

고온의 인공해수 중 12Cr강의 부식피로특성에 관한 연구

조선영[†] · 김철한^{*} · 배동호^{**}

(2000년 4월 22일 접수, 2001년 2월 27일 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: Corrosion Fatigue(부식피로), Direct Current Potential Drop Method(직류전위차법), Compliance(컴플라이언스), Corrosion Current Cell(부식조), Stress Intensity Factor Range(응력확대계수 범위), Fracture Mechanics(선형탄성파괴역학, LEFM)

Abstract

In this study, corrosion fatigue characteristics of 12Cr alloy steel were investigated in 3.5wt.% NaCl solution of 150°C and 4.5bar. Behavior of corrosion fatigue cracks was measured by the indirect compliance method and compared with the results in distilled water and in air. 1) 12Cr alloy steel was susceptible to temperature. Its susceptibility was increased as the temperature was increased. 2) The crack growth characteristics of 12Cr alloy steel in distilled water were similar to 3.5wt.% NaCl solution. 3) The temperature of solution affects to the crack growth characteristics of 12Cr alloy steel. In corrosion solutions of 4.5bar, 150°C, fracture surfaces of corrosion fatigue crack growth at a/W = 0.3 was showed the trans-granular fracture surface. As the crack grew up, it was changed to inter-granular type. In condition of high temperature, The crack growth behaviors of 12Cr alloy steel were remarkable.

1. 서론

화력발전설비의 핵심 요소 중의 하나인 증기터빈은 고온의 고·중압부와 최종 단(stage) 근방의 저온·저압부로 구성되며, 전자의 경우에 있어서는 대체로 로터(rotor)부의 고온 크리프(creep)와 열 피로(thermal fatigue)에 의한 손상이, 후자의 경우는 온도강하에 따른 습증기(wet vapor)에 의한 블레이드 단(blade edge)의 침식부식(erosion corrosion)과 열화된 재료에 부식과 기계적인 피로로 인해 부식 피로(corrosion fatigue)가 발생되는 것으로 알려져

있다. 이러한 손상사례는 운전개시 후 수년간, 즉 초기 고장 발생기에 야기되고 있는 것으로 조사되고 있기 때문에, 파손사고 예방과 신뢰성 향상을 위해서 정기적인 검사를 통한 보수와 부품교체 등에 의해 손상사고는 대폭 감소하는 경향을 보이고 있고, 최근에 와서는 운전 년수가 15년을 넘는 경우도 드물지 않다. 그러나, 지금은 장기간 사용에 의한 경년열화(aging degradation) 등에 대한 배려로부터 종전보다 보수관리의 강화가 요구되고 있고, 특히, 터빈 블레이드의 경우는 위에서 언급한 바와 같이 재료 열화 및 손상 기구(mechanism)에 의한 사고 예가 국·내외에서 계속 보고되고 있기 때문에,^(1~5) 터빈 블레이드 재료의 부식기구와 파괴특성에 관한 정보축적과 파손수명 평가 및 예측 기법의 개발이 요구되는 실정이다. 그러기 위해서는 터빈 블레이드 재료의 실 운전 환경에 대한 전기화학적(electro-chemical) 부식특성과 부식피로에 의한 파괴특성을 체계적으로 규명할 필요가 있다. 화력발전용 증기터빈

