

Cr-Mo강 시효재의 취화손상 평가를 위한 전기화학적 분극시험에 관한 연구

A Study on Electrochemical Polarization Test for Embrittlement Damage Evaluation of Aged Cr-Mo Steel

유 효 선*
 Yu Hyo-Sun*

초 록 에너지 변환설비와 관련된 기계구조물의 내열재료는 350℃~550℃의 온도범위에서 장시간 사용되는데 이때 조직의 결정입계에는 불순물 원소(P, Sn, Sb 등)의 편석과 탄화물의 석출 등으로 인하여 재료의 취화 현상이 발생되고, 그로 인해 입계강도의 저하가 초래된다. 따라서 노후화된 고온설비의 안전성 및 효율적인 운전조건을 확보하고, 취성파괴 방지를 위해서는 취화손상의 정량적 평가는 매우 중요하다. 그러나 가동중인 고온설비에서 파괴시험을 위한 대량의 시험편 채취가 거의 불가능한 경우가 대부분이므로 비파괴적인 시험방법이 요구된다. 본 연구에서는 인공시효열처리된 2.25Cr-1Mo강의 비파괴적인 취화손상도 평가를 위해 적정 부식환경하에서 전기화학적 분극시험 방법에 의한 최적의 평가인자를 조사하였다. 또한 전기화학 시험결과들은 준비파괴시험인 SP시험에 의한 취화도 평가결과와 비교되었다.

주요용어 : 시효재, 취화손상, 양극분극시험, 정전위시험, 소형편치시험, 1차 peak 전류밀도(I_{FP})

Abstract It has been well recognized that a long term service at elevated temperature of 350℃~550℃ induces embrittlement damage due to carbide precipitation and/or P, Sb and Sn segregation at grain boundaries and thereby deteriorates the grain boundary strength of heat resisting components in the energy-related plants. Therefore, it is very important to assess quantitatively the extent of embrittlement damage of heat resisting components to secure the reliable and efficient service condition and to prevent brittle failure in service. However, because fracture tests are limited in size and number of specimen obtained from the structural components, nondestructive test method is required. In this study, the optimum electrochemical parameters are investigated and discussed to evaluate nondestructive embrittlement damage for aged 2.25Cr-1Mo steels by means of electrochemical polarization test method (ECPM) in proper corrosive environment. In addition, the electrochemical test results are compared with embrittlement degree evaluated by semi-nondestructive SP test.

Keywords: aged material, embrittlement damage, anodic polarization test, potentiostatic test, small punch test, first peak current density(I_{FP})

1. 서 론

가동중 고온설비에서 특별하게 중요한 문제는 고온에서 장시간 사용중에 재질특성이 크게 변화된다는 것이다. 이러한 재질특성 변화중 고온재료를 350℃~550℃

의 온도범위에서 장시간 사용할 경우 발생하는 결정입계의 불순물 원소(P, Sn, Sb 등)의 편석(segregation)과 탄화물의 형성 및 조대화 그리고 석출(precipitation) 등에 의한 취화손상(embrittlement damage: ED)은 고온재료의 대표적인 열화현

상이다. 이같은 손상이 발생되면 입계강도의 저하와 함께 연성-취성전이곡선(ductile-brittle transition curve)이 고온측으로 이동하는 인성의 저하를 초래하게 된다(1~3). 따라서 노후화된 고온설비의 안전성 및 효율적인 운전조건을 확보하고, 고온재료의 취성파괴방지를 위해서는 취화도의 정량적 평가는 매우 중요하다(4, 5).

고온설비의 재질열화와 관련된 취화손상의 정량적 평가는 현장에서 시료를 채취하여 충격시험과 같은 파괴시험을 행하고 그 결과로 취화의 감수성을 평가하는 방법이 가장 정확하나, 실제 가동중인 고온설비에서 대량의 시험편 채취가 거의 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 고온설비의 현상태 진단기술의 개발은 구조물의 강도에 영향을 미치지 않는 범위에서 비파괴적인 방법으로 검출 평가할 수 있는 새로운 기술의 개발이 강력히 요망된다(6).

한편, 최근에는 내부 조직변화에 기인하여 현저히 변화하는 재료의 전기화학적 성질(electrochemical property)을 이용한 비파괴평가가 제안되고 있으며, 이방법은 기본적으로 단일의 시험방법으로 다양한 손상의 계측평가가 가능한 장점을 가지고 있다(7). 이러한 전기화학적 성질을 이용한 손상평가의 기본원리는 손상원인이 되는 특성의 불순물, 탄화물 혹은 무석출대 등만을 각각 선별적, 우선적으로 용해하여 그의 용해반응량을 정량계측하는 것에 의해 손상을 검출, 평가하는 것이다.

따라서 본 연구에서는 취화손상도의 비파괴적인 진단 기술과 평가인자의 조사를 위해, 화력발전설비의 고온 튜브재로 널리 사용되는 저합금 Cr-Mo강계의 신재와 인공시효 열처리재(artificially aged materials)를 대상으로 전기화학적 분극시험방법(electrochemical polarization test method: ECPTM)을 이용하여 시험재의 분극특성을 조사하고 그의 결과를 준비 파괴시험인 소형편치(small punch: SP)시험(8)으로부터 얻은 취화손상도 결과와 비교, 검토하고자 한다.

