



 論 文
 

## V첨가 0.35%C-Mn 미소합금강의 연속공기냉각특성

The Characteristics of Continuous Air Cooling in  
0.35%C-Mn Steel Microalloyed with Vanadium

심재진·이상윤

동아대학교 공과대학 금속공학과

J. J Shim and S. Y. Lee

Department of Metallurgical Engineering, Dong-A University

## ABSTRACT

The effects of austenitizing temperatures and times and cooling rate on the characteristics of continuous air cooling have been investigated for 0.3%C-Mn steels microalloyed with vanadium. Transformation start temperatures have been found to be measured from temperature-time curve directly obtained with continuous air cooling and to decrease with increasing austenitizing temperature, cooling rate and Mn contents. The coarsening behavior of austenite grain size has been measured to abnormally grow at 1050°C and rapidly grow at 1200°C. It has been found that the volume fraction of pearlite was lineally proportional to the reciprocal square root of austenite grain size. The hardness has been measured to increase with increasing cooling rate up to 250°C/min. and to remain relatively unchanged in the range of 250~400°C/min. showing that hardness values for steel with a higher Mn content increase more than those for steel with a lower Mn content. The impact property has been found to decrease with increasing of austenite grain size but does not lineally change with the reciprocal square root of austenite grain size.

## 1. 서 론

저탄소강의 기계적 성질향상을 위한 강력 탄질화물 형성 원소인 Nb, V, Ti 등의 미량첨가(microalloying)에 대한 연구는 대단히 많이 진행되었으며 이들 원소의 첨가 영향은 페라이트의 결정립 미세화 및 석출강화로 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 특히 페라이트의 석출강화에 대해서는 오스테나이트가 변태시 오스테나이트와 페라이트 계면에 석출되는 일렬의 락상 석출물(interphase precipitation)

에 의한 것이며, 석출기구에 대해서는 Honeycombe<sup>4)</sup>에 의해 밝혀졌다.

이러한 미량첨가방법은 중탄소강에서도 페라이트에 탄질화물 석출에 의해 고강도를 얻을 수 있다고 보고되고 있으며 석출물의 고용온도가 낮은 V원소를 중탄소강에 첨가하여 열간가공상태에서 공기냉각만으로 조질처리의 기계적 성질을 만족시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>5,6)</sup>.

그러나 실질적인 냉각과정은 고온에서 체류시간이 짧

고 저온에서 긴 비등속 연속냉각으로 등속연속냉각과 변태특성에 차이가 있으나<sup>7)</sup>, 이에 대한 정량적인 연구 결과가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비 등속연속냉각한 0.35%C-Mn-V미소합금강의 오스테나이트화 처리조건 및 냉각속도의 변화에 따른 연속냉각의 특성, 현미경 조직경도 및 충격성질의 변화를 고찰하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시 료

본 연구에 사용된 시료는 고주파 진공 유도로에서 용해하여 열간압연에 의해 직경 15 mm의 봉재로 제작하였으며, 잔류응력과 압연조직의 영향을 제거하기 위하여 1000°C에서 1시간동안 노말라이징 처리를 하였으며, 화학조성은 Table 1과 같다.

### 2.2. 연속냉각 특성시험

시료를 직경 13 mm, 길이 15 mm로 기계가공하여 중심부에 직경 3.3 mm의 구멍을 뚫은후 Pt-Pt/Rh열전대를 삽입한채로 수직진공 관상로에서 1000°C, 1100°C 및 1200°C에서 30 분동안, 오스테나이트화 처리한 후 원통형 공기냉각장치에서 750°C에서 냉각속도를 150°C/min, 250°C/min 및 400°C/min으로 공기냉각하였다. 연속냉각동안 온도변화는 온도기록계를 이용하여 냉각곡선을 얻었으며 냉각곡선의 기울기가 변환되는 점(inflexion point)를 변태개시 온도로 하였다.