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소

E-mail : chosy@sbsmail.net

TEL : (042)935-9033 FAX : (042)868-8346

^{*} 회원, 한국원자력연구소

^{**} 회원, 성균관대학교 기계공학부

의 블레이드 재료는 12~13%Cr합금강으로서, 증기가 고순도인 경우 안정된 재료이다.⁽¹⁾ 그러나, 터빈에 유입되는 증기는 실제로는 순수한 증기가 아니고 각종의 불순물을 포함하고 있다. 이들 불순물들은 과열기의 산화물 이외에, 보일러 수증의 불순물이 증기 및 포화증기에 용해된 것으로서, 과열기를 거쳐 터빈에 유입되어 터빈 블레이드의 표면에 흡착되어 농축된다. 특히, 부식활성도가 큰 염화물(chloride)과 황화물(sulfide) 등이 터빈 블레이드의 표면에 농축되면, 국부적으로 농도가 증가하여 전기화학적 반응으로부터 블레이드 표면에는 부식 피트(corrosion pit)가 형성됨으로써 터빈 구동력에 의해 파괴기점이 된다. 즉, 금속과 부식환경간의 지속적인 전기화학적 반응에 의한 부식작용과 회전구동력 및 원심력 등에 의한 역학적 요소의 복합작용에 의해서 야기되는 부식피로기구(corrosion fatigue mechanism)로부터 파손에 이르게 된다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 그래서, 부식환경을 고려한 재료의 부식피로특성을 실험적으로 해석하기 위해서는 가능한 실 환경을 고려한 조건하에서 연구되어야 하나, 실험장치 제작이 어렵고, 적정한 데이터 획득 기술이 요하기 때문에, 150°C 이상에서 수행된 부식피로특성에 관한 연구 결과는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서, 본 논문은 화력발전용 증기 터빈 블레이드 재료로 널리 사용되고 있는 12Cr 합금강의 부식피로특성을 평가하기 위한 일련의 연구결과로서, 터빈에 유입된 증기 중에 용해되어 있는 염화물이 블레이드 표면에 농축되었을 경우 국소적인 농도증가에 의한 부식작용으로부터 터빈 블레이드 표면에 발생된 피트와 블레이드 모서리로부터 균열이 발생된 경우의 파괴특성을 파괴역학적으로 해석하였다. 이를 위해서 고온 부식피로 실험용 장치를 자체개발하고, 부식환경은 전기화학적 분극시험을 통하여 12Cr 합금강의 부식민감성이 큰 3.5wt.% NaCl 수용액으로 결정함과 동시에, 수용액의 온도를 중·저압 천이 단계 온도범위에 해당하는 150°C로 설정하였다. 이상의 부식피로해석 결과를 증류수 및 공기 중에서의 결과와 비교·평가함과 더불어, 피로파괴된 시험편의 피로파면을 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 관찰함으로써, 실제 터빈 블레이드의 부식피로 손상시 파손원인분석과 안전설계 및 신뢰성 평가의 기준을 확립하기 위한 기초자료로 삼고자 하였

다.

2. 12Cr 합금강의 고온 부식피로 특성

2.1 시험편 및 실험방법

시험편 재료는 화력발전용 증기 터빈 블레이드 재료로 이용되고 있는 12Cr 합금강으로서, 내식성뿐만 아니라 강도를 향상시킨 마르텐사이트계의 스테인리스 강이며, 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. Table 1과 같이, 12Cr 합금강은 0.18wt.% Ni을 함유하고 있는 동시에 P와 Cu가 포함되어 있기 때문에, 일반적인 스테인리스강과 같이 염화물과의 전기화학적 반응에 의해서 재료표면에 치밀하고 안정적인 산화피막을 형성하는 특성을 가지고 있다. 시험편 형상은 Fig. 1과 같이 CT(compact tension) 형상으로 제작하였으며, 예비균열을 위한 시험장치는 MTS사의 피로시험기(용량 : 10ton)를 사용하였다. 예비균열 생성을 위한 하중조건과 방법은 하중 감소법에 의해 실험하중의 최대치보다 20%가 높은 하중에서 시작하여 균열이 1mm진전할 때마다 하중을 5%씩 떨어뜨려 최종균열길이의 1mm진부터는 실험하중과 같도록 하였다. 그리고, 예비균열을 위한 하중반복속도는 20Hz, 하중비($R = P_{min}/P_{max}$)는 0.1, 하중의 형태는 정현파이며, 균열성장 길이는 시험 전·후면 균열길이를 50배율의 이동식 광학현미경으로 측정하여 그 평균값을 취하였다.

