

터빈 수명평가를 위한 전기화학법의 현장적용에 관한 연구

장성호* · 김진호* · 송기욱* · 유효선**

A Study on the Life Assessment for Turbine Rotor by the In-field Electrochemical Method

S. H. Chang*, J.H. Kim*, G. W. Song*, H. S. Yu**

Key Words : 터빈(Turbine), 로터(Rotor), 수명평가(Life Assessment), 전기화학법(Electrochemical Method), 재질열화(Material Degradation).

Abstract

Nowadays, 60 percent of thermal power plants already have been operated over their own design life. These operations of old power plant over their design life have caused a fracture accident of degradation, a loss of economic and human. Therefore, the new life assessment and prediction technology is necessary to improve the safety and reliability of high pressure and high temperature power plant facilities. In this paper, innovative electrochemical test method have been used and results have been compared to the conventional test. Finally, the electrochemical test is applied to the in-field HP turbine and a database is currently in progress for the development of the life assessment standard and procedure.

기호설명

DBTT : 연성-취성전이온도 (Ductile-Brittle Transition Temperature)
 Δ DBTT : 재질열화도 (Difference of DBTT for degraded material and de-embrittled material)
 E_{Corr} : 자연부식전위 (Open circuit potential)
 I_{FP} : 재활성화 개시전하량 (First peak current density at passivation region)
 E_{SP} : 제 2 차 부동태 완료전위
 I_{Crit} : 임계부동태 전류밀도
 I_{SP} : 제 2 차 부동태화 전류밀도
 I_{FP} : Peak 전류밀도
 I_{PP} : 부동태화 전류밀도 (Initial current density of passivation region)
 I_R : 재활성화 전류밀도 (Reactivation current density)
 $I_{RC}/I_{Crit}(Q_R/Q_{Crit})$: 재활성화율 (Potentiokinetic reactivation rate)

ΔI_{FP} : I_{FP} 와 I_{PP} 의 차
 ΔI_{SP} : I_{FP} 와 I_{SP} 의 차
 Q_{Crit} : 부동태 완료전위까지의 전하량
 Q_{RC} : 재활성화 전하량 (Reactivation charge)

1. 서론

70년대 이후 경제개발 계획의 추진과 함께 국내에 건설된 발전설비는 상업운전개시 이후 15년 이상 장기사용된 고온 설비가 점점 증가하고 있는 추세이다. 따라서, 재질열화에 의한 파손사례는 설계수명 임박 및 초과와 설비의 경제성 향상을 위한 가혹한 운전 조건 등으로 인해 발전설비의 보일러 및 터빈을 비롯한 각종 에너지 변환 설비 등에서 발견되고 문제시되고 있다. 이에 따른 사회적, 경제적 손실은 물론 인명 피해도 초래하고 있어, 이에 대한 대응책으로 발전설비 고온부재의 경년열화도 평가는 노후화된 고온설비의 안정성 및 효율적인 운전조건을 확보하기 위해 매우 중요한 사안이 되고 있다.

고온설비의 경년열화 및 손상 정도는 발전설비

* 전력연구원 (Korea Electric Power Research Institute)

** 전북대학교 (Chonbuk National University)

에서 직접 재료를 채취하여 충격시험이나 크리프 시험 등의 기계적 파괴시험을 행하여 평가하는 것이 가장 정확하다. 그러나, 가동중인 설비에서 시험을 위한 대량의 시험편 채취가 불가능하다. 따라서, 발전설비의 고온부재에 대한 잔여수명평가와 관련된 현상태 진단 기술의 개발은 발전설비의 강도 및 특성에 영향을 미치지 않는 범위에서의 비파괴적인 방법으로 검출하여 평가할 수 있는 새로운 기술개발이 필요하다.

