

## 마르텐사이트계 스테인리스강(12%Cr)의 피로균열 진전거동 및 파괴인성연구

윤병주\*, 최재하\*\*

### A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of Martensitic Stainless Steel(12%Cr)

Byoung Joo Yoon\*, Jae Ha Choi\*\*

#### Abstract

Martensitic stainless steels containing 12%Cr are commonly used in quenched and tempered conditions. The quenching heat treatment involves annealing to obtain austenite and to dissolve the carbides, followed by cooling to transform the austenite into martensite and often to cause carbide precipitation. In this study, we used three different tempered specimens which were tempered at 600°C, 670°C and 750°C. The crack propagation and fracture toughness tests were performed on this three different specimens. The experimental results showed that the highest value of crack growth rate and the lowest value of fracture toughness were observed in the specimen which were tempered at 600°C. However, when the specimen were tempered at 750°C, the value of crack growth rate was significantly decreased and the value of fracture toughness was significantly increased as compared to which were tempered at 600°C.

**Key Words :** Martensitic stainless steel (마르텐사이트계 스테인리스강), Heat treatment(열처리), Quenching(담금), Tempering(뜨임), Precipitation(석출), Fatigue crack growth rate(피로균열진전율), Fracture toughness(파괴인성)

### 1. 서론

마르텐사이트계 스테인리스강은 Cr을 12~17% 함유함과 동시에 C를 함유하는 Fe-Cr-C의 3원계 합금으로 내식성과 내마모성이 우수하며, 고온의 오스테나이트 상태에서 퀴칭(quenching)하면 마르텐사이트 조직으로 변태하여 현저하게 경화하는 특징을 나타낸다.<sup>1)</sup> 그러나 퀴칭 상

태에서는 잔류 왜곡이 크고 또한 조직이 불안정하기 때문에 그대로 사용할 수는 없고, 반드시 템퍼링(tempering)을 해야 하는데, 그 조건에 따라 재료의 기계적 특성이 크게 변화한다. 일반적으로 마르텐사이트계 스테인리스강은 기계 구조용 재료, 증기터빈날개, 가스터빈 및 제트 엔진부품, 항공기부품 또는 석유화학 플랜트, 기어, 밸브, 축류, 베어링, 금형 등 다양한 용도에 사용되어지며,<sup>2)</sup> 특히 항

\* 주성대학 공학 1학부 기계계열  
\*\* 충북대학교 재료공학과

공기 부품으로 사용되는 장착 장치(landing gear), 휘팅 류(fittings), 크랭크축, 강력 톱니바퀴, 터빈 샤프트(turbin shaft), 등은 내식성과 내마모성이 우수하고, 고강도(high strength)와 고 인성(high toughness) 및 피로강도(fatigue strength)가 절실히 요구되어진다.<sup>(4)</sup> 그러나 현재까지 마르텐사이트계 스테인리스강을 대상으로 한 고온 피로 특성<sup>(5)</sup> 및 파괴인성 연구<sup>(6)</sup>는 찾아 볼 수 있으나, 상온에서의 피로균열진전특성 및 파괴인성연구는 그리 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 12% Cr의 마르텐사이트계 스테인리스강을 소재로 하여 강인성을 부여할 목적으로 템피링 온도를 3가지 조건으로 정하였으며, 각각의 템피링 조건에 따른 인장시험, 경도측정, 피로균열진전거동 및 파괴 인성치 변화를 조사하여, 이 결과들로부터 각 특성과의 상관 관계를 고찰하였다. 또한 파단면을 관찰하여 템피링 온도에 따른 파괴형태도 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 미국 K사제품으로 12% Cr의 마르텐사이트계 스테인리스 원형봉 강이며, 이를 rolling 방향으로 채취하여 Fig. 1과 같이 a)의 피로균열진전 시험편은 ASTM E647-95a<sup>(7)</sup>에 의해, b)의 파괴인성 시험편은 ASTM E399-908)에 의해, 표준 CT(Compact Tension) 시험편으로 제작하였다.

시험편의 화학성분은 전자 탐침미세분석기(EPMA ; Electron Probe Micro Analyser)로 분석하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 시험편 제작 후 잔류 응력 제거 및 내부조직의 균질화를 목적으로 완전풀림(표준온도범위; 800℃~900℃)열처리를 관상열처리로(cabolute furnaces LTF 15/74)를 사용하여 870℃에서 60분 동안 항온 유지 후 서냉 하였다.