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						

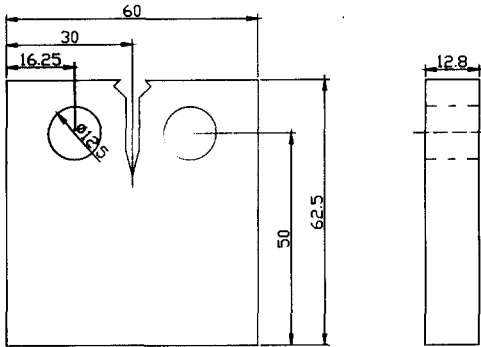


Fig. 1 Configuration of specimen

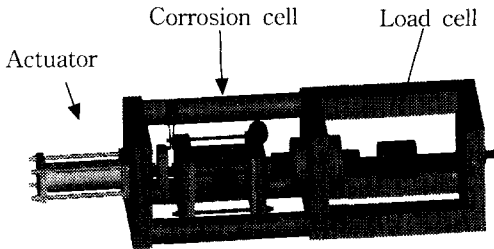


Fig. 2 Configuration of specimen

2.2 실험장치

실험에 사용된 부식피로시험기는 자체 개발한 수평식 저주기 피로시험기를 이용하였다. 부식조를 장착한 저주기 피로시험기의 형상은 Fig. 2와 같다. 이 장치는 서보 밸브(servo valve)를 이용한 2톤 용량의 유압식 피로시험기로서 진기적 신호에 의한 하중제어방식을 채택함으로써, 균열성장 에 의한 변위 증가로부터 하중의 감소효과가 배제될 수 있도록 하여 실험의 신뢰성을 높였다. 그리고, 부식피로 시험 시, 시험편의 탈착 및 교체가 용이하고, 균열길이 측정장치의 부착이 쉬우며, 실험도중에 부식용액 누수에 대한 불안감을 해소하기 위해 일반적인 재료시험기와 달리 수평식으로 하였다. 시험기의 제어장치는 서보 밸브의 구동만을 제어하도록 함으로써, 시험기 본체의 개조 또는 교체가 용이함은 물론 실험목적에 따라 응용범위가 넓도록 개발하였다. 그리고, 서보밸브를 제어하는 서보 콘트롤러(servo controller)를 자체 개발한 프로그램을 통해 제어되도록 함으로써, 시험편에 실질적으로 가해지는 반복하중의 파형이 다양하게 구현될 수 있음과 동시에, 피드백신호(feedback signal)를 통한 정확한 하중제어가

