

12Cr 합금강의 부식특성 및 인공열화된 12Cr 합금강의 피로특성

조선영[†] · 김철한^{*} · 배동호^{*}
(2000년 7월 14일 접수, 2001년 2월 17일 심사완료)

Corrosive Characteristics of 12Cr Alloy Steel and Fatigue Characteristics of the Artificially Degraded 12Cr Alloy Steel

Sun Young Cho, Chul Han Kim and Dong Ho Bae

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

Abstract

To estimate the reliability of 12Cr alloy steel, the material of turbine blade in the steam power plant, its corrosion susceptibility and fatigue characteristics in NaCl and Na₂SO₄ solution with the difference of concentration and temperature was investigated. The polarization tests recommended in ASTM G5 standard for corrosion susceptibility in the various corrosive solutions was estimated. It showed that the higher temperature, the faster corrosion rates and corrosion rates were the fastest in 3.5 wt.% NaCl and 1M Na₂SO₄ solution. From these results, the degradation conditions were determined in distilled water, 3.5 wt.% NaCl and 1M Na₂SO₄ solution at room temperature, 60°C and 90°C during 3, 6 and 9 months. Its surface had a few pits for long duration. But, it was not susceptible in sulfide and chloride condition of several temperatures. If the degraded 12Cr alloy steel and non-degraded one were compared with fatigue characteristics, Any differences were not found regardless of temperature and degradation period.

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 중요요소인 증기터빈(steam turbine)의 터빈블레이드(turbine blade)는 순환기 계통의 누설, 과열기와 보일러 내의 불순물의 용해 등 다양한 불순물들

이 과열기를 거쳐 터빈(turbine)에 유입됨으로 인해서 부식 및 열화 된다.⁽¹⁻⁵⁾ 특히, 과잉 알칼리나 염화물(chloride), 황화물(sulfide) 등이 터빈 블레이드에 흡착 및 농축되면, 금속과의 전기화학적 반응에 의해 터빈 블레이드 표면에는 표면부식 또는 부식 피트(corrosion pit)가 형성되어 운전 중 피로파괴의 원인을 제공하기도 한다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 손상에 이르는 터빈블레이드의 손상기구를 규명하고, 열화정도에 따른 파괴특성을 체계적으로 평가하는 것은 발전설비의 사고예방과 안전설계를 위해 매우 중요한 의미를 가질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 부식열화에 의한 손상사태가 흔히 보고되고 있는 증기터빈 출구 쪽 근방의 저압·저온단계(low pressure and temperature stage)의 습증기(wet vapor) 환경에서 장시간 노출되는 터빈 블레이드

[†] 책임저자, 회원, 한국 원자력 연구소
E-mail : chosy@sbsmail.net
TEL : (042)935-9033 FAX : (042)868-8346
^{*} 회원, 성균관대학교 기계공학부

재료의 부식열화 특성과 부식에 의해 열화된 경우의 피로특성을 실험적으로 평가하여 12Cr 합금강의 부식특성 및 열화후 피로특성에 대한 기초적 자료를 제공하고자 하였다. 이를 위해서, 터빈 블레이드 재료인 12Cr 합금강의 부식성 환경에 대한 전기화학적 부식민감성을 먼저 평가하고, 그 결과로부터 결정된 가장 가혹한 환경에서 온도와 열화기간을 매개변수로 하여 인공열화된 재료의 용액별, 온도별, 기간별에 따른 파괴특성을 공기 중의 피로실험을 통하여 파괴역학적으로 평가하였다.

