142 설비공학논문집 제 24 권 제 2 호(2012)/pp. 142-146
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2012.24.2.142

지열발전용 배관재(SUS316)의 부식특성 평가

한 지 원†, 박 영 수*
호서대학교 기계공학과, *성균관대학교 대학원 기계공학과

Evaluation of Corrosion Characteristics of Pipeline Material(SUS316) for the Geothermal Power Plant

Ji Won Han†, Young Su Park*
Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, 336-795, Korea
**Graduate school of Mechnical Engineering, Sungkyunkwan University, 440-736, Korea*

(Received November 1, 2011; revision received November 29, 2011)

ABSTRACT: In the geothermal power, the geothermal fluid such as water or steam is moved from the ground to turbine a pipeline. Because the geothermal fluid with high temperature contains Cl-and SO4-, It cause to diminish the system lifetime due to the increase in the corrosion of pipeline. In the present work, the characteristics of corrosion and its fatigue of the sus316 which is used in the pipeline are evaluated experimentally. From this study, the following results can be obtained; for the case of the corrosion environment, it is found that the corrosion rate is faster than that of the steam environment by 10 to 30 times, and the corrosion fatigue limit is underes-timated compared to that of steam state.

Key words: Corrosion(부식), Corrosion fatigue(부식피로), Corrosion susceptibility(부식민감성), Potentio dynamic polarization(동전위 분극실험), Fatigue limt(피로한도)

기 호 설 명

i_{corro}	: 부식전류밀도 [$\mu A/cm^2$]
mmpy	: 부식속도 [mm/years]
fi	: 원자분율
Wi	: 원자량
ni	: 원자가
$\sigma_{\min}$	: 최소응력
$\sigma_{\max}$	: 최대응력
N_f	: 파단주파수

† Corresponding author
Tel.: +82-41-540-5801; fax: +82-41-540-5808
E-mail address: jwhan@hoseo.edu

1. 서 론

화석에너지를 이용한 발전과정에서는 에너지의 연소로 인해 발생되는 가스가 지구온난화에 막대한 영향을 미치며, 이는 기후 변화와 환경파괴 등 사회 전반에 걸쳐 큰 문제로 대두되고 있다. 따라서 이에 대한 해결방안으로 신·재생에너지에 대한 관심이 높아지고, 특히 지열에너지가 각광을 받고 있다.[1] 하지만 지열수와 증기를 이용한 지열발전의 경우, 유체는 고온이며, 저 pH, 고농도 Cl-, SO_4^{-2}, H_2S 등이 포함되어 있어,[2] 배관을 통해 발전설비의 터빈으로 보내지는 동안 배관망과 플랜트를 구성하는 각종 요소 설비에 부식을 촉진시키는 요인으로 작용하여 설비의 수명을 단축시키거나 축척된 부식물로 인해 터빈 작동에 상당한 악영향을 주며, 또한 부식피로

로 인해 발생하는 열화부식은 재료에 치명적 파손의 원인이 된다.[3, 4] 우리나라에서도 현재 지열발전에 대한 연구가 진행되고 있으나 외국선진국에 비해 아직 초보 단계로서 발전설비에 사용되는 재료들에 대해서도 부식환경에서의 재료평가 및 내식성이 우수한 경제적인 재료개발이 요구되고 있다.

본 연구는 지열발전 플랜트에 쓰이는 SUS316에 대하여 부식 환경에서의 전기화학적인 부식민감성을 평가하여 부식속도를 산출하고, 부식특성을 비교, 검토하였으며, 부식 환경과 증류수 환경하에서 부식피로 실험을 수행하여 부식환경이 피로한도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 전기화학적 부식특성

부식환경에 따른 SUS316의 부식평가는 ASTM G5[5]에 의거하여 동전위분극실험으로 실시하였다. 이 방법은 부식현상이 재료와 환경간의 전기화학적인 반응임을 감안해 인위적으로 전위를 가해주고 난 후 부식전위(Ecorro), 부식전류밀도(icorro) 등을 측정하여 재료의 전기화학적인 부식특성을 평가하는 것이다. 부식속도는 Faraday 법칙에 의거하여 다음 식으로 구할 수 있다.[6]

$$mmpy = \frac{3.27 \times 10^{-3} \times i_{corro} \times E \cdot W}{density(g/cm^3)} \quad (1)$$

$$E \cdot W = \frac{1}{\Sigma \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (2)$$