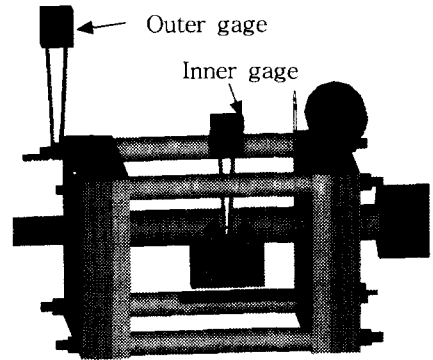


Fig. 3 Corrosion cell

이루어지도록 하였다. 부식조(corrosion cell)는 실험기간동안 주어진 환경을 일정하게 유지하여야 하며, 부식조에 채결된 시험편 외의 다른 금속이 부식용액과 접촉이 되어서는 안된다. 그 이유는 장기간의 부식피로시험 과정에서 시험편 이외의 금속제 요소들이 부식용액과 전기화학적 부식작용과 더불어 갈바닉부식(galvanic corrosion)을 일으키게 되면, 설정된 부식용액의 화학적 평형이 유지될 수 없을 뿐만 아니라 용액 내에 침적되어 있는 시험편의 부식작용과 균열성장특성에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 그리고, 밀폐된 공간에서 온도가 상승하면 압력이 온도에 비례해서 증가하기 때문에, 내압에 대한 충분한 강도를 확보해야 한다. 이상의 조건을 만족시키고 시험편의 탈착 및 교체가 용이하도록 부식조를 직경 140mm, 두께 3mm의 스테인리스 강관을 사용하여 제작하고, 내부는 테프론 접착제(teflon bond)로 도포하여 부식용액과의 접촉을 방지하였다. 강관 양면은 테프론 판(teflon plate)을 설치하고, 수밀을 위해 테프론판 외면에 SM45C강의 외면 지지판을 보강하였다. 압력은 릴리프 밸브(relief valve)를 설치하여 설정된 압력이 유지되도록 조절하였다. 그리고, 부식용액의 가열과 온도조절을 위해 부식조 내부에 설치되는 히터(heater, 220V, 300W)와 열전대(thermo-couple) 등 부속장치는 부식용액과의 전기화학적 부식반응을 방지하기 위해서 비금속재료로 제작하였으며, 부식용액의 온도는 열전대로부터 감지된 온도를 PID제어가 가능한 자동온도조절기를 통해 오차 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 범위에서 제어되도록 하였다. 본 실험에서 사용된 부식조의 전체적 형상은 Fig. 3과 같고, 내구성을 평

가한 결과 200℃, 16bar까지 신뢰성이 있음이 확인되었다.

2.3 실험조건과 방법

12Cr합금강은 0.18wt.% Ni를 함유하고 있는 동시에 P와 Cu가 포함되어 있기 때문에 내식성이 우수하다.⁽¹¹⁾ 그러나, 부식용액중의 용존산소(dissolved oxygen)를 고려하지 않은 상태에서도 온도가 상승하면, 용액의 점도가 감소함과 동시에, 부식활성인자인 염소 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 감소하는 성질을 나타내었다.⁽¹²⁾ 이상과 같은 12Cr 합금강의 특성을 고려하여, 본 연구에서는 부식환경조건을 150℃, 4.5bar의 3.5wt.% NaCl 수용액으로 설정하였다. 부식피로시험은 ASTM E 647-95⁽¹³⁾ 식 (1), (2)에 의거하여 하중비(R)=0.1, 최대하중=7848N, 주기(f)=0.5Hz로 설정하여 하중일정 시험을 수행하였다. 그리고, 부식피로시험 결과를 공기중과 증류수의 결과와 비교함으로써, 12Cr합금강의 파괴특성에 대한 환경의 영향을 검토하였다.

$$\alpha = \frac{a}{W} = 1.0010 - 4.6695u + 18.460u^2 - 236.82u^3 + 1214.9u^4 - 2143.6u^5 \quad (1)$$

$$u = \frac{1}{(BE'\lambda)^{1/2} + 1} \quad (2)$$

- a : crack length
- B : specimen thickness
- E' : effective modulus of elasticity
- W : specimen width
- α : a/W
- λ : compliance

2.4 균열길이측정

부식피로시험을 통해 발생하는 균열진전은 직접적으로 광학현미경을 통해 측정하는 것이 정확하겠지만, 부식환경과 재료의 상호부식작용에 의해 발생하는 부식생성물과 보호피막, 용액 등으

