

Nb, Ti 및 V를 첨가한 HSLA 주강의 열처리 변화에 따른 기계적 특성 연구

박재현·김인배*

포항산업과학연구원 신뢰성평가 2팀

*부산대학교 금속공학과

A Study of Mechanical Properties With Variation of Heattreatments on HSLA Cast Steels Microalloyed With Nb, Ti, and V

Jai-Hyun Park and *In-Bae Kim

Reliability Assessment 2 Team, Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang, 790-330.

*Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University, Pusan 609-735.

(2000년 6월 15일 받음, 2000년 9월 25일 최종수정본 받음)

초 록 Nb, Ti 및 V를 0.15% 씩 각각 첨가한 3종의 HSLA 주강을 오스테나이트화 온도 및 템퍼링 시간을 변화시킨 후 기계적 특성등을 관찰 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 오스테나이트화 온도를 1150℃로 하여 2시간 가열시킨 경우 첨가원소의 종류에 관계 없이 경도가 가장 증가하였으며 1100℃ 이하의 온도에서는 서서히 경도가 감소하는 경향을 나타내었다. 오스테나이트화 온도를 1150℃로 하여 2시간 가열시킨 경우 Nb, Ti, V 첨가원소중에서 경도가 가장 높게 나타난 것은 Ti 첨가 HSLA 주강이며 오스테나이트 온도변화에 따라 경도차가 나는 주된 이유는 배이나이트 조직의 상대적인 양과 고용강화에 주로 기인하였다. 1150℃에서 오스테나이트화한 Ti 첨가 HSLA 주강의 경우를 제외하고는 대부분의 경우에 있어 C-Mn 주강을 대체 하기 위한 최소 충격값인 2kg-m/cm² 이상의 충격치를 나타내었다. 1150℃에서 2시간 오스테나이트화한 경우 첨가원소의 종류에 관계 없이 10분정도 템퍼링에서 경도가 증가하여 V 첨가 HSLA 주강을 제외하고는 그이후는 템퍼링 시간이 증가함에 따라 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

Abstract Mechanical properties of HSLA cast steels alloyed with 0.15% Nb, Ti or V were tested as variations of austenizing temperatures and tempering times. The test results are as follows. The hardness of HSLA cast steels austenized for 2 hrs at 1150℃ was shown the highest value regardless of alloying elements and then decreased as the temperature decreased below 1100℃. The hardness of HSLA cast steels with 0.15% Ti austenized for 2 hrs at 1150℃ was higher than that of any other HSLA cast steels, and which was mainly attributed to the relatively high amount of bainite, and solid solution hardening. Charpy impact energy of HSLA cast steels was comparable to the C-Mn cast steel except HSLA cast steels with 0.15% Ti austenized at 1150℃. The hardness of HSLA cast steels austenized for 2 hrs at 1150℃ increased at a ten-minute tempering, and after that, the hardness kept almost similar level except HSLA cast steels with 0.15% V.

Key words : HSLA cast steel, heat treatment, Nb, V, Ti, hardness, Charpy impact.

1. 서 론

산업설비의 일반구조용강으로 널리 사용되고 있는 C-Mn주강은 탄소함량을 증가시키기에 따라 강도값을 높일 수 있다. 그러나 탄소함량의 증가에 따라 충격치 저하 및 용접성에 큰 문제점이 나타나고 또한 고온에서 사용시 기계적 특성이 저하되는 단점이 있다. 고온에서의 열적 특성을 보완하기 위해서는 고온강도를 유지할 수 있는 다량의 합금원소를 첨가하여야 하나 이 경우 소재가격이 상승 할뿐 아니라 탄소당량 때문에 용접성이 저하될 가능성이 매우 높다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 고려할 수 있는 것이 HSLA 주강(cast steel)로서 이재질은 HSLA 가공재(wrought steel)에서의 Nb, V, Ti 등과 같은 미량원소 첨가에 의한 석출강화, 결정립 미세화 및 고용강화등에 의한 강도향상 효과를 주강에 적용한 예이다.¹⁾ 따라서 HSLA 주강과 가

공재의 물리야금학적인 원리는 유사하나 화학성분이나 조직 및 제조공정은 판이하다. 즉 탄소함량을 낮추고 적절한 미량원소첨가와 열처리조건에 의한 입자미세화, 석출경화 효과 및 고용강화를 얻을 수 있는 HSLA (High Strength Low Alloy) 주강으로 기존의 C-Mn 주강을 대체시 높은 강도값, 인성값과 같은 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있어 실제 부품에 적용시, 무게감소와 비용절감을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, C함량의 저하에 의한 우수한 용접성 및 우수한 열적 특성도 기대할 수 있다.^{2~8)} 그러나 HSLA 주강이 많은 적용분야에 대한 잠재적인 가능성을 가지고 있음에도 불구하고 아직까지 재질규격이나 사용처 및 체계적인 연구 등이 미진한 실정이며¹⁾ 특히 기계적 특성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 열처리 조건에 대한 첨가원소별 영향에 대한 체계적인 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Nb, Ti, V 등을 각각 첨가한

Table 1. Chemical compositions of used materials.

	(wt. %)										
	C	Mn	Nb	V	Al	Ti	Mo	S/P	Si	Ni	Cr
HSLA2-5	0.103	0.642	0.146	-	0.049	-	0.5	≤0.025	0.5	0.1	0.35
HSLA 2-10	0.101	0.655	-	-	0.050	0.147	0.5	≤0.025	0.5	0.1	0.35
HSLA 2-12	0.114	0.652	-	0.151	0.050	-	0.5	≤0.025	0.5	0.1	0.35

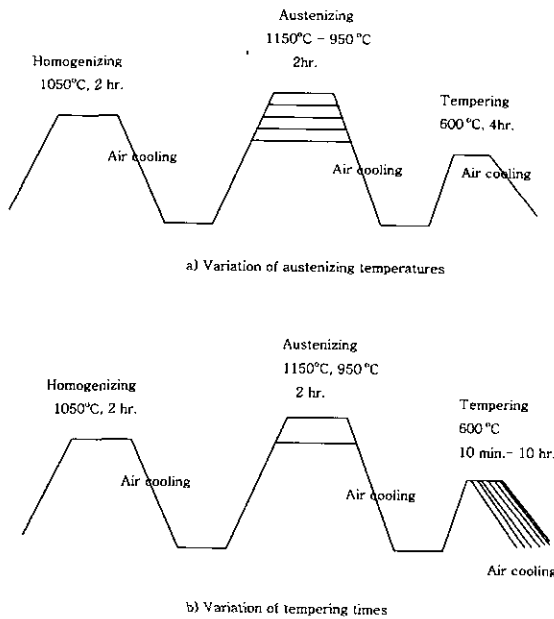


Fig. 1. Various heat treatment cycles for HSLA cast steels.

