

《論 文》

Si 첨가 고탄소강의 인장 성질에 미치는 패턴팅 조건의 영향

이준범 · 이상윤*

산업 과학 기술 연구소

* 동아대학교 금속공학과

The Effect of Patenting Conditions on the Tensile Property of
High Carbon Steels added with Si

J. B. Lee and S. Y. Lee*

Research of Institute of Industrial Science and Technology

*Dept. of Metallurgical Engineering, Dong-A University

ABSTRACT

Isothermal transformation behavior during patenting and variations of microstructure and tensile strength of patented wires were investigated in Si-added high carbon steel. The TTT curves of the steels were made for two different austenitizing temperature. As the salt bath temperature was increased, the observed microstructures were bainite at 450°C, the mixture of bainite and pearlite at 500°C, and to pearlite at 600°C. The tensile strength of patented wire exhibited the highest value when the structure was pearlite, while the bainitic structure showed the lowest.

1. 서 론

재료의 기계적 성질은 조직의 구성에 민감한 상관성을 가져, 종래 각종의 열처리에 의해 조직 제어를 시도하여 왔다. 최근 철강 재료의 조직 제어 기술로는 제어 압연, 제어 냉각 기술이 발달하여, 정밀한 제어가 가능하여져 우수한 재료가 제조 가능하게 되었다¹⁾. 이러한 제어 압연, 제어 냉각 기술은 종래의 제조 공정에 비해 에너지 및 합금원

소의 절감에 기여하여 고강도, 고인성의 강판 제조에 적용되고 있다. 그러나 타이어 코드용 선, 비드 선, 와이어 로프등의 고탄소강 강재의 경우는 제조 공정에서 제품의 신선 가공성의 향상 및 신선후의 제성질을 확보하기 위하여 납 패턴팅(Pb patenting)이나 공기 패턴팅(Air patenting)이라는 열처리를 실시하여 필라이트를 형성하는 조직 제어를 하고 있다. 그래서 현재 고탄소 강선의 제조 공정에서는 열간 압연후 냉각대의 콘베어 상에서

강제 냉각시키는 인 라인(in line)인 스텔모아(stelmor)방법이 행하고 있고 이를 직접 패터닝 법이라 하고 있다. 그러나 직접 패터닝법은 종래 오프 라인(off line)에서 행하는 납 패터닝 법에 비해 냉각능이 열세이므로 현재는 냉각능을 개선 시키고저 냉매를 용융 솔트(salt)로 이용하는 방법,^{2,3)} 이나 소입성을 향상 시키고저 화학성분을 조정하는 방법⁴⁾ 등이 납 패터닝의 대체 방법으로 개발되고 있다. 그러나 이같은 방법은 주로 탄소강이나, 일부 탄소강에 크롬, 알루미늄등의 합금원소를 첨가한 강재에 이용되고 있다.^{5,6)}

그래서 본연구에서는 페라이트 고용 강화 효과를 갖는 실리콘 원소를 함유한 고탄소 강재의 선재를 패터닝 열처리를 시뮬레이션 하여 패터닝시의 변태 곡선, 패터닝시의 열처리 온도 조건등이 인장 성질에 미치는 영향을 조사하여 강종의 열처리 조건을 확보 하고저 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시 료

본 연구에 사용된 강재는 0.65%~0.70% 탄소의 고탄소강에 Si : 1.5%~2.0% 함유한 강으로 50 kg 급 진공 용해로에서 용해한 후 선재인 5.5 mmo 로 열간 압연한 후 공기 패터닝으로 평균 냉각 속도 15°C/초 냉각한 강재로 이의 화학 조성을 Table 1 에 나타내었다.

2.2. 항온 변태 곡선

Table 1 에 제시된 강재의 패터닝 열처리 시 강재의 열처리 온도및 유지 시간 조건을 설정하기 위해 Fig.1 에 제시된 치수로 가공한후 고주파 가열식 변태 측정 장치인 Formaster 기기(Japan.

Table 1. Chemical Composition of Tested Steel (wt %)

Steel No	C	Si	Mn	P	S
7015	0.71	1.55	0.56	0.012	0.005
7020	0.70	2.04	0.56	0.012	0.006
6520	0.66	2.03	0.56	0.012	0.006

Fuzi Electronic Co. Model F)을 이용 시편의 한쪽 끝 부분에 열전대 삽입을 삽입하여 항온 변태 곡선을 작성하였다. 이의 변태 곡선 작성 방법을 Fig.2 에 보여주며 이같은 방법으로 하여 시험 강재를 1000°C 및 1200°C 로 오스테나이트화 한 후 각 온도인 400°C, 500°C, 550°C, 600°C 및 700°C 에 급냉하여 유지하면서 팽창량을 측정하여 변태 시간을 계산 하였다.

2.3. 패터닝 열처리 실험

선재로 열간 압연된 5.5 mmo 의 소재를 상기 2.2 항으로 실시된 항온 변태 곡선을 이용하여 가열 온도 900°C, 1000°C 및 1100°C 에서 15분 유지한 후 패터닝 온도 조건인 400°C, 500°C, 550°C, 600°C 및 700°C 인 염욕 온도에 시험재를 침지하여 각 온도에 맞는 변태 완료 시간까지 유지한 후 공냉 시켰다. 이의 패터닝 열처리의 모식도를 Fig.3 에 나타내었다.