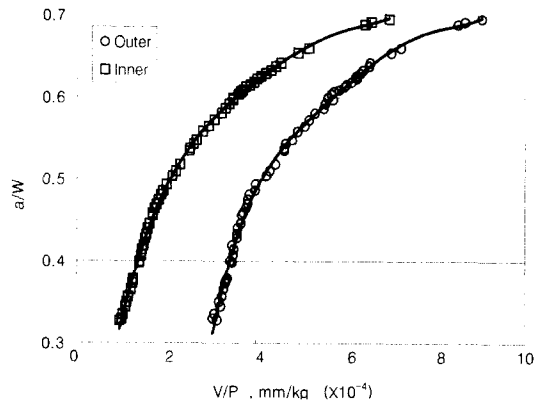


Fig. 4 Comparison of V/P between inner and outer COD gage

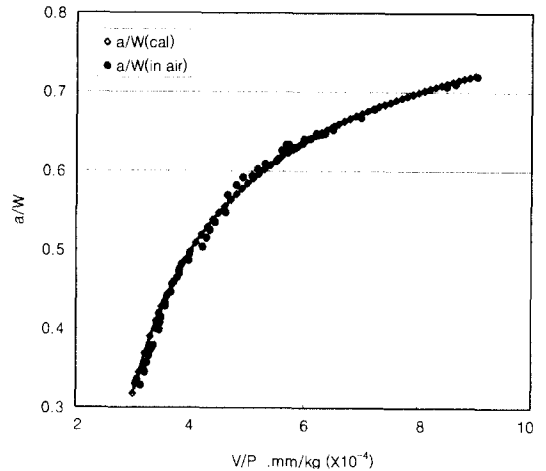


Fig. 5 Comparison of measured crack and calculated crack

로 인해 균열길이를 직접 측정하는 것은 어렵다. 특히, 고온·고압인 경우 부식조 내부를 모니터링(monitoring)할 수 없기 때문에 결과적으로 간접적인 방법을 통해 균열길이를 측정할 수밖에 없다. 간접적인 균열길이 측정방법으로는 직류전위차법(DCPD method)⁽¹⁴⁾ 등 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 부식피로에 의한 균열성장 길이를 부식조 외부로부터 컴플라이언스법(compliance method)을 이용하여 간접적으로 측정하는 방법을 시도하였다. 그 이유는 본 실험과 같이 부식조 내의 온도와 압력이 높은 경우는 내압(inner pressure)에 의한 누설(leak)로 용액과 온도 및 압력 등의 초기환경 조건이 일정하게 유지될 수 없기 때문에,

부식조 몸체(body)에 구멍을 뚫어 전위차 측정을 위한 리드선(lead wire)을 설치하기가 어려울 뿐만 아니라, 장기간의 실험동안 리드선이 부식될 가능성도 배제할 수 없기 때문이다. 그러나, 간접적으로 균열길이를 측정하는 경우는 데이터의 신뢰성에 대한 충분한 검정이 필요하므로, Fig. 3과 같이, 2개의 COD 게이지를 부식조 외부와 시험편에 부착하고, 게이지들의 상관관계를 구하여 외부에 설치된 게이지를 통해 실제 시험편에 설치된 내부 게이지의 측정값을 간접적으로 측정하는 것이다. 즉, 2개의 게이지를 통하여 얻어진 균열성장애 따른 변위값으로부터 컴플라이언스($\lambda = V/P$)를 각각 계산하여 Fig. 4의 $V/P-a/W$ 관계를 비교·검토함으로써, 간접적으로 시험편의 균열성장애 따른 컴플라이언스가 계산될 수 있도록 하였다. 그리고, Fig. 5에서 구한 두 게이지 간의 컴플라이언스 상관관계로부터 시험편의 컴플라이언스가 구해지면, ASTM E-647에 근거한 식 (1)에 의해 부식피로균열 길이가 계산된다. 이상의 과정은 DT-VEE 프로그램과 A/D 터미널(terminal)을 이용하여 각각의 COD 게이지와 저주기 부식피로시험기로부터 출력되는 신호를 획득한 후, txt file로 전환하여 MS-EXCEL을 통해 계산처리 하였다. 본 실험에서 시도된 간접적인 부식피로균열 길이 측정법의 신뢰성을 검증하기 위해서 시험편으로부터 직접 측정된 균열길이와 비교한 결과, Fig. 5에 나타난 바와 같이, 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

