

SUS416강의 효과적 가공을 위한 열처리 조건에 관한 연구

김홍건*

(논문접수일 2004. 11. 6, 심사완료일 2004. 12. 2)

A Study on the Heat Treatment Condition for Effective Manufacturing of SUS416 Steel

H. G. Kim*

Abstract

Optimal heat treatment process in martensitic stainless steel such as SUS416 is investigated. The approach is based on the combination of the interpolation and extrapolation method of a standard heat treatment technology with the principle of quenching and tempering temperature difference. The relationship of the macroscopic structure, fracture toughness and ductility as well as the hardness and strength are considered to induce a simple rule to apply with feasibility. Consequently, optimal heat treatment condition in martensitic stainless steel is proposed and is shown the better quality. It was found that the smaller grain size of microstructure gives the enhanced fracture toughness and ductility.

Key Words : Stainless Steel(스테인레스강), Martensite(마르텐사이트), Heat Treatment(열처리), Quenching(담금질), Tempering(뜨임), Fracture Toughness(파괴인성), Interpolation(보간법), Extrapolation(외삽법)

1. 서론

스테인레스강(Stainless Steel)은 철과 크롬 그리고 다른 원소들의 합금으로서 강철이 최소 10.5% 이상의 크롬을 함유해야 하며 여러 환경에서 부식에 대한 저항성을 갖도록 만든 특수강의 일종이다. 이러한 스테인레스강은 Ferrite계, Martensite계, Austenite계, PH합금계 등으로 분류할 수 있다⁽¹⁾. 이 합금강의 내식의 원리는 다음과 같다. 철 속에 Cr을 약 12%이상 합금하면 철의 내식성은 현저하게 증가한다. 특히 공기 중에서 녹슬지 않게 된다. 이것은 철-크롬

합금의 표면에 부동태 피막이라 부르는 얇고 치밀한 산화 피막이 형성되므로 이 12% Cr 이상의 철-크롬 합금을 스테인레스강이라 한다. 그 중에서 400 이상의 스테인레스강을 페라이트계 스테인레스강 또는 마르텐사이트계 스테인레스강이라 하며, 이 중 마르텐사이트계 스테인레스강은 12.6% Cr과 0.26% C를 포함한다. 이 재질은 공기중에서는 녹이 생성되기 힘들으나 다른 물질과 접촉할 때는 부식이 쉽게 일어난다. 그리고 담금질과 뜨임에 의하여 기계적 성질을 얻을 수 있다. 또 쾌삭성이 좋아 가공이 쉬운 반면에 인성이 좋아 지속적인 열을 받을 때 변형을 일으키기

* 전주대학교 공학부 기계공학과 (hkim@jj.ac.kr)
주소 : 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

쉽다. 그리고 공구용으로 많이 쓰이기 때문에 경도가 좋다. 그러나 가공을 좋게 하기 위해서 경도를 떨어뜨려 용도에 맞게 열처리 Cycle을 조절해야 한다^(2,3).

이 논문에서는 마르텐사이트계 스테인레스강에서의 기본적인 열처리 원칙을 제시한 후, 이 표준 데이터로부터 보간법(Interpolation) 및 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 임의의 경우에 사용할 수 있도록 정립하였다. 그리고 기존 문헌으로부터 추출한 표준 열처리 절차를 인성을 높이기 위한 금속 조직상의 원칙과 합성하여 이 내용들을 중첩시킨 최적의 열처리 조건을 도출하고자 하였으며, 그 결과 마르텐사이트계 스테인레스강 (SUS416 기준)⁽⁴⁻⁶⁾에서의 최적 열처리 조건을 제시하였고 이 조건에 의해 열처리한 결과 미세조직의 조밀화가 달성되어 파괴경도 및 파괴인성을 향상시키고 효과적 가공을 위한 경도를 충족시킬 수 있었다.