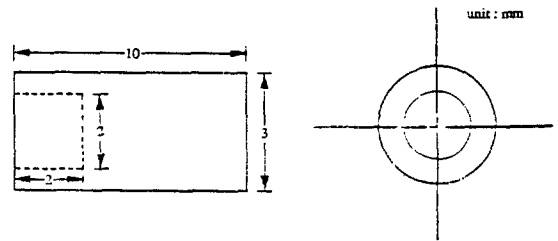


Fig. 1. Specimen for time-dilatation curve.

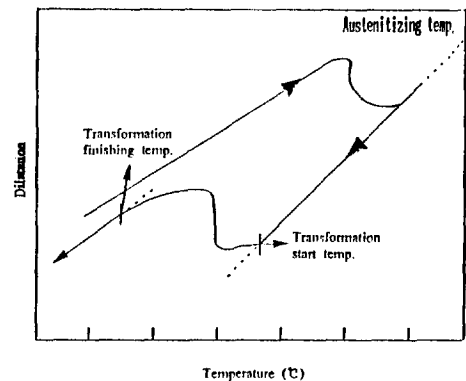


Fig. 2. The dilation curve for tested steel.

2.4. 조직 관찰 및 기계적 성질 조사

Fig.3에 의한 패터닝 열처리를 실시한 강재의 조직 변화를 관찰하기 위하여 광학현미경(Nikon, model AFX), 또는 주사 전자 현미경(scanning electron microscope : model JSM-35F)을 이용하여 관찰 하였다. 또한 이의 열처리 실험재의 인장 시험은 Instron testing M/C 기기(USA, model 4204, cap 50 Ton)을 10 Ton Load cell 으로 cross head speed 10 mm/min 의 속도로 정하여 시험 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 소재의 강도

시험재로 사용하려는 강재인 6520, 7015 및 7020 재의 (Table 1에 나타난 화학 성분을 가진 성분중

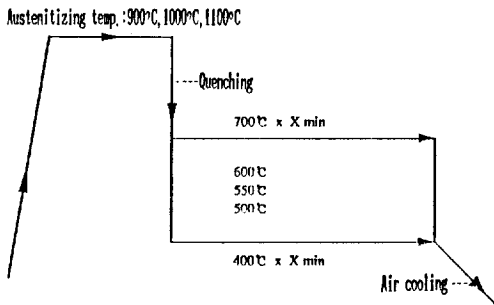


Fig.3. Heat treating cycles for partenting conditions.

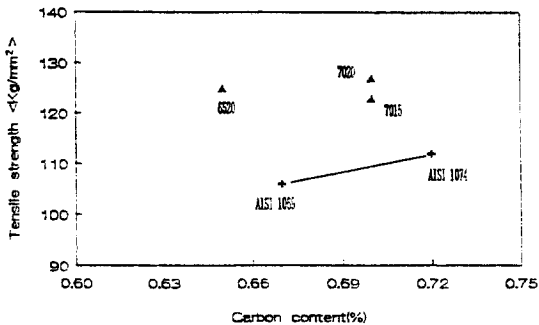


Fig.4. Effect of direct air partenting on the tensile strength of tested steels : 6520, 7015, 7020.

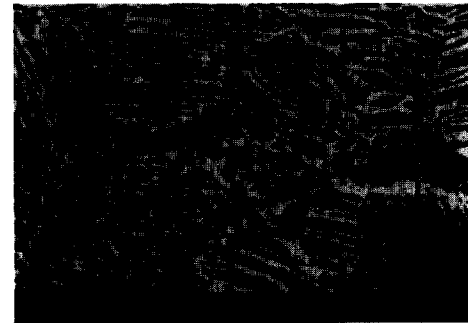
탄소 및 실리콘 양을 중시하여 7015, 7020 및 6520 으로 표기한다. 예로 7015는 C : 0.71%, Si : 1.55%. 7020은 C : 0.70%, Si : 2.0% 를, 6520는 C : 0.66%, Si : 2.0% 강종을 나타낸다) 인장 강도 수준을 탄소강인 AISI 1069, AISI 1074 과 비교한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 AISI 1069, AISI 1074 재의 인장 강도



(A)



(B)



(C)

Photo 1. Scanning electron micrographs showing pearlite of as rolled steels.

(A : 7015, B : 7020, C : 6520)

는 106 kg/mm², 112 kg/mm² 인 반면에 시험 강재 6520 은 125.4 kg/mm², 7015 는 123.12 kg/mm², 7020 재는 127.7 kg/mm²로 유사한 탄소 함유량에서 실리콘이 함유된 실험 강종은 탄소강에 비해 인장 강도가 증가되고, 동일한 0.7% 탄소량에서 실리콘 함유량이 1.5%~2.0%로 증가된 실험 강종 또한 인장 강도가 약 4 kg/mm² 증가됨을 알 수 있다. 이는 Photo.1 에서 보여주는 주사 전자현미경 조직으로 알 수 있듯이 실리콘 함유된 강재는 일반 탄소강에 비해 펄라이트 라멜라(pearlite lamellar) 간격이 미세함을 확인 할 수 있다. 이는 펄라이트 변태 온도와 펄라이트 라멜라의 관계에서 Zener 는 펄라이트 라멜라 간격은 열역학적 계산으로 식(1)에서⁷⁾

$$LPS_m = 2\gamma \cdot Te / \rho \cdot \Delta H \cdot \langle Te - T_a \rangle \quad (1)$$

