

열간단조용 비조질강의 기계적 성질에 미치는 V, Nb의 영향

위점복, 정운태, 이경섭, 왕성도*

한양대학교 공과대학 금속공학과

*기아특수강(주) 금속기술연구소

Effect of V and Nb on Mechanical Properties of Non-Heattreated Hot Forging Steels

K.B. Wee, W.T. Jeong, K.S. Lee, and S.D. Wang*

Department of Metallurgical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

*R & D Center for Metallurgy, Kia Steel Co, Ltd., Seoul 152-050

초 록 0.4wt% C을 함유하는 기존의 기계구조용 탄소강에 V과 Nb을 단독 또는 복합으로 첨가한 열간단조용 비조질강의 기계적 성질을 조사하고, 미세조직과 석출물의 분포 및 형상을 관찰하였으며 첨가원소의 영향을 정량화 하기 위해 중회귀분석을 행하였다.

인장시험 결과 모든 재료의 인장강도는 70kg/mm² 이상으로 기존의 소입·소려재(S45C)와 동등하거나 그 이상이었으며, 충격시험 결과 대부분 재료의 충격에너지는 40J 이하로 기존 재료의 약 50% 정도였다.

V함량이 0.10에서 0.15wt%로 증가하였을 경우 인장강도는 약 20% 증가하였으나 충격에너지는 감소하였다. 이는 VC의 미세석출에 의해 석출강화 효과와 함께 펄라이트의 부피분율이 증가하고 층간거리가 감소했기 때문이다. 반면 Nb 함량이 0.05에서 0.10wt%로 증가한 경우에는 강도와 인성의 근소한 증가경향을 나타내었다. 이는 NbC의 석출에 의한 결정립 미세화 효과가 VC 보다 우수했기 때문이다. 또한 V+Nb의 복합첨가는 단독첨가에 비하여 충격인성의 향상에 보다 효과적이었으며, 본 실험에서 최적 강도와 인성의 조합을 보인 합금조성은 0.4C-1.19Mn-0.05S-0.12V-0.07Nb로 인장강도는 84kg/mm² 이상, 충격인성은 34J 이상이었다.

Abstract 0.4wt%C steel added with V and/or Nb were forged and followed by air cooling. The structure-property relationships were examined and multiple regression analysis was conducted to quantify the magnitudes of effects of microalloying elements on the properties of the steels.

All material's tensile strength are greater than 70kg/mm², so they are equal to or superior to Q/T material's(S45C). Their impact energies are less than 40J, so they are 50% of Q/T material's

Increasing the content of V from 0.10 to 0.15 wt% had brought improvement in UTS about 20% but with some sacrifice of impact energy. These were the results from the precipitation strengthening by fine dispersion of VC in ferrite, increment of pearlite volume fraction and decrement of pearlite interlamellar spacings. However, increasing the content of Nb from 0.05 to 0.10wt% slightly improved UTS and impact energy. NbC precipitates were more effective in suppression of austenite grain coarsening than VC precipitates. Combined additions of V+Nb were more effective to bring impact toughness than sole addition. Optimum combination of strength and toughness was accomplished with 0.4C-1.19Mn-0.05S-0.12V-0.07Nb steel.

1. 서 론

비 조질강이란 일반 탄소강의 열처리공정 (Quenching & Tempering)을 생략하고 V,

Nb, Ti 등의 탄화물 생성원소를 미량첨가하여 요구되는 기계적 성질을 얻는 강재를 말한다. 이러한 비조질강은 자동차 부품의 열처리 비용의 절감을 목적으로 1972년 서독에서 처음

으로 개발된 이래 유럽과 일본에서 활발한 연구가 이루어져 일부는 이미 상용화 되어 있다.⁽¹⁻³⁾ 열간가공 후에 열처리 공정을 거치는 기존의 조질강에 비해 비조질강은 ton 당 \$200 이상의 원가절감 효과를 얻을 수 있으나⁽⁴⁾, 충격인성이 취약하여 과도한 충격과 부하가 걸리지 않는 일부 자동차 부품(crankshaft, connecting rod)에 그 사용이 제한되어 왔다. 페라이트 + 펄라이트계 비조질강의 이러한 낮은 충격인성은 열간단조시의 고열(1200°C)로 인해 결정립의 조대화를 피할 수 없기 때문이며, 이의 개선을 위하여 초기의 비조질강은 결정립 미세화 원소(V, Nb, Ti, Al)를 미량 첨가하여 결정립 크기를 조절하였으나 조질강 수준의 충격인성에는 미치지 못하였다. 따라서 현재에는 충격인성을 향상시키는 연구가 활발히 진행중에 있다.⁽⁵⁾

페라이트 + 펄라이트계 비조질강은 V, Nb, Ti, Al와 같은 탄질화물 형성원소를 미량 첨가(microalloying)하여 열간가공 후의 냉각시 미세한 탄질화물을 페라이트에 석출시킴으로써 강도를 향상시킨다. 따라서 석출강화 효과를 최대화하기 위해서는 첨가 원소가 용체화 처리시 오스테나이트에 충분히 고용되어야 하며 냉각시 석출되는 입자가 조대화되지 않고 미세하게 분포하여야 한다. 이러한 면에서 오스테나이트에의 고용도가 제일 좋은 V의 미량첨가는 석출강화에 가장 효과적이며 또한 널리 이용되어 왔다.^(6,7)

Nb과 Ti는 오스테나이트 결정립의 성장을 지연시키는 효과적인 원소로 알려져 있으며, MnS는 오스테나이트 결정입계와 결정립 내부에 존재하여 페라이트의 핵생성을 촉진시킴으로써 인성을 향상시킨다고 보고되어 있다.⁽⁸⁾

그러나 이와 같은 첨가원소의 영향에 대한 국내의 연구실정은 아직은 기초 연구단계에 머물러 있으며, 열간단조용 비조질강의 실제 부품에 대한 적용도 아주 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 비조질강의 실용화를 앞당기기 위하여 우선 충격인성이 다소 열세에 있기는 하나 과도한 충격과 부하가 걸리지 않는 자동차 부품에 적용하여 기존의 재료로 사용되고 있는 조질처리한 S45C를 대체할 목적으로 페라이트 + 펄라이트계 열간단조용 비조질강의 기본 합금조성을 결정하고 그 기계

적 성질을 조사하였다. 또한 비조질강의 기계적 성질에 미치는 V과 Nb의 미량 첨가효과를 중회귀 분석을 통하여 계량화 하고 강도와 인성의 최적조합을 위한 합금성분을 정량화 함으로써 열간단조용 비조질강 합금설계의 기초연구를 시도하고자 하였다.

