

STS 420 스테인레스 강의 기계적 성질 및 피로균열전파에 미치는 템퍼링 온도의 영향

The Effect of Tempering Temperature on the Mechanical Properties and Fatigue Crack Propagation in STS420 Stainless Steel

박 용 식*, 임 병 수**
Y. S. Park, B. S. Lim

ABSTRACT

An experimental investigation has been carried out to determine the effect of tempering temperature on the fatigue crack propagation behavior and mechanical properties using the quenched and tempered STS420 martensitic stainless steel.

Heat treatments of tempering for two hours at the five different temperatures of 150°C, 300°C, 450°C, 600°C and 700°C have been performed on the martensite obtained by air cooling the specimens austenitized for one hour at 1010°C. Tensile strength, yield strength, hardness, ΔK_{th} , C and m values of differently tempered specimens have been investigated by tensile, hardness and fatigue tests.

1. 서 론

마르텐사이트계 스테인레스 강은 부식에 대한 우수한 저항성과 높은 강도와 경도 등 좋은 기계적 성질을 가지고 있기 때문에 가혹한 환경하에서의 각종 기계부품 재료로 많이 사용되고 있다. 특히 이 재료는 열처리에 의하여 기계적 성질이 많이 변하므로 용도에 맞는 적절한 열처리의 선택이 필요하며, 이를 위해서는 열처리 후 재료의 인장, 경도, 피로성질 등 기계적 성질의 변화를 조사하는 것이 요구된다.

자동차의 엔진 및 각종 축 등은 반복되는 피로하중을 받기 때문에 이로 인한 손상이 발생하기 쉬우므로 고려해야 할 여러가지 기계적 성질 중 피로성질은 특히 중요하다. 피로

성질은 열처리 후의 미세조직의 변화에 의하여 많은 영향을 받는데, 낮은 ΔK 영역에서는 특히 민감하게 영향을 받는 것으로 보고 되어 있다. 재료의 열처리에 따른 피로성질의 변화는 탄소강, Ti 합금 등에서는 결정립 크기^{2,3)}, 복합조직강에서는 제 2 상의 체적비율⁴⁾, 퀴칭 후 템퍼링한 강에서는 오스테나이트 온도⁵⁻¹⁰⁾와 템퍼링 온도, 시간⁵⁻¹⁰⁾, 공석강에서 퍼일라이트 조직의 층간 간격¹¹⁾ 등을 변수로 하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 이들 연구 중 템퍼링 온도가 미치는 피로균열전파(Fatigue Crack Propagation: FCP) 특성에 관한 연구는, 일반적으로 템퍼링 온도가 높아질수록 항복강도는 감소하는 반면, 용력확대계수 범위의 하한계치, ΔK_{th} 값은 증가하며, 안정균열성장단계인 제 2 영역에서의 균열성장속도는

*성균관대 대학원

**정희원, 성균관대 기계설계학과

템퍼링 온도의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보고되어 있다. 그러나, 300~350 °C 부근의 템퍼링 온도에서 흔히 발생하는 TME (Tempered Martensite Embrittlement) 현상¹²⁾이 FCP에 미치는 영향에 관해서는 그 중요성에도 불구하고 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 또한, 템퍼링 온도의 변화가 FCP에 미치는 영향에 관하여 발표된 내용은 주로 탄소강, 고강도강을 사용하여 조사되었으나, 마르텐사이트계 스테인레스 강을 사용하는 경우는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 마르텐사이트계인 420 스테인레스강을 사용하여 템퍼링 온도변화가 인장강도, 항복강도, 경도 등 기계적 성질과 재료의 FCP 특성인 ΔK_{th} 값과 $da/dN - \Delta K$ 선도 제 2 영역에서의 재료상수인 C, m 값에 미치는 영향을 TME 현상과 관련하여 조사하였으며, 항복강도와 ΔK_{th} 값과의 관계를 검토하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 삼미특수강에서 열간 압연에 의하여 생산된 STS 420 스테인레스강이며, 화학성분은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical Composition, wt %

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
STS 420	0.26	1.0	0.50	0.04	0.03	12.5	0.03

실험에 사용된 모든 시험편의 하중축방향은 압연 방향과 일치시켰으며, 피로시험편의 경우에는 균열성장방향이 압연 방향과 수직하도록 채취하여서 사용하였다.