최근에는 내부 구조변화에 기인한 재료의 전기화학적 성질(Electrochemical property)의 변화를 이용한 비파괴 평가법이 제안되고 있으며, 이 방법은 단일의 시험방법으로 다양한 손상의 계측 평가가 가능한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 전기화학시험법(Electrochemical test method)을 이용하여 화력발전설비인 터빈 케이싱강인 Cr-Mo-V 강에 대한 신재와 시효 열처리재의 재질열화 평가를 하였으며, 최종적으로는 전기화학시험에 의한 비파괴적인 재질열화 평가 및 진단 기술의 정립과 발전설비인 터빈 수명평가에 현장 적용을 연구목적으로 하였다.

2. 전기화학시험법

2.1 전기화학시험 측정법의 개요

전기화학시험법은 크게 두 가지 방법이 사용되고 있으며 다음과 같이 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 용액중에서 전위에 따라 흐르는 전류를 측정하거나 시간에 따라 전류나 전압을 측정하여 부식 속도나 경향을 구하는 방법이 있다. 간접적인 부식원인을 연구하는데 많이 사용되었으며, 주로 부식 현상의 관찰이나 부식 방지 효과를 평가하는데 사용되고 있다. 두번째 방법과 구별하기 위하여 이 방법을 직류법이라 한다.

두 번째 방법은 대상이 되는 전위에서 전위를 변화를 매우 적게주어 그때 나타나는 전류변화의 관계로부터 전기적 임피던스를 구하여 전극과 용액과의 계면에 대한 상세한 정보를 얻어 부식기구를 연구하는 방법이다. 이 방법은 직류법으로부터 얻어 낸 정보로부터 자세한 부식경로를 구하기 위해 사용되며 매우 빠른 속도로 자료를 얻을 수 있어 시간에 따라 변하는 부식 반응의 연구에도 큰 도움이 된다. 그러나 이 방법은 부식 속도 측정에는 유리하지만 실험 방법이 까다로우며 자료해석에 어려움이 많고 거의 보편화되지 않았으며, 현재 개발 중에 있는 방법이다.

본 연구에서는 전기화학시험법들 중에서 직류법을 이용하였다.

2.2 전기화학시험 장치의 구성

앞 절에서 설명한 직류법에 의한 부식 측정법은 전통적으로 사용되어 왔으며, 현재 보편화되어 측정방법도 표준화되어 있다. 직류법에 의한 전기화학적 측정방법으로써 주로 사용되는 것으로는 정전위법 (Potentiostatic Polarization Method), 전위구동법 (Potentiodynamic Polarization Method), 분극저항법 (Polarization Resistance Method), 순환 분극법(cyclic Polarization Method), 재활성화 분극법 (Potentiokinetic Reactivation Method) 등이 있다.

여러가지 전기화학시험법중에서 본 연구에서는 정전위법, 전위구동법 그리고 재활성화 분극법을 이용하여 연구를 수행하였다. 전기화학시험법의 전체적인 시스템은 Fig.1 과 같다.

부식측정뿐만 아니라 전기화학 실험에 필수적인 장비는 정전위기 (Potentionstat)이다. 정전위기는 시편에 해당하는 시료전극 (working electrode)과 기준전극 (reference electrode) 사이의 전위차가 원하는 값이 되도록 보조전극 (auxiliary electrode)의 전류를 조절하도록 구성되어 있다.

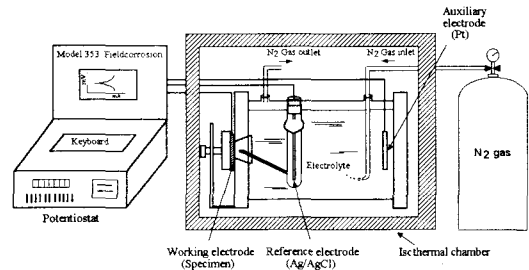


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical test system

기준전극의 전위 측정은 분극(Polarization)에 의한 전위의 오차를 없앨 수 있도록 입력저항이 $10^{11}\Omega$ 이상되는 electrometer를 사용한다.

시료전극 (working electrode)은 일정한 면적을 가지도록 하여야 한다. 시료 홀더와 시료사이에는 틈이 없어야 하며, 틈이 있을 경우에는 틈에 의한 부식 (crevice corrosion)이 가속화되어 정작보고자 하는 반응을 간과할 경우가 있다.