### 2.3. 충격 및 경도시험

수직진공 관상로를 이용하여 1000°C, 1100°C 및 1200°C에서 15분, 30분 및 60분동안 가열한 후 냉각속도를 150°C/min, 250°C/min 및 400°C/min으로 하여 상온까지 냉각한 후 충격시험은 ASTM-E 23의 U형 노치 subsize 충격시편을 샤프트 충격시험기(MEL사, PSW-300)를 사용하여 상온에서 실시하여 3회 평균값으로 하였으며 경도시험은 마크로 비커스 경도계를 사용하여 5회 측정된 값의 평균치를 경도값으로 하였다.

Table 1. Chemical Composition of Specimens (wt%)

Steels	C	Si	Mn	Al	V	N <sub>2</sub>
A	0.34	0.28	1.14	0.038	0.111	0.0090
B	0.36	0.31	1.50	0.036	0.115	0.0098

### 2.4. 현미경 조직시험

#### 2.4.1. 오스테나이트 결정입도

오스테나이트 결정입도는 950°C~1200°C까지 50°C 간격으로 30분간 오스테나이트화 처리후 얼음물에 급냉하여 450°C에서 24시간동안 템퍼링한후 약 50°C의 포하피크린산 수용액을 이용하여 오스테나이트 결정입계를 노출시킨후 Heyn의 선교차법에 의해 측정하였다.

#### 2.4.2. 페라이트 체적분율

충격시편의 비변형부를 절단하여 연마 정마하여 2% nital에 부식시켜 교점 700개의 grid를 이용하여 교점계산법(Poing counting)에 의해 페라이트의 체적분율을 측정하였다.

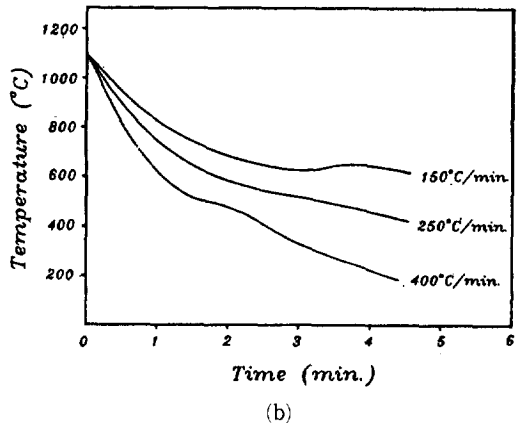
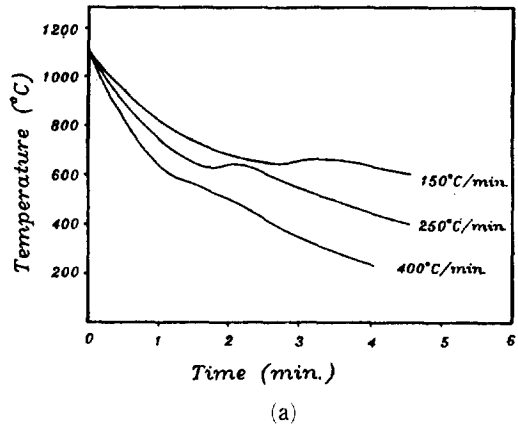


Fig.1. Air cooling curve obtained from steel A and B austenitized at 1100°C for 30 minutes, with various cooling rate.  
(a) steel A, (b) steel B

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 연속냉각특성

Fig.1은 Steel 1(a)과 Steel 2(b)를 1100°C에서 30분간 오스테나이트화 처리후 냉각속도에 따른 냉각곡선을 나타낸 것으로 오스테나이트화 온도에서 연속냉각중 냉각속도가 변하는 변곡점(inflexion point)이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 본 실험에서 이 점을 변태개시온도로 하였다. 이러한 현상은 냉각동안 오스테나이트가 변태될때 변태열의 방출(recalescence)에 의해 냉각속도가 감소하기 때문이며<sup>8)</sup> 본 실험의 경우는 페라이트와 퍼얼라이트의 변태 개시온도로 하였다.