인장시험용 시험편은 KS B0801에 준하여 6 호시험편으로, 피로시험용 시험편은 ASTM E 647-88에 준하여 CT 시험편으로 제작하였으며, 그 형상을 Fig.1에 나타내었다. 각 시험편은 열처리 후 시험 내부와 외부의 조직을 균일하게 하기 위해 두께를 5mm로 정하였다.

인장시험은 Instron Dynamic Testing

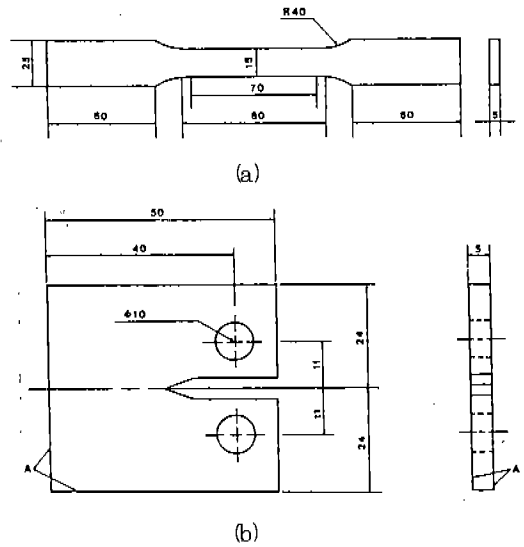


Fig.1 Configuration of test specimens for Tensile (a) and Fatigue Test (b)

System Model 1332를 사용하였고, 경도시험은 두께 5mm, 사방 10mm 형태로 시험편을 제작하여 열처리 한 후, Model SDRH-15 Digital System Rockwell Hardness Tester 를 사용하였다.

피로시험은 일본 Saginomiya사의 ±10ton 용량의 Dynamic servo fatigue testing machine 을 사용하였으며, cycle 진행에 따른 균열의 성장을 관찰하고 균열길이를 측정 하는데는 50배 배율, 1/100mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경을 사용하였다.

피로시험조건은 하중비 R=0.1, 하중반복속도 20Hz 인 sine 파형을 사용하였으며, 하중 제어방식으로는 먼저 ΔK 감소방식¹³⁾으로 ΔK_{th} 를 찾은 후, ΔK 증가방식으로 수행하였다. 응력확대계수 범위, ΔK 의 계산과 피로 균열 진전속도, $da/dN - \Delta K$ 의 관계식은 최소자승법으로 구하였다.

열처리는 LINDBERG사 제품의 3 zone tube type의 전기로를 사용하여, 99.9% 순도의 질소 gas를 분당 1.5 liter의 유동상태로 유지하면서 실시하였고, 가공된 인장시험편, CT 시험편과 경도측정 및 조직검사용 시험편은 노가 열평형을 이룬 후에, 원하는 온도

와 시간동안 동시에 열처리를 하였으며, 노내 온도는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 정확성을 유지하였다.

마르텐사이트 조직을 얻기 위하여 시편을 1010°C 에서 1시간 가열한 후 공냉하였으며, 이후 템퍼링은 150°C , 300°C , 450°C , 600°C , 700°C 의 5가지 온도에서 각각 2시간씩 실시하였다. 또한 같은 템퍼링 온도에서 경도에 미치는 템퍼링 시간의 영향을 알기 위하여 2시간 이외에 30분간 템퍼링 열처리 시킨 경도시편도 준비하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열처리 결과