2. 12Cr 합금강의 부식특성

2.1 시험편 및 실험방법

시험편 재료는 화력발전용 터빈 블레이드 재료로 사용되고 있는 마르텐사이트계의 스테인리스강인 12Cr 합금강으로서, 0.18wt.% Ni과 P 및 Cu를 함유하고 있어 부식용액과의 전기화학적 반응에 의해서 재료표면에 치밀하고 안정적인 산화피막을 형성하는 특성이 있기 때문에, 내식성이 우수하다.⁽⁶⁾ 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시험편은 Fig. 1과 같이 10×10×10mm의 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 분극실험에 사용하였다. 실제로 보일러 등의 증기발생장치로부터 생성된 증기는 터빈에 유입되는 과정에서 염화물과 황화물이 혼입된다. 이들 불순물이 저압 터빈의 블레이드 표면에 부착 및 농축되면, 국부적으로 농도가 증가하게 되어 금속과의 전기화학적 반응에 의해서 국부적인 부식작용이 일어나며, 특히 고온분위기 하에서 이와 같은 부식작용은 더욱 가속되는 것이 일반적이다.⁽⁷⁾ 그래서, 본 연구에서는 염화물, 황화물이 블레이드 표면에 농축되는 것을 고려하여, Table 2와 같이 NaCl 수용액과 Na₂SO₄ 수용액의 농도를 설정하였고, 부식용액의 온도상승에 따른 재료의 부식열화특성을 평가하기 위하여, 각 수용액의 농도별 온도를 25, 60, 90℃로 변화시켰다. 여기서, 상온은 공기중의 비열화재에 대

한 부식의 영향을 비교하기 위한 것이고, 60, 90℃의 경우는 증기터빈의 저온·저압단계인 습증기의 온도상황을 고려하여 설정한 것이다. 부식현상이 재료와 부식성 환경간의 전기화학적 반응에 의한 것임을 고려해서 ASTM G5⁽⁸⁾에 의거하여 재료에 인위적인 전위를 가하여 동전위 분극 시험을 수행하였으며, 부식속도(corrosion rate)는 Faraday 법칙에 따라 식 (1)과 같이 계산하였고, 부식전류밀도(*i*_{corr})는 Tafel 외삽법을 이용하여 정하였다.^(9,10)

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

E.W (equivalent weight) = ∑ f_iM_i/n_i,

f_i : 원자분율, M_i : 원자량, n_i : 원자가

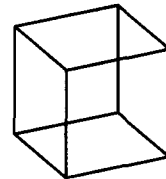
i_o : exchange current density

mpy : milli inch per year

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

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Content(%)	0.16	0.34	0.46	0.016	0.003	0.18	11.9	0.09

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
989.4	1205	13



Dim. : 10×10×10

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

Table 2 Test conditions for evaluating polarization characteristics

NaCl (wt.%)			Na ₂ SO ₄ (M)		
25℃	60℃	90℃	25℃	60℃	90℃
2.0	2.0	2.0	0.01	0.01	0.01
3.5	3.5	3.5	0.1	0.1	0.1
5.0	5.0	5.0	1	1	1

2.2 실험결과 및 고찰

실험조건에 따라 Table 3과 같이 부식속도와 부식전류밀도를 정리하였다. Figs. 2, 3은 NaCl과 Na₂SO₄ 수용액의 온도가 90°C인 경우의 농도에 따른 동전위 분극곡선을 예시한 것이고, Fig. 4는 실험조건별 부식속도를 비교· 도시한 것이다. 본 실험에서 설정된 부식환경조건하에서는 NaCl 수용액의 경우, 설정온도에 대해 3.5wt.%가 가장 부식속도가 빠르게 나타났으며, 온도가 증가할수록 부식속도도 증가하는 것으로 나타났다. Na₂SO₄ 수용액의 경우는 온도와 농도가 증가할수록 부식속도가 증가하여 농도가 1M일 때 90°C인 경우가 가장 빠른 부식속도를 나타내었다. 이러한 결과는 12Cr합금강이 강도와 안정적인 산화피막에 의한 내식성을 가지고 있음에도 불구하고, 동일 농도조건에서 용액의 온도가 상승하면, 용액의 점도(viscosity)가 감소함과 동시에 수용액 중의 용존산소, 부식활성인자(Cl^- , SO_4^{2-}) 활성도(activity)가 증가하여 전기화학적 반응에 의한 부식작용이 촉진되어 산화막이 불안정해짐에 따라 부식속도가 증가하게 된 것으로 판단된다.^(11,12) 이상의 결과로부터, 본 실험에서 설정된 부식환경 하에서 12Cr 합금강의 부식에 의한 열화속도가 가장 빠르게 나타나는 온도와 농도는 90°C 및 3.5wt%NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액인 경우로 평가되었다.