2. 이론적 항복강도 및 파괴응력

일반적으로 금속조직의 미세화는 재료의 강도와 인성을 모두 증가시키는 기회를 부여한다. SAE에서 조사된 결정립의 크기와 합금강도 및 파괴인성과의 관계는 결정립의 크기가 작아지면 강도 및 파괴 인성 K_{IC} 의 크기가 향상된다는 것을 알 수 있다⁽⁷⁾. 이에 관한 메커니즘 해석은 결정립계가 작으면 작을수록 미세 균열들이 더욱더 빈번히 효과적인 장애물(결정립계)에 의하여 정지할 것이라는 것이 입증된다는 것이며, 이의 결과로서 균열은 반복적으로 재생성되어야 하고 또 인성 결정립에서 균열이 전파방향을 바꿀 때 상당한 에너지 소모가 수반된다는 것이다. 이와 관련된 Griffith의 식을 보면 평면응력의 조건하에서 다음의 식 (1)과 같이 되고

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1)$$

평면변형의 조건하에서는 다음의 식 (2)와 같이 된다고 발표하였다. 여기서 a 는 균열의 길이, γ_s 는 비표면 에너지를 의미한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

그러므로 위의 식 (1), (2)에서와 같이 미세결정조직은 더욱 작은 잠재적 결함을 생성시키고 따라서 파괴에 필요한

응력을 증가시키게 된다고 볼 수 있는 것이다. 이것은 일반적으로 관찰되는 강도와 인성 사이의 반비례관계에 비추어 특별히 관심을 끄는 강도증가 기구를 의미한다고 볼 수 있다. Cottrell과 Petch의 전위론⁽⁴⁾을 이용한 해석에 의하면 파괴응력이 다음의 식 (3)으로 주어진다는 것을 알 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{4G\gamma_m}{k_y} d^{-1/2} \quad (3)$$

여기서 γ_m 은 소성일(Plastic Work)을 의미하고 k_y 는 Hall-Petch 관계에서의 전위 고착항(Dislocation Locking Term)이며 d 는 결정립의 크기를 의미한다. 따라서 결정립의 크기가 감소함에 따라 σ_f 가 증가하는 것은 결정립 미세화로 항복강도가 비슷하게 증가하는 것에 상당한다는 것도 잘 알 수 있으며 항복강도에 대해 잘 알려진 다음 식 (4)의 Hall-Petch식에서도 결정립의 크기에 민감하게 적용된다는 것을 알 수 있다.

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (4)$$

여기서 σ_{ys} 는 항복강도이고 σ_i 는 전위운동에 대하여 여러 가지 강도 증가기구와 본질적 격자마찰에 의해 생기는 격자저항을 의미한다. 위의 식 (1) 및 (4)에서 보이는 바와 같이 조직의 Grain Size를 미세화시키면 파괴인성이 증가된다는 원칙을 알 수 있으며 이는 열처리시 Tempering에 의해 조절할 수 있는 Factor로서 SUS416강에 있어서의 열처리 절차에 관해 검토한 후 조직상의 변화를 고찰하였다.

3. 마르텐사이트계 스테인레스강의 금속조직 및 열처리선도 고찰

3.1 마르텐사이트계 스테인레스강의 금속조직 고찰

철-크롬의 상태도는 Fig. 1과 같으며 이러한 합금강의 열처리에 관하여는 많은 시행착오가 있었으나 현재까지도 하나의 표준조건만 제시될 뿐, 각각의 경우에 따른 구체적인 절차는 개별적으로 존재하고 있는 실정이다.

실온에서 철-크롬합금은 크롬의 20% 함유량까지 페라이트조직을 갖는다. 이 점에서 시그마라고 불리는 한 개의 상이 나타나는데, 시그마상은 여러 조성의 철과 크롬으로 이루어진 단단하고 여린 화합물이고 바람직하지 않은 상이다. 왜냐하면 그것은 부식저항을 감소시키고 기계적 성질을 낮추어준다. 니켈이 철-크롬합금에 첨가될 때 오스테나이트는

상온에서 평형구조가 될 수 있다. 그래서 어떤 스테인레스강은 페라이트 조직, 어떤 것은 오스테나이트 조직, 어떤 것은 마르텐사이트 조직으로 경화될 수 있다. 그리고 금속조직의 미세화는 재료의 강도와 인성을 모두 증가시키는 기회를 부여한다.