2. 시험편과 실험방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용한 시험재료는 현재 화력발전설비의 파열기관 재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo강계의 신재와 인공시효열처리재이다. Table 1에 재료의 화

Table 1 Chemical composition (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
2.25Cr-1Mo	0.13	0.01	0.42	0.02	0.29	0.12	2.23	1.12

Table 2 Accelerated aging time at 630°C (2.25Cr-1Mo steel)

Simulated time to in-service at 538°C(hr)	Aging time at 630°C (hr)
2,675	64
18,171	330
62,995	1,144
100,200	1,820

학적 성분을 나타내었다. 먼저 인공시효재를 얻기 위해 시험 tube재를 실제 사용온도(500°C~538°C)보다 높은 온도에서 시효열처리를 행하고, 각각의 시효조건에 따라 전기화학시험용과 SP시험용 시험편을 제작하였다. 모의 열화시간은 철의 자기 확산에 필요한 활성화 에너지에 근거한 다음과 같은 식으로 결정하였다.

즉, 538°C에서 $D_1 = D_0 \exp(-Q/RT_1) = \text{constant}/t_1$
630°C에서 $D_2 = D_0 \exp(-Q/RT_2) = \text{constant}/t_2$
이며, 이때, 확산계수 $D_1 = D_2$ 이므로

$t_2 = t_1 \exp(Q(T_2^{-1} - T_1^{-1})/R)$ 의 관계식이 성립한다. 여기서, R은 기체 상수이고, Q는 철의 자기활성화 에너지로서 약 65kcal/mol. 이다.

Table 2에 630°C에서의 시효열처리 시간과 실기온도 538°C에서 대응되는 모의열화시간을 나타내었다. 그리고 파괴시험에 있어 취화손상도 평가에 사용된 SP 시험편의 크기는 규격크기인 10mm×10mm×0.5thmm로 하고(8), 전기화학 시험편의 채취는 tube의 외측표면을 기준으로 해서 12mm×12mm×3thmm의 크기로 제작하였다. 준비된 시험편은 뒷면에 리드선을 연결한 다음, 시험 부식면을 제외한 나머지 부분은 에폭시 수지로 피복하여 분극계측용 시험편을 제작하였다. 전기화학 시험편의 표면상태는 조직상태를 관찰할 수 있도록 수지연마지(emery paper)를 이용하여 #100~#1500까지 연마한 후, alumina powder(5μm, 0.3μm)를 이용하여 buffer 연마를 함으로써 표면을 경면상태로 유지하였다. 분극시험전 시험편은 탈기 건조시킨 후, 틈부식을 막기위해 시험편 주위를 절연성 도료로 피복하고, 만능투영기(×10)에 의해 시료면적을 측정하여 분극시험결과 분석에 이용하였다. Fig. 1에 tube로부터 시험편의 채취방법과 시험편의 크기를

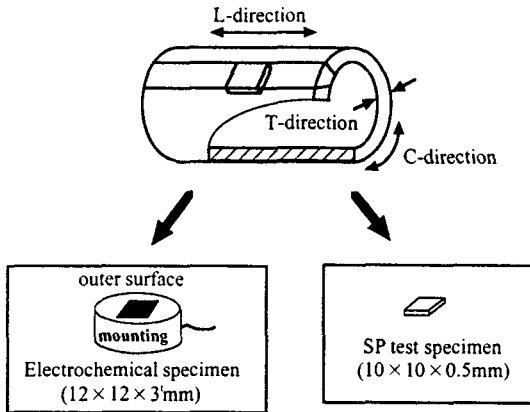


Fig. 1 Preparation of specimens for SP and electrochemical tests

나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. SP 실험방법

SP 시험법은 극소형시험편을 이용하여 원자로 내벽의 조사(irradiation)에 의한 기계적 성질의 저하를 평가하기 위해 새로이 개발된 시험법으로, 현재 핵융합로의 조사취화에 따른 재료강도 평가이외에도, 세라믹이나 경사기능재료(functionally gradient material : FGM)와 같은 신소재 및 발전설비의 재료평가에도 사용되고 있다(9~11). 따라서 본 연구에서는 이러한 SP시험법을 이용하여 고온재료의 취화손상도를 평가하였다. Fig. 2에 SP시험장치의 개략도를 도시하였다. SP시험에 적용된 부하속도는 0.2mm/min.