템퍼링 온도를 변화시킨 경우에 있어서 열처리 조건과 이에 따른 기계적 성질의 변화를 Table 2에 나타내었으며, 열처리 후 얻어진 조직을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2 (a)는 공냉되어 얻어진 조직으로 전형적인 마르텐사이트계 스테인레스강의 조직으로 침상의 마르텐사이트 조직특성을 나타내고 있으며, Fig. 2 (b)~(d)는 150 , 450 , 700°C 에서 각각 2시간씩 템퍼링한 조직으로, 사진에서 보듯 템퍼링 처리에 따라 마르텐사이트 조직의 전형적인 침상조직이 사라지고 있으며, 700°C 의 고온으로 템퍼링한 경우에는 탄화물이 구형으로 석출된 spheroidite 조직이 형성되어 있다.

3.2 경도시험 결과

상이한 템퍼링 온도에서 30분과 2시간씩 각각 다르게 템퍼링 처리한 420 스테인레스강의 경도값을 템퍼링 온도의 영향과 함께 같은 온도에서의 템퍼링 시간의 영향을 비교할 수 있도록, Fig. 3의 한 그래프 안에 나타내었다.

이들 템퍼링 곡선들은 대략 다음과 같은 특성을 갖는 것으로 나타났다.

1) 경도의 변화는 3영역을 나타낸다. 경도는 템퍼링 온도가 증가함에 따라 감소하며, 450°C 부근에서는 $(\text{Fe, Cr})_{23}\text{C}_6$ 상이 생기기 시작하는 초기 단계에 의한 것이라 생각되는 약간의 2차 경화가 일어난다. 2차 경화 온도를 넘어선 온도에서는 경도가 급속히 감소한다.

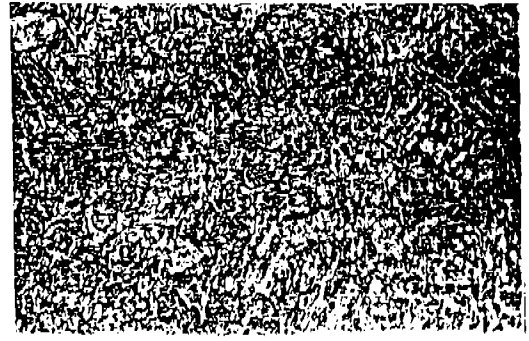
2) 템퍼링 시간이 0.5시간에서 2시간으로 증가할 때, 같은 온도에서 경도는 약간 떨어지지만 템퍼링 곡선의 경향은 거의 변화가 없다. 따라서 본 실험온도 구간에서는 0.5시간 템퍼링시켜도 2시간 템퍼링시킨 시편과 거의 같은 경도 변화가 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 경향도 온도가 500°C 이상 되면 얼마간의 경도차이를 나타내고 있으나, 경도곡선 경향 자체는 별 변화가 없었다.

Table 2 Heat treatment conditions and mechanical properties

Heat Treatment					Mechanical Property			
Austenitizing Temp.	Holding Time		Tempering Temp.	Holding Time	Hardness (HRC)	σ_{ys} (MPa)	U. T. S. (MPa)	Elongation (%)
1010 $^\circ\text{C}$	1hr	Air Cooling	As-Air Cooled	2hrs	50.1	1470	1754	9.3
			150 $^\circ\text{C}$		48.6	1303	1735	11.9
			300 $^\circ\text{C}$		41.8	1225	1519	12.2
			450 $^\circ\text{C}$		42.5	1264	1568	13.5
			600 $^\circ\text{C}$		25.7	774	951	15.5
			700 $^\circ\text{C}$		20.8	676	823	16.8



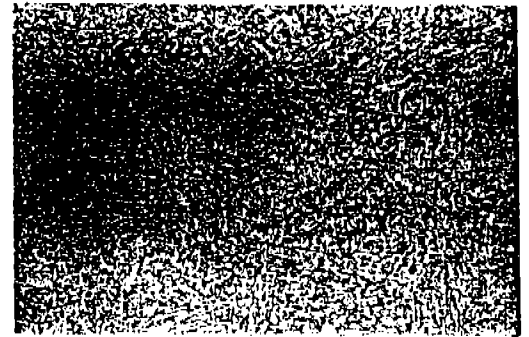
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) As-quenched specimen ($\times 800$)
 (c) 450°C - 2hrs tempered specimen ($\times 800$)