또한 SAE에서 조사된 결정립 크기와 합금강도 및 파괴인성과의 관계는 Fig. 2에서 보여주고 있으며 이는 결정립의 크기가 작아지면 강도 및 파괴인성치 K_{IC} 가 크게 향상된다는 것을 알 수 있다⁽⁴⁾. Fig. 2에서 파괴강도 σ_f 가 항복응력 σ_{ys} 보다 결정립 크기에 더 민감하다는 것을 보여준다. 첫째, 항복강도와 파괴강도 곡선의 교차점은 재료 반응에 있어서

의 전이점을 나타낸다. 큰 결정립에서 파괴가 일어나기 위해서는 소성 유동이 시작되는 시점까지 기다려야 한다. 따라서 파괴는 $\sigma = \sigma_f + \sigma_{ys}$ 일 때 일어난다. σ_f 와 σ_{ys} 는 온도에 민감한 성질을 가졌으므로, 파괴 전이에 대한 임계 결정립 크기는 시험 온도에 따라 변할 것으로 유추된다. 따라서 전이온도는 결정립 크기가 감소함에 따라 심하게 감소함을 볼 수 있다.

3.2 마르텐사이트계 스테인레스강의 표준 열처리선도 고찰

마르텐사이트계 스테인레스강은 크롬을 12~18% 범위로 함유하고 탄소농도는 1.2% 정도로 비교적 높은 편이다. 이 재질에 관한 표준 열처리 곡선을 살펴보면 경화와 풀림 처리를 하고, 안정화 및 질화 처리는 선택적으로 하며 Normalizing 처리는 보통 하지 않는다. 경화처리는 풀림시 사용되는 보호 분위기와 동일하게 적용하며 기름 같은 오일이 묻지 않도록 해야 한다. 이 강은 탄소강과 저합금강에 비하여 열전도도가 작기 때문에 열처리 후 큰 열구배와 응력이 생겨 휘어짐(Warping)이나 균열을 발생시킬 수 있으므로 특히 이 점을 조심해야 한다. 따라서 760-790℃에서 모든 부위가 균일한 온도로 될 때까지 유지시켜 예열처리 한다.

오스테나이트화는 925-1010℃에서 하며 큰 제품이거나 최대 내식성과 강도를 원할 때는 고온측을 택한다. 유지시간은 13mm까지는 30-60분이 적당하고 25mm 두께증가에 따라 30분씩 더 유지시킨다. 565℃ 이상에서 Tempering할 때에는 위의 온도 범위중 저온측을 택하여 연성과 인성을 향상시킨다. 완전 풀림이나 항온 풀림한 제품에서는 유지시간을 두 배로 하며 675℃ 이상에서 장시간 중간풀림하였을 경우에는 유지시간을 50% 더 길게 한다. 냉각시에는 유냉과 공냉이 가능하나 유냉하면 최대내식성과 연성이 얻어지므로 더 유리하다. Quenching 경도는 H_B 375 - 415 정도이다. Tempering의 온도에 따른 경도 변화는 Fig. 3 및 4와 같으며 이 Tempering 온도의 조절로 경도변화 및 파괴인성을 조절하고자 하였다. 한편 경도값의 Brinell, Vickers, Rockwell Number의 상관관계는 기존자료⁽⁵⁾로부터 쉽게 구할 수 있으며 예로서 H_{RC} 30~32는 H_B 285~302의 범주에 속한다. 여기서 그림 3과 4의 두 표준열처리 기준에 해당되지 않는 임의의 Quenching 온도에 대한 경도는 표준 데이터로부터 보간법(Interpolation) 및 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 임의의 경우에 사용할 수 있도록 정립하였으며 선형 보간에 관한 이론식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