2.1 시험편

전기화학적 부식특성을 평가하기 위한 시험편은 SUS316으로 ASTM G5에 의거하여 10×10×10 mm의 정육면체로 제작하였다. 시험편은 에머리페이퍼(#600)로 연마한 후, 에폭시수지를 사용하여 마운팅하였고, 표면과 마운팅 간극사이의 틈부식(crevice corrosion)을 방지하기 위해 페인팅을 하여 24시간 상온에서 건조시켰다. 시험편의 화학적 성분과 기계적성질은 Table 1, Table 2와 같다.

2.2 시험장치

전기화학적 부식민감도를 평가하기 위한 실험

Table 1 Chemical compositions of SUS316

unit : (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.06	0.5	1.09	0.02	0.01	12.2	16.2	2.31	0.35	Bal.

Table 2 Mechanical properties of SUS316

ultimate strength (MPa)	yield strength (MPa)	modulus of elasticity (GPa)	elongation(%)
579.2	290.1	192.4	56.25

장치는 전위측정기(Potentiostat Perkin-Elmer Co., Model 273A)를 사용하였다. 분극시험을 위해 전극은 보조전극으로 탄소봉 2개, 기준전극으로는 감홍전극(SCE)이 사용되었다. 또한 일정한 온도를 유지하기 위해 온도 조절기, 열전대, 밴드히터를 사용하였다.

2.3 실험 방법 및 조건

분극실험은 부식시험편이 평형전위상태에서 분당 10 mV(0.166 mV/s)의 주사속도(scan rate)로 양극분극시켰으며, -250 mV까지 같은 주사속도로 역분극시켰다. 동전위 분극실험의 개요도는 Fig. 1과 같다.

부식용액은 pH7인 1L의 증류수에 빙초산을 섞어 pH3으로 만들었고, 용존산소량을 제거하기 위해 질소가스를 200 ml/min로 120분간 주입하였다. 염소이온(Cl-)과 황산이온(SO_4^{-2})의 농도에 따른 부식특성을 평가하고자 NaCl과 Na_2SO_4의 양을 각각 다르게 하였으며, 또한 온도에 따른 부식특성을 평가

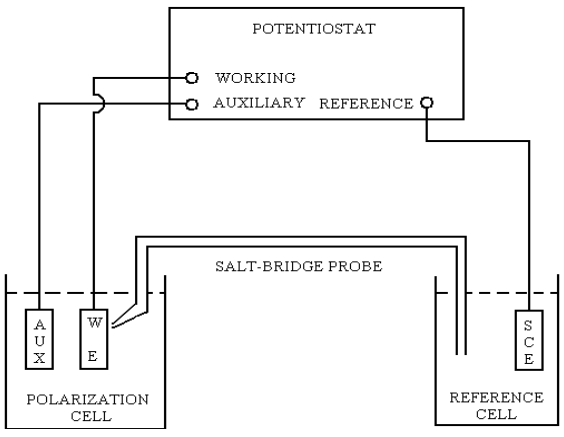


Fig. 1 Schematic diagram of a potentio-dynamic polarization test.

Table 3 Electro-chemical corrosion test conditions

Specimen	distilled water	pH	NaCl	Na_2SO_4	Temp (°C)
No.1	1 ℓ	3.0	2.0 wt.% 20(g)	0.1 M (14.3 g)	20
No.2	1 ℓ	3.0	3.5 wt.% 35(g)	0.1 M (14.3 g)	20
No.3	1 ℓ	3.0	5.0 wt.% 50(g)	0.1 M (14.3 g)	20
No.4	1 ℓ	3.0	3.5 wt.% 35(g)	0.15 M (21.5 g)	20
No.5	1 ℓ	3.0	3.5 wt.% 35(g)	0.2 M (28.6 g)	20
No.6	1 ℓ	3.0	3.5 wt.% 35(g)	0.2 M (28.6 g)	50
No.7	1 ℓ	3.0	3.5 wt.% 35(g)	0.2 M (28.6 g)	80
No.8	1 ℓ	7.0	-	-	20

를 위해 온도에 변화를 주었다. 이상의 부식 특성 평가를 위한 실험 조건을 정리하여 Table 3에 나타냈다.

