

|||||||
論 文
|||||||

HSLA 주강의 기계적 성질에 미치는 첨가원소의 영향

박재현 · 김인배*

Effects of Additional Elements on the Mechanical Properties of HSLA Cast Steels

Jai-Hyun Park and In-Bae Kim*

Abstract

The effects of additional elements on the mechanical properties of HSLA cast steels such as hardness, tensile strength and charpy impact energy have been investigated. Test results showed the mechanical properties of HSLA cast steels were superior to those of C-Mn cast steels. In case of the HSLA cast steels, HSLA cast steels with all addition of Nb, V, and Ti had more excellent tensile strength than those with individual addition of Nb, V, or Ti. The tensile strengths of HSLA cast steels were increased as the Mo contents were increased from 0.25% to 0.5%. These are attributed to the solution hardening and the change of the precipitation kinetics of NbC due to increased Mo contents. The tensile strength of HSLA cast steel was remarkably increased as the manganese contents were increased from 0.65% to 1.2% and 1.5%, respectively. However, the optimum composition of HSLA cast steels to obtain the best compromise between tensile strength and charpy impact energy compared to C-Mn cast steel was the additions of 0.1% C and 1.2% Mn. (Received June 7, 2000)

1. 서 론

HSLA (high strength low alloy)강은 저탄소강 혹은 중탄소강에 약간의 Nb, V, 및 Ti등을 독립적으로 넣거나 혼합하여 첨가한 강으로서 최근에 가공재에 적용된 많은 기술들이 HSLA 주조품에도 성공적으로 적용되었다. 가공품과 주조품과의 가장 큰 차이는 가공품의 경우 우수한 기계적 특성을 기계적 변형등에 의해 얻을 수 있는데 반해 주조품의 경우 우수한 기계적 성질을 초기의 적절한 성분조정과 열처리에 의해 얻는다[1].

산업설비의 일반구조용강이나 반복적인 열부하를 받는 슬라그팟(slag pot) 등과 같은 고온용기에 적용되는 C-Mn주강은 탄소함량을 증가시킴에 따라 강도값을 높이게 된다. 그러나 탄소함량의 증가에 따라 충격치 저하 및 용접성에 큰 문제점이 나타나고 또한 고온에서 사용시 기계적 특성이 저하되는 단점이 있다. 고온에서의 특성을 보완하기 위해서는 고온강도를 유지할 수 있는 다량의 합금원소를 첨가하여야 하나 이경우 소재

가격이 상승할 뿐 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 및 Ti 등과 같은 미량원소 첨가에 의한 석출강화, 결정립 미세화 및 고용강화 등에 의한 강도향상 효과를 주강에 적용한 예이다[2]. 따라서 탄소함량을 낮추고 적절한 미량원소 첨가와 열처리조건에 의한 입자미세화, 석출경화 및 고용강화효과를 얻을 수 있는 HSLA주강으로 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[3-8]. 그러나 HSLA 주강이 많은 적용분야에 대한 잠재적인 가능성을 가지고 있음에도 불구하고 아직까지 재질규격이나 사용처 및 체계적인 연구등이 미진한 실정이다[2].

따라서 본 연구에서는 C-Mn주강과 HSLA주강의 상

포항산업과학연구원(Research Institute of Industrial Science & Technology)
*부산대학교 금속공학과(Department of Metallurgical Eng., Pusan National University)

온 및 고온 강도를 비교분석하고 대체재료인 HSLA 주강의 기계적 특성에 영향을 미칠 수 있는 탄소나 망간, Nb, V 및 Ti와 같은 미량원소의 첨가량에 대해 검토하였다.

2. 실험방법

C-Mn 주강인 SC42등을 대체하기 위한 재료로서 HSLA 주강을 여러성분으로 설계하여 진공주조로 시편을 제작하였다. 시험편은 전해철 및 각종 첨가원소를 이용, 50 kg 용량의 진공로에서 용해후 130×130×300(mm) 크기로 금형주조한 시편을 제작하여 중앙을 절단 65×130×300(mm) 크기로 한후 열처리하였다. 열처리후 시험편의 중앙부에 형성된 결함을 포함하는 부위를 일정크기로 길이방향을 따라 제거하였으며 최종 크기는 50×130×300(mm)으로 하여 특성을 평가하였다. 표 1은 SC42, 미량원소를 넣지 않은 주강과 각종 성분을 첨가한 HSLA 주강의 성분을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 HSLA 주강의 성분은 1차용해재인 경우(HSLA 1-1~1-4) Nb의 단독첨가와 Nb 와 V의 복합첨가시의 특성비교와 Mo의 영향을 살펴보기 위해 각각 0.5%, 0.25% Mo를 첨가하였다.

2차용해재인 경우(HSLA 2-4~2-13)Nb, V 및 Ti의 단독첨가량의 영향을 살펴보기 위해 각각원소에 대해 0.05%-0.15% 범위내에서 첨가하였으며 Nb, V 및 Ti 의 3종을 동시에 첨가한 복합첨가강을 제조하여 특성을 비교하였다.

3차용해재인 경우(HSLA 3-2~3-10) Nb-V의 복합첨가영향과 C와 Mn의 영향을 살펴보기 위해 C을 0.10%-0.16% 범위내에서 첨가하였고 Mn을 0.6%-1.5% 범위내에서 첨가하였다.

이렇게 주조된 SC42 및 HSLA 주강을 표 2에서 보는바와 같은 조건으로 열처리를 실시하였다. 제조된 시험편은 경도시험, 상온 및 고온 인장시험, 샤르피 충격시험, 광학현미경 및 SEM을 이용한 조직관찰 등을 통해 첨가원소가 HSLA 주강의 특성에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였고 석출물의 거동을 관찰하기 위해 추출레프리카를 이용 TEM 관찰을 하였다.

또한 페라이트 결정립의 크기를 측정하기 위해 입도 분석기를 이용 결정립의 크기를 측정하였다.

경도측정은 30 kg의 하중을 사용하여 비커스 경도를 측정하였다. 인장시험편은 전체길이가 150 mm 이고 그립부 직경이 16φ, 평행부 직경이 8φ, 게이지 길이가 18 mm 인 환봉을 사용하였으며 시험온도는 상온,

Table 1. Chemical compositions of used materials.

	C	Mn	Nb	V	Al	Ti	Mo	S/P	Si	Ni	Cr
SC42	0.152	0.85	-	-	-	-	-	0.025	0.49	-	-
X	0.109	0.659	-	-	0.052	-	0.501				
HSLA 1-1	0.095	0.65	0.1	-	0.05	-	0.5				
HSLA 1-2	"	"	"	-	0.048	-	0.25				
HSLA 1-3	"	"	0.05	0.05	0.05	-	0.5				
HSLA 1-4	"	"	"	"	0.053	-	0.25				
HSLA 2-4	0.099	0.640	0.047	-	0.037	-					
HSLA 2-5	0.103	0.642	0.146	-	0.049	-					
HSLA 2-8	0.100	0.648	-	-	0.060	0.051					
HSLA 2-9	0.101	0.649	-	-	0.055	0.112					
HSLA 2-10	0.101	0.655	-	-	0.050	0.147					
HSLA 2-11	0.100	0.654	-	0.052	0.034	-					
HSLA 2-12	0.114	0.652	-	0.151	0.050	-					
HSLA 2-13	0.104	0.664	0.053	0.053	0.044	0.053					
HSLA 3-2	0.104	0.658	0.098	-	0.050						
HSLA 3-3	0.145	0.652	0.095	-	0.053						
HSLA 3-4	0.102	0.655	0.049	0.050	0.059						
HSLA 3-6	0.102	1.16	0.049	0.052	0.054						
HSLA 3-8	0.102	1.50	0.049	0.052	0.055						
HSLA 3-10	0.161	1.51	0.051	0.050	0.057						

S/P 0.025
Si : 0.5 - 0.51
Ni : 0.1 - 0.12
Cr : 0.35 - 0.38

Table 2. Heat treatment conditions for SC42 and HSLA cast steels

Specimen	Heat treatment				
	Annealing	Homogenizing	Austenizing	Tempering	
SC42	950°C, 2 hr.	-	-	-	-
HSLA 1-11-4	-	1050°C, 2hr.	1100°C, 2hr.	600°C, 4hr.	
HSLA 2-4 2-13	-	1050°C, 2hr.	1150°C, 4hr.	600°C, 4hr.	
HSLA 3-23-10	-	1050°C, 2hr.	1150°C, 2hr.	600°C, 4hr.	
HSLA 3-23-10	-	1050°C, 2hr.	1100°C, 2hr.	600°C, 4hr.	

