

Turbine Blade재료의 부식민감성과 부식피로특성에 관한 연구

조선영*· 김철한*· 류승우****· 김효진**· 배동호***
(1999년 1월 27일 접수)

A Study on the Corrosion Susceptibility and Corrosion Fatigue Characteristics on the Material of Turbine Blade

Sun Young Cho, Chul Han Kim, Seung Woo Ryu, Hyo Jin Kim and Dong Ho Bae

Key Words: Fatigue Strength(피로강도), Corrosion Potential(부식전위), Corrosion Cell(부식조), Corrosion Current Density(부식전류밀도), Corrosion Rate(부식속도), Intergranular Corrosion(입계부식), Corrosion Fatigue(부식피로), Stress Intensity Factor Range(응력 확대계수 범위), Crack Growth Rate(균열성장속도)

Abstract

Corrosion characteristics on the 12Cr alloy steel of turbine blade was electro-chemically investigated in 3.5wt% NaCl and 12.7wt% Na₂SO₄ solution, respectively. Electro-chemical polarization test, Huey test and Oxalic acid etching test were previously conducted to estimate corrosion susceptibility of the material. And, using the horizontal corrosion fatigue tester, corrosion fatigue characteristics of 12Cr alloy steel in distilled water, 3.5wt% NaCl solution, and 12.7wt%(1M) Na₂SO₄ solution were also fracture-mechanically estimated and compared their results. Parameter considered was room temperature, 60°C and 90°C. Corrosion fatigue crack length was measured by DC potential difference method.

Obtained results are as follows,

- 1) 12Cr alloy steel showed high corrosion rate in 3.5wt% NaCl solution and Na₂SO₄ solution at high temperature.
- 2) Intergranular corrosion sensitivity of 12 Cr alloy was smaller than austenitic stainless steel.
- 3) Corrosion fatigue crack growth rate in 3.5wt% NaCl and 12.7wt%(1M) Na₂SO₄ solution is entirely higher than in the distilled water, and also increased with the temperature increase.

1. 서 론

터빈 블레이드(Turbine blade)의 손상사례에 대한 조사결과에 의하면, 파손의 64%가 저압단(low pressure stage)에서의 증기(vapor)에 의한 부식과 피로(fatigue)의 조합된 영향에 기인된 것이며, 이 가운데 상당수는 운전초기(약 1년)에 발생하고 있

는 것으로 보고된 바가 있다. 따라서, 터빈 블레이드의 설계와 제작에 있어서, 지금까지 많은 기술적 노력이 경주되어 왔으나, 운전 중 여러 가지 원인들로 인한 파손사고의 예는 여전히 보고되고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 터빈 블레이드의 표준적인 재료는 12-13 %Cr합금강으로 제조자에 따라 합금 원소에 차이가 있으나, 블레이드 재료 그 자체로서는, 순수증기인 경우, 내식성이 만족스러운 재료로 평가되고 있다. 그러나, 응축기(condenser), 정숙계(demineralizer system) 및 순환기 계통에서의 누설, 과열기와 보일러 내의 불순물의 용해, 포화 증기에 혼입된 mist의 용해 등 다양한 원인들이 의해 과열기를 거쳐 터빈에 유입된 불순물들이 극히 미량이라 할지라도 터빈 블레이드의 표면에

* 회원, 성균관대학교 대학원

E-mail : chosy@sbsmail.net

TEL : (0331)290-7479 FAX : (0331)295-1937

** 회원, 한국 중공업(주)

*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

**** 한국 중공업(주)

부착되면, 국부적으로 농축되어 표면부식이 발생된다. 특히, 과잉 알카리나 염화물(chloride), 황화물(sulfide) 등이 터빈 블레이드 표면에 부착되면, 금속과의 전기화학적 반응(electro-chemical reaction)에 의해 블레이드 표면에는 부식 피트(pit)가 생성된다. 만일 이것이 활성적인 경우에는 계속적인 부식작용으로 성장이 가속화됨과 동시에, 터빈 구동력과 블레이드 회전력에 의해 피트 주변에는 응력집중(stress concentration)으로 인한 피로균열(fatigue crack)이 발생하여, 결국 부식피로에 의한 손상으로 이어지게 된다. 이상과 같은 터빈 블레이드의 파괴기구(fracture mechanism)를 규명하고, 파괴특성을 평가하는 것은 발전설비의 전전성 확보와 파손사고의 예방 및 안전설계 차원에서 매우 중요하고도 필요한 사항이다. 따라서, 본 연구에서는 터빈 블레이드 재료인 12Cr 합금강의 염화물과 황화물에 대한 부식민감성(corrosion susceptibility)을 전기화학적으로 평가하고, 그 결과를 바탕으로 부식피로 특성을 평가하여, 터빈 블레이드의 안전설계 및 신뢰성 평가를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 12Cr 합금강의 전기화학적 부식특성 평가