기준전극 (reference electrode)으로는 포화 카로멜 전극 (saturated calomel electrode:SCE)이나 포화 Ag/AgCl 전극을 가장 많이 사용한다. SCE 는 내부용액이 시간당 약 $3\mu\text{l}$ 정도 흘러나오므로 용액과 기

준전극사이에 salt bridge 를 만들어 기준전극의 내부 용액이 시험하고자 하는 용액에 흘러 들어가는 것을 방지해야 한다.

보조전극 (auxiliary electrode)은 전류를 흘려주는 역할을 할뿐이므로 자체반응이 없는 전극을 쓴다. 백금망을 쓰거나 백금판이나 선위에 백금을 도금하여 사용한다. 보조전극의 면적은 시료전극보다 2 배이상 넓게하여 분극을 억제한다.

2.3 전기화학시험 분석 내용 및 범위

본 연구에서 실험분석에는 열처리가 되지않은 Cr-Mo-V 터빈 케이싱강 신재를 대상으로 하였다.

고온 재질의 열화도 평가를 위한 최적의 전해 조건 등 전기화학 실험조건을 제시하고 전기화학 분극시험 결과치 (임계부동태 전류밀도, 부동태화 완료전위와 전류밀도, 부동태 피막 형성후 전류밀도의 거동, 재활성화 전하량 등)와 재질열화 특성과의 상관관계를 조사분석하였다.

전기화학분석 결과치와 연성-취성전이온도 등 재질열화 특성과의 정량적인 상관관계를 비교, 분석하고 열화도 평가가 가능한 전기화학적 파라메타를 제시한다.

실험실에서 수행하는 전기화학시험법을 시편 채취가 곤란한 현장 발전설비의 재질열화를 평가하기 위한 portable electrochemical test cell 의 개발과 적용과 현장에 적용하기 위한 기술의 개발 및 가능성을 확인하였다.

3. 시험편과 실험방법

3.1 시험편

본 연구에 사용한 시험편은 Cr-Mo-V 터빈 케이싱강 신재를 사용하였다. Table 1 은 케이싱 강 의 화학적 성분을 나타냈었다.

Table 1. Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.15	0.15-0.3	0.4-0.6	0.7-1.2	0.7-1.2	0.25-0.35

Cr-Mo-V 강 의 인공시효재를 얻기위해 시험편을 실제 사용온도(550-650℃)보다 높고 뜨임 처리 온도보다 낮은 온도에서 모의 열화, 즉, Aging heat treatment 를 행하였으며, 각각의 시효조건에 따라 전기화학시험용 시험편을 제작하였다. Aging heat

treatment time 은 철의 자기확산에 필요한 활성화 에너지에 근거한 다음식으로 결정하였다. 이때 확산계수 $D_1=D_2$ 이므로 $t_2=t_1 \exp[Q(T_2^{-1}-T_1^{-1})/R]$ 의 관계식이 성립한다.

$$538^\circ\text{C에서 } D_1=D_0 \exp[-Q/RT_1]=\text{constant}/t_1$$

$$630^\circ\text{C에서 } D_2=D_0 \exp[-Q/RT_2]=\text{constant}/t_2$$

여기서, R 은 기체상수, Q 는 철의 자기활성화 에너지로 약 65kcal/mol.이다. Table 2 에는 630℃에서의 시효열처리 시간과 실기온도 538℃에서의 모의 열화시간을 나타내었다.

Table 2. Accelerated aging time at 630℃ and simulated time at in-service at 538℃

Simulated time at in-service at 538℃ (hrs)	Aging time at 630℃ (hrs)
5,500	100
27,000	500
55,000	1,000
110,000	2,000
160,000	3,000

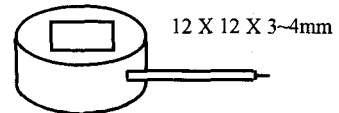


Fig. 2 Electrochemical test specimen

Fig. 2 는 전기화학시험에 사용된 시험편의 형상과 크기를 나타내었다. 전기화학시험편은 12mm X 12mm X 3-4mm 의 크기로 제작하였다.