500°C 및 700°C 이고 0.5 mm/min 인장속도로 시험하였다.

샤르피 충격시험은 V홈을 가지는 시험편을 사용하였으며 200°C 에서의 시험은 글리세린을 가열시켜 사용하였다.

시험값은 경도, 인장 및 충격시험 모두 동일조건에 대해서 3번을 반복시험하여 평균값을 취하였다. 페라이트 결정립 크기측정은 조직시험편을 현미경에 올려놓고 100배 확대후 입도분석기로 10회 측정하여 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 C-Mn 주강과 HSLA 주강의 비교

일반구조물 등의 부재로 널리 사용되는 C-Mn 주강(SC42 등)은 표 2에서 보는바와 같은 전형적인 소둔(annealing)처리후 사용하게 되며 HSLA 주강의 경우 균질화(Homogenizing)-오스테나이트화(Austenizing)-템퍼링(Tempering)의 3단계 혹은 오스테나이트화-템퍼링 등의 2단계 열처리 공정을 거친후 사용하게 된다.

그림 1 및 2는 C-Mn 주강과 HSLA 주강의 경도

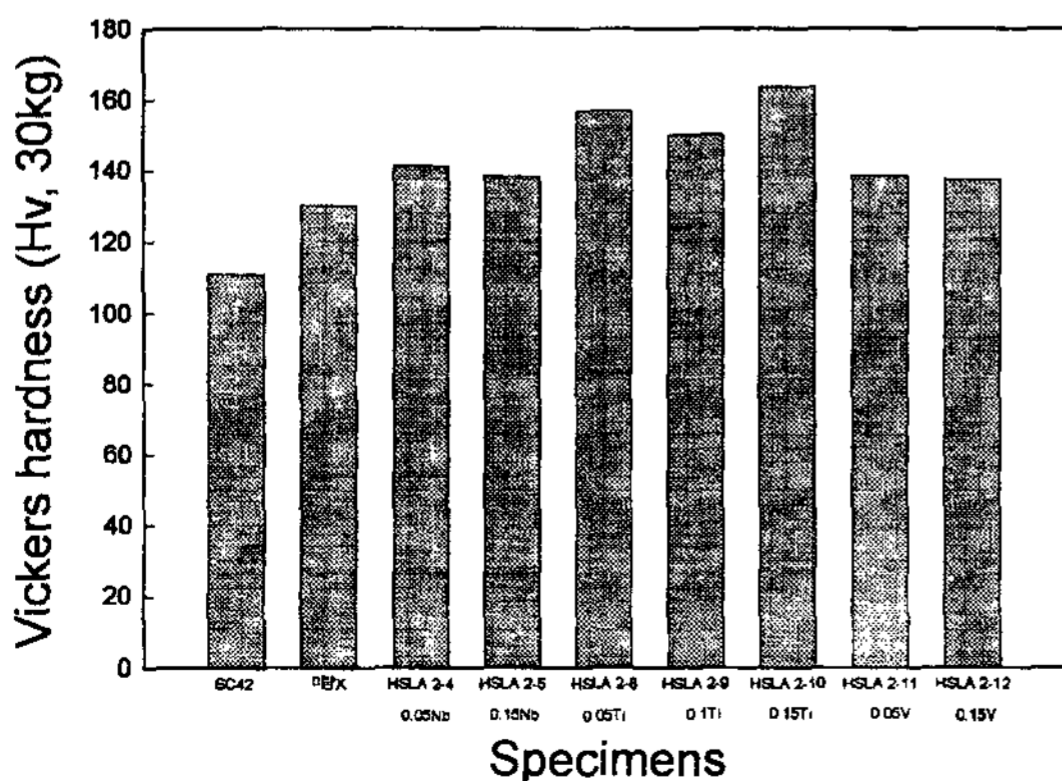


Fig. 1. Effect of alloyed element on hardness for various cast steels.

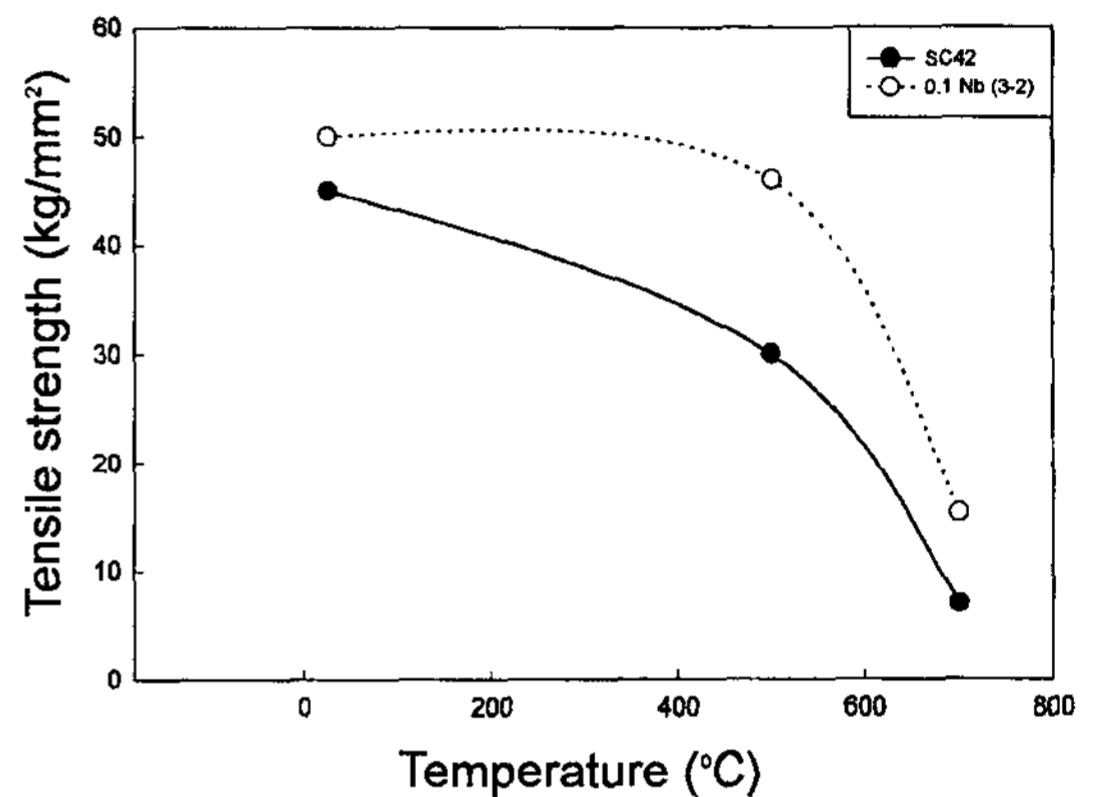
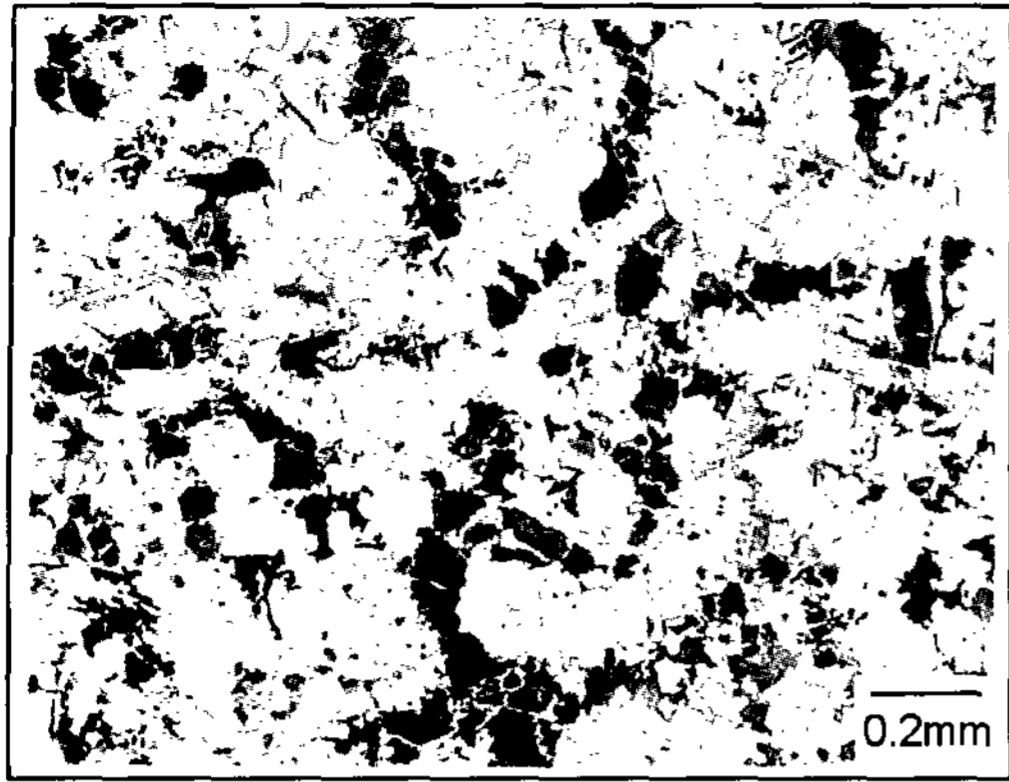
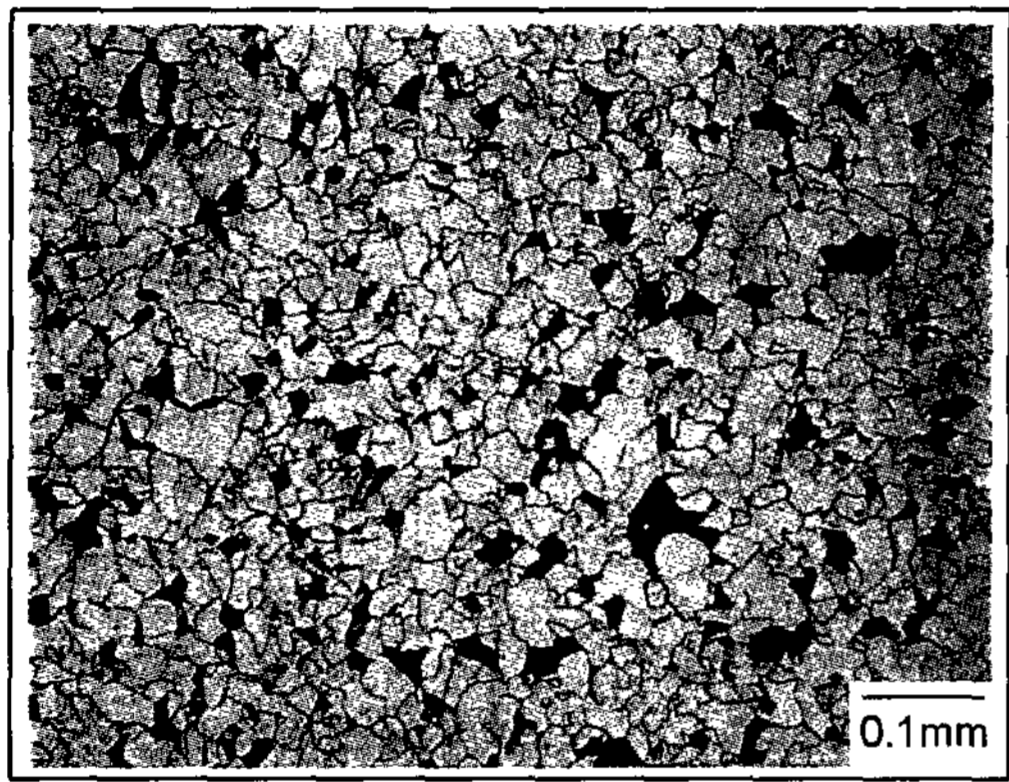