2.5 실험 결과 및 고찰

12Cr 합금강의 비열화재의 상온(25°C), 공기 중 피로균열 성장특성과 25, 150°C(4.5bar) 조건의 증류수 및 3.5wt.% NaCl 수용액에서 부식피로에 의한 균열성장특성인 $da/dN-\Delta K$ 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 25°C의 증류수 및 3.5wt.% NaCl 수용액의 결과와 공기 중의 경우를 비교하면, 증류수의 경우는 공기 중 균열성장특성과 거의 유사한 경향을 보이고 있으며, NaCl 수용액인 경우에서도 동일 ΔK 에 대해 유사한 균열진전속도를 갖는다. 이러한 결과는 12Cr 합금강이 온도가 상온(25°C), 3.5wt.% NaCl 수용액 하에서 증류수와 공기 중보다 부식피로에 대한 저항성이 크다는 것을 의미한다. 일반적으로 공기 중보다 부식환경 하에서 균열진전속도가 빠른 이유는 균열 선단부에서 부식활성인자와 금속간의 전기화학적 부식반응

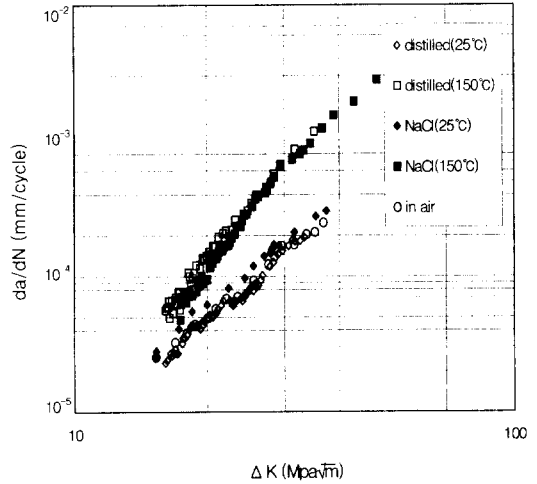


Fig. 6 Relations between $da/dN - \Delta K$

Table 2 Experimental estimation of C, m

	Air	Distilled water		3.5wt.% NaCl	
		25°C	150°C	25°C	150°C
C	2.2 $\times 10^{-8}$	1.1 $\times 10^{-8}$	7.3 $\times 10^{-10}$	1.6 $\times 10^{-8}$	6.3 $\times 10^{-10}$
m	2.58	2.79	4.04	2.76	4.03

을 일으켜 공기 중과는 균열진전기구(crack growth mechanism)가 상이하기 때문이지만 본 실험에서는 재료의 내식성으로 인해 부식피로 특성에 있어서 큰 차이를 나타내지 않았다. 150°C의 증류수와 3.5wt.% NaCl 수용액 하에서 부식피로 특성은 25°C와 공기중에 비해 빠른 균열진전속도를 나타낸다. 그리고, 동일 ΔK 에 대해 유사한 부식피로 균열성장특성을 나타내고 있는데, 이 결과는 12Cr합금강이 염화물과 전기화학적 반응에 의해서 재료표면에 치밀하고 안정적인 산화피막을 형성하고, 온도가 증가하여도 Cl⁻ 이온과 같은 부식활성인자에 대한 부식저항이 커 증류수 조건과 크게 차이가 나지 않은 것으로 사료된다. 이상과 같은 결과에서, 12Cr 합금강은 온도증가에 따른 부식활성인자의 영향으로 인해 부식피로 균열진전속도가 빨라질 수가 있다는 것을 의미한다. Table 2는 Fig. 6의 $da/dN-\Delta K$ 특성 곡선으로부터 균열성장 관계측인 Paris law에 의거하여 C, m을 정리한 것이다. 피로균열의 진전속도 (da/dN)는