3.2 Cr-Mo-V 강 의 전기화학실험

Fig. 2 와 같이 준비된 전기화학시험편은 뒷면에 리드선을 연결하고 시험 부식면을 제외한 나머지 부분은 에폭시 수지로 피복하여 분극 계측용 시험편을 제작하였다. 시험편의 표면상태는 조직상태를 관찰할 수 있도록 등교 paper 를 이용하여 #100-2,000 까지 연마한 후 alumina power(0.3μm)를 이용하여 연마를 함으로써 표면을 경면상태를 유지하였다. 분극시험전 시험편은 탈기 건조시킨후, 틈부식을 방지하기 위하여 시험편 주위를 절연성 도료로 피복하고, 만능 투영기에 의해 시료면적을 측정하여 분극시험 결과분석에 이용하였다. 전해액에 노출된 시험편 면적은 0.9199cm²로 하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 조직관찰과 경도측정

현재 화력발전설비의 터빈케이싱 및 터빈로터 강재로 사용되는 Cr-Mo-V 강은 고온강도가 우수한 재료로 널리 알려져 있으나 고온에서 장시간 사용하게 되면 조직의 입내에서는 연화 그리고 입계에서는 취화의 거동을 보이는 재질형 열화거동을 나타낸다. 실제 연화나 취화거동이 터빈설비의 수명에 지대한 영향을 주는 것은 아니지만 이들은 고온 크리프 및 입계강도에 영향을 주기 때문에 구조물의 수명관리를 위해서는 이들 에 대한 정확한 상태진단이 요구된다.

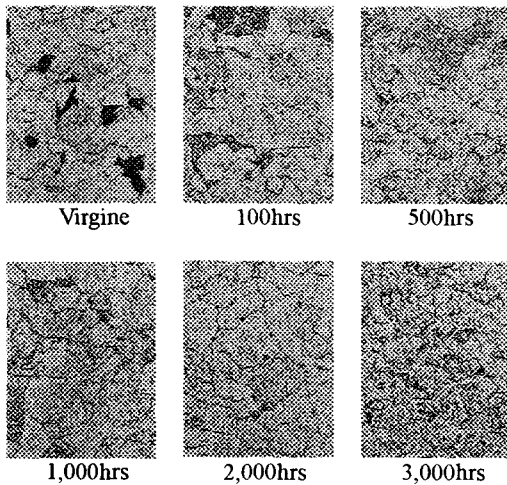


Fig. 3 Microstructures of aged materials etched by picric acid solution

Fig. 3 에 Cr-Mo-V 강의 신재와 시효시간에 따른 열화재의 조직사진을 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 as-received 재인 신재의 경우는 페라이트와 퍼얼라이트 조직으로 구성되어 있음을 관찰할 수 있다. 또한 시효시간이 증가함에 따라 조직의 구성은 그 정도는 적지만 입계폭의 증가와 함께 퍼얼라이트 조직 분률이 점차 감소함을 알 수 있다. 이들 조직에 대해 비커스 경도를 측정된 결과는 Fig. 4 와 같다. 신재에 대해 1,000hrs.까지 시효처리된 열화재는 경도가 증가하는 취화거동을 보이고 있으나 2,000hrs.과 3,000hrs. 시효재는 경도가 감소하는 연화의 거동을 보이고 있다.

이같은 거동은 신재에 대한 경도차이(ΔH_V)를 나타낸 Fig. 5 에서 뚜렷이 확인할 수 있다. 그리고 조직사진에서 알 수 있듯이 시효재 2,000hrs.와

3,000hrs.의 경우는 퍼얼라이트상이 거의 나타나지 않아 경도값은 모재보다 낮은 값을 보인다고 생각된다. 또한 3,000hrs. 시효재의 경우는 열처리에 의해 생성된 미세한 탄화물을 관찰할 수 있어 구성조직은 낮은 경도값을 보이고 있는 것으로 사료된다.