Fig. 2. Comparison of tensile strength for SC42 and HSLA 3-2.

및 강도 특성을 비교한 결과이다. 그림 1에서 보면 C-Mn 주강인 SC42는 경도가 110 Hv 내외인 반면 HSLA 주강은 대부분 140 Hv 이상의 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 인장강도 비교에서도 명확함을 알 수 있는데 그림 2에서 보는바와 같이 상온 인장강도의 경우 SC42가 45 kg/mm² 임에 반해 HSLA 주강의 경우 50 kg/mm²임을 알 수 있다. 이러한 격차는 고온으로 갈수록 심해지며 700°C와 같은 고온의 경우 SC42가 8 kg/mm² 미만임에 반해 HSLA 주강의 경우 16 kg/mm² 이상으로 약 2배정도 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 이유는 SC42의 경우 현미경조직이 페라이트와 펄라이트의 혼합조직임에 반해 HSLA 주강의 경우 애시쿨라 페라이트 혹은 베이 나이트 조직과 페라이트의 혼합조직으로 이루어질 뿐 아니라 고온에서도 안정한 석출물(여기서는 진공용해하였으므로 질화물은 거의 없고 탄화물만 대부분 존재)을 형성하고 있기 때문이다. 그림 3 및 4는 SC42 및 HSLA 주강의 현미경 조직결과이다. 여기서 그림 3은 SC42와 HSLA 주강의 광학현미경 조직을 비교한 것이며 그림 4는 HSLA 주강의 조직을 확대한 SEM 사진이다. 그림 3 및 4에서 알수 있는 바와 같이 SC42의



(a) SC42



(b) HSLA 2-4

Fig. 3. Comparison of optical microstructure for SC42 and HSLA 2-4.

조직은 전형적인 페라이트와 펄라이트의 혼합조직이며 페라이트 결정립이 HSLA 주강에 비해 다소 조대하다. 그러나 HSLA 주강의 경우 그림 4에서 보는바와 같이 베이나이트와 페라이트의 혼합조직 및 Nb, V 및 Ti의 탄화물(화살표)로 구성되어 있고 페라이트 결정립도 SC42보다는 미세하다. 베이나이트 조직의 생성가능성은 유사성분을 가지는 합금의 CCT 곡선상에서 유추가 가능하며 다른 연구결과[3]에서의 현미경 조직과 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 그림 1에서 미량 X로 표시된 조성은 HSLA 주강성분에서 Nb, V, 및 Ti 등의 첨가원소를 제외한 것인데 SC42 보다는 경도가 높지만 0.05%-0.15% 범위의 Nb, V 및 Ti 등을 첨가한 HSLA 주강보다는 경도가 낮음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 Nb, V 및 Ti 등의 첨가는 결정립 미세화, 석출물 형성 및 고용강화등에 의해 기계적 특성의 향상에 기여함을 예측할 수 있다. HSLA 주강에서 첨가

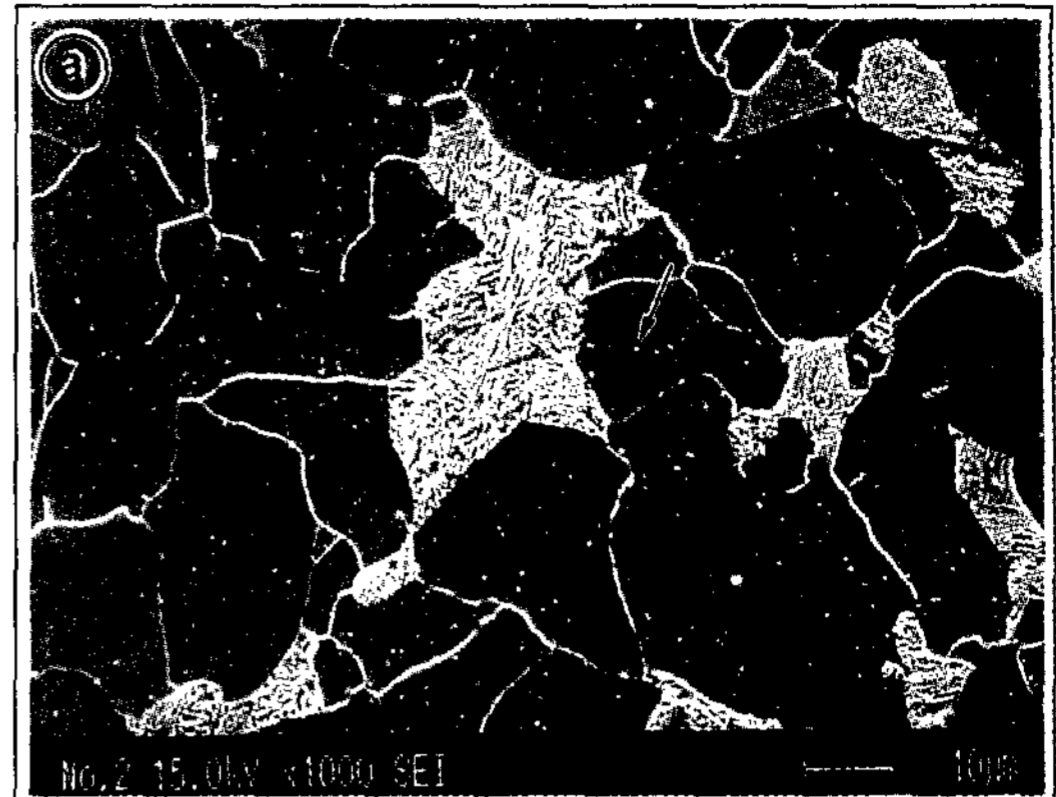


Fig. 4. Magnifications of Fig. 3b). (a) ×1000 (b) ×5000

원소의 양을 각각 0.05%-0.15% 범위에서 달리첨가한 경우 첨가원소량이 증가하더라도 Nb 나 V 원소의 경우 큰 차이는 없는 것으로 보이며 Ti의 경우 0.15%를 첨가시 경도가 상승하는 경향을 나타낸다. Nb, V 및 Ti 각각의 원소에 대한 단독 첨가효과 비교시 전반적으로 Ti 원소를 첨가하는 것이 Nb나 V 원소 첨가보다 우수한 것으로 판단된다.