여기서 LPS_m: 최소 펄라이트 라멜라 간격, γ : 펄라이트와 세멘타이트간의 계면 에너지 ρ : 펄라이트의 밀도, ΔH : 펄라이트 변태의 엔탈피, Te: 평행상태에서 공석온도, T_a: 실제 변태한 온도. 계산에서 $\gamma = 7 \times 10^{-5} \text{ J/Cm}^2$ ⁸⁾, $\rho = 7.87 \text{ g/Cm}^3$, $\Delta H = 76 \text{ J/Cm}^{3,9,10}$, Te = 996 K 을 사용하면 실리콘 함유된 강은 탄소강에 비해 (1) 식의 $\langle Te - T_a \rangle$ 값이 적어 펄라이트 간격을 미세화 하고 이는 Hall-Petch 의 강도공식인

$$\sigma = \sigma_0 + K\lambda^{-1/2} \quad (2)$$

에서 강도는 펄라이트 층상 간격에 지배되므로^{11,12)} 실리콘 함유된 강은 강도는 증가하는 것이다.

3.2. 항온 변태 곡선

Table 1 에 나타난 화학 성분을 가진 성분중 7020 강종을 Fig.1 의 칫수로 가공한 후 Fig.2 처럼 변태 곡선을 측정한 결과를 Fig.5 에 나타내었다. 이같은 결과는 서론에서 서술하였지만 타이어 코드 선이나 와이어 로프용 선은 제품 가공시 신선 가공성의 향상 및 최종 제품의 물성치를 확보하기 위해 가공 공정 중간에서 패터닝 열처리를 실시하여 신선 가공된 조직을 열처리에 의해 재펄라이트 조직으로 전환 시키는데 이때 가열 온도의 조건은 오스테나이트 영역인 900℃~1000℃, 유동층 로나 납 목초의 온도는 400~600℃ 에 침치하여 열처리를 실시한다. 이 펄라이트 조직은 아

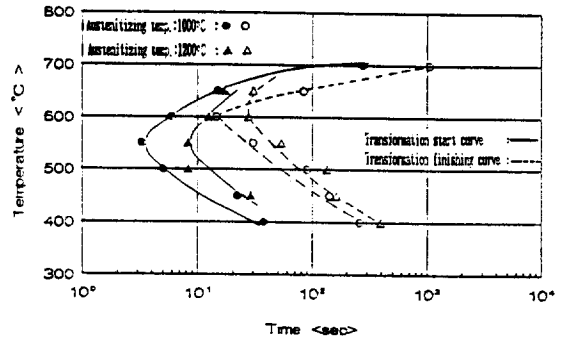


Fig.5. Isothermal transformation diagrams of 7015 steel.

금학적으로 페라이트와 판상의 세멘타이트로 구성되는 층상의 펄라이트로 구성되며 이때의 펄라이트 간격, 즉 미세 펄라이트는 신선 가공성을 향상시키고¹³⁾, 또한 강도는 Hall-Petch 공식인 (2)식인 $\sigma = \sigma_0 + K\lambda^{-1/2}$ 에서 σ : 항복 강도, σ_0 : fraction stress, K: 상수, λ : 펄라이트 층상 간격으로 표기되어 σ : 항복 강도는 펄라이트의 층상 간격에 지배된다.^{11,12)} 따라서 패터닝에 의해 전환된 펄라이트 조직은 최종 선의 가공성과 강도에 밀접한 영향을 주게 되므로 탄소강에 실리콘 함유된 강은 변태 곡선을 작성함은 대단히 중요하다. Fig.5 에 나타난 변태 곡선에서 가열온도 1000℃에서 소재의 변태 온도인 700℃, 650℃, 600℃, 550℃, 500℃, 450℃ 및 400℃에서 변태 시작과 완료 시간은 281, 1055, 15,84, 6,15, 3,30, 5,90, 22,141 및 38,260 초이며, 가열온도 1200℃에서 소재의 변태 온도인 650℃, 600℃, 550℃, 500℃ 및 450℃에서 변태 시작과 완료 시간은 17, 31, 13, 28, 8,54, 8,136 및 28,163 초이다. 따라서 실리콘 함유된 강종 7015의 항온 변태 곡선에서 변태가 가장 빨리 시작되는 노즈(nose)부분은 550℃이며, 변태 소요 시간 또한 가장 느린 곡선을 보여주고 있다. 예로 가열온도 1000℃, 변태 온도 550℃에서 변태 시작과 완료 시간은 3,30초로 변태에 소요되는 시간은 27초이며, 또한 가열온도 1200℃, 변태 온도 550℃에서 변태 시작과 완료 시간은 8,54초로 변태에 소요되는 시간은 46초이다. 또한 가열온도 1000℃보다 가열온도

