

전기화학적 재활성화 분극시험에 의한 터빈부재의 열화손상 평가

권일현* · 백승세** · 류대영*** · 유효선†
(2001년 5월 24일 접수, 2002년 4월 23일 심사완료)

Degradation Damage Evaluation for Turbine Structural Components by Electrochemical Reactivation Polarization Test

Il-Hyun Kwon, Seung-Se Baek, Dae-Young Lyu and Hyo-Sun Yu

Key Words: Cr-Mo-V Steel(Cr-Mo-V강), Aged Materials(시효재), Reactivation Polarization Test(재활성화 분극시험), Small Punch(SP) Test(소형편치시험), Degradation Damage(열화손상), Δ [DBTT]_{SP}(재질열화도), Reactivation Current Density(I_R , 재활성화 전류밀도), Reactivation Rate(I_R/I_{CRIT} , Q_R/Q_{CRIT} , 재활성화율)

Abstract

The extent of materials deterioration can be evaluated accurately by mechanical test such as impact test or creep test. But it is almost impossible to extract a large test specimen from in-service components. Thus material degradation evaluation by non-destructive method is earnestly required. In this paper, the material degradation for virgin and several aged materials of a Cr-Mo-V steel, which is an candidate as structural material of the turbine casing components for electric power plant, is nondestructively evaluated by reactivation polarization testing method. And, the results obtained from the test are compared with those in small punch(SP) tests recommended as a semi-nondestructive testing method using miniaturized specimen. In contrast to the aged materials up to 1,000hrs which exhibit the degradation behaviors with increased Δ [DBTT]_{SP}, the improvement of mechanical property can be observed on the 2,000hrs and 3,000hrs aged materials. This is because of the softening of material due to the carbide precipitation, the increase of ferritic structures and the recovery of dislocation microstructure by long-time heat treatment. The reactivation rates(I_R/I_{CRIT} , Q_R/Q_{CRIT}) calculated by reactivation current density(I_R) and charge(Q_R) in the polarization curves exhibit a good correlation with Δ [DBTT]_{SP} behaviors.

1. 서론

저합금 페라이트계 강은 용접성 및 가공성이 우수할 뿐만 아니라 고온·고압하에서 뛰어난 기

계적 성질을 유지하기 때문에 터빈 로터, 케이싱, 파열기 튜브 그리고 헤더 등과 같은 화력 발전소 설비부재의 구조재료로 널리 사용되어 왔다. 그러나 이와 같은 저합금 페라이트 강은 그 사용시간이 증가함에 따라 기계적 성질이 현저히 저하되는 재질열화(material degradation) 현상이 발생하여 설비부재의 수명 단축을 초래한다. 국내에서 가동 중에 있는 화력발전 설비중 상당부분은 그 사용이력이 약 15~20년을 초과하고 있고, 근래에는 경제적인 이유로 인해 화력발전소의 신설보다는 보수를 통해 설계수명을 연장하고자 하는

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

* 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소
E-mail : crack67@hanmail.net

TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

** 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 전주공업대학, 정밀기계과

추세에 있다. 결국 고온 설비부재의 열화 손상평가는 초기의 설계수명까지의 안전성 및 신뢰성 있는 운전조건의 확보 및 설계수명 연장을 위한 보수의 측면에서 매우 중요하다.^(1,2)

적합금계 페라이트강의 재질열화 평가는 주로 파괴인성⁽³⁾ 및 크리프 특성의 저하⁽⁴⁾ 등과 같은 파괴실험에 의해 얻어진 물리량에 의해 판단되어 왔다. 그러나, 이러한 파괴적인 열화손상 평가법은 시험편의 채취시 크기의 제한성 때문에 가동중에 있는 설비부재에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서, 설비부재의 수명에 영향을 주지 않는 범위에서 현상태 진단을 할 수 있는 비파괴적인 재질열화 평가법의 개발이 요구되었다. 최근 경년열화된 설비부재의 현상태 진단기술을 위한 비파괴적인 시험방법으로서 열화에 따른 조직의 전기화학적 성질의 변화를 이용한 전기화학 분석법이 국내·외의 연구기관에서 활발히 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾

본 연구에서는 전기화학적 시험에 의해 고온부재의 비파괴적인 재질열화 평가와 현상태 진단기술의 최종적인 확립을 위한 기초자료를 구축하기 위해 지금까지 보고되지 않은 터빈 케이싱 부재인 Cr-Mo-V강의 신재 및 인공시효재(artificially aged materials)에 대한 전기화학적 재활성화 분극 시험(reactivation polarization test) 결과에 대해 논하고자 한다. 또한 그의 시험결과는 준비파괴적인 소형편치(small punch : SP)시험의 인성 평가 결과와 비교·검토되었다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료와 시험편

시험재료는 화력 발전소의 터빈 케이싱의 구조 재료로 사용되고 있는 Cr-Mo-V강의 신재와 인공시효재이다. 인공시효재를 확보하기 위해 터빈 케이싱 부재의 실제 사용온도(500~550℃)보다 높고 뜨임처리 온도보다 낮은 온도에서 모의 열화, 즉 시효열처리(aging heat treatment)를 행하여 얻었다. 이때, 모의 열화시간은 철의 자기확산에 필요한 활성화 에너지 식에 근거하여 결정하였다.⁽⁹⁾ Table 1과 2에 각각 실험재료의 화학성분과 630℃에서의 시효열처리 시간 및 실기온도 538℃에서의 모의 열화시간을 나타내었다.