3.2 HSLA 주강에 미치는 Mo 의 영향

그림 5는 0.1%Nb 첨가 HSLA 주강 및 0.05%Nb-0.05%V HSLA 주강의 Mo 첨가량 변화에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 그림이다. Mo 성분은 통상적인 경우 강도를 향상시키기 위해 첨가하는 경우가 대부분이다. HSLA 주강의 경우 Mo 첨가량을 0.25%에서 0.5%로 증가시킬 경우 0.1%Nb HSLA나 0.05%Nb-0.05%V HSLA 주강 모두 고온 인장강도가 대부분 증가함을 알 수 있다. 이러한 강도증가의 원인은 여러가지가 있을 수 있으며 그중의 하나는 고용강화 효과

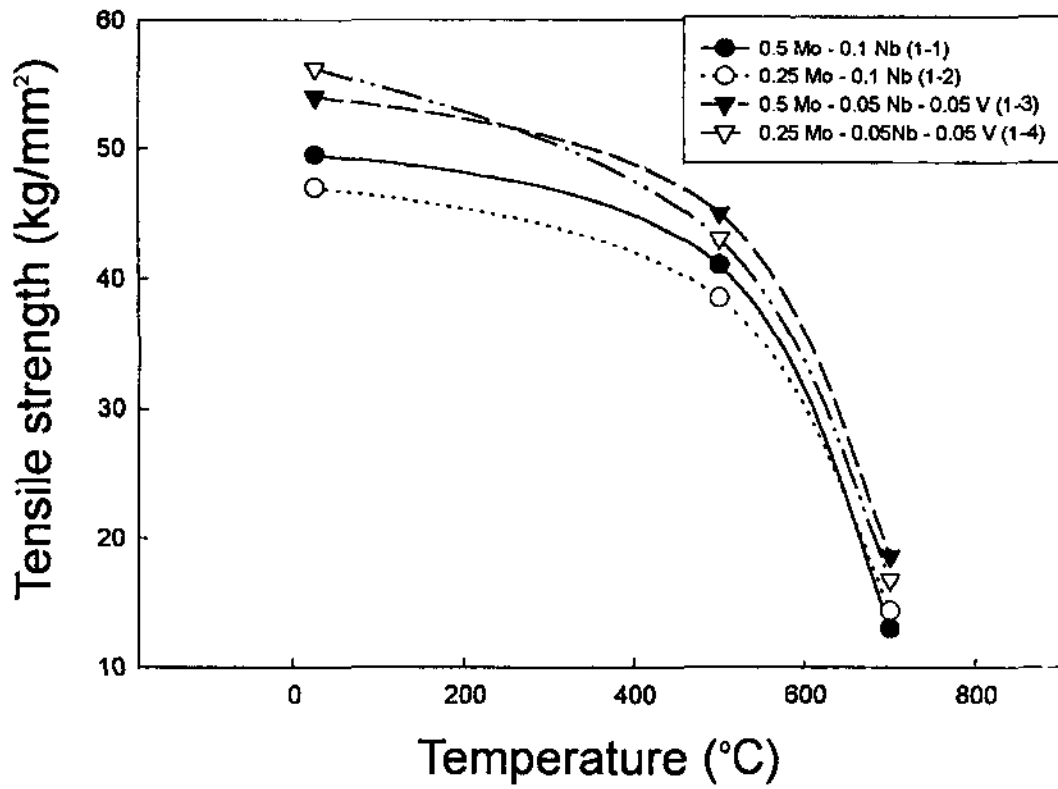


Fig. 5. Comparison of tensile strength for Nb and Nb-V HSLA cast steels with different Mo contents.

이다. Mo 첨가에 의한 또다른 효과는 Nb(C,N)등의 석출속도에 미치는 영향이다[1]. Mo의 첨가는 오스테나이트 중의 Nb 고용량을 높이므로 석출을 지연시켜 C 곡선상에서 등온석출시 nose온도를 낮춤으로서 템퍼링시 보다 많은 석출물이 생성되어 강도향상에 기여하게 된다.

3.3 HSLA 주강의 특성에 미치는 Nb, V 및 Ti 의 영향

HSLA가공재의 경우Nb, V 및 Ti 등을 단독 혹은 복합 첨가 함으로서 원하는 기계적 성질을 얻을 수 있는데 주강의 경우에 있어서도 목적은 다르지만 기계적 특성 향상을 위해 단독 혹은 복합첨가를 고려해 볼 수 있다. 앞서 언급한 그림 5는 Mo를 0.25% 혹은 0.5% 첨가한 HSLA 주강에 있어 동일한 미량합금원소양에 대해 Nb를 단독첨가한 경우와 Nb-V를 복합 첨가한 경우를 비교한 결과이다. 여기서 보면 Nb를 단독 첨가한 경우 Nb-V를 복합 첨가한 경우보다 상온 및 고온 인장강도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 한편 J. Sekine 등[9]의 연구결과에서도 Nb, V의 단독 첨가보다는 Nb-V의 복합첨가가 강도향상에 큰 기여를 함을 볼 때 Nb, V 등을 첨가시 단독 첨가보다는 복합첨가가 강도측면에서 유리할 것으로 판단된다.

그림 6은 동일한 Nb, V 및 Ti의 미량합금원소양에 대해 단독 첨가한 경우와 3종을 동시에 복합 첨가한 경우에 대한 인장강도 결과이다. 여기서 우선적으로 알 수 있는 사실은 큰 차이는 아니지만 첨가원소의 종류에 따라 강도값이 다르다는 것과 3종을 복합첨가한 경우 강도가 가장 높다는 사실이다. 단독 첨가의 경우

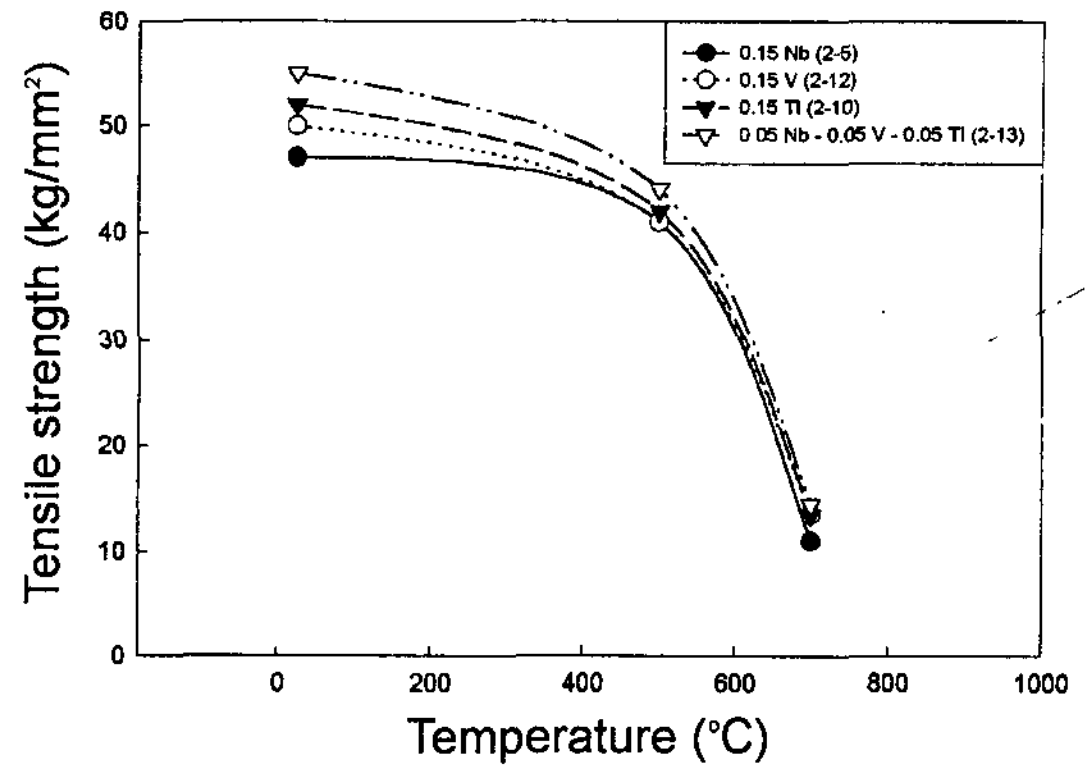


Fig. 6. Effect of microalloyed elements of HSLA cast steels on tensile strength.

