

Cr-Mo-V강의 전기화학적 분극 특성과 재질열화 평가

An Evaluation on Electrochemical Polarization Characteristics and Material Degradation for Cr-Mo-V Steel

권일현*[†], 이송인*, 하정수**, 유효선*

Il-Hyun Kwon*[†], Song-In Lee*, Jeong-Soo Ha** and Hyo-Sun Yu*

초 록 본 연구는 Cr-Mo-V강의 다양한 분극특성들을 이용하여 비파괴적으로 재질열화를 평가하는 전기화학적 기법에 대해서 서술한 것이다. 사용된 전기화학적 기법은 스테인레스강의 열 이력에 의해 주로 야기되는 강화원소 결핍 영역에서의 예민화 그리고 부식속도를 평가하기 위해 널리 사용되는 양극분극 시험법이다. 재질열화 평가는 10×10×0.5mm 크기의 시험편을 사용하는 미소역학 시험법으로 잘 알려진 SP시험에 의해 수행되었다. 630℃에서 1,000hrs 시효된 재료가 가장 높은 재질 열화도 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 를 보였으나, 2,000hrs 그리고 3,000hrs 시효된 재료는 시효 시간이 증가함에 따라 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 의 감소를 보였다. 전류밀도의 차(ΔI_{FP} , ΔI_{SP})가 1,000hrs 시효시간까지는 증가하였고, 그 이후의 시효시간에서는 시효시간의 증가와 더불어 감소됨이 관찰되었다. 이 같은 결과는 시효재료에 대한 경도의 거동과 일치하였다. 덧붙여, $\Delta[DBTT]_{SP}$ 는 ΔI_{FP} 및 ΔI_{SP} 와 같은 전기화학적 분극특성들과 좋은 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

주요용어 : 양극분극 시험, 소형편치시험, 재질 열화도, 전류밀도의 차

Abstract This research is described on the applicability of a electrochemical techniques for evaluating nondestructive material degradation with various polarization characteristics for Cr-Mo-V steel. The applied electrochemical technique is anodic polarization test which are widely used to evaluate the corrosion rate and/or sensitization at depleted zone of strengthening elements mainly caused by thermal experience for stainless steels. The evaluation of material degradation is performed by small punch test which has been well known as micromechanics test method using specimen size of 10×10×0.5mm. The 1,000hrs aged material at 630℃ shows the highest material degradation($\Delta[DBTT]_{SP}$), but the 2,000hrs and 3,000hrs aged materials show the decrease of $\Delta[DBTT]_{SP}$ as aging time increases. It is observed that the difference of current density(ΔI_{FP} and ΔI_{SP}) increase to 1,000hrs aging time, and after that time those values decrease with aging time. Such results are consistent with hardness behaviors of aged materials. It can be recognized that $\Delta[DBTT]_{SP}$ has a good correlation with electrochemical polarization characteristics such as ΔI_{FP} and ΔI_{SP} .

Keywords: anodic polarization test, small punch test, material degradation, difference of current density

1. 서 론

화력발전 및 석유화학 설비와 같은 에너지 변환설비의 고온 배관 및 열교환기 그리고 터빈 부재 등은 고온·고압에서 사용되는 구조물이기 때문에 Cr-Mo강이나 Cr-Mo-V강과 같은 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 저합금계의 내열강이 널리 사용된다. 그러나 이들 내열 구조부재들은 고온·고압의 사용환경에 장시간 노출됨에 따라 재료의 미세조직 변화에 의하여 강도나 인성이 저하하는 열화손상(degradation damage)을 나타내고, 그 결과 고온 설비부재의 파손사고를 초래하여 부재의 안전 및 경제적인 측면에서 큰 문제로 지적되고 있다[1,2]. 따라서, 화력 및 석유화학 설비의 안전성 및 신뢰성 있는 운전조건을 확보하기 위해서 가동시간의 증가에 따른 설비부재의 현상 태진단 및 잔존 수명평가를 위한 기술 개발이 국내·외적으로 큰 관심분야로 되고 있다.