2.1 시험편 및 실험방법

2.1.1 전기화학적 분극 실험

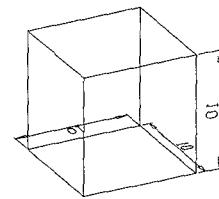
부식현상이 재료와 환경간의 전기화학적인 반응임을 고려해서 재료에 인위적인 전위를 가해줌으로써 부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(i_{corr}), 부동태전류밀도(i_p), 기본부동태전위(E_{pp}), 임계양극전류밀도(i_c), 임계공식전위(E_b) 등을 측정하여 재료의 전기화학적인 부식특성을 평가할 수 있는데, 이 방법은 ASTM G5 (Making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement)에 표준시험법으로 규정되어 있다.⁽²⁾ 부식속도(corrosion rate)는 Faraday 법칙에 의거하여 부식전류밀도로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Corrosion rate} = \frac{0.13 \times i_{corr} (\mu A/cm^2) \times E.W}{\text{density}(g/cm^3)} \quad (1)$$

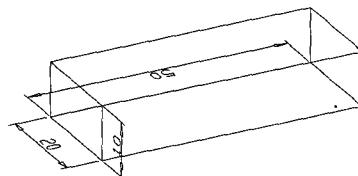
$E.W$ (equivalent weight) = $\sum f_i M_i / n_i$,
 f_i : 원자분율, M_i : 원자량, n_i : 원자가

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			



(a) Polarization and oxalic acid etching test



(b) Huey test

Fig. 1 Configuration of specimen for electrochemical corrosion tests(unit:mm)

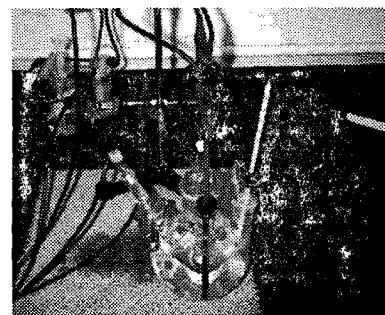
식 (1)에서, 부식 전류 밀도(corrosive current density)는 두 가지 방법, 즉 Tafel 외삽법과 직선분극법에 의해 실험적으로 측정할 수 있다.⁽³⁾ 본 실험에서는 Tafel 외삽법을 이용하였다. Tafel 외삽법에 의한 경우는 전위-전류 분극곡선에 Tafel 관계식을 준수하는 부분을 외삽법으로 찾아서 부식전위와 교차하는 점이 부식전류밀도(i_{corr})가 된다. 시험편 재료는 화력발전용 터빈 블레이드의 12Cr합금강이고, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시험편은 Fig. 1의 (a)와 같이 $10 \times 10 \times 10$ mm의 정육면체로 제작한 후, Struers 사의 에폭시(epoxy)수지를 사용하여 마운팅(mounting)하였고, 표면과 마운팅의 간극에 Ameron 사의 Amercoat 90으로 페인팅(painting) 한 후 24시간 상온에서 건조하였다. 그리고, 시험편을 모두 600-grit SiC paper로 연마한 후, Schlumberger사의

Potentiostat (SI 1286)을 사용하여 분극실험을 수행하였다. 상온과 고온 실험용의 부식조(corrosion cell)는 Fig. 2와 같다. 분극측정을 위해 부식조는 시험편 전극(working electrode)과 보조전극(counter electrode)으로서 2개의 탄소전극과 기준전극(reference electrode)을 감홍전극(calomel electrode)으로 구성하여 기준전극에 대한 부식전위를 측정하였다. 부식된 시험편의 표면처리는 부식상황이 손상되지 않도록 흐르는 물에서 부드러운 솜(cotton)으로 가볍게 세정한 후, 메탄올로 재 세척하였다.

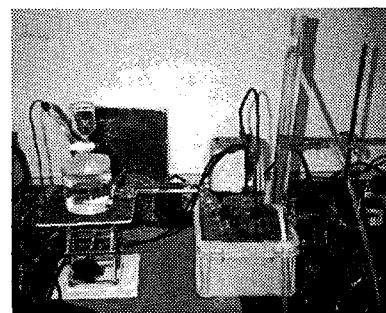
시험편은 부식조내에서 개회로 전위(open circuit potential)로 15초간 유지한 후 분극실험을 시작하였고, 동전위 분극실험(potentio-dynamic polarization)의 주사 속도(scan rate)는 0.166 mV/s로 하였다. 그리고, 보일러 등의 증기발생장치로부터 생성된 증기가 터빈에 유입되는 과정에서 혼입되는 각종 불순물 중에는 미량의 염화물과 황화물이 존재한다. 이들 불순물이 저압 터빈의 블레이드 표면에 부착 및 농축되면, 국부적으로 농도가 증가하게 되어 금속과 이를 부식성분간의 전기화학적 반응에 의해서 국부적인 부식작용이 일어나며, 특히 고온분위기 하에서 이와 같은 부식작용은 더욱 가속되는 것이 일반적이다. 그래서, 본 연구에서는 염화물과 황화물이 블레이드 표면에 농축되는 것을 고려하여, 부식용액의 농도를 NaCl 수용액의 경우 2.0wt%, 3.5wt%, 5.0wt%로 설정하고, Na₂SO₄ 수용액의 경우는 0.14wt%(0.01M), 1.4wt%(0.1M), 12.7wt%(1M)로 하였다. 그리고, 부식용액의 온도상승에 따른 재료의 부식민감성을 평가하기 위하여, 각 수용액의 농도별 온도를 25°C, 60°C, 90°C로 변화시켰다.