재료를 강화할 목적으로 수행되는 켄칭(표준온도범위, 900℃~980℃)은 950℃에서 60분간 항온 유지 후 유냉 하였다. 이때 미소균열(micro crack)을 방지하기 위하여 켄칭유(quenching oil)의 온도를 약 80℃로 유지하였다. 그리고 각각의 시험편을 구조용 강으로서 꼭 필요한 성질인 강인성을 부여할 목적으로 고온 템피링(표준온도범위; 600℃~750℃)을 600℃, 670℃ 그리고 750℃에서 60분 동안 항온 유지한 후 급냉 하는 방법으로 마무리하였다.(JIS G 4303) 아울러 각각의 템피링(tempering) 조건에 따른 재료의 기계적 성질을 조사하기 위하여 KS 규격

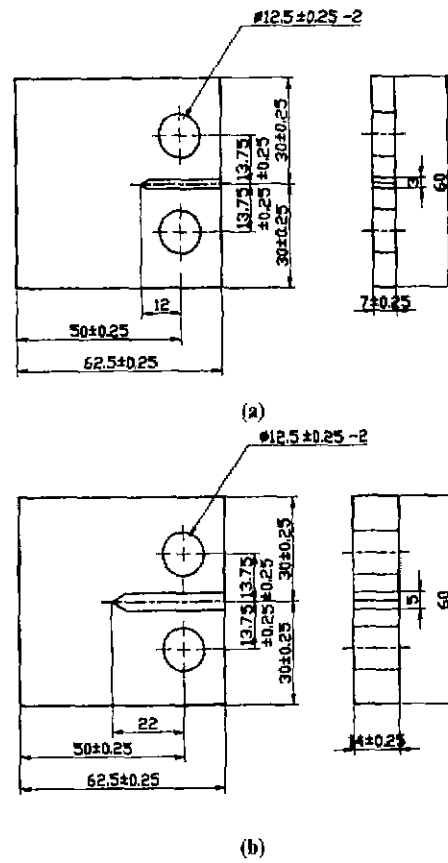


Fig. 1 Specimen geometry for (a) fatigue crack growth (b) fracture toughness

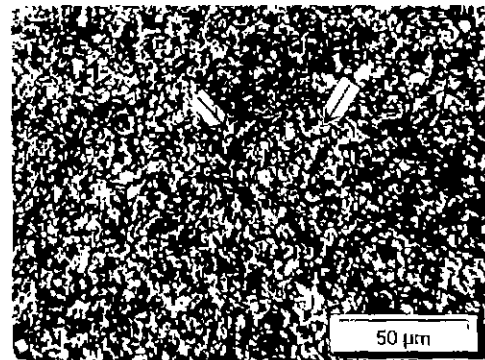


Fig. 2 Microstructure of the martensitic stainless steel(12% Cr)

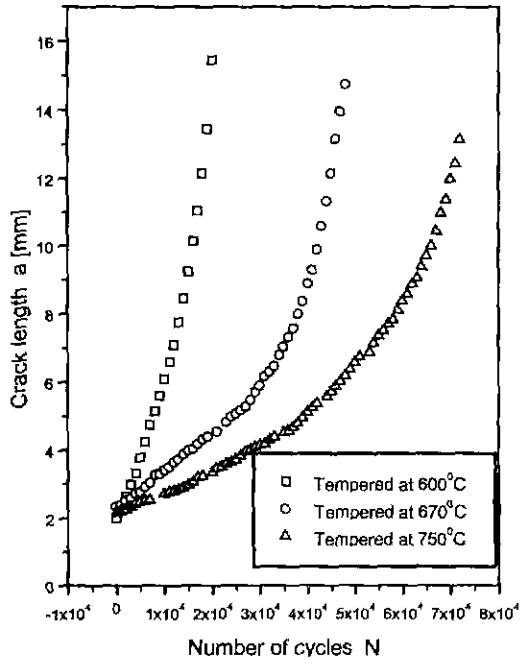


Fig. 3 Relation between crack length(a) and cycle(N)