일반적으로 에너지 변환설비에 사용되는 저합금강의 기계적 성질에 크게 영향을 주는 것으로 불순물의 결정립계의 편석을 들 수 있는데, 불순물 입계편석을 설명하는 두 개의 접근법이 제안되고 있다. 하나는 불순물과 합금원소 사이의 화학적인 상호작용을 고려하므로서 제안된 cosegregation 이론이며, 다른 하나는 인(P)의 입계편석에 영향을 주는 표면 활성 및 탄화물 형성 원소로서 탄소(C)의 역할이 고려되고 있다[3,4]. 이상의 이론들은 결국 설비부재의 재질열화는 결정립계에 형성되는 탄화물 또는 불순물의 편석에 의해 지배되고 있음을 지적하고 있다. 따라서, 입계 탄화물 또는 불순물 편석에 따른 결정립계의 거동을 조사할 수 있는 시험법이 개발된다면 재질열화를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 부응하여 최근 경년열화를 비파괴적으로 평가할 수 있는 시험법으로서 미세조직의 변화 즉, 탄화물의 조성 변화, 석출물의 크기 및 석출물 사이의 간격변화 그리고 결정립계 및 입내 편석 등에 의한 전기화학적 특성의 변화를 이용한 전기화학 분극시험법이 제안되고 있어 현장 구조물의 열화 정도의 현상태 진단법으로서의 가능성이 주목받고 있다[5,6].

이상의 배경으로부터 본 연구에서는 전기화학시험에 의한 고온부재의 비파괴적인 재질열화 평가기술 개발의 최종적인 연구목표를 위해 저합금강 Cr-Mo-V강의 양극분극(electrochemical anodic polarization) 및 재활성화 분극(reactivation polarization) 특성을 조사하였다. 또한, 분극시험 결과는 소형편치(small punch: SP) 시험[7,8]에 의한 재질열화도 평가 결과와 비교·검토되었다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 시험재료는 고온 설비 부재에 널리 사용되는 저합금강 Cr-Mo-V강의 신재와 인공시효 열처리 재료 하였다. Table 1에 실험재료의 화학성분을 나타내었다. 이때 시효 열처리재는 부재의 실제 사용온도(500~550℃)보다 높고 뜨임처리 온도보다 낮은 온도인 630℃에서 등온노화 열처리, 즉 시효 열처리(aging heat treatment)를 행하여 준비하였다. 이때, 모의 열화시간(t_2)은 철의 자기 확산에 필요한 활성화 에너지에 근거하여 결정하였다[9]. Table 2에 630℃에서의 시효열처리 시간과 현상온도 538℃에서의 모의 열화시간을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Cr-Mo-V. (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

Table 2 Accelerated aging times at 630℃ and simulated times 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

2.2. 미세조직 관찰 및 경도 측정

페라이트계 강의 재질열화 원인으로는 연화와 취화가 큰 원인으로 되기 때문에 이를 조사하기 위해 경도측정을 행하였다. 표면상태에 따른 경도값의 오차를 줄이기 위해 측정하고자 하는 시험편의 표면은 모두 경면연마 후 제공되었다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도기(micro-Vicker's hardness tester)를 사용하였고, 시험시 사용된 하중은 500g이었다.

2.3. 전기화학적 분극실험

전기화학 분극실험용 시험편은 12×12×3~4mm의 크기로 하여 1cm²의 시험편 표면만이 부식액에 노출되도록 에폭시 수지를 이용하여 마운팅하였다.

분극시험시 사용된 기준전극은 포화 Ag/AgCl 전극이며, 보조전극으로는 백금(Pt)전극을 사용하였다. Fig. 1에 전기화학 분극시험장치의 개략도를 나타내었다. 부식액은 내열재료의 열화거동을 평가하기에 유효하다고 보고되고 있는 50wt%-Ca(NO₃)₂의 수용액을 사용하였다[6]. 전해액의 온도는 30°C±2°C로 유지하였으며, pH는 7.3으로 조절하였다. 그리고 부식액은 용존산소의 영향을 제거하기 위해 질소가스를 이용하여 10분 동안 탈기하였다.

양극분극(anodic polarization) 시험조건으로는 시험편을 전해액에 약 5분간 침적시킨 후 회로를 연결하여 자연부식전위(corrosion potential : E_{corr.})를 기준으로 -200mV에서부터 0.5mV/sec.의 분극속도로 기준전극에 대해 약 2200mV까지 분극하여 시험체 표면의 전기화학적 용해반응량을 실시간적으로 측정하였다.