HSLA 주강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 평가하고 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

HSLA 주강의 열처리 조건에 따른 특성을 비교 평가하기 위하여 표 1과 같이 microalloying element 인 Nb, V 및 Ti를 각각 0.15%씩 첨가한 3종의 화학조성으로 진공주조 후 그림 1에서와 같이 열처리를 실시하였고 노말라이징시 냉각속도는 1°C/sec.로 하였다. 열처리는 오스테나이트 온도별 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 알기 위해 1050°C에서 2시간 균질화 처리후 1150°C-950°C 구간에서 단계별로 2시간씩 열처리를 하였으며 이때 템퍼링 조건은 600°C에서 4시간동안 동일하게 유지하였다. 템퍼링 시간이 기계적 특성 등에 미치는 영향을 검토하기 위해 오스테나이트 온도를 1150°C 및 950°C 두조건에서 유지후 10분-10시간 범위내에서 템퍼링 시간 변화에 따른 특성을 분석하였다. 기계적 특성을 평가하기 위한 수단으로 비커스 경도 및 샤르피 충격시험을 수행하였으며 조직관찰을 위해 광학현미경 및 SEM을 사용하였고 TEM을 이용 석출물의 거동을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

오스테나이트 온도 영향

HSLA 주강은 주물의 편석을 없애기 위해 온도를 오스

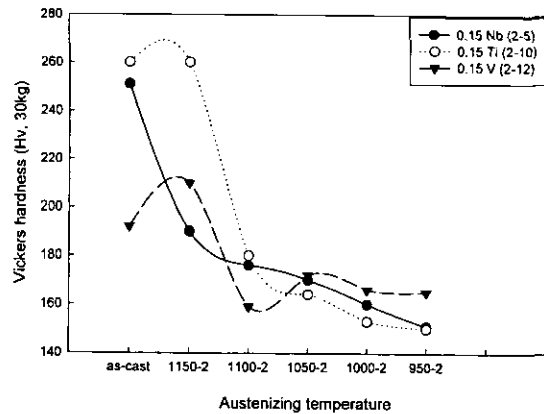


Fig. 2. Effect of austenizing temperature on hardness for various HSLA cast steels. (Tempering : 600°C, 2hr.)

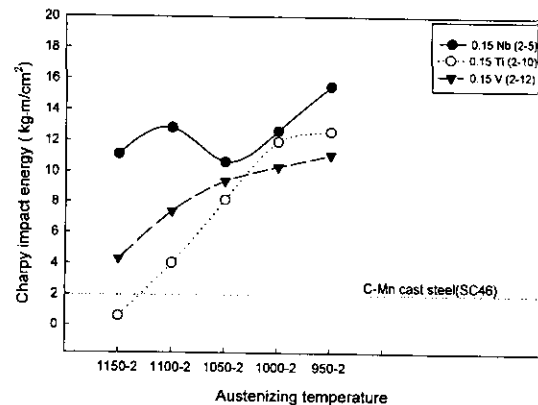


Fig. 3. Effect of austenizing temperature on Charpy impact energy for HSLA cast steels at room temperature. (Tempering : 600°C, 2hr.)

테나이트 영역으로 올려서 균질화 (균질화 생략시는 오스테나이트 처리) 처리를 해주며 이 경우 인성을 향상시키는 효과가 있다. 균질화 처리후에는 주강중에 석출되어있는 주조시의 느린 냉각속도 등에 의해 조대화된 (Nb,V,Ti) (C,N) 등의 석출물을 재용해 시키고 템퍼링 등과 같은 후속 열처리 공정에서 변태 및 미세한 석출물 생성을 원활히 하여 요구하는 기계적 특성을 얻을 수 있도록 할 수 있다. 문헌에 의하면 V (C,N)을 재용해 시키기 위해서는 950°C 이상이면 충분하나 Nb (C,N)을 용해시키기 위해서는 1150°C 이상이 되는 것이 바람직하다고 보고하고⁹⁾ 있으나 적절한 오스테나이트 온도에 대해서는 의견이 분분하다. 그 이유는 오스테나이트 온도는 높일수록 조대화된 석출물이 재용해되어 템퍼링시의 석출효과가 큰 반면에 오스테나이트 영역에서의 가열시 온도가 높으면 오스테나이트 결정립이 조대화

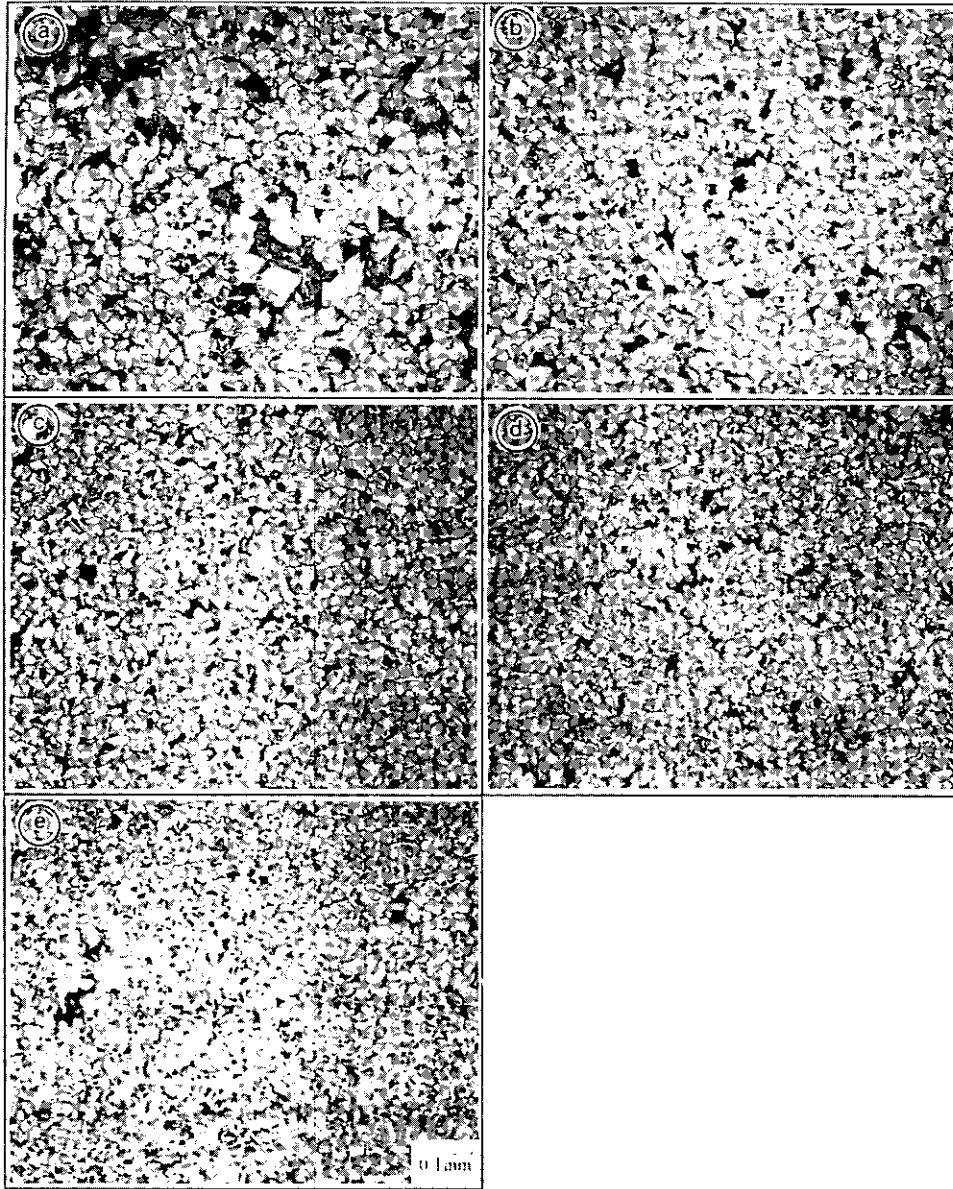


Fig. 4. Comparison of microstructures by various heat treatment for HSLA 2-5 (0.15 Nb)
 a) H:1050°C 2hr./A:1150°C 2hr./T:600°C 4hr. b) H:1050°C 2hr./A:1100°C 2hr./T:600°C 4hr.
 c) H:1050°C 2hr./A:1050°C 2hr./T:600°C 4hr. d) H:1050°C 2hr./A:1000°C 2hr./T:600°C 4hr.
 e) H:1050°C 2hr./A:950°C 2hr./T:600°C 4hr. (H:homogenizing A:austenizing T:tempering)

하여 페라이트 결정립이 조대화되기 쉬운 양면성이 있기 때문이다.

