

## 12Cr 합금강의 부식열화에 의한 피로파괴 특성

조선영\* · 김철한\*\* · 배동호†

(2000년 10월 11일 접수, 2001년 4월 21일 심사완료)

### Fatigue Fracture Characteristics by Corrosion Degradation of 12Cr Alloy Steel

Sun Young Cho, Chul Han Kim and Dong Ho Bae

**Key Words:** Corrosion Degradation(부식열화), 12Cr Alloy Steel(12Cr 합금강), Fatigue(피로), Corrosion Fatigue(부식피로), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위), Crack Growth Rate(균열 성장속도), SEM Fractography(SEM 파면사진)

#### Abstract

In order to investigate the fatigue fracture characteristics by corrosion degradation of 12Cr alloy steel, both the fatigue characteristics in air of them artificially degraded during long period and the corrosion fatigue characteristics were experimentally evaluated in various environments which were determined from electro-chemical polarization tests. And also, their fracture mechanisms were analyzed and compared, fractographically. From their results, the fracture mechanical characteristics of it artificially degraded during long period in the distilled water, 3.5wt.% NaCl solution and 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution of 25, 60 and 90°C did not show distinguishable difference comparing with non-corroded one in regardless of temperature and degradation period. It means that degradation of the material by just surface corrosion does not remarkably affect to fatigue crack growth. On the other hand, the crack growth rates by corrosion fatigue increased due to activity increase of corrosive factors such as OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>-</sup> at the crack tip with temperature increase. Therefore, the crack growth rates by corrosion fatigue were more faster than that in air of the artificially degraded specimen due to the such difference of crack growth mechanism.

#### 1. 서 론

설비노후의 가장 큰 원인 중 하나는 재질열화(material degradation)이며, 열화는 설비의 장시간 사용에 따른 부식환경과 하중 등의 인자가 복합적으로 작용하여 재료의 기계적 특성을 변화시킴으로써 발생한다. 그 한 예로, 발전설비의 중요 요소인 증기터빈(steam turbine)의 터빈블레이드(turbine blade)는 순환기 계통의 누설, 과열기와 보일러 내

의 불순물의 용해 등 다양한 불순물들이 과열기를 거쳐 터빈(turbine)에 유입됨으로 인해서 부식열화 된다.<sup>(1~5)</sup> 특히, 과잉 알카리나 염화물(chloride), 황화물(sulfide) 등이 터빈 블레이드에 흡착 및 농축되면, 금속과의 전기화학적 반응에 의해 터빈 블레이드 표면에는 표면부식 또는 부식피트(corrosion pit)가 형성되어 운전 중 피로파괴의 원인을 제공하기도 한다. 이와 같이, 부식환경에 노출되거나 영향을 받는 산업설비용 재료의 부식열화에 의한 손상기구를 규명하고, 열화정도에 따른 파괴특성을 체계적으로 평가하는 것은 산업설비의 사고예방과 안전설계를 위해 매우 중요한 의미를 가질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 여러 산업설비용 재료들 중에서 12Cr 합금강이 부식성 환경에서 장시간 노출되어 부식에 의해 열화된 경우의 피로파괴특성을 실험적으로 평가하였다.

\* 회원, 한국원자력 연구소

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : bae@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7443, FAX : (031)295-1937

이를 위해서, 먼저 전기화학적으로 부식민감성이 가장 예민한 환경에서 온도와 열화기간을 매개변수로 하여 인공열화시킨 12Cr합금강의 공기 중 피로특성을 평가하였다. 그리고, 이와 동일한 환경과 온도조건에서의 부식피로특성을 평가하여, 두 경우에 대한 파괴기구(fracture mechanism)를 비교·평가하였다.

