

< 논 문 >

Ni-Cr-Mo-V강의 전기화학적 방법에 의한 내식성 평가

권재도* · 문윤배**

(1996년 11월 25일 접수)

Evaluation of Corrosion Resistance by Electrochemical Method for Ni-Cr-Mo-V Steel

Jae-Do Kwon and Yun-Bae Moon

Key Words : Corrosion Resistance(내식성), Electrochemical Polarization(전기화학적 분극),
Original Material(건전재), Degraded Material(열화재)

Abstract

When the structures are exposed to their own an application for a long period, a number of variables such as strength properties and corrosion resistance, so on are expected to change. In the present investigation the corrosion behavior and resistance for the original and degraded materials of Ni-Cr-Mo-V steel were evaluated under the conditions of pH 3, 6, 9 and 12 in a distilled water environment. The electrochemical polarization technique was employed in this investigation. Based upon the experimental results obtained, the following conclusions were drawn. A severe and uniform corrosion was observed for both original and degraded materials under the condition of pH 3. At pH 6 and pH 9, these materials showed the degradation by a pitting corrosion. The materials under pH 12 environment were degraded by a uniform corrosion. The corrosion rate per year were the highest in the pH 3 environment, followed by pH 12, pH 6 and pH 9 environment in order. The corrosion resistance was decreased from the original material, slow cooled material(10°C/hr) and step cooled material in order.

1. 서 론

원자력 발전 설비의 2차 계통중의 하나인 터빈부는 피로, 응력부식균열(SCC) 그리고 침식(erosion)에 의한 블레이드(blade), 블레이드 로터(blade rotor), 블레이드 연결부 및 로터디스크(rotor disc) 등의 파손 현상이 보고⁽¹⁾되고 있다. 또한, 터빈의 축 및 로터디스크는 Ni-Cr-Mo-V강(A471강)⁽²⁾으

로 제작되어 있으며, 터빈 축 및 로터디스크의 파손은 재질열화를 동반한 부식, 부식피로 및 SCC 등이 원인이 되어 파손된 예가 다수 보고⁽³⁾되고 있다. 이와 같이 로터디스크에서의 파손사례는 부식 피트(pit)가 발생되고, 이를 기점으로 응력부식균열이 발생하여 파손된다고 보고되고 있으며, 균열 주위에는 NaOH, Na₂CO₃, NaCl, Na₂SO₄ 및 Cu 등의 성분⁽⁴⁾이 포함되어 있는 것으로 나타나고 있다.

그러므로 터빈 축 및 로터디스크용 재료로 사용되고 있는 Ni-Cr-Mo-V강이 고온의 특수환경 하

*회원, 영남대학교 기계공학부

**영남대학교 대학원 기계공학과

에서 장기사용에 의해 열화된 경우, 이에 따른 부식거동에 대해 평가하여야 할 필요성을 느낀다. 아울러 부식과 관련된 연구들은 주로 응력부식⁽⁵⁻⁷⁾ 및 부식피로^(8,9) 등에 관한 많은 연구가 있고, 전기화학적 방법에 의한 부식평가^(10,11)에 대한 연구결과들은 보고되고 있지만 주로 Al 및 스테인레스강에 대한 것이 주종을 이룬다. 아울러 전기화학적 분극 (electrochemical polarization) 시험은 부식거동 및 부식물에 관한 여러 가지 데이터를 얻을 수 있는 새로운 기법 중의 하나로 최근 각광을 받고 있다.

따라서 증기발생기 (steam generation)에서 발생되는 증기에 의해 고온의 습한 분위기 하에서 사용하게 되는 터빈 축 및 로터디스크재인 Ni-Cr-Mo-V강이 재질열화를 동반한 내식성의 저하에 따라 부식 피트발생 등을 일으킬 것으로 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 전기화학적 분극시험시 터빈부의 운전조건을 감안하여, 기본 수용액을 3차 증류수로 하고, H₂SO₄ 및 NaOH로 pH를 변화시켜 가며 Ni-Cr-Mo-V강의 건전재 및 모의열화재에 대한 부식거동 및 내식특성을 규명하여 보았다.

2. 모의열화재 제작

일반적으로 재료는 장기사용으로 재질열화현상이 생기게 되며, 열화와 더불어 재료강도특성 및 내식성에 상당한 변화가 있을 것으로 기대된다.

따라서 전기화학적 방법에 의한 터빈 축 및 로터디스크 재의 내식특성을 정도있게 평가하기 위해서는, 재질열화와 더불어 내식특성의 변화거동을 파

악하는 것이 필요하다. 이 경우 장기사용되어 열화된 재료가 요구되지만 이 방법은 많은 시간과 어려움이 뒤따르게 된다.