준비된 재료를 대상으로 전기화학 분극실험용

시험편은 12×12×3~4mm의 크기로, SP실험용 시험편의 크기는 10×10×0.5mm로 제작하였다. 여기서 전기화학분극 시험편은 부식면을 제외한 나머지 부분을 에폭시 수지로 마운팅하였고, 표면은 0.3μm의 알루미나 파우더(alumina powder)를 이용한 buffer 연마를 행하여 평면상태로 유지하였다. 분극시험전 시험편은 탈기 건조시킨 후 틸 부식을 막기 위해 시험편 주위를 절연성 도료로 피복하였고, 시료면적은 형상투영기(×10)를 이용하여 정밀 측정된 후 분극실험에 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 미세조직 관찰 및 경도 측정

시험재인 Cr-Mo-V강의 시효 열처리에 따른 미세조직 변화를 관찰하기 위해 금속현미경을 사용하였다. 관찰을 위해 신재 및 인공 시효재를 마운팅한 후, 에머리 페이퍼(emery paper)와 알루미나 파우더를 이용하여 경년 연마하였다. 그 후 연마된 시험편 표면에 남아있는 불순물을 제거하기 위해 아세톤 세정을 한 후 포화 피크린산(picric acid) 부식액을 사용하여 표면을 30분 부식(etching)한 후 조직관찰을 수행하였다.

노말라이징과 템퍼링(normalizing + tempering : NT)에 의해 강화처리된 Cr-Mo-V강의 재질열화 거동은 입계취화와 입내연화가 큰 원인으로 되기 때문에 이를 조사하기 위해 경도측정을 행하였다. 표면상태에 따른 경도값의 오차를 줄이기 위해 측정하고자 하는 시험편의 표면은 모두 경년 연마한 후 제공되었다. 경도측정은 마이크로 비이커스 경도 시험기(micro-Vicker's hardness tester)

Table 1 Chemical compositions of Cr-Mo-V (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
0.15	0.15~0.3	0.4~0.6	0.7~1.2	0.7~1.2	0.25~0.35	bal.

Table 2 Accelerated aging times at 630℃ and simulated times at 538℃ in service

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

를 사용하였고, 부하하중은 500g으로 하였다.

2.2.2 재활성화 분극시험

분극시험시 기준전극으로는 포화 Ag/AgCl 전극을, 보조전극으로는 백금(Pt)전극을 사용하였으며, 기준전극의 내부용액이 흘러들어가는 것을 방지하기 위해 전해액과 기준전극 사이에 염다리(salt bridge)를 사용하였다. Fig. 1에 전기화학 분극시험장치의 개략도를 나타내었다.

부식액은 내열재료의 열화거동을 평가하기에 유효하다고 보고되고 있는 50wt%-Ca(NO₃)₂의 수용액을 사용하였다.⁽⁸⁾ 전해액의 온도는 시험결과에 큰 영향을 주기 때문에 30°C±2°C로 유지하였으며, 전해액의 pH는 buffer solution을 이용하여 pH7.3으로 조절하였다. 그 후 부식액은 용존산소의 영향을 제거하기 위해 순도 99%의 질소가스를 이용하여 10분간 탈기하였다. 재활성화 분극(reactivation polarization) 시험은 0.5mV/sec.의 분극속도로 부동태 전위까지 양극분극(anodic polarization)한 후 5분간 유지한 다음 다시 자연부식전위(corrosion potential : E_{Corr})를 기준으로 -50mV까지 음극분극(cathodic polarization)을 수행하여 진행되었다. 이때 전위 변화에 따른 전기화학적 용해반응량을 실시간적으로 계측하여 재활성화 분극곡선을 얻었다.

2.2.3 SP 실험방법

원자로브의 조사손상을 평가하기 위해 개발된 SP시험법은 최근 내열재료의 재열화도 평가 및 복합재료와 경사기능재료에 대한 기계적 성질의 평가에 적용되어 많은 연구논문의 발표와 그 유용성이 입증되고 있는 시험법이다. SP시험은 탄