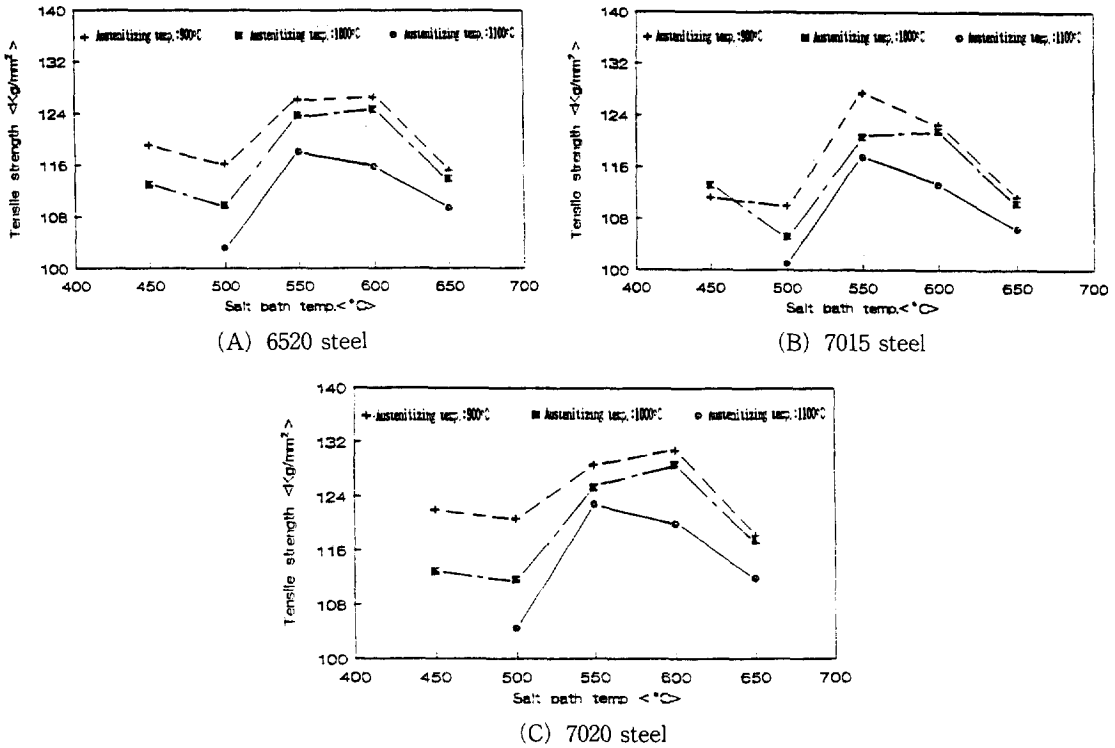


Fig. 6. Influence of austenitizing temp. and salt bath temp. on tensile strength of 6520, 7015, 7020 steels.
 (Austenitizing temperature : 900 $^\circ\text{C}$, 1000 $^\circ\text{C}$, 1100 $^\circ\text{C}$. Salt bath temperature : 400 $^\circ\text{C}$, 450 $^\circ\text{C}$, 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$, 650 $^\circ\text{C}$.)

1200 $^\circ\text{C}$ 가 되면 변태 곡선은 장시간축으로 이행되기에 변태 개시 온도는 저하한다. 이는 일반적으로 오스테나이트 온도가 높으면 결정 입경은 커지고 변태 곡선이 우측 이동 한다는 연구결과와¹⁴⁾ 일치 하는 현상이다. 이러한 오스테나이트 결정 입경이 커지면 펄라이트 변태의 진행은 늦어진다.

3.3. 패터닝 열처리 조건에 따른 강도 및 조직의 변화

Fig.6의 A, B, C는 실험강종 6520, 7015 및 7020 재의 가열 온도 900 $^\circ\text{C}$, 1000 $^\circ\text{C}$ 및 1100 $^\circ\text{C}$ 로 오스테나이트한 후 염욕 욕조 온도 450 $^\circ\text{C}$, 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$ 및 650 $^\circ\text{C}$ 로 침치한 후 변태 완료 시킨 실험재의 강도 변화를 보여준다. 이 결과로 알 수 있듯이 6520강은 오스테나이트 온도 900 $^\circ\text{C}$ 이면서 염 욕조 온도 450 $^\circ\text{C}$, 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$ 및 650 $^\circ\text{C}$ 일때 강도는 119.1 kg/mm², 116.1 kg/mm²,

126.1 kg/mm², 126.5 kg/mm² 및 115.2 kg/mm² 이고 오스테나이트 온도 1100 $^\circ\text{C}$ 이면서 염 욕조 온도 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$ 및 650 $^\circ\text{C}$ 일때 강도는 103.2 kg/mm², 118.1 kg/mm², 115.8 kg/mm² 및 109.4 kg/mm² 이다. 또한 7015강은 오스테나이트 온도 1000 $^\circ\text{C}$ 이면서 염 욕조 온도 450 $^\circ\text{C}$, 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$, 650 $^\circ\text{C}$ 및 700 $^\circ\text{C}$ 일때 강도는 113.2 kg/mm², 105.2 kg/mm², 120.7 kg/mm², 121.6 kg/mm² 및 110.4 kg/mm² 이고 7020강은 오스테나이트 온도 1100 $^\circ\text{C}$ 이면서 염 욕조 온도 500 $^\circ\text{C}$, 550 $^\circ\text{C}$, 600 $^\circ\text{C}$ 및 650 $^\circ\text{C}$ 일때 강도는 104.5 kg/mm², 122.9 kg/mm², 120 kg/mm² 및 111.9 kg/mm² 이다. 따라서 이 결과로 보아 이 3 강종은 오스테나이트화 온도와 관계없이 염 욕조 온도 550 $^\circ\text{C}$ 및 600 $^\circ\text{C}$ 에서 인장 강도 값이 가장 최대로 보이고 이후 전 후의 온도에서는 낮은 값의 강도