가장 강도가 낮은 원소는 Nb 이며 그 다음이 V, Ti 등의 순서이다. 이러한 강도차이는 각각의 첨가원소에 의한 변태점변화, 오스테나이트 결정립 미세화 효과, 석출효과, 석출물의 경도, 고용강화 및 첨가원소간의 상호작용(복합첨가시)등 강도에 미치는 영향이 다양하므로 정확한 판단을 내리기는 매우 곤란하다. HSLA 가공재의 경우 L. Meyer 등[10]에 의하면 0.08% Nb, V 및 Ti 등의 단독 첨가시 Nb>V>Ti 순으로 강도향상 효과가 있으며 J. Sekine 등[9]의 경우 0.1% Nb, V 첨가시 강도향상 효과가 거의 같음을 보여주고 있다. 즉 이와 같은 사실은 본 연구결과와는 다소 상반된 결과인데 이는 HSLA강의 경우라도 가공의 존재 유무, 용해조건이나 열처리조건, 기타 성분등이 Nb, V 및 Ti 등의 첨가효과에 서로다른 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 그림 7은 각각의 Nb, V 및 Ti 원소첨가에 대한 시험편의 광학현미경 관찰 결과를 나타낸 것이다. 모든 경우에 있어 조직은 페라이트와 베이나이트의 혼합조직이며 광학현미경으로 관찰할 수는 없으나 미세한 석출물이 산재되어 있다. 본 연구에서는 시험편을 진공 용해 하였으므로 석출가능한 성분은 주로 NbC, VC 및 TiC 등이다. NbC 및 TiC의 경우 오스테나이트화 시 1100°C 이상의 고온에서도 비교적 안정한 형태로 존재하므로 오스테나이트 결정립의 조대화를 방지하여 페라이트 변태시 결정립이 미세하여 강도나 충격치가 향상될 수 있다. 반면에 오스테나이트화 온도에서 오스테나이트 중으로의 Nb, Ti 용해량은 상대적으로 줄어들므로 템퍼링시의 석출효과에 의한 강도향상은 적게 된다. VC의 경우 1000°C 정도의 오스테나이트화 온도에서 거의 대부분 용해되므로 템퍼링시 석출효과는 Nb

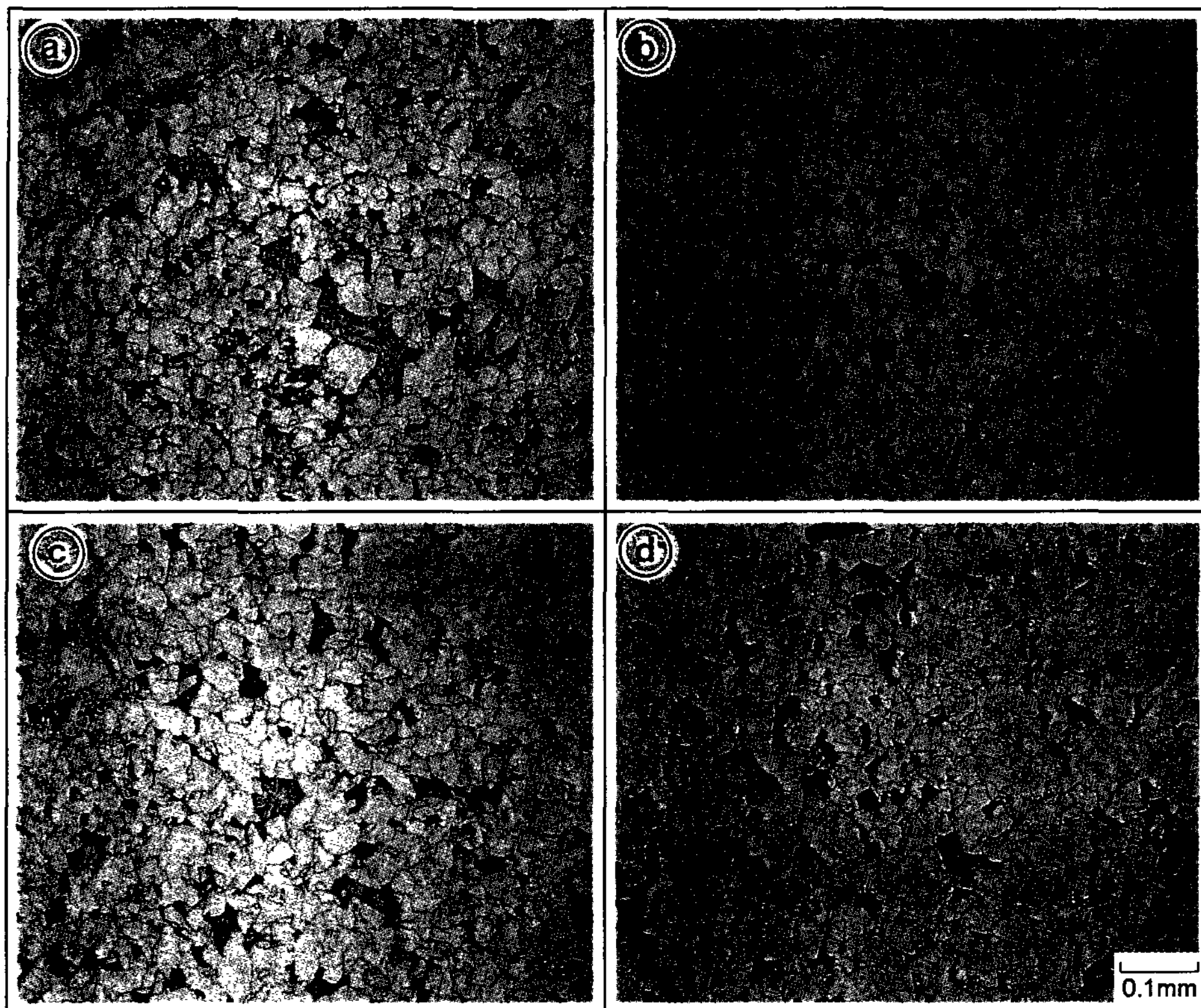


Fig. 7. Comparison of optical micrograph for various HSLA cast steels. (a) HSLA 2-5 (0.15Nb) (b) HSLA 2-10 (0.15Ti) (c) HSLA 2-12 (0.15V) (d) HSLA 2-13 (0.05Nb-0.05V-0.05Ti)

첨가보다 효과가 크다. 반면에 오스테나이트 결정립 성장을 억제하는 효과가 상대적으로 적으므로 페라이트 결정립 미세화 효과는 상대적으로 적다고 볼 수 있다. L. Meyer의 연구[11]에 의하면 열간압연한 HSLA강의 경우 Nb, V 및 Ti를 0.12% 첨가한 경우 페라이트 결정립의 크기는 $V(90\mu) > Ti(55\mu) > Nb(25\mu)$ 순으로 V 첨가의 경우가 페라이트 결정립이 가장 큰 것으로 보고하고 있으며 또다른 연구결과[12]서도 Nb나 Ti에 비해 V첨가의 경우가 페라이트 결정립이 큰 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서도 각각의 첨가원소에 대한 페라이트 결정립의 크기를 측정하였다. 그 결과를 나타낸 것이 그림 8이다. 여기서 알수 있는 것은 예상대로 V첨가 HSLA 주강의 경우가 다른 시험편에 비해 페라이트 결정립의 크기가 조대하며 Ti 첨가의 경우가 페라이트 결정립이 가장 작은 것을 알 수 있다. 그러나 첨가원소의 종류에 따라 20-26 μ 범위내에서 큰 차이가 없음을 알 수 있는데 이러한 사실은 기존의 HSLA 강공재에서 연구되었던 Meyer 등의 결과와는 많은 차이