능시험기를 사용하여 펀치 선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 $\phi 2.4\text{mm}$ 의 강구를 놓고 이를 통하여 시험편의 상부에 0.2mm/min.의 일정한 부하속도로 하중을 가하는 방법으로 수행된다. 시험온도는 액체질소를 사용하여 -196°C~실온의 범위로 하였으며, 온도 제어범위는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 로 하였다. 시효열처리재의 열화도 평가는 신재와 시효재의 연성-취성전이온도(ductile-brittle transition temperature)인 [DBTT]_{SP}의 차를 이용한 $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ 로 구하였다. Fig. 2에 SP 시험장치의 개략도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 3은 포화 피크린 산을 이용하여 30분 부식시킨 Cr-Mo-V강의 신재와 인공 시효열처리재의 미세조직 사진이다. 신재의 조직은 페라이트, 퍼얼라이트 그리고 lath 템퍼드 마르텐사이트 조직들로 구성되어 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 시효시간의 증가에 따라 lath 상의 감소와 함께 퍼얼라이트의 부피분율이 점차로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 시효 열처리에 의해 퍼얼라이트 조직내의 탄소가 강내의 다른 화학성분과 결합하여 탄화물을 형성하므로써 나타나는 탄소의 확산 이동에 의한 결과로 생각된다. 이와 같은 경향으로 2,000hrs. 및 3,000hrs. 시효계의 경우는 퍼얼라이트 조직분율이 크게 감소하였으며, 상대적으로 페라이트 조직분율의 증가를 관찰할 수 있다. 또한 미세조직 내에 고온의 장시간 열처리에 따른 Cr-Mo-V강 종의 탄화물(M₂₃C₆, M₆C) 석출도 관찰할 수 있다.^(1,10)

3.2 경도측정 결과

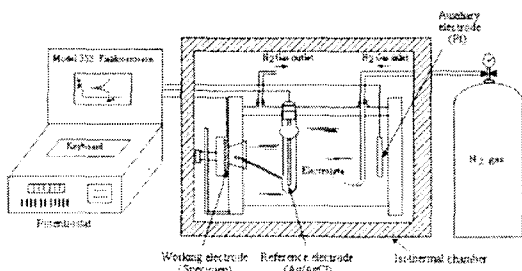


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for electrochemical polarization testing

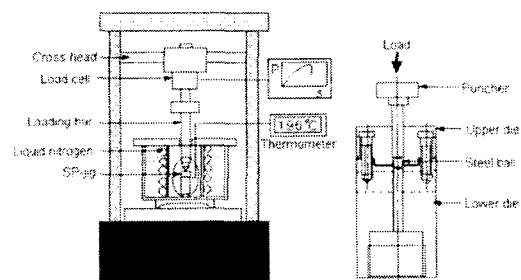


Fig. 2 Schematic diagram of apparatus for SP testing

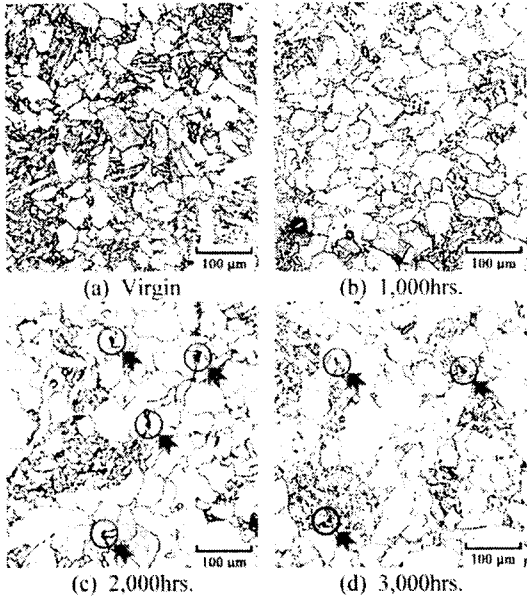


Fig. 3 Microstructures of Cr-Mo-V steel etched by picric acid solution

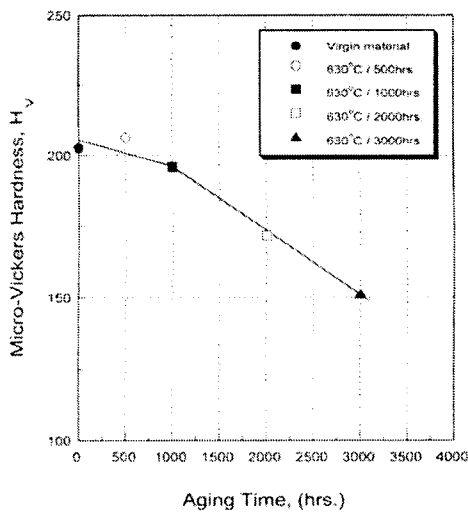


Fig. 4 Variation of microhardness behaviors for virgin and aged materials of Cr-Mo-V steel

신재와 시효재에 대한 마이크로 비커스 경도값의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 1,000hrs. 시효재까지는 경도의 변화가 작은 반면 그 이후의 시효시간에서는 신재에 비해 경도값이 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 2,000hrs. 및 3,000hrs. 열화재에서는 뚜렷한 재료