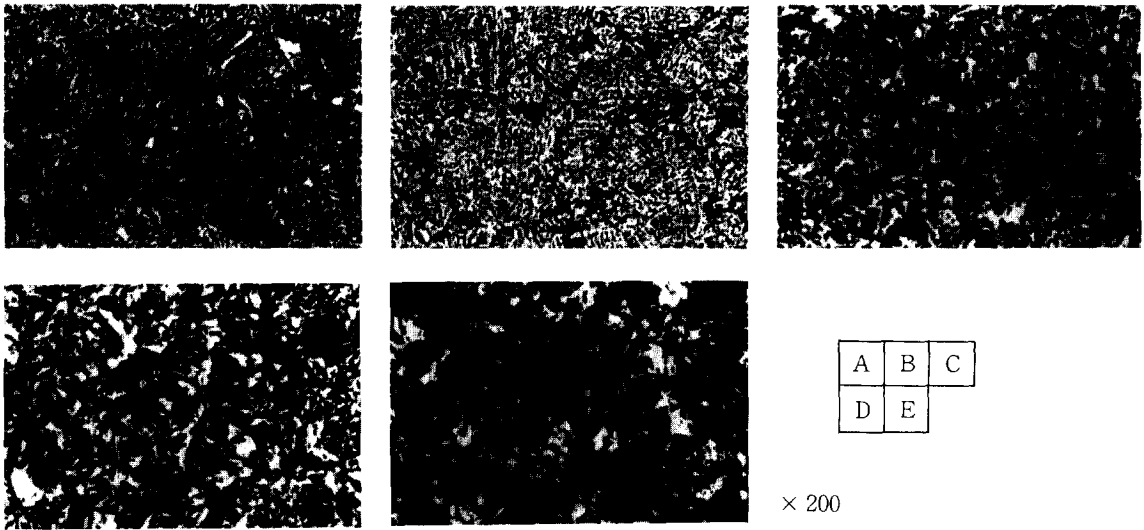


Photo 2. Optical micrographs of 7020 steel showing the effect of salt bath temperature at austenitizing temp. : 1000°C.
 (A : salt bath temperature : 450°C, B : salt bath temperature : 500°C, C : salt bath temperature : 550°C, D : salt bath temperature : 600°C, E : salt bath temperature : 650°C.)

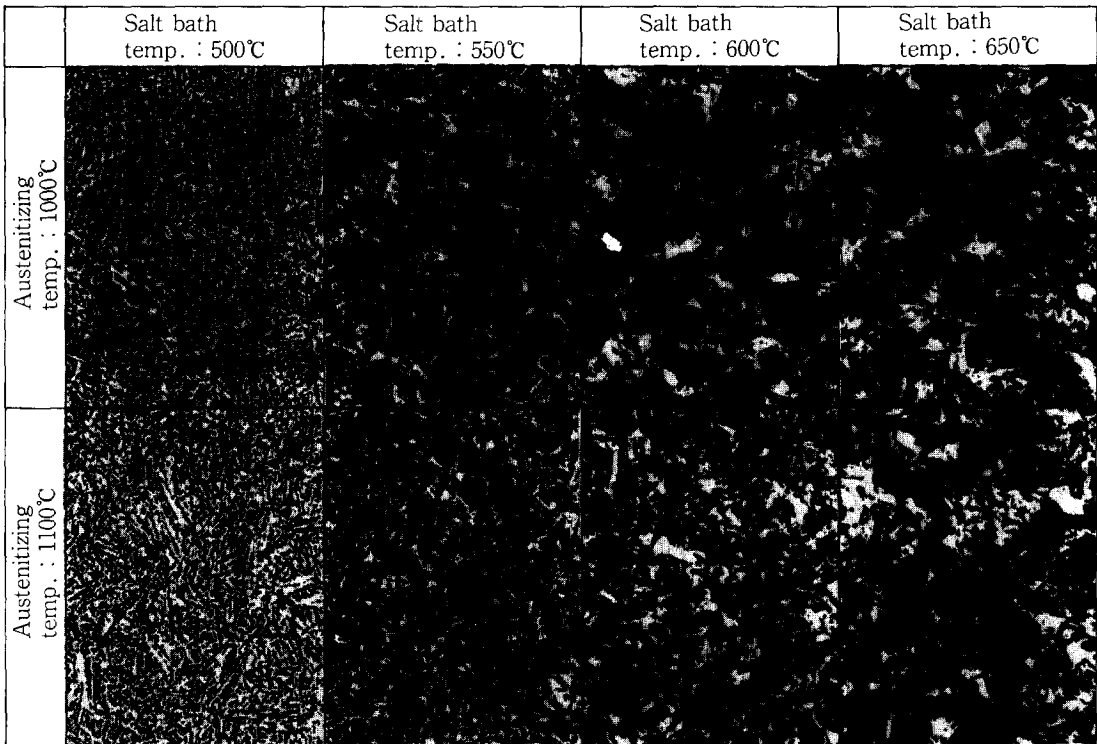


Photo 3. Optical micrographs of 6520 steel showing the effect of salt bath temperature at austenitizing temp. : 1000°C, 1100°C.