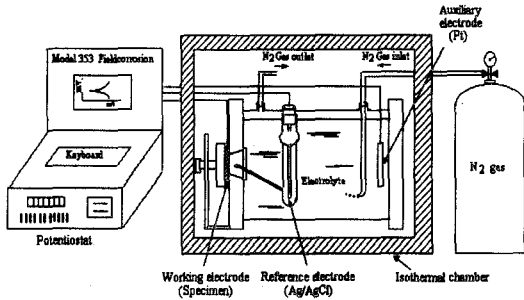


Fig.1 Schematic diagram of apparatus for electrochemical polarization testing

2.4. SP 실험

Cr-Mo-V강의 시효시간에 따른 재질열화도 평가는 SP 시험에 의해 조사되었다[7,8]. SP시험편은 Cr-Mo-V강으로부터 10×10×0.8mm의 크기로 기계 가공한 후 emery paper를 사용하여 습식 연마를 통해 규격크기인 10×10×0.5mm로 제작하였다. SP시험은 만능시험기에 의해 0.2mm/min.의 부하속도로 행하였고, 시험온도 변화는 -196°C~20°C의 범위로 하였다. 시험편에의 집중하중은 편치선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 Ø2.4mm의 강구를 놓고 편치에 압축하중을 가함으로써 행하였다. 각 시험체의 열화손상(degradation damage)은 SP-에너지 온도 곡선으로부터 신재에 대한 인공시효재의 연성-취성전이 온도(ductile-brittle transition temperature : DBTT_{SP}) 상승량인 Δ[DBTT]_{SP}로 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시효시간에 따른 미세조직 및 경도의 변화

Fig. 2는 Cr-Mo-V강의 신재 및 시효시간에 따른 미세조직의 변화를 나타내는 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 신재의 미세조직은 페라이트와 퍼얼라이트의 혼합조직임을 알 수 있다. 그러나, 시효시간의 증가와 더불어 퍼얼라이트의 조직이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 시효시간이 증가함에 따라 퍼얼라이트 조직내의 C가 강내에 포함된 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo)과 같은 원소와의 결합에 의한 결정립계 및 입내 탄화물 형성과 관련있을 것으로 사료된다. 이들 조직에 대한 비커스(Vicker's) 경

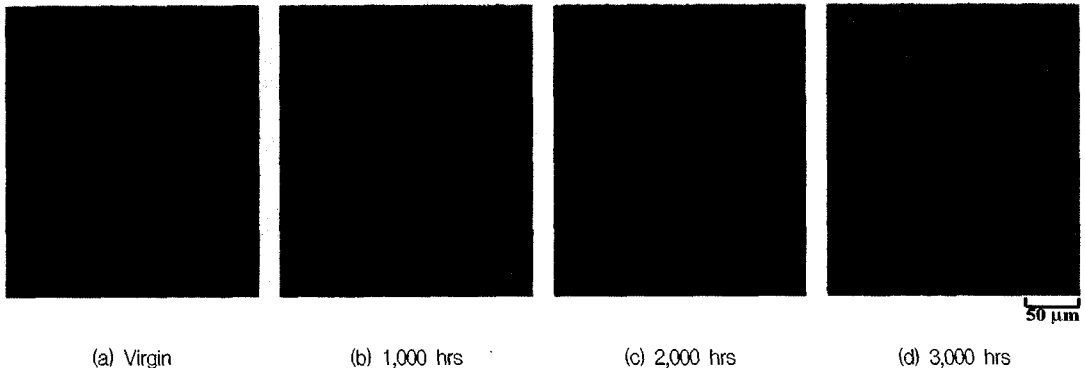


Fig. 2 Optical microstructures of several aged materials etched by picric acid solution

도의 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 1,000hrs.까지의 열처리재에서 얻어진 경도는 신재보다 다소 큰 값을 보였으나, 그 이상의 열처리재인 2,000hrs. 및 3,000hrs. 열처리재의 경우에는 경도가 감소하는 연화(softening) 거동을 보이고 있다. 이는 조직관찰 결과로부터 알 수 있듯이 2,000hrs. 이상의 열화재에서는 퍼얼라이트 조직의 현저한 감소 및 미세 탄화물의 석출로 인한 결과로 생각된다.