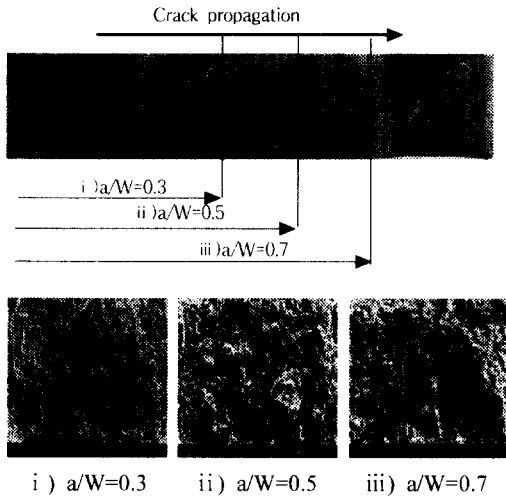


Fig. 7 Fractographs of corrosion fatigue fractured surface in air

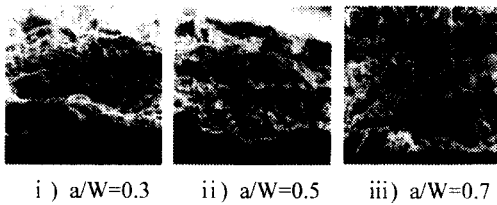


Fig. 8 Fractographs of corrosion fatigue fractured surface in distilled water of 150°C, 4.5bar

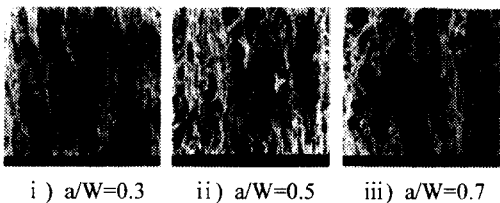


Fig. 9 Fractographs of corrosion fatigue fractured surface in 3.5wt.% NaCl solution of 150°C, 4.5bar

지배적인 파괴기구에 의해 달라지며, 그에 따른 피로파면 형태도 상이하다. 일반적으로, 파괴기구에 의한 da/dN 의 대소관계는 $a/dN(\text{intergranular fracture}) > da/dN(\text{cleavage fracture}) > da/dN(\text{dimple fracture}) > da/dN(\text{striation})$ 과 같다.⁽¹⁵⁾ 따라서, 본 연구에서는 파괴기구에 의한 부식피로 균열성장

거동을 면밀히 파악하기 위해서 실험이 완료된 시험편에 대해 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 540배율로 파단면을 관찰하였다. Fig. 7은 25°C의 공기 중, Fig. 8은 150°C(4.5bar)의 증류수, Fig. 9는 150°C(4.5bar)의 3.5wt.% NaCl 수용액에서 부식 피로시험을 완료한 시험편의 파단면을 나타낸 것이다. 증류수의 경우, 균열진전형태가 상온에서는 $a/W=0.3, 0.5$ 에서 공기 중의 비열화재와 유사한 스트라이에이션(striation) 진전형태를 나타내는 피로 하중 지배형의 파면형태를 나타내는 것으로 확인하였다. 그러나, Fig. 8과 같이, 150°C, 4.5bar에서는 비열화재에 비해 입계형(inter-granular type)이 지배적인 입내+입계+딴뿔(dimple)의 혼합형태를 나타냄으로 인해서 결과적으로 균열성장속도가 증가한 것으로 판단된다. Fig. 9의 150°C, 4.5bar의 3.5 wt.% NaCl 수용액 하에서 균열진전형태는 증류수와 유사하게 ΔK 가 증가함에 따라 입계형 비율이 증가하는 입계+딴뿔의 형태를 보이나 $a/W=0.7$ 정도에서는 입계형이 지배적인 균열진전 형태로 변화되고 있다. 이상의 파면관찰 결과로부터 150°C, 4.5bar의 증류수 및 3.5 wt.% NaCl 수용액의 경우, 공히 입계형이 지배적인 균열진전 형태를 나타낸다는 특성으로 부터 Fig. 6에서 두 환경조건하에 대해 균열성장특성상 뚜렷한 차이를 나타내지 않음을 이해할 수 있다.

