DCPD 법을 이용한 TMCP 강의 부식피로수명 평가

박진형* · 배동호**

Evaluation of Corrosion Fatigue Life of TMCP Steel Using the DCPD Method

Jinhyung Park, and DongHo Bae

Key Words : DCPD(직류전위차), Corrosion degradation(부식열화), Corrosion fatigue life(부식피로수명), Corrosion susceptibility(부식민감성), Critical potential(임계전위)

Abstract

In order to develop a method of corrosion fatigue design and estimate reliability of TMCP steel using as the material of heavy industries and plants, its corrosion susceptibilities and corrosion fatigue life considering corrosion degradation were investigated. From the results, the corrosion characteristic of TMCP steel is very susceptible in 3.5wt.% NaCl solution. Its susceptibility was linearly increased with the solution temperature increase. The potential difference due to the crack growth behavior in 25℃, 3.5wt.% NaCl solution is very susceptible. And it was found that stress amplitude has a linear relationship with the critical potential. Therefore, it is expected that the corrosion fatigue life of TMCP steel can be nondestructively predicted using the DCPD method.

1. 서 론

해양구조물, 중화학플렌트, 화력 및 원자력 발전플렌트 등의 설비와 구조물은 여전히 가혹한 환경조건 하에서 사용되기 때문에, 이들의 설계, 제작 및 보수관리에 있어서 재료의 선택, 허용응력의 결정, 수명예측 등을 위한 데이터가 더욱 요구되고 있다. 그리고, 한편으로는 강도를 확보하고 내구성과 안전성을 확보하기 위해서는 이들의 부식상황과 방식방법에 대한 적정한 관리가 행해져야함도 인식되고 있다. 그래서 많은 연구자들에 의해 주요 산업설비 재료들에 대한 부식 열화도와 부식을 고려한 강도평가에 관한 연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 최근에는 산업설비의 안전성과 신뢰성 유지를 위한 설비통합관리시스템 구축차원

* 삼성중공업
** 성균관대학교 기계공학부
E-mail : bae@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7443 FAX : (031)290-5849

에서 부식상황을 자동적으로 실시간에 모니터링(monitoring)하는 기술개발도 진행되고 있다. 이를 통하여 실제환경과 역학적 조건하에서 사용되고 있는 산업설비와 구조물의 실제 부식상황에 대한 정보획득과 잔존수명의 추정, 보수 및 교환시기의 결정, 부식원인 해석 및 방식법의 효과판정 등이 가능할 것으로 기대되고 있다[1-4].

그래서, 이러한 산업설비와 구조물들의 실시간 통합관리체계를 구축하고자 하는 일련의 연구로서, 본 연구에서는 재료의 전기화학적 부식열화도를 평가 함과 동시에, DCPD 법을 이용하여 부식피로수명을 비파괴적인 실험방법으로 평가하였다.

2. TMCP 강의 전기화학적 부식열화특성 평가

2.1 시험편

용접성과 내진성이 우수하고, 조선 및 해양구조물, 파이프라인(pipe line) 등에 적용되고 있는 TMCP 강에 대한 부식열화도를 ASTM G5[5]에 의거하여 평가하였다. TMCP 강의 화학성분과 기계성질은 Table 1 과 같다. 전기화학적 부식열화도 평가를 위한 시험편은 $10\times10\times10mm^3$ 의 정육면체로 제작하였고, 에폭시(epoxy) 수지로 마운팅(mounting)한 후, 표면과 마운팅 간극 사이의 틈 부식(crevice corrosion)을 방지하기 위해 페인팅(painting)하고 24 시간 상온에서 건조시켰다. 시험편 표면은 모두 600-grit SiC paper 로 습식연마(wet polishing)하였다.

2.2 실험 장치

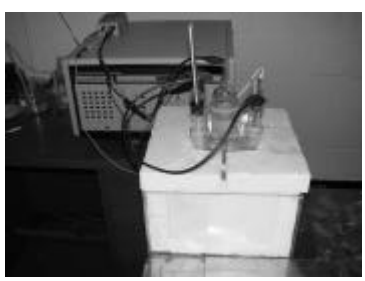
전기화학적 부식열화도 평가 시험장치는 Potentiostat (Perkin Elmer Co., Model 273A)를 사용하였다. 동전위분극실험(potentiodynamic polarization)을 위한 시편은 open-circuit potential 을 유지한 후 실험을 시작하였고, -250mV 부터 10mV/m(0.166 mV/sec)로 scan

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of TMCP steel

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
0.1	1.49	0.25	0.014	0.001	0.024	0.25

Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
519	228	34.2

하였다. 전극은 보조 전극(counter electrode)으로 탄소봉전극 2 개가 사용되었고, 기준전극 (reference electrode)으로는 감홍전극(SCE)이 사용되었다. 그리고, 본 실험에서는 TMCP 강의 실제용도를 고려하여 0 10℃범위의 저온과 60 90℃ 범위의 상온 이상(이하 고온)에서 부식열화에 대한 온도의 영향을 검토하였다.