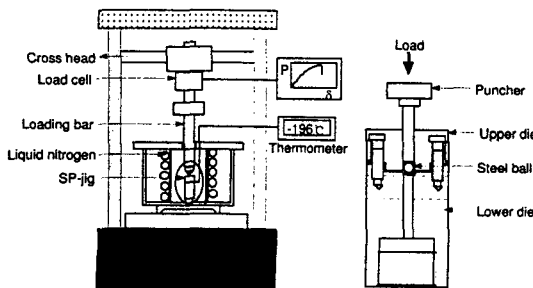
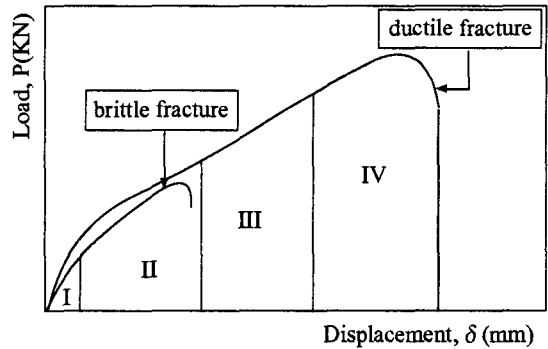


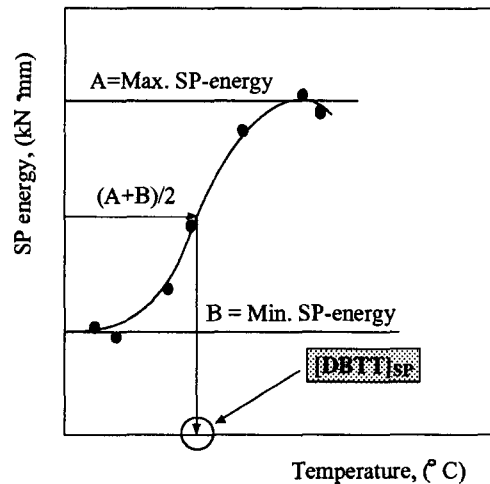
Fig. 2 Schematic diagram of SP test equipment

이며, 시험온도 변화는 -196℃~20℃의 범위로 하였다. SP시험은 만능시험기(용량 10ton)를 사용하였으며, 펀치선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 ϕ 2.4mm의 강구를 놓고 이를 통하여 시험편 상부에 하중을 가하였



- I : Elastic bending region
- II : Plastic bending region
- III : Plastic membrane stretching region
- IV : Plastic instability region

(a) typical load-displacement curve



- SP-Energy (E_{SP})= The area under P- δ curve
- DBTT=Temperature of $0.5(E_{SP-max.}+E_{SP-min.})$
- Δ DBTT=(DBTT)_{Used material}-(DBTT)_{New material}

(b) typical SP-energy ductile-brittle transition curve

Fig. 3 The load-displacement curves and the definition of ductile brittle transition temperature, DBTT_{SP} in SP test

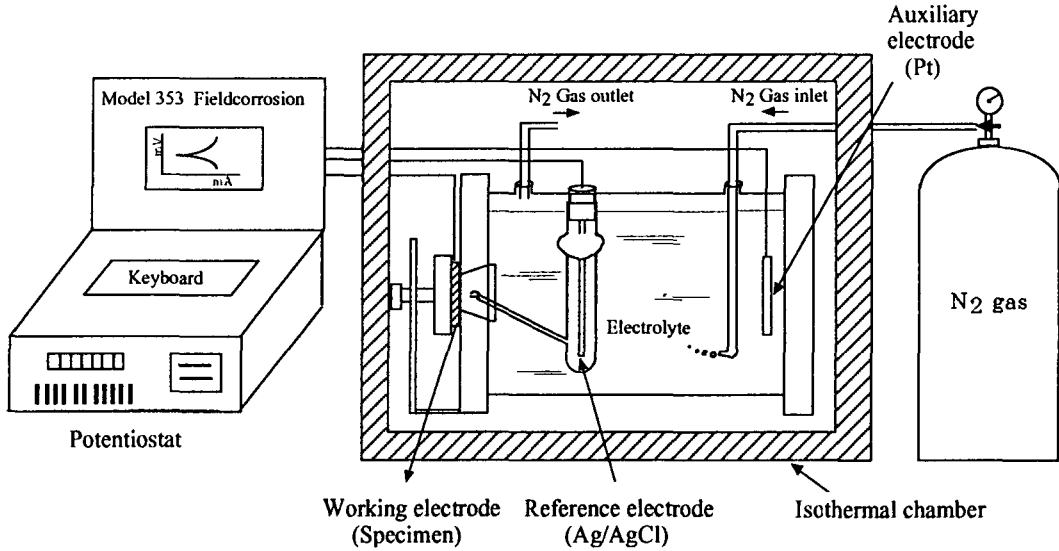


Fig. 4 Schematic diagram of electrochemical test equipment

다. 각 시효재의 취화손상도(embrittlement damage degree : ED degree)는 SP-에너지 온도곡선으로부터 신재에 대한 인공시효재의 연성-취성전이온도(ductile-brittle transition temperature: $DBTT_{SP}$) 상승량인 $\Delta DBTT_{SP}$ 로 평가하였다. Fig. 3에 SP시험에서 얻을 수 있는 하중-변위곡선과 4단계의 파괴거동, 연성취성전이곡선 그리고 $\Delta DBTT_{SP}$ 의 평가방법 등을 나타내었다.