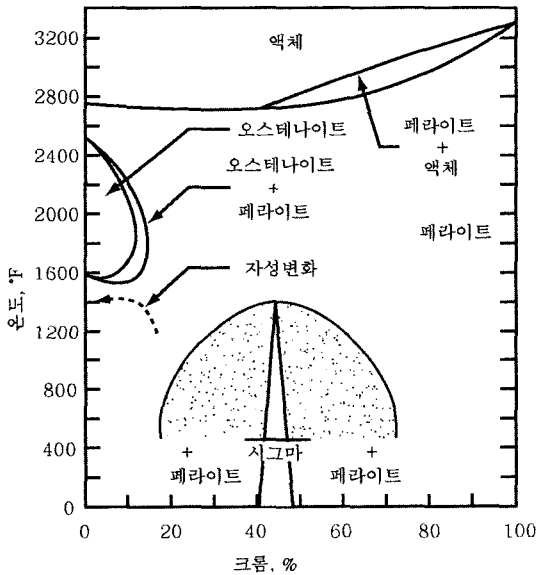


Fig. 1 Fe-Cr Diagram of Stainless Steel

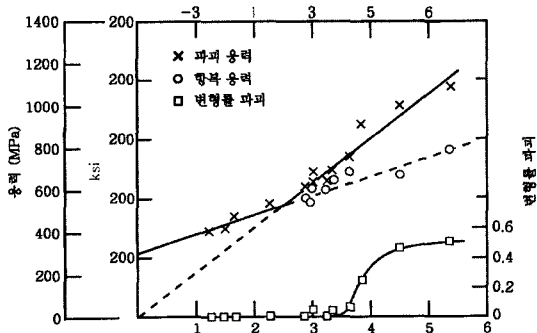


Fig. 2 Relationship of grain size to the fracture stress, yield stress and strain failure

$$H_{BX} = H_{B1} + \frac{T_{QX} - T_{Q1}}{T_{Q2} - T_{Q1}} \cdot (H_{B2} - H_{B1}) \quad (5)$$

여기서 T_{Q1} 은 조건1에서의 템퍼링 온도
 T_{Q2} 은 조건2에서의 템퍼링 온도
 T_{QX} 은 임의의 조건 X의 템퍼링 온도
 H_{B1} 은 조건1에서의 브리넬 경도
 H_{B2} 은 조건2에서의 브리넬 경도
 H_{BX} 은 임의의 조건 X의 브리넬 경도

를 의미한다.

SUS416의 경우 가공성의 위한 적정 경도와 파괴 인성의 약화 가공시 공구 마모 증대로 인한 부적절한 조건 H_{RC} 30이하와 H_{RC} 32이상을 탈피하고 금속의 미세조직의 조실화를 기하기 위해 Quenching 및 Tempering의 최적 곡선을 찾아내었다. 또한 경도를 H_{RC} 30~32를 유지하도록 한 실험 합금(SUS416)에 대한 화학 성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical component to experimental alloy (SUS416)

Type	Chemical Component						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SUS416	Max 0.15	Max 1.00	Max 1.25	Max 0.06	Max 0.15	12.5 %	Max 0.6

4. 마르텐사이트계 스테인레스강의 최적 열처리 절차 및 실험결과

위의 Fig. 3 및 Fig. 4의 표준 곡선에서 나타난 데이터를 이용하여 보간법(Interpolation)을 적용하면 다른 Quenching 온도에서의 적절한 Tempering 온도를 찾아낼 수가 있으며, 여기에 부가적으로 인성을 높이기 위한 다음의 기본적 열처리 원칙 2가지를 적용하여 중첩시키면 이 강의 최적 열처리 곡선을 구할 수 있다.