를 보이고 있다. 또한 가열 온도 변화에 따른 강도 변화는 900°C가 가장 높고, 1000°C 및 1100°C의 순으로 낮아진다. 이러한 현상을 규명하기 위해 광학 현미경으로 조직 관찰 한 것이 Photo 2에 7020 재, Photo 3에 6520 재를 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 7020 강종의 오스테나이트 1000°C 일때 염욕 온도 450°C 이면 베이나이트 조직이 관찰 되고, 욕조 온도 500°C 이면 베이나이트와 일부 펄라이트의 (사진상 검은색) 혼성된 조직, 욕조온도 550°C 이면 페라이트(사진상 흰색)와 펄라이트 조직으로 관찰 된다. 이후 600°C 와 650°C 이면 펄라이트 조직이 형성됨을 알수 있다. 또한 6520 강종의 조직은 가열 온도인 오스테나이트 온도인 1000°C 와 1100°C 에서 펄라이트 형성이 1000°C 보다 1100°C 가 보다 빨리 진행됨을 염욕 온도 500°C 에서 확인 된다. 이후 염욕 온도의 차이는 7020 강과 유사하게 진행된다. 이러한 열처리

조직의 차이에 의해 인장 강도 값은 펄라이트가 가장 높고, 다음은 베이나이트, 그리고 혼재된 베이나이트와 펄라이트의 조직 순으로 나타난다. 이를 좀더 미세 관찰한 결과는 Photo 4에 7020 재의 오스테나이트 온도 900°C 이면서 염욕 온도 450°C, 500°C, 550°C 및 600°C 의 조직을 Photo 5는 7020 재의 오스테나이트 온도 1100°C 이면서 염욕 온도 500°C, 550°C, 600°C 및 650°C 의 주사 전자 현미경 조직을 보여 주고 있다. 여기서 알 수 있듯이 패턴팅 열처리시 염욕 온도 450°C 이면 베이나이트, 500°C 이면 펄라이트와 베이나이트가 혼재된 조직, 600°C 이면 미세한 펄라이트가 발달되는 조직임을 관찰 할 수 있다. 이는 문헌¹⁵⁾에 의해 탄소강의 패턴팅 열처리후 베이나이트 조직의 출현은 550°C 이지만 본 실험의 실리콘 함유 강종에서는 500°C 이하에서도 베이나이트 조직이 나타남은 특이한 점이다. 또한 퍼얼라이트 발달도 550°C 보다

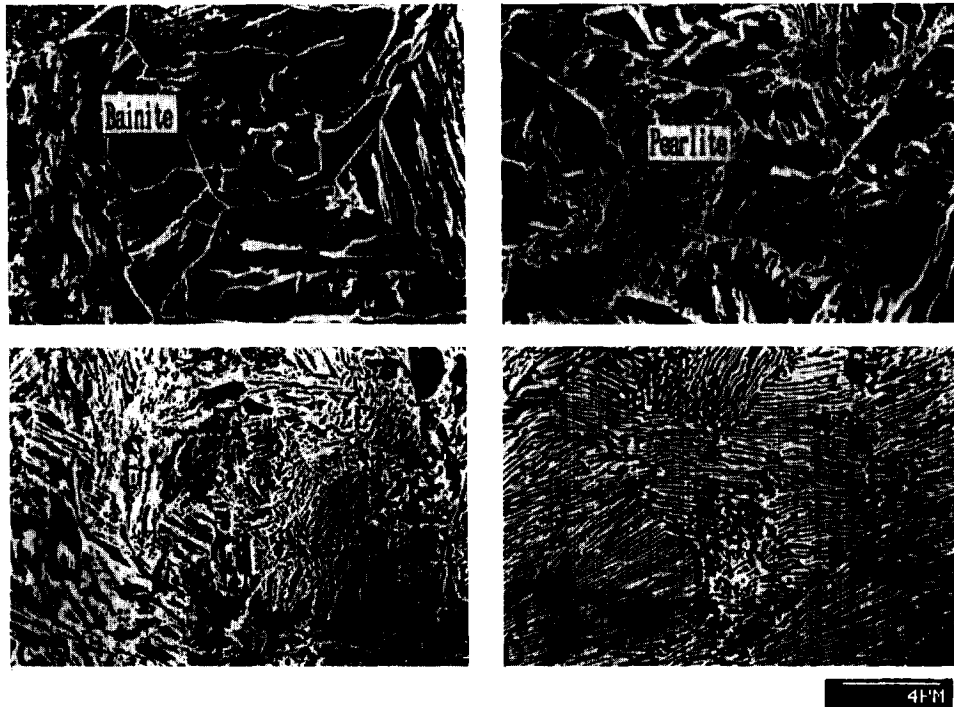


Photo 4. Scanning electron micrographs of 7020 steel showing the effect of salt bath temperature at austenitizing temp. : 900°C.
(A : salt bath temperature : 450°C, B : salt bath temperature : 500°C, C : salt bath temperature : 550°C, D : salt bath temperature : 600°C.)