따라서 현장의 가동온도에서 장시간사용에 따른 재질의 열화현상을 단시간에 실험실에서 모의하기 위한 방법으로 실제 사용온도보다 다소 높은 온도에서 가속실험방법이 제안되고 있다. 이 방법은 단시간에 여러 단계의 열화를 모의할 수 있다는 장점이 있으므로 각광을 받고 있다.

재질의 열화 현상을 실험실에서 모의 제작하는 방법으로는 등온취화처리법, 다단계 냉각 (step cooling) 법, 저속냉각 (slow cooling) 법이 이용되고 있다. 이중 등온취화처리법은 장시간동안 인성의 변화를 정량적으로 관찰하여야 하며, 다단계냉각법은 Fig. 1의 (a)와 같이 300~600°C 취화 온도 영역에서 단계적으로 냉각하는 것으로써 재질의 특성에 따라 온도 및 시간을 다양하게 조합시킬 수 있다. 또한 Fig. 1의 (b)와 같이 냉각속도를 조정함으로써 열화도중단계의 시료를 제작하는 저속냉각법이 있다.

특히, Murakami, Sawda 등은 다단계냉각 및 저속냉각법에 의해 가속열처리한 시료를 auger electron spectroscopy에서 관찰한 결과, 장기사용에 의한 열화와 유사한 특성을 가진다는 보고^(12,13)도 있었다.

따라서, 본 연구에서는 다단계냉각방법 및 저속냉각방법을 이용하여 열화재를 제작하여 본 실험에 사용하였다. 즉, 터빈 축 및 로터디스크재인 Ni-Cr-Mo-V강은 실제 사용되기 전의 재료이기 때문에 이를 건전재 (original material)라 하고, 모의열화시킨 재료에 대해선 모의열화재 (simulatedegrad-

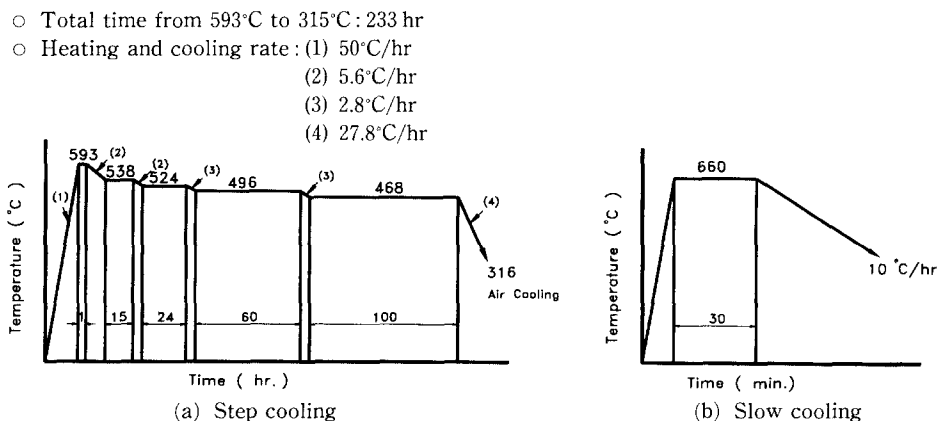


Fig. 1 Schematic diagram for degradation simulation

ed material)라 정의하였는데, 모의열화의 방법에 따라서도 다단계냉각법에 의해 제작된 재료는 다단계냉각재 (step cooled material), 저속냉각법에 의해 10°C/hr로 노냉하여 제작된 재료는 저속냉각재 10°C/hr (slow cooled material (10°C/hr))라 정의하였다.

이와 같이 제작된 건전재 및 모의열화재들을 사용하여 Charyp 충격시험을 수행한 결과 건전재의 경우 파면전이온도 FATT는 약 -153°C에 위치하고, 저속냉각재는 약 -35°C 및 다단계냉각재는 약 -18°C 근처로서, 모의열화방법에 의해 열화가 되었음이 입증되었다.

3. 시험편 및 시험방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 원자력 발전 설비의 터빈 축 및 로터디스크용 재료인 Ni-Cr-Mo-V 강 (ASTM A471)으로서, 화학적 성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 2에 나타내었다.

전기화학적 분극시험에 사용된 시험편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 13×13×3 mm의 크기로 다이아몬드 휠-커터 (wheel-cutter)로 가공경화 및 열응력 등의 영향을 배제하기 위해 저속으로 절단하였다. 그 후 시험편에 전선을 연결시키고, 호마이카로 마운팅 (mounting) 하였다. 이와 같이 제작된 시험편의 표면을 #400에서 #1500까지의 에머리-페이퍼 (emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마한 후 시험편의 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여, 연마기에서 산화알루미늄 (Al₂O₃) 분말을 이용하여 시험편 표면을 마무리 연마를 하였다. 그 후 시험편 표면을 아세톤 (acetone)으로 탈지하고, 증류수로 세척한 후 열풍으로 건조시켰다.

최종적으로 시험편과 호마이커 사이의 틈방지 및 일정한 시험편의 표면적 (1 cm²)을 얻기위하여 래커 (lacquer)를 이용하여 2차 피복을 하여 본 실험에 임하였다.

