 분율이 증가하는 데에 기인하는 것이다. 이렇듯 가공후 냉각시편에서는 재가열냉각시편보다 경도값의 증가에 미치는 Nb의 첨가효과가 뚜렷이 나타나고 있다.

#### 4. 고 찰

지금까지는 재가열CCT, 가공CCT 시험을 통해 Nb첨가에 따른 미세조직 및 경도값의 변화를 보았고, 또한 각각의 CCT도 작성을 통하여 상변태온도의 변화를 살펴보았다. 여기서는 Nb 첨가강에서 Nb 탄질화물의 용해거동을 이론적으로 살펴봄으로써, Nb 첨가에 따른 상변태온도, 미세조직 및 경도값의 변화의 이유를 고찰해 보기로 한다.

Irvine 등[11]이 제시한 온도에 따른 용해도적  $[Nb][C,N]$ 은 다음의 (1)식으로 나타난다.

$$\log[\%Nb][\%C+12/14\%N]=2.26-6,770/T \quad (1)$$

(1)식으로 각 온도에서의 용해도적,  $[Nb][C,N]$ 을 계산하면 Table 2와 같다. 한편 각 강들의 전체 용해도적을 Table 1의 화학조성으로부터 계산하면, A강의 경우는 물론 0이고, C강의 경우  $1.8 \times 10^{-3}$ , D강의 경우

Table 2. Solubility products of  $[Nb][C,N]$ .

Temp.(°C)	980	1080	1180	1250
$[Nb][C,N]$	0.72	1.80	3.99	6.50

$2.8 \times 10^{-3}$ , 그리고 F강의 경우  $5.6 \times 10^{-3}$ 이다. 따라서 이론적 계산에 따르면, C강의 경우 1080°C 이상이면 Nb이 전량 고용되고, D강의 경우는 약 1150°C 이상에서, 그리고 F강의 경우는 1230°C 이상에서 전량 고용된다. 실제 가열시에 Nb 탄질화물이 용해되는 속도를 고려하면, 이 온도들보다는 더 높은 온도에서 완전히 고용하게 될 것이나, 여기서 알수 있는 사실은 Nb강에서는 가열온도가 높을수록 Nb의 고용량이 증대되고, 또한 고온에서는 Nb첨가량이 많을수록 고용 Nb양이 증대되리라는 것이다.

앞서 기술한 재가열CCT의 결과에서 보면, Nb이 첨가된 C, D, F강의 미세조직은 Nb이 첨가되지 않은 A강에 비해 페라이트 입도가 작고 경질상인 베이나이트가 더 많이 존재하였으며, CCT도에서 나타나듯이 변태 온도도 더 낮게 나타났다. 이 결과로 Nb 첨가강의 경도값이 Nb이 첨가되지 않은 A강의 경도값보다 높게 되었다. 재가열온도가 980°C일 때, Nb 첨가강의 용해도적,  $[Nb][C,N]$ 은  $7.19 \times 10^{-4}$ 로서, 비록 강 중의 전체 Nb 중 극히 적은 양만이 용해되지만 이 양으로도 강의 경화능이 어느 정도 증가된다는 사실을 알 수 있다. 결국, Nb 첨가강은 오스테나이트 내에 고용된 Nb으로 인하여, Nb이 첨가되지 않은 A강보다 낮은 변태온도를 나타냈으며, 이러한 경화능의 증가로 인해 미세조직에 베이나이트의 함량이 증가하였고, 이에 따라 경도값도 증가하였다. 한편 Fig. 6의 경도변화에서 보았듯이 A강에 비해 C강(0.025%Nb)의 경도값은 1°C/s에서는 약 10, 7°C/s에서는 약 20 정도로 많이 증가되지만, Nb이 더 첨가된 D, F강의 경도는 C강에 비해 그다지 증가하지 않는다. 그 이유는 재가열온도가 980°C일 때, 이때의 용해도적,  $[Nb][C,N]$ 은  $7.19 \times 10^{-4}$ 로서 강중의 전체 Nb중 극히 일부만이 용해되고, 전체 Nb함량에 관계없이 C,D,F강이 비슷한 양의 Nb이 고용상태로 존재하게 되기 때문으로 판단된다. 물론 이론적으로는 Nb함량에 관계없이 고용된 Nb의 양은 같더라도 Nb 탄질화물의 용해속도를 고려하면, 실제로는 Nb함량이 많은 F강의 경우가 고용되는 Nb양이 더 많게되어 어느 정도 경도값의 상승에 기여하는 것으로 사료된다.

가공CCT 결과에서 보면, 역시 Nb이 첨가된 C, D, F강이 Nb이 첨가되지 않은 A강보다 페라이트 입자도 작고 베이나이트의 양도 많으며, CCT 상에 나타난 변태온도도 낮게 나타났다. 또한 경도값도 Nb 첨가강의 경우가 훨씬 높았다. 이 결과는 재가열CCT의 경우와 같은 경향이었으며, 특히 동일한 조건이라도 가공CCT의 경우가 재가열CCT의 경우보다 베이나이트의 절대량이 많았고, 두 강 사이의 경도값의 차이가 재가열CCT의 경우보다 한층 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 역시 Nb 첨가로 인하여 고용된 Nb이 강의 경화능을 증가시켰기 때문이다.