## 2. 부식환경에서 인공열화된 12Cr 합금강의 공기 중 피로특성

### 2.1 시험편

12Cr 합금강의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 인공부식열화를 위한 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 노치를 가공하지 않았는데, 그 이유는 열화기간동안 노치 선단이 부식에 의해 둔화될 수 있기 때문이다. 그리고, 시험편 표면을 균일하게 연마하여 인공열화시 표면결함으로 인한 국부부식 및 피팅(pitting)의 발생을 최대한 억제하였다. 열화기간이 만료된 후, 공기 중 피로시험 직전에 노치(notch)를  $a/W=0.25$ 까지 방전가공(EDM)하였다. 그리고, 노치로부터의 예피로균열(pre-fatigue crack)은 하중 감소법에 의해 실제 실험 하중보다 20%가 높은 하중에서부터 균열이 1mm진전할 때마다 하중을 5%씩 감소시켜 최종균열길이의 1mm전부터는 실험하중과 같도록 하여  $a/W=0.3$ 까지 삽입하였다.

### 2.2 실험조건 및 방법

열화조건은 전기화학적 분극실험 결과<sup>(6-8)</sup>로부터 부식속도가 상대적으로 빠르게 나타난 3.5wt.% NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액으로 설정하고, 비교테스터를 위해 증류수에서도 열화시켰다. 각 용액별 온도는 25, 60, 90℃로 하고, 이상의 인공열화조건 하에서, 부식에 의한 열화가 재료의 피로파괴특성에 미치는 영향을 가능한 충분히 파악할 수 있도록 하기 위해서 열화기간을 공히 3, 6, 9개월로 하여 실험을 수행하였다. 재료의 인공열화를 위해 사용된 부식조(corrosion chamber)의 형상은 Fig. 2와 같이, 비이커(beaker), 수용액가열용 히터(heater), 용액의 온도조절을 위한 열전대(thermo-couple) 및 온도조절 장치로 구성하였다. 열화 방법은 시편을 비이커내의 부식용액 중에 침적시키고, 비이커 외부를 감싸고 있는 전기히터

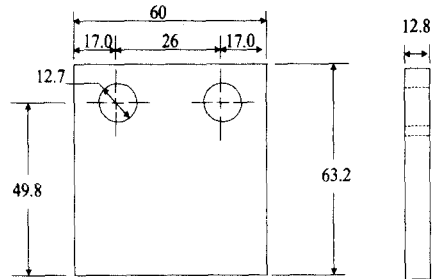


Fig. 1 Configuration of specimen for artificial degradation (unit:mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 12Cr alloy steel (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Content(%)	0.16	0.34	0.46	0.016	0.003	0.18	11.9	0.09	0.06
Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)		Elongation (%)						
989.4	1205		13						

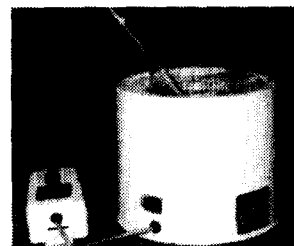


Fig. 2 Configuration of corrosion cell for artificial degradation

(electric heater)로 가열함과 동시에 비이커 내에 시편과 함께 용액 중에 침적되어 있는 열전대로 설정된 온도가 일정하게 유지되도록 온도제어기(control panel)에 연결하여 제어하였다. 각 비이커에 채워져 있는 3.5wt% NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액의 농도를 유지하기 위해서는 주사형 용액공급장치를 이용해 150시간마다 용액을 교환함으로써 열화기간중의 용액의 농도를 일정하게 유지시켰다. 이상에서 인공열화된 열화재의 예균열과 공기 중 피로시험을 위해서는 유압식 재료시험기(MTS Co. capacity: 10ton)를 사