2.2.2. 전기화학 분극 실험방법

본 연구에서 사용된 전기화학 시험장비는 EG & G Instruments Cor.의 제품으로 다양한 분극시험 즉, 양극/음극분극시험, Tafel 분극시험, 재활성화 분극시험, 순환분극시험 등을 수행할 수 있는 휴대용 장비를 사용하였다[12]. 분극시험장치의 구성은 크게 정전위기(potentiostat), 전해 cell, 전극(electrode), data aquisition system 등으로 구성되어 있다. 분극시험시 기준전극으로는 포화 Ag/AgCl 전극을, 보조전극으로는 백금(Pt) 전극을 사용하였다. 이때 백금 전극의 표면적을 넓게 하기 위하여 백금망을 사용하였다. Fig. 4에 본 연구에서 사용된 전기화학 계측장치의 개략도를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 분극방법은 양극분극시험(anodic polarization test) 방법을 채택하였으며, 이때 사용된 전해액은 50% $Ca(NO_3)_2$ 의

부식용액을 사용하여 분극곡선의 거동을 조사하였다. 전해액의 pH는 buffer solution을 이용하여 pH7.3으로 조절하였다. 전해액의 온도는 $30 \pm 1^\circ C$ 로 하였으며, 시험용액의 용존산소의 영향을 제거하기 위해 질소가스를 15분 동안 불어 넣어 탈기하였다. 시험재의 분극조건은 준비된 시험편을 분극 전해액에 침적한 후, 약 5분 정도 유지한 다음 회로를 연결하여 자연 부식전위(corrosion potential : $E_{Corr.}$)에서부터 $0.5mV/sec.$ 의 분극속도로 기준전극에 대해 약 $2500mV$ 까지 분극하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. SP 시험에 의한 취화손상도 평가

Fig. 5는 2.25Cr-1Mo강의 신재와 인공시효 열처리재 중 64hrs., 1820hrs.재의 SP-에너지의 연성-취성전이온도 곡선이다. 여기서 SP-에너지의 산출은 시험온도에서 얻은 하중-변위곡선의 아래 면적으로 산출된 값이다 먼저, 시효재의 천이거동을 보면, 신재의 경우보다 모두 고온측에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 1820hrs.재의 천이곡선은 64hrs.재의 천이곡선에 비해 고온측에 위치하여 큰 취화손상 정도를 예견할 수 있다. 이때, 64hrs.재와 1820hrs.재의 $DBTT_{SP}$ 는 각각 $-181^\circ C$ 와 $-165^\circ C$ 로서 1820hrs.재의 경우가

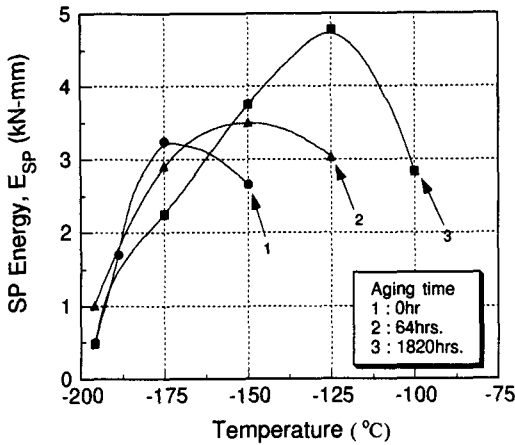


Fig. 5 SP ductil-brittle transition behaviors for 0hr, 64hrs., and 1820hrs. materials at various temperatures.

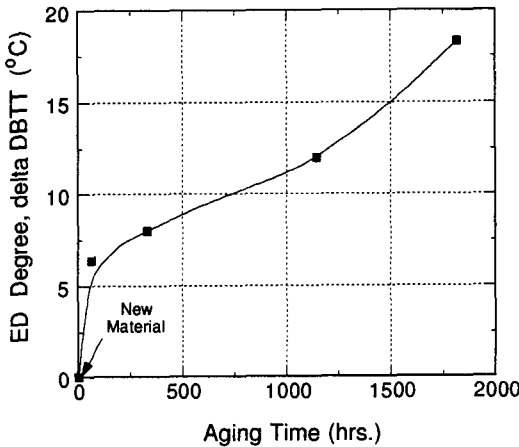
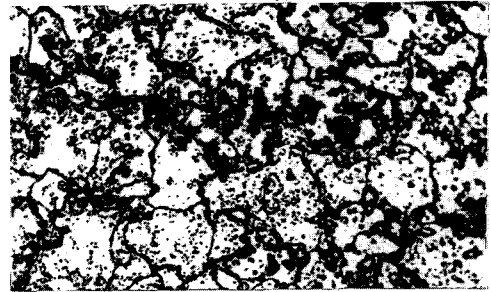
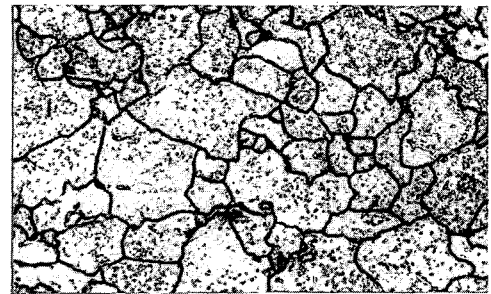