2.1.2 비등질산 부식시험(Huey test)

본 실험은 재료를 예민화 열처리(sensitizing heat treatment)하고, 끓는 질산용액에서 부식시킨 후, 질량 감소를 측정하여 입계부식의 정도를 평가하는 방법이다.⁽⁴⁾ 시험편은 Fig. 1의 (b)와 같이, 50×20×10mm로 제작하여 시험편의 모든 면을 100-grit SiC Paper로 연마하였다. Fig. 3의 실험 장치는 1리터 용량의 플라스크(flask)와 냉각기 및 1kW 용량의 히터(heater)로 구성하였으며, 65%의 끓는 질산(nitric acid)에서 48시간씩 5회에 걸쳐



(a) Corrosion cell for polarization test at ambient temperature



(b) Corrosion cell for polarization test at high temperature

Fig. 2 Corrosion cell for polarization test

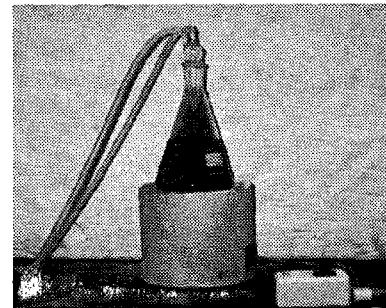


Fig. 3 Equipment for nitric acid test (Huey test)

부식시켰다. 그리고, 세척된 시편은 80°C에서 1시간 유지시켜 수분의 영향을 제거한 후, 전자저울로 시편의 무게를 측정하였다. 이상과 같은 과정을 반복적으로 수행하면서, 각 부식회수별 중량 손실(weight loss)을 측정하였으며, 방법은 때 실

혐이 끝날 때마다 중량을 측정하여 전회와의 차이를 계산함으로써, 부식에 의한 손실중량으로 하였다. 그리고, 이상의 결과로부터, 부식속도는 다음 식을 가지고 예측하였다.

$$\text{부식속도(cm/month)} = \frac{287 \times W}{(A \times d \times t)} \quad (2)$$

W: 중량 손실량(g), d: 밀도(g/cm³),
A: 시편의 표면적(cm²), t: 시험기간(month)

2.1.3 옥살산 에칭 시험(Oxalic acid etching test)

본 실험은 상대적인 입계부식의 정도를 판단하기 위한 것으로, 에칭 시험(etching test)을 거친 후, 부식된 표면조직으로 다른 열산 시험의 필요 여부를 판별하였다. 스텝 조직(step structure)이나, 이중 조직(dual structure) 또는 end grain I 조직이 나타나면, 입계 부식에 민감하지 않은 경우이고, ditch나 end grain II 조직이 나타나면, 입계 부식에 매우 민감한 경우라 할 수 있다.⁽⁴⁾

실험 장치는 Fig. 4와 같이 30V, 20A 용량의 직류전원 공급장치(DC power supply)와 전도성의 스테인리스 바이커로 구성하였으며, 이때, 시험편은 양극(+)에, 바이커는 음극(-)에 연결하였다. 시험편은 표면을 다이아몬드 연마제(diamond paste)로 1마이크로까지 폴리싱(polishing)을 행한 후, 옥살산 용액 중에서 1.5분 동안 1A/cm²의 전류밀도로 전해 에칭(etching)하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 분극시험

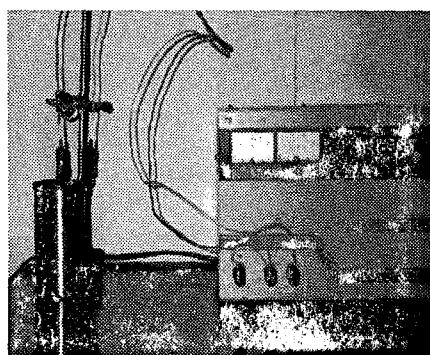


Fig. 4 Equipment for oxalic acid etching test

1) NaCl 수용액의 경우

Figs. 5-7은 NaCl 수용액의 온도(25°C, 60°C, 90°C)와 농도(2.0wt.%, 3.5wt.%, 5.0wt.%)에 따른 동전위분극곡선이고, Tafel 외삽법으로 구한 각 NaCl수용액의 온도에 따른 농도별 부식전류밀도는 Table 2와 같다. 본 연구에서 설정된 부식조건에서, NaCl수용액의 온도가 상승하면, 부식속도는 3.5wt%의 경우가 가장 빠르게 나타났다. 그리고, 부식전위는 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