용하였으며, 하중반복속도( $f$ )=20 Hz, 하중비( $R = P_{min}/P_{max}$ )=0.1로 하였다. 그리고, 피로하중에 의한 균열진전 길이는 배율 50인 광학현미경을 이용하여, 시편 전·후면의 피로균열을 측정하고, 그 평균값을 취하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 증류수를 부식용액으로 하고, 25, 60, 90°C에서 9개월 동안 열화 시킨 시편의 외 표면 상황을 예시한 것이다. 전체적으로 용액의 온도가 증가하고, 열화기간이 길수록 약간의 표면부식과 이로 인한 부식산화물이 표면을 덮고 있어 Fig. 3과 같이 시편의 표면이 변색되었음을 관찰할 수 있었다. 그러나, 3개월간 인공열화된 시편의 표면 상태는 온도에 관계없이 비열화재와 별 차이가 없을 정도로 표면부식이 발생이 관찰되지 않았다. 증류수중에서 장기간의 인공부식열화에도 불구하고 재료의 기계적 성질에 큰 영향을 미칠 만큼 표면 부식과 국부부식의 발생이 뚜렷하게 관찰되지 않은 것은 12Cr 합금강의 내식성과 안정된 산화피막에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 3.5wt.% NaCl 수용액을 부식용액으로 하고, 25, 60, 90°C에서 9개월 동안 열화 시킨 시편의 외 표면 상황을 예시한 것이다. 열화시간이 경과함에 따라 표면부식이 진행되었으며, 6개월이 경과된 시편의 경우는 증류수 9개월의 표면상태와 유사한 부식정도를 나타내고있었다. 이것은NaCl 수용액환경에서 부식활성 인자인 Cl<sup>-</sup> 이온(ion)의 전기화학적 부식반응으로 증류수에 비해 부식이 촉진되었음을 의미하며, 온도가 증가할수록 이러한 경향은 크게 나타날 것이라는 것이 Fig. 6의 전기화학적 분극실험결과를 통해 예측이 가능하였다. 그리고, 시편의 모서리 부근이 표면에 비해서 부식 상태가 상대적으로 심한 것은 시편가공과정에서 발생된 내부응력과 단말효과(edge effect) 등으로 국부부식이 촉진되어 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액을 부식용액으로 하고, 25, 60, 90°C에서 9개월 동안 열화 시킨 시편의 외 표면 상황을 예시한 것이다. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액의 온도가 증가하고, 열화기간이 길수록 상대적인 부식정도는 커짐을 관찰할 수가 있었으나, 3.5wt.% NaCl 수용액 중에서 열화된 동일 시편에 비해 부식정도가 상대적으로 크지 않았다.

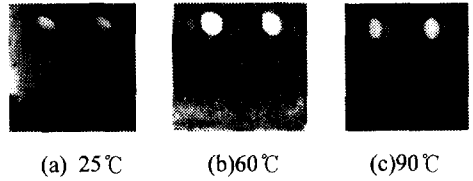


Fig. 3 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in distilled water

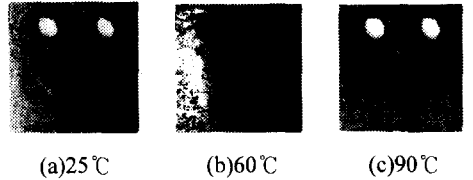


Fig. 4 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in 3.5wt.% NaCl solution

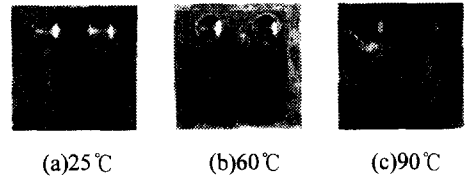


Fig. 5 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in 1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

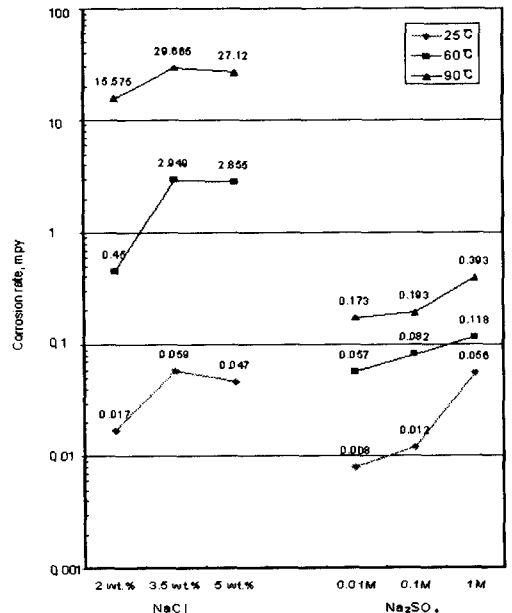


Fig. 6 Effect of temperature and percentage of solution on the corrosion rate in polarization test