Fig. 6 Embrittlement damage degree according to aging time at 630°C

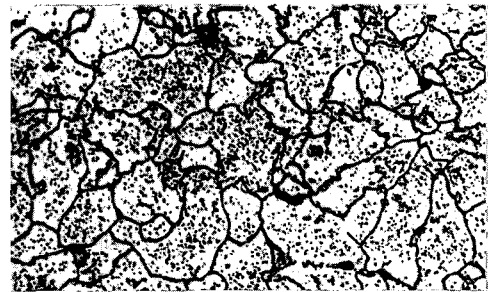
64hrs.재의 경우에 비해 보다 큰 연성-취성전이온도를 보이고 있다. 여기서, $DBTT_{SP}$ 는 SP-에너지의 온도의존곡선에서 상부점의 에너지(upper shelf energy)와 하부점의 에너지(lower shelf energy)의 평균값에 해당하는 온도로서 나타낸다. 그리고 신재에 대한 인공시효재의 취화손상 정도를 시효시간에 대해 살펴보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 시효열처리 시간이 증가함에 따라 취화손상 정도가 점점 증가함을 관찰할 수 있으며, 특히 1820hrs.재의 경우는 신재에 대한



(a) As-received



(b) 64hrs.



(c) 1820hrs.

Fig. 7 Etching microstructures of as-received, 64hrs., and 1820hrs. aged materials by picric acid ($\times 400$)

$\Delta DBTT_{SP}$ 가 18°C로서 매우 큰 취화손상 정도를 보이고 있다. 이러한 시험결과는 각 시험재의 조직관찰 사진으로도 설명되어진다. Fig. 7은 시험재중 신재, 64hrs. 그리고 1820hrs. 시험재의 피크린산(picric acid) 부식용액에 의해 관찰된 조직사진이다. 사진에서 신재의 경우는 페라이트와 퍼얼라이트 조직으로 구성되어있음을 알 수 있고, 시효열처리재의 경우는 퍼얼라이트 조직의 소실과 함께 시효시간이 길수록 입계폭의 증가와 입계주위의 탄화물과 불순물의 부식정도가 큼을

관찰할 수가 있다. 따라서 이같은 재료의 내부조직 변화에 기인하여 시효재의 입계강도는 저하되고 결국 취화손상 거동은 증가하게 되는 것이다.

3.2. 전기화학 양극분극거동과 I_{FP} 특성

전기화학실험에 있어 분극(polarization)이란 전해질 용액내에서 평형전위 상태에 있는 금속이 외부의 부가전위(applied potential)에 의해 산화 및 환원반응이 지배될 때 금속의 평형전위로 부터의 전위이동을 말한다. 즉 전류가 흐르지 않는 평형상태에서의 전위와 전류가 흐를때의 전위의 차이를 의미한다. 이같은 분극 기법을 이용한 전위구동법인 양극분극 시험방법은 일반적으로 오스테나이트 스텐레스강재를 대상으로 특정 부식환경하에서 금속재료의 활성화(active)거동과 부동태(passive)거동을 결정하는데 널리 사용되어온 시험 방법이다.

Fig. 8은 30℃로 유지된 50% $Ca(NO_3)_2$ 전해액 중에서 신재와 인공시효재에 대한 양극분극곡선의 거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 자연부식전위($E_{Corr.}$)로부터 양극분극시 뚜렷한 활성화거동과 부동태거동을 보이고 있다.

일반적으로 부식환경내에서 저합금 Fe-Cr강은 자연 부식전위에서부터 부식이 가속되어 어느 한계전류치에 도달하면, 그 이후에 시험재 표면에 부동태 산화피막(oxide film)을 형성하게 되어 시험재 표면에 흐르는 전류밀도는 급격히 감소하게 된다. 이같은 부동태 거동은 특정의 전위영역에서 갑자기 용해속도가 현저하게 저하하는 현상으로 종래 이러한 부동태영역에서 산화피

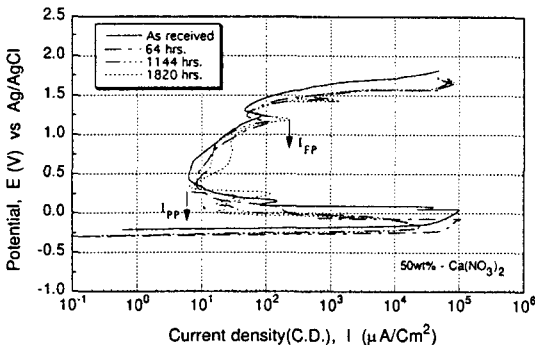


Fig. 8 Electrochemical anodic polarization curves for new and aged materials in 50% $Ca(NO_3)_2$ solution

막의 형성에 관련된 인자 즉, 부동태화 전류밀도값(I_{PP})은 시험재의 미세조직의 변화에 따른 부식특성 및 내식성 평가에 널리 사용되고 있다. 따라서, 먼저 각 인공시효재의 양극분극곡선상의 부동태화 전류밀도인 I_{PP} 를 관찰해 볼 때, $6\mu A/cm^2 \sim 10\mu A/cm^2$ 으로서 매우 미미한 차이임을 알 수 있다. 그러므로 부동태화 전류밀도인 I_{PP} 로서 취화손상도를 평가한다는 것은 어려움이 있다.