12Cr합금강은 내식성뿐만 아니라 강도를 향상 시킨 마르텐사이트계의 스테인리스 강으로서, 0.18wt.% Ni을 함유하고 있는 동시에 P와 Cu가 포함되어 있기 때문에, 일반적인 스테인리스강과 같이 염수용액과 전기화학적 반응에 의해서 재료표면에 치밀하고 안정적인 산화피막을 형성하는 특성을 나타낸다.⁽⁵⁾ 그러나, 본 연구에서와 같이, 부식용액중의 용존산소(dissolved oxygen)를 고려하지 않은 상태에서도 온도가 상승하면, 용액의 점도가 감소함과 동시에, 부식활성 원소인 염화물 이온(Cl⁻ ion)의 활성도가 증가한다. 따라서, 재료표면의 산화막이 불안정해짐으로 인해서 부식이 촉진되며, 특히 3.5wt%의 NaCl 수용액의 경우에 이러한 특성이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나, NaCl 수용액의 농도가 3.5wt% 이상에서는 산소의 용해도 및 확산속도가 감소하기 때문에 부식속도는 다시 감소하게 된다.⁽⁶⁾

이상은 본 실험으로부터 3.5wt% NaCl 수용액의 경우가 동일 온도조건에서 부식속도가 가장 크고, 온도가 상승함에 따라서 부식속도가 증가하는 결과와 일치된다고 할 수 있다.⁽⁷⁾

Table 2 Electro-chemical corrosion characteristics in NaCl solutions by potentiodynamic polarization test

Corrosion Rate (mpy)	NaCl solution (wt.%)								
	25°C			60°C			90°C		
	2	3.5	5	2	3.5	5	2	3.5	5
Ec _{corr} (mV vs. SCE)	-64	-182.5	-184.6	-215.2	-292.6	-287.2	-188.1	-232.2	-272.0

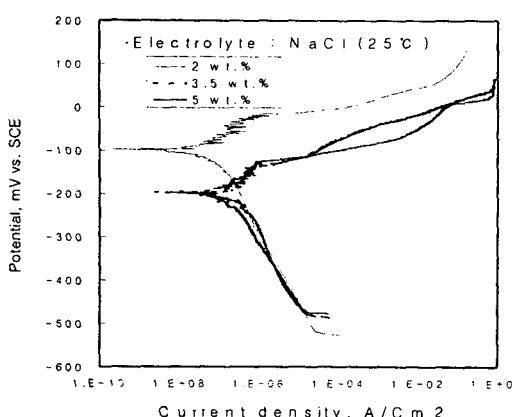


Fig. 5 Potentiodynamic polarization curves in NaCl solution(25°C)

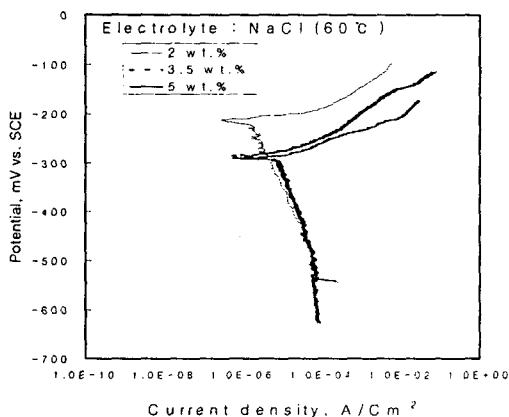


Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves in NaCl solution(60°C)

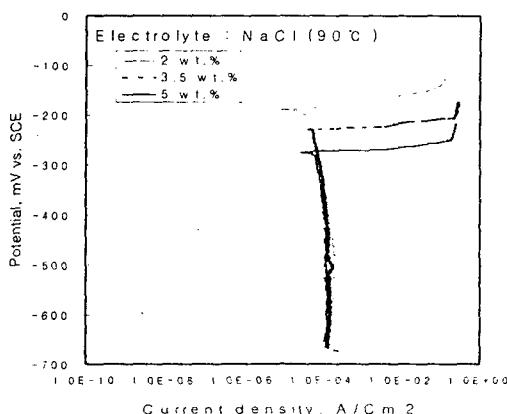


Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves in NaCl solution(90°C)

2) Na_2SO_4 수용액의 경우.

Figs. 8-10은 Na_2SO_4 수용액의 온도(25°C, 60°C, 90°C)와 농도(0.14wt.% (0.01M), 1.4wt.% (0.1M), 12.7wt.% (1M))에 따른 동전위 분극곡선이다. Tafel 외삽법으로 구한 각 Na_2SO_4 수용액의 온도에 따른 농도별 부식전류밀도는 Table 3과 같으며, 부식속도는 부식전류밀도가 클수록 증가함을 알 수 있다.

본 연구에서 설정된 부식조건하에서, Na_2SO_4 수용액의 온도와 농도가 증가하면, 부식속도는 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는, NaCl 수용액의 결과와 고찰에서 언급한 바와 같이, 12Cr합금강은 강도와 내식성을 가지고 있음에도 불구하고, 동일 농도조건에서 용액의 온도가 상승하면, 접도가 감소함과 동시에, 부식활성 원인 황화물 이온의 활성도가 증가함에 따라서 부식이 촉진되었기 때문이라고 판단된다. 그리고, 동일 온도조건 하에서도 용액의 농도가 증가하면, 부식속도가 상승하며, 온도가 변화하더라도 이러한 경향은 동일하다. 이것은, 농도가 증가할 수록 전기화학적 반응에 의해 생성되는 산화막이 안정적인 경향을 나타내나, Na_2SO_4 수용액은 NaCl 수용액과는 달리 자체적으로 산소기(oxygen, O^{2-})를 포함하고 있기 때문에, 산화막이 안정적이라 하더라도 용존산소 또는 화학적 반응에 의해서 생성되는 산소의 영향에 의해서 산화막이 불안정해지고, 따라서, 부식활성 요소의 확산이 활발해졌기 때문인 것으로 판단된다.^(6,7)