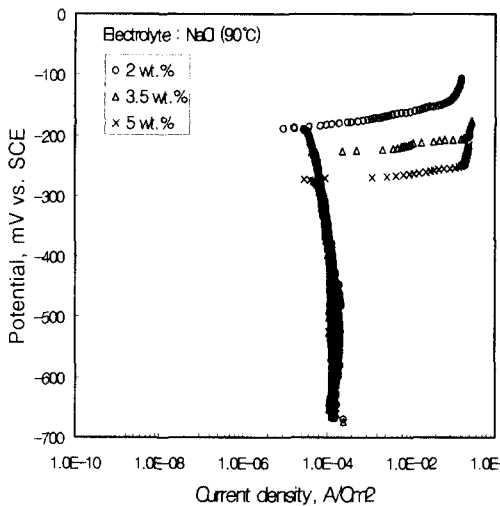


Fig. 2 Potentiodynamic polarization curves in NaCl solution (90°C)

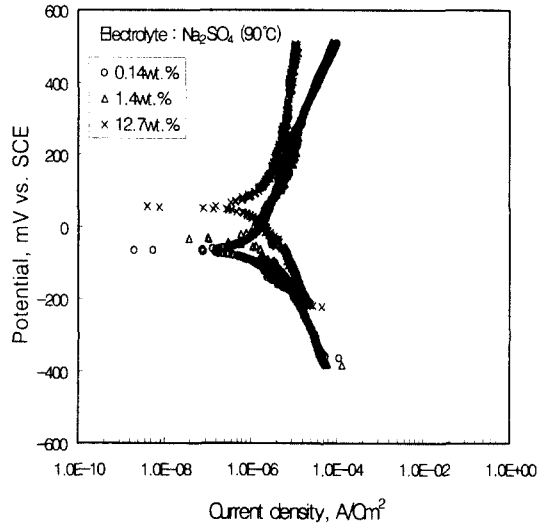


Fig. 3 Potentiodynamic polarization curves in Na₂SO₄ solution (90°C)

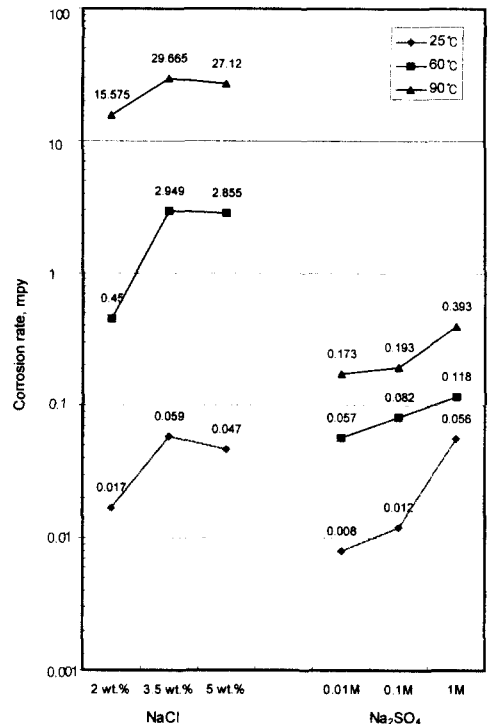


Fig. 4 Effect of temperature and percentage of solution on the corrosion rate in potentiodynamic polarization test

Table 3 Corrosion rates in NaCl and Na₂SO₄ solutions by potentio-dynamic polarization test (mpy)

NaCl solution (wt.%)								
25℃			60℃			90℃		
2	3.5	5	2	3.5	5	2	3.5	5
1.7	5.9	4.7	45	294.9	285.6	1557.5	2967	2712

Na ₂ SO ₄ solution (M)								
25℃			60℃			90℃		
0.01	0.1	1	0.01	0.1	1	0.01	0.1	1
0.008	0.012	0.056	0.057	0.082	0.118	0.173	0.193	0.393

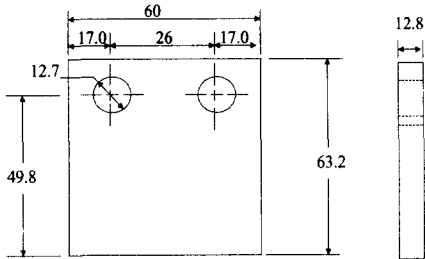


Fig. 5 Configuration of specimen (unit:mm)