본 연구에서는 오스테나이트 온도 1150°C부터 950°C 구간 사이에서 각각 변화시켜가며 가열 후 공냉시킨 경우의 경도 및 충격값의 변화를 관찰하였다. 그림 2는 경도결과를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 V첨가 HSLA 주강의 경우를 제외하고는 주조조직에서는 대체로 높은 경도 값을 가지지만 열처리가 진행됨에 따라 경도가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 오스테나이트 온도에 따른 경도값은 첨가원소의 종류에 관계 없이 1050°C에서 2시간 균질화 처리 후 1150°C에서 2시간 오스테나이트 시 가장 높은 경향을 나타내는 것을 알 수 있고 이러한 경향은 Ti 첨가 주강의 경우 가장 심하며 그 다음이 V 첨가 주강이다. 이러한 사실로 미루어 보아 Ti 첨가 HSLA 주강의 경우 1150°C에서 오스

테나이트 처리를 하면 Nb나 V 첨가 HSLA 주강보다도 매우 높은 경도값을 얻을 수 있다. 그러나 1050°C의 오스테나이트 온도부터는 첨가원소의 종류에 관계 없이 오스테나이트 온도가 감소함에 따라 점차적으로 완만한 경도감소를 나타낼 수 있다.

그림 3은 오스테나이트 온도 변화에 따른 샤르피 충격치의 변화를 나타낸 결과이다. 충격치는 그림 2의 경도값과는 반비례하는 경향을 나타내며 오스테나이트 온도가 감소함에 따라 대체로 충격치는 증가하는 경향을 나타낸다. 서두에서도 언급했듯 HSLA 주강은 주 목적은 C-Mn 주강을 대체하는데 그 목적이 있다. 따라서 HSLA 주강이 C-Mn을 대체하려면 C-Mn의 충격치(본 연구결과에서 측정된 결과 SC46 구조물의 경우 약 2kg-m/cm²)에 비해 동등 이상이어야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 0.15%Ti 첨가

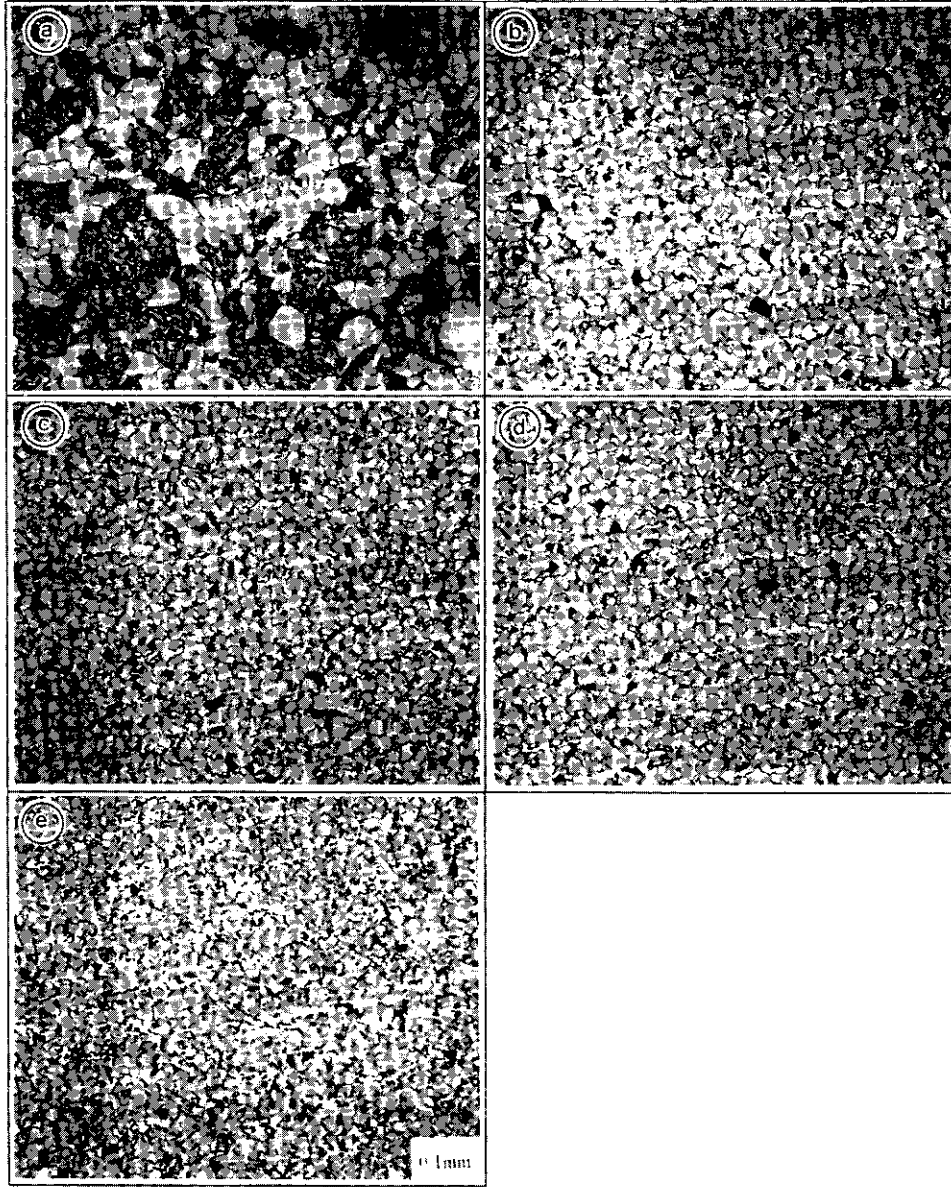


Fig. 5. Comparison of microstructures by various heat treatment for HSLA 2-10 (0.15 Ti)
 a) H:1050°C 2hr./A:1150°C 2hr./T:600°C 4hr. b) H:1050°C 2hr./A:1100°C 2hr./T:600°C 4hr.
 c) H:1050°C 2hr./A:1050°C 2hr./T:600°C 4hr. d) H:1050°C 2hr./A:1000°C 2hr./T:600°C 4hr.
 e) H:1050°C 2hr./A:950°C 2hr./T:600°C 4hr. (H:homogenizing A:austenizing T:tempering)

HSLA 주강의 경우 오스테나이트 온도 1100°C를 초과하면 곤란할 것으로 판단된다.