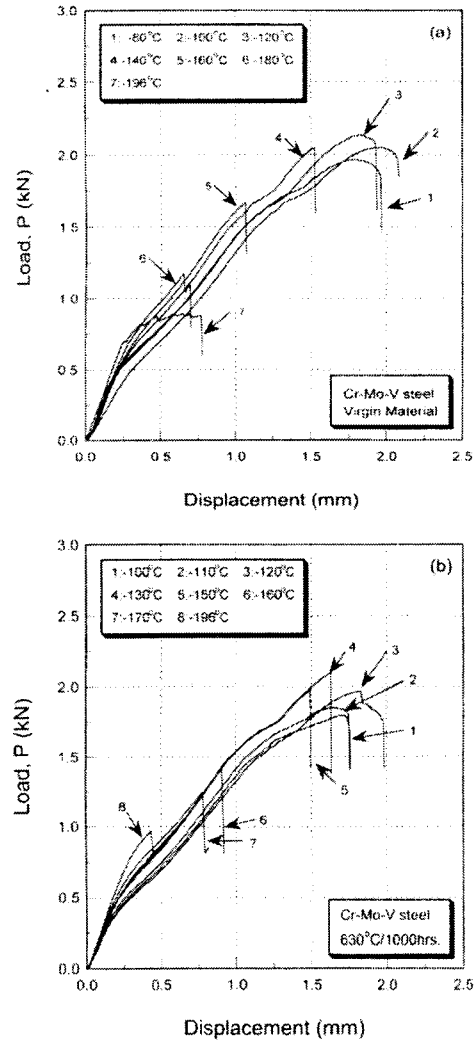


Fig. 5 Load-displacement curves for virgin and 630°C/1000hrs. aged materials of Cr-Mo-V steel

의 연화거동을 확인할 수 있는데, 이는 조직관찰에서 알 수 있듯이 퍼얼라이트를 구성하고 있는 탄소가 장시간 시효열처리에 의해 Cr 및 Mo의 고용강화 원소와 결합하여 탄화물을 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 SP시험에 의한 재질열화 평가

SP 시험은 박판형 디스크 형태의 비소 시험편을 이용하는 일종의 bulging 시험이다. 시험편에 하중이 가해짐에 따라 국부적인 슬립(slip) 및 보

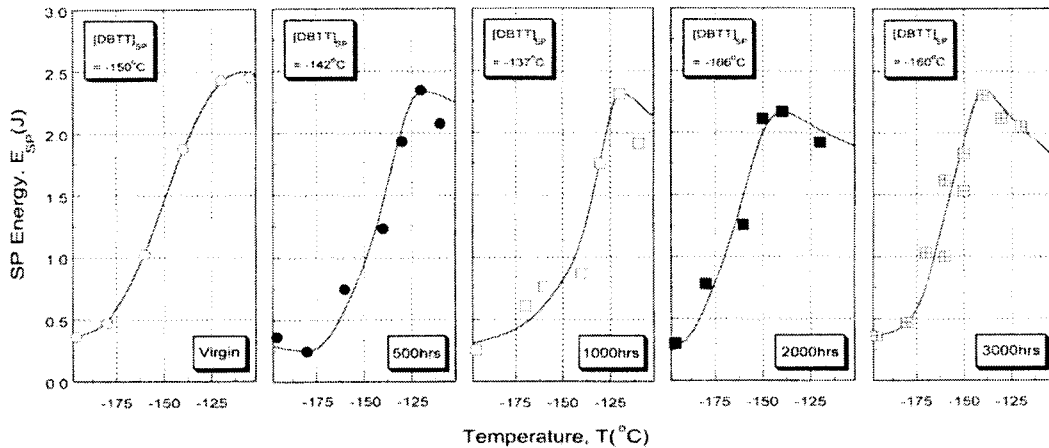


Fig. 6 Variation of ductile-brittle transition behaviors obtained from the virgin and aged materials using SP test for Cr-Mo-V steel

이드(void)가 발생·합체되고, 원주 및 두께 방향으로 미세 균열이 형성되어 최종적으로 파괴에 이르게 된다. 본 연구에서는 SP 시험시 얻어지는 하중-변위 곡선의 아래변적으로 정의된 SP 에너지(E_{sp})의 변화를 이용하여 얻은 $\Delta[DBTT]_{sp}$ 를 재질열화의 평가인자로 사용하였다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 실험재료인 Cr-Mo-V 강의 신재 및 1,000hrs. 인공시효재를 대상으로 얻은 전형적인 하중-변위곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 신재와 1,000hrs. 열화재의 하중-변위곡선은 비교적 높은 온도에서는 SP시험의 4단계 영역중 I영역인 탄성극한 영역, II영역인 소성극한 영역, III영역인 소성막 신장영역 그리고 IV영역인 소성 불안정영역이 명확히 관찰되어 연성적인 파괴거동을 나타내고 있다.⁽⁸⁾ 그러나, 실험온도가 저온으로 됨에 따라 점차적으로 소성막 신장영역과 소성 불안정영역이 감소되어 최종적으로는 탄성극한 영역에서 파괴가 발생하는 취성적인 파괴거동의 전이를 관찰할 수 있다. 특히 -196°C에서의 파괴거동을 살펴보면, 신재에 비해 1,000hrs. 시효 열처리재의 경우가 보다 뚜렷한 취성적인 파괴거동을 나타내고 있어 미소시험편을 이용한 SP시험으로부터 얻어지는 하중-변위곡선은 재료의 열화거동을 반영하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 신재와 시효재를 대상으로 SP시험을 행하여 얻은 E_{sp} 를 시험온도에 따라 나타낸 것이다. 시험 재료에 무관하게 뚜렷한 연성-취성전이