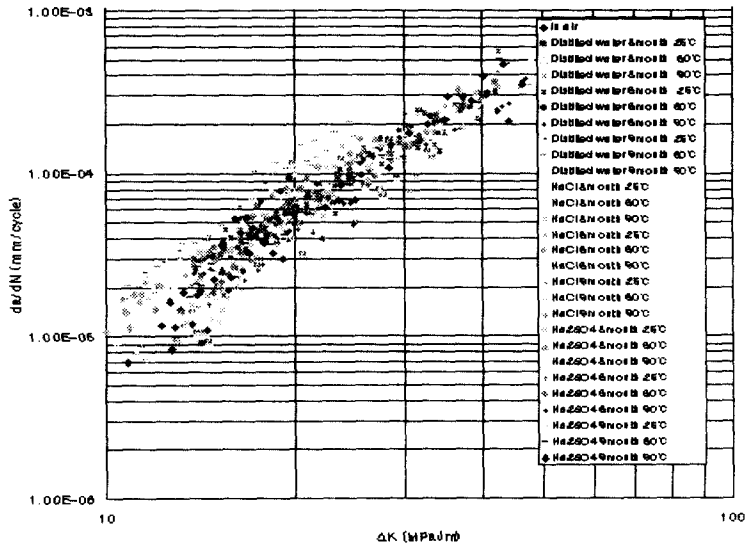


Fig. 7 Comparison of the  $da/dN - \Delta K$  relations of 12Cr alloy steel artificially degraded in various environments ( $R=0.1, f=20\text{Hz}$ )

재료를 부식성 환경 중에 침적된 상태로 장기간 열화시키면, 지속적인 부식작용에 의해 표면부식의 침투효과가 예상되고, 이러한 효과는 재료의 파괴 특성에도 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에, 재료의 열화와 파괴에 관한 정보를 획득하는 것은 재료의 신뢰성 확보와 설비의 안전설계 차원에서 매우 중요한 의미가 있을 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 각 환경별 인공열화재에 대한 공기 중 피로실험을 수행하여 표면부식이 재료의 파괴특성에 미치는 영향을 파괴역학적으로 평가하였다.

Fig. 7은 25, 60, 90°C의 증류수, 3.5wt.% NaCl 수용액 및 12.7wt.%(1M)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  수용액 중에서 3, 6, 9개월 동안 열화된 인공열화재의 공기 중 피로특성을 종합적으로 비교·도시한 것이다. 증류수에서 각 온도별로 3, 6, 9개월간 열화된 시험편의 공기 중 피로특성이 거의 동일한 결과를 나타내었는데, 이는 열화기간동안 12Cr강의 내식성으로 인해 피로강도 저하를 발생시킬 만큼 열화가 일어나지 않았음을 의미한다. 3.5wt.% NaCl 수용액 중에서 3, 6, 9개월 동안 열화된 시험편의 피로균열성장특성도 비열화재와 비교해 보면, 열화기간과 온도에 크게 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있는데, 이는 부식에 의한 표면열화가 균열진전을 가속시킬 만큼 크

지 않았음을 의미한다. 그리고, 12.7wt.%(1M)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  수용액에서 동기간동안 열화된 경우도 역시 증류수 및 3.5wt.% NaCl수용액에서와 유사한 균열성장 특성을 나타내고 있는 것으로 미루어, 열화기간과 온도에 크게 영향을 받지 않았음을 확인할 수 있다. 이상과 같이, 장기간의 부식열화에 의해 표면부식의 침투효과가 예상되지만, 재료의 피로파괴특성에 미칠 만큼 그 영향은 크지 않았음을 확인할 수 있었다. 가혹한 부식환경 하에서 장기간 인공열화를 시켰음에도 불구하고 피로특성에 뚜렷한 영향이 나타나지 않은 이유는 무 부하 상태에서 재료표면이 부식용액과 접촉하여 전기화학적 반응을 일으켜 열화초기에는 어느 정도 재료표면이 부식되지만, 일정 시간이 경과되면서부터는 부식작용에 의해 발생하는 부식생성물과 안정적인 보호피막이 표면을 덮게 되어 더 이상 부식 인자의 침투가 불가능해지거나 침투속도가 늦어지기 때문인 것으로 판단된다.