그림 4, 5 및 6은 Nb, Ti 및 V 첨가 주강에 대한 오스테나이트 열처리 조건별 현미경 조직사진이다. 문헌^{2,4,5)}에 의하면 Mo를 첨가하지 않은 Nb-V HSLA 주강의 공냉조직은 30°C/min. 이하의 빠른 속도에서도 펄라이트가 생기기 시작하지만 0.4% Mo를 첨가한 Nb-V HSLA 주강의 공냉조직은 1°C/min. 이하의 느린 냉각속도에서 비로소 펄라이트가 생기기 시작한다. 따라서 본 연구에서와 같은 0.5% Mo 첨가시 CCT diagram 상에서 펄라이트 nose를 오른쪽으로 이동시키면서 베이나이트 영역을 확대시키게 된다. 본 연구에 사용된 HSLA 주강 조성과 문헌상의 HSLA 주강의 조성이 유사하고 사용된 시험편의 냉각속도가 1°C/sec. 인 점을 고려하면 그림 4, 5 및 6에서 검게 나타나는 조직

은 베이나이트 조직이라고 볼수 있으며 이는 그림 4의 a) 조직을 확대한 그림 7의 SEM 관찰에서도 확연히 알수 있다. 그림 4, 5 및 6에서 보면 전반적으로 오스테나이트 온도가 감소함에 따라 희게 보이는 페라이트 결정립이 미세화됨을 알 수 있다. 따라서 Hall-Petch 식에 의한 입자미세화 측면에서 본다면 오스테나이트 온도를 감소시킬수록 페라이트 결정립은 미세화되는 경향을 나타내므로 그림 4-6의 e)가 강도 혹은 경도가 가장 높게 나타난다고 예상 할 수 있다. 그러나 실제로 그림 2의 경도결과를 보면 경도가 가장 낮으므로 경도향상에 기여하는 원인은 다른데 있다고 볼 수 있다. 그림 2의 경도 결과에 의하면 경도가 가장 높게 나타나는 오스테나이트 조건은 1050°C에서 2시간 균질화 처리후 1150°C에서 2시간 오스테나이트 정한 경우이다. 이 경우의 조직에서 특징적인 것은 Nb, Ti, V 첨가의 종류에 관

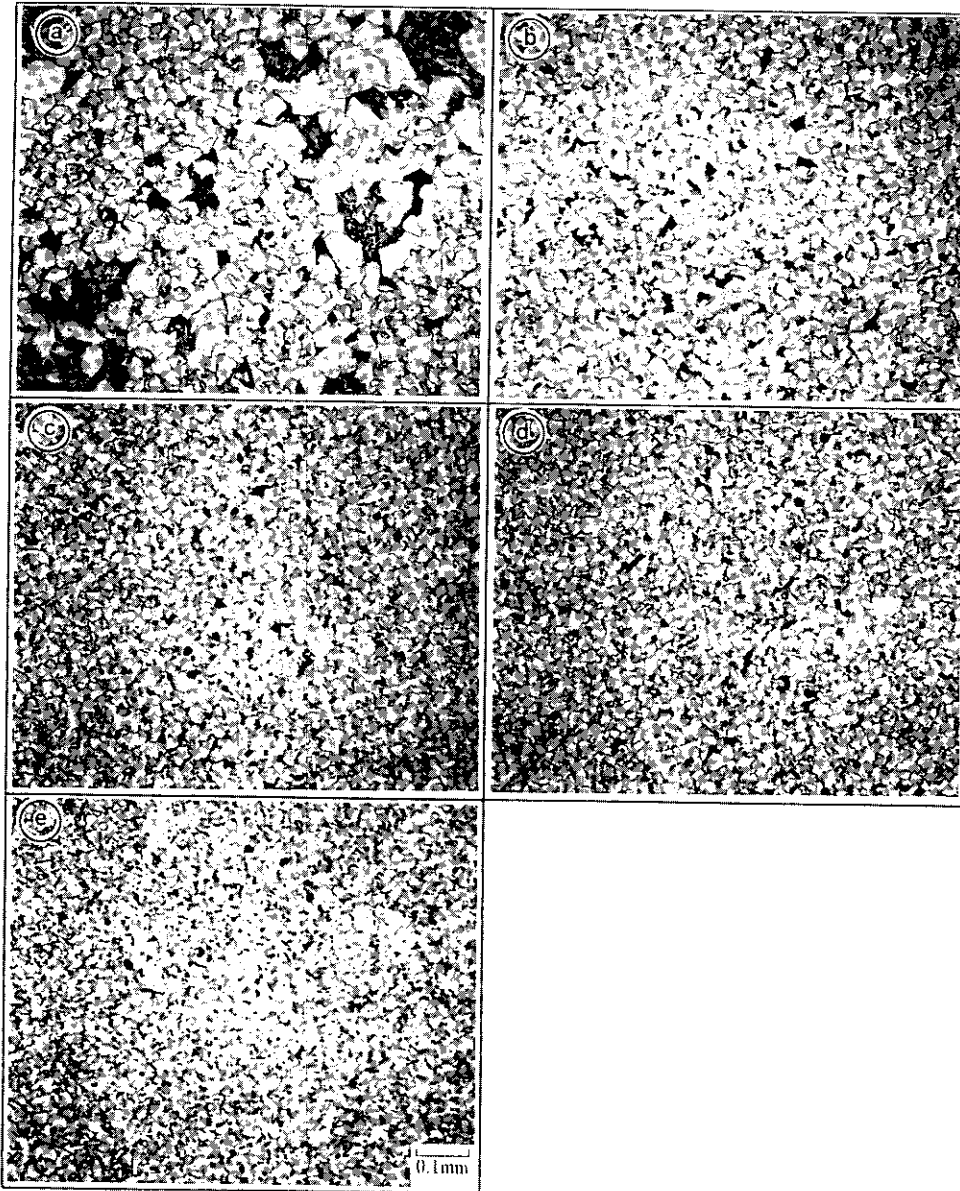


Fig. 6. Comparison of microstructures by various heat treatment for HSLA 2-12 (0.15 V)

a) H:1050°C 2hr./A:1150°C 2hr./T:600°C 4hr.

b) H:1050°C 2hr./A:1100°C 2hr./T:600°C 4hr.

c) H:1050°C 2hr./A:1050°C 2hr./T:600°C 4hr.

d) H:1050°C 2hr./A:1000°C 2hr./T:600°C 4hr.

e) H:1050°C 2hr./A:950°C 2hr./T:600°C 4hr.

(H:homogenizing A:austenizing T:tempering)

계 없이 검게 보이는 조대한 베이나이트 조직의 양이 다른 열처리 조건 조직에 비해 많다는 것이다. 따라서 석출물의 분포나 크기를 배제한다면 경도가 높게 나타나는 이유는 베이나이트 양에 우선적으로 기인한다고 볼수 있다. 즉 1050°C에서 2시간 균질화 처리후 1150°C에서 2시간 오스테나이트화한 경우 다른 열처리 조건에 비해 석출물중의 원소들이 보다 용이하게 오스테나이트 중에 용해됨으로서 변태점 저하 등에 의해 베이나이트 양이 증가한 것이다. 1150°C에서 2시간 오스테나이트화한 경우의 조건에 대해 첨가원소별 경도를 비교시 Ti 첨가의 경우가 Nb 나 V 첨가에 비해 경도가 높게 나타난다. 이러한 경도에 영향을 미칠수 있는 요인으로서 우선적으로 광학현미경상의 Ti 첨가의 경우가 Nb 나 V 첨가에 비해 베이나이트양이 상대적으로 많이 생성된 것을 원인으로 들수 있다. 이러한 베이나이트의 상대적인