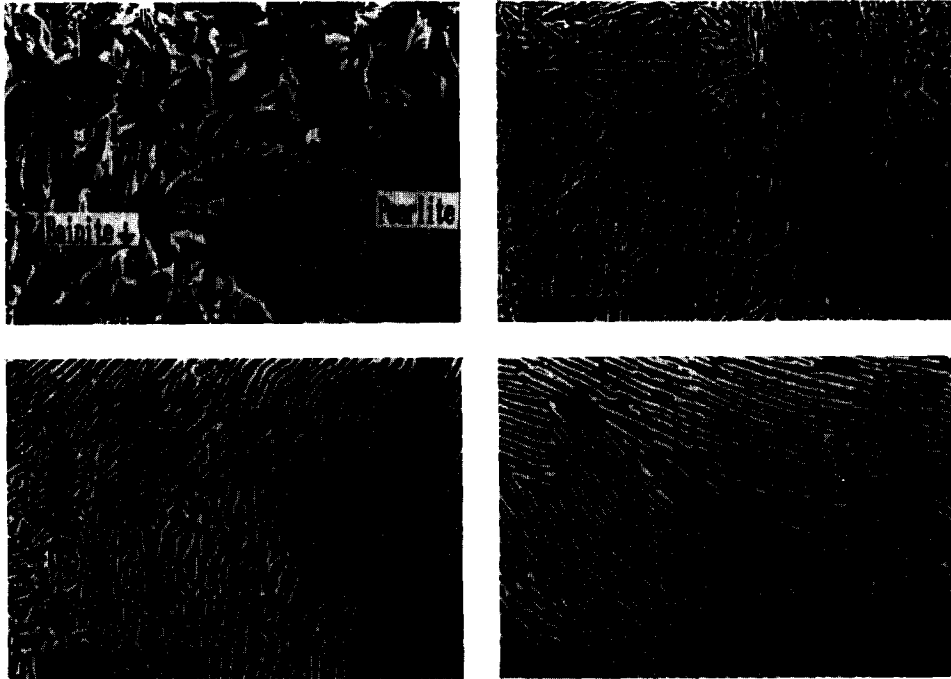


Photo 5. Scanning electron micrographs of 7020 steel showing the effect of salt bath temperature at austenitizing temp. : 1100°C.
 (A : salt bath temperature : 500°C, B : salt bath temperature : 550°C, C : salt bath temperature : 600°C, D : salt bath temperature : 650°C.)

600°C 가 보다 층상 간격이 발달되고 세멘타이트 형성도 양호한 것으로 보이고 있다. 가열 온도 변화에 따른 강도 변화는 일반적으로 가열 온도가 상승하면 인장강도 또한 증가 하는 경향이 있으나 반면 과도한 가열 온도인 경우는 반대로 감소 하는 경우가 있다는 연구 결과가¹⁶⁾ 있듯이, 본 실험 강종에서도 염욕 패턴팅 열처리시 가열 온도 온도가 높으면 라멜라 간격이 커져 인장 강도는 낮게 나타난다. 이의 결과를 비교한 것을 Fig.7 에 보여 준다. 여기서 알 수 있듯이 실험 강종의 소재인 인장 강도는 7020 재가 127.7 kg/mm², 6520 는 125.4 kg/mm² 인것과 같이 7020 재의 패턴팅 처리 시오스테나이트 온도 900°C, 1000°C 및 1100°C 이면서 염욕 온도 600°C 일때 130.8 kg/mm² 128.7 kg/mm² 및 120 kg/mm² 의 강도 값이고 6520 재의 오스테나이트 온도 900°C, 1000°C 및 1100°C 이면서 염욕 온도 600°C 일때 126.5 kg/mm², 124.6

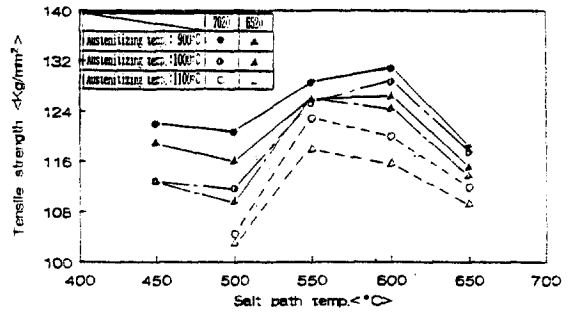


Fig. 7. Influence of austenitizing temp. and salt bath temp. on tensile strength of 6520, 7020 steels.
 (Austenitizing temperature : 900°C, 1000°C, 1100°C. Salt bath temperature : 400°C, 450°C, 500°C, 600°C, 650°C.)