### 3. 12Cr 합금강의 부식피로 특성

#### 3.1 시험편과 실험장치

활성적 국부부식으로부터 균열이 발생 및 성장하여 설비가 운전 중 손상에 이르게 되면, 운전중

지와 보수를 위한 부품교체 등으로 인해 상당한 경제적 손실이 야기되므로, 설비의 안전설계와 건전성 평가를 위해서는 부식피로기구에 의한 재료의 파괴특성을 평가할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 12Cr 합금강에 대한 부식피로 실험을 수행하고, 부식피로 특성을 파괴역학적으로 평가하였다. 시험편은 Fig. 8과 같이 CT(compact tension)형상으로 제작하였으며, 예비균열을 위한 하중조건과 방법은 인공열화재의 공기 중 피로시험법과 동일하다. 부식조는 아크릴수지로 제작하여 갈바닉부식을 방지하였고, 용액순환장치와 히터, 열전대를 장착하여 주어진 환경에서 장기간 실험이 가능토록 하였다. 그리고, 부식조의 상단부를 개방하여 시험편 탈착과 직류전위차법을 이용한 균열길이 측정이 용이하도록 하였다. 실험장치는 부식피로시험 전용으로 자체설계 및 제작된 저 주기 수평식 피로시험장치(horizontal fatigue tester)를 사용하였으며, 전체적인 구성은 Fig. 9와 같다.

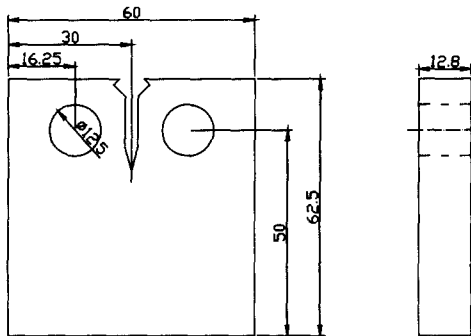


Fig. 8 Configuration of specimen for corrosion fatigue test (unit:mm)

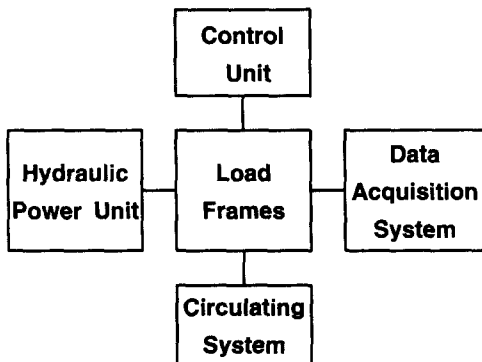


Fig. 9 Schematic diagram of horizontal corrosion fatigue tester

3.2 실험조건과 방법

실험하중의 선정방법은 ASTM E 647-95<sup>(9)</sup>에 의거하였다. 즉, 균열관찰 범위가  $a/W=0.7$ 일 때의  $K_{max}$ 를 결정하고, 이로부터 선형탄성파괴역학(LEFM)의 적용 가능성과 실험 후 충분한  $\Delta K$ 영역을 확보할 수 있도록 최대하중( $P_{max}$ )=7848N으로 설정하였다. 부식피로시험 방법은 하중비( $R=P_{min}/P_{max}$ )=0.1로 한  $\Delta P$  일정 조건하에서 수행하였다. 그리고, 부식환경 중에서는 재료와 부식환경간의 전기화학적 반응에 의해 발생된 부식 생성물이 재료표면을 덮고 있기 때문에, 공기 중과 같이, 광학적인 방법으로 직접 균열길이를 측정하는 것은 곤란하다. 그래서, 본 연구에서는 직류전위차법(DCPD)<sup>(10)</sup>을 이용하여 균열길이를 간접적으로 측정하였으며, 사용된 입력전류는 전위차의 측정가능성과 과전류로 인한 시험편의 가열을 고려하여 10A로 하였다.