양에 영향을 미칠수 있는 요인중의 하나는 오스테나이트중에 재용해되는 Nb, Ti 및 V 석출물로 인한 변태점 저하를 들수 있다. 본 연구에서는 앞서 언급했듯 진공용해 하였으므로 Nb, Ti 및 V를 첨가시 탄화물만 대부분 존재한다. 문헌³⁾에 의하면 1150°C에서의 오스테나이트 중에서의 NbC의 용해도곱(solubility product)은 7.4×10^{-3} , TiC는 9.3×10^{-3} , VC는 1.1로서 1150°C에서 재용해되는 양만을 본다면 VC가 단연 많고 그다음으로 NbC와 TiC로 비슷하다. 따라서 동일 냉각속도에서는 단연 베이나이트의 양이 가장 많은 것은 V 첨가 HSLA 주장일 것이다. 그러나 변태점 저하에 영향을 미칠수 있는 요인들은 합금원소별로도 차이가 나고 이외에도 여러가지가 복합적으로 존재하므로 이에 대해서는 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

오스테나이트화 온도가 석출물의 분포나 크기에 미치는 영

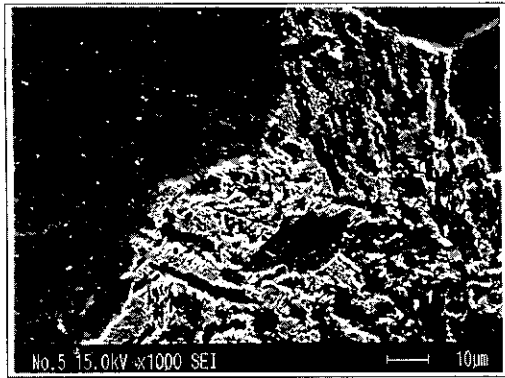


Fig. 7. SEM micrograph of Fig. 4 a) showing ferrite and bainitic structure.

향을 평가하기 위해 1150°C 및 950°C에서 각각 오스테나 이징한 Nb, Ti 및 V 첨가 시험편에 대해 TEM을 이용 석 출물을 관찰 하였다. 그림 8은 그 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 NbC, VC 및 TiC 석출물은 cubic 형태의 FCC 구조를 이루며¹⁰⁾ 그림 8의 a) 에 보는바와 같이 유사한 형 태의 cubic 석출물을 관찰 할 수 있다. 그러나 Nb 첨가 HSLA 주강의 경우 긴 꼬리를 가지는 석출물 형상도 관찰 되는데 이는 성분분석결과 Nb가 대부분이거나 Nb와 Mo 성분이 혼합된 것으로 나타났으며 cubic 형태를 제외한 대 부분의 부정형 석출물에서는 Nb 성분 단독으로 존재하는 경우는 거의 없었다. 석출물의 크기는 첨가원소의 종류에 관계 없이 큰것과 작은 것이 혼재함을 알 수 있었고 1µm에 서부터 수nm 크기까지 다양하였으나 강도에 큰 영향을 주

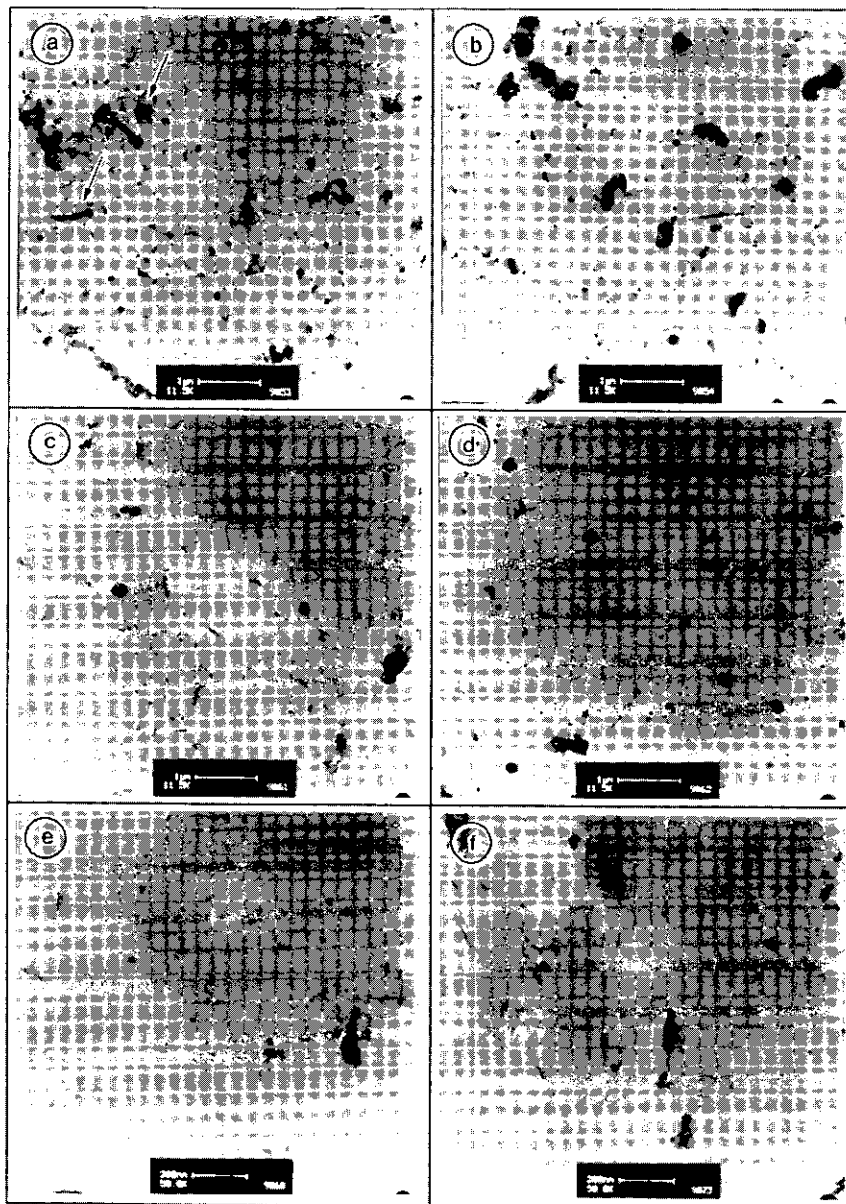


Fig. 8. TEM micrographs of extraction replicas illustrating the effect of austenizing temperature on the precipitation behavior for various HSLA cast steels.