2.4 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 NaCl에 대해 동전위 분극실험을 통하여 획득한 부식전류밀도(icorr)와 부식전위(Ecorr)와의 관계인 동전위 분극곡선을 예시한 것이며, Fig. 3은 밀도는 7.98 g/cm^3, 이온당량은 25.05[6]로 하여, 앞에 주어진 식(1), 식(2)로부터 부식속도를 계산하여 나타낸 것이다.

그림에서 NaCl은 농도 3.5 wt.% 까지는 부식속도가 증가하나 NaCl 3.5 wt.% 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 NaCl의 농도가 증가함에 따라 전도도가 증가하게 되고 이로 인해 양극과 음극 사이의 부식전류가 커지게 된다. 그리고 NaCl 3.5 wt.% 이상에서는 산소의 용해도 및 확산속도가 감소함에 따라 전도도가 낮아지게 되며 이로 인해 양극과 음극이 조밀한 간격으로 존재하게 된다. 이는 양극의 반응 생성물이 음극의 산소환원을 제한했기 때문으로 사료된다. Na_2SO_4가 증가할수록 부식 속도가 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 황산이온(SO_4^{-2})이 금속표면에 흡착하여 전기화학적 반응을 크게 촉진시키기 때문으로 사료된다. 또한, 온도가 증가할수록 부식속도가 증가함을 볼

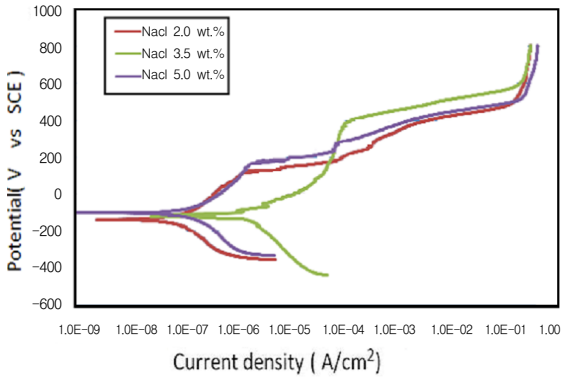
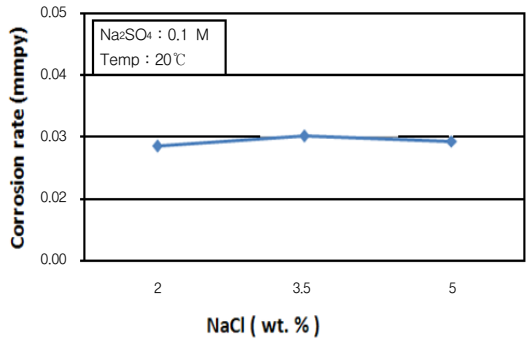
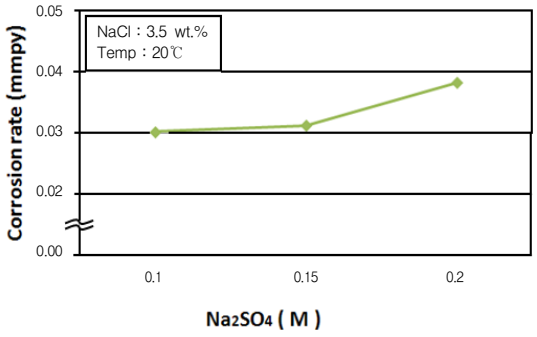


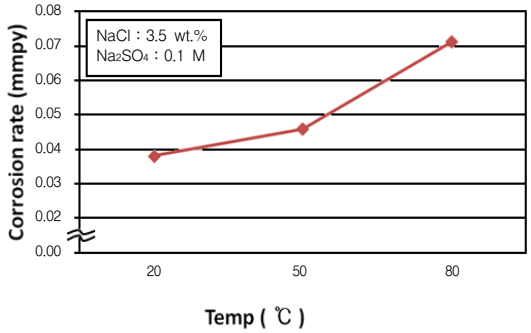
Fig. 2 Potentio-dynamic polarization curves.