거동이 나타남을 알 수 있고, 시효시간이 증가함에 따라 상부 에너지역과 하부 에너지역의 온도 범위가 점차로 감소함을 보이고 있다. 본 그림으로부터 각 시험재료의 $[DBTT]_{sp}$ 를 구한 후 신재와 각 열화재의 $[DBTT]_{sp}$ 의 차이를 재질열화 손상도 $\Delta[DBTT]_{sp}$ 로 정의하여 시효시간에 대해 정리한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 1,000hrs.까지는 시효 열처리 시간의 증가와 함께 $\Delta[DBTT]_{sp}$ 가 증가하고 있어 재질열화 거동을 관찰할 수 있다. 그러나, 2,000hrs. 및 3,000hrs. 시효재의 경우는 1,000hrs. 시효재 및 신재와 비교해 $\Delta[DBTT]_{sp}$ 가 감소하는 경향을 보이고 있어 기계적 성질이 오히려 회복되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 장시간 열화된 시효재가 오히려 좋은 인성 값을 보이는 결과는 Okamura 등⁽¹¹⁾의 연구결과에서도 찾아볼 수 있다. 그들은 개량된 9Cr-1Mo강을 대상으로 시효 열처리를 행하여 충격실험을 수행한 결과, 650°C에서 3,000hrs.동안 시효처리된 시험편의 파괴인성이 600°C에서 3,000hrs. 시효된 시험편의 것보다 우수한 인성치를 보이고 있음을 보고하였다. 이들은 그 원인으로서 파괴인성 값의 상승은 laves상의 소멸에 기인한 것으로 판단하고 있다.

본 연구의 시험결과 중 2,000hrs. 및 3,000hrs. 시효재의 경우, 기계적 성질이 오히려 회복되고 있는 것은 시험재의 야금학적인 조직 변화 즉, 장시간 고온 열처리에 의한 전위조직의 회복과 미세 탄화물 석출 및 페라이트 조직분율의 증가

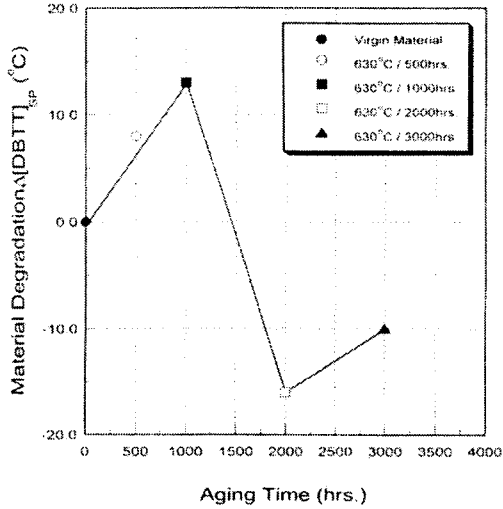


Fig. 7 Variation of $\Delta[DBTT]_{sp}$ (°C) according to aging time for Cr-Mo-V steel

에 따른 미세조직의 연화에 의한 결과로 사료된다.⁴¹⁾ 그러나 3,000hrs 이상의 장시간 시효열처리재의 경우에는 결정입계에서의 탄화물의 조대화 및 구상화에 의해 입계강도의 취화 및 입내부의 고용강화 원소의 지하에 기인하여 인성 저하를 초래할 것으로 생각된다. 이에 대한 보다 정확한 해석을 위해서는 향후 3,000hrs. 이상의 장시간 시효처리된 열화재에 대한 연구결과가 필요하다고 사료된다.

3.4 재활성화 분극시험에 의한 재질열화 평가

전기화학시험방법중 재활성화 분극시험은 스테인레스강의 모재 및 용접부의 예민화(sensitization) 정도 및 장시간 고온(550°C ~ 650°C) 사용에 의한 입계에 탄화물($M_{23}C_6$, M_6C)의 석출에 기인한 입계부식 감수성을 평가하는데 주로 사용되어 왔다.⁴⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 터빈 케이싱 부재인 Cr-Mo-V강의 재질열화도 평가에 재활성화 분극시험의 적용 가능성을 조사하였다.