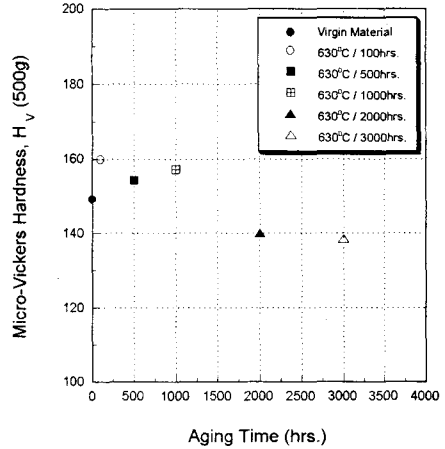


Fig. 4 Variation of Vickers hardness

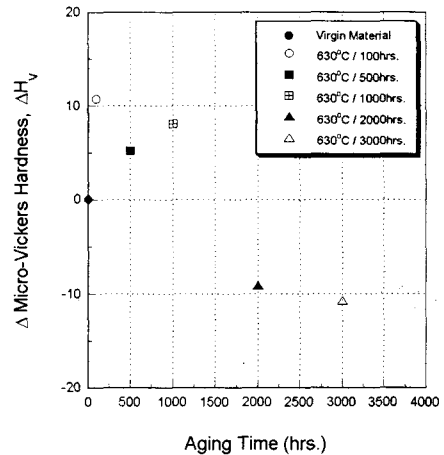


Fig. 5 Variation of Δ Vickers hardness

4.1.1 양극분극시험에 의한 재질열화도 평가

본 절에서는 양극분극 시험법을 이용하여 앞서 살펴본 시험재에 대한 전기화학시험을 수행하였다. 먼저 Cr-Mo 강계의 뜨임취화(temper embrittlement) 평가에 유용하다고 보고된 질산칼슘 전해액을 이용하여 전기화학분극 특성을 조사하였다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 시효열처리재의 양극분극거동

을 나타낸 결과이며, 비교를 위해 몇몇 시험재를 함께 나타내었다.

각 시험재의 양극분극곡선상의 부동태화 전류 밀도인 I_{PP} 를 관찰해 볼 때, 신재의 경우는 약 30 A/cm^2 로 가장 높은 값을 보이고 있으며, 시효재의 경우는 약 $11 \text{ A/cm}^2 \sim 24 \text{ A/cm}^2$ 로서 큰 차이를 보이고 있지 않아 각 시험재의 재질열화 거동을 I_{PP} 의 인자로서 평가한다는 것은 어려움이 있다.

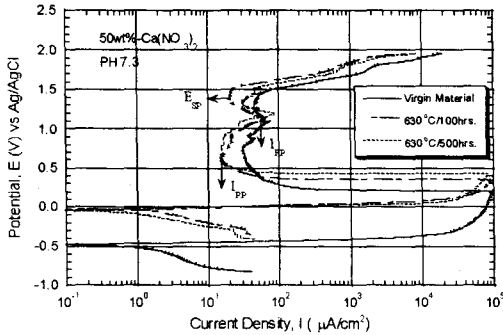


Fig. 6 Aging time dependence of polarization curves for virgine and serveral aged materials in $50\text{wt}\%-\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

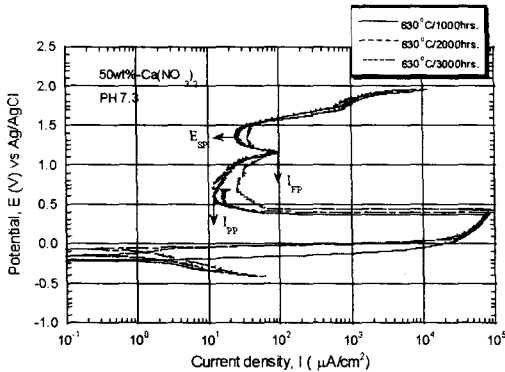


Fig. 7 Aging time dependence of polarization curves for serveral aged materials in $50\text{wt}\%-\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

5. 전기화학실험의 현장적용

5.1 HP turbine의 현장 전기화학실험

현장에서 운전중인 발전설비 부재에서는 Fig. 2 와 같이 시편을 만들기 위해서 실비에서 직접 시편을 채취할 수 없다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 실험실에서 수행되는 전기화학시험을 현장의 발전설비에 직접 적용하기 위해 제작된 전기화학시험용 portable cell 을 high pressure turbine 에 설치하여 실험을 하고 있는 것을 보여주고 있다.