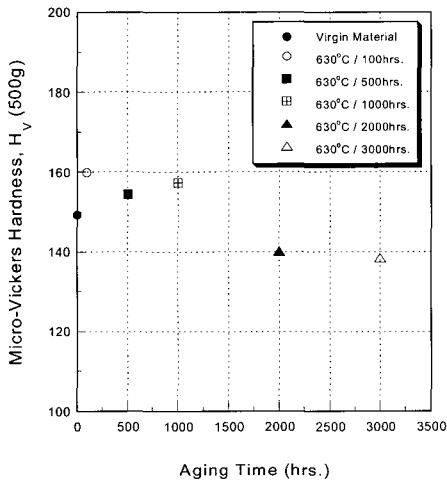


Fig. 3 Variation of Micro-Vickers hardness, H_v , according to aging time

3.2. Cr-Mo-V강의 양극분극 특성

일반적으로 특정 부식환경내에서 저합금 Fe-Cr강의 미세조직 변화에 따른 부식특성 및 내 식성 평가에 널리 사용되고 있는 평가인자로서 시험편 표면에 부동태 산화 피막(oxide film)의 형성에 관련된 인자인 부동태화 전류 밀도값 I_{PP} 가 제안되고 있다[5,6]. Fig. 4는 Cr-Mo-V강의 신재 및 인공 시효열처리재를 대상으로 50wt%-Ca(NO₃)₂ 전해액 중에서 얻은 대표적인 양극분극 곡선이다. 각 시험재의 부동태화 전류 밀도인 I_{PP} 는 신재의 경우 약 $30\mu A/cm^2$ 로 높은 값을 보이고 있으나, 시효재의 경우는 약 $11\mu A/cm^2 \sim 24\mu A/cm^2$ 로서 큰 차이가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 부동태 피막 형성후 전위 증가에 따라 나타나는 전류밀도 변화중 2차 부동태영역으로 들어가기 전, 과부동태 영역에서 최고 peak 값인 I_{FP} 를 고려하였다. Fig. 5에 그 결과를 시효시간에 따라 나타내었다. 그림에서 보듯이 신재의 경우는 약 $75\mu A/cm^2$, 500hrs.제는

약 $90\mu A/cm^2$, 1000hrs.제는 $94\mu A/cm^2$, 2000hrs.제는 약 $80\mu A/cm^2$ 그리고 3000hrs.제는 약 $79\mu A/cm^2$ 의 전류밀도 값을 보이고 있다. 주목할만한 것은 I_{FP} 를 보이는 전위영역이 약 1.3V~1.4V로서 거의 일정한 전위에서 나타나는 전기화학적 용해 반응량이라는 것이다. 이것은 시효시간의 증가에 따라 입계 또는 입내에 편석된 불순물 및 석출물 등이 1차 부동태 피막을 불안정하게 한 후 I_{FP} 를 보이는 전위영역에서 용해된 결과로 사료된다. 이 결과는 가장 높은 I_{FP} 를 보인 1000hrs.제의 열화도가 가장 크다는 것을 지적하고 있다.

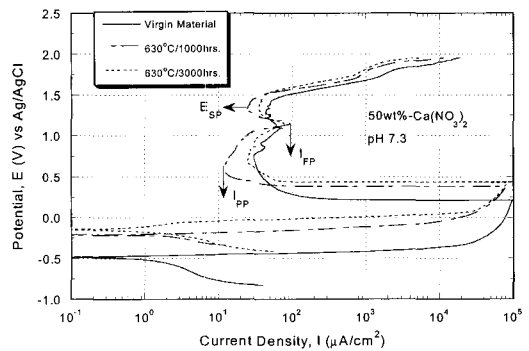


Fig. 4 Aging time dependence of anodic polarization curves for virgin and several aged materials in 50wt.%-Ca(NO₃)₂ solution

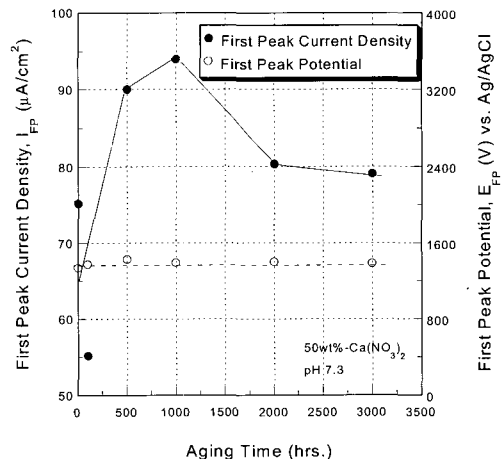


Fig. 5 I_{FP} and E_{FP} behaviors according to aging time for virgin and aged materials

위의 결과를 증명하기 위해 신재와 1,000hrs. 그리고 3,000hrs. 열화재에 대해 동일 부식용액 내에서 제 1차 peak를 보인 전위영역에서 정전위시험(potentiostatic test)을 수행하였다. 먼저 각 시험체를 전해액 중에 침적한 후 5분동안 유지한 후 신재의 경우는 1339mV, 1,000hrs.재는 1390mV 그리고 3,000hrs.재의 경우는 1385mV에서 약 2,000sec.동안 변화하는 전류 밀도량을 조사하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 모든 시험체는 시험 개시점에서는 높은 전류밀도를 유지하나 약 200sec.까지는 시간경과에 따라 급격한 전류밀도의 감소를 보이고 있다. 신재와 3,000hrs. 열화재는 1,000sec. 이후에 장시간 동안 거의 동일한 정도의 전류밀도를 보이고 있다. 그러나 1,000hrs. 열화재의 경우는 다른 시험체보다 높은 전류밀도를 보이고 시간이 경과함에 따라 점차 증가하여 2,000sec.에서는 약 50 μ A/cm²의 전류밀도값을 보이고 있다. 또한, 다른 시험체에서 관찰된 것과는 달리 전류밀도가 일정하게 유지되는 시간이 매우 짧음을 알 수 있어 1,000hrs. 열화재가 다른 시험체에 비해 활성화된 용해 반응량을 보임을 알 수 있다.