신재 및 1,000hrs. 시효재를 대상으로 재활성화 시험을 행하여 얻은 전형적인 분극곡선을 Fig. 8의 (a)와 (b)에 나타내었다. 분극곡선에 나타낸 것처럼 재질열화 평가인자로는 재활성화 전하량(reactivation charge : Q_R), 재활성화 전류밀도(reactivation current density : I_R), 입계 부동태 전류밀도(I_{cm}) 그리고 양극분극시 자연부식전위에서

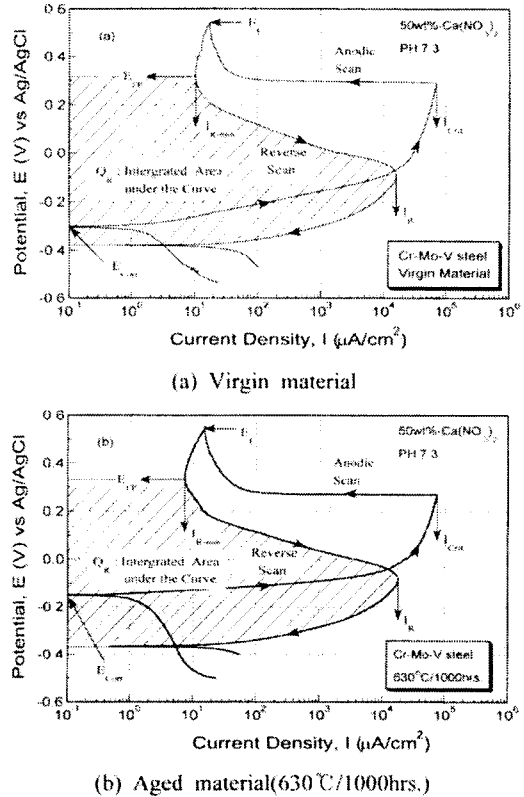


Fig. 8 A representative reactivative polarization curves for Cr-Mo-V steels in 50wt%-Ca(NO₃)₂ solution

부동태 완료 전위까지의 전하량(Q_{crit}) 등을 이용하였다. 그림에서 보여지듯이 시험편의 부동태 피막형성 후 음극분극시 뚜렷한 재활성화 분극거동이 관찰되었다.

Fig. 9는 각 시험재의 재활성화 시험을 행하여 얻은 대표적인 분극곡선으로서 비교를 위해 부동태 형성까지의 양극주사(anodic scan) 후 역주사(reverse scan)에 의해 나타나는 재활성화 개시전위(Idle potential : E_{IP})에서부터 자연부식 전위(E_{Corr})를 기준으로 하여 -50mV까지의 분극곡선만을 정리하여 나타낸 것이다. 시효시간에 따른 재활성화 전류밀도 거동을 조사하기 위해 위의 그림을 확대하여 Fig. 10에 나타내었다. 모든 시험재에 있어 음극 분극시 뚜렷한 재활성화 개시전위와 재활성화 분극거동을 보이고 있고, 약간의 차이는 있지만 개시전위(E_{IP})가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 모든 재료에서 재활성화 전류밀도(I_R)를 보이고 있고, 열화시간에 따른 전

류밀도의 차이를 나타내고 있다. 전기화학실험은 보다 정밀한 실험절차와 실험과정에서 실험자의 숙련도를 절대적으로 필요로 하는 실험이다. 본 연구에서 얻은 전기화학적 실험결과들은 수회 반복하여 얻은 결과로서 각 재료의 전류밀도 값은 거의 동일 수준에서 얻어졌고, 재활성화 전류밀도(I_R)는 각 시험재의 전기화학적 용해 반응 특성을 명확히 반영하고 있음을 알 수 있었다. Table 3에 재활성화 시험에서 얻어진 각 시험재의 분극 시험 결과를 정리하여 나타내었다. 각 시험재의 I_R 를 보면 1,000hrs. 열화재는 $17.94 \times 10^3 \mu A/cm^2$ 임을 보여 신재와 비교해 재질열화에 따른 전기화학적 용해 반응 특성을 보였으나, 2,000hrs. 및 3,000hrs. 열화재의 경우는 각각 $13.94 \times 10^3 \mu A/cm^2$ 와 $14.90 \times 10^3 \mu A/cm^2$ 를 보여 오히려 I_R 가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 같이 2,000hrs와 3,000hrs

열화재의 경우에 낮은 재활성화 용해반응 특성을 보인 이유는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 장시간 고온 열처리에 의한 탄화물 분산상태의 변화와 페라이트 조직분율의 증가에 의한 미세조직의 변화로 사료된다. 또한 이 같은 시험결과는 SP 시험에서 얻은 재질열화도 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 의 결과와 좋은 일치를 보이고 있다. 한편, 종래 보고된 전기화학 실험결과와 경우 재질열화 평가인자로 사용된 신재와 열화재사이의 전류밀도 차가 수 $\mu A/cm^2$ 차이인 것에⁽⁷⁾ 비해 본 연구에서 얻어진 재질열화에 따른 재활성화 전류밀도 값의 차는 수십~수백 $\mu A/cm^2$ 이상의 값을 보여 보다 정확한 전기화학 시험에 의한 재질열화의 평가가 가능할 것으로 기대한다.