3. 결론

화력발전용 터빈 블레이드 재료로 사용되고 있는 마르텐사이트계 스테인리스 강인 12Cr합금강의 고온 염화물 부식피로특성을 평가하기 위해, 150°C, 4.5bar의 3.5wt.%NaCl 수용액하에서 부식 피로 실험을 수행하고, 그 결과를 증류수와 공기 중에서의 균열성장특성과 비교평가 하였다. 이를 위해서 저 주기 수평식 재료시험기와 고온·고압용 부식조를 개발하였으며, 부식피로균열 길이를 측정하기 위해서는 컴플라이언스법을 이용한 간접 측정법을 도입하고, 이의 신뢰성을 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 12Cr 합금강은 상온(25°C)에서 공기 중 비열화재와 증류수, 3.5wt.% NaCl 수용액 하에서 부식피로균열 진전특성은 공히 유사한 특성을 나타냈다.

(2) 150°C, 4.5bar의 증류수와 3.5wt.% NaCl 수

용액에서는 상온에 비해 부식피로균열 성장속도가 증가하며, 두 경우 유사한 균열진전 특성을 보였다. 균열진전속도가 증가하는 이유는 부식인자의 활성도가 증가하여 균열진전기구가 변하기 때문이다. 대체로, 균열성장초기의 입내형에서 균열이 진전됨에 따라 입계형이 지배적인 균열성장 특성을 나타내었다.

(3) 화력발전용 증기터빈의 저압단계에서는 상대적으로 저온인 습증기 상태이므로, 블레이드 표면에 축적된 염화물 등의 부식성 환경에 의한 부식피로 손상을 예방하기 위해서 실시간 또는 정기점검 중 비파괴적 부식열화도 감시기술의 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학기술단산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가센터의 지원에 의해서 이루어졌으며, 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 1985, "腐食と破壊," 日本機械學會編, pp. 71~74.
- (2) 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.
- (3) 田中智夫, 1980, "濕潤硫化水素環境下における割れ破壊の實際と對策," 金屬の割れ破壊, 昭和プリント, pp. 155~166.
- (4) 1987, "材料強度問題の最近の話題," 日本機械學會, pp. 114~119.
- (5) Wulpi D. J., 1993, "Understanding How Components Fail," pp. 236~244.
- (6) 1980, "金屬の割れ破壊 - 解析と防止對策," 經管開發 센터, pp. 521~526.
- (7) Crooker T. W. and Lange E. A., 1973, "The Influence of Yield Strength and Fracture Toughness on Fatigue Design Procedure for Pressure Vessel Steel," ASTM Paper No. 70-PVP-19, New York, April.
- (8) Speidal M. O., 1978, "Corrosion Fatigue in Fe-Ni-Cr Alloys in Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloy," *National Association of Corrosion Engineers*, p. 1071.
- (9) Logsdon W. A., 1975, "An Evaluation of the Crack Growth and Fracture Properties of AISI Modified 403 Stainless Steel," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 7~23.
- (10) Clark Jr. W. G., 1974, "The Fatigue Crack Growth Rate Properties of Type 403 Stainless Steel in Marine Environments in International Conference on Corrosion Problems in Energy Generation and Conversation," *Electrochemical Society*, p. 368.
- (11) Achilles R. D. and Bulloch J. H., 1987, "The Effect of Frequency and Environment on the Fatigue Crack Growth Behavior of SA508 Cl.III RPV Steel," *Int. J. Pre. Ves. & Piping*, Vol. 30, pp. 171~192.
- (12) 1966, "Stress Corrosion Cracking of Stainless Steels Mechanism of Crack Initiation in Chloride Solutions," ASTM STP 425, p. 155.
- (13) Herbert, H. U., and Winston, R. R., 1985, *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley, 3rd ed., pp. 96~111.
- (14) 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E 647-95, pp. 578~614.
- (15) Hicks M. A. and Pickard A. C., 1982, "A Comparison 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.
- (16) 小寺澤良, "フラクトグラフィとその應用," 日刊工業新聞社, pp. 31~76.