오스테나이트화 온도 및 냉각속도변화에 따른 변태개시온도의 변화를 Fig.2에 나타내었다. 변태개시온도는 Steel A와 B 모두 오스테나이트화 온도와 냉각속도가 증가할수록 변태 개시온도가 저하된다. 이것도 오스테나이트화 온도를 상승시키면 오스테나이트 입도가 증가하여 오스테나이트 결정계면의 면적을 감소시켜 페라이트와 퍼얼라이트의 핵생성이 지연되기 때문이다. 그리고 동일 오스테나이트화 온도 및 냉각 속도에서 steel B의 변태 개시온도가 steel A보다 낮음을 볼 수 있는데 이는 Mn함량의 증가에 의해 변태온도로 저하된다는 사실과 잘 일치되고 있다.

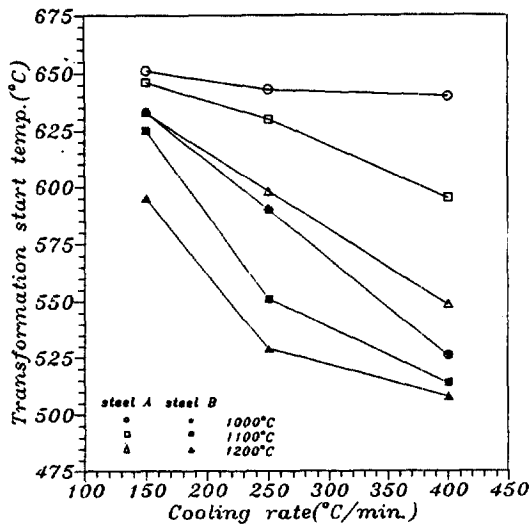


Fig.2. Variation of transformation start temperature with austenitizing temperature and cooling rate.

#### 3.2. 오스테나이트 결정립의 성장특성

Fig.3은 오스테나이트화 온도에 따른 prior 오스테나이트 결정립 크기의 변화를 나타낸 것으로 두 시료 공히 유사한 양상을 보이며 1000°C까지는 prior 오스테나이트 결정립크기의 변화가 미소하나 1200°C에서는 급격히 성장함을 알 수 있다. 그리고 1050°C에서는 비정상적인 성장이 일어나는데 이는 오스테나이트 결정립을 고착하고 있던 탄질화물의 고용에 의한 것으로 생각된다<sup>10)</sup>. 탄질화물의 고용온도는 용해도적 관계식으로 부터 계산될 수 있으며 합금의 조성 및 석출물의 형태에 따라 차이가 있다.

#### 3.3. 현미경조직 변화

1000°C, 및 1200°C에서 30분간 오스테나이트화 처리 후 공기 냉각한 Steel 1과 Steel 2의 현미경조직을 Photo 1과 Photo 2에 나타내었다. 오스테나이트화 온도가 증가할수록 오스테나이트 결정립이 조대화되어 초석 페라이트의 핵생성자리수가 감소하기 때문에 초석 페라이트의 형상이 덩어리 형태(blocky type)에서 얇은 망상편 형태(thin network type)로 변화되며, steel B가 steel A보다 얇게 되는데 이는 변태온도저하에 의한 페라이트의 성장이 지연되기 때문이다. 또한 steel A는 냉각속도가 150°C/min과 250°C/min에서는 초석 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되며 400°C/min의 경우에는