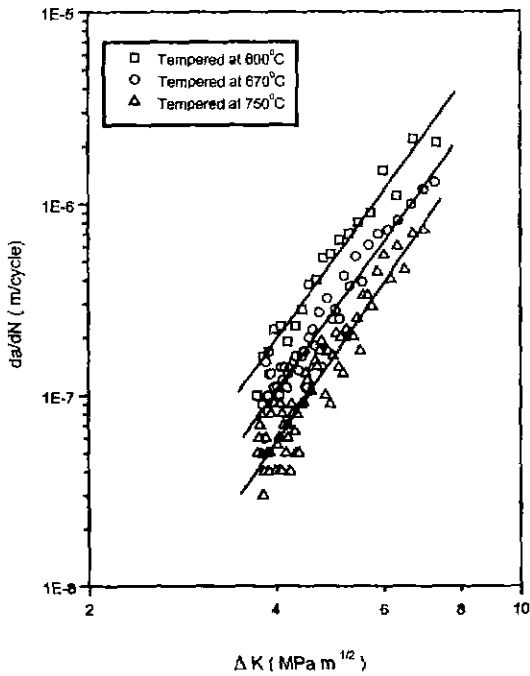


Fig. 4 Relation between da/dN and ΔK

Table 1 Chemical composition of the specimen

Element	C	Si	Mn	P	S
wt.(%)	0.3	0.45	0.7	0.02	0.01
Element	Cu	Ni	Cr	Mo	-
wt.(%)	0.1	0.36	12	0.02	-

Table 2 Mechanical properties of the specimen

No	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
I	747.4	900.2	9.4
II	656.3	791.3	12.0
III	565.9	720.9	16.6

Tempered at I) 600 °C, II) 670 °C, III) 750 °C

Table 3 C and m values obtained from da/dN and ΔK relations

No	C	m
I	$4.06 \times 10^{-10}$	4.44
II	$2.22 \times 10^{-10}$	4.43
III	$8.07 \times 10^{-11}$	4.72

Tempered at I) 600 °C, II) 670 °C, III) 750 °C

Table 4 Yield strength ( $\sigma_y$ ) and fracture toughness( $K_{Ic}$ ) of the specimen

No	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{Ic}$ (N/mm <sup>3/2</sup> )
I	747.4	183.5
II	656.3	353.8
III	565.9	447.9

Tempered at I) 600 °C, II) 670 °C, III) 750 °C

Table 5 Fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) and hardness ( $H_V$ ) of the specimen

No	$K_{Ic}$ (N/mm <sup>3/2</sup> )	$H_V$
I	183.5	319
II	353.8	268
III	447.9	245

Tempered at I) 600 °C, II) 670 °C, III) 750 °C

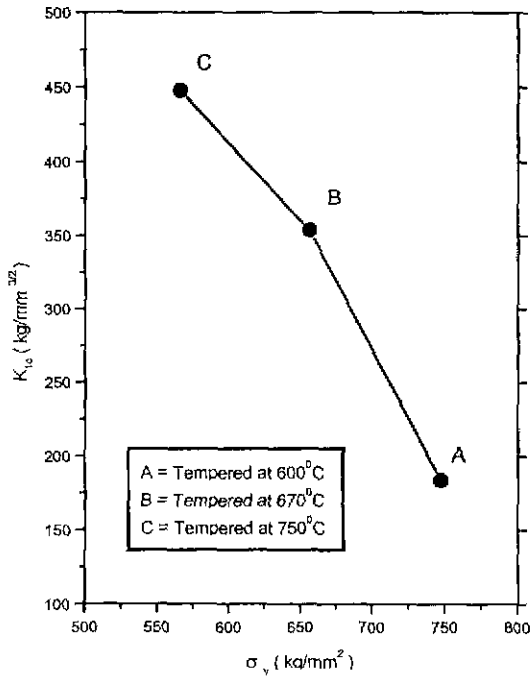


Fig. 5 Relation between fracture toughness ( $K_{1c}$ ) and yield strength ( $\sigma_v$ )