2. 실험 방법

합금설계 및 시편제작

Table 1은 본 실험에 사용된 시편의 화학조성이다. S45C는 열처리 공정(quenching & tempering)을 거쳐서 자동차 부품 및 중장비 부품에 사용되고 있는 기존 조질강의 화학조성으로서 본 실험의 결과와 비교하기 위한 것이다. 이것을 기본 조성으로 하여 우선 C 함량을 충격인성의 저하를 고려하여 S45C 보다

Table 1. Chemical composition of the steel specimens. (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	V	Nb
S45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.6-0.9	<0.030	<0.035	-	-
NH 1	0.39	0.18	0.62	0.010	0.006	0.10	0.00
NH 2	0.38	0.27	0.69	0.016	0.013	0.15	0.00
NH 3	0.41	0.30	0.68	0.003	0.046	0.02	0.07
NH 4	0.43	0.28	0.71	0.011	0.005	0.01	0.12
NH 5	0.40	0.38	0.66	0.008	0.007	0.04	0.11
NH 6	0.40	0.25	0.65	0.016	0.010	0.10	0.05
NH 7	0.46	0.22	1.02	0.016	0.010	0.10	0.04
NH 8	0.40	0.27	1.19	0.004	0.054	0.12	0.07

는 약간 낮은 0.4wt% 수준으로 하고 여기에 V과 Nb을 단독 또는 복합으로 첨가하여 NH (Non-Heattreated)로 명명한 8가지의 합금을 만들었다. NH1과 2는 V을 단독 첨가한 것이고 NH3과 4는 Nb을 단독 첨가한 것이나 연속적인 주조작업으로 인해 V이 불순물로 소량 존재하였다. NH5와 6은 V과 Nb을 total 함량 0.15wt% 수준으로 하여 복합 첨가하였다. 또한 NH7과 8은 각각 Mn과 S의 영향을 알아보기 위하여 NH6와 같은 수준에서 Mn 함량을 1.2wt%, S 함량을 0.05wt% 수준으로 높인 것이다.

시편은 합금설계 후 고주파 유도 용해로에서 용해하여 10kg의 각주형 ingot를 제조하

고, 시편제조를 위해 이를 1200°C에서 열간단조를 행하여 30mmφ의 환봉으로 성형하였다. 실제 부품단조시 단조온도가 너무 낮으면 금형의 수명이 단축되고, 또한 너무 높으면 결정립이 조대화되고, 충격인성의 저하가 현저하므로 1100°C와 1200°C를 단조종료 온도의 simulation을 위한 소준온도로 택하여 box furnace에서 30분간 용체화 처리를 행한 후 대기중에서 공냉(냉각속도 약 65°C/min) 시킨 다음 인장시편과 충격시편을 가공하였다. 냉각속도는 M-C International 사의 Raynger model II optical pyrometer를 이용하여 $\gamma \rightarrow \alpha$ 변태온도 구간(850°C~500°C)에서 10초 간격으로 온도를 측정하여 구하였다.

기계적 성질 시험

충격시편은 ASTM E-23의 규격에 의거하여 환봉의 중심부에서 가공방향에 수직으로 채취하였으며 notch는 2mm U-notch 형태로 제조하여 상온에서 30kg 용량의 Charpy 충격 시험기로 4회씩 시험한 후 평균하여 충격흡수에너지값을 구하였다.

경도시험은 충격시험을 행하기 전에 Rockwell B scale의 경도기로 충격시편의 표면부위를 5회 이상 측정하여 평균값을 취하였다.

인장시편은 역시 환봉의 중심부에서 가공방향에 수직인 길이방향으로 표점거리 25mm, 평행부위 직경 6.25mm 인 ASTM sub-size 규격의 시편을 채취하였으며, Satec System 사의 Model 20-1028 시험기를 이용하여 상온에서 시험하였다. crosshead speed는 4mm/min. 였다.

미세조직 관찰

재료의 미세조직관찰은 파괴된 충격시편으로부터 시료를 채취하여 3% nital로 15초간 부식시킨 후 금속광학현미경을 이용하여 100배로 확대하여 기본 조직을 관찰하였다. 정량적인 미세조직의 결과를 얻기 위하여 Leco사의 2001 Image analyzer를 이용하여 페라이트 부피분율을 측정하였으며, ASTM E-112의 linear intercept method를 이용하여 초기 오스테나이트 결정립 크기를 측정하였다.

또한 주사전자현미경으로 최소 spacing을 갖는 colony를 scanning하여 10000배로 확대

한 후 linear intercept method로 최소 200 point 이상 측정하여 펄라이트 층간거리를 구하였다.

펄라이트 내 시멘타이트 층의 두께, t 는 다음 식⁽⁹⁾에 의해 계산되었다.

$$t = \frac{S_0}{[f_p/0.15(\%C)] - 1}$$

S_0 : interlamellar spacing,
 f_p : pearlite volume fraction

상변태 후 석출물의 분포 및 형상의 관찰은 투과전자현미경을 이용하였다. 관찰용 시편은 인장시편의 grip 부위에서 채취하였으며, jet polishing은 perchloric acid(HClO₄) 5% + acetic acid(CH₃COOH) 95%의 전해액으로 DC 90~100V의 전압으로 상온에서 행하였다.