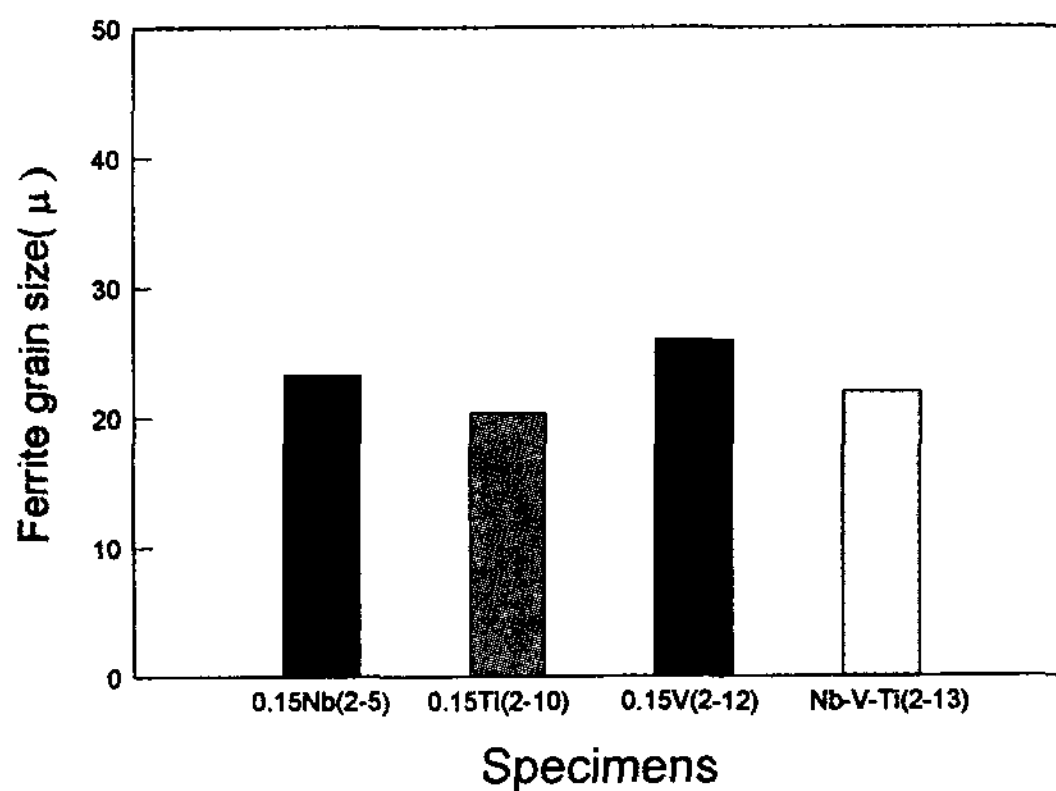


Fig. 8. Effect of microalloyed elements of HSLA cast steels on ferrite grain size.

를 보이고 있다. 이러한 원인에 대해서는 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그러나 이러한 사실로 미루어 볼 때 HSLA 주조재에서 사용된 Nb, V 및 Ti 첨가원소가 페라이트 결정립의 크기에 미치는 영향

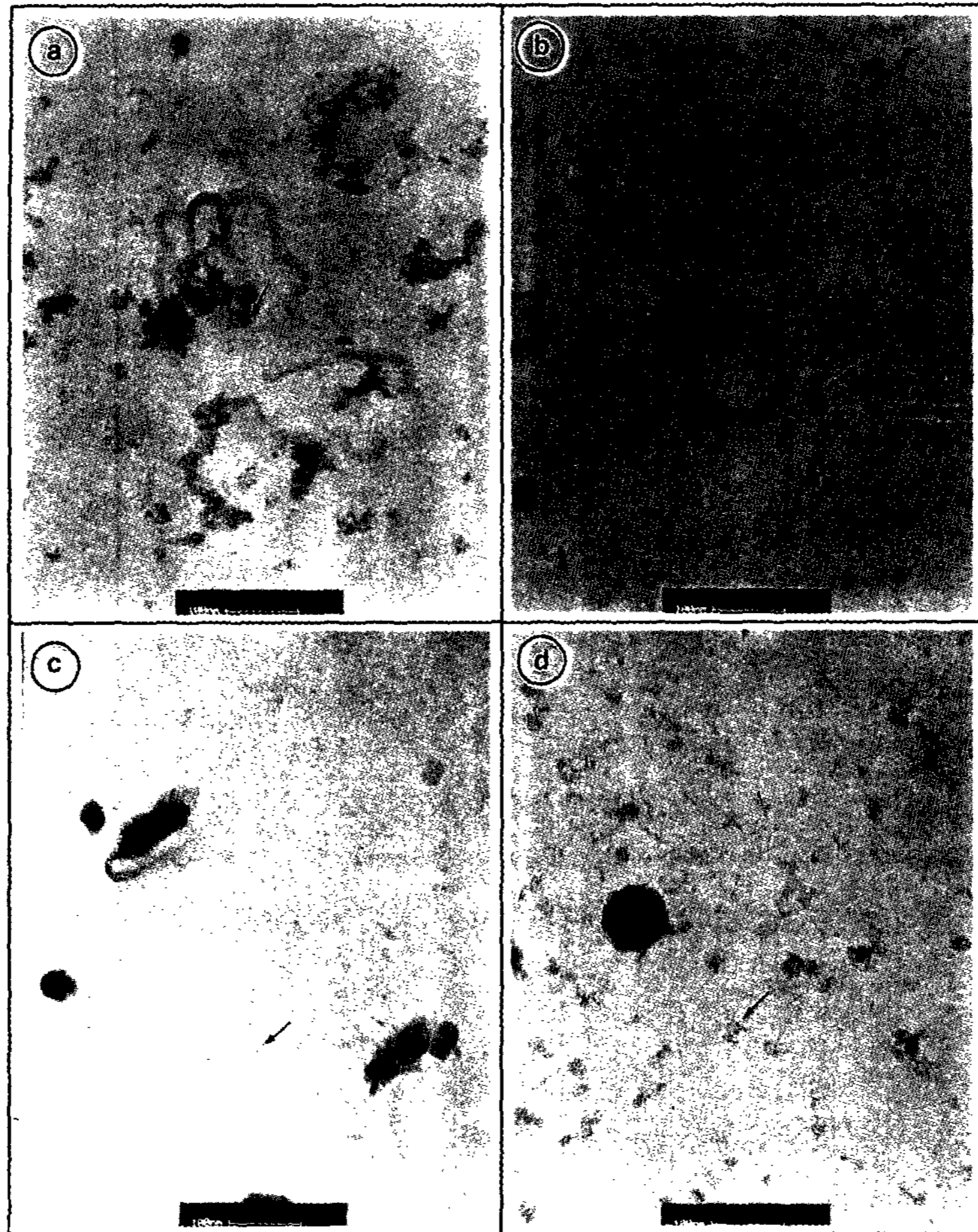


Fig. 9. Comparison of TEM for various HSLA cast steels. (a) HSLA 2-5 (0.15Nb) (b) HSLA 2-10 (0.15Ti) (c) HSLA 2-12 (0.15V) (d) HSLA 2-13 (0.05Nb-0.05V-0.05Ti)

은 가공재의 경우에 비하면 매우 적다는 것을 알 수 있고 첨가원소의 종류를 달리하더라도 페라이트 결정립의 크기차이로 인해 강도에 미치는 영향은 적으리라는 것을 짐작할 수 있다.