을 하고 있는 것을 보여주고 있다.

Fig. 8 은 HP turbine 의 제 1 단 고온부에 설치한 것이다. Portable electrochemical cell 을 현장의 HP turbine 에 설치하기 위해서는 수행하고자 하는 부분의 스테일과 이물질 제거하고, diamond paste ($1\mu\text{m}$) 를 이용하여 표면을 경면처리하였다.

전처리가 완료된 후 cell 을 표면처리된 부분에 위치한 다음 테프론 판을 cell 과 시험대상 부위의 사이에 넣고 cell 을 고정한다. 각각의 electrode 를 연결한다.

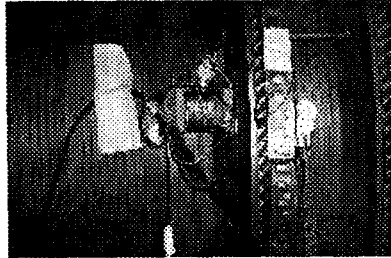


Fig. 8 In-field electrochemical test for HP turbine

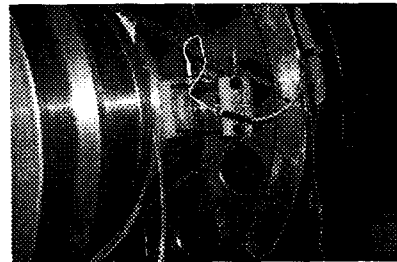


Fig. 9 In-field electrochemical test for turbine plange

Fig. 9 는 turbine 의 저온부인 plange 에 portable electrochemical test cell 을 설치한 장면이다.

현장에 사용된 전기화학시험장치는 Fig. 1 과 같은 시스템으로 구성되어 있으며, Fig. 2 와 같은 실험실용 전기화학시험편이 아닌 현장의 발전설비인 터빈에 직접 cell 을 고정하여 실험을 수행하였다.

5.2 결과 및 분석

현장의 1 차 부동태 피막 형성 후 전위의 증가에 따라 나타나는 전류 밀도치의 최대값(1 차 peak) 및 2 차 부동태 영역이 나타나지 않은 관계로 현재의 데이터는 부득이하게 I_{crit} (임계부동태 전류밀도) 만으로만 해석이 가능하다. 이러한 원인은 실기 현장에 적용할 때 작용되는 실험변수들

중 특히 실험온도(실험실 실험온도 25°C, 현장 실험 온도 10°C)의 영향에 기인한 것으로 생각되며, 급후 현장 cell 의 수정 및 온도 보정 장치를 개선하면 보다 정확한 평가가 가능할 것으로 생각된다.

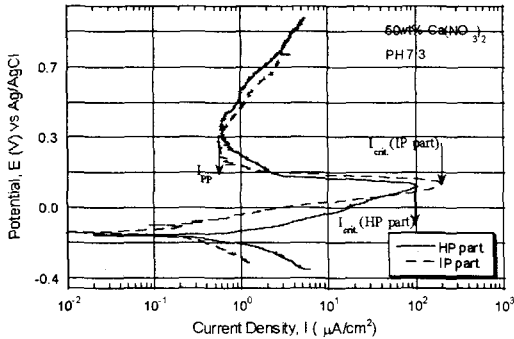


Fig. 10 Aging time dependence of polarization curve for HP turbine

현재의 데이터를 가지고 분석하면 HP part 의 I_{crit} 이 IP part 의 I_{crit} 보다 낮기 때문에 HP part 가 열화가 좀더 진행된 것으로 생각된다.