3.2 전기화학 분극시험방법

실험에 사용된 수용액은 증기발생기에서 발생하는 고온 고압의 증기에 의해 구동되는 터빈부는 운전조건이 습증기 분위기이기때문에 기본 수용액을 3차 증류수로 정하고, H₂SO₄ 및 NaOH를 첨가하여 산 및 알칼리성의 넓은 pH 환경에서 부식특성

Table 1 Chemical composition of Ni-Cr-Mo-V steel

Composition, wt. %								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.27	0.2	0.4	0.01	0.008	3.5	1.4	0.4	0.09

Table 2 Mechanical properties for Ni-Cr-Mo-V steel

Tensile strength	Yield strength	Elongation
835 MPa	533 MPa	18 %

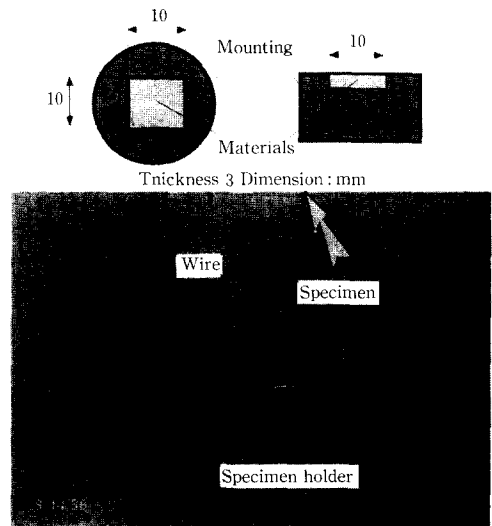


Fig. 2 Specimen on electrode holder

을 파악하기 위해서 pH를 3, 6, 9 및 12로 한 4가지 수용액을 만들고, 실온에서 ASTM G5-87⁽¹⁴⁾에 의거하여 전기화학적 분극시험을 수행하였다. 또한, 수용액은 대기와 접촉시켰고, 용액의 교반은 행하지 않았다.

Fig. 3은 전기화학 분극시험에 사용된 장치로서, E. G. & G. Princeton Applied Research (PAR)의 Potentiostat/Galvanostat (Model 273A)이고, 이 장치는 PAR Model 352 software에 의해 조정되도록 되어 있다.

기준전극 (reference electrode)은 포화 칼로멜전극 (Saturated Calomel Electrode ; SCE)을 사용하였다. 그리고 초기전위 (initial potential) 및 순환되는 최고전위 (vertex potential)는 예비실험에서 각

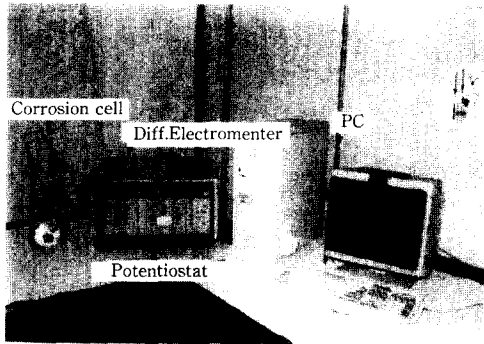


Fig. 3 Equipments for electrochemical polarization test

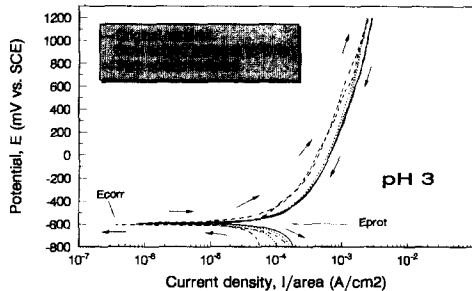


Fig. 4 Cyclic polarization behaviors for original, slow cooled (10°C/hr) and step cooled specimens in the condition of pH 3

각의 수용액조건에서 부식거동이 잘 나타나는 -800 mV 및 -500 그리고 1000 , 1200 및 1400 mV로 하고 주사속도(scan rate)는 0.5 mV/s로 순환분극(cyclic polarization)을 시켰다. 이들 전기화학 분극시험은 여러 차례의 예비실험을 수행하여 재현성을 검토하였다.

4. 전기화학적 순환분극특성

4.1 pH 3에서의 거동

건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대해 3차 증류수에 H_2SO_4 를 첨가하여 pH 3으로 조정된 수용액 내에서 초기전위 -800 mV, 최고전위 $1,200$ mV 및 주사속도 0.5 mV/s로 순환분극시험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그래프에서 PAR Model 352 software에 의해 부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(I_{corr}) 및 방식전위(E_{prot})를 계산할 수 있다.