(a)

(b)

Fig. 1 Corrosion cell for low and high temperature

Fig. 1(a)의 저온 분극실험을 위한 부식조(corrosion cell)는 아크릴(acryl)과 보온재를 사용하여 저온 분위기가 장기간 유지될 수 있도록 제작하였고, 액화질소와 알콜(alchol)을 이용하여 용액의 온도를 낮추었다. 시험기간 동안 저온조건이 계속 유지되도록 하기 위해서 저온용 온도조절기(thermo controller)와 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 사용하였다. 그리고, Fig. 1(b)의 고온용 부식조도 장기간 온도가 유지되어야 하기 때문에 온도조절기와 열전대(thermo couple) 및 석영히터(heater)를 사용하였다.

2.3 실험 조건

부식용액은 염화물에 의한 재료의 부식열화도를 비교·평가하기 위해 증류수와 3.5wt.% NaCl 수용액을 사용하였다. 실험온도는 증류수와 NaCl 수용액 공히, 5, 10, 25, 60, 90 ℃로 설정하였으나, NaCl 수용액에서는 0℃를 추가하였다.

2.4 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 는 증류수와 NaCl 수용액의 온도변화에 따른 분극곡선(polarization curve)으로부터 Tafel 외삽법으로 구한 부식속도(corrosion rate)를 정량값으로 도시한 결과이다. NaCl 수용액과 증류수 모두 온도변화에 대한 부식속도는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

NaCl 수용액의 경우 부식속도는 0℃에서 1.094mpy, 90℃에서 961.4mpy 이며, 증류수의 경우는 5℃에서 0.133mpy, 90℃에서 65.3mpy 로 측정되었다. 본 실험에서는 부식용액중의 용존산소를 고려하지 않았지만, 온도가 상승하면 용액의 점성(viscosity) 감소와 부식활성 이온(ion)의 활성도(activity) 증가로 재료표면의 산화막(oxide film)이 불안정해짐으로 인해서 부식이 촉진된 것으로 생각된다.

특히 3.5wt.% NaCl 수용액의 경우에는 부식활성 원소인 염화이온(Cl^-)이 첨가되었기 때문에, 증류수에 비해 이러한 현상이 더욱 민감하게 나타난 것으로 생각된다[6,7].

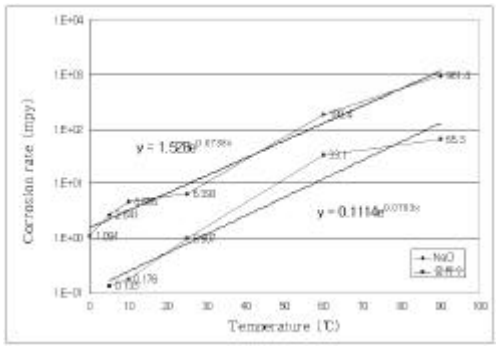


Fig. 2 Relationship between the corrosion rate and the solution temperature

3. DCPD 법을 이용한 TMCP 강의 부식피로수명 평가

3.1 시험편

DCPD 법을 이용한 TMCP 강의 부식피로수명 평가를 위한 시편은 ASTM E606-928)에 의거 Fig. 3 과 같이 제작하였다.

시험편의 측정부 직경은 6mm, 측정길이는 30mm 로 하였으며, 시편중앙에 깊이 1.0mm 의 노치(notch)를 삽입하였다. 시편은 600-grit SiC paper 로 연마하였으며, 시험 전 시편 표면의 유분과 기타 불순물들을 제거하기 위해 모든 시편을 초음파 세척하였다.

3.2 실험 장치

자체 설계·제작한 수평식 피로시험기를 사용하였다. 부식조(corrosion cell)는 시편 외 다른 금속의 갈바닉 부식(galvanic corrosion)을 방지하고, 장기간 실험동안 내구성과 주어진 환경(온도, 압력)이 유지되도록 Fig. 4 와 같이 제작하였다.