이상의 부식피로시험조건을 정리하면, Table 2와 같다.

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 25, 60, 90℃로 설정된 3.5wt.% NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액 및 증류수 중에서  $\Delta P$  일정 피로시험을 수행하여 얻은 12Cr 합금강의 부식피로특성곡선을 인공열화재의 공기 중 결과와 비교 도시한 것이다.

Table 2 Corrosion fatigue test condition

Conditions	Contents	
Loading condition	Load ratio (R)	0.1
	Load range( $\Delta P$ )	Constant
	Maximum load( $P_{max}$ )	7848N
	Loading speed(f)	0.5Hz (sine wave)
DCPD method	Input current	10A
Corrosion fatigue tests condition	in air	25℃
	distilled water	25℃, 60℃, 90℃
	3.5wt.% NaCl	25℃, 60℃, 90℃
	12.7wt.% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25℃, 60℃, 90℃

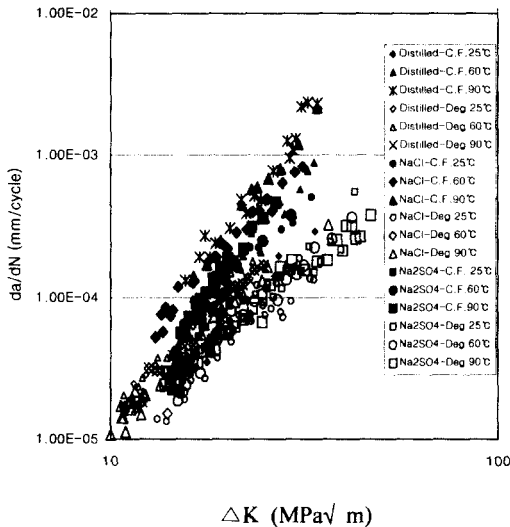


Fig. 10 Comparison of the  $da/dN-\Delta K$  relations between artificially degraded specimen for 9 months and corrosion fatigue tested specimen in various environments

대체로, 저  $\Delta K$  영역(저 균열성장속도 영역)에서 부식피로와 인공열화재의 공기 중 균열성장특성은 뚜렷한 차이를 나타내지 않으나, 균열성장속도가  $1 \times 10^4$  mm/cycle 이상에서는 25°C의 증류수를 제외한 환경과 조건에서, 부식피로에 의한 균열성장속도가 인공열화재에 비해 큰 폭으로 가속되는 결과를 보였다. 그리고, 부식피로의 경우는 동일온도 조건에서 증류수와 3.5wt.% NaCl 수용액 및 12.7wt.% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 수용액에서 부식피로특성은 큰 차이를 나타내고 있지 않으나, 동일 환경에서는 온도가 상승함에 따라 전체적으로 균열성장속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이상과 같은 부식피로특성은 식 (1)<sup>(11)</sup>과 같이 지배적인 파괴기구의 영향을 받으므로, 피로파괴를 면밀히 관찰하는 것은 부식피로에 의한 균열성장특성을 해석하는 데 매우 중요한 요소가 된다.

$$\begin{aligned} da/dN(\text{intergranular fracture}) &> da/dN(\text{cleavage fracture}) > \\ da/dN(\text{dimple fracture}) &> da/dN(\text{striation}) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서, 본 연구에서는 이상과 같은 균열성장속도와 파괴형태의 상관관계로부터 부식환경과 조건

별 부식피로특성을 비교검토하기 위해서, 부식피로 시험을 수행한 후 전자주사현미경(SEM,  $\times 540$ )을 이용하여 파면을 촬영하고 분석하였다. Fig. 11의 (a)는 공기 중, (b), (c), (d)는 각각 90°C의 증류수, 3.5wt.% NaCl 수용액, 12.7wt.% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액 중에서 수행된 부식피로파면 형태를 예시한 것이다. 부식피로의 경우 공기중과 달리 증류수와 3.5wt.% NaCl 수용액 및 12.7wt.% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액 중의 저  $\Delta K$ 영역(저 균열성장속도 영역)에서는 파면학적인 관점에서 입계+입내+딴플이 혼재된 균열진전 형태를 보이고 있다. 그러나, 이러한 현상은 온도와  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 입내+입계+딴플의 파면형태로부터 입계의 비율이 증가하는 입계+딴플의 형태를 보이다가, 임계균열길이에 근접하면서 입계파괴가 지배적인 균열진전형태로 변화되고 있음을 관찰할 수 있었다.