Table 3 Electrochemical corrosion characteristics in Na_2SO_4 solutions by potentio-dynamic polarization test

	Na_2SO_4 solution (wt.%)									
	25°C			60°C			90°C			
	0.14	1.4	12.7	0.14	1.4	12.7	0.14	1.4	12.7	
Corrosion Rate (mpy)	0.008	0.012	0.056	0.057	0.082	0.118	0.173	0.193	0.393	
Ecorr (mV vs. SCE)	-168.5	-149.8	-246.7	-116.8	-117.7	-180.0	-65.7	-33.4	-55.2	

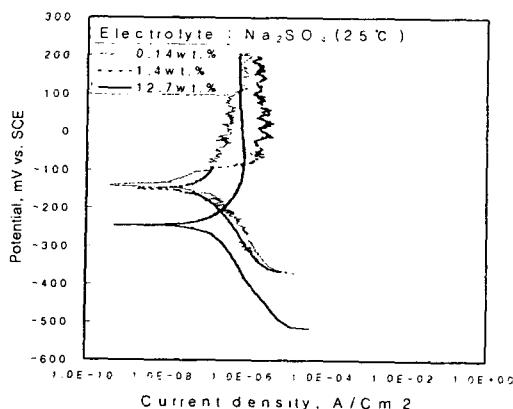


Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves in Na_2SO_4 solution(25°C)

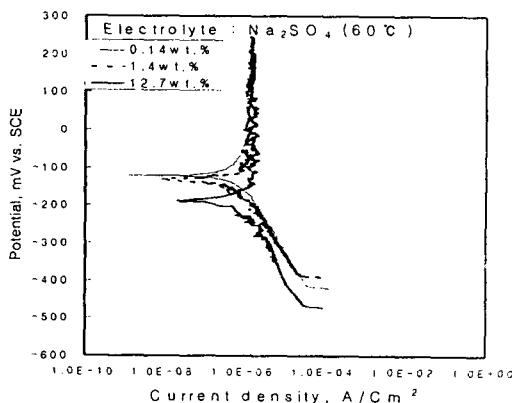


Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves in Na_2SO_4 solution(60°C)

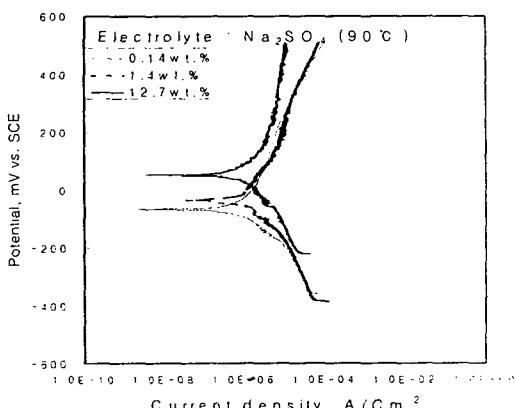


Fig. 10 Potentiodynamic polarization curves in Na_2SO_4 solution(90°C)

2.2.2 비등질산 시험결과

Fig. 11은 각 실험기간에 따른 부식속도 변화를 나타낸 것으로, 실험기간이 경과함에 따라서 부식속도의 증가량은 점차 둔화되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 12는 실험후의 부식조직을 나타낸 것이다. 실험내용과 방법에서 언급한 바와 같이, 본 실험은 재료를 예민화 열처리하고, 끓는 질산 용액에서 부식시킨 후, 질량 감소를 측정함으로써 입계부식의 민감성을 평가하는 것이다. Cr합금강을 예민화 처리하면, 크롬탄화물이 입계에 석출됨으로써, Cr결핍층이 형성됨과 아울러 입계부식이 발생되는 특성으로부터, Fig. 12와 같이, 마르텐사이트의 결정립계 (crystal boundary)부분이 상당히 부식되었음을 관찰할 수 있다. 그러나, 시간이 경과함에 따라서 부식속도의 증가가 둔화되는 것은, 전기화학적 반응에 의해 부식이 진행되면서 생성된 부식 생성물이 재료표면에서 보호막의 역할을 했기 때문인 것으로 판단된다.

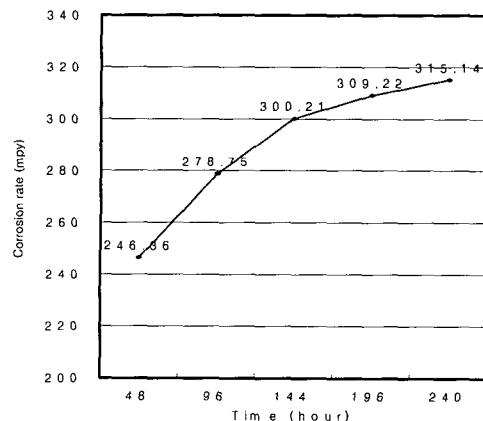


Fig. 11 Effect of test period on corrosion rate

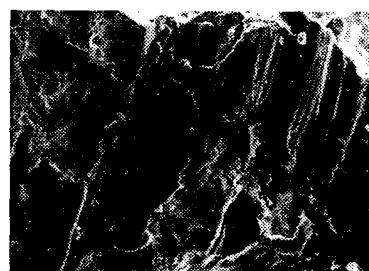


Fig. 12 Microstructure of 12Cr steel after Huey test($\times 1000$)