Fig. 11은 재활성화 전류밀도를 이용하여 얻은 재

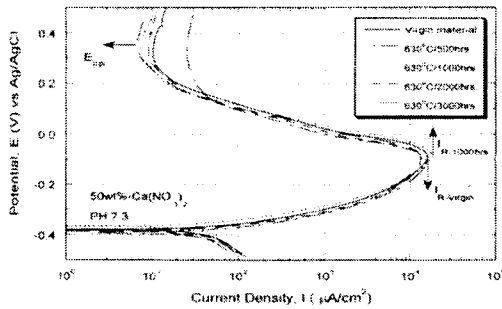


Fig. 9 Aging time dependence of reactive polarization curves for virgin and aged materials in 50wt%-Ca(NO₃)₂ solution

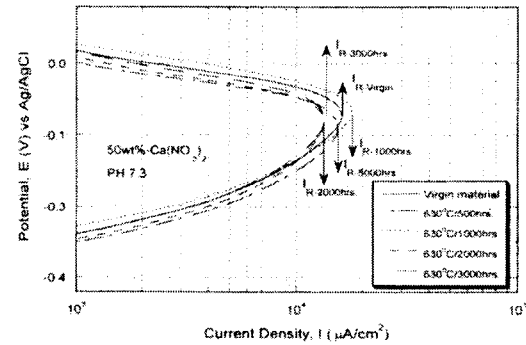


Fig. 10 Detail I_R behaviors in reactivation region for virgin and aged materials of Cr-M-V steel

Table 3 The electrochemical test results obtained from reactivative polarization curves in 50wt%-Ca(NO₂)₃ solution (pH 7.3)

Material	Electrochemical Reactivation Polarization Data						
	I_{crit} ($\mu A/cm^2, \times 10^3$)	Q_{crit} (C/cm ²)	Q_R (C/cm ²)	E_{FP} (mV)	I_R ($\mu A/cm^2, \times 10^3$)	I_R/I_{crit}	Q_R/Q_{crit}
Virgin	82.79	39.78	5.448	322.5	16.14	0.194	0.137
500hrs.	72.88	36.24	5.340	294.5	15.30	0.209	0.147
1,000hrs.	70.02	30.05	5.360	313.5	17.94	0.255	0.187
2,000hrs.	74.80	44.91	4.831	338.5	13.43	0.171	0.107
3,000hrs.	80.22	44.34	5.280	305.5	14.90	0.186	0.119

* I_{crit} : Critical current density * Q_{crit} : Activation charge * Q_R : Reactivation charge
 * E_{FP} : Flade potential * I_R : Reactivation current density * Q_R/Q_{crit} : Reactivation rate by charge
 * I_R/I_{crit} : Reactivation rate by current density

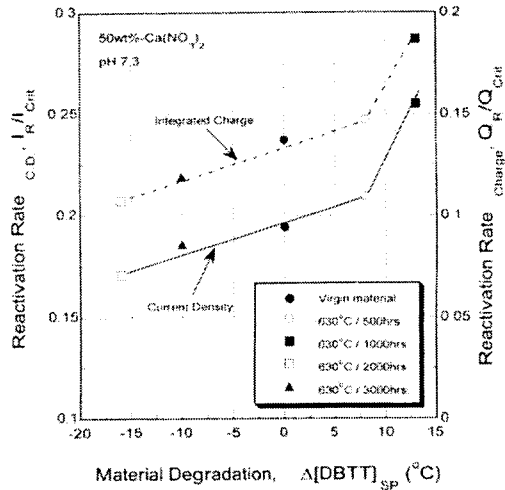


Fig. 11 A relationship between electrochemical reactivative characteristics and $\Delta[DBTT]_{SP}$ ($^{\circ}C$) according to aging time for virgin and aged materials

화성화율인 I_R/I_{Crit} 과 Q_R/Q_{Crit} 을 SP 시험에서 얻은 재결열화도 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 와의 상관관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 재활성화 특성 값은 파괴시험에 의해 얻은 재결열화 손상도와 좋은 상관관계를 나타내고 있고, 특히 재활성화 전하율 Q_R/Q_{Crit} 은 기존의 오스테나이트계 강의 예민화도 평가인자로 적용되어 온 I_R/I_{Crit} 의 특성과 거의 동일한 거동을 보이고 있다. 이상의 결과로부터 화력발전소 터빈부재의 재결열화도 평가인자로서 전기화학적 재활성화 특성 값인 I_R/I_{Crit} 및 Q_R/Q_{Crit} 의 적용 가능성을 확인할 수 있다. 결국, 전기화학적 재활성화 분석시험법을 터빈부재인 Cr-Mo-V강에 대한 비파괴적 재결열화도 평가방법으로 적용한다면 실기 환경내에서 운전시간의 증가에 따른 미세조직의 변화에 의해 야기되는 재결열화를 효과적으로 예측 가능할 것으로 기대된다. 그러나 이를 위해서는 먼저 현장 적용용 전기화학적 셀(cell)의 개발과 시험중 부식액의 온도 보정 문제 등의 해결이 선행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 화력발전설비의 터빈 케이싱강인 저합금 Cr-Mo-V강의 비파괴적인 재결열화 평가 및 진단기술의 정립을 위한 기초자료 확립을