(a) Effect of NaCl



(b) Effect of Na_2SO_4



(c) Effect of Temperature

Fig. 3 Corrosion rates for various corrosion environment.

수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하게 되고 따라서 확산계수가 증가하게 됨으로써, 부식이 촉진되었기 때문으로 사료된다.

3. 부식 피로 평가

3.1 시험편

부식피로강도를 평가하기 위한 시험편은 전기 화학적 부식특성 평가에 사용된 재료와 동일하며, 시험편의 형상은 Fig. 4와 같다.

시험편의 그립부는 나사가 부식액에 접촉하는 것을 방지하기 위해 암나사로 가공하였으며, 시험편의 표면은 유지성분이나 불순물 등이 균열진전속도에 영향을 미칠 수 있으므로, ASTM G102[7]에 의거하여 시험편의 표면을 에머리페이퍼(#1000)로 연마한 후 아세톤용액으로 초음파 세척을 하였다.

3.2 실험장치

부식피로강도평가는 부식피로시험전용으로 자체 설계 제작한 Fig. 5의 수평식 피로 시험기를 사용하였다. 부식조는 시험편 이외의 다른 금속이 부식용액과 접촉되어 발생하는 갈바닉 부식(galvanic corrosion)을 방지하기 위해 아크릴수지로 제작하고, 아크릴 수지와 시편이 닿는 부분은 리데너(retainer)를 이용해서 누수를 방지 하였다. 일정한 온도 유지는 온도 조절기, 열전대, 밴드히터를 사용하였으며, 밴드히터는 부식조에 직접 부착할 수 없어 유리로 제작된 수조를 이용해 일정한 온도를 유지시켰다. 부식용액은 실험기간중 화학적 평형이 일정하게 유지됨으로써 부식작용이 원활하게 진행될 수 있도록 순환장치와 유량계를 이용하여 일정속도(0.5 L/min)로 순환되게 하였다.

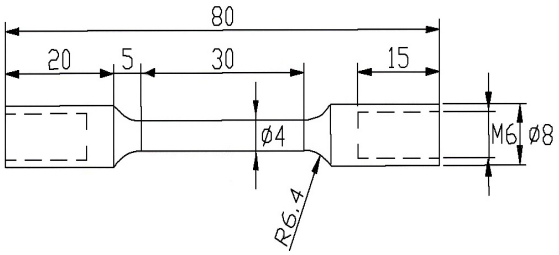


Fig. 4 Configuration of smooth specimen for corrosion fatigue test.

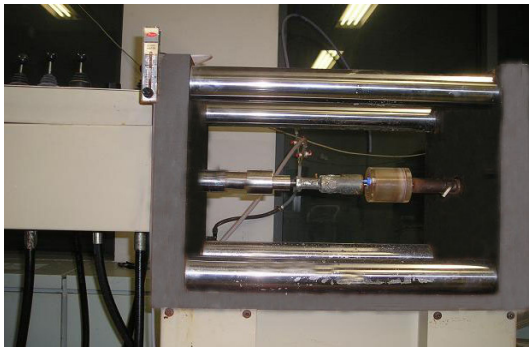


Fig. 5 Horizontal corrosion fatigue tester.

3.3 실험조건 및 방법

부식피로 강도를 평가하기 위한 인가하중은 SUS 316의 극한강도 579.2 MPa를 최대하중으로 시작하여 5%씩 하중을 감소시키고, 하중비(R = $P_{\min}/P_{\max}$)는 0.1로 부식피로실험을 실시하였다. 부식피로수명은 시험편이 완전히 파단 될 때까지의 사이클수로 하였고, 피로한도는 10^6사이클까지 재료파단이 일어나지 않는 하중으로 하였다. 하중 반복속도는 시험편과 수용액 간의 충분한 부식반응에 의해 피로균열이 발생하고 거동하도록 1 Hz로 하였으며, 증류수와 부식 용액조건에서 부식피로실험을 실시하였다.