2.2.3 옥살산 에칭시험 결과

Fig. 13은 옥살산 에칭 시험한 12Cr 합금강의 표면조직을 나타낸 것이다. 본 실험은 입계부식의 정도를 에칭 시험을 통해 측정함으로써, 입계부식에 대한 민감성을 판단하는 데 목적이 있으므로, 옥살산 에칭 시험 결과, 12Cr 합금강은 마르텐사이트조직을 구성하고 있고, 입계가 세밀하기 때문에, 오스트레나이트계열의 스테인리스강에 비해서 예민화의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 것으로 평가되었다.

이상, 터빈 블레이드재료인 12Cr 합금강의 염화물 및 황화물에 대한 부식기구와 부식민감성을 파악하고, 입계부식에 대한 민감성을 평가한 결과는 터빈 블레이드의 내환경 특성과 신뢰성 및 부식피로에 의한 손상원인을 해석하는 데 매우 중요한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 이러한 차원에서 수행한 12Cr 합금강에 대한 전기화학적 부식실험 결과를 가지고, 부식피로특성을 평가하기 위한 실험조건을 설정하였다.

3. 파괴역학적 부식피로특성

12Cr 합금강은 화력 발전 플랜트의 터빈 블레이드재료로 사용되고 있기 때문에, 중기 중에 혼입된 미량의 불순물들이 터빈 블레이드의 표면에 부착되어 농축되면, 금속과의 전기화학적 반응에 의해 블레이드 표면에는 부식 피트가 생성된다. 이것은 응력집중에 의한 피로균열 발생원이 되어, 결국 부식피로에 의한 손상으로 이어지게 된다. 따라서, 12Cr 합금강의 부식피로에 의한 파괴특성을 평가하는 것은 발전설비의 건전성 확보와 과손사고의 예방 및 안전설계차원에서 매우 중요하고도 필요한 사항이다.

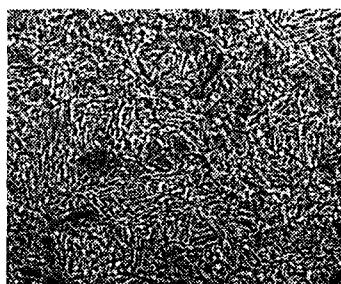


Fig. 13 Microstructure of 12Cr steel after oxalic acid etching test($\times 540$)

본 연구에서는 12Cr합금강에 대한 전기화학적 부식 특성을 평가한 결과로부터 설정된 Table 4의 환경조건 하에서 ASTM E647⁽⁸⁾에 의거하여 재료의 부식피로 실험을 수행하고, 부식피로균열성장 특성을 파괴역학적으로 해석하였다.

3.1 실험장치 및 방법

부식피로 실험에 사용된 실험장치는 부식피로 전용으로 자체설계 및 제작한 수평식(horizontal type) 피로시험기로서, 전체적인 구성은 Fig. 14와 같다. 그리고, 부식피로에 의한 균열길이는 공기 중 피로실험을 통하여 얻은 식 (3)의 전위와 균열길이 관계인 교정곡선(calibration curve)을 이용하여 측정하였다. 부식피로 실험에 있어서, 직류전위차법(DCPD)에 의한 전위 변화량 측정을 위하여 직류전원공급장치(DC power regulator)를 통하여 일정한 전류를 시험편에 공급하였으며, 전류의 공급은 Hicks와 Pickard⁽⁹⁾가 제시한 방법을 따랐다.

$$\left(\frac{a}{w}\right) = -0.273 \left(\frac{V}{V_r}\right)^3 + 1.194 \left(\frac{V}{V_r}\right)^2 - 1.215 \left(\frac{V}{V_r}\right) + 0.575 \quad (3)$$

a: Crack length(㎟), W: Width(㎟),

V: Measuring voltage(V), V_r: Reference Voltage(V)

Table 4 Test methods and environments for evaluating corrosion fatigue characteristics

Corrosion Fatigue Test (°C)	Air	distilled water		3.5wt.% NaCl solution			1M Na ₂ SO ₄ solution		
	25	25	60	90	25	60	90	25	60

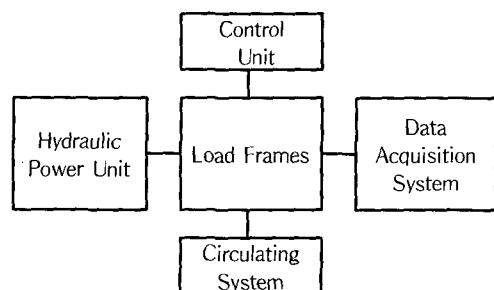


Fig. 14 Schematic diagram of horizontal corrosion fatigue tester

3.2 부식피로실험 결과 및 고찰

Fig. 15는 전기화학적 부식열화특성 평가 결과로부터 설정된 중류수, 3.5wt.% NaCl 수용액 및 12.7wt% (1M) Na_2SO_4 수용액을 여러 가지 온도로 변화시켜 수행한 12Cr합금강의 부식피로특성 곡선을 나타낸 것이고, Table 5는 각 부식피로 특성 곡선으로부터 Pari's law를 만족하는 균열 안정성 장 영역에서의 C와 m값을 구한 결과이다. 이상의 결과로부터 각 부식환경별 12Cr 합금강의 부식피로 특성을 정리하면, 다음과 같다.