6. 결론

본 연구에서는 화력발전설비인 Cr-Mo-V 터빈 케이싱강의 비파괴적인 재질열화 평가 및 진단기술의 개발을 위해 신재와 인공 시효 열처리재를 대상으로 전기화학적 양극분극 특성을 조사하였으며, 전기화학시험법을 이용하여 시편 채취가 곤란한 현장의 운전중인 발전설비에 대한 전기화학시험법의 적용 및 개발 가능성을 시도하였다.

시험결과들을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 시효시간이 증가함에 따라 조직의 구서은 작지만 입계폭의 증가와 함께 pearlite 조직 분률이 점차 감소하였다.
- (2) 신재에 대해 1,000 시간까지의 시효 열화재는 경도가 증가하는 취화 거동을 보이고 있으나 2,000 시간과 3,000 시간 시효열화재는 경도가 감소하는 연화의 거동을 보였다.
- (3) 538°C에서 약 160,000 시간 사용재에 상당하는 장시간 시효처리된 3,000 시간의 경우는 인성의 강화를 보였는데, 이는 입내 및 입계에 석출된 미세 탄화물에 의한 석출강화 (precipitation strengthening) 효과에 기인한 결과로 보인다.
- (4) 30°C로 유지된 50wt%-Ca(NO₃)₂ 전해액중에서

Cr-Mo-V 강 의 신재와 각 시효재의 양극분극 거동은 뚜렷한 활성화 거동과 부동태거동을 보였고, 열화재의 부동태화 전류밀도인 I_{pp} 는 약 11 μ A/cm²-24 μ A/cm²로서 큰 차이를 보이지 않아 I_{pp} 의 특성치로서 재질열화도를 평가한다는 것은 어려움이 있다.

- (5) 현장에서 직접 발전설비에 적용할 때 작용되는 실험변수들 중 특히 실험온도 (실험실 실험온도 25°C, 당시 현장 실험 온도 10°C)의 영향에 따라 데이터의 신뢰성이 좌우된다. 따라서, 현장 cell 의 수정 및 온도 보정 장치를 개선하면 보다 정확한 평가가 가능할 것으로 생각된다.

지금까지 Cr-Mo-V 강 의 신재 및 시효열처리 재질에 대한 전기화학시험에 의한 재질열화평가와 현재 운전중인 발전설비에 대한 현장적용 및 결과를 분석하였다.

향후 뜨임 취화 및 탄화물 취화에 더욱 민감한 열처리된 Cr-Mo-V 강에 대한 전기화학적 시험 데이터를 보강하면, 최종적으로는 화력발전설비인 터빈의 재질열화 평가를 위한 데이터베이스의 확보와 수명평가의 수행이 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) J.C. Murza, C.J. McMahon, 1980, Jr., "The Effects of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in 2.25Cr-1Mo Steel", Trans. ASME, J. Eng Mater. Technol. 102, pp.369~375.
- (2) EPRI, 1985, "Manual for Investigation and Correction of Boiler Tube Failures", pp.1~110.
- (3) R. Viswanathan and S.M. Gehl, 1992, "Life-Assessment Technology for Power-Plant Components", JOM Feb., pp.34~42.
- (4) G.A. Webster and R.A. Ainsworth, 1993, "High Temperature Component Life Assessment", CHAPMAN & HALL, pp.1~319.
- (5) 유효선, 1999, "입계부식법을 이용한 열화도 평가 프로그램 개발", 한국표준과학연구원 보고서, pp.1-219.
- (6) Shoji and Watanabe, 1991, "Non-destructive Evaluation of Material Degradation in 2.25Cr-1Mo Steel by Electrochemical Technique", Japanese Jour. of Material, Vol. 40, No. 448, pp.89~95.
- (7) 유효선, 1998, "전기화학적 분극시험방법에 의한 고온부재의 비파괴적 뜨임취화 평가 기술개발에 관한 연구", 한국과학재단 연구보고서, pp1~89.
- (8) R. Viswanathan and S.M. Gehl, 1991, Journal of Engineering Material and Technology, Vol. 113, p.263.