위해 신제와 인공시효 열처리제를 대상으로 전기화학적 재활성화 분석특성을 조사하였다. 그리고 그 시험결과를 준비파괴적인 SP시험에서 얻은 재료의 인성저하 결과와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Cr-Mo-V강 신제의 미세조직은 페라이트, 퍼얼라이트 그리고 lath 템퍼드 마르텐사이트의 혼합조직이었고, 시효시간의 증가와 더불어 lath 상과 퍼얼라이트 조직분율의 감소 그리고 페라이트 조직의 증가가 관찰되었다. 또한, 경도는 시효 시간에 따라 저하되는 경향을 보여 재결열화의 주된 원인인 연화거동을 반영하고 있었다.

(2) SP시험결과 1,000hrs.까지는 시효 열처리 시간의 증가와 함께 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 가 증가하고 있어 재결열화 거동을 관찰할 수 있었으나, 2,000hrs. 및 3,000hrs. 시효제의 경우는 신제와 비교해 기계적 성질이 오히려 회복되고 있음을 알 수 있었다. 이 같은 이유는 장시간 고온 열처리에 의한 잔위조직의 회복과 미세 탄화물 석출 및 페라이트 조직분율의 증가에 따른 미세조직의 연화에 의한 결과로 사료된다.

(3) 모든 시험제에 있어 음극 분석시 뚜렷한 재활성화 개시전위(E_{EP})와 재활성화 전류밀도(I_R) 거동을 보였다. 또한 본 연구에서 얻어진 I_R 값은 시험조건에 따라 큰 차이를 보여 종래 보고된 전기화학시험 결과에 비해 보다 정확한 재결열화의 평가가 가능할 것으로 기대된다.

(4) 재결열화도 평가인자인 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 와 재활성화율 특성 값인 I_R/I_{Crit} 및 Q_R/Q_{Crit} 의 상관관계를 조사한 결과, 재활성화 분석특성은 Cr-Mo-V강의 재결열화 거동을 반영하고 있음을 확인할 수 있어 Cr-Mo-V강계의 터빈부재에 대한 열화손상 평가에 본 시험기법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년 전북대학교 자동차 신기술연구소 및 전주공업대학 산업기술연구소 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chung, S. H., and Kim, J. K., 1992, "Material Degradation in In-Service High Temperature

- Structural Components," *Journal of the KSME*, Vol. 32, No. 4, pp.326~334.
- (2) Kwon, J. D., 1992, "Counterplan and Evaluation of Degradation after Long Term Service in Pressure Vessel Steels," *Journal of the KSME*, Vol. 32, No. 4, pp. 340~350.
- (3) Holzmann, M., Dlouhy, I., Vlach, B., and Krumpos, J., 1996, "Degradation of Mechanical Properties of Cr-Mo-V and Cr-Mo-V-W Steam Turbine Rotors after Long-Term Operation at Elevated Temperatures. Part II: Fracture Toughness, Correlation of Fracture Toughness with Charpy V-notch Results," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, No. 68, pp. 113~120.
- (4) Larouk, Z., and Pilkington, R., 1998, "The Effect of Phosphorous on Carbide Composition in a CrMoV Low Alloy Steel under Creep Conditions," *Materials Science and Engineering*, A251, pp. 77~86.
- (5) ASTM, G5, 1982, Polarization Practice for Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement.
- (6) Matsushita, T., and Saito, Y., 1991, "Non-Destructive Evaluation of Material Degradation for Austenitic Stainless Steel by means of Electrochemical Method," *Journal of The Society of Materials Science Japan*, Vol. 39, No. 446, pp. 566~573.
- (7) Watanabe, Y., and Shoji, T., 1991, "Nondestructive Evaluation of Material Degradation in 2.25Cr-1Mo Steel by Electrochemical Technique," *Journal of The Society of Materials Science Japan*, Vol. 40, No. 448, pp. 89~95.
- (8) You, H. S., Song, M. S., Song, G. W., and Lyu, D. Y., 2000, "Degradation Damage Evaluation of High Temperature Structural Components by Electrochemical Anodic Polarization Test," *Transactions of the KSME*, A, Vol. 24, No. 6, pp. 1398~1407.
- (9) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey, D., and Taplin, D. M. R., 1981, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," *Proc. of 5th International Conference on Fracture(ICF5)*, Cannes, France, Vol. 4, pp. 1613~1620.
- (10) Viswanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*, pp. 43~53.
- (11) Okamura, H., Ohtani, R., Saito, K., Kimura, K., Ishii, R., Fujiyama, K., Hongo, S., Iseki, T., and Uchida, H., 1999, "Basic Investigation for Life Assessment Technology of Modified 9Cr-1Mo Steel," *Nuclear Engineering and Design*, pp. 243~254.