외벽은 아크릴(acryl)수지를 이용하여 갈바닉 부식을 방지하는 한편, 실험이 진행되는 동안 부식조 내의 상황을 관찰할 수 있도록 하였다. 시편과 용액이 접촉되는 면은 테프

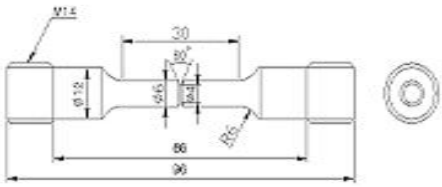


Fig. 3 Configuration of notched specimen for corrosion fatigue test

론 코팅(teflon coating)을 하였고, 실리콘(silicon)으로 수밀(sealing)을 유지하였으며, 아크릴수지와 닿는 부분은 오링(O-ring)을 삽입하여 누수를 방지하였다. 그리고, 실험이 진행되는 동안 부식조 내 부식용액의 화학적 평형을 유지하기 위해 순환장치를 이용하여 부식용액이 50ml/min 로 계속 순환되도록 하였다.

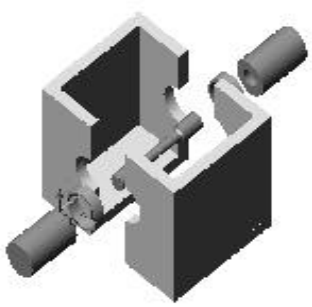


Fig. 4 Configuration of corrosion cell

DCPD 법으로 전위를 측정하는 동안 입력전류가 그립으로 누전되는 것을 방지하기 위해 그립의 양단에 절연 테입을 붙여 절연시켰다. 전류공급장치는 시간에 관계없이 안정성을 충분히 유지하기 위해 적절한 일정 전류 공급이 필요하므로 DC 정류기를 사용하였다. 전압측정 장치(volt meter)는 정확성과 안정성을 고려하여 Nano volt 까지 측정이 가능한 Hewlett packard 사의 34420A nano volt meter 를 사용하였다.

3.3 시험 방법 및 조건

노치 시험편의 부식피로강도 평가를 위한 하중조건은 응력집중을 고려하여 최초하중을 항복강도의 50%로부터 하중감소법을 이용하여 시험하였고, ΔP=일정조건 하에서 부식피로시험을 수행하였다. 이때, 하중비($R= P_{min} / P_{max}$)는 0.1 로 하였다. 하중형태는 일정진폭 정현파(sine wave)로 하고, 하중반복속도는 부식환경이 충분히 반영되도록 1Hz 로 하였다. 그리고, NaCl 수용액의 온도는 상온(25℃)으로 유지 시켰으며, 용액의 농도는 인공해수에 상당하는 3.5wt.%로 설정하였다. 이상의 시험조건을 Table 2 에 정리하였다.

Table 2 Fatigue test conditions

Conditions	Contents	
Loading condition	Load ratio ($R= P_{min} / P_{max}$)	0.1
	Load range(ΔP)	Constant
	Maximum load (P_{max}) (N)	2648 N
	Load frequency	1Hz
Environment conditions	Temperature	R.T.
	Solution	3.5wt.% NaCl solution

3.4 시험 결과 및 고찰

열악한 부식환경에서 운전되는 산업설비의 안전성 평가와 실시간 감시체계를 구축하기 위해서는 대상설비 또는 구조물의 재료에 대한 파괴적인 정보 외에 비파괴적인 정보의 확보도 매우 중요하다. 그래서 본 연구에서는 여러 가지 비파괴적인 강도평가 방법들 중에서 DCPD 법을 이용하여 재료의 부식피로수명 평가를 시도하였다.

