

## SUS416강의 열처리제어를 통한 미세구조특성에 관한 연구

### A Study on Microstructural Characteristics of SUS416 Steel by Controlling Heat Treatment Process

김홍건\*, 최창용, 김진수 (전주대학교 공학부 기계공학과)

Hong Gun Kim\*, Chang Yong Choi, Jin Su Kim

(Dept. of Mechanical Engineering, School of Engineering, Jeonju University)

#### Abstract

Theoretical efforts were taken to investigate an optimum heat treatment process in martensitic stainlesssteel. 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 macroscopic structure and fracture toughness and ductility as well as the hardness and strength has been focused to induce a simple rule to apply with feasibility. As a result, it was found that the grain size influences to the fracture toughness and ductility significantly.

#### I. 서 론

일반적으로 스테인레스강은 여러 환경에서 부식에 대한 저항성을 갖도록 만든 철과 크롬 그리고 다른 원소들의 합금으로서 강철이 최소 10.5% 이상의 크롬을 함유해야 Stainless Steel이라 할 수 있다. 이러한 Stainless Steel은 Ferrite계 Martensite계, Austenite계, PH합금 등으로 분류할 수 있다 [1]. 이 합금강의 내식의 원리는 다음과 같다. 철 속에 Cr을 약 12%이상 합금하면 철의 내식성은 현저하게 증가하며 특히 공기 중에서 녹슬지 않게 된다. 이것은 철-크롬 합금의 표면에 부동태 피막이라 부르는 수십 Order의 얇고 치밀한 산화피막이 형성되므로 이 12% Cr 이상의

철크롬 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 공기 중에서는 녹이 생성되기 쉽으나 다른 물질과 접촉했을 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 쉽다. 그리고 공구용으로 많이 쓰이기 때문에 경도가 좋다. 그러나 가공을 좋게 하기 위해서 경도를 떨어뜨려 용도에 맞게 열처리 Cycle을 조절해야 한다 [2].

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)에서의 최적 열처리 조건을 이론적으로 제시하였다.

#### II. 전위론에 의한 파괴용력계산

일반적으로 금속조직의 미세화는 재료의 강도와 인성을 모두 증가시키는 기회를 부여한다

[2]. ASAE에서 조사된 결정립의 크기와 합금 강도 및 파괴인성과의 관계는 결정립의 크기가 작아지면 강도 및 파괴 인성  $K_{IC}$ 의 크기가 향상된다는 것을 알 수 있다. 이에 관한 메카니즘적 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[2]. 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  $\gamma_s$ 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. 이 것은 일반적으로 관찰되는 강도와 인성 사이의 반비례관계에 비추어 특별히 관심을 끄는 강도증가 기구를 의미한다고 볼 수 있다. Cottrell과 Petch의 전위론을 이용한 해석에 의하면 파괴응력이 다음의 식(3)에 의하여 주어진다 하는 것을 알 수 있다.

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

여기서  $\gamma_m$ 은 소성일(Plastic Work)을 의미하고  $k_y$ 는 Hall-Petch 관계에서의 전위고착항(Dislocation Locking Term)이며  $d$ 는 결정립의 크기를 의미한다. 따라서 결정립의 크기가 감소함에 따라  $\sigma_f$ 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  $\sigma_{ys}$ 는 항복강도이고  $\sigma_i$ 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 SUS 416강에 있어서의 열처리 절차에 관해 검토한 후 조직상의 변화를 고찰해 보고자 한다.

### III. 마르텐사이트계 스테인레스강에서 금속조직과 기계적 성질과의 관계

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.

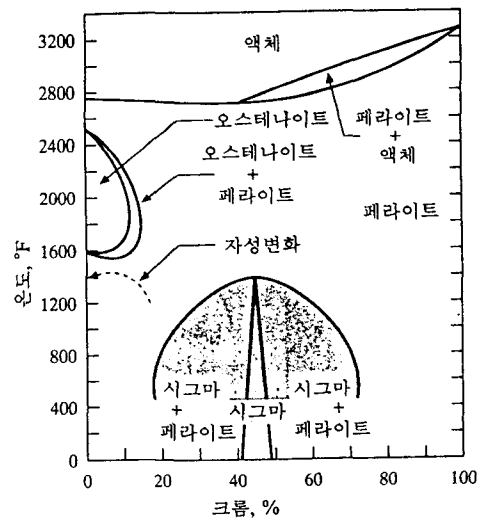


Fig. 1 Stainless Steel의 철-크롬선도

그리고 금속조직의 미세화는 재료의 강도와 인성을 모두 증가시키는 기회를 부여한다. ASAE에서 조사된 결정립의 크기와 합금 강도 및 파괴인성과의 관계를 Fig 2에서 보여주고 있으며 이는 결정립의 크기가 작아지면 강도 및 파괴인성치  $K_{IC}$ 가 크게 향상된다는 것을 알 수 있다.