다음은 부동태 영역에서 전위 증가에 따른 전류밀도의 변화중, 첫번째 peak점에서의 전류밀도인 I_{FP} 를 관찰해 보았다. 그 결과, 신재의 경우보다 시효재의 경우는 모두 높은 I_{FP} 거동을 보였으며, 시효재들 중에서도 1820hrs. 시험재가 가장 높은 peak치를 보였다. 그림에서 신재의 경우는 약 $81\mu A/cm^2$ 이며, 64hrs. 시효재는 약 $105\mu A/cm^2$, 1144hrs. 재는 약 $159\mu A/cm^2$ 그리고 1820hrs. 재의 경우는 약 $225\mu A/cm^2$ 임을 관찰할 수가 있다. 이렇게 조사된 I_{FP} 의 시험결과와 그때의 전위값인 E_{FP} 를 각 시험재의 취화손상도와 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 두인자 사이에는 뚜렷한 상관관계가 있음을 확인할 수 있으며, 가장 취화손상도가 큰 1820hrs. 재의 경우에서 가장 높은 I_{FP} 의 부식전류밀도 값을 보이고 있다. 따라서 전기화학 분극곡선 특성중 I_{FP} 에 의한 취화손상도의 평가 가능성을 알 수 있다. 특히 주목할

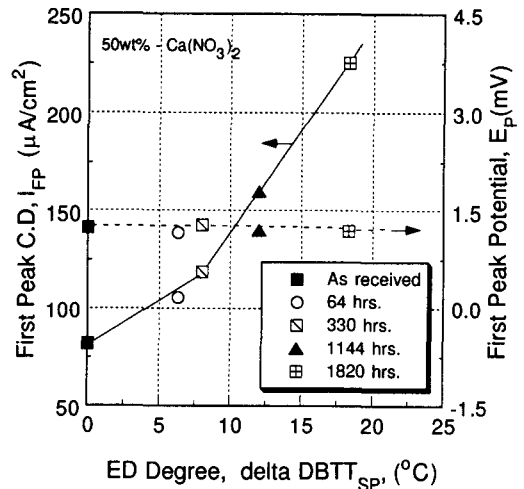


Fig. 9 The behaviors of first peak current density (I_{FP}) and potential(E_{FP}) according to embrittlement damage degree for new new and aged materials

만한 내용은 I_{FP} 를 보이는 전위가 약 1.2V로서 거의 같은 특정 전위영역에서 일어나는 전기화학적 용해 반응량이라는 사실이다.

한편 내열재료의 경년적 재료손상은 특정 석출물의 조대화, 불순물 입계편석 혹은 고용강화원소의 감소 등 장시간 사용중의 미시적인 재료내부의 구조변화에 기인한 것 이기때문에 비파괴적 손상계측방법은 최대한으로 이 내부조직변화에 따른 재료의 물리적 성질의 변화를 계측하는 것에 의해 손상의 정도를 평가 해야만 한다. 또한 여기서 재료평가지 주의를 요하는 것은 계측량과 손상의 대응관계의 물리적 의미 부여가 명확히 이루어져야한다. 이러한 점에서 I_{FP} 의 변화특성을 고찰해 보면, 먼저 신재의 경우는 시험재 표면에 안정된 산화피막이 형성되기 때문에 전위의 상승에 의한 전류의 변화가 작은 것으로 사료된다. 이에 반해 취화손상 정도가 큰 1820hrs.재의 경우는 시험재 표면에 산화피막이 형성된다 할지라도 형성된 피막의 상태는 미세조직의 불균일 특히 입계부의 탄화물과 불순물로 인해 매우 불안정 상태일 것이다. 따라서 불안정한 부동태 피막의 형성으로 인해 전위의 상승도중 특정 전위영역에서 탄화물과 불순물의 용해에 기인하여 높은 전류량의 증가를 보인 것으로 사료된다. 이같은 결과를 입증하기 위해 신재와 1820hrs.를 대상으로 동일 부식용액내에서 1차 peak를 보인 특정전위에서 정전위시험(potentiostatic test)을 행하였다. 먼저 각 시험재를 부식용액 중에 침적한 후 5분동안 유지한 후 신재의 경우는 1240mV 그리고 1820hrs.재의 경우는 1192mV에서

4000sec.동안 변화되는 전류밀도량을 조사해 본 결과, Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 두 시험재 모두 시험 시작시에서는 높은 전류량과 함께 약 500sec.까지 전류밀도는 급감하다가 오랜시간동안 거의 같은 정도의 전류밀도를 보이고 있다. 이때 넓은 영역을 차지하는 전류밀도량을 비교해 보면, 신재의 경우는 약 $1\text{mA}/\text{cm}^2$, 1820hrs.의 경우는 약 $2.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 을 보여 앞의 양극분극곡선상에서 구한 I_{FP} 의 값보다는 크지만 1820hrs.의 경우가 신재보다는 약 2배 이상의 부식 전류밀도량을 보이고 있다. 따라서, 앞서 논한 양극분극 시험결과와 거동과 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 정전위시험후 시험재의 부식면을 관찰한 사진이다. 두 시험재 모두 부식된 부위는 거의 입계주위를 알 수 있고, 1820hrs.의 경우가 입계부의 부식 정도가 신재보다 상당히 큼을 관찰할 수가 있다. 이같은 결과는 본 연구의 실험조건 및 해석결과와 신뢰성을 뒷받침하는 중요한 결과로 사료되며, 따라서 앞서 고찰한 I_{FP} 는 취화손상도에 따른 전기화학적 용해반응량