그 결과 부식전위, E_{corr} 의 값은 건전재의 경우 -602.8 mV, 저속냉각재(10°C/hr)는 -589.1 mV

및 다단계냉각재는 -585.5 mV로 나타났다. 그리고 이때 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 부식전류밀도, I_{corr} 은 61.25 , 92.50 및 $135.8 \mu\text{A/cm}^2$ 로 나타났다. 여기서, 부식률과 직접적인 관계가 되는 I_{corr} 의 값은 열화정도에 따라 anode 방향으로 이동해 감을 알 수 있다.

또한, 세 재료 모두 부동태 영역(passivation region)의 존재없이 계속 전류가 상승되는 것을 알 수 있고, 이것은 강한 산성분위기 하에서 미처 부동태 피막의 형성없이 바로 금속이 용액에 용해되어 버림을 알 수 있으며, 그래프에서 히스테리시스 루프(hysteresis loop)가 형성되어 있지 않은 것으로 보아 공식(pitting)의 영향은 미미함을 알 수 있다.

Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)는 각각 pH 3에서 분극시험 후의 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재 시험편 표면을 광학현미경에서 50배로 관찰한 사진을 나타낸 것으로써 공식의 현상은 거의 찾아 볼 수 없고, 시험편 전체가 심하게 부식되어 진한 회색의 산화물이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 열화정도에 따라 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재 순으로 점점 부식 정도가 심하게 나타남을 알 수 있다.

그리고 Fig. 4에서 완전한 히스테리시스 루프는 형성되지 않았지만, 공식이 완전방지되는 방식전위(Protection potential), E_{prot} 는 작은 차이이지만 각 재료의 E_{corr} 보다 약간 active한 범위에 존재함을 알 수 있었다. 이것은 어느 정도 공식의 가능성도 있으나, 그 이전에 이미 급격히 용해되어 버리기 때문에 그 영향은 아주 미미했을 것으로 사료된다. 이때 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 E_{prot} 의 값은 -595 , -600 및 -600 mV로서 역시 열화재들이 건전재보다도 약간 낮은 범위에 존재하는 것으로 나타났다.

4.2 pH 6에서의 거동

Fig. 6은 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대해 pH 6의 환경에서 초기전위 -500 mV, 최고전위 1400 mV 및 주사속도 0.5 mV/s로 순환분극시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 E_{corr} 의 값은 각각 -117.1 , -131.6 및 -121.7 mV로 나타났고, I_{corr} 은 0.176 , 0.188 및 $0.197 \mu\text{A/cm}^2$ 로 나타났으며, 부동태영역은 존



(a) Original material



(b) Slow cooled material (10°C/hr)



(c) Step cooled material

Fig. 5 Photographs showing specimen surfaces after electrochemical polarization test in the condition of pH 3 ($\times 50$)

재하지 않았다. 그러나 히스테리시스 루프를 형성하고 있음을 알 수 있다. 따라서 공식의 발생이 있음을 추정할 수 있다.

그리고 이때의 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재의 Eprot는 -480, -500 및 -527 mV로서 각 재료에 대해 다소의 차이가 나타났다. 이처럼 방식전위, Eprot가 부식전위, Ecorr 값보다 상당히 낮은 범위에 존재하는 것으로 나타났는데, 이 현상은 재료가 pH 6에서는 공식의 발생 가능성이 높다는 것은 의미하며, 만약 시험편에 이미 공

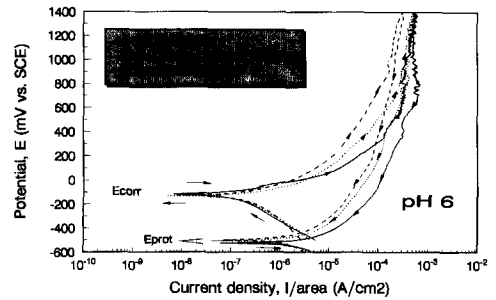


Fig. 6 Cyclic polarization behaviors for original, slow cooled (10°C/hr) and step cooled specimens in the condition of pH 6

식이 발생해 있다면 부식전위 이하에서도 공식은 진행될 수 있다는 것을 의미한다.

또한, 여기서 모의열화시킨 재료들이 건전재에 비해 방식전위가 다소 active한 위치에 있는 것으로 보아 열화재가 공식에 더 민감함을 알 수 있다. 특히, 열화재 중에서도 열화도가 가장 심한 다단계냉각재의 경우가 더욱 공식에 민감함을 알 수 있다. 이 현상은 실험후 육안으로도 쉽게 판별할 수 있었으며, Fig. 7은 pH 6에서 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재의 분극시험 후의 시험편 표면을 광학현미경에서 관찰한 사진으로서, 이 사진에서도 열화의 정도에 따라 공식의 발생은 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재로 갈수록 점점 심해져 감을 알 수 있다.