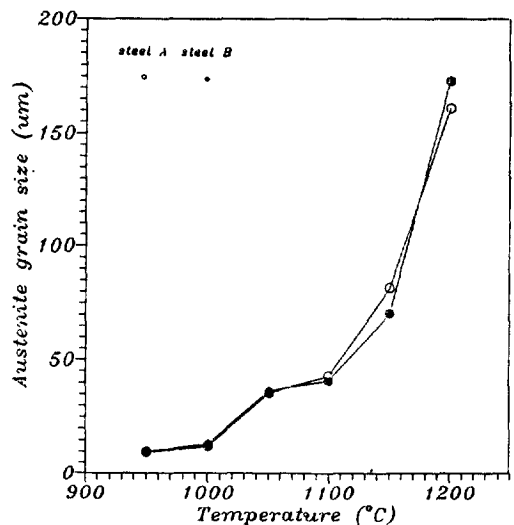
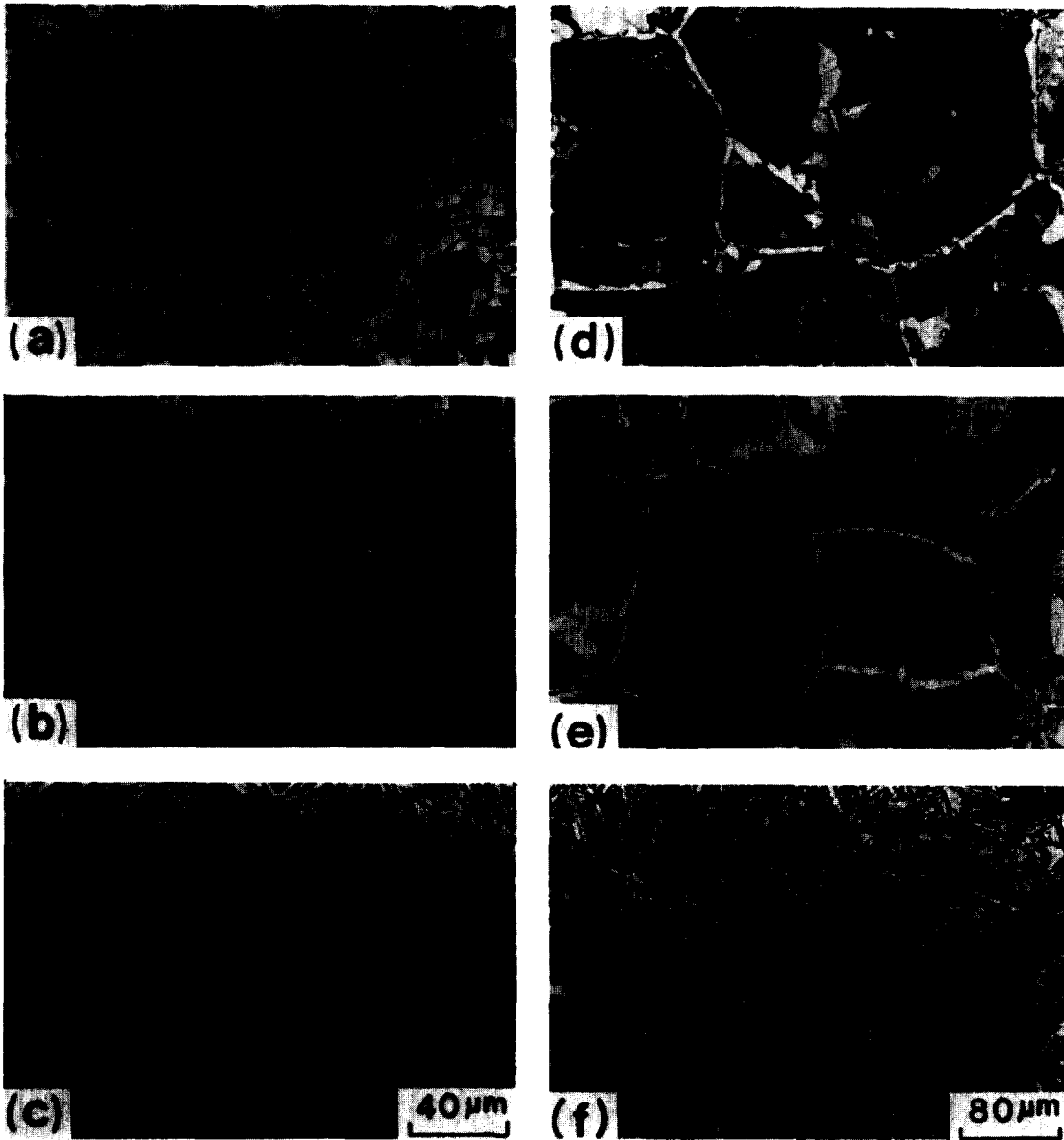


Fig.3. Austenite grain coarsening behavior as a function of austenitizing temperatures.