3.4 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 부식환경과 증류수에서의 부식피로강도를 $\sigma_{\max} - N_f$의 관계를 나타낸 것이다. 부식환경과 증류수에서의 피로시험 결과를 비교해 보면 고하중 값에서는 비슷한 주파수값에서 피로파괴가 발생하

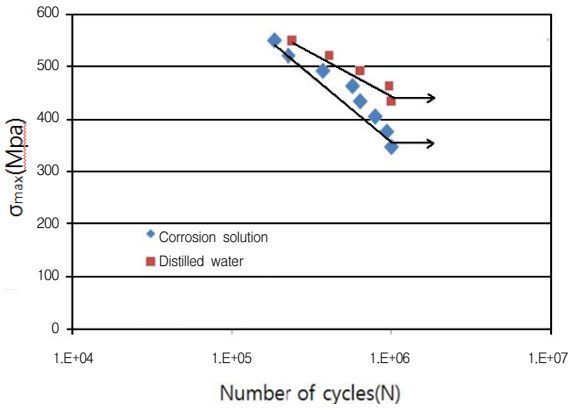


Fig. 6 Relationship between $\sigma_{\max} - N_f$.

였지만, 저하중값으로 갈수록 동일한 하중에 대해서 부식피로수명의 차이가 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 고하중 범위 일수록 부식피로 파단이 전기화학적 부식작용 영향보다는 외력의 영향으로 발생하는 것으로 사료된다. 증류수에서의 피로한도는 극한강도의 75%에 해당하는 434.4 Mpa이며, 부식환경에서의 피로한도는 극한강도의 60%에 해당하는 347.5 Mpa로 나타났으나 저하중 범위에서도 장시간 시험이 진행된다면, 부식의 영향으로 시편이 파단 될 가능성이 있음을 알 수 있다.

이는 시험편 No. 7과 No. 8의 경우, 부식속도가 각각 0.0712483 mmpy, 0.0024430 mmpy로 약 30배의 차이가 나타난다는 결과로 뒷받침 할 수 있다.

4. 결 론

지열발전 플랜트 분야의 재료로 이용되는 SUS316에 대해 전기화학적 부식특성실험과 부식피로 실험을 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) NaCl 부식환경의 경우, 부식속도는 농도 3.5 wt.% 까지는 증가하나 그 이상에서는 오히려 감소하며, Na_2SO_4 부식환경과 온도영향의 경우, 농도나 온도가 증가할수록 부식속도는 증가함을 나타냈다.

(2) 실험조건에서 부식환경에서의 부식속도는 증류수환경에서의 부식속도에 비해 약 30배 빠르게 나타났다.

(3) 부식환경에서의 피로한도는 극한강도의 60%인 347.5 Mpa이며, 증류수에서의 피로한도는 극한강도의 75%인 434.4 Mpa로 나타났다.

후 기

이 논문은 2010년도 호서대학교학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Kim, C. M. and Kim, K. Y., 2008, A study on economic analysis of new renewable energy power(photovoltaic, wind power, small hydro, biogas), The Korea solar energy society, Vol. 28, No. 6, pp. 1-28.
2. Tolivia, M. E., 1998, Corrosion measurements in a geotanihermal environment, Geothermics, Vol. 2, No. 2, pp. 1596-1601.
3. Zaki, A., 2006, Types of corrosion : materials and environments, Principles of corrosion engineering and corrosion control, pp. 120-270.
4. Lee, I. H., Lee, H. L., Hwang, U. S., and Kim, K. K., 2003, Principles and prevention of corrosion, Sinkwang, pp. 197-190.
5. ASTM, 2002, Standard reference test for making potention-static and potentio-dynamic anodic polarization measurement, G5-94.
6. ASTM, 2002, Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements, G102-89.
7. ASTM, 2005, Standard practice for preparing, cleng, and evaluation corrosion test specimens, G102-89.