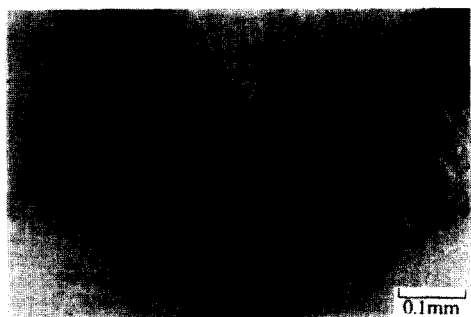
또한, Fig. 6에서 히스테리시스 루프의 형성에도 불구하고 공식에 의해 부동태가 파괴되는 공식전위 (pitting potential)도 나타나지 않았다는 것은 또 다른 거동이 존재함을 시사한다. 열화재의 경우 특히, 다단계냉각재의 경우 전위가 noble 쪽으로 갈수록 약 600 mV 이상부터 노이즈(noise)현상이 나타났는데, 이것은 Fig. 8(b)의 현미경 사진을 보면 알 수 있듯이 다단계냉각재에서 시험편과 호마이커 사이의 틈을 방지하기 위해 피복한 래커와 시험편 사이에서 틈새부식의 현상이 나타남을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8(a) 건전재의 경우는 그 정도가 미약함을 알 수 있다.

4.3 pH 9에서의 거동

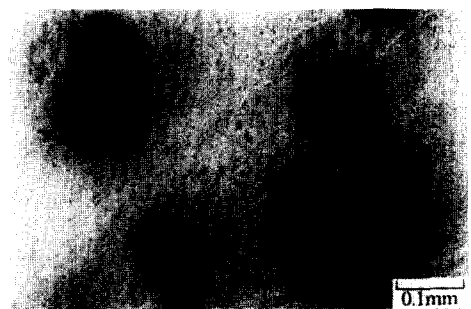
Fig. 9는 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대해 3차 증류수를 NaOH를 첨가하여 pH 9의 환경에서 초기전위 -500 mV, 최고전위 1000 mV 및 주사속도 0.5 mV/s로 순환분극시험을



(a) Original material



(b) Slow cooled material (10°C/hr)

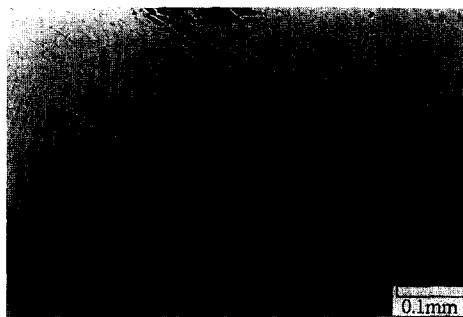


(c) Step cooled material

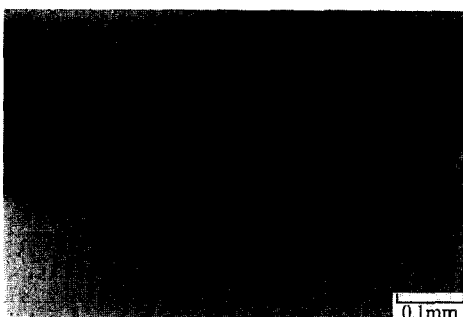
Fig. 7 Photographs showing specimen surfaces after electrochemical polarization test in the condition of pH 6 ($\times 50$)

수행한 결과를 나타낸 것이다. 이 곡선에서 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 E_{corr} 의 값은 -254.7 , -236.0 및 -244.9 mV로 나타났고, I_{corr} 은 각각 0.132 , 0.177 및 0.196 $\mu A/cm^2$ 로 나타났다.

그리고 active-passive 전위가 존재하지 않는 임의부동태(spontaneous passivity) 영역⁽¹⁰⁾이 나타났으며, 히스테리시스 루프도 형성되어 있다. 따라서 공식에 의해 부동태가 파괴되는 전위인 E_{pit} 는 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재의 경



(a) Original material



(b) Step cooled material

Fig. 8 Photographs showing the interface between the specimen and lacquer after electrochemical polarization test in the condition of pH 6 ($\times 50$)

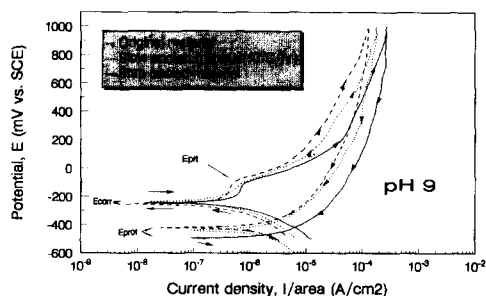


Fig. 9 Cyclic polarization behaviors for original, slow cooled (10°C/hr) and step cooled specimens in the condition of pH 9

우 각각 -88.77 , -90.73 및 -112.3 mV로 나타났다. 이 결과로 건전재, 저속냉각재(10°C/hr), 다단계냉각재로 갈수록 공식전위가 낮아짐으로 재질 열화에 따라 그만큼 공식의 시작은 빨라진다고 할 수 있다.