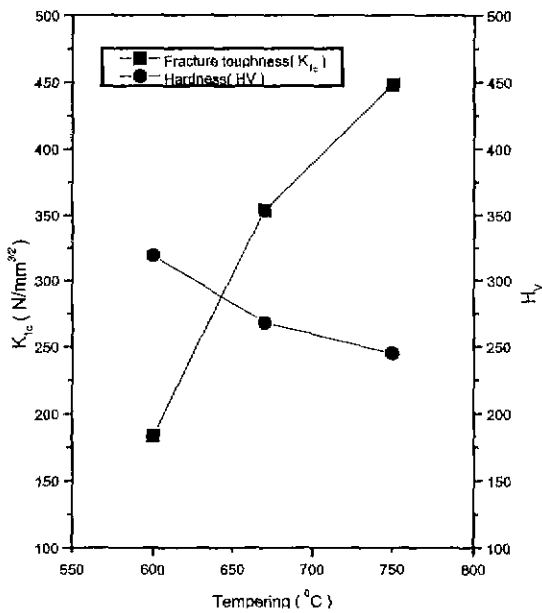


Fig. 6 Relation between the  $K_{1c}$  and hardness ( $H_V$ ) according to tempering condition

에 의한 인장시험편을 별도로 제작한 후 CT 시험편과 같은 조건으로 열처리를 수행하였으며, 각각의 시험편에 대한 인장시험을 행하였다. 그 결과는 Table 2와 같다. 또한 미세하게 연마(polishing)된 시험편의 표면을 마이크로 비커스 경도기(micro vickers hardness tester)를 사용하여 경도측정을 하였으며, 그 결과는 Table 5와 Fig. 6에서 파괴인성( $K_{1c}$ )과 비교하여 나타내었다.

## 2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 Instron (Model 8032)사의 재료시험기로 최대 용량은  $\pm 250$  KN이다. 파괴인성 및 피로균열진전시험편의 노치(notch)는 세브론(chevron)형으로 기계가공하고 노치로부터 예상 균열진전면을 따라 에머리 페이퍼 및 알루미나 분말로 연마(polishing)하였고, 약 2mm의 예비균열(pre-crack)을 발생시킨 후 본 실험에 임하였다.

피로균열진전시험시의 조건은 하중비( $R$ ) 0.1의 사인파형(sine wave)이며, 주파수는  $5 H_z$ 로 일정하게 하였다. 그리고 일정사이클( $a$ )마다 정확한 균열진전의 길이( $N$ )를 측정하기 위하여 20 배율의 이동현미경을 사용하였다. 실험에서 얻어진 균열길이( $a$ )와 적용사이클( $N$ )의 관계에서 균열진전속도( $da/dN$ )를 결정하고 식(1)의 Paris law를 이용하여 균열진전 거동을 고찰하였으며, 응력확대 계수( $\Delta K$ )는 식(2)로 구하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W(1 - \alpha)^{3/2}}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2)$$

여기서,  $\alpha = a/w$

파괴인성 실험에서 균열개구변위(COD)를 측정하기 위하여 시험편의 노치 선단부에 스페이스블록을 부착하고 그곳에 COD 게이지를 장착한 후 실험하였으며, 실험에서 얻어진 하중-변위곡선에서 균열성장 2%인 하중( $P_Q$ )을 알기 위해 직선부분 기울기의 95% 되는 할선(second line)을 긋고, 그 교점을  $P_Q$ 로 정하고 곡선상의 최대하중  $P_{max}$  와 의 비가 식(3)을 만족하는 경우 식(4)에 의해  $K_Q$  를 구하였다.

$$\frac{R_{max}}{P_Q} < 1.10 \quad (3)$$

$$K_Q = \frac{P_Q}{Bw^{1/2}} f(a/w) \quad (4)$$

여기서,

$$f(a/w) = \frac{(2+a/w)(0.886+4.64a/w-13.32a^2/w^2+14.72a^3/w^3-5.6a^4/w^4)}{(1-a/w)^{3/2}}$$

- $P_Q$  ; 하중 [KN]
- $B$  ; 시험편두께 [mm]
- $w$  ; 시험편폭 [mm]
- $a$  ; 균열길이 [mm]

그리고 식 (4) 에 의해 구해진  $K_Q$ 가 식 (5)를 만족 할 때 파괴 인성 ( $K_{IC}$ ) 값으로 인정하였다.

$$B \cdot a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_v} \right)^2 \quad (5)$$