(b) 150°C - 2hrs tempered specimen ($\times 800$)
 (d) 700°C - 2hrs tempered specimen ($\times 800$)

Fig.2 Microstructure of each specimen after tempering temperature control

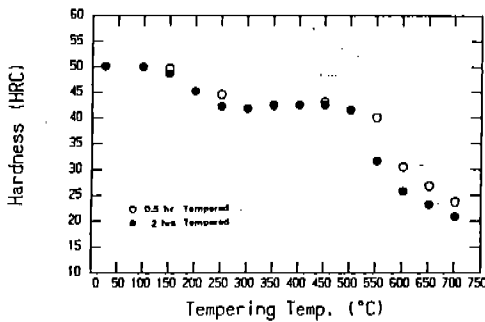


Fig.3 Effect of tempering temperature on the hardness of 420 stainless steel

3.3 인장시험 결과

인장시험을 통하여 템퍼링 온도를 다르게 한 420 스테인레스강의 항복강도, 인장강도를 Fig.4, 연신율을 Fig.5에 각각 나타내었다. 인장강도와 항복강도는 경도시험에서와 비슷

한 곡선 경향을 보이나 연신율의 경우는 이와 관계없이 템퍼링 온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

3.4 피로시험 결과

템퍼링 온도를 달리한 시편들의 ΔK 감소 실험의 $a-N$ 관계를 Fig.6에 나타내었으며, $da/dN-\Delta K$ 관계를 Fig.7에 나타내었다. 여기에서 볼 수 있는 바와 같이 일반적으로 템퍼링 온도가 높아질수록 ΔK_{th} 값은 증가하나, 300°C에서 템퍼링한 시편의 경우에는 ΔK_{th} 값이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 이 온도 구간에서 Tempered Martensite Embrittlement, 즉, TME가 발생하여 재료의 입계취화가 일어나 피로에 대한 저항이 떨어졌기 때문이라고 생각된다. 또한, da/dN

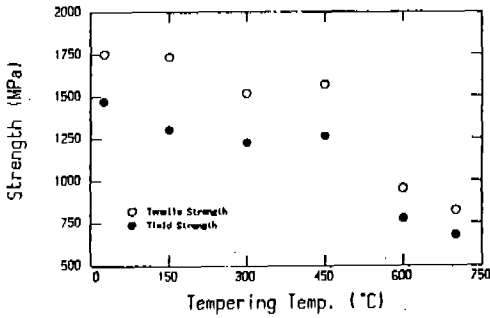


Fig. 4 Effect of tempering temperature on the yield strength and tensile strength of 420 stainless steel (tempering time: 2hrs)

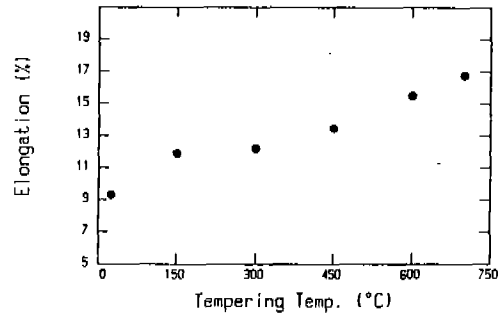


Fig. 5 Effect of tempering temperature on the % elongation of 420 stainless steel (tempering time: 2hrs)