a) 중류수의 경우, Fig. 15에 나타낸 바와 같이, 상온에서는 전체적으로 공기 중에 비해 특별한 차이는 없으나, 온도가 상승함에 따라 동일 ΔK 범위에서 공기중과 상온에 비해 전체적으로 균열 성장속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 중류수의 온도가 상승함에 따라서, 균열선단에서의 전기화학적인 부식활성도가 증가되어 균열진 전기구(crack growth mechanism)에 변화가 생기기 때문이다. 즉, 균열진전형태가 상온에서는 Fig. 16(a)의 공기 중의 비열화재와 같이 입내형(trans-granular type) 진전형태를 보이나, Fig. 16(b)에 예시(90°C)된 바와 같이, 온도가 상승하게 되면, 비열화재에 비해 입계형(inter-granular type)이 지배적인 입내+입계+딤풀(dimple)의 혼합형태를 나타냄으로 인해서 결과적으로 균열성장속도가 증가한 것으로 판단된다.

b) 3.5 wt.% NaCl 수용액에서의 균열성장특성은 실험결과 공기중과 중류수에 비해 상온에서도 동일 ΔK 에서 균열진전속도가 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 온도가 상승함에 따라서, 균열진 전형태가 Fig. 16(c)에 예시된 바와 같이, ΔK 가 증가함에 따라 입계형태 비율이 증가하는 입계+딤풀의 형태를 보이다가 $a/W=0.7$ 정도에서는 입계 형태가 지배적인 균열진전형태로 변화되고 있기 때문에, 결과적으로 온도가 상승함에 따라서 균열성장속도가 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 이것은 전기화학적인 분극시험 결과에서 온도가 상승할수록 부식속도가 증가하는 경향과 일치되고 있음을 알 수 있다.

c) 12.7wt% (1M) Na_2SO_4 수용액에서의 균열성장 특성은 상온에서 공기 중과 큰 차이는 없으나, 온도가 상승함에 따라 동일 ΔK 에서 공기 중에 비해 균열성장속도가 상당히 빠른 경향을 나타내었다. 그리고, 균열진전기구, 즉 파면형태는

Fig. 16(d)에 예시된 바와 같이 3.5wt.% NaCl수용액과 유사한 특성을 보였다. 낮은 ΔK 에서 부식피로균열은 입계+입내+딤풀의 혼재된 진전형태를 보이고 있으나, 온도와 ΔK 가 증가함에 따라 입계가 지배적인 입계+��풀의 형태로의 변화를 보이다가 높은 ΔK 영역으로 갈수록 입계형태로 전환되고 있음이 관찰되었다. 그리고, 60°C와 90°C 균열진전속도가 역전되는 특이 현상은 이상과 같은 균열진전기구의 변화에서 기인된 것으로 판단된다.

이상에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 설정한 부식성 환경과 조건에서 부식용액중의 부식활성인자들(Cl^- , SO_4^{2-})이 균열성장특성에 미치는 영향은 균열성장 초기에는 분명하게 나타나지 않았지만, 온도가 상승하고, ΔK 가 증가할수록 온도 상승에 의한 균열선단에서의 전기화학적인 부식인자의 활성이 증가됨으로써 뚜렷하게 나타났다.

Table 5 Experimental estimation of C, m

	Air	distilled water			NaCl solution			Na_2SO_4 solution		
		25°C	60°C	90°C	25°C	60°C	90°C	25°C	60°C	90°C
C	8E-8	1E-8	3E-8	1E-9	2E-9	1E-8	1E-8	7E-8	1E-8	3E-10
m	2.28	2.93	3.55	4.09	3.16	3.28	4.29	3.08	3.16	4.36