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 미세조직 관찰

본 실험에 사용된 마르텐사이트계 스테인리스강의 미세 조직은 1 g picral acid, 5 ml HCl, 100 ml ethanol 로 에칭(etching)하여 광학 현미경으로 관찰하였으며, Fig. 2 에 보이는 것처럼 미세한 레스(lath)를 가지는 템퍼드마르텐사이트(tempered martensite)조직이고, 석출물은 주로 PAGB(Prior Austenite Grain Boundary) 및 레스계면(lath boundary) 에 석출되어있는 Cr이 많이 함유된 탄화물로서 미세한 ferrite + (Cr, Fe)<sub>23</sub> C<sub>6</sub> 이다.<sup>(9,10)</sup>

#### 3.2 피로 균열 진전거동

Fig. 3은 마르텐사이트계 스테인리스강(12% Cr)을 600 ℃, 670 ℃ 그리고 750 ℃의 템퍼링온도로 열처리하여 하중비( $R$ ) 0.1 의 조건으로 행한 피로균열진전 실험결과를 일정사이클( $N$ )에 대한 균열진전길이( $a$ )로 나타내었다. 그림에서 나타난 것과 같이 템퍼링온도 600 ℃ 에서는 약  $2 \times 10^4$  cycle, 670 ℃ 에서는 약  $4 \times 10^4$  cycle, 750 ℃ 에서는 약  $7 \times 10^4$  cycle 로 현저하게 피로수명이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 Table 2 에서의 기계적 특성 실험결과와 같이 템퍼링 온도의 상승에 따른 평

균입자의 조대화로 강도가 저하하고 연성이 증가하는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 4는 피로균열성장률(da/dN)과 응력확대계수범위( $\Delta K$ )의 관계를 나타낸 것으로 각 조건에 대하여 식 (1) 의 Paris law를 잘 만족함을 알 수 있으며, Paris law가 성립되는 안정성장 영역에서의 재료상수 값들을 구하여 Table 3에 나타내었다. m값은 템퍼링 온도에 무관하게 거의 일정함을 알 수 있지만 C값은 템퍼링 온도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냄을 Table 3에서 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 템퍼링 온도가 증가함에 따라 C 값의 감소로 인하여 균열진전속도가 감소함을 의미하며 Fig. 4에서 보는 것처럼 주어진 응력 확대계수 범위에 대하여 템퍼링 온도 600 ℃의 조건에서는 피로균열 진전속도가 가장 크고 750 ℃의 조건에서는 가장 낮은 균열진전속도를 나타내고 있다. 이와 같이 균열진전속도가 템퍼링 온도의 증가에 따라 감소하는 경향은 재료강도의 저하와 상대적으로 재료연성의 증가에 기인한다고 사료된다.<sup>(11)</sup>

#### 3.3 파괴인성( $K_{IC}$ )실험

Table 4 에서 파괴인성실험의 결과와 인장실험에서 얻은 항복강도( $\sigma_v$ )의 결과를 나타내었고, Table 5 에서 파괴인성 실험결과와 경도( $H_v$ )값을 나타내었다.  $K_{IC}$ 의 계산은 앞에서 언급한 파괴인성 실험에서 얻어진 COD 곡선에서  $P_Q$ 를 정하고 이에 대해  $K_Q$ 를 구한 후  $K_{IC}$  값으로 인정하였다.  $K_{IC}$ 와  $\sigma_v$ 의 관계에서는 Fig. 5에서처럼 템퍼링 온도가 상승할 때  $\sigma_v$ 는 작아지고  $K_{IC}$ 는 증가하는 경향을 볼 수 있으며,  $K_{IC}$ 와  $H_v$ 의 관계에서는 Fig. 6에서처럼 템퍼링 온도의 증가에 따라  $K_{IC}$ 는 증가하는 반면에  $K_{IC}$ 는 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 일반적으로 동일재료에서 항복응력( $\sigma_v$ )이 커지고 아울러 경도( $H_v$ )가 높아지면 인성이 부족하여 충격력이나 파손에 대한 저항력이 떨어져<sup>(12)</sup> 파괴인성( $K_{IC}$ )이 저하하는 경향을 잘 뒷받침 해 주고 있다.