3. 부식환경에서 인공열화된 12Cr 합금강의 공기 중 피로특성

3.1 시험편

인공부식열화를 위한 시험편의 형상은 Fig. 5와 같으며, 노치를 가공하지 않았는데, 그이유는 열화기간동안 노치 선단이 부식에 의해 둔화될 수 있기 때문이다. 따라서 노치는 열화기간이 만료된 후, 공기 중 피로시험 직전에 방전가공(EDM)하였다. 시험편 표면은 균일하게 연마하여 인공열화시 표면결함으로 인한 국부부식 및 피팅(pitting)의 발생을 최대한 억제하였다. 노치로부터의 예균열(pre-crack)은 하중 감소법에 의해 실제 실험하중의 최대치보다 20%가 높은 하중에서 시작하여, 균열이 1mm진전할 때마다 하중을 5%씩 떨어뜨려 최종균열길이의 1mm전부터는 실험하중과 같도록 하였다.

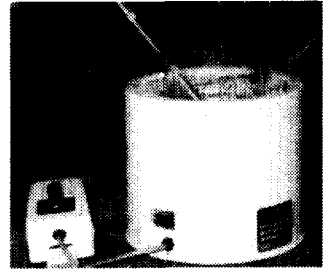


Photo. 1 Configuration of corrosion cell for artificial degradation

3.2 실험조건 및 방법

열화조건은 분극실험에서 부식속도가 가장 빠르게 나타난 3.5wt.% NaCl 수용액, 12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액의 농도로 설정하고, 비교데이터를 위해 증류수에서도 열화시켰으며, 구체적인 실험 조건은 Table 4와 같다. 재료의 인공열화를 위해 사용된 부식조의 형상은 Photo.1과 같다. 부식조(corrosion chamber)는 비이커(beaker), 용액가열용 히터(heater), 용액의 온도 조절을 위한 열전대(thermo-couple) 및 온도조절 장치로 구성하였다. 인공열화 방법은 비이커내의 부식용액 중에 시편을 침적시키고, 비이커 외부를 감싸고 있는 전기히터(electric heater)로 가열함과 동시에 비이커 내에 시편과 함께 용액 중에 침적되어 있는 열전대로 설정된 온도(25℃, 60℃, 90℃)가 일정하게 유지되도록 온도제어기(control panel)에 연결하여 제어하였다. 각 비이커에 채워져 있는 3.5wt% NaCl 수용액과 12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액의 농도를 유지하기 위해서는 주사형 용액공급장치를 이용해 150시간마다 용액을 교환함으로써 열화기간중의 용액의 농도를 일정하게 유지시켰다. 이상의 인공열화조건 하에서, 부식에 의한 열화가 재료의 피로파괴특성에 미치는 영향을 가능한 충분히 파악할 수 있도록 하기 위해서 열화기간을 3, 6, 9개월로 설정하였다. 이상에서 인공열화된 열화재의 예균열과 공기 중 피로시험을 위해서는 유압식 재료시험기(MTS Co. capacity: 10ton)를 사용하였으며, 하중반복속도(f)=20 Hz, 하중비($R = P_{min}/P_{max}$)=0.1로 하였다. 그리고, 피로하중에 의한 균열진전 길이는 배율 50배인 광학현미경을 이용하여, 시편 전·후면의 피로균열을 측정하고, 그 평균값을 취하였다.

Table 4 Test methods and environments for artificial degradation (unit : month)

Distilled water			3.5wt.% NaCl			1M Na ₂ SO ₄		
25℃	60℃	90℃	25℃	60℃	90℃	25℃	60℃	90℃
3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	6	6	6	6	6	6	6	6
9	9	9	9	9	9	9	9	9

3.2 실험결과 및 고찰

Photos. 2~4는 각각 증류수, 3.5wt.% NaCl, 12.7wt.% (1M) Na₂SO₄ 수용액을 부식용액으로 하고, 25℃, 60℃, 90℃에서 9개월 동안 열화 시킨 시편의 외표면 상황을 20배 확대하여 나타낸 것이다.