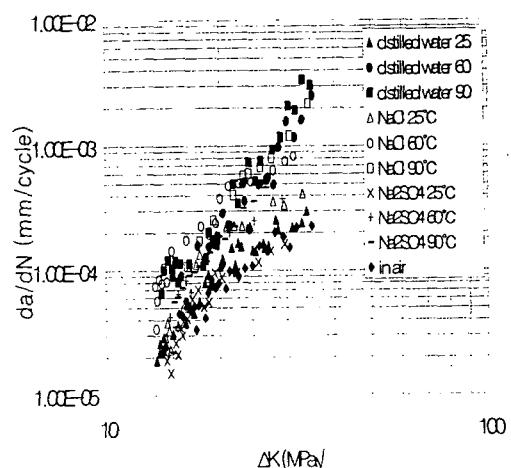


Fig. 15 Relations between da/dN - ΔK

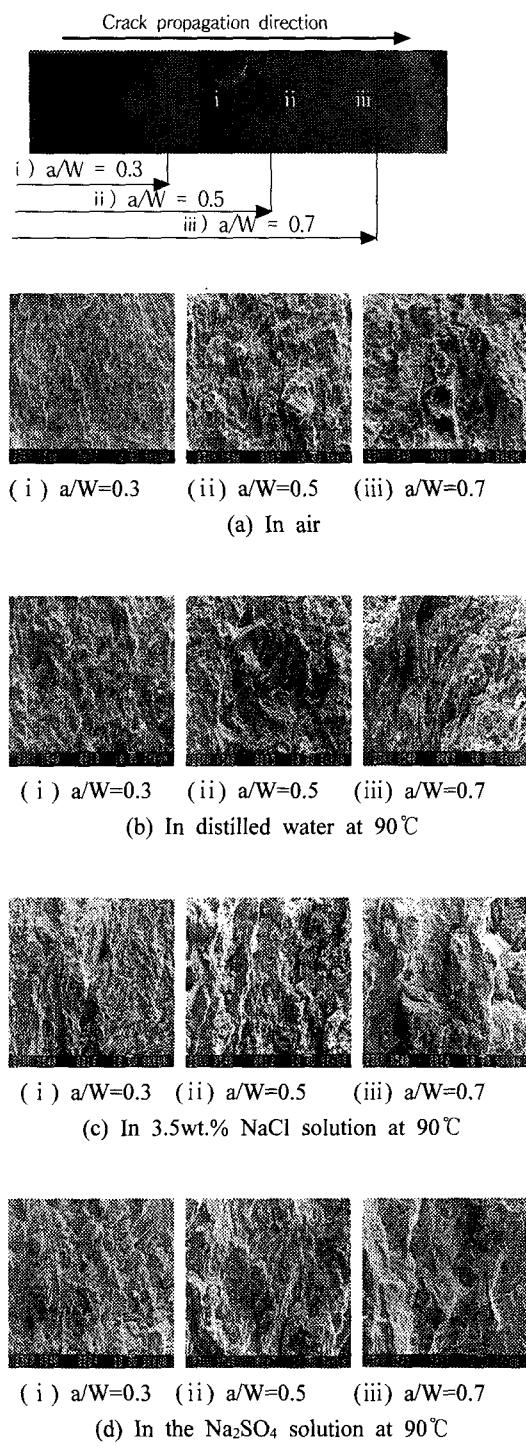


Fig. 16 Fractographs of fracture surface

5. 결 론

터빈 블레이드 재료로 사용되고 있는 12Cr합금 강에 대한 전기화학적 부식시험을 수행하여 부식 민감성을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 부식피로균열의 성장특성을 정량적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 여러 가지 환경과 조건을 고려하여 12Cr합금강의 전기화학적인 부식민감성을 평가한 결과, 3.5wt% NaCl 수용액과 12.7wt%(1M) Na₂SO₄ 수용액에 대한 부식민감도가 비교적 크고, 온도가 상승함에 따라 부식속도가 증가하는 특성을 나타내었다. 특히, 고온의 증류수에 의해서도 부식에 의해 열화될 수 있음이 확인되었다.

(2) 증류수, 3.5wt% NaCl 및 12.7wt% Na₂SO₄ 수용액에서의 균열진전특성은 상온 하에서 공기 중 비열화재와 구별될 만큼 차이가 없으나, 온도가 상승할수록 균열진전속도는 비열화재에 비해 증가한다.

(3) 증류수, 3.5wt% NaCl 및 12.7wt% Na₂SO₄ 수용액에서의 균열진전속도가 온도가 상승함에 따라서 증가하는 이유는 부식인자의 활성도가 증가하여 균열진전기구가 변하기 때문이다. 대체로, 저온과 균열성장초기에는 입내형을 보이다가 온도가 상승하고, 균열이 진전됨에 따라서 입계형이 지배적인 균열성장특성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 센터와 한국중공업 기술연구소의 지원에 의해서 이루어 졌으며, 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 1985 “腐食과破壊, pp. 71~74., 日本機械學會
- (2) ASTM G5, 1987, "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements," *Annual Book of ASTM standards*, pp. 73~76.
- (3) Dean, S. W., 1971, *Handbook on Corrosion Testing and Evaluation*, John Wiley, p. 171.

- (4) ASTM A262, 1991, "Standard Practice for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steel", *Annual Book of ASTM standards*, pp. 46~50.
- (5) ASTM STP425, 1966, "Stress Corrosion Cracking of Stainless steels Mechanism of Crack Initiation in Chloride Solutions", p. 155.
- (6) Herbert H. Uhlig and Winston, R. Revie, 1985, *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley, 3rd ed., pp. 96~111.
- (7) Speller, F.N., 1951, *Corrosion, Causes and Prevention*, McGraw-Hill, 3rd ed., p. 168.
- (8) ASTM E647-95, 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", *Annual Book of ASTM standards*, pp. 578~614.
- (9) Hicks, M. A. and Pickard, A. C., 1982, "A Comparision of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating the Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination", *International Journal of Fracture*, Vol. 20, pp. 91~101.