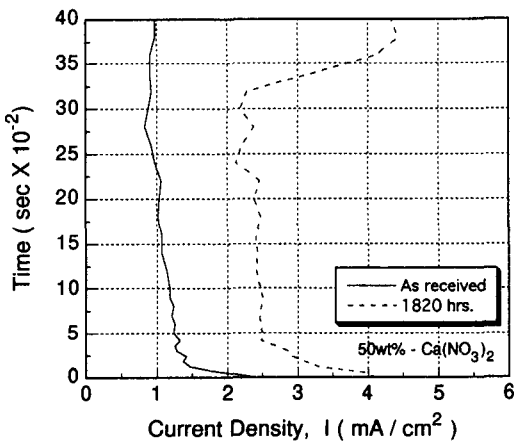
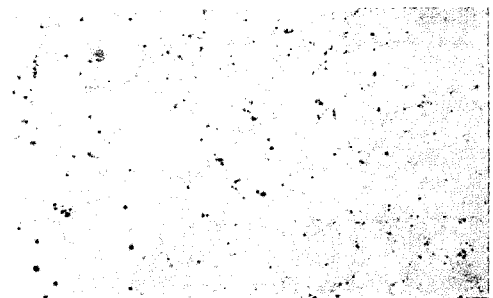
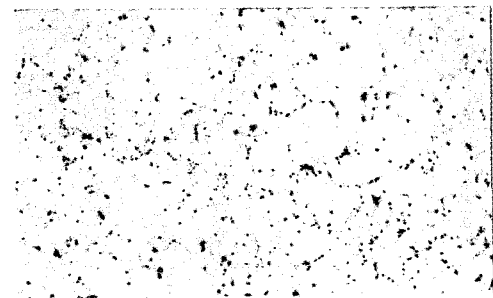


Fig. 10 Variation of current density as a function of time at applied potential in electrochemical potentiostatic test



(a) As-received



(b) 1820hrs.

Fig. 11 Appearance of surface after electrochemical potentiostatic test at E_{FP} for as-received and 1820hrs. materials ($\times 400$)

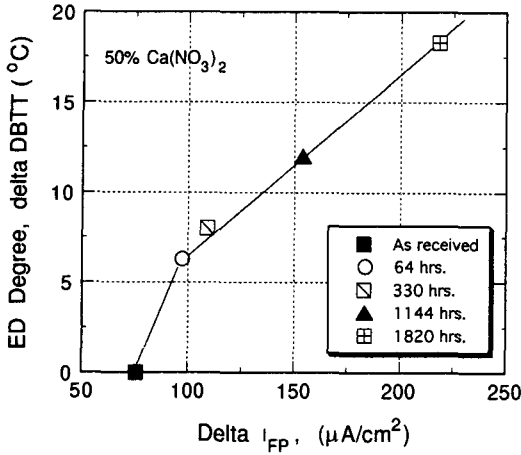


Fig. 12 A relationship between ED degree and delta I_{FP} for new and aged materials

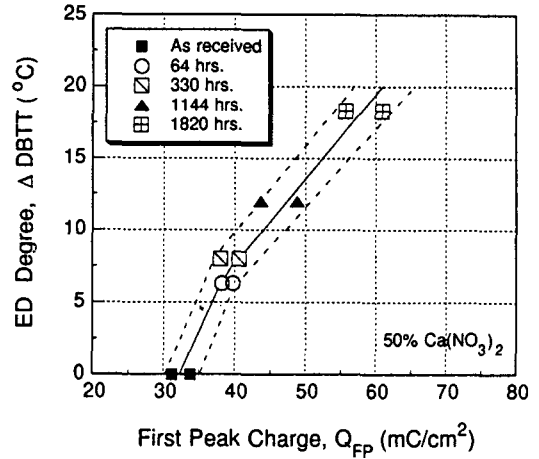


Fig. 13 A relationship between ED degree and first peak charge for new and aged

을 확인할 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 취화손상도 $\Delta DBTT_{SP}$ 에 따른 I_{FP} 와 I_{PP} 와의 차 ΔI_{FP} 그리고 I_{PP} 와 I_{FP} 사이의 전하량인 Q_{FP} 를 나타낸 결과이다. 신재에서 시효시간의 증가에 따른 열화정도가 커짐에 따라 ΔI_{FP} 와 전하량 Q_{FP} 는 증가함을 관찰할 수 있다. 특히 취화손상 정도가 큰 1144hrs.와 1820hrs.재의 경우는 뚜렷한 ΔI_{FP} 와 Q_{FP} 의 증가를 관찰할 수 있어 시효시간이 큰 열화재에서의 뚜렷한 전기화학적 특성을 관찰할 수 있다.