중회귀분석

미세합금원소가 기계적 성질에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 중회귀분석(multiple regression analysis)을 행함으로써 첨가원소와 미세조직 그리고 미세조직과 기계적 성질간의 상호관계를 나타내는 회귀식(regression equation)을 계산하였으며, 이러한 회귀식의 적합도를 판정할 수 있는 R-squared value를 계산하였다. 이러한 계산은 중회귀 분석이 가능한 computer program인 "STATGRAPHICS"를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

기계적 성질에 미치는 합금원소의 영향

첨가원소의 양을 달리한 0.4wt% C의 중탄소강을 각각 1100°C, 1200°C에서 소준한 시편에 대해 조사된 모든 기계적성질 및 미세조직의 결과를 Table 2에 나타내었다. Q.T.재(S45C)와 비교해 볼 때 강도와 연성 그리고 경도값은 대체로 양호한 값을 보인 반면 충격에너지 값은 매우 저조한 값을 나타내었다. 이는 페라이트 + 펄라이트 계 비조질강의 문제점으로 지적된 것으로서 이미 예상된 결과이다. 그러나 일부 재료(NH5, NH6, NH8)는 과도한 충격과 부하가 걸리지 않는 자동차용 부품(connecting rod, hub wheel 등)에 적용 가능한 충격인성을 보이고 있다. 현재 일본의

Table 2. Mechanical properties and microstructural parameters of the steels normalized

(a) at 1100°C.

	UTS	YS	EL	RA	Imp.E	H _R B	AGB	F vol.	PIS	Thick.
	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	J		μm	%	μm	μm
S45C	>70	>50	>17	>45	>78	92~104				
NH 1	75.0	47.5	19.4	47.6	34.7	96.6	—	27.6	0.288	0.0253
NH 2	90.9	60.5	19.6	42.2	22.5	102.2	77	15.6	0.263	0.0191
NH 3	71.3	44.3	16.8	39.2	41.2	97.1	74	25.4	0.282	0.0253
NH 4	71.1	41.9	20.0	44.6	45.2	94.3	—	34.6	0.297	0.0305
NH 5	67.1	40.3	25.4	49.3	51.9	92.3	—	38.5	0.273	0.0295
NH 6	89.3	59.9	20.9	44.1	48.3	102.5	86	14.2	0.266	0.0200
NH 7	not analyzed									
NH 8	84.8	57.0	15.8	29.4	52.1	100.2	71	20.8	0.261	0.0214

(b) at 1200°C

	UTS	YS	EL	RA	Imp.E	H _R B	AGB	F vol.	PIS	Thick.
	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	J		μm	%	μm	μm
S45C	>70	>50	>17	>45	>78	92~104				
NH 1	77.2	48.2	18.8	42.6	16.0	97.2	125	17.5	0.298	0.0227
NH 2	95.5	64.4	13.0	27.4	15.7	104.0	117	8.5	0.260	0.0173
NH 3	77.3	49.5	14.0	23.3	22.6	98.9	110	18.4	0.290	0.0236
NH 4	80.0	44.7	16.6	36.4	24.5	99.4	91	15.1	0.282	0.0238
NH 5	78.1	46.7	15.9	31.2	24.5	98.1	113	18.3	0.275	0.0215
NH 6	95.7	65.6	15.0	33.3	20.1	103.5	150	5.7	0.270	0.0183
NH 7	101.2	63.9	8.7	9.1	10.0	104.5	190	2.5	0.262	0.0200
NH 8	91.3	59.9	12.8	28.8	34.7	103.4	104	10.1	0.260	0.0186

* H_RB : Rockwell hardness B scale, AGS : Austenite Grain Size,
 PIS : Pearlite Interlamellar Spacing, Thick. : Cementite Thickness.

자동차 회사에서 이미 자동차용 crankshaft로 양산중인 동종 비조질강의 충격에너지 값은 약 40J 정도이다.

한편 본 실험의 결과에서 기존 재료인 Q.T. 재의 인장강도 요구치를 만족하면서 가장 좋은 충격에너지값을 나타내는 즉, 강도와 인성의 조합이 가장 잘 이루어진 합금은 NH8로서 인장강도는 84kg/mm² 이상, 충격에너지는 34J 이상 이었다.

그림 1과 그림 2는 각각 V과 Nb을 단독으로 첨가한 경우 그 첨가량에 따른 인장강도와 충격인성의 변화를 나타낸 것이다. V 함량이 0.10에서 0.15wt%로 증가하였을 경우 인장강도는 약 20% 향상되었으나, 충격에너지는 감소하였다. 그러나 Nb을 0.07에서 0.12wt%로

증가하였을 경우에는 1100°C와 1200°C 공히

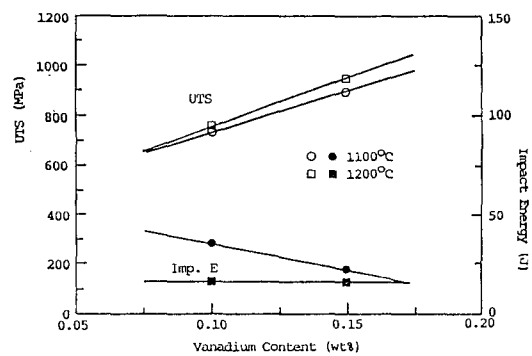


Fig. 1. Effect of vanadium contents on UTS and impact energy.

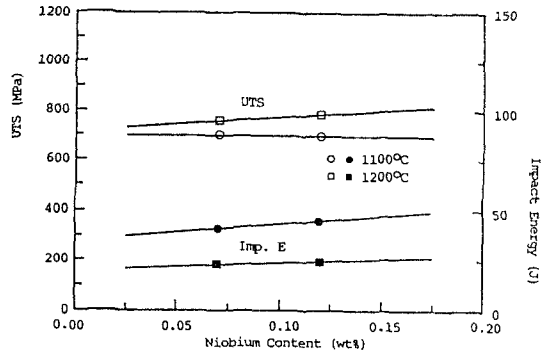
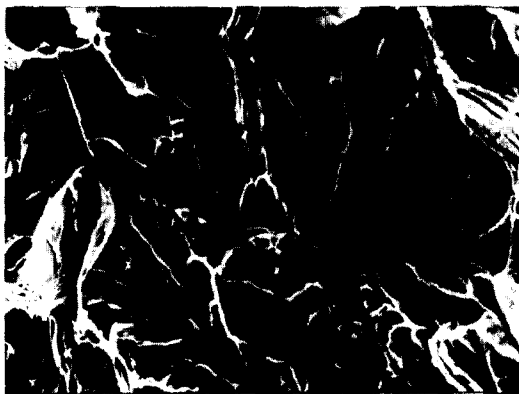


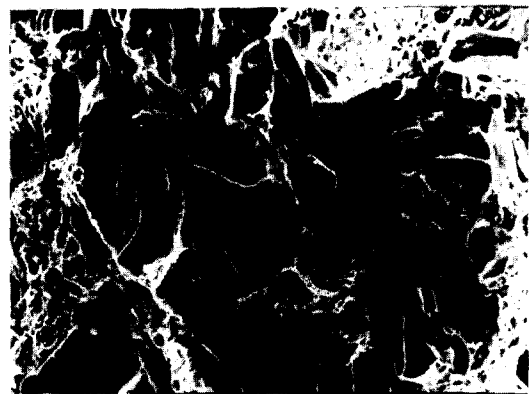
Fig. 2. Effect of niobium contents on UTS and impact energy.