**Photo 1.** Optical micrographs showing the change of proeutectoid ferrite and pearlite morphology of steel A air cooled with following rate after austenitizing at 1000°C (a,b,c) and 1200°C (d,e,f) for 30 minutes; (a) and (d) : 150°C/min, (b) and (e) : 250°C/min, (c) and (f) : 400°C/min.

Widmanstätten 페라이트가 발달하며, 상부 베이나이트와 혼재되어있다. 그러나 Mn함량이 높은 steel B에서는 Widmanstätten 페라이트변태는 일어나지 않으며, 냉각속도가 250°C/min.에서도 상부베이나이트가 생성되며,

400°C/min.의 경우에는 퍼얼라이트 변태는 일어나지 않으며 미세한 페라이트, 상부 및 하부베이나이트로 구성되었음을 알 수 있다.

오스테나이트 결정립크기 제곱근의 역수에 따른 퍼얼

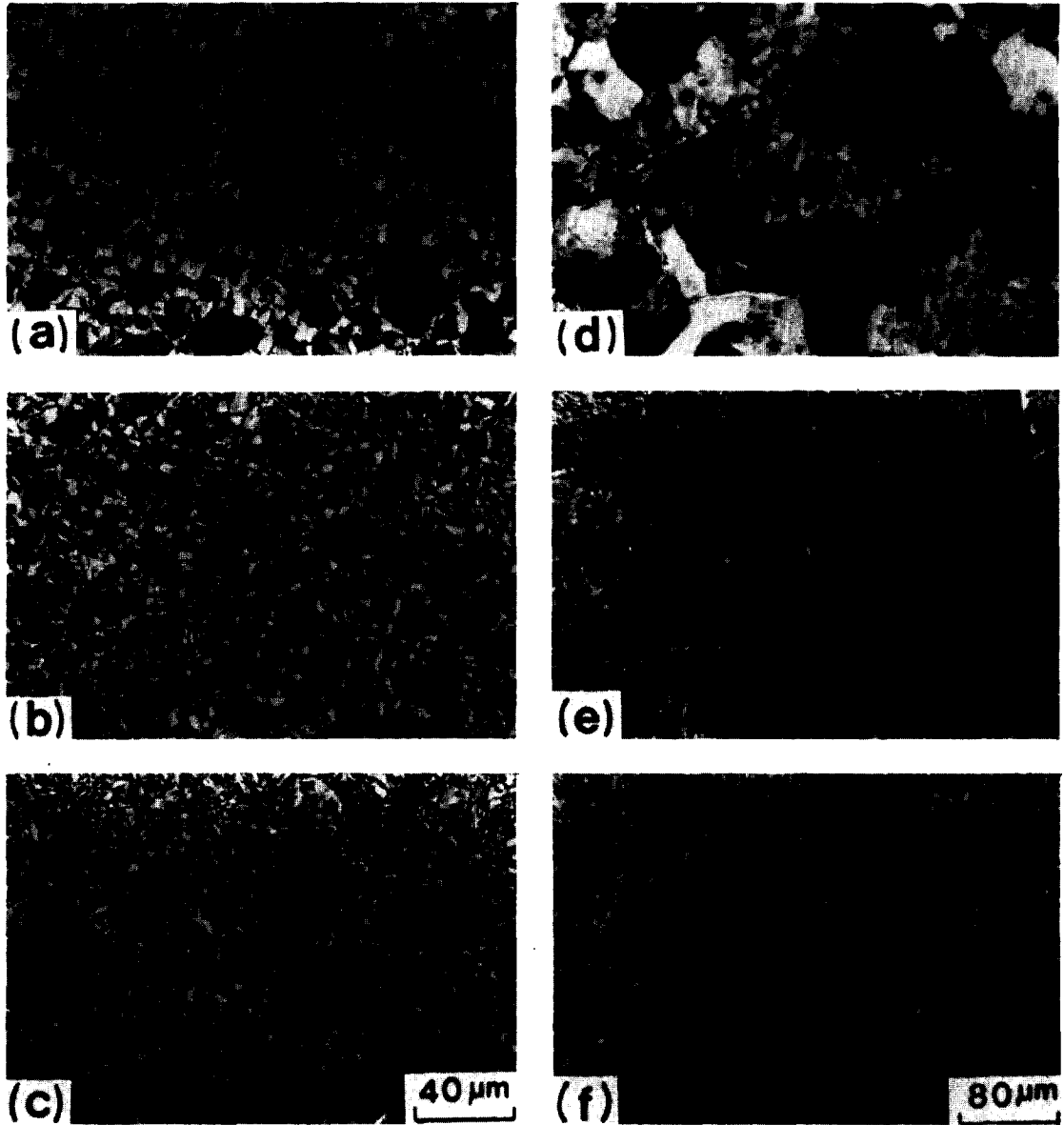


Photo 2. Optical micrographs showing the change of proeutectoid ferrite and pearlite morphology of steel B air cooled with following rate after austenitizing at 1000°C (a,b,c) and 1200°C (d,e,f) for 30 minutes; (a) and (d) : 150°C/min, (b) and (e) : 250°C/min, (c) and (f) : 400°C/min.