방식전위, E_{prot} 는 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재의 경우 각각 -420 , -441 및

-495 mV로서 역시 열화의 정도에 따라 방식전위의 값이 더 active한 위치에 놓임을 알 수 있다. 그리고 pH 6의 방식전위 값에 비해 각각의 재료들이 다소 noble한 쪽에 있는 것으로 보아 pH 6의 환경에서보다는 공식의 민감성이 다소 낮을 것으로 사료된다.

이와 같은 결과는 Fig. 10의 광학현미경 사진에서도 확인할 수 있는데, 이 사진은 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대해 분극시험을 수행한 후의 시험편 표면을 광학현미경에서 관찰한 사진으로서, 열화 정도에 따라 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재의 순으로 갈수록 공식의 크기 및 정도가 심해져 감을 알 수 있다.

3.4 pH 12에서의 거동

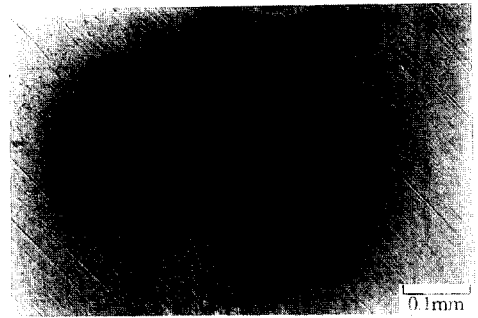
Fig. 11은 pH 12의 환경에서 초기전위 -500 mV, 최고전위 1000 mV 및 주사속도 0.5 mV/s로 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 순환분극시험 결과의 곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선에서 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재의 E_{corr} 은 -211.6, -412.7 및 -417.4 mV로 나타났고, I_{corr} 은 0.209, 0.569 및 $1.476 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 나타났다. 또한, 임의 부동태영역은 pH 9의 값과보다 다소 넓은 범위의 전위에 걸쳐 형성되어 있었다. 그리고 히스테리시스 루프는 형성되어 있지 않음으로 공식은 발생되지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 12는 pH 12에서 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대해 분극시험 후의 시험편 표면을 광학현미경에서 촬영한 사진으로서 공식의 발생은 없음을 확인할 수 있다. 그리고 부식의 경향은 시험편 전체가 균일하게 부식되는 균일 부식의 형태를 띠을 알 수 있다. 부식의 정도는 건전재에 비해 열화재들이 다소 심함을 알 수 있고, 그 정도는 다단계냉각재가 가장 심함을 알 수 있다.

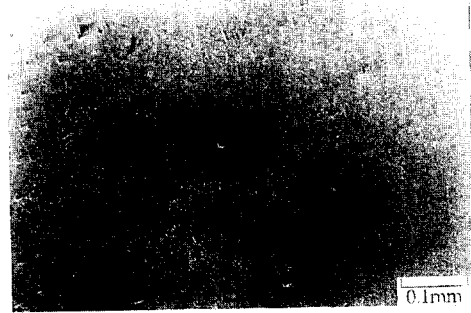
또한, pH 12의 조건에서는 임의 부동태영역이 pH 9보다는 다소 넓은 범위에 걸쳐 형성되어 있지만, I_{corr} 의 수치의 비교로서 오히려 강 알카리성으로 갈수록 부식물은 더 심해질 것으로 사료된다.

5. 내식성 평가

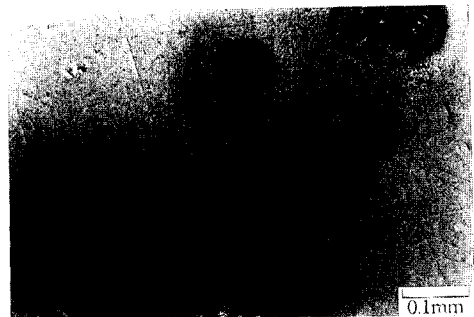
이상과 같이 증류수를 기본 수용액으로 하여 pH를 3, 6, 9 및 12로 변화시켜가며 전기화학 분극시험을 수행한 후 부식전류에 의한 연간 부식물⁽¹⁵⁾은



(a) Original material



(b) Slow cooled material (10°C/hr)



(c) Step cooled material

Fig. 10 Photographs showing specimen surfaces after electrochemical polarization test in the condition of pH 9 ($\times 50$)

식 (1)에 따라 계산할 수 있다.

$$\text{Corrosion rate (mmpy)} = \frac{0.0033 \times I_{corr} \times EW}{d} \quad (1)$$

여기서, I_{corr} = 부식 전류밀도 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), EW = 재료의 당량(g), d = 재료의 밀도 (g/cm^3) 및 0.0033 = 단위의 환산 factor이다. 또한 여기서, Ni-Cr-Mo V강의 당량은 주어진 합금에 있어서 주 합금의 원소에 대한 분자량/전기화학반응에 관계되는