강도와 인성의 근소한 증가경향을 보이고 있다.

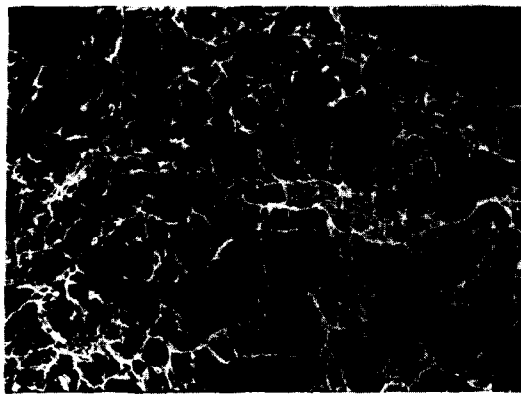
이러한 경향은 Held⁽¹⁰⁾와 Hulka⁽¹¹⁾ 등의 보고와도 일치하는 것으로서 VC와 NbC의 용해도 차이에 기인한 것이다. Hulka⁽¹¹⁾ 등의 실험에 의하면 1200°C에서 γ 에 용해되는 Nb는 0.4wt% C의 경우 약 0.04wt% 정도이다. 따라서 고용되지 못한 NbC 입자는 열간단조시 γ 의 결정립 성장을 억제하여 결정립을 미세화 시킴으로써 충격인성의 향상에 기여하며, γ 에 고용된 Nb는 열간단조 후 냉각시에 γ 에 석출하여 변태를 지연시켜 펄라이트 층간거리를 감소시킴으로써 강도를 증가시키고 또한 α 에



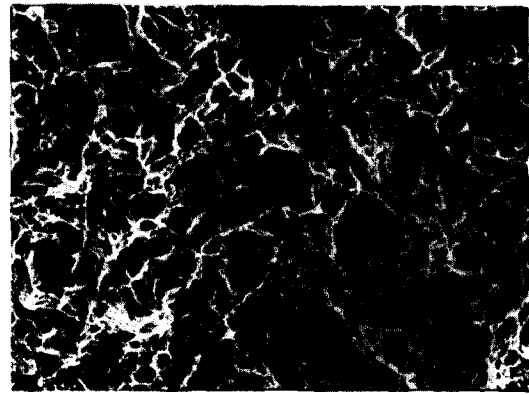
(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 1. SEM fractographs of tensile specimen normalized at 1100°C.

- (a) NH1 (0.10V) (b) NH3 (0.05Nb)
- (c) NH5 (0.04V + 0.11Nb) (d) NH6 (0.10V + 0.05Nb)

도 석출하여 석출강화를 일으킨다. 그러나 V의 경우에는 1100°C에서도 r 에 약 7°Cwt% 이상 용해되므로 전량이 모두 고용될 수 있다. 따라서 고용되지 못한 VC 입자에 의한 인성의 향상은 기대할 수 없고 고용된 V에 의한 강도의 향상만을 얻을 수 있는 것이다.

한편 총 함량 0.15wt%로 V + Nb 복합첨가한 경우와 동함량의 V 단독첨가한 경우를 비교해 볼 때 (Table 2), 0.04V + 0.11Nb (NH5) 경우에는 강도가 약 20% 감소하고 충격에너지는 약 100% 증가하였으며, 0.10V + 0.05Nb (NH6) 경우에는 강도가 약 1% 감소하고 충격에너지가 약 80% 증가하였다. 이는 전술한 바와 같은 VC의 석출강화와 NbC의 결정립미세화 효과가 복합적으로 작용했기 때문이다.

사진 1은 V과 Nb를 각각 단독 또는 복합(0.15wt%) 첨가하고 1100°C에서 소준한 시편에 대한 인장파면이다. V과 Nb를 각각 단독으로 첨가한 경우에는 사진 (a), (b)와 같은 전형적인 벽개파괴 양상을 많이 나타내었으며, 벽개면에 균열의 전파방향을 알 수 있는 많은 수의 river marking도 관찰할 수가 있었다. 그러나 복합첨가한 경우에는 약간의 벽개면도 있었으나 대부분 그림 (c), (d)와 같은 dimple을 나타내는 연성파괴를 보였으며 연신율과 충격인성값도 보다 우수한 성질을 나타내었다.

미세조직에 미치는 합금원소의 영향

사진 2는 각각 1100°C와 1200°C에서 소준한 시편에 대한 대표적인 기본 조직사진으로서 초기 오스테나이트 결정입계에 우선적으로 석출된 초석 페라이트를 볼 수 있다. 페라이트의 부피 분율은 1100°C에서 14~38%, 1200°C에서 6~18%의 분포를 나타내고 있으며, 오스테나이트 결정립 크기는 1100°C의 경우 74~86 μ m, 1200°C의 경우 91~150 μ m의 분포를 보이고 있다. 즉 소준온도가 감소함에 따라 페라이트 분율은 증가하고 오스테나이트 결정립 크기는 감소함을 알 수 있다.

900°C에서 소준한 0.4% 탄소강의 표준조직은 페라이트 분율이 약 50% 정도인데 반해 본 실험의 결과에서는 페라이트 분율이 상당히 감소하였다. 이는 용체화처리 온도가 매우

높아 초기 오스테나이트 결정립의 크기가 조대화 되어 $r \rightarrow \alpha$ 변태온도가 감소하였기 때문이다. 이와 같이 페라이트 분율이 80% 이상인 강의 강도를 지배하는 요소는 페라이트 결정립 크기보다는 페라이트의 강화요소, 즉 페라이트의 colony 크기, 충전거리, 세멘타이트 두께 등이 주 요소가 되며 초기 오스테나이트 결정립의 크기 또한 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 따라서 이러한 미세조직에 대한 정량적인 분석을 통하여 미량 합금원소의 영향을 살펴보았다.