- (1) Quenching 온도가 높으면 입자의 지나친 성장을 초래하게 되어 입계가 커짐으로서 조직이 조대화되어 인성 및 연성이 떨어지게 되기 때문에 Quenching 온도는 가능한 한 낮추도록 한다.
- (2) 같은 경도에서도 Tempering 온도에 따라 기계적 성질이 바뀌며 Tempering 온도가 높을수록 성질이 기계적 안정화되고 인성 및 연성을 극대화시킬 수 있다. 특히

순간적으로 고온 고압의 상태로 되는 제품의 경우에는 가능한 Tempering 온도를 높여야 충격 및 내구성 면에서 안전하게 사용할 수 있다.

결과적으로 위의 2가지 원칙을 요약하면 다음의 식 (6)과 같은 공식을 유도할 수 있다. 그러므로 원하는 경도 조건을 만족시키며 동시에 다음 식의 ΔT 를 최소화하는 것이 최적 열처리 조건이 될 것이다.

$$\Delta T = T_Q - T_T \quad (\text{단, } T_T < T_{tr}) \quad (6)$$

여기서 T_T 는 Tempering 온도, T_Q 는 Quenching 온도, ΔT 는 Quenching 온도, T_{tr} 은 변태온도에서 Tempering

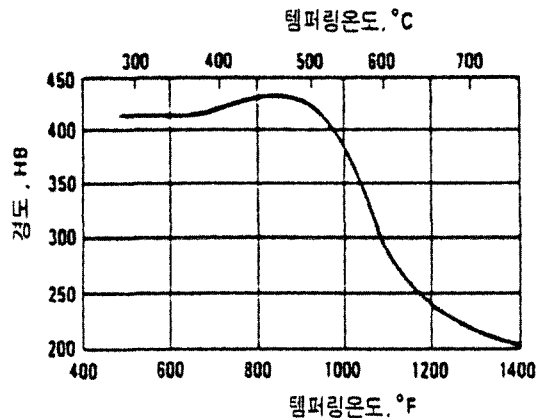


Fig. 3 Hardness according to tempering temperature (Austenite at 980°C)

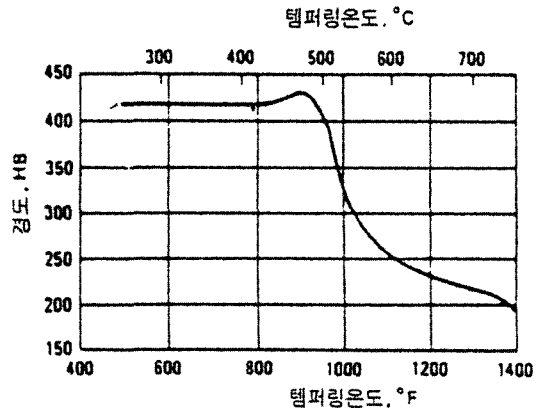


Fig. 4 Hardness according to tempering temperature (Austenite at 925°C)

온도를 감한 온도를 의미한다.

따라서 H_{RC} 30~32의 정도조건을 만족시키며 ΔT 를 최소화시킬 수 있는 Quenching 및 Tempering 온도를 최적 열처리 조건으로 볼 수 있을 것이다. 이와 관련된 금속조직의 미세구조는 기존의 방법보다 최적조건에 의한 결과가 훨씬 조밀화되어 있는 것을 알 수 있었으며 이에 따른 내충격성 및 내구성에 큰 기여가 있을 것이다.

Fig. 3 및 Fig. 4의 표준 곡선의 데이터를 이용하여 외삽법 및 내삽법을 적용하면 서로 다른 Quenching 온도에서 적절한 Tempering 온도를 찾아 낼 수 있으며, 이 온도에 따라서 불안정한 조직이 비교적 균일하게 안정된 조직으로 변하면서 동시에 인성을 증가시킬 수 있다. 특히 순간적으로 고온 고압의 상태로 되는 제품의 경우에는 더욱 가능한 한 Tempering 온도를 높여야 추후 충격 및 내구성면에서 안전하게 사용할 수 있음을 알 수 있다. 아래의 Fig. 5는 SUS416의 기존의 열처리 흐름을 나타낸 것이다. 이 때의 열처리 조건 Case 1, 2, 3는 각각 다음의 Fig. 6~8과 같다.