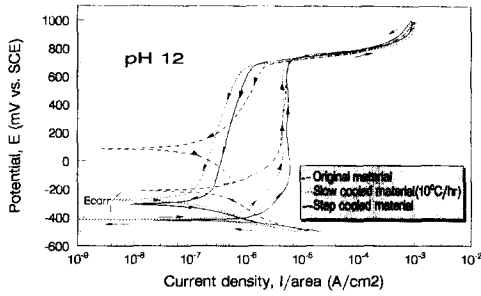


Fig. 11 Cyclic polarization behaviors for original, slow cooled (10°C/hr) and step cooled specimens in the condition of pH 12

전자수에 대한 평균이다. 즉, 당량수 (equivalent number), N_{EQ} 의 총계를 결정하는데 모든 합금원소의 당량수의 합으로서, 이것은 합금의 용융되는 단위질량과 관계된다. 즉, 다음과 같은 식 (2)⁽¹⁵⁾으로 표현될 수 있다.

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{f_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right) \quad (2)$$

여기서 f_i , n_i 및 a_i 는 합금요소의 질량분율 (mass fraction), 전자변화 및 원자량이다. 당량 EW 는 N_{EQ} 의 역수가 됨으로 당량, $EW = N_{EQ}^{-1}$ 이다. 또한, 밀도는 Table 1에서 전체 화학성분에 대한 원소의 평균 밀도를 채택하였다.

Table 3은 pH 3, 6, 9 및 12로 변화시킴에 따라 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 연간 부식률의 계산결과 및 순환분극시험 결과 얻은 E_{corr} 및 I_{corr} 값을 나타내었다.

이와 같이 계산된 각 수용액조건에 따른 연간 부식률을 가지적인 막대그래프로 나타낸 것이 Fig. 13이다. 여기서, 건전재의 경우 pH 3에서 연간 0.834 mm였고, pH 6인 경우는 0.0024 mm, pH 9의 경우는 0.0018 mm 그리고 pH 12에서는 0.0028 mm의 부식률을 나타냈다. 즉, Ni-Cr-Mo-V강의 내식성은 pH 9, 6, 12 및 3의 순으로 갈수록 저하되는 것으로 나타났다. 그리고 저속냉각재 (10°C/hr) 다단계냉각재의 경우도 동일한 경향으로 나타났다.

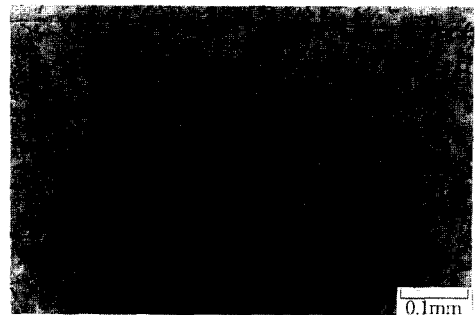
동일 pH 조건에서는 열화정도에 따라 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재로 갈수록 연간 부식률이 커져 감으로, 열화가 가장 심하게 나타나는 다단계냉각재가 가장 내식성이 떨어짐을 알 수 있다.



(a) Original material



(b) Slow cooled material (10°C/hr)



(c) Step cooled material

Fig. 12 Photographs showing specimen surfaces after electrochemical polarization test in the condition of pH 12 (×50)

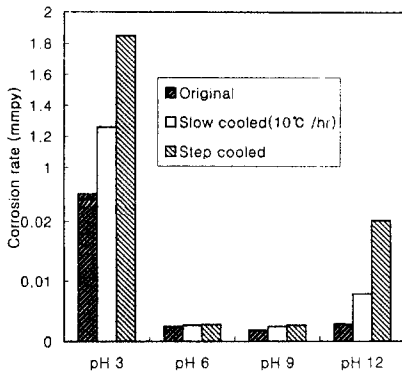
4. 결 론

이상과 같이 기본 수용액을 3차 증류수로 하고, pH를 3, 6, 9 및 12로 변화시킨 수용액조건에서 전기화학적 방법에 의해 Ni-Cr-Mo-V강의 건전재, 저속냉각재 (10°C/hr) 및 다단계냉각재에 대한 순환분극시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 건전재 및 열화재 모두 pH 3 및 12에서의

Table 3 Results of corrosion analysis for Ni-Cr-Mo-V steel

Potential hydrogen	Materials	Ecorr (mV)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosion rate (mmpy)
pH 3	Original	-602.8	61.25	0.834
	Slow cooling (10°C/hr)	-589.1	92.50	1.259
	Step cooling	-585.5	135.8	1.849
pH 6	Original	-117.1	0.176	0.0024
	Slow cooling (10°C/hr)	-131.6	0.188	0.0026
	Step cooling	-121.7	0.197	0.0027
pH 9	Original	-254.7	0.132	0.0018
	Slow cooling (10°C/hr)	-236.0	0.177	0.0024
	Step cooling	-244.9	0.196	0.0026
pH 12	Original	-211.6	0.209	0.0028
	Slow cooling (10°C/hr)	-412.7	0.569	0.0078
	Step cooling	-417.4	1.476	0.0201

**Fig. 13** Corrosion rates for original, slow cooled (10°C/hr) and step cooled specimens

부식거동은 균일 부식의 형태로 나타났으며, 그 정도는 pH 3의 경우가 더 심하게 나타났다. 그리고 pH 6 및 9에서의 부식거동은 공식의 형태로 나타났으며, 그 정도는 pH 6의 경우가 더 심한 것으로 나타났다. 더욱이 pH 6의 환경에서는 틈새부식의 경향도 동시에 나타남을 알 수 있었다.