그림 3은 V과 Nb의 단독 또는 복합첨가에 따른 페라이트 부피분율의 변화를 나타낸 것으로서 단독첨가와 복합첨가시 공히 그 첨가량이 증가함에 따라 페라이트 부피분율은 감소하였다. 즉 페라이트의 분율이 증가하였는데 이는 VC 또는 NbC 입자들의 미세분산에 의하여 페라이트의 결정립 성장이 억제된 때문이다. 한편 V에 의한 페라이트 분율의 감소가 더 뚜렷하였는데 이는 오스테나이트에 고용되는 탄화물의 용해도 차이에 기인한 것으로서 오스테나이트에 전량이 고용되는 V은 $r \rightarrow \alpha$ 변태를 지연시킴으로써 페라이트의 결정립 성장을 억제하는 효과가 Nb보다 더 우수한 것으로 생각된다. 따라서 V 첨가에 따른 강도의 증가가 Nb 첨가의 경우보다 더 큰 이유는 VC의 분산 석출에 의한 페라이트 분율의 감소가 약 9%로 Nb 첨가시의 약 3%에 비해 감소효과가 더 크기 때문이다.

그림 4는 V과 Nb의 단독 또는 복합첨가에 따른 오스테나이트 결정립 크기의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 첨가량이 증가함에 따라 결정립 크기가 감소하였음을 볼 수 있었으며, Nb의 첨가에 의한 오스테나이트 결정립의 조대화 저지 효과가 보다 두드러지게 나타났다. 이러한 경향은 전술한 바와 같이 Hulka⁽¹²⁾ 등이 제시한 Nb의 거동과도 일치하는 것으로서 이러한 효과로 기계적 성질 결과에서 나타난 바와 같이 충격에너지의 향상에 Nb이 V보다 기여도가 더 큼을 알 수 있다. 즉, Nb은 미세 석출물의 분산에 의한 페라이트 부피분율의 감소 효과와 함께 결정립 미세화 효과가 더 우수하여 V보다 충격인성의 개선에 더 효과적인 것으로 사료된다.

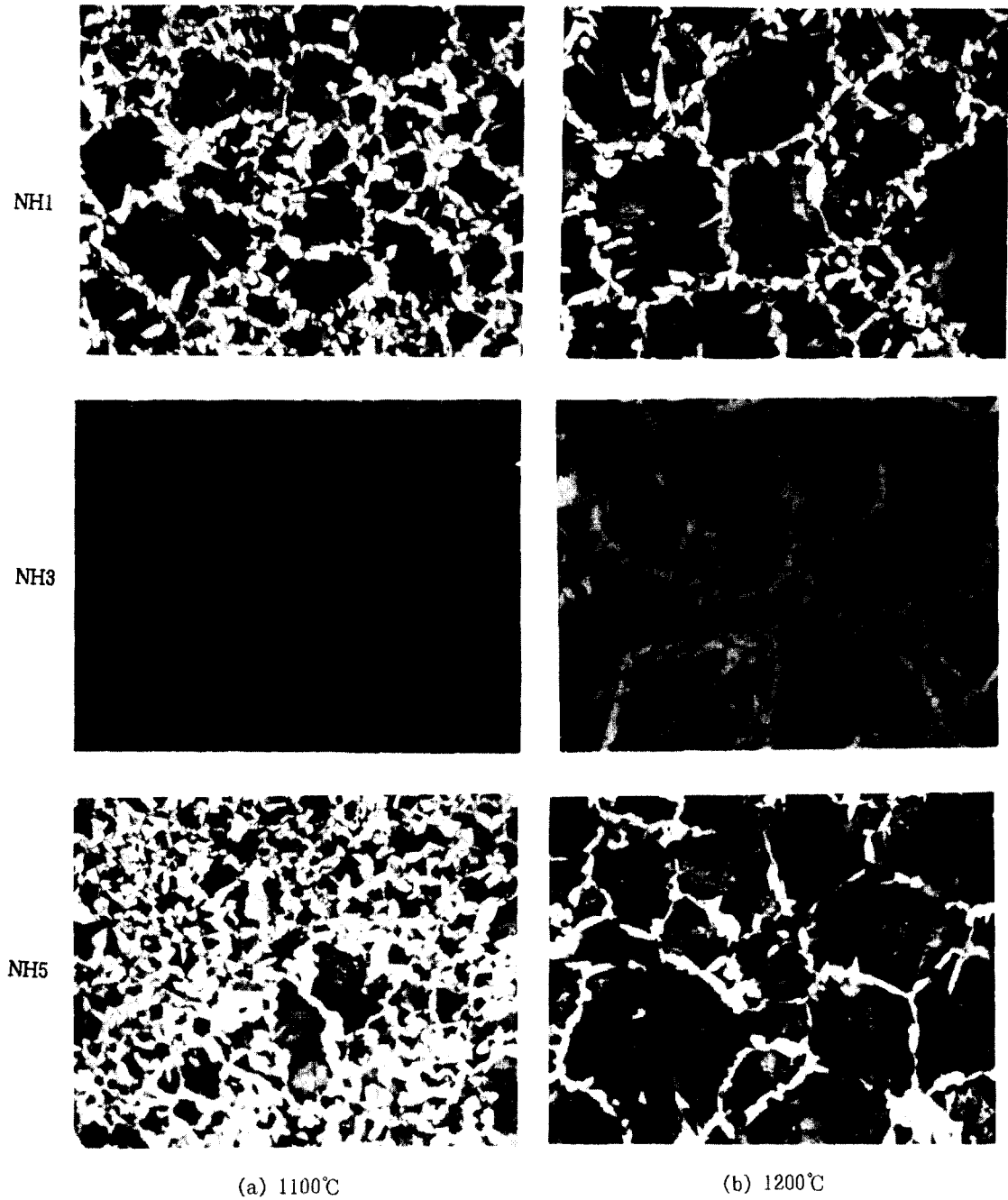


Photo 2. The microstructures of the steels normalized at
(a) 1100°C (b) 1200°C

사진 3은 1200°C에서 소준한 시편의 펄라이트 층상구조 SEM 사진으로서 V과 Nb의 첨가에 따른 펄라이트 층간거리와 세멘타이트

두께의 변화를 보여주고 있다. (a)와 (b)는 각각 V(0.10wt%)과 Nb(0.05wt%)을 단독첨가한 시편으로 층간거리는 각각 0.298 μ m,