Fig. 5는 전위(V)와 피로수명(N_f)과의 관계를 도시한 것이다. 전체적으로 부식피로 cycle 수가 증가함에 따라 전위는 서서히 증가하다가 일정 cycle 수, 즉, 파단 시점에 도달하면, 전위가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이로부터, 부식피로균열거동과 파단 수명 및 전기적 특성치의 상관관계를 이

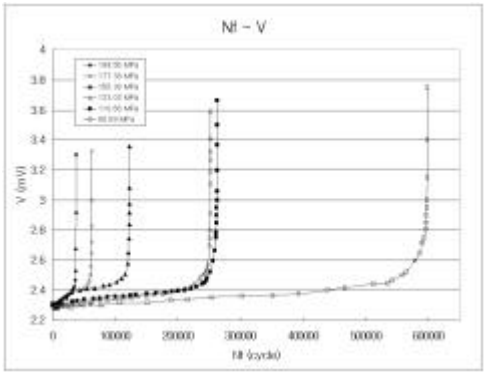


Fig. 5 Relationship between V and N_f

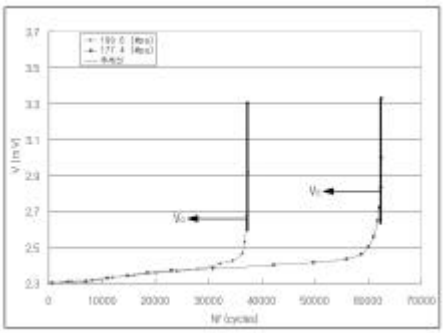


Fig. 6 Determination of V_c

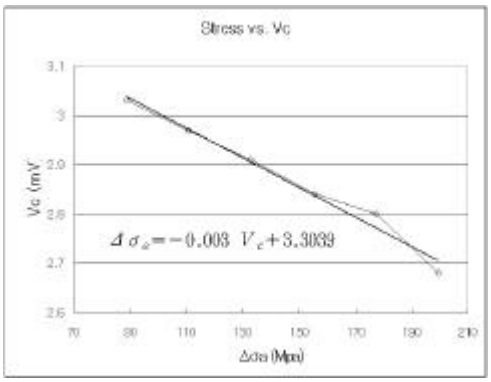


Fig. 7 Relationship between V_c and $\Delta\sigma_a$

용하면, 부식환경 하에서 운전 중에 있는 산업설비의 건전성과 부식피로수명을 비파괴적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

그래서, 환경을 고려한 설계기준을 설정하고 불안정 파괴가 야기되는 임계 변수 값을 결정하기 위해 Fig. 6 과 같이 전위와 피로수명관계로부터 임계전위(V_c)를 결정하는 방법을 고려하였다.

Fig. 6 에서 임계전위는 전위가 급격히 증가하는 직선부와 곡선부의 접점으로부터 결정하였다. 이렇게 구해진 임계전위를 부식피로 시험에서 시편에 가해진 하중범위(ΔP)에 상당하는 공칭응력범위(nominal stress range : $\Delta\sigma$)로 나타내면 Fig. 7 과 같다.

4. 결 론

산업설비와 구조물들의 실시간 통합관리 체계를 구축하고자 하는 일련의 연구로서, 본 연구에서는 재료의 부식열화도와 부식피로수명를 실험적으로 평가하고, 획득된 데이터를 이용하여 부식환경을 고려한 재료의 부식열화 및 부식피로수명을 예측하는 기법을 연구하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) TMCP 강의 3.5wt.% NaCl 수용액에 대한 부식열화도는 온도가 상승하면 선형적으로 증가하였다. 그리고, 동일한 부식용액에서 임의 온도에 대한 부식속도를 예측할 수 있는 부식속도와 온도의 상관관계를 다음과 같이 제시하였다.

증류수: Rcorr = 1.528e 0.0738T

3.5w.t% NaCl 수용액:

Rcorr = 0.1114e 0.0783T

2) 전위차법을 이용하여, 부식피로균열의 거동과 부식피로강도 및 부식피로수명을 예측할 수 있는 방법을 구하고, 그 가능성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) ASTM, 1984, "Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods", ASTM STP 908.
(2) AIME, 1985, "High Temperature Corrosion in Energy Systems", The metallurgical society of AIME.
(3) 日本機械學會, 1984, “機械構造物の 破損事例と解析技術”, 日本機械學會.
(4) Sung D. Kwon, Seok S. Yoon, Sung J. Song, Dong H. Bae,2000,"The Evaluation of Corrosion Strength of 12Cr Steel using Backward Radiated Ultrasound", KSNT/ SC0005, pp. 49 55.
(5) ASTM, 1987, "Standard Reference Test For Making Potentio-static and Potentio-dynamic Anodic Polarization Measurement", ASTM G5, pp.73 76.
(6) Herbert H. Uhlig, R Winston Revie, 1984, "Corrosion and Corrosion control", pp.95 96.
(7) 이학렬, 1990, “금속 부식 공학”, pp.54 55.
(8) ASTM, 1993, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing", ASTM, pp.632 646.