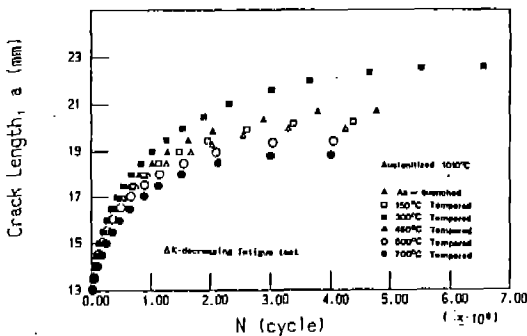


Fig. 6 Crack length, a vs. cycle number, N for different tempering temperature specimens (tempering time: 2hrs)

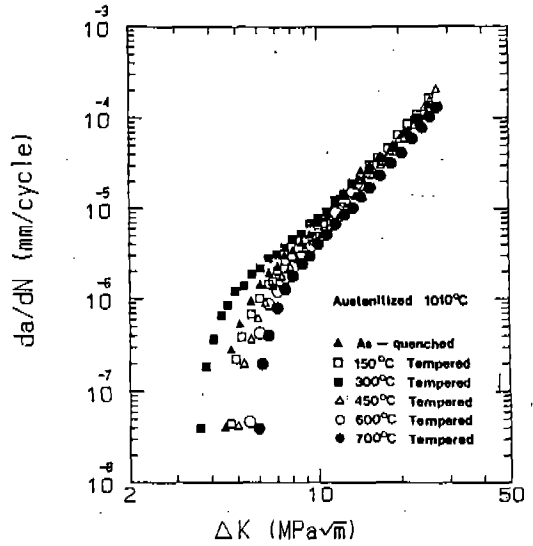


Fig. 7 da/dN vs. ΔK for different tempering temperature specimens (tempering time: 2hrs)

$-\Delta K$ 선도의 제 2 영역에서 성립하는 Power law, $da/dN = C (\Delta K)^m$ 의 재료상수 C , m 값은 10^{-6} mm/cycle 이상의 da/dN 영역에서 최소자승법을 사용하여 구하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. m 값은 3.2~3.6으로 거의 큰 차이를 보이지 않았으나, 300°C에서 템퍼링한 시편은 2.7로 타시편에 비해 m 값이 적게 나타났다.

Table 3 C , m and ΔK_{th} values of each specimen

Tempering Temp. °C	C	m	ΔK_{th} MPa√m
Room Temp.	4.57×10^{-9}	3.18	4.49
150	2.34×10^{-9}	3.43	4.70
300	1.48×10^{-9}	2.74	3.64
450	1.29×10^{-9}	3.57	5.00
600	1.17×10^{-9}	3.60	5.52
700	1.26×10^{-9}	3.48	5.98

3. 5 항복강도와 ΔK_{th} 와의 관계

Fig. 8은 템퍼링 온도별로 조사한 시편의 ΔK_{th} 값과 항복강도간의 관계를 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 항복강도가 증

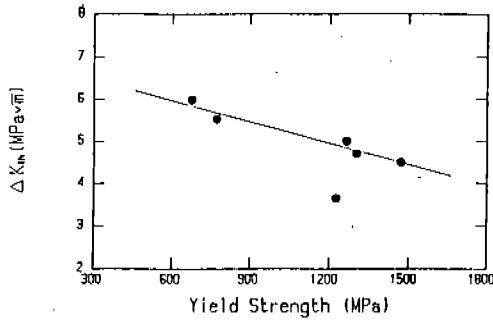


Fig.8 Relation between σ_{ys} and ΔK_{th}

가함에 따라 ΔK_{th} 값은 반대로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 예외적으로 300°C에서 템퍼링한 시편의 경우는 항복강도 값에 비해 ΔK_{th} 값이 현저히 떨어져 나타났는데, 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 TME 현상에 의한 것이라고 생각된다. TME 현상이 나타난 경우를 뺀 나머지 5개 시편들에서 σ_{ys} 와 ΔK_{th} 와의 관계를 최소자승법으로 구해 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta K_{th} = -0.0017\sigma_{ys} + 7$$

여기에서, ΔK_{th} 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고, σ_{ys} 의 단위는 MPa이다.