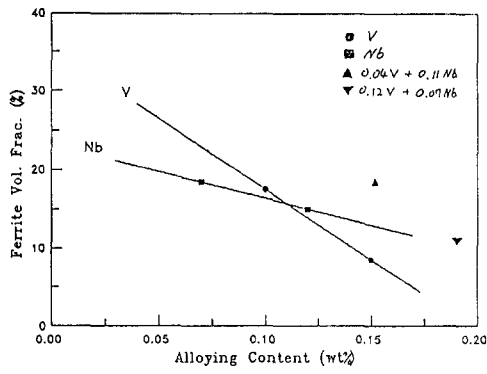


Fig. 3. Effect of vanadium and niobium on ferrite volume fraction of the steels normalized at 1200°C.

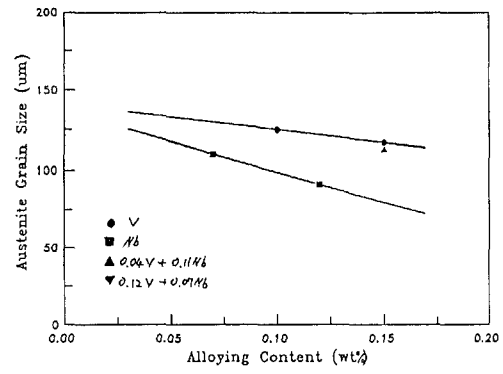
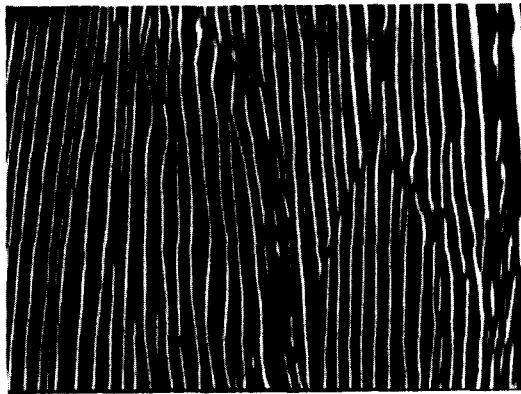
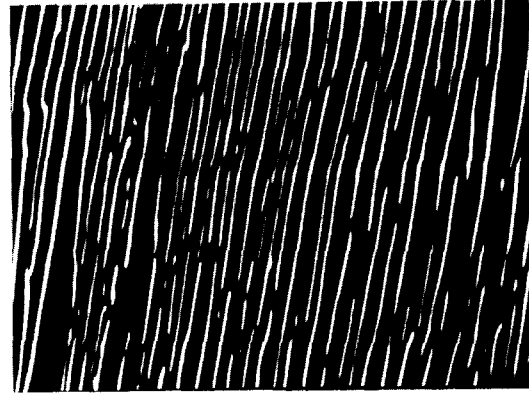


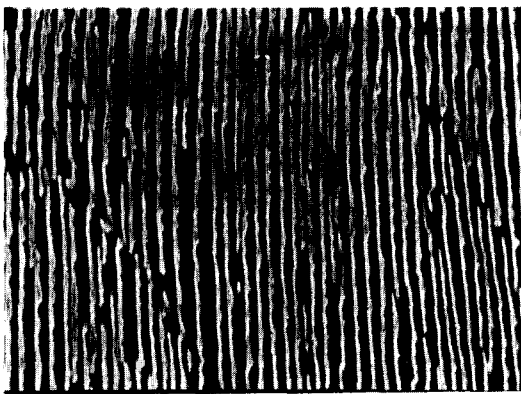
Fig. 4. Effect of vanadium and niobium on austenite grain size of the steels normalized at 1200°C.



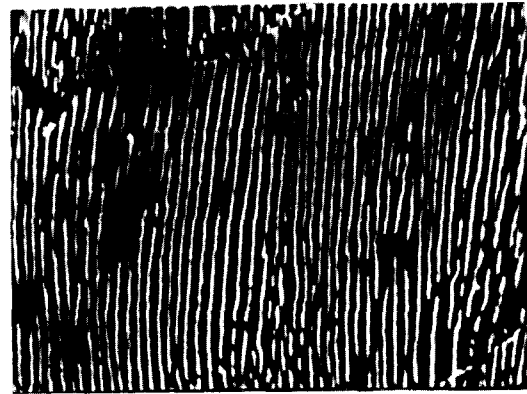
(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 3. SEM photographs showing pearlite interlamellar spacing of the steels normalized at 1200°C.

(a) NH1 (0.10V)

(b) NH3 (0.05Nb)

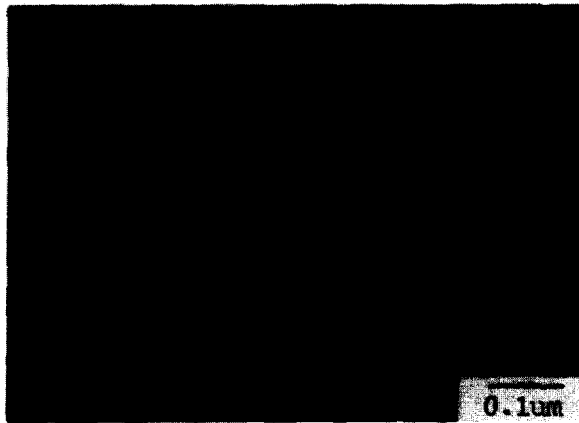
(c) NH5 (0.04V + 0.11Nb)

(d) NH6 (0.10V + 0.05Nb)