#### 4. 고찰

지금까지, 2, 3장에서 12Cr합금강의 인공열화에 의한 공기 중 피로특성과 동일 부식조건 하에서의 부식피로특성을 실험적으로 비교 평가한 결과에 대해서 서술하였다. Fig. 10에서 인공열화재의 공기 중 피로균열성장특성과 비열화재의 부식피로특성이 뚜렷한 차이를 나타내는 이유는 무 부하 상태에서 장기간 인공열화된 재료의 열화기구 및 공기 중 피로균열진전기구가 부식피로에 의한 그것과 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 인공열화의 경우는 열화초기에는 부식환경과 금속의 전기화학적 반응에 의해 일시적인 표면부식작용이 진행되었지만, 내부식성의 12Cr 합금특성상 부식작용에 의해 생성된 불순물과 안정적인 보호피막으로 인하여 무 부하 상태에서는 표면부식이 시간경과와 함께 가속될 수 없다. 그러나, 부식피로의 경우는 표면부식에 의한 영향은 기대할 수 없으나, 균열진전과정에서 부식용액의 침투에 의한 균열선단에서의 직접적인 전기화학적 부식작용이 균열성장거동에 영향을 미치게 되며, 온도가 상승할수록 부식용액중의 부식활성 인자들( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ )의 활성도가 증가하여 Fig. 11과 같이 피로균열의 성장기구에도 변화가 발생하게 된다. 그리고, 부식피로의 균열 진전속도는 식 (2)와 같이 순수한 역학적인 피로에 의한 균열진전속도 ( $da/dN$ )<sub>F</sub>와 부식환경의 영향이 고려된 응력부식균열기구(stress corrosion

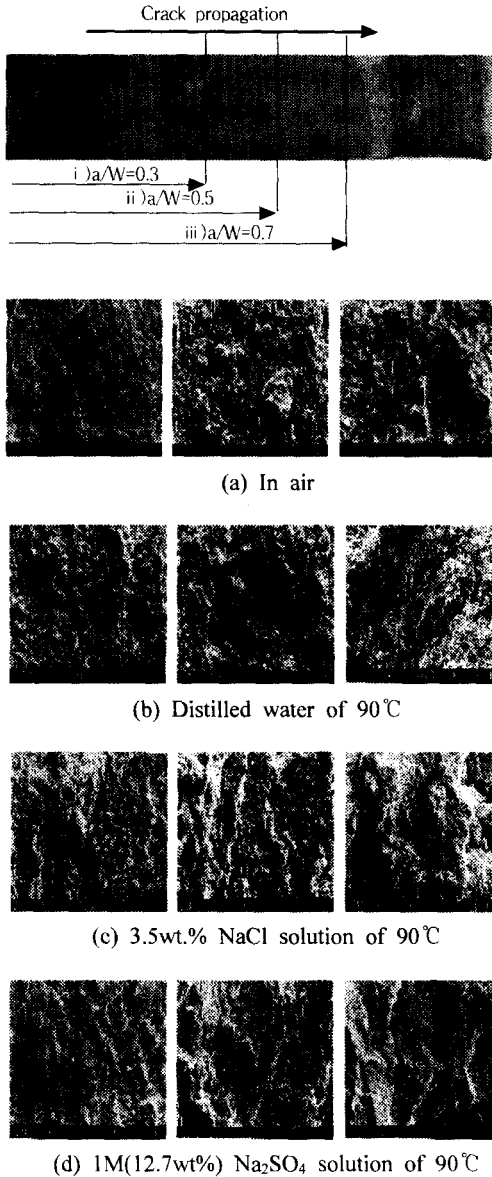


Fig. 11 Fractographs of corrosion fatigue fractured surface in various corrosive conditions

cracking mechanism)에 대응하는 시간 의존적인 균열진전속도( $da/dt$ )<sub>SCC</sub>의 함으로 정의되므로,<sup>(12)</sup> 부식 환경 하에서 부식피로의 경우는 비열화재와 인공 열화재의 공기 중 피로처럼 역학적 피로에 의한 균열진전 이외에 전기화학적 부식과 응력부식균열의 복합적인 가속효과가 추가적으로 영향을 미친다고 볼 수 있다.