이상의 정전위시험에서 얻어진 결과는 양극분극시험에서의 전류밀도 거동과 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 재질열화 평가인자로서 과부동태 영역에서의 peak 전류밀도의 유용성을 우선적으로 확인할 수 있다.

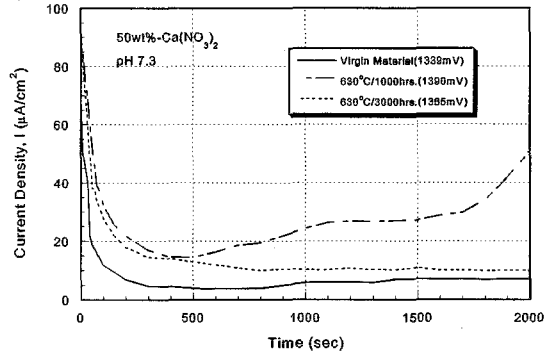


Fig. 6 Variation of current density as a function of time at applied potential in potentiostatic test

Fig. 7은 신재 및 열화재에 대한 입체부의 EDX 분석 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 1,000hrs. 열화재의 경우가 가장 높은 Cr 피크 거동을 보여 다른 시험체보다 입체부에서의 $M_{23}C_6$ 라고 여겨지는 Cr-riched 탄화물의 생성 정도가 높음을 확인할 수가 있고, 그로 인해 특정 부식환경내에서 전기화학적 분극 용해량이 큰 것으로 사료된다. 일반적으로 Cr과 Mo이 포함된 고온 재료를 고온에서 장시간 사용하게 되면 Mo_2C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Mo_6C 와 같은 탄화물과 함께 불순물의 편

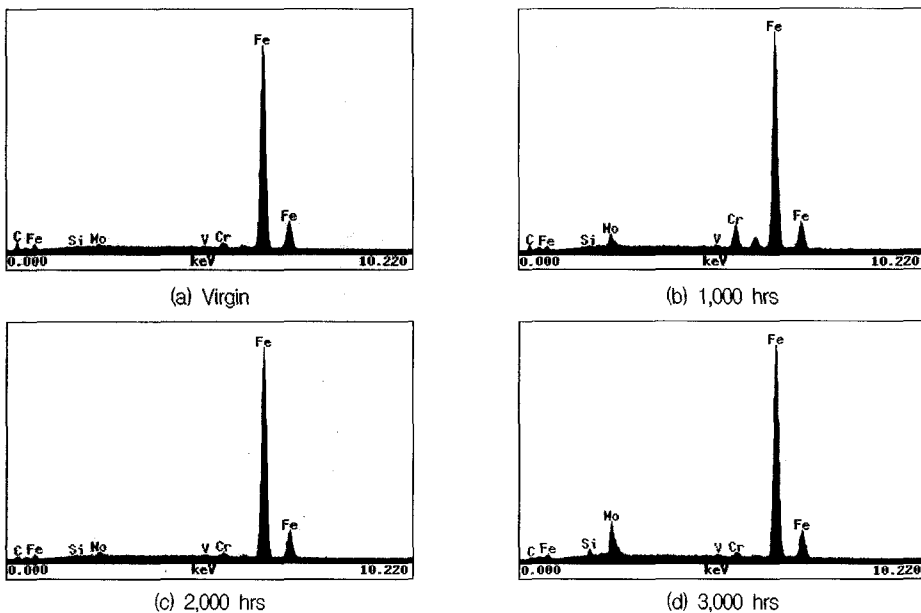


Fig. 7 Analysis results of EDX for the virgin and the aged materials

석을 초래하게 된다. 특히 이러한 탄화물 중 최종적으로 안정화되는 탄화물은 Mo_6C 로서 이 탄화물이 구상화 및 조대화 됨에 따라 재료의 연화가 촉진되고 파괴인성의 저하를 초래한다고 알려져 있다[3,4]. 그러나 열화과정 중 입계와 입내의 국부영역에 생성되는 다양한 형태의 탄화물과 불순물 등은 운전시간 및 재료의 종류에 따라 고온 재료의 거시적, 미시적 기계적 성질에 큰 영향을 주기 때문에 이들에 대한 정확한 해석을 위해서는 꾸준한 데이터의 확보가 요구된다.