그림 9는 Nb, V 및 Ti 3종을 단독 및 복합첨가한 경우에 대한 시험편의 석출물을 관찰한 TEM 사진이다. NbC, VC 및 TiC 석출물은 NaCl 구조인 cubic 구조를[13] 가지며 성분분석결과 단독으로 존재하기도 하나 Mo 성분을 포함하는 것도 다수 있었고 형상도 다양하였다. 대부분의 경우에 있어 석출물 크기는 1 μ 크기에서 수nm 크기까지 다양하게 존재하였으나 본 사진에는 강도에 큰 영향을 미치는 미세한 크기를 가지는 것만을 나타내었다. 석출물의 분포를 본다면 V 첨가의 경우 오스테나이트화 영역에서 대부분 용해되었을 것이

므로 템퍼링시 보다많은 석출물이 관찰되어야 하며 예상되로 다른 첨가원소에 비해 미세한 다수의 석출물이 관찰된다. 동일한 조건에서 석출물의 경도만을 고려시 각각의 원소를 단독첨가한 경우 Ti 첨가 시험편이 Nb나 V 첨가 시험편에 비해 강도가 높은 이유는 석출물의 경도가 강도에 미치는 영향을 고려할 때 TiC의 경우 3200 Hv[14] 인 반면 V나 Nb의 경우 이보다 낮은 2800 Hv 내외로 이러한 경도차에 기인한 때문일 수 있다. Nb, V 및 Ti 원소를 복합첨가한 경우 페라이트 결정립의 크기가 단독첨가에 비해 큰 차이를 보이지 않고 석출물의 크기나 분포 형상등에 있어 특이한 현상이 나타나지 않는 것으로 보아 복합첨가로 인한 강도증가의 원인은 첨가원소간의 상호작용이나 기타 다른 요인에서 기인하는 것으로 판단된다. 종합적으로

볼 때 본 연구의 결과에서는 각각의 첨가원소가 강도에 미치는 영향은 Ti의 경우가 가장 높게 나타났으며 그림 5 및 6의 결과로부터 알수 있듯 단독첨가보다는 복합첨가의 경우가 강도적인 측면에서는 유리함을 알 수 있다.

3.4 HSLA 주강의 특성에 미치는 C, Mn 의 영향

모든강종에 있어서 C, Mn 원소는 강도향상을 위해 항상 고려의 대상이 되는 원소이다. HSLA 주강의 경우 C의 함량을 가능하면 줄이고 반면에 Mn을 첨가함

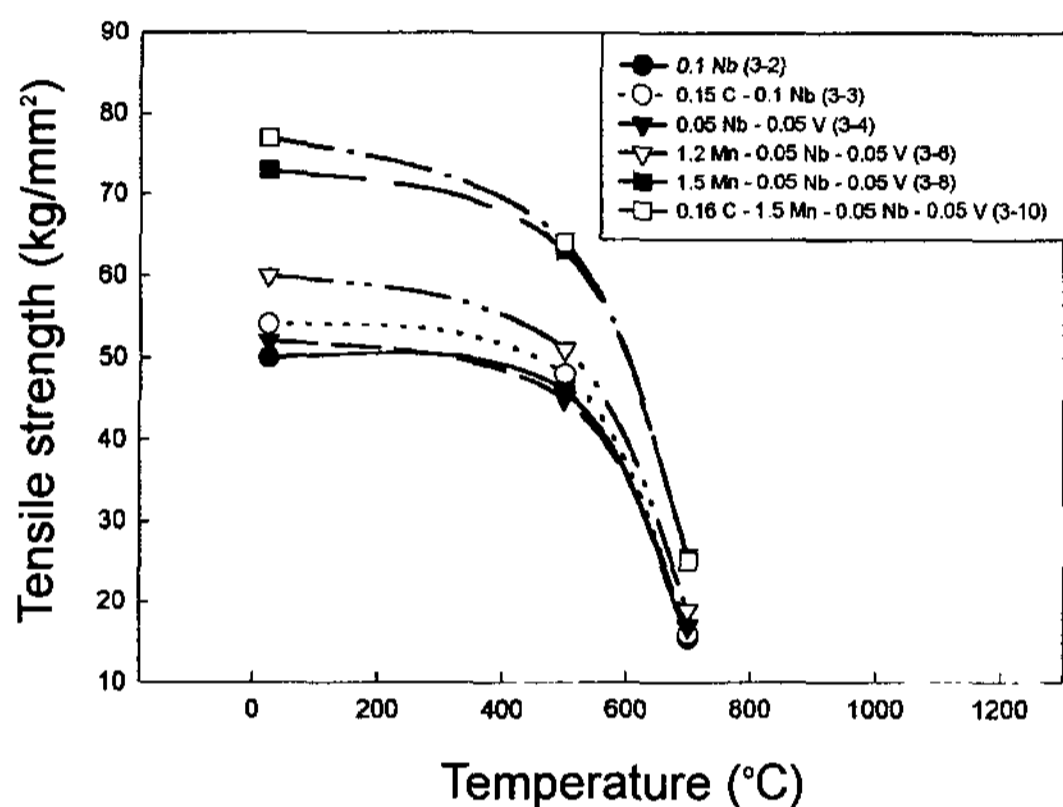


Fig. 10. Effect of carbon and manganese contents on the tensile strength of HSLA cast steels.

으로서 용접성과 강도, 충격특성을 향상 시킬 수 있다. 그림 10은 HSLA 주강에서 C 및 Mn 함량 증가가 강도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림 10에서 보면 0.1%C 조성(3-2)을 가지는 0.1% Nb HSLA 주강의 경우 C 함량을 0.15%로 증가시키기에 따라 강도는 약간 상승함을 알 수 있다. 그러나 그 값은 크지 않으며 그림 10에서 보는바와 같이 조직상의 변화도 거의 없다. 0.05%Nb-0.05%V HSLA 주강의 경우 Mn의 함량을 0.65%에서 1.2% 및 1.5%로 증가시키기에 따라 상온 인장강도의 경우 52 kg/mm²에서 60 kg/mm² 및 73 kg/mm² 등으로 각각 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 Mn 첨가에 의한 고용강화 효과 및 변태점 강하 등을 원인으로 들 수 있다. 광학현미경상의 조직사진에서 보면 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 1.2%Mn 첨가 HSLA 주강이나 0.65% Mn 첨가 HSLA 주강이나 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 따라서 이 경우 강도향상 원인은 변태점 강하보다는 고용강화 효과에 의한 강도향상 때문으로 여겨진다. 그러나 Mn의 첨가량이 1.5%가 되면 고용강화 효과 및 변태점강하등에 의한 입자미세화 및 미세 베이나이트 조직 증가 등으로 인해 강도는 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 게다가 여기에 C의 함량을 0.16%로 증가시키기에 따라 조직은 더욱 미세하여져서 강도는 급격