증류수의 경우 Photo. 2와 같이, 25℃에서 인공 열화된 시편의 표면상태는 비열화재와 별 차이가 없을 정도로 표면부식과 부식 피트(corrosion pit)가 관찰되지 않았으나, 열화기간이 길수록, 용액의 온도가 증가할수록 약간의 표면부식과 이로 인한 부식산화물이 표면을 덮고 있어 시편의 표면이 변색되었음을 관찰할 수 있었다. 증류수중에서 장기간의 인공부식열화에도 불구하고 재료의 기계적 성질에 큰 영향을 미칠 만큼 표면부식과 부식피트의 발생이 관찰되지 않은 것은 12Cr 합금강의 내식성과 안정된 산화피막에 기인한 것으로 판단된다.

3.5wt.% NaCl 수용액의 경우, Photo. 3과 같이, 열화시간이 경과함에 따라 표면부식이 진행되었으며, 6개월이 경과된 시편의 경우는 증류수 9개월의 표면상태와 유사한 부식정도를 나타내고 있었다. 이것은 염화물 환경에서 시험편이 부식활성 인자인 Cl⁻의 전기화학적 부식반응으로 증류수에 비해 촉진되었음을 의미한다. 온도가 증가할수록 이러한 경향은 크게 나타날 것이며, 이것은 전기화학적 분석실험결과를 통해 예측이 가능하다. 그리고, 시편의 모서리 부근이 표면에 비해서 표면부식과 부식피트의 발생이 심한 것은 시편가공과정에서 발생한 금속조직의 변화로 전기화학적 국부전지가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액의 경우, Photo. 4과 같이, 3.5wt.% NaCl 수용액 중에서 열화된 동일 시편에 비해 부식정도가 상대적으로 크지 않

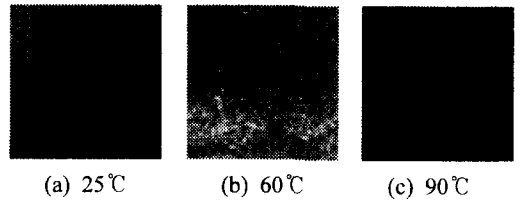


Photo. 2 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in distilled water

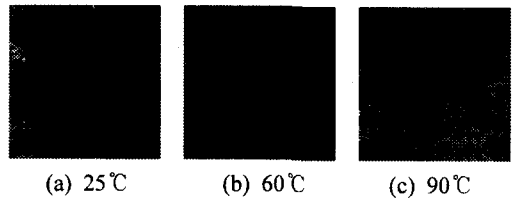


Photo. 3 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in 3.5wt.% NaCl solution

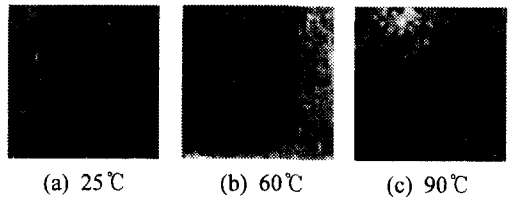


Photo. 4 Surface conditions of artificially degraded specimen for 9 months in 1M Na₂SO₄ solution

음을 확인할 수 있었으며, 시편의 모서리 부분과 표면에서의 부식피트 발생도 적었는데 이는 Fig. 4에서와 같이 NaCl 수용액의 부식속도보다 Na₂SO₄ 수용액의 부식속도가 더 느리기 때문이다. 그러나, Na₂SO₄ 수용액의 농도와 온도가 증가할수록, 열화기간이 길어질수록 상대적 부식정도는 커짐을 관찰할 수가 있었다. 이상과 같이 본 연구에서 설정한 여러 가지 환경에서 장기간 인공열화를 수행한 결과, 대체로 부식활성인자를 가지고 있는 염화물과 황화물 환경에서는 증류수에 비해 표면부식 또는 부식피트의 발생빈도와 정도가 높음을 확인할 수 있었으나, 외형적으로는 재료의 파괴특성에 영향을 미칠 만큼 단면적 감소라든가 발생된 피트의 밀도가 크지 않았다. 그러나, 부식성 환경에 침적된 상태로 장기간에

걸쳐 이루어진 부식열화에 의해 의한 재료의 부식 및 열화가 예상되고, 이러한 결과가 재료의 파괴특성에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다고 사료되어 인공열화에 대한 공기 중 피로실험을 수행하였다.