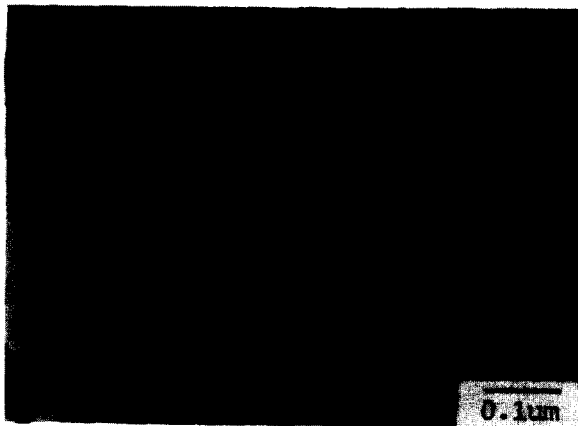
0.290 μm이며 세멘타이트 두께는 약 23nm로 비슷한 값을 나타내었다. total 함량 0.15wt%로 복합첨가한 (c)와 (d)는 층간거리가 각각 0.275 μm, 0.270 μm, 세멘타이트 두께는 약 20nm 정도이다. 즉 복합 첨가한 경우 층간거리가 감소함을 볼 수 있었다. 한편 V과 Nb의 단독첨가에 따른 층간거리의 변화를 비교해보면 (Table 2), V 함량이 0.10에서 0.15wt%로 증가하였을 경우 층간거리는 약 10% 감소하였으며, Nb 함량이 0.07에서 0.12wt%로 증가하였을 경우에는 층간거리가 약 1% 감

소하였다. 즉, V의 첨가에 의한 층간거리의 감소 효과가 더 우수하게 나타났다.

사진 4는 (a)초석 페라이트와 (b)펄라이트 내부의 페라이트 층에 석출된 VC의 분포를 나타내는 bright field image이다. 초석 페라이트의 결정립 내부에는 수 nm 단위의 VC가 미세하게 분포되어 있음을 볼 수 있었고, 펄라이트의 페라이트 층에는 VC가 전위 등에 수십 nm 단위로 석출되어 있음을 볼 수 있었다. 이와 같은 석출양상은 Sage⁽¹³⁾와 Burnett⁽¹⁴⁾ 등의 보고와도 일치하는 것으로써 석출강화를 위한 효과적인 size로 존재함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Photo 4. Bright field transimssion electron micrographs of vanadium carbide precipitation.

- (a) in proeutectoid ferrite
- (b) in ferrite laths of pearlite

중회귀 분석 결과

합금성분, 특히 V과 Nb이 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 정량화하고 또한 미세조직과 기계적 성질간의 상호 관계식을 도출하기 위하여 모든 data를 종합하여 중회귀 분석을 행한 결과는 아래와 같다.

『합금원소와 기계적 성질』

$$UTS(kg/mm^2) = -432 + 990(\%C) - 12(\%Mn) + 119(\%Si) + 357(\%V) - 146(\%Nb) + 0.065(Temp)$$

$$R-SQ : 0.84$$

$$H_RB = -123 + 430(\%C) - 1.1(\%Mn) + 58.51(\%Si) + 113.8(\%V) - 101(\%Nb) + 0.03(Temp)$$

$$R-SQ : 0.67$$

중회귀식에서 나타난 바와 같이 C과 V의 영향이 강도에 지배적이다. 이는 C에 의한 펄라이트 부피분율의 증가와 VC에 의한 석출강화로 강도와 경도가 증가되며, 조직사진에서 확인할 수 있었다. 한편 윌 식들의 제일 마지막 항은 소준온도(°C)의 향으로서 이는 Burnett⁽¹⁴⁾의 연구 결과와 비교하기 위하여 독립 변수로 선택한 것이다.

$$EL(\%) = 210 - 312(\%C) - 11(\%Mn) - 56(\%Si) - 4(\%V) + 147(\%Nb) - 0.05(Temp)$$

$$R-SQ : 0.65$$

$$Impact E(J) = 512 - 627(\%C) + 18(\%Mn) - 113(\%Si) - 56(\%V) + 337(\%Nb) - 0.2$$

(Temp)

R-SQ : 0.68

연신을 및 충격특성은 합금원소가 강도와 경도에 미치는 영향에 반비례한다. 즉 탄소의 증가는 연신을 및 충격특성에 결정적 저해 요인이며, V, Si 그리고 가열온도의 증가는 부분적 저해 요인이 된다.

그러나 Nb는 연신을 및 충격특성 향상의 중요한 성분이다. 이는 전술한 바와 같이 오스테나이트에서 용해되지 않는 NbC가 오스테나이트 결정립 성장 지연에 의한 결정립 미세화와 오스테나이트에 일부 용해된 Nb이 변태를 지연시키며 재결정을 지연시킴으로써 오스테나이트 결정립 연신 효과로 충격특성에 좋은 원소이다. 상기 증회귀식은 신뢰도에 관계있는 R-제공값이 비교적 낮다.

『합금원소와 미세조직』

$$\% \alpha = 3.81 - 5.5(\%C) + 0.7(\%Mn) + 0.2(\%Si) - 4.6(\%V) - 2.3(\%Nb) - 0.001(\text{Temp})$$

R-SQ : 0.87

$$\text{Spacing}(\times 10^{-3}) = 1 - 2(\%C) + 0.04(\%Mn) - 0.2(\%Si) - 0.7(\%V) + 0.1(\%Nb) + 0.003(\text{Temp})$$

R-SQ : 0.95

페라이트 부피분율은 C, V 함량 저하와 가열온도를 낮추면 증가하는 경향이 있으며, 펄라이트 층간거리는 C, V 함량증가와 가열온도를 올리면 감소하여 강도와 향상된다. 또한 온도를 올리면 페라이트 부피분율은 감소하며 층간거리는 증가하는 경향이 있다. 이론상 Nb 함량증가시 층간거리를 감소시키거나 측정상 오차에 의해 층간거리를 증가시키는 것으로 회귀식은 나타내고 있다. 그러나 T값은 0.7로 다른 요소에 비해 매우 낮아 크게 영향을 미치지 않는다. 여기서 T값이란 편회귀 계수로써 다른 독립변수가 일정하다고 가정했을 때 어떤 하나의 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력을 나타내는데 이 값의 절대치가 1 이하이면 영향력을 거의 미치지 않는 것으로 생각할 수 있다.