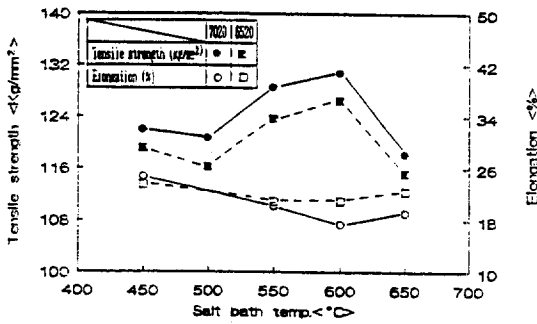


Fig. 8. Influence of austenitizing temp. : 900°C and salt bath temp. on mechanical properties of 6520, 7020 steels.
(Salt bath temperature : 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C.)

kg/mm² 및 115.8 kg/mm² 의 순으로 오스테나이트화의 온도가 낮으면 인장 강도는 높아진다. 이는 열처리 과정에서 오스테나이트화 온도 상승은 결정립의 성장으로 핵생성 속도의 감소로¹⁷⁾ 보다 낮은 온도에서 펄라이트의 핵생성이 발달하고 또한 강도는 펄라이트의 미세화에 의한 인장 강도가 증가한다는 보고와^{15,18,19)} 같이 이강종에서도 앞서 조직 관찰에서 보았듯이 550°C 및 600°C 부근에서 강도가 가장 증가가 높고 450°C, 500°C에서는 베이나이트 조직의 생성으로 강도는 낮아지고 있다. 이는 종래 문헌에¹⁸⁾ 의한 결과와 같은 현상이다. 또한 오스테나이트화 온도 900°C에서 염욕 온도 450°C, 500°C, 550°C, 600°C 및 650°C로 열처리한 7020 및 6520 강종의 강도 및 연신율을 조사한 결과를 Fig.8에 나타내었다. 이결과 7020 강종의 염욕 온도 450°C, 550°C, 600°C 및 650°C 일때 연신율은 24.7, 20.2, 17.4 및 19.16%이며 6520 강종은 23.4, 20.8, 20.9 및 22.4%로 19%에서 24%의 변화가 있으나 강도가 보다 높은 600°C 및 650°C 염욕 온도일때 강도 128.6 kg/mm², 130.8 kg/mm², 123.7 kg/mm² 및 126.5 kg/mm² 인 반면 연신율은 20%로 큰 차이가 없다. 따라서 실험한 강종의 염욕 온도는 550°C, 600°C가 양호한 조건으로 나타나며 오스테나이트화 온도는 낮은 경향이 좋은 것으로 나타났다. 그래서 본 실험 강종의 패터닝 열처리시의 오스테나이트화 온

도는 900°C 이면서 염욕 온도 550°C, 600°C가 양호한 것으로 나타났다.

4. 결론

실리콘 성분을 함유한 고탄소강의 패터닝 열처리시의 항온변태곡선, 열처리후의 조직 및 인장성질을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실리콘성분을 함유한 고탄소강의 항온변태곡선을 작성하였고 이 변태곡선에 의한 패터닝 염욕 온도 변화 450°C, 500°C 및 600°C 이면 조직은 베이나이트, 베이나이트와 펄라이트의 혼성 및 퍼얼라이트로 관찰 되었다.
2. 패터닝 열처리 후의 인장 강도 값은 펄라이트가 가장 높고 베이나이트 및 펄라이트와 베이나이트의 혼성된 조직의 순으로 증가된다.
3. 실험 강종의 최적 패터닝 열처리 조건은 오스테나이트 온도 900°C, 염욕 온도 550°C 및 600°C 이다.

참고문헌

1. I.Kozasu : Accelerated Cooling of Steels, ed. by P.D.Southwick, The Metallurgical Society, New York (1986) 15
2. Larry Drummond : Wire Journal international, May (1984) 44-46
3. J.Tominaga, K.Matsuoka and S. Inoue : Wire Journal International, 18 (1985) 65
4. 中村芳美 : 線材とその製品, 25(1987) No8 P6
5. 大鈴弘忠外3人 : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan (1976) S371
6. 上井 明外 3人 : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan (1971) S480
7. C.Zener : Trans.AIME. 167 (1946), 550
8. J.J.Kramer, G.M.Pound and R.F.Mehl : Acta.Metall., 6(1958), 763
9. 木下修司 外 : 日本金屬學會誌, 32 (1968), 244
10. P.K.Agarwal and J.K.Brimacombe : Metall.Trans., 12B (1981) 121

11. A.R.Marder and B.L Bramfitt : Metall. Trans (A) 7, (1976) 365
12. J.M.Hyzak and I.M.Bernstein : Metall, Trans (A) 7, (1976) 1217
13. 岡本一生, 江口直記, 富永治明 : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan 50, (1964) No12
14. Minoru Umemoto, Nozomi Komatsubara, Imao Tamura : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan 66 (1980) No3 400
15. B.M.Armstron and G.M.Sturgeon : Wire Industry, 32 (1965) 73
16. Eiji Takahashi, Masaru Shimizu, Yasuhiro Oki, Osamu Ishigami : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan 62 (1976) No10 1373
17. Yutaka.Kanetsuki, Masaaki.Katsumata 外 2 人 : Journal of The Iron and Steel Institute of Japan., 75 (1989), No12 2218
18. T.Gahill and B.A.J.James : Wire and Wire Products, 43(1968) No3 73
19. N.Ridley : Wire Industry, 37 (1970) 829