한편 Fig. 9 및 Fig. 10은 H_{RC} 30~32의 정도조건을 만

Forging	1150℃ ~ 1260℃
Annealing	항온풀림(Isothermal annealing) 830~885℃로 가열한 후 720℃로 서냉하여 2시간유지 경도는 HRC85 정도이다.
Preheating	760℃ ~ 790℃에서 모든 부위가 균질화 될 때까지 유지시켜 예열처리한다.
Austenitic Condition	925℃ ~ 1010℃에서 최대내식성과 강도를 얻기 위해 고온측을 사용
Quenching	CASE 1의 경우 1030℃ CASE 2의 경우 950℃ CASE 3의 경우 990℃
Tempering	CASE 1의 경우 580℃ CASE 2의 경우 520℃ CASE 3의 경우 550℃

Fig. 5 Flow chart of SUS416 heat treatment

족시키며 ΔT 를 최소화시킬 수 있는 Quenching 및 Tempering 온도를 최적 열처리 조건으로 나타낸 것이다. 이 두 온도의 차인 최적의 온도 ΔT 는 320℃와 345℃ 사이의 값으로 나타난다.

그리고 Fig. 11 및 Fig. 12는 기존 열처리 방식에 의한 전형적인 조직사진과 최적의 Quenching 조건과 Tempering 조건에 의해 개선된 조직도이다. 이 조직도에서 알 수 있는 바와 같이 최적조건에 조직은 기존의 열처리 조건에 의한 조직보다 훨씬 더 미세한 조직으로 조성됨을 보여주며, 이러한 조밀화 현상은 항복강도를 높임은 물론 더욱 향상된 파괴인성치를 제공할 것이다.

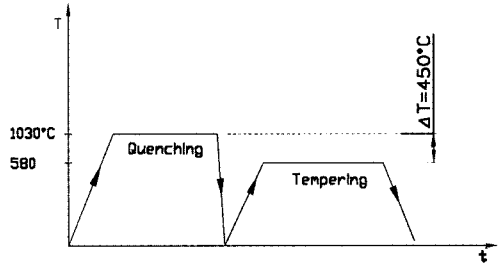


Fig. 6 Quenching & Tempering Cycle of CASE 1 ($\Delta T = 450^\circ\text{C}$)

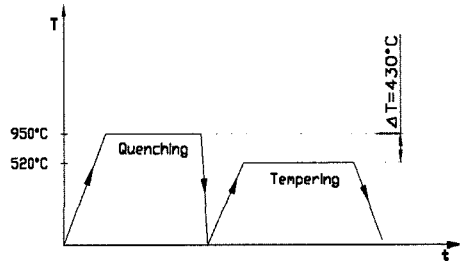


Fig. 7 Quenching & Tempering Cycle of CASE 2 ($\Delta T = 430^\circ\text{C}$)

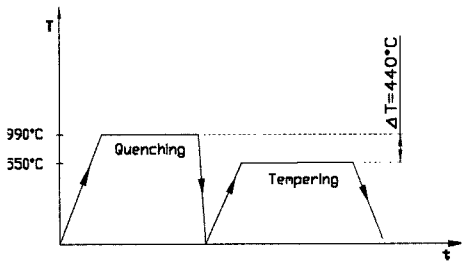


Fig. 8 Quenching & Tempering Cycle of CASE 3 ($\Delta T = 440^\circ\text{C}$)

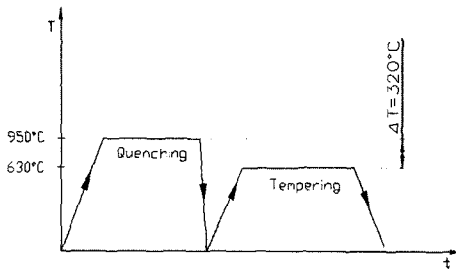


Fig. 9 Optimal Quenching & Tempering condition at $\Delta T = 320\text{ }^{\circ}\text{C}$