이상과 같은 인공시효재의 SP시험 및 전기화학 실험 결과 즉, 취화손상도 $\Delta DBTT_{SP}$ 에 따른 양극분극시험 시 시료전극의 부동태 완료전위와 전류밀도(E_{FP} , I_{FP}), 부동태피막 형성 후 제 1차 peak의 전류밀도와 전위(I_{PP} , E_{FP}), I_{FP} 와 I_{PP} 와의 차 ΔI_{FP} 그리고 I_{PP} 와 I_{FP} 사이의 전하량인 Q_{FP} 등을 고찰한 결과, I_{FP} , ΔI_{FP} 그리고 Q_{FP} 의 평가인자는 Cr-Mo강재의 취화손상도 평가시 그 적용 가능성이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 에너지변환 고온설비의 튜브 재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo 강을 대상으로 내부 조직 변화에 기인한 전기화학적 성질의 변화를 이용하여 취화손상을 비파괴적으로 평가하기 위한 실험실적 단계의 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 30℃로 유지된 50% $Ca(NO_3)_2$ 전해액중에서 신재와 각 인공시효재에 대한 양극분극거동은 뚜렷한 활성화거동(active behavior)과 부동태거동(passive behavior)을 보였고, 부동태화 전류밀도인 I_{PP} 는 약 $6\mu A/cm^2$ ~ $10\mu A/cm^2$ 으로서 매우 미미한 차이를 보여 IPP특성치로서 취화손상을 평가한다는 것은 어려움이 있었다.
- 2) 부동태 피막형성후 제 1차 peak에서의 전류밀도 I_{FP} 는 신재의 경우보다 시효재의 경우가 모두 높은 거동을 보였으며, 각 시험재의 취화손상도와 뚜렷한 비례관계가 있음을 확인할 수 있었다. 특히 주목할만한 내용은 I_{FP} 를 보이는 전위가 약 1.2V로서 거의 같은 특정 전위영역에서 일어나는 전기화학적 용해 반응량이었다.
- 3) 인공시효재들 중에서도 1820hrs. 시험재가 가장 높은 I_{FP} 값 ($225\mu A/cm^2$)을 보였는데 이는 불안정한 부동태 피막의 형성과 함께 전위의 상승도중 특정 전위영역에서 입계근처의 탄화물과 불순물의 용해에 기인하여 높은 전류량의 증가를 보인 것으로 사료된다. 이 같은 결과는 정전위시험(potentiostatic test)을 통해 확인할 수 있었다.
- 4) 인공시효재의 SP시험과 전기화학 실험결과 즉, 양극분극시험시 시료전극의 부동태영역에서의 전기화학적 반응 특성 즉, E_{FP} , I_{PP} , E_{FP} , I_{FP} , I_{PP} 와 I_{FP} 와의 차 ΔI_{FP} 그리고 I_{PP} 와 I_{FP} 사이의 전하량인 Q_{FP} 등을 고찰해본 결과 I_{FP} , ΔI_{FP} 그리고 전

하량 Q_{FP} 의 파라미터는 Cr-Mo강재의 취화손상도 평가시 사용 가능함을 알 수 있어, 앞으로 실기 고온재료에 대한 그의 적용이 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(과제번호 : 971-1004-025-1)지원으로 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- [1] 青木滿, 角屋好邦, "火力·原子力およびプラント機器·構造部材の經年劣化と壽命豫測", REALIZE INC., pp. 49-96, (1994)
- [2] J. C. Murza, C. J. McMahon, 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, (1980)
- [3] D. Firrao and R. Robert, G. M. La Vecchia, "Tempering temperature and blunt notch fracture toughness of Ni-Cr-Mo steels", Proceeding of the 7th ICF, Houston, Texas, Vol. 4, pp. 2433-2445, (1989)
- [4] 新谷紀雄, "高温構造材料の餘壽命豫測技術開發", 鐵と鋼, 第 73卷, 第 9號, pp. 13-19, (1987)
- [5] G. A. Webster and R. A. Ainsworth, "High temperature component life assessment", CHAPMAN & HALL, pp. 1-319, (1993)
- [6] H. Takahashi and T. Shoji, "In-service degradation of fracture properties of high temperature structure components and related NDE in fossil electrical power plants", 火力原子力發電, Vol. 37, No. 8, pp. 858-867, (1986)
- [7] Matsushita and Saito, "Non-destructive evaluation of material degradation for austenitic stainless steel by means of electrochemical method", Japanese Jour. of Material, Vol. 39, No. 446, pp. 566-573, (1991)
- [8] JAERI-memo(62-193), "小型パンチ(SP) 試験法(案)", 日本原子力研究所, pp. 1-135, (1987)
- [9] 유효선 外 3人, "수소취화된 CANDU 압력관 재료의 파괴강도 평가를 위한 SP시험에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 510-521, (1995)
- [10] J. Kameda, R. Ranjan, "Characterization of deformation and fracture behavior in amorphous and/or ceramic coatings and aluminum alloy substrates by small punch testing and acoustic emission techniques", Mater. Sci. Eng. 183, pp.121, (1994)
- [11] 유효선, 박종진, 정세희, "고온부재의 재질열화에 따른 응력부식균열 평가에 관한 연구", 대한기체학회 논문집, Vol. 20-4, pp. 1123-1132, (1996)
- [12] EG & G Instruments Corporation, "Field Corr portable corrosion analyzer", (1991)