재가열CCT와 가공CCT의 결과를 비교하면 가공CCT의 경우가 베이나이트의 석출이 더욱 촉진되었으며, 동일한 조건이라도 Nb이 첨가되면 베이나이트의 석출이 보다 늦은 냉각속도에서 생긴다. 또한 변태온도는 가공CCT의 경우가 더 낮으며, 가공CCT의 경우에도 Nb이 첨가되면 변태온도는 낮아지고 있다. 이러한 결과의 이유는 Nb의 고용도 차이에 의해 경화능이 변화하기 때문이다. 즉, 재가열 후에 냉각하는 재가열CCT 시편은 가열온도가 980°C로 낮기 때문에 위에서 언급한대로 극히 적은 양의 Nb(C,N)이 용해되어 강의 경화능 증가가 크지는 않았다. 반면, 1250°C로 가열한 후 980°C에서 가공한 다음 냉각한 가공CCT의 경우에는 Nb 첨가량에 따른 경도값의 차이가 뚜렷이 났다. 그 이유는 가공후 냉각시편은 초기에 1250°C로 재가열하므로 이때의 용해도적,  $[Nb][C,N]$ 은  $6.5 \times 10^{-3}$ 으로서, Nb양이 0.08%인 F강의 전체 용해도적이 1250°C에서  $5.6 \times 10^{-3}$ 이고, Nb양이 그보다 적은 C, D강의 용해도적은 이보다 작은  $1.8 \times 10^{-3}$ ,  $2.8 \times 10^{-3}$ 이므로, 1250°C에서는 모든 Nb이 강중에 용해되어 Nb이 고용상태로 존재하게 되기 때문으로 판단된다. 물론 이후의 냉각과정이나 압축에 의해 일부 Nb이 탄질화물로 석출하겠지만, Nb 첨가량이 많을수록 980°C 가공후의 Nb 고용량은 클 것이고, 이에 따라 경화능이 증가함으로써 경질상의 분율이 증가하고 경도값이 상승하는 것으로 판단된다.

결론적으로 Ti 및 Nb이 첨가된 저탄소강을 1250°C 등의 높은 온도로 재가열한 후 고온에서 열간가공하는 경우에는 재가열시 모든 Nb 탄질화물이 용해되어 오스테나이트에 고용되며, 이것이 가공이 진행될 때에도 많은 양의 Nb이 고용상태로 존재하여, 강의 경화능을 높이는 것으로 보인다. 이러한 경화능의 증가로 인하여, 강의 변태온도가 낮아지고, 페라이트의 입도가 미세하게

되며, 경질상의 분율이 증가되어 강도가 증대될 수 있다고 판단된다. 또한 페라이트의 미세화에 의한 강화에서는 충격인성의 열화가 적으므로 좋은 강도-인성특성을 가질 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

Ti-Nb를 함유한 저탄소강에 대한 연속냉각 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단순히 980°C로 가열하여 냉각할 때(재가열CCT) 보다 1250°C로 가열하고 980°C에서 30%의 압축가공을 한 후 냉각하는 경우(가공CCT)가 전체적으로 상변태 온도가 낮아졌으며, 가공CCT의 경우가 재가열CCT의 경우보다 경화능이 커져서 베이나이트가 나타나는 임계냉각속도가 늦어졌으며, 동일한 냉각속도에서 더 많은 양의 베이나이트가 석출하였다.

2) 재가열CCT의 경우보다 가공CCT의 경우가 경화능이 더 큰 원인은, 재가열CCT에서는 단순히 980°C로 가열하므로 오스테나이트에 고용되는 Nb의 양이 매우 적은 데 반하여, 가공CCT에서는 시편을 1250°C의 고온으로 가열하였기 때문에 강 중에 함유된 모든 Nb이 고용되고, 이후 980°C에서 가공되더라도 많은 양의 Nb이 고용상태로 존재하기 때문으로 판단되었다.

3) Nb 함량이 많아질수록 경화능은 증가하여, 상변태 온도가 낮아지고 베이나이트의 석출이 촉진되었으며 경도값이 상승하였다. 또한 이러한 Nb 첨가효과는 가공CCT의 경우가 재가열CCT의 경우보다 뚜렷하게 나타났다.

4) Nb이 첨가된 저탄소강을 RCR과 같이 고온에서 압연하는 경우에는 고용된 Nb에 의한 경화능의 향상으로, 페라이트가 미세화되고 경질상의 양이 증대되어 고강도-고인성의 강판을 제조할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. W. Y. Choo, J. K. Kwak and S. C. Shin: The 35th SEASI Conference, Wollongong, Australia, May 1991.
2. B.Hutchinson, M.Korchynski, R. Lagneberg and T. Siwecki: Swedish Institute for Metals Research,



- Report No.IM-2515(1989).
3. T. Siwecki, A. Sandberg and W. Roberts: Swedish Institute for Metals Research, Report No. IM-1858 (1984).
  4. T. Siwecki: THERMEC-88, ISIJ(1988) 232-239.
  5. 이상우, 김창영, 주용용: “저온가열 및 RCR기술을 이용한 후물재 품질개선”, 산업과학기술연구소 연구보고서(1992).
  6. 유장용, 홍순택 등: “조선용 50 kg급 강의 입성장제어 기술 개발”, 포스코기술연구소 연구보고서(1994).
  7. W. Y. Choo and S. W. Lee: Proc. of the Int'l Symp. on High Performance Steels for Structural Applications, Cleaveland, USA(1995) 117-125.
  8. E. J. Palmiere, C. I. Garcia and A. J. DeArdo: “Low-Carbon Steels for the 90's”, Pittsburgh, U.S.A(1993) 121-130.
  9. H. Ohtsuka, M. Umemoto and I. Tamura : Proc. of THERMEC-88, Tokyo, Japan(1988) 352-359.
  10. M. H. Thomas and G. H. Michal: Proc. of International Conference on Solid→Solid Phase Transformation, TMS-AIME, Pittsburgh, U.S.A(1981) 469-473.
  11. K. J. Irvine et al: JISI, 206 (1967) 161.