3.3. SP시험에 의한 재질열화 평가

원자력 발전소 설비부재의 방사선 조사에 의한 기계적 성질의 저하를 평가하기 위해 개발된 SP 시험은 현장 부재로부터 시험편 채취의 제한성을 고려하여 미소 시험편을 사용하며, 시험편에 하중이 가해짐에 따라 발생하는 미시 크랙 및 관통크랙으로 인해 시험편의 흡수에너지가 점차로 해방된다. 이때 시험편은 부하능력을 상실하게 되어 최종적인 파괴에 이르게 되고, 부하능력의 상실을 의미하는 SP에너지(이하 : E_{SP})가 재질열화도의 측정 파라미터로 사용되고 있다[7,8]. E_{SP} 는 SP시험시 얻어지는 하중-변위 곡선의 아래면적으로 정의된 값이다.

Fig. 8은 신재와 시효재를 대상으로 SP 저온시험을 행하여 얻은 하중-변위곡선의 아래면적으로 계산한 E_{SP} 를 시험온도에 따라 정리하여 각 시험재료의 연성-취성 천이 온도 $[DBTT]_{SP}$ 를 구한 후 신재와 각 열화재의 $[DBTT]_{SP}$ 의 차이를 열화 손상도 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 로 정의하여 시효시간에 대해 정리한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 1,000hrs.까지는 시효 열처리 시간의 증가와 함께 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 2,000hrs.와 3,000hrs. 시효재의 경우는 1,000hrs. 시효재에 비해 재질열화도 $\Delta[DBTT]_{SP}$ 가 감소하는 경향을 보이고 있어 1000hrs. 이후에는 기계적 성질이 오히려 회복되고 있음을 알 수 있다.

Okamura 등[10]은 수정된 9Cr-1Mo강을 대상으로 시효 열처리를 행하여 충격실험을 수행한 결과, 650°C에서 3000hrs.동안 시효처리된 시험편의 파괴인성이 600°C에서 3000hrs. 시효된 시험편의 것보다 우수함을 보고하였다. 그들은 그 원인으로서 파괴인성의 상승은 Laves상의 소멸에 기인한 것으로 판단하고 있다. 또한, Viswanathan 등[11]은 Cr-Mo-V강 티빈로터강의 경우 인성과 관련된 재질열화도는 약 40,000hrs.~50,000hrs.일 때가 최대이며, 그 이후에는 사용시간이 증가하여도 재료의 인성열화는 크게 발생하지 않는다고 보고하고 있다. 이같은 연구결과들은 현상온도 538°C에서 약 55,000hrs. 사용재에 해당하는 1,000hrs. 인공시효 열처리재가 가장 높은 재질열화도를 보이며, 그 이상의 가속노화 열처리재에서는 재질열화가 회복되는 본 연구 결과와 유사하다.

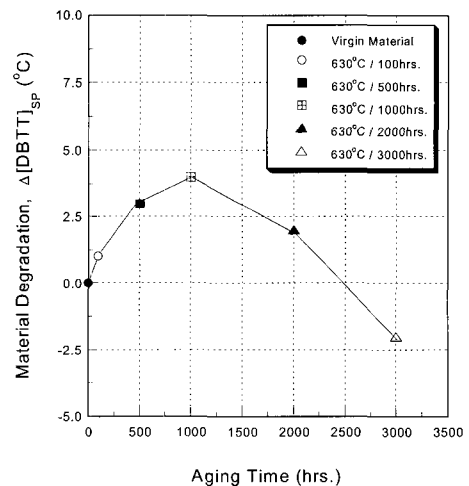


Fig. 8 Variation of material degradation, $\Delta[DBTT]_{SP}$ (°C) behaviors according to aging time for virgin and aged materials