#### 3.4 파면관찰

파괴인성 실험으로 파단된 시험편의 파단면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)으로 촬영하였으며, 그 사진을 촬영된 시험편의 파단면 위치와 함께 Fig.7에 나타내었다.

Fig.7(a)는 600 ℃에서 템퍼링한 시험편의 파단면으로 A부분처럼 거시적인 소성변형 없이 빠른 속도로 균열이 전파하여 파단되는 벽개파괴형태(cleavage fracture mode)

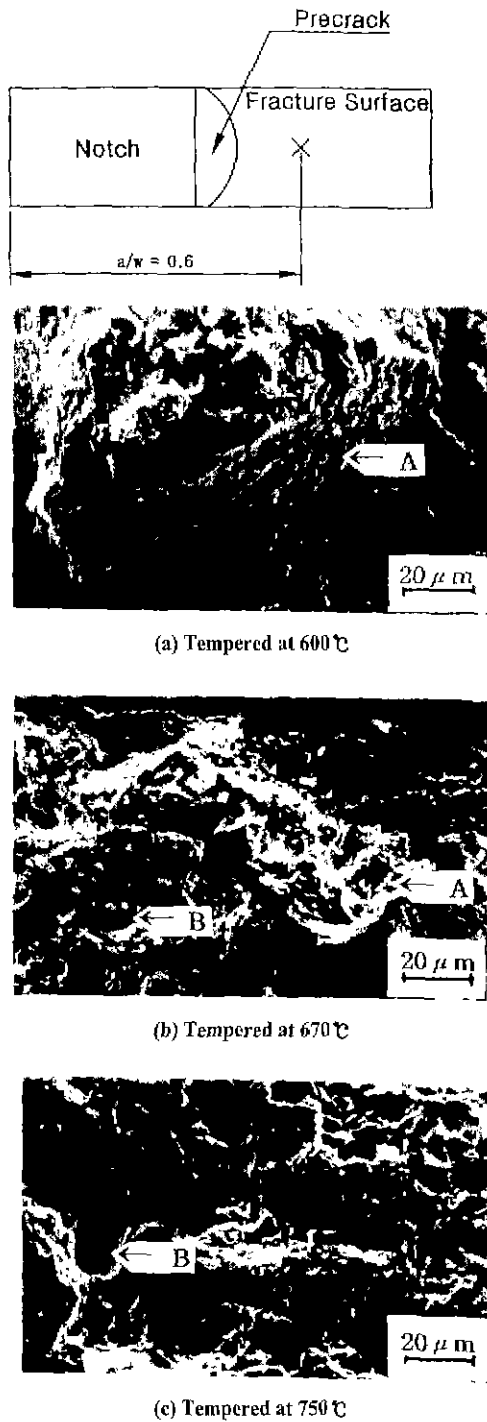


Fig. 7 SEM micrographs of fracture surface

의 양상을 보이고 있다. 이것은 마르텐사이트(martensite) 조직에서 템퍼링(tempering)시 예상되는 Cr이 많이 함유된 탄화물이 석출되어있는 템퍼드마르텐사이트(tempered martensite)의 조직을 바탕으로 한 미세한 탄화물 입자가 입내에 다량으로 존재하기 때문으로 보여진다. Fig. 7(c)는 750 °C에서 템퍼링한 시험편의 파단면으로 미세한 탄화물의 입자가 성장하여 파단되므로써 B부분처럼 딥플 파괴형태(dimple fracture mode)를 나타내고 있다.<sup>13)</sup> Fig. 7(b)는 670 °C에서 템퍼링한 시험편의 파단면으로 Fig. 7(a)와 Fig. 7(c)의 중간정도인 혼합파괴형태(mixed fracture mode)의 양상을 보여줌을 알 수 있었다. 따라서 템퍼링 온도가 낮을수록 취성 파괴의 양상으로 보여지는 파단면을 보여주고, 템퍼링 온도가 높을수록 연성파괴의 양상으로 보여지는 파단면을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