Fig. 6은 25°C, 60°C, 90°C의 증류수, 3.5wt.% NaCl 수용액, 12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액 중에서 3개월, 6개월, 9개월 동안 열화 시킨 인공열화재의 공기 중 피로특성을 종합적으로 비교 도시한 것이다. 증류수의 경우, 각 온도에 따른 3, 6, 9개월의 경우 공기 중 피로시험 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었는데, 이는 열화기간동안 12Cr합금강의 내식성으로 인해 피로강도 저하를 발생시킬 만큼 열화가 일어나지 않았음을 의미한다. 3.5wt.% NaCl 수용액 중에서 3, 6, 9개월 동안 열화 시킨 시편의 피로균열성장특성의 경우도 비열화재와 비교해 보면, 열화기간과 온도에 크게 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있는데, 이는 부식에 의한 표면열화가 균열진전을 가속시킬 만큼 크지 않았음을 의미한다. 그리고, 12.7wt.%(1M) Na₂SO₄ 수용액에서 동기간 동안 인공열화된 경우도 역시 증류수 및 3.5wt.% NaCl 수용액에서와 유사한 균열성장 특성을 나타내고 있는 것으로 미루어, 열화기간과 온도에 크게 영향을 받지 않았음을 확인할 수 있다. 열화재의 공기중 피로시험결과를 Paris law에 따라 Table 5와 같이 정리하였다. 이상과 같이, 여러 가지 부식환경 조건하에서 인공열화된 12Cr합금강의 파괴특성에 대한 열화의 영향을 검토하기 위해 공기중 피로실험을 수행한 결과, 장기간의 부식열화에 의해 표면부식의 침투효과가 예상되지만, 재료의 피로파괴특성에 미칠 만큼 그 영향은 크지 않았음을 확인할 수 있었다. 가혹한 부식환경하에서 장기간 인공열화 시켰음에도 불구하고 피로특성에 뚜렷한 영향이 나타나지 않은 이유는 무부하상태에서 재료 표면이 부식용액과 접촉하여 전기화학적 반응을 일으킴으로 인해서 열화초기에는 어느 정도 재료 표면이 부식되지만, 일정 시간이 경과되면서부터는 재료표면에 부식작용에 의해 발생하는 부식생성물과 안정적인 보호피막이 덮게 되어 더 이상 부식 인자의 침투가 불가능해지거나 침투속도가 늦어지기 때문인 것으로 판단될 수 있다. 따라서, 소형 시험편을 가지고 부식열화에 의한 재료의 역학적 특성을 실험실적으로 평가하기 위해서는

시험편에 하중을 가함으로써, 부식작용의 방해요인인 보호피막이 자연적으로 파괴되도록 하여 부식인자의 침투에 의한 지속적인 부식작용이 유도되도록 할 필요가 있다고 사료된다.

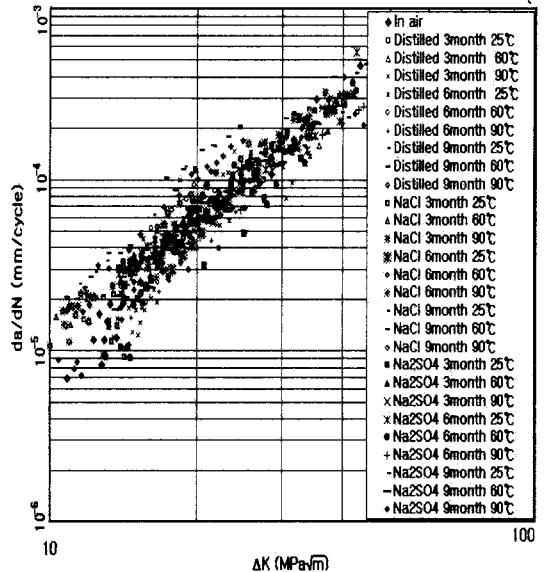


Fig. 6 Comparison of the $da/dN - \Delta K$ relations of 12Cr alloy steel artificially degraded in various environments ($R = 0.1, f = 20\text{Hz}$)