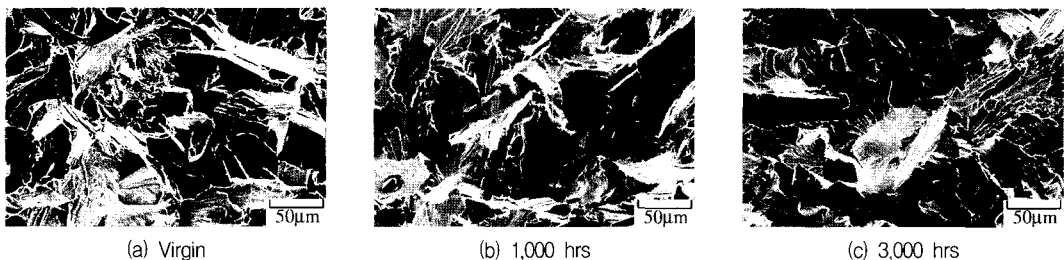


Fig. 9 SEM fractographs of several aged materials tested at $-196^{\circ}C$

Fig. 9는 시험편의 미시파면을 조사하기 위해 -196°C 에서 SP 시험 종료 후의 대표적인 SEM 사진이다. 파면 사진에서 알 수 있듯이 신재의 경우는 전형적인 입내 벽 개파괴를 보이고 있으나, 1,000hrs. 시효재는 입내 벽개파면과 입계파면이 혼재된 양상을 보이고 있다. 그리고, 3,000hrs. 시효 열처리재에서는 다시 전형적인 입내 벽개 파면으로의 천이가 관찰되고 있다. 일반적으로 저합금강에서 관찰되는 파면은 결정립계에 인(P)가 편석됨에 따라 입내 벽개파괴에서 입계파괴로 천이된다고 알려져 있다 [12]. 따라서 이 같은 미시적 파괴거동으로부터도 1,000hrs. 시효재의 열화 손상거동을 관찰할 수 있다. 이상의 SP 파괴시험에서 얻은 재질열화도 $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ 및 파면관찰 결과는 전기화학 분극실험에서 얻어진 결과와 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.5. 전기화학적 특성값과 재질열화도의 상관관계

이상에서 명확히 보였듯이 시효에 의한 연성-취성 천이온도의 상승은 미세조직 변화에 따른 입계 불순물 및 탄화물에 의한 결정립계 결합력 약화에 기인하며, 전기화학 특성치는 이들 불순물 및 탄화물의 용해 반응량임을 알 수 있다. 따라서, 최근 관심의 대상으로 되고 있는 비파괴적인 설비부재의 경년열화 평가기법의 개발에 착안하여 전기화학적 분극시험 결과와 SP 시험결과 사이의 상관관계를 조사하였다. Fig. 10은 3000hrs. 재를 제외한 시험재를 대상으로 양극분극 시험시 얻어진 I_{FP} 와 부동태화 전류밀도(I_{FP})의 차이 ΔI_{FP} 그리고 I_{FP} 와 제 2차 부동 태화 전류밀도(I_{SP})의 차이 ΔI_{SP} 를 재질열화도인 $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ 와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ 가 증가함에 따라 탄화물 또는 불순물의 용해 반응량인 ΔI_{FP} 와 ΔI_{SP} 가 증가하고 있어 각각의 두 인자 사이에 뚜렷한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

따라서, 전기화학적 양극분극 특성중 I_{FP} , I_{FP} , I_{SP} 등을 이용하여 산출한 ΔI_{FP} 와 ΔI_{SP} 에 의해 Cr-Mo-V강의 재질열화도를 비파괴적으로 평가가능함을 알 수 있다. 향후 뜨임취화(temper embrittlement) 및 탄화물 취화(carbide embrittlement)에 더욱 민감한 Cr-Mo-V강의 강화열처리재에 대해 전기화학적 분극시험을 행하여 데이터 베이스(data base)를 보강한다면 최종적으로 화력발전소 설비부재에 대한 재질열화와 수명 평가를 위한 Master 곡선과 평가방법을 정립할 수 있을 것으로 기대한다.

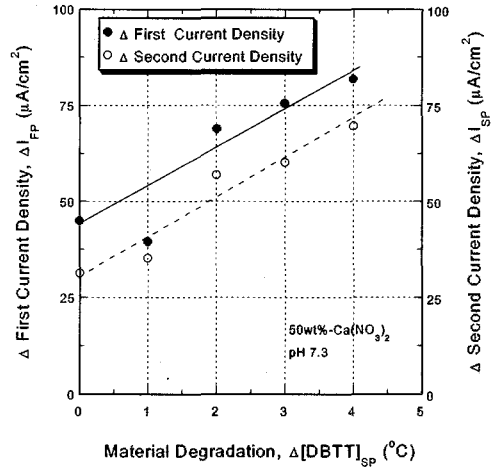


Fig.10 A relationship between electrochemical anodic characteristics and $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ ($^{\circ}\text{C}$) obtained from virgin and aged materials