이상과 같이 마르텐사이트계 스테인리스강(12% Cr)의 템퍼링(tempering)온도를 달리함에 따른 미세 조직관찰을 하고 피로균열진전 실험과 파괴인성실험을 한 후 파면관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 실험에 사용된 시험편의 현미경조직은 미세한 래스(lath)를 가지며 Cr이 많이 함유된 탄화물이 석출되어있는 템퍼드마르텐사이트(tempered martensite) 조직에 바탕을 둔 미세한 ferrite+ (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>의 조직으로 판단된다.
- (2) 피로균열진전 실험결과 동일 ΔK에서 템퍼링온도 600 °C의 경우가 가장 높은 피로균열진전속도를 보여주고 있으며, 템퍼링온도 750 °C의 경우가 가장 낮은 피로균열진전속도를 나타내고 있다.
- (3) 파괴인성 실험결과 템퍼링온도 600 °C에서 항복강도( $\sigma_y$ ) 747.4 N/mm<sup>2</sup>와 경도( $H_v$ ) 319의 높은 값을 얻었으며, 반면에 파괴인성( $K_{IC}$ ) 값은 183.5 N/mm<sup>3/2</sup>으로 낮은 값을 얻었다. 또한 템퍼링온도 750 °C의 경우는 항복강도( $\sigma_y$ ) 565.9 N/mm<sup>2</sup>과 경도( $H_v$ ) 245로 낮은 반면에 파괴인성( $K_{IC}$ ) 값은 447.9 N/mm<sup>3/2</sup>로 높은 값을 얻었다.
- (4) 파면 관찰결과, 템퍼링온도 600 °C에서는 벽개파괴형태(cleavage fracture mode)의 양상을 나타내었고, 템퍼링온도 750 °C에서는 딥플파괴형태(dimple fracture mode)의 양상을 나타내었다. 따라서 템퍼링

온도 600℃의 경우 경도값과 항복강도는 가장 높게 나타났으나, 피로균열진전속도가 가장 높고 파괴인성값이 가장 낮게 나타났으며, 템퍼링온도 750℃의 경우 경도값과 항복강도는 가장 낮게 나타났으나, 피로균열진전속도가 가장 낮고 파괴인성값이 600℃에 비해 약 2배 이상 높게 나타났으므로, 구조용 재료로 사용할 경우 상기 결과들을 이용하면 안정한 사용범위예측과 파괴예방의 기본자료가 되리라 예상된다.

### 참 고 문 헌

- (1) G. Krauss, *Stainless Steels, Steels-Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, pp. 351~375, 1990.
- (2) J. Z. Briggs and T.D. Parker, *The Super 12 % Cr Steel. Climax, Molybdenium Co.* 1965.
- (3) J. R. Lewis, *Handbook of Stainless Steels*, D. Peckner and I. M. Bernstein (eds.), Mc Graw- Hill Book Co. New York. Chap. 19, 1977.
- (4) 김광배, 박명과, 최환중, "항공기 재료" 한국항공대학 출판부, pp. 54~76, 1990.
- (5) 孔炳郁, 李守燦, 南壽祐, "12%Cr 강의 고온저주파 피로수명에 미치는 유지시간의 영향" 대한금속학회지, 제29권 제5호, pp. 514~518, 1991.
- (6) P.R.Sreenivasan, S.K.Ray, S L.Mannan, P.Rodriguez, "Dynamic fracture toughness and Charpy impact properties of an AISI 403 martensitic stainless steel", *Journal of Nuclear Materials* 228, pp. 338~345, 1996.
- (7) ASTM Standard E647-95a "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", pp. 557~568, 1997.
- (8) ASTM Standard E399-90 "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", pp. 422~438, 1997.
- (9) J.W.Schmkel, P.L.F.Radenmarkers, B.R.Drenth and C.P.Schecpens. "J.Heat Treating" 3, pp. 237~248, 1984.
- (10) G. Eggeler, J.C.Eathman, N Nilsvang and B.Ilschner, *Acta Met.* 1 pp. 49~60, 1989.
- (11) 長谷川正義 監修, 編輯部 譯, "스테인리스鋼 編覽" 圖書出版 世和, pp. 150~152, 1992.
- (12) 金基敦, "420-J2 스테인리스강의 어닐링열처리에 따른 경도와 미세조직 변화", 대한금속학회지, 제3권, 제1호, pp. 20~27, 1994.
- (13) 배성인, 한민구, "파괴역학 실험법" 원창출판사, pp. 203~206, 1995.