$$(da/dN)_{CF} = (da/dN)_F + (da/dN)_{SCC} \quad (2)$$

따라서, 12Cr 합금강의 부식열화에 의한 피로강도와 파괴특성을 실험실적으로 평가하기 위해서는 부식이 지속될 수 있는 정도의 부하조건에서 열화시킬 필요가 있다고 판단된다.

### 5. 결론

12Cr 합금강을 전기화학적 부식실험을 통하여 설정된 여러 가지 부식환경에서 온도와 열화시간을 매개변수로 하여 열화시킨 인공열화재의 공기 중 피로특성과 비열화재의 부식피로특성을 파괴역학적으로 비교·평가하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증류수와 3.5wt.% NaCl 수용액, 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액환경에서 장기간 인공열화된 12Cr합금강의 공기 중 피로파괴특성은 내식성으로 인해 온도와 열화시간에 관계없이 비열화재와 유사한 특성을 나타내었다. 이것은 무 부하 상태에서는 재료의 피로강도를 저하시킬 만큼 열화효과가 크지 않았음을 의미한다.

(2) 따라서, 12Cr 합금강의 부식열화에 의한 피로강도와 파괴특성을 실험실적으로 평가하기 위해서는 부식이 지속될 수 있는 정도의 부하조건(가동 상태의 실용력)에서 열화시킬 필요가 있다.

(3) 3.5wt.% NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액에서 12Cr 합금강의 부식피로에 의한 균열성장특성은 온도의 영향을 받는다. 상온의 경우, 저 ΔK영역에서는 입계+입내+덤플의 혼재된 파면형태이나, 온도가 증가함에 따라 입계파괴의 비율이 증가하는 입계+덤플의 형태를 보이다가, 고 ΔK영역에서는 입계파괴가 지배적이다. 이러한 부식피로균열성장기구의 변화로 온도가 증가하면 동일 ΔK범위에 대해 균열성장속도는 가속되는 경향을 나타낸다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 센터(SAFE)의 지원 하에 이루어 졌으며, 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

### 참고문헌

(1) 1984, 機械·構造物の破損事例と解析技術, 日本機械學會, pp. 286~290.

- (2) 1985, 腐食と破壊, 日本機械學會編, pp. 71~74.
- (3) 1980, 金屬の割れ・破壊總合資料集, 日本金屬の割れ・破壊對策研究會, pp. 521~526.
- (4) 1987, 材料強度問題の最近の話題, 日本機械學會, pp. 114~119.
- (5) Evert D. D. Durning, 1997, "Corrosion Atlas," 3rd Edition, Elsevier, pp. 71~313.
- (6) 조선영, 2000, "터빈블레이드 재료의 부식열화에 의한 파괴특성 평가," 박사학위 논문.
- (7) ASTM G5, 1987, "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements," Annual Book of ASTM standards, pp. 73~76.
- (8) 조선영, 김철한, 류승우, 김효진, 배동호, 2000, "Turbine Blade 재료의 부식민감성과 부식피로특성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 A권, 제24권 제3호, pp. 603~612.
- (9) 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E647-95, pp. 578~614.
- (10) 1993, "Guideline for Electric Potential Difference Determination of Crack Size," ASTM E647, pp. 695~700.
- (11) 小寺澤良, 1983, "フラクトグラフィとその應用," 日刊工業新聞社, pp. 31~76.
- (12) R. P. Wei and J. D. Landes, 1969, "ASTM Material Research Standard 9-7," p. 25.