4. 결 론

본 연구는 저합금 Cr-Mo-V강의 비파괴적인 재질열화 평가 및 진단기술의 정립을 위한 기초 자료를 얻기 위한 것이다. 이를 위해 Cr-Mo-V강 신재와 인공시효 열처리재를 대상으로 전기화학적 시험에 의해 양극분극 특성을 조사하였다. 또한, SP 시험에 의해 재질 열화도를 평가하여 전기화학시험에서 얻은 분극특성값과의 비교를 통해 시험 결과의 신뢰성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1,000hrs. 시효재의 경도는 신재보다 다소 큰 값을 보였으나, 그 이상의 열처리재인 2,000hrs. 및 3,000hrs. 열처리재의 경우에는 경도가 감소하는 연화(softening) 거동을 보였는데 이는 퍼일라이트 조직의 현저한 감소 및 미세 탄화물의 석출로 인한 결과로 생각된다.
- 양극분극 특성인 전류밀도의 차(ΔI_{FP} 와 ΔI_{SP})가 1,000hrs. 시효재에서 가장 높은 값을 보인 후 그 이상의 시효재에서는 오히려 저하되었다.
- SP 시험결과로부터 538 $^{\circ}\text{C}$ /55,000hrs.에 해당되는 630 $^{\circ}\text{C}$ /1,000hrs. 시효재가 가장 높은 열화손상도를 보였으며, 2,000hrs와 3,000hrs. 시효재의 경우는 오히려 기계적 성질이 회복되었다. 이같은 결과는 -196°C 의 파면관찰 결과와 잘 일치하였다.
- 전기화학적 양극분극 특성인 ΔI_{FP} 와 ΔI_{SP} 가 SP 시험에서 얻은 재질열화도 $\Delta[\text{DBTT}]_{\text{SP}}$ 와 좋은 상관

관계를 보여 Cr-Mo-V강의 신뢰성 있는 재질열화 평가인자임을 알았으며, 향후 이들 인자들에 의한 다양한 내열재료 및 현장부재에 대한 비파괴적인 재질열화 평가가 주목된다.

참고문헌

- [1] K. Akiyama, T. Shiota, H. Ikawa, K. Kawamoto, T. Goto and H. Karato, "Life Assessment of Turbine components by Integrated Techniques," Proc. of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Chicago, pp. 98-10, (1987)
- [2] R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," ASM International, pp. 43-53, (1989)
- [3] J. C. Murza, C. J. McMahon, Jr., "The Effects of Composition and Microstructure on Temper Embrittlement in 2.25Cr-1Mo Steel," Transation of ASME, J. Eng. Mater. Technol. Vol. 102, pp. 369-375, (1980)
- [4] D. Firrao, R. Robert, and G. M. La Vecchia, "Tempering Temperature and Blunt Notch Fracture Toughness of Ni-Cr-Mo Steels," Proceeding of the 7th International Conference on Fracture, Houston, Texas, Vol. 4, pp. 2433-2445, (1989)
- [5] Aaltonen, I. Aho-Mantila and H. Hanninen, "Electrochemical Methods for Testing the Intergranular Corrosion Susceptibility of Stainless Steels," Corrosion Science, Vol. 23, No. 4, pp. 431-440, (1983)
- [6] Y. Nishiyama, K. Fukaya, M. Suzuki and M. Eto, "Irradiation Embrittlement of 24Cr-1Mo steel at 400°C and its Electrochemical Evaluation," Journal of Nuclear Materials, Vol. 258-263, pp. 1187-1192, (1998)
- [7] T. Misawa, T. Adachi, A. Saito and Y. Hamaguchi, "Small Punch Tests for Evaluating Ductile-Brittle Transition Behavior of Irradiated Ferritic Steels," Journal of Nuclear Materials, Vol. 150, pp. 194~202, (1987)
- [8] 權一賢, 劉世程, Maribel L. Saucedo, 橋田俊之, 高橋秀明, "小型パンチ試験法を用いたオーステナイト系ステンレス鋼JN1の溶接部及び熱処理材の極低溫破壊特性", 日本機械學會論文集(A編), 第63卷, 第605號, pp. 1-7, (1997)
- [9] A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett, D. Sidey, and D. M. R. Taplin, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," Proceedings of the 5th International Conference on Fracture, Cannes, France, Vol. 4, pp. 1613-1620, (1981)
- [10] H. Okamura, R. Ohtani, K. Saito, K. Kimura, R. Ishii, K. Fujiyama, S. Hongo, T. Iseki and H. Uchida, "Basic investigation for life assessment technology of modified 9Cr-1Mo Steel," Nuclear Engineering and Design, Vol. 193, pp. 2430-254, (1999)
- [11] R. Viswanathan and S. M. Gehl, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steels Based on Composition," Journal of Engineering Material and Technology, Vol. 113, pp. 263-270, (1991)
- [12] J. H. Bulloch, "Reverse Temper Embrittlement, RTE, in Low Alloy Steels: a Substantive Study Concerning the Influences of Grain Size, Bulk Phosphorous and Accumulated Service Strain," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, pp. 63-78, (1999)