- a) Austenized at 1150°C (2-5, 0.15 Nb)
- b) Austenized at 950°C (2-5, 0.15 Nb)
- c) Austenized at 1150°C (2-10, 0.15 Ti)
- d) Austenized at 950°C (2-10, 0.15 Ti)
- e) Austenized at 1150°C (2-12, 0.15 V)
- f) Austenized at 950°C (2-12, 0.15 V)

Table 2. Influence of austenizing temperature on vickers hardness of ferrite for HSLA cast steels. (Hv, 5g)

Alloying elements	austenizing temp.s	
	950°C	1150°C
Nb	150	181
Ti	165-180	248-280
V	150-180	161-190

는 10nm 이하의 석출물은 많지 않았다. 석출물의 성분은 대부분 Nb, V, 및 Ti를 위주로 하지만 공통적으로 첨가된 Mo, Si, Al 등도 관찰되었다. Nb 첨가 석출물의 경우 오스테나이트 온도 1150°C인 경우 950°C에 비해 큰 석출물의 크기가 상대적으로 적어 보이는데 이는 1150°C에서는 일부 석출물이 오스테나이트 중으로 용해된 반면 950°C에서는 그렇지 않고 석출물이 남아 있었기 때문으로 판단된다. 그러나 석출물의 분포나 크기에 있어 큰 차이는 없는 것으로 보아 석출물로 야기될 수 있는 정도차는 크지 않을 것으로 판단된다. Ti 첨가의 경우도 Nb 첨가의 경우와 유사하게 조대한 석출물이 950°C에서도 녹지않고 남아있음을 알 수 있다. 석출물의 성분은 Nb 첨가 시험편의 경우와는 달리 EDS 분석결과 Ti 외에 S가 검출됨을 알 수 있었다. 이러한 사실로 보아 Ti 첨가의 경우 석출물은 carbosulphide로도 존재함을 알 수 있으며 이는 다른 문헌³⁾에서도 확인된다. 그러나 석출물의 분포정도나 크기를 볼 때 역시 정도에 어느정도 영향을 줄지는 명확하지 않다.

그림 8의 e), f)는 V 첨가의 경우를 보여주고 있다. V 첨가의 경우 Nb 나 Ti 첨가에 비해 상대적으로 석출물의 분포가 적은 것을 알 수 있으며 오스테나이트 온도차에 의한 석출물의 분포나 크기의 차이는 거의 없다. 따라서 Nb, Ti 및 V 첨가의 경우에 있어 오스테나이트 온도차에 따른 석출물의 분포나 크기가 정도에 미치는 영향은 별로 없을 것으로 판단된다. 게다가 석출물의 성분에서도 시험편의 종류에 관계 없이 각각의 시험편에 공통적으로 첨가된 Mo, Si, 및 Al 등이 나타나는 복합적인 성분의 양상을 뚜렷이 정량화 시키는 다소 어려운 것으로 판단된다. 이상에서 보듯 오스테나이트 온도차에 따른 정도향상의 주요인은 베이나이트의 상대적인 양과 비례한다고 볼 수 있다. 그러나 오스테나이트 온도차가 다를 경우 석출에 기여하지 않고 페라이트(ferrite) 중에 고용되어 있는 성분들에 의한 고용강화 효과도 차이가 날 수 있다. 이러한 가능성을 검토하기 위해 Nb, Ti 및 V 첨가 시험편의 950°C 및 1150°C 열처리 조건에 대한 페라이트 정도를 측정하였다. 표 2는 그 결과를 나타낸 것이다. 표 2는 5그램의 미소 정도계를 이용한 것이므로 정량적인 신뢰는 다소 곤란할 수도 있으나 비교는 가능하다. 이 결과에 의하면 950°C에서 오스테나이트 온도 1150°C의 경우에 비해 첨가원소의 종류에 관계 없이 전반적으로 페라이트의 정도가 낮음을 알 수 있다. 따라서 오스테나이트 온도차에 의한 정도차는 결국 베이나이트의 상대적 양 뿐 아니라 고용강화 효과의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

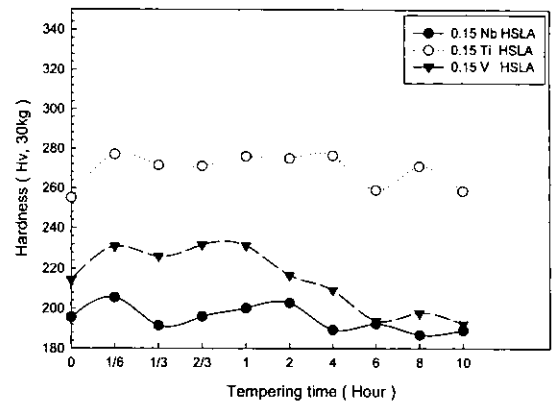


Fig. 9. Effect of tempering times on hardness for various HSLA cast steels austenized at 1150°C.

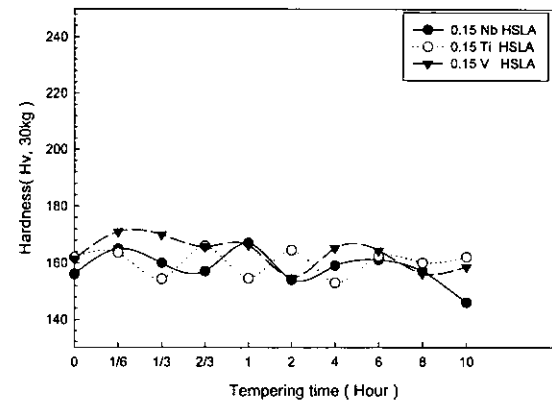


Fig. 10. Effect of tempering times on hardness for various HSLA cast steels austenized at 950°C.

템퍼링조건의 영향

HSLA 주강의 경우 템퍼링 온도와 시간은 석출물의 정도에 미치는 중요한 변수중의 하나이며 주로 580-660°C 온도 범위에서 이루어 진다.¹¹⁾ 본 연구에서는 오스테나이트 온도를 1150°C 및 950°C로 한 경우에 있어 템퍼링 시간에 따른 정도변화를 관찰 하였으며 템퍼링 온도는 600°C로 일정하게 하였다.

그림 9 및 10은 1150°C 및 950°C 로 각각 오스테나이트 온도인 경우에 대한 Nb, Ti 및 V 첨가 HSLA 주강의 템퍼링 시간별 정도변화를 나타낸 것이다. 그림 9에서 보면 앞에서 언급했듯 1150°C 오스테나이트 온도인 경우에 Ti 첨가의 경우에 대한 정도가 가장 높게 나타나고 그 다음이 V, Nb 첨가 순이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 Ti 첨가의 경우 10분정도 템퍼링함에 따라 정도가 약간 증가하다가 일정 시간까지는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있으며 V 및 Nb 첨가의 경우도 10분 템퍼링시 템퍼링 전보다 정도가 약간 상승하며 그 이후에는 거의 일정하게 유지되거나 감소하는 경향을 나타낸다. V 첨가의 경우 템퍼링시 일정시간 경과한 후부터는 정도가 다른 첨가원소에 비해 크게 감소함을 알 수 있다. 이상의 사실로부터 공냉조건의 경우 첨가원소의 종류에 관계 없이 템퍼링 초기에 정도향상이, 크지는 않지만 대부분 이루어짐을 알 수 있으며 이러한 결과는 Voigt¹¹⁾의 연