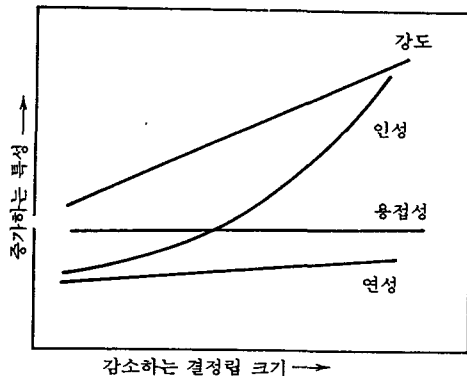


Fig. 2 결정립의 크기와 합금 강도, 인성, 용접성, 연성과의 관계

#### IV. 마르텐사이트계 스테인레스강의 표준 열처리선도

마르텐사이트계 스테인레스강은 크롬을 12-18% 범위로 함유하고 탄소농도는 1.2% 정도로 비교적 높은 편이다. 이 재질에 관한 항온 변태 곡선을 조사해 보면 SUS 416의 경우 Fig. 3과 같고 표준 열처리 곡선을 살펴보면 경화와 풀림 처리를 하고, 안정화 및 질화 처리는 선택적으로 하며 Normalizing 처리는 보통 하지 않는다[2].

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°C에서 모든 부위가 균일한 온도로 될 때까지 유지시켜 예열처리 한다.

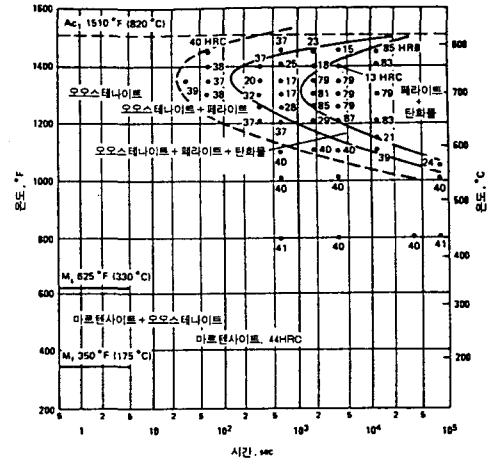


Fig. 3 마르텐사이트계 스테인레스강의 항온 변태 곡선

오스테나이트화는 925-1010°C에서 하며 큰 제품이거나 최대 내식성과 강도를 원할 때는 고온측을 택한다. 유지시간은 1/2"까지는 30-60분이 적당하고 1" 두께증가에 따라 30분씩 더 유지시킨다. 565°C 이상에서 Tempering할 때에는 위의 온도 범위중 저온측을 택하여 연성과 인성을 향상시킨다. 완전 풀림이나 항온 풀림한 제품에서는 유지시간을 두 배로 하며 675°C 이상에서 장시간 중간풀림하였을 경우에는 유지시간을 50% 더 길게 한다. 냉각시에는 유냉과 공냉이 가능하나 유냉하면 최대내식성과 연성이 얻어지므로 더 유리하다. Quenching 경도는 HB 375 - 415 정도이다. Tempering의 온도에 따른 경도 변화는 Fig. 4 및 5와 같으며 이 Tempering 온도의 조절로 경도 변화 및 파괴인성을 조절하고자 하였다.

한편 경도값의 Brinell, Vickers, Rockwell Number의 상관관계는 기존자료[4]로부터 쉽게 구할 수 있으며 예로서  $H_{RC} 30-32$ 는  $H_B 285-302$ 의 범주에 속한다. 여기서 그림 4와 5의 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.