Table 5 Comparison of C and m of 12Cr alloy steel artificially degraded in various environments

Solution	Mon	25°C		60°C		90°C	
		C	m	C	m	C	m
Distilled water	3	6×10^{-9}	3.01	9×10^{-9}	2.83	8×10^{-9}	2.88
	6	1×10^{-7}	2.00	8×10^{-8}	2.24	2×10^{-8}	2.54
	9	3×10^{-8}	2.77	2×10^{-8}	2.98	7×10^{-9}	3.31
NaCl 3.5 wt.%	3	5×10^{-8}	2.36	6×10^{-8}	2.38	1×10^{-8}	2.98
	6	1×10^{-8}	2.80	9×10^{-9}	2.82	2×10^{-8}	2.67
	9	6×10^{-9}	2.96	7×10^{-9}	3.13	5×10^{-8}	2.39
Na ₂ SO ₄ 12.7 wt.%	3	4×10^{-8}	2.44	5×10^{-8}	2.37	4×10^{-8}	2.44
	6	2×10^{-8}	2.65	7×10^{-9}	2.66	8×10^{-8}	2.19
	9	8×10^{-8}	2.22	1×10^{-8}	2.72	2×10^{-8}	2.56

4. 결 론

터빈 블레이드 재료인 12Cr 합금강의 부식성 환경에 대한 전기화학적 부식민감성을 먼저 평가하고, 그 결과로부터 결정된 가장 가혹한 환경에서 온도와 열화시간을 매개변수로 하여 인공열화된 재료의 용액별, 온도별, 기간별에 따른 열화 정도와 역학적인 특성을 공기 중의 피로실험을 통하여 파괴역학적으로 평가하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 설정된 부식환경 하에서 12Cr 합금강의 부식에 의한 열화속도가 가장 빠르게 나타나는 온도와 농도는 90°C 및 3.5wt%NaCl 수용액과 12.7wt%(1M) Na₂SO₄ 수용액인 경우로 평가되었다.

(2) 12Cr합금강은 마르텐사이트계 스테인리스강으로 미세조직을 갖는 고강도 재료로서 증류수와 저온의 염화물 또는 황화물 수용액에 대한 신뢰할 만한 내식성을 가지고 있음이 전기화학적 부식실험과 장기간의 인공열화 실험을 통하여 입증되었으나, 고온의 염화물과 황화물 환경에서 장기간 노출된 경우에는 표면 피트가 발생될 가능성이 크다.

(3) 증류수와 염화물 및 황화물 부식환경에서 장기간 인공열화된 12Cr합금강의 균열성장특성을 평가한 결과, 내식성으로 인해 온도와 열화기간에 관계없이 비열화재와 유사한 특성을 나타내었다. 이것은 무부하 상태에서는 재료의 피로강도를 저하시킬 만큼 열화 되지 않았음을 의미한다.

(4) 소형 시험편을 가지고 부식열화에 의한 재료의 역학적 특성을 실험실적으로 평가하기 위해서는 응력부식균열 관점으로 음극분극영역에서 전위를 걸어 인공열화 시키면서 응력을 가하여 균열진전특성을 관찰·해석할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 센터의 지원 하에 이루어졌으며, 관계자 여러분께 심심한 감사를 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・破壊総合資料集," 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., 1997, "Corrosion Atlas," Elsevier, 3rd ed., p. 71, p. 300, p. 313.
- (6) 1966, "Stress Corrosion Cracking of Stainless steels Mechanism of Crack Initiation in Chloride Solutions," ASTM STP 425, p. 155.
- (7) Cocks F. H., 1973, "Manual of Industrial Corrosion Standards and Control," ASTM STP 534, pp. 3~41.
- (8) 1987, "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements," Annual Book of ASTM standards G5, pp. 73~76.
- (9) Dean, S. W., 1971, *Handbook on Corrosion Testing and Evaluation*, John Wiley, p. 171.
- (10) Denny, A. J., 1991, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall, pp. 76~79.
- (11) Herbert, H. U., and Winston, R. R., 1985, *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley, 3rd ed., pp. 96~111.
- (12) Speller, F. N., 1951, *Corrosion, Causes and Prevention*, McGraw-Hill, 3rd ed., p. 168.