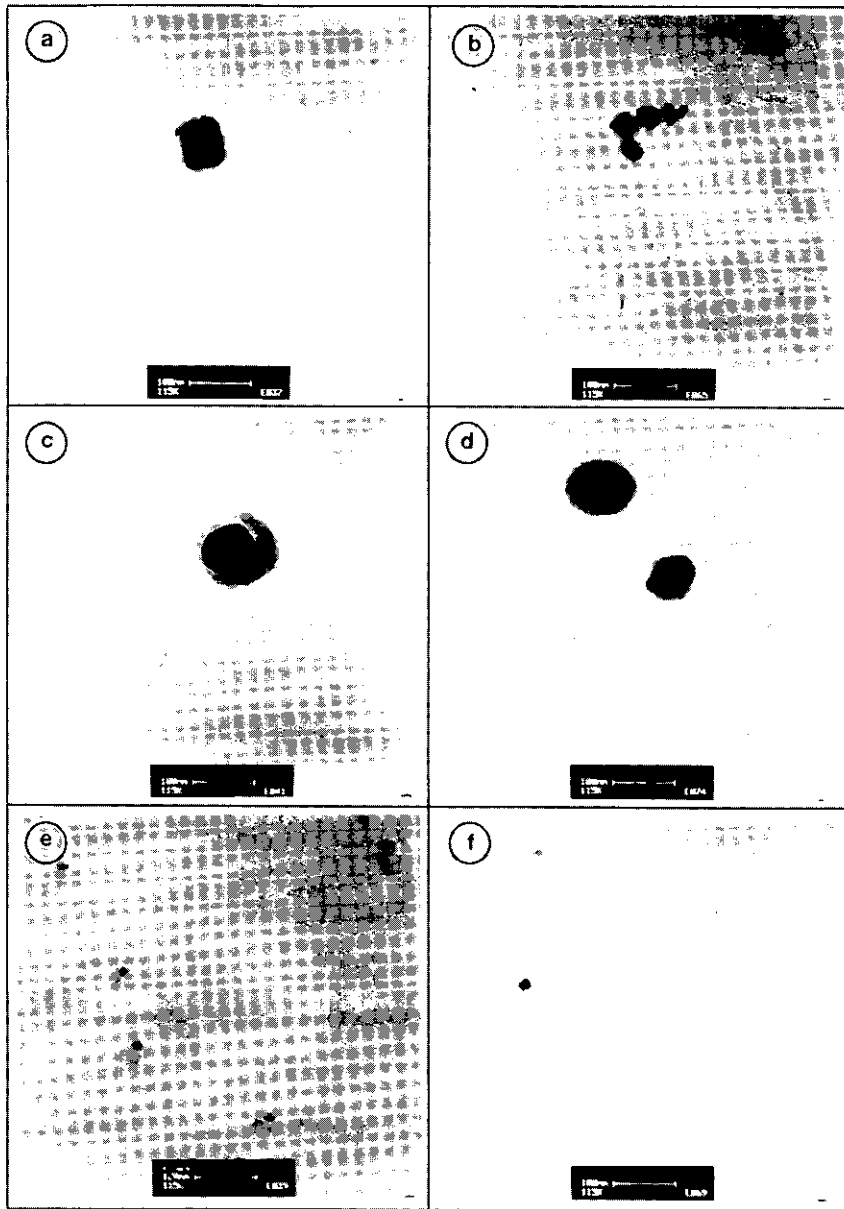


Fig. 11. TEM micrographs of extraction replicas illustrating the effect of tempering on the precipitation behavior for various HSLA cast steels austenitized at 1150°C.

- a) Without tempering (2-5, 0.15 Nb)
- b) Tempered for 10 min. (2-5, 0.15 Nb)
- c) Without tempering (2-10, 0.15 Ti)
- d) Tempered for 10 min. (2-10, 0.15 Ti)
- e) Without tempering (2-12, 0.15 V)
- f) Tempered for 10 min. (2-12, 0.15 V)

구결과와도 잘 일치하고 있다. 그림 10에서 보듯 950°C에서 오스테나이징 한 경우에도 Nb, Ti 첨가원소의 경우 초기에 경도가 약간 상승하는 경향을 나타낸다. 그러나 1150°C 열처리조건 보다는 경도상승 효과가 적고 거의 미미한 수준이다. 이러한 템퍼링 초기의 경도상승현상은 템퍼링에 의한 석출현상 때문일 가능성이 높다. 이러한 석출효과를 확인하기 위해 템퍼링전 및 템퍼링 10분후의 석출물의 거동을 관찰하였다.

그림 11은 그결과를 나타낸 것이다. 이결과에 의하면 템퍼링 전이나 후를 비교시 Nb, Ti 및 V석출물의 분포나 크기변화는 거의 없는 것을 알수 있는데 이러한 사실로 보아 공냉시 템퍼링에 의한 석출효과는 그다지 크지 않으며 이는

템퍼링 초기에 경도향상 효과가 그다지 크지않은 결과와 잘 일치한다. 그리고 비록 석출현상에 의한 경도향상 효과가 약간 있더라도 주조시험편의 경우 특히 관찰부위에 따라 석출물의 크기나 분포의 변화가 심하므로 TEM 관찰에 의한 석출물의 거동으로 5-20Hv 정도의 경도향상 효과를 설명하기에는 다소 무리인 것으로 판단된다.

그림 12는 1150°C에서 오스테나이징한 Nb 첨가 HSLA 주강에 대한 템퍼링 시간변화에 따른 조직변화를 템퍼링전, 템퍼링 10분, 4시간, 10시간에 대해 각각 나타낸 결과이다. 템퍼링 시간증가에 따라 결정립이 약간 조대해지는 경향은 있으나 조직의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않음을 알 수 있다. 템퍼링 시간증가에 따른 보다 구체적인 조직인 석출

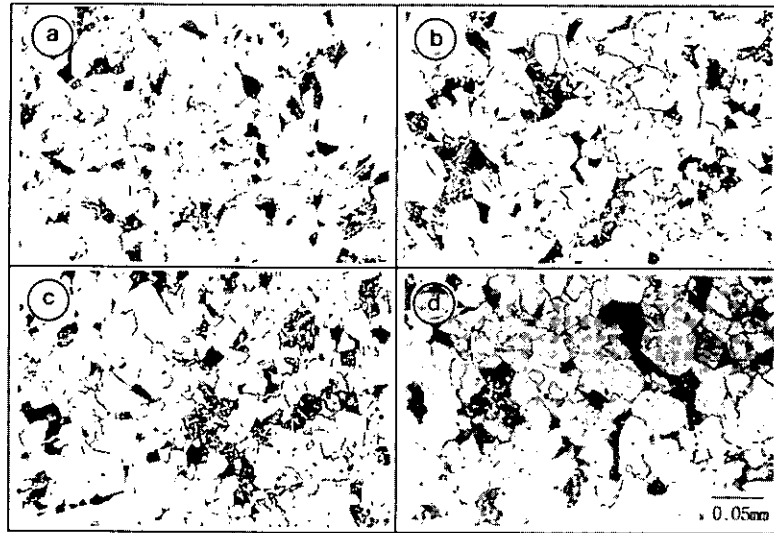


Fig. 12. Optical micrographs illustrating the effect of tempering times for 0.15 Nb HSLA cast steels austenized at 1150°C.

a) Without tempering b) Tempered for 10 mins c) Tempered for 4 hrs d) Tempered for 10 hrs

물변화를 보기 위해 TEM 관찰을 하였다. 그림 13은 1150°C 오스테나이트 열처리 조건에 대한 10분 및 10시간 템퍼링에서의 석출물변화를 나타낸 결과이다. Nb 및 Ti 첨가의 경우 템퍼링시간이 증가하더라도 석출물에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 V 첨가의 경우 10시간 템퍼링의 경우 10분 템퍼링에 비해 조대한 석출물이 다수 존재함을 알 수 있는데 이러한 사실로 미루어 보아 V 첨가 HSLA 주강에서 1150°C 오스테나이트의 경우 10시간 템퍼링시 경도 감소가 큰 이유는 석출물의 조대화 때문으로 판단되며 Nb 나 Ti 첨가의 경우 10시간 템퍼링에서도 경도가 감소가 적은 이유는 석출물 조대화가 거의 없었기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

Nb, Ti 및 V를 0.15% 씩 각각 첨가한 3종의 HSLA 주강에 대해 오스테나이트 온도를 1150°C에서 950°C 구간에서 열처리 하거나 템퍼링 시간을 10분에서 10시간 까지 변화시킨 공냉조직의 기계적 특성 및 조직학적 특성등을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 오스테나이트 온도를 1150°C로 하여 2시간 가열시킨 경우 첨가원소의 종류에 관계없이 경도가 가장 증가하였으며 오스테나이트 온도를 1100°C로 낮춤에 따라 경도는 급속히 감소하여 그이하의 온도에서는 서서히 경도가 감소하는 경향을 나타내었고 결정립의 크기는 반대의 경향을 나타내었다.