라이트 체적분율의 변화를 Fig.4에 나타내었으며, 퍼일 라이트 체적분율은 각 냉각속도에서 오스테나이트 결정립크기와 직선적인 관계를 갖고 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Steel A의 경우

$$PVF_{150} = -0.0217 \times (dr)^{-1/2} + 1.090 \dots\dots\dots (1)$$

$$PVF_{250} = -0.0166 \times (dr)^{-1/2} + 1.062 \dots\dots\dots (2)$$

Steel B의 경우

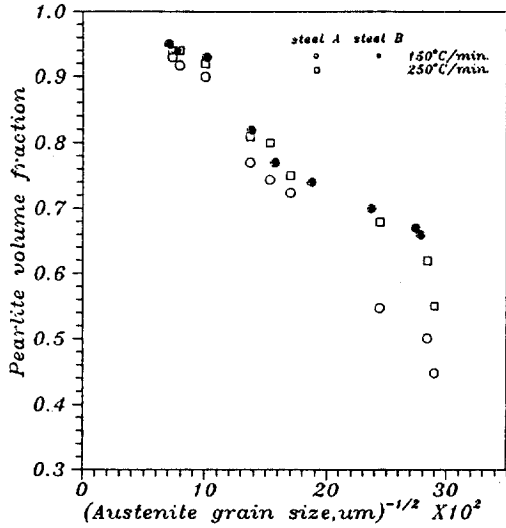


Fig. 4. Relation between the volume fraction of pearlite and the reciprocal square root of austenite grain size of steel A and steel B.

$$PVF_{150} = -0.0142 \times (dr)^{-1/2} + 1.037 \dots\dots\dots (3)$$

여기서 PVF는 퍼얼라이트 체적분율이며 첨자 150, 250은 냉각속도(°C/min) dr는 오스테나이트 결정립 크기(μm)이다.

3.4. 경도 및 충격성질의 변화

Fig. 5는 냉각속도에 따른 경도변화를 나타낸 것이며, 두 시료 공히 오스테나이트화 온도가 증가할수록 페라이트의 체적분율이 감소하기 때문에 증가하며 냉각속도는 250°C/min까지는 증가하나 그 이상에서는 거의 변화가 없음을 알수 있다. 이러한 현상은 냉각속도가 임계값 이상이 되면 변태온도가 저하되어 탄질화석출물의 석출이 일어나기 어렵기 때문이며 단지 페라이트의 체적분율감소에 의한 경도증가가 주요인자로 생각된다. 그리고 steel B는 전 구간에 걸쳐 steel A보다 경도가 높게 나타나는데 이는 현미경조직 변화에서 고찰한 바와 같이 페라이트 체적분율의 감소와 변태온도저하에 의한 변태생성물의 미세화에 기인된 것으로 생각된다.