4. 결 론

이상의 실험고찰을 통하여 STS 420 스테인레스강을 템퍼링 열처리 할 때, 템퍼링 온도의 변화가 피로균열성장특성과 기계적 성질 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) ΔK_{th} 값은 템퍼링 온도가 높아짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 300°C에서 템퍼링한 시편의 경우에는 ΔK_{th} 값이 아주 작게 나타났는데, 이는 TME 현상 때문이라 생각된다.

2) $da/dN-\Delta K$ 선도의 2영역에서 C, m 값은 템퍼링에 의한 영향을 크게 받지 않으나, 300°C에서 템퍼링한 시편의 경우에는 TME 현상에 의해 m 값이 작아지는 것으로 나타

났다.

3) 항복강도와 ΔK_{th} 값은 TME 현상이 나타나지 않는 경우에는 서로 역비례한다.

4) 템퍼링 온도가 높아짐에 따라 경도는 감소하나, 450°C 근처에서 다시 경도가 높아지는 2차 경화가 나타난다.

5) 템퍼링 온도가 높아짐에 따라 인장강도, 항복강도는 완만한 감소 추세를 보이다가 450°C 이상의 온도에서는 급속한 감소 추세를 보인다.

참 고 문 헌

1. H. A. Liu and Dai Liu, "A quantitative analysis of structure sensitive fatigue crack growth in steels", Scripta Met., vol.18, pp.7-12, 1984.
2. G. R. Yoder, L. A. Cooley and T. W. Crooker, "Quantitative analysis of microstructural effects on fatigue crack growth in Widmanstätten Ti-6Al-4V and Ti-8Al-1Mo-1V", Eng. Fract. Mech, Vol.11, pp.805-816, 1979.
3. S. Taira, K. Tanaka and M. Hoshina, "Grain size effect on crack nucleation and growth in long-life fatigue of low-carbon steel", ASME STP 675, pp.135-173, 1979.
4. K. Minakawa, Y. Matsuo and A. J. McEvily, "The influence of a duplex microstructure in steels on fatigue crack growth in the near-threshold region", Metall. Trans. A, vol.13A, pp. 439-445, 1982.
5. B. London, D. V. Nelson and J. C. Shyne, "The effect of tempering temperature on near-threshold fatigue crack behavior in quenched and tempered 4140 steel", Metall. Trans. A, vol.19 A, pp.2497-2502, 1988.
6. B. Lou and B. L. Averbach, "The effect of heat treatment on fracture toughness and fatigue crack growth rates in 440C and BG42 steels", Metall. Trans. A, vol.14A, pp.1899-1906, 1983.
7. Robert O. Ritchie, "Influence of impurity segregation on temper embrittlement and threshold behavior in 300-M high strength steel",

- Metall. Trans. A, vol.8A, pp.1131-1140, 1977.
8. Robert O. Ritchie, "Near-threshold fatigue crack propagation in ultra-high strength steel : influence of load ratio and cyclic strength", Trans. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, July, pp.195-204, 1977.
 9. K. S. Ravichandran, E. S. Dwarakadasa, "Effect of tempered structure on the near threshold fatigue crack growth behavior of a coarse grained high strength steel", Engg. Fracture Mech., vol.28, pp.435-444, 1987.
 10. 김현철, 임병수, "SM 45C 강의 피로균열 성장에 미치는 미세조직의 영향", 자동차 공학회지, Vol. 13, No. 2, pp. 103-111(1991).
 11. 강계명, 송진태, "TMT 가 국산 레일강의 피로특성에 미치는 효과", 대한금속학회지, Vol. 27, No. 8, pp. 730-738 (1989).
 12. R. W. Hertzberg, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", 3rd ed., pp.400-406, 1989.
 13. R. J. Bucci, "Development of a Proposed ASTM Standard Test Method for Near-Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP 738, pp.22-44, 1981.
 14. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM Standard E647-88, pp.636-654, 1988.