『미세조직과 기계적 성질』

$$\text{UTS}(\text{kg}/\text{mm}^2) = 199.3 + 91.8(\gamma - \text{GS}) - 16.6(\% \alpha) - 3.8(\text{S}_0) - 7.3(t)$$

R-SQ : 0.97

$$\text{H}_{\text{RB}} = 129.0 - 12.7(\gamma - \text{GS}) - 28.9(\% \alpha) - 7.4(\text{S}_0) - 1.0(t)$$

R-SQ : 0.99

$\gamma - \text{GS}$: austenite grain size (μm), % α : percent ferrite

S_0 : pearlite interlamellar spacing (μm),

t : cementite thickness (μm)

미세조직의 각 요소가 기계적 성질에 미치는 영향력 정도를 나타내는 T값이 펄라이트 층간거리 S_0 의 경우 UTS와 H_{RB} 에 각각 -7.3, -6.3으로 절대값이 가장 높으나 둘째로 큰 값인 오스테나이트 결정립 크기는 각각 2.7, -1.7로 낮으므로 UTS와 H_{RB} 에 지배적인 요인은 층간거리이다. 즉 층간거리가 감소할수록 강도 및 경도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 강도와 경도를 증가시키기 위해서는 층간거리를 감소시킬 수 있는 방향으로 화학성분이 첨가되어야 하며, 이를 위한 최적 원소는 C, V을 들 수 있으나, 충격특성을 저하시킨다. 또한 강도와 경도 증가는 페라이트 부피분율 감소, 세멘타이트 두께 감소에 의해서도 영향을 받는다.

$$\text{EL}(\%) = 17 + 16(\gamma - \text{GS}) + 52(\% \alpha) + 3512(\text{S}_0) - 5 \times 10^{-5}(t)$$

R-SQ : 0.33

$$\text{Impact } E(\text{J}) = 163 - 55(\gamma - \text{GS}) + 91(\% \alpha) - 5.7 \times 10^{-5}(\text{S}_0) + 6.2 \times 10^{-5}(t)$$

R-SQ : 0.53

연신율과 충격특성 공히 페라이트 부피분율이 증가함에 따라 증가한다. 상기 식에서 페라이트 부피분율의 T값이 타 요소에 비해 10배 이상이므로 연신율이나 충격특성에 대한 지배적인 요인이라고 할 수 있으며, 페라이트 부피분율을 증가시키기 위해 Mn, Si 등의 첨가와 가열온도 감소등의 방법을 이용할 수 있다. 그러나 미세조직의 측정상 어려움과 오차에 의해 R-제공값이 매우 낮다.

본 연구결과와 Burnett 연구결과⁽¹⁴⁾를 비교

하여보면 합금원소와 기계적 성질 또는 미세 조직에서, 연성과 인성은 일치하나 강도와 경도, 페라이트 부피분율 및 펄라이트 층간거리는 상이하다. 이는, 본 연구에서는 펄라이트 증가원소인 C와 카바이트 형성에 의한 강도 증가요인인 V를 고려하였으나, Burnett는 Mn, 가열온도 및 냉각속도를 고려한 결과 Mn이 주요요소로써 강도와 경도의 증가, 페라이트 부피분율 및 펄라이트 층간거리의 감소요인으로 작용하였기 때문으로 사료된다. 한편 미세 조직과 기계적 성질을 살펴보면 강도와 경도 증가 지배요인은 펄라이트 층간거리이고, 연성 및 인성증가요인은 페라이트 부피분율로써 Burnett결과와 일치한다. 그러나 오스테나이트 결정립 크기는 Burnett결과와 다르다. 이는 페라이트 부피분율 효과가 결정립 미세화 효과보다 강도 및 인성에 더 중요한 요인으로 작용하고, 본 연구에서 페라이트 부피분율에 직접적인 C를 고려하였기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

이상과 같은 실험으로 중탄소강(0.4wt% C)의 기계적 성질에 미치는 V과 Nb의 영향은 다음과 같다.

1. V을 미량 첨가(0.04~0.15wt%)하면 VC가 페라이트 내부와 펄라이트의 페라이트 층에 석출하여 페라이트 부피분율을 감소시키고 펄라이트 층간거리와 세멘타이트 두께를 감소시킴으로써 강도와 경도의 향상에 기여하였다.
2. Nb의 미량첨가(0.05~0.12wt%)는 NbC에 의한 결정립 미세화 효과가 보다 우수하여 충격인성의 향상에 기여하였다.
3. 총 함량 0.15wt%로 V + Nb 복합첨가한 경우와 동함량의 V 단독첨가한 경우를 비교해 볼 때 0.05V + 0.10Nb은 강도가 약 20% 감소하고 충격에너지는 약 100% 증가하였으며, 0.10V + 0.05Nb 경우에는 강도가 약 1% 감소하고 충격에너지가 약 80% 증가하였다. 즉 복합첨가에 의해 총

격인성이 상당히 개선됨을 알 수 있었다.

4. 강도와 인성의 조합이 가장 잘 이루어진 합금은 1.19Mn-0.05S-0.12V-0.07Nb의 조성으로 인장강도는 84kg/mm² 이상, 충격에너지는 34J이상 이었다.

후 기

본 연구는 1990년도 상공부 공업기반기술 사업계획의 연구비 지원으로 수행된 것으로써 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. Krauss and S.K. Banerji(eds.) : "Fundamentals of microalloying forging steels", 1987, Warrendale, PA, Metallurgical Society of AIME.
2. V. Schüler, S. Engineer and B. Huchtemann : ref.1, p19.
3. D.J. Naylor : Ironmaking and steelmaking, 1989, Vol.16, No.4, p246.
4. M. Korchynsky and J.R. Paules : SAE Technical Paper 890801, 1989.
5. Advanced materials and progresses, 1991. Vol.5, p22.
6. M. Leap, E.L. Brown, P. Mazzare and G. Krauss : ref.1, p91.
7. M. Leap, D.K. Matlock and G. Krauss : ref.1, p113.
8. I. Nomura, et al. : SAE Technical Paper 890511, 1989.
9. T. Gladman, I.D. McIvor, and F.B. Pickering : JISI, 1972, Vol.210, p916.
10. J. F.Held : "Some Factors Influencing the Mechanical Properties of Microalloyed Steel", ref.1, p175.
11. K. Hulka and F. heisterkamp : ref.1, p255
12. J.M. Hyzak and I.M. Bernstein : Met. Trans., 1976, Vol.7A, p1217.
13. Dr. Arthur M. Sage : ref.1, p239.
14. M.E. Burnett : ref.1, p601.