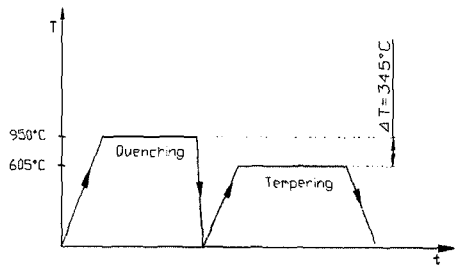


Fig. 10 Optimal Quenching & Tempering condition at $\Delta T = 345\text{ }^{\circ}\text{C}$

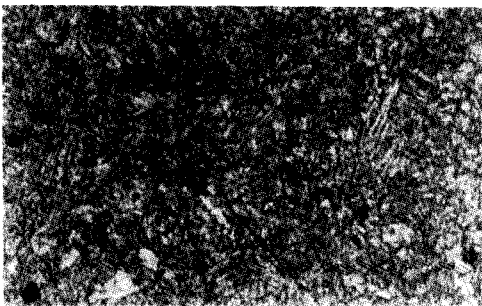


Fig. 11 Microstructure of conventional heat treatment condition (X 800)

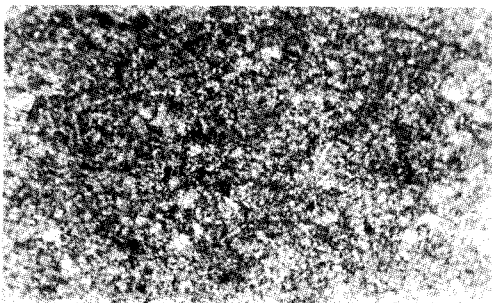


Fig. 12 Microstructure of optimal heat treatment condition (X 800)

5. 결론

마르텐사이트 스테인레스강(SUS416)의 순간 온도, 고압의 제품 사용시 최적 열처리 온도를 구하기 위한 결론은 다음과 같다.

- (1) Quenching 온도가 높으면 입자의 지나친 성장을 초래하게 되어 입계가 커짐으로 조직이 조대화 되어 인성 및 연성이 떨어지게 된다. 따라서 SUS416강의 경도를 $H_{RC} 30 \sim 32$ 로 맞출 수 있는 Quenching 및 Tempering의 최적 곡선을 도출방법을 제시하였다.
- (2) 표준곡선을 이용한 내삽법 및 외삽법을 통하여 도출된 최적의 Quenching & Tempering 조건 $\Delta T = 320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 경우와 $\Delta T = 345\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 경우로 나타났다.
- (3) 이러한 최적곡선을 이용하여 SUS416강을 열처리한 결과, 금속 미세구조조직은 충분히 조밀화 되었고, 향상된 파괴인성치를 기대할 수 있게 되었다.

참고 문헌

- (1) Low, J. R., 1954, "Relation of Properties to Microstructure," *ASM, Metals Park*, pp. 163~168.
- (2) Kim, H. K., Hong, Y. W., Park, S. J. and Noh, J. M., 1993, "Heat Treatment Guide," Wonchang Publisher, pp. 52~156.
- (3) Kim, H. G., 1997, "An Experimental and Numerical Study on the Thermally Induced Residual Stress Effect in Metal Matrix Composites," *KSMTE*, Vol. 6, No. 4, pp. 108~117.
- (4) Kang, S. C., Kang, S. S. and Kim, B. K., 1997, "Mechanical Materials," Chungmun Publisher, pp. 56~78.
- (5) Marc, A. M., 1984, "Mechanical Metallurgy," Prentice Hall, pp. 356~378.
- (6) Honeycombe, R. W. K., 1984, "The Plastic Deformation of Metal," Edward Arnold, pp. 178~192.
- (7) Hertzberg, R. W., 1992, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., pp. 152~173.