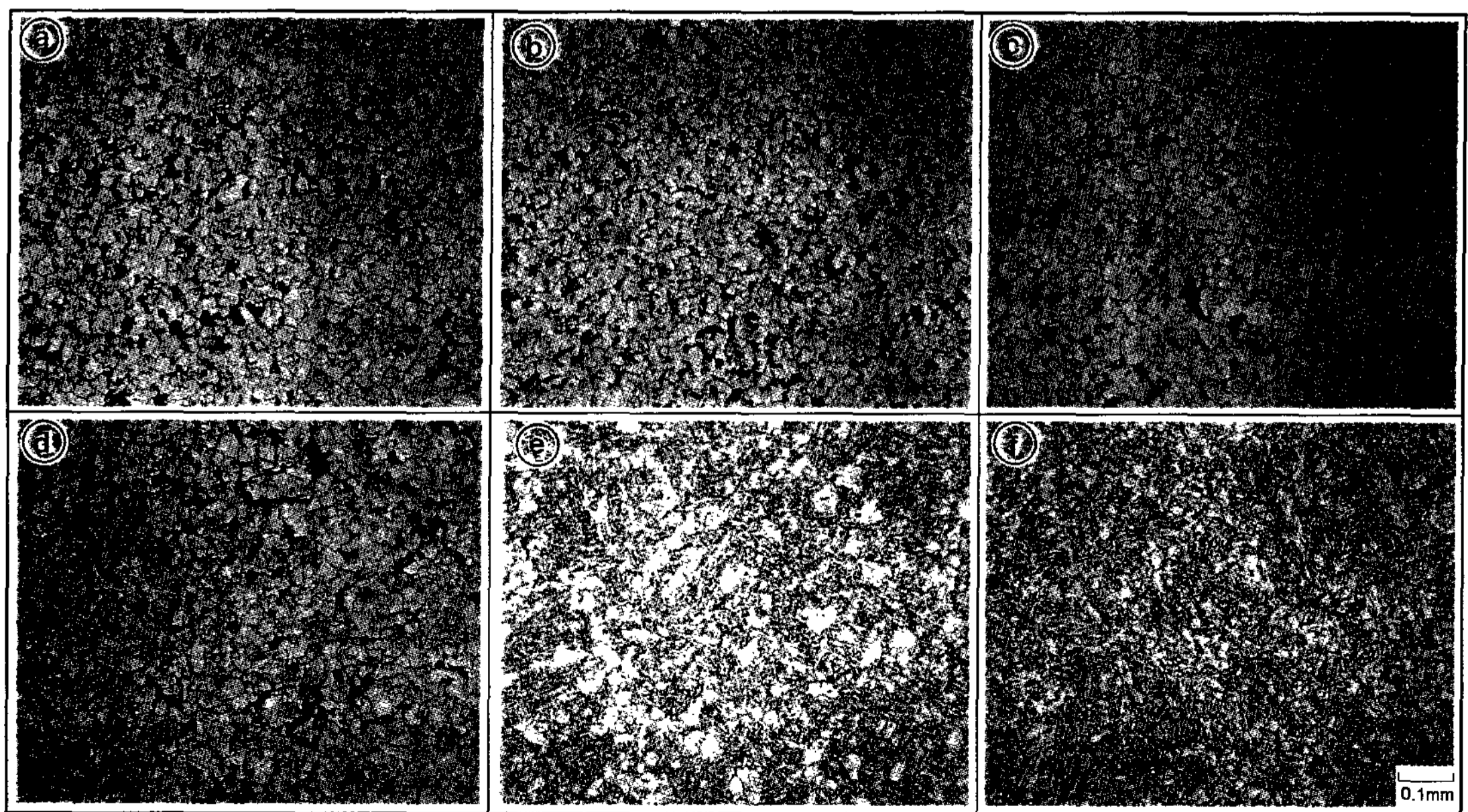


Fig. 11. Comparison of optical micrograph for various HSLA cast steels. (a) HSLA 3-2 (b) HSLA 3-3 (c) HSLA 3-4 (d) HSLA 3-6 (e) HSLA 3-8 (f) HSLA 3-10

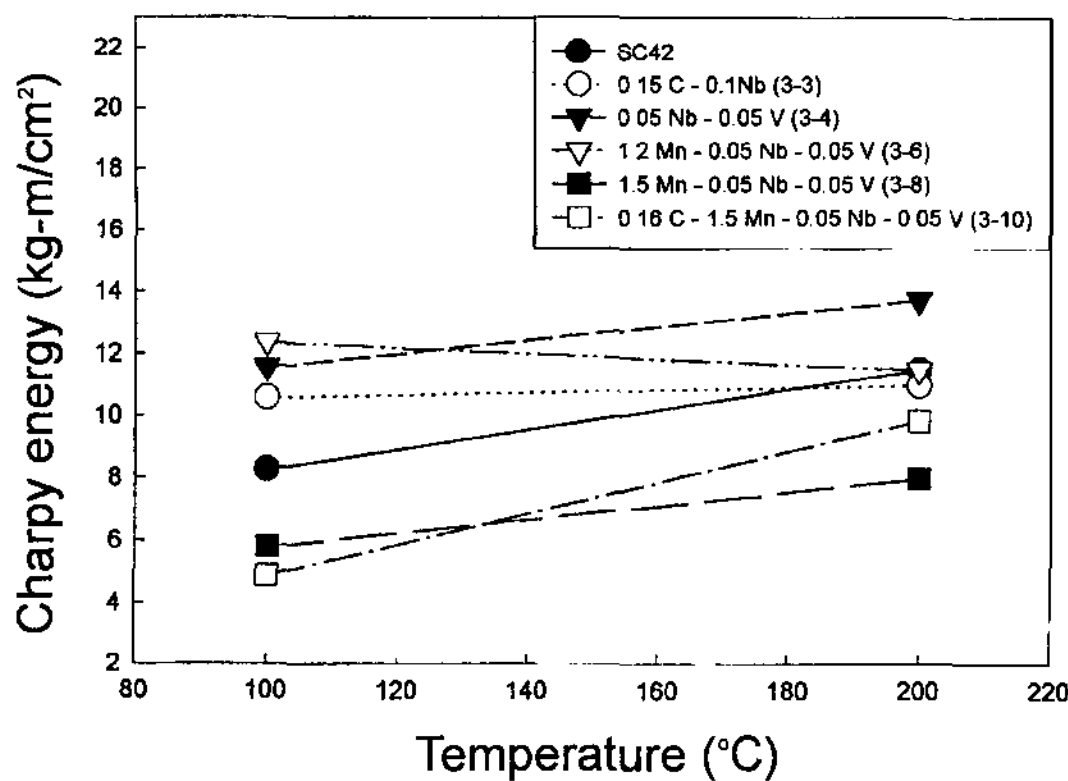


Fig. 12. Comparison of Charpy energies for SC42 and various HSLA cast steels.

히 상승하게 된다. 따라서 HSLA 주강의 경우 강도향상만을 고려한다면 C나 Mn을 높이는 쪽으로 재질을 설계하는 것이 유리하다. 그렇지만 HSLA 주강의 경우 본 연구목적도 마찬가지로이지만 대부분의 경우 기존의 C-Mn(SC42) 주강을 대체하는데 그 목적이 있으므로 용접성이나 충격특성 등은 최소한 C-Mn 수준 이상을 유지해야 할 필요가 있다. 그림 12는 3차 용해재에 대한 충격치를 SC42와 비교한 결과이다. 여기서 알수 있는바와 같이 설계 기준을 SC42 재질에 전주어 볼 때 HSLA(3-8) 및 HSLA(3-10)은 강도는 높으나 충격치는 낮으므로 대체재로 사용하기에는 곤란한 점이 있다. 반면에 HSLA(3-6)의 경우 강도도 약 60 kg/mm^2 으로 1차 및 2차 용해재 HSLA 주강보다 높으며 특히 기존 SC42 재질인 45 kg/mm^2 보다는 매우 높고 충격치 또한 기준값 이상이므로, 충격하중이 가해지며 또한 비교적 고온에서 사용되는 슬라그풋 등과 같은 재질로 사용시 C의 경우 0.1%, Mn의 첨가는 1.2% 정도가 적당할 것으로 판단된다.

4. 결 론

C-Mn 주강인 SC42와 C, Mo, Mn 및 미량합금원소인 Nb, V 및 Ti 등을 단독 혹은 복합첨가한 HSLA 주강의 기계적 특성에 미치는 첨가원소의 영향

을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) HSLA 주강의 경우 첨가원소나 양에 관계없이 전반적으로 C-Mn 주강보다 상온 및 고온 특성이 우수하였으며 강도적인 측면에서 볼 때 슬라그풋 등과 같은 고온용기의 대체재로의 사용이 가능하다.

2) HSLA 주강에서 Mo 성분을 0.25%에서 0.5%로 증가 시킴에 따라 인장강도는 증가하였으며 이러한 원인은 고용강화 및 탄화물의 석출에 영향을 미치기 때문이다.

3) HSLA 주강에 Nb, V 및 Ti 등을 0.05%-0.15% 범위내에서 단독 첨가시 Ti의 효과가 가장 우수하였으며 2종 이상을 복합첨가시 첨가효과는 더욱 두드러지는 경향을 나타내었다.

4) HSLA 주강에서 C나 Mn을 첨가함에 따라 강도는 증가하지만 C-Mn 주강과 동등이상의 충격치를 유지하면서 강도가 상대적으로 우수한 HSLA 주강의 성분은 0.1%C-1.2% Mn HSLA 주강이었다.

참 고 문 헌

- [1] Geoffrey Tither : Electric Furnace Conference Proceedings, 48 (1990) 305
- [2] R. C. Vogit and J. Rassizadehghani : Trans. of AFS, 103 (1995) 791
- [3] C. Lebeau, Joinville : Trans. of AFS, 92 (1984) 645
- [4] T. Gladman : The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Materials, London (1997) 185
- [5] D. L. Albright, G. T. Eldis : Trans. of AFS, 90 (1982) 625
- [6] F. B. Pickering : Physical Metallurgy and the Design of Steels, Applied Science, London (1978) 72
- [7] Harry Stuart : JOM, 41 (1991) 35
- [8] R. B. Hetnarski : Thermal Stresses II, Elsevier Science, New York (1987) 330
- [9] J. Sekine et al. : Tetsu-To-Hagane, 56(5) (1970) 569
- [10] L. Meyer et al. : op. cit. 2, 32
- [11] L. Meyer et al. : In Microalloying 75, Union Carbide Corp., New York (1976) 153
- [12] L. Meyer et al. : Thyssenforschung, 3(1,2) (1971) 8
- [13] M. J. Crooks et al : Metall. Trans. A, 12A (1981) 1999
- [14] J. R. Davis : ASM specialty hand book.-Cast Iron-, ASM, (1996) 117