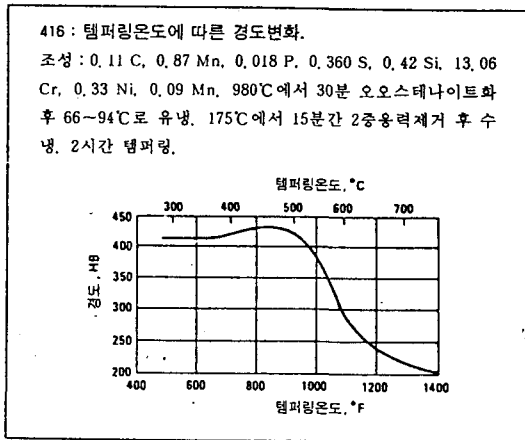


Fig. 4 Tempering 온도에 따른 경도 변화 (980°C에서 Austenite화)

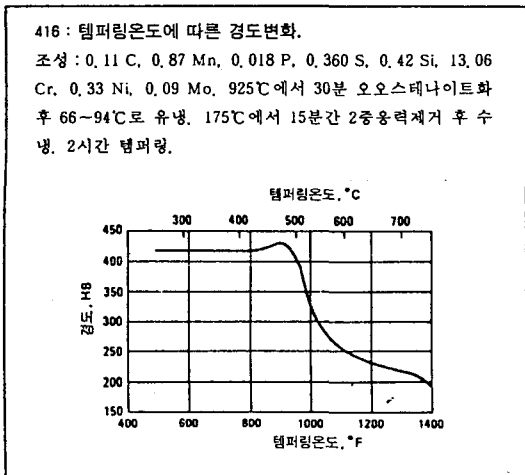


Fig. 5 Tempering 온도에 따른 경도 변화 (925°C에서 Austenite화)

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

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 브린넬 경도

$H_{B2}$  은 조건2에서의 브린넬 경도

$H_{BX}$  은 임의의 조건 X의 브린넬 경도를 의미한다.

### V. 마르텐사이트계 스테인레스강의 최적 열처리 조건

위의 Fig. 4 및 5의 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 강 of 최적 열처리 곡선을 구할 수 있다.

(1) Quenching 온도는 가능한 한 낮추도록 한다. 그 이유는 Quenching 온도가 높으면 입자의 지나친 성장을 초래하게 되어 입계가 커짐으로서 조직이 조대화되어 인성 및 연성이 떨어지게 되기 때문이다.

(2) Tempering 온도는 가능한 한 높여도록 한다. 왜냐하면 같은 경도를 맞추더라도 Tempering 온도에 따라 기계적 성질이 바뀌며 Tempering 온도가 높을수록 성질이 기계적 안정화되고 인성 및 연성을 극대화시킬 수 있기 때문이다. 특히 순간적으로 고온 고압의 상태로 되는 제품의 경우에는 더욱이 가능한 한 Tempering 온도를 높여야 추후 충격 및 내구성 면에서 안전하게 사용할 수 있게 될 것이다.

결과적으로 위의 2가지 원칙을 요약하면 다음의 식 (5)과 같은 공식을 유도할 수 있다. 그러므로 원하는 경도 조건을 만족시키며 동시에 다음 식의  $\Delta T$ 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,  $\Delta T$ 는 Quenching 온도,  $T_{tr}$ 은 변태온도에서

Tempering 온도를 감한 온도를 의미한다.

따라서  $H_{RC}$  30-32의 경도조건을 만족시키며  $\Delta T$ 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.

## VI. 결 론

본 논문에서는 마르텐사이트계 스테인레스강에서의 기본적인 열처리 원칙을 제시한 후, 이 표준 데이터로부터 보간법(Interpolation) 및 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 임의의 경우의 열처리에 적용할 수 있도록 체계화하였다. 그 결과 마르텐사이트계 스테인레스강 (SUS 416 기준)에서 원하는 경도를 도출하였고 이와 같은 표준 열처리 절차를 인성을 높이기 위한 금속 조직상의 제원칙과 합성하여 이 내용들을 중첩시킨 최적의 열처리 조건을 만족시키며 파괴인성을 극대화시킬 수 있는 최적 열처리 조건을 제시하였다.

## 참고 문헌

- [1] J. R. Low, Jr., "Relation of Properties to Microstructure", ASM, Metals Park, OH, 1954, pp. 163-168
- [2] 김한국, 홍영환, 박상준, 노정만, "열처리 가이드", 원창출판사, 1993.
- [3] R. W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [4] 강석춘, 강성수, 김복기, "기계재료", 청문각, 1997.