2) 오스테나이트 온도를 1150°C로 하여 2시간 가열시킨 경우 Nb, Ti, V 첨가원소중에서 경도가 가장 높게 나타난 것은 Ti 첨가 HSLA 주강이며 오스테나이트 온도변화에 따라 경도차가 나는 주된 이유는 베이나이트 조직의 상대적인 양과 고용강화에 주로 기인한 것으로 석출물의 영향은 거의 미미하였다.

3) 1150°C에서 오스테나이트화한 Ti 첨가 HSLA 주강의

경우를 제외하고는 대부분의 경우에 있어 C-Mn 주강을 대체 하기 위한 최소 충격값인 2kg-m/cm² 이상의 충격치를 나타내었다.

4) 1150°C에서 오스테나이트화한 경우 첨가원소의 종류에 관계 없이 10분정도 템퍼링에서 경도가 약간 증가하여 그 이후는 템퍼링 시간이 증가함에 따라 약간의 기복현상을 보이며 일정하게 유지되는 경향을 나타냈으나 V 첨가 HSLA 주강의 경우 템퍼링 시간이 1시간 이후부터 감소하기 시작하여 10시간 후에는 상당히 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 석출물의 조대화 때문이다.

5) 950°C에서 오스테나이트화한 경우 Nb, Ti 첨가의 경우 10분정도 템퍼링에서 경도가 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 미미한 수준이었고 그 이후는 템퍼링 시간이 증가함에 따라 약간의 기복현상을 보이며 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. R.C. Voigt and J.Rassizadehghani, Trans. of AFS, **103**, 791 (1995).
2. C. Lebeau, Trans. of AFS, **92**, 645 (1984).
3. T. Gladman, The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Materials, London, pp 185, pp. 121, pp. 265 (1997).
4. D.L. Albright, G.T. Eldis, Trans. of AFS, **90**, 625 (1982).
5. Geoffrey Tither, Electric Furnace Conference Proceedings, 48, Iron & Steel Soc., Pennsylvania, pp. 304 (1990).
6. F.B. Pickering, Physical Metallurgy and the Design of Steels, Applied Science, London, pp. 72 (1978).
7. Harry Stuart, JOM, **41**, 35 (1991).

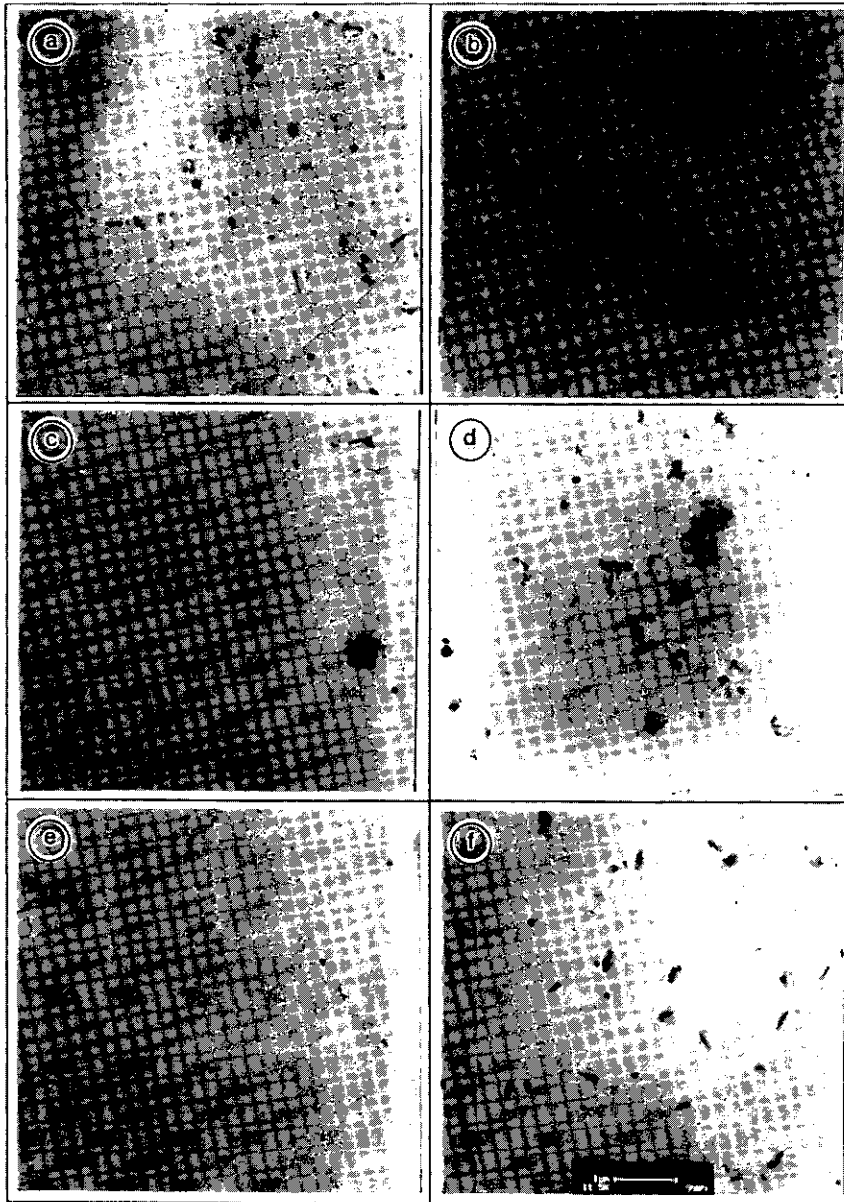


Fig. 13. TEM micrographs of extraction replicas illustrating the effect of tempering time on the precipitation behavior for various HSLA cast steels austenized at 1150°C.

- | | |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| a) Tempered for 10 mins (2-5, 0.15 Nb) | b) Tempered for 10 hrs (2-5, 0.15 Nb) |
| c) Tempered for 10 mins (2-10, 0.15 Ti) | d) Tempered for 10 hrs (2-10, 0.15 Ti) |
| e) Tempered for 10 mins (2-12, 0.15 V) | f) Tempered for 10 hrs (2-12, 0.15 V) |

8. R.B. Hetnarski, Thermal Stresses II, Elsevier Science, New York, pp. 330 (1987).
 9. J. Rassizadehghani, Ph. D. Theis, pp. 46, University of Kansas (1990).

10. Ki-Bong Kang. Ph. D. Thesis. pp. 29, Pohang University of Sci. & Eng., Korea (1996).
 11. Thomas M. : Micro-alloying 75, pp. 75, Union carbide co., Washington, USA (1975).