충격값과 냉각속도와의 관계를 Fig. 6에 나타내었으며 오스테나이트화 온도와 냉각속도가 증가할수록 충격값은 steel A와 steel B 모두 감소하며, 오스테나이트화온도가 1200°C에서 냉각속도가 증가하면 steel B가 steel A보다 충격치가 향상되는데 이는 미세한 페라이트와 소

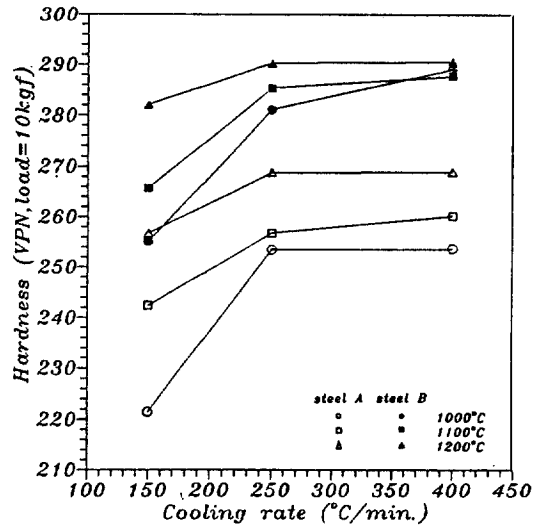


Fig. 5. Effect of cooling rate on hardness of steel A and B air cooled after austenitizing at three different temperatures for 30 minutes.

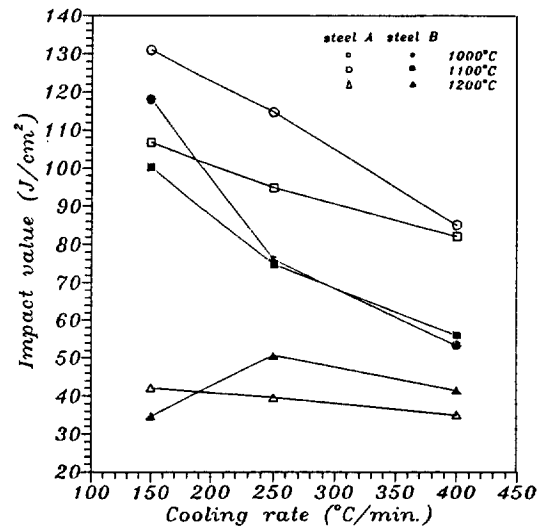
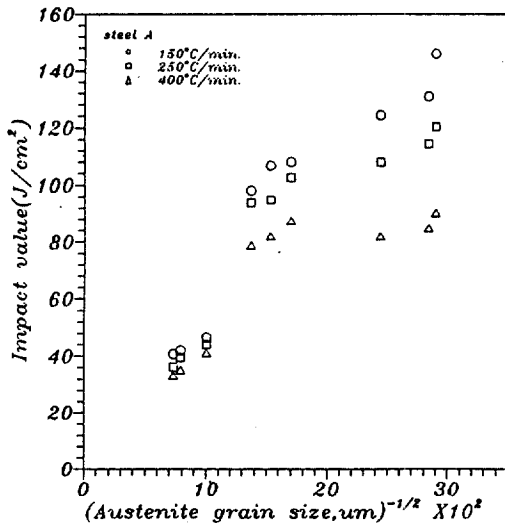
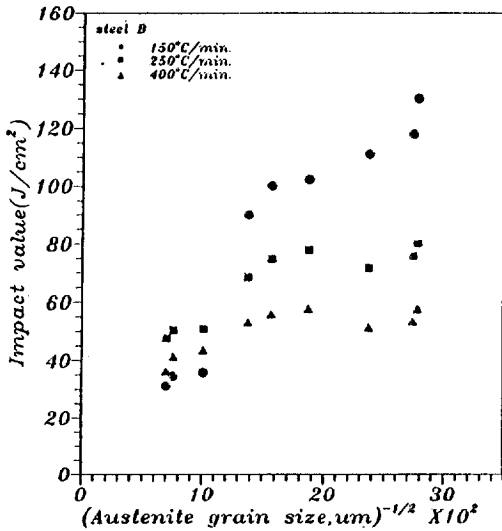


Fig. 6. Variation of impact properties of steel A and B air cooled after austenitizing at three different temperatures for 30 minutes with cooling rate.