(2) 동일환경에서 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재로 열화가 심해질수록 균일 부식 정도가 심해져 감을 알 수 있었다. 또한 열화의 정도에 따른 공식에 대한 민감성도 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재 순으로 점점 높아져

감을 알 수 있었다.

(3) 분극시험 결과로부터 연간부식률 계산을 해 본 결과 pH 3, 즉 강산성에서 내식성이 가장 저하되며, 그 다음이 pH 12, 6 및 9의 순으로 저하되어 가는 것을 알 수 있다. 아울러, 동일환경에서 열화도에 따른 내식성은 건전재, 저속냉각재(10°C/hr) 및 다단계냉각재 순으로 열화정도가 심해짐에 따라 저하되어 감을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Syrett, B. C., Wiswanathan, R., Wing, S. S. and Witting, J. E., 1982, "Effect of Microstructure on Pitting and Corrosion Fatigue of 17-4pH Turbine Blade Steel in Chloride Environments," *EPRI Special Report RD-2284-SR*, pp. 2-1~2-7.
- (2) *ASTM A471*, 1992, "Standard Specification for Vacuum-Treated Alloy Steel Forging for

- Turbine Rotor Disks and Whells,” pp. 281~285.
- (3) 金宇哲, 金辰外 5人, 1982, “蒸氣發生器, 터빈, 復水器의 性能監視 및 缺陷診斷研究,” 韓國에너지研究所, pp. 78~105.
- (4) Lyle, Jr F. F. and Prager, M., 1982, “Stress Corrosion Characterization of Turbine Rotor Materials,” *EPRI Research Project 1925-5*, Phase I.
- (5) Sprowls, D. O. and Summerson T. J., et al., 1976, “Evaluation of a Proposed Standard Method of Testing for Susceptibility to Stress Corrosion Cracking of High-Strength 7xxx Series Al Alloy Products,” *Stress Corrosion-New Approaches, ASTM STP 610*, pp. 3~31.
- (6) Beck, F. H., Juppenlatz, J. and Wieser, P. F., 1976, “Effects of Ferrite and Sensitization on Intergranular and Stress-Corrosion Behavior of Cast Stainless Steels,” *Stress Corrosion-New Approaches, ASTM STP 610*, pp. 381~398.
- (7) 內田仁, 吉田勝修, 1985, “SUS 304鋼 單結晶의 應力腐食龜裂に及ぼす 引張軸 方位 影響,” 材料, 第35卷, 第388號, pp. 7~12.
- (8) Imam, M. A., Fraker, A. C. and Gilmore, C. M., 1979, “Corrosion Fatigue of 316L Stainless Steel, Co-Cr-Mo Alloy, and ELI Ti-6Al-4V,” *Corrosion and Degradation of Implant Materials, ASTM STP 684*, pp. 128~143.
- (9) 長容川, 岡章三, 清重正典, 1992, “溶解法の異なる 高强度 ステンレス鋼における 腐食疲労強度 特性,” 材料, 第41卷, 第468號, pp. 1331~1336.
- (10) Pawlick, L. A. and Kelly, R. G., 1995 “An Electrochemical Investigation of the Corrosion Behavior of Aluminum Alloy AA5052 in Methanolic Solutions,” *Journal of Corrosion Science and Engineering*, Vo. 1, Paper 4, pp. 1~7.
- (11) Yoshil Tanaka, 1993, “Corrosion of Austenitic Stainless Steel in Phosphoric Acid Environments,” *JSMS*, Vol. 42, No. 479, pp. 923~929.
- (12) 村上賀國, 1983, 壓力容器用Cr-Mo鋼の燒屯脆性に關する研究. pp. 8~42.
- (13) Susumu Sawada, Tateo Ohhashi, Masamichi Okamoto and Juro Watanabe, 1978, “Temper Embrittlement Characteristics of $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo Steel Used in Hydrogenation units for 30, 000 and 60, 000 Hours at 660 to 840°F,” *ASME/MPC*, pp. 167~186.
- (14) *ASTM G5-87*, 1987, “Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements,” pp. 79~85.
- (15) Denny A. Jones, 1992, Principles and Prevention of Corrosion, pp. 74~79.