량의 하부베이나이트에 의한 영향으로 생각된다. 오스테나이트결정립이 미세하여 페라이트 체적분율이 높은 경우는 연성이 높은 페라이트가 균열전파에 대한 저항



(a)



(b)

Fig.7. Relation between impact value and the reciprocal square root of austenite grain size.

(a) steel A, (b) steel B.

효과 있으나, 조대한 오스테나이트에서 석출된 얇은 대상의 페라이트는 저경각 입체로 형성되기 때문에 균열의 저지효과가 소실되기 때문에 충격값이 현저하게 감소한다. Fig.7은 steel A(a)와 steel B(b)의 오스테나이트 결정립 크기의 제곱근의 역수에 따른 충격값의 변

화를 나타낸 것으로 냉각속도에 따라 오스테나이트 결정립 크기의 의존성이 다르며, 충격값은 오스테나이트 결정립 크기 제곱근의 역수와 직선적인 관계로 볼수 없다. 이는 퍼얼라이트 군(nodule)의 크기 및 라스(lath)형 조직에서는 평행한 라스의 집단(packet)크기에 영향을 받는다는 보고<sup>12)</sup>와 잘 일치됨을 알수 있다.

#### 4. 결론

V를 첨가한 0.35%C-Mn미소합금강의 연속냉각특성에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연속냉각동안 온도-시간 곡선으로 부터 변태개시 온도를 측정할 수 있으며 오스테나이트화 온도 및 냉각속도가 증가할수록 변태온도가 저하하며, Mn 함량이 높은 Steel B가 동일조건에서 Steel A보다 낮다.

2) 오스테나이트 결정립 성장은 1050°C에서 비정상 성장이 일어나며 1200°C에서 급격히 성장하며 Mn의 영향은 없다.

3) 두 시료 모두 150°C/min.에서는 초석 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있으며, 퍼얼라이트량은 오스테나이트 결정립 크기 제곱근의 역수에 직선적으로 비례한다. 250°C/min.이상에서 Mn이 높을수록 베이나이트 변태가 촉진된다.

4) 경도는 냉각속도의 증가에 의해 증가하나 250°C/min이상에서는 변화가 없으며 Steel B가 Steel A보다 약 HV 40 높다.

5) 충격값은 오스테나이트화 온도 및 냉각속도 증가에 따라 감소하며 1200°C에서 급격히 감소하며, 오스테나이트 결정립 크기 제곱근의 역수와 직선적으로 비례되지 않는다.

#### 참고문헌

1. D. Whittaker, Metallurgia, (1979), Vol. 46, pp 944.
2. K.J. Irvine and F.B. Pickering, JISI, (1963), Vol. 201, pp. 944.
3. W.B. Morrison and J.H. Woodhead, JISI, (1963), Vol. 201, pp. 43.
4. R.H.K. Honeycombe, Metall, Trans., (1976), Vol. 7A, pp. 915.

5. H. Stuart and B.L. Tones, *J. of Metals*, (1983), Vol. 4, pp. 87.
6. A.R. Chamber and D.Whittaker, *Metals Technology*, (1984), Vol. 11, pp. 637.
7. R.A. Grange, J.F. Boyce and V.F. Peck, *Met. Progress*, (1950), Vol. 57, pp. 637.
8. E.S. Hawbolt, B. Chau and J.K. Brimacombe, *Metall. Trans.*, (1985), Vol. 16 A, pp. 565.
9. G.L. Dunlop, C.J. Carlsson and G.Frimodig, *Metall. Trans.*, (1978), Vol. 9 A, pp. 261.
10. L.J. Cuddy and J.Craley, *Metall. Trans.*, (1983). Vol. 9 A, pp. 261.
11. P.R. Howell, R.A. Ricks and R.W.K. Honeycombe, *J. Meter. Sci.*, (1980), Vol. 15, pp. 376.
12. J.T. Branby and M.R. Johnson, *J. Meter. Sci.*, (1969), Vol. 3, pp. 155.