

## 전기화학적 방법을 이용한 약염기 분위기에서 저합금강의 유체가속부식(FAC) 현상 연구

김 준 환 · 김 인 섭 · 정 한 섭\*

한국과학기술원 원자력, 양자공학과, 한국전력공사 전력연구원\*

### Flow Accelerated Corrosion of Low Alloy Steel in Weak Alkaline Solution characterized by Electrochemical Method

J. H. Kim, I. S. Kim and H. S. Chung\*

Dept. of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Republic of Korea

\*Korea Electric Power Research Institute, Yuseong, Daejeon 305-380, Republic of Korea

Flow-Accelerated Corrosion behavior concerning both activation and mass transfer process of low alloy steel was studied using rotating cylinder electrode in mild alkaline solution by DC and AC electrochemical techniques at ambient temperature. Passive film was formed from pH 9.8 by step oxidation of ferrous product into hydroxyl compound. Corrosion potential shifted slightly upward with rotating velocity by the diffusion mechanism of cathodic species. Corrosion current density increased with rotating velocity in neutral solution. Meanwhile, limiting current increased with rotating speed irrespective of pH values. It seems that activation process, which represents formation of passive film on the bare metal surface, controls the entire corrosion kinetics in this study.

*Keywords : Flow-Accelerated Corrosion, Low Alloy Steel, Alkaline Solution, Activation, Mass Transfer*

#### 1. 서 론

유체가속부식(Flow-Accelerated Corrosion, 이하 FAC)현상은 1986년 가압경수로인 미국 Surry 발전소의 응축기 계통의 파단 사고 이후 주목받기 시작했으며 1996년 Canada의 Point Lepreau 발전소의 자관(feeder) 파단 사고를 통하여 가압 중수로의 FAC 현상이 매우 시급함이 보고되었다.<sup>1)</sup> FAC는 초기에 산화 보호피막이 형성된 탄소강과 저합금강이 유체에 노출되면서 보호피막 표면의 철 이

온이 농도의 차이에 따른 물질전달(mass transfer) 반응에 의하여 사라지게 되어 정지상태(stagnant condition)보다 부식상태가 가속되는 현상을 일컫는다. 결국 부식에 의한 피막 생성 반응과 유체에 의한 피막 제거 반응이 같은 속도로 일어나게 되면 그 결과 배관두께가 연속적으로 감소하게 되어 최종단계에 설계 임계두께에 이르면 배관은 파단된다.

본 연구의 목적은 이러한 FAC 현상을 구성하는 인자인 철 이온의 활성화 반응과 유체에 의한 물질 전달 반응의 유속에 대한 민감도를 평가하기 위해

가압중수로 1차 수화학 환경 하에서 직류와 교류 전기화학적 방법을 이용하여 각 과정에 대한 부식 과정을 분석하는데 있다. 최근 전기화학기술의 발전으로 부식속도 및 표면반응을 이해하는 주요 수단으로 전기화학적 방법을 많이 사용하고 있으며 금속-수용액 계면 반응의 특성을 이용하여 여러 가지 측정법이 발전되어 왔고 비교적 높은 정확도로 실시간 부식현상을 재현성 있게 측정하는 방법으로 각광 받고 있다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 환경

모사된 CANDU 수화학 조건 하에서의 정적인 환경에서의 부식거동을 관찰하기 위해 EG & G 362 model potentiostat과 3전극 시스템을 이용하여 분극실험을 수행하였다. 수화학 환경은 증류수에 1 M LiOH를 단계별로 적정하는 방법으로 pH 6.96, 9.84, 10.6, 11.83으로 실험하였다. 용존산소 조건은 대기중 산소 포화 조건과 용액에 질소를 불어넣어 산소를 제거한 조건을 각각 이용하였다. 기준전극(reference electrode)은 포화 카로멜 전극을 사용하였고 상대전극(auxiliary electrode)은 탄소막대를 사용하였으며 주사속도(scan rate)는 초당 0.5 mV이었다. 일전극(working electrode)은 원전 주증기 배관재로 사용 중인 SA106 Gr.C강이며 CANDU 발전소의 자관의 재질인 SA106 Gr.B강과 유사한 화학조성과 미세구조를 갖는다.

### 2.2 전기화학적 방법

부식전위 근처에서의 전극표면의 전하교환반응에 의거한 부식전류밀도를 측정하기 위하여 혼합전위 이론(mixed potential theory)에 의한 부식전위 근처의 산화, 환원반응의 교점을 구하는 Tafel 외삽법과 부식전위에서의 순간 전하교환 속도를 구하는 Stern-Geary 방법(선형분극법)을 택하였으며 부식계의 물질전달 반응을 측정하기 위하여 한계전류밀도(limiting current density)를 측정하는 방법을 택하였다. 전극과 수용액간의 전위가 충분히 높아 전극이 이온화 되기에 충분한 활성화 에너지를 얻을 수 있는 경우 전체 부식반응은 전극 표면에 형성된

이온이 농도 차에 의하여 확산되는 속도에 의하여 좌우되며 이를 한계전류밀도라 일컫는다. cathodic overpotential  $\eta_c$ 에 대한 한계전류밀도  $i_L$ 의 지배방정식은 아래의 식과 같으며 각각의 곡선에 대하여 log-scale로 곡선 근사하여 이의 점근선을 구한 값을 한계전류밀도로 정한다.

$$\eta_c = 2.3 \frac{RT}{zF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

구한 분극곡선을 바탕으로 특정 수화학 조건에서의 보호피막 형성기구를 관찰하기 위해 몇몇 선택된 전위에서 전기화학적 임피던스를 측정하였다. 임피던스는 1MHz에서부터 100 $\mu$  Hz까지 순차적으로 주파수를 낮추면서 측정하였으며 각각의 교류진폭은 약 0.2mV로서 인가전압과 응답전류간에 선형성(linearity)을 유도하였다. 실험장비 및 조건은 앞 절의 분극곡선 측정법과 동일하였다.

### 2.3 Rotating Cylinder Electrode

유속에 대한 부식속도의 민감성을 평가하기 위해 Rotating Cylinder Electrode (이하 RCE)를 제작하였다. RCE는 부식 cell 안에서 원통 전극을 일정한 속도로 회전시켜서 회전에 의하여 유도되는 유동에 의한 금속재료의 부식 현상을 측정하는 장치로 최근 FAC 현상을 관찰하는 간편한 방법으로 응용되고 있는 방법이다.<sup>2)</sup> 부식 cell에 원통형 일전극을 가공하여 motor에 연결된 회전막대에 부착하였고 스프링을 이용한 bridge를 가공하여 이를 회전 중인 시편에 접촉시켜 이를 통해 전위를 인가하였다. 일전극의 면적은 4.71 cm<sup>2</sup>이고 지름은 30 mm로서 회전속도가 3000 rpm일때 전극표면의 속도는 4.8 m/sec를 갖는다. 실험 전 시편의 표면을 1 $\mu$ m까지 연마하여 농도경계층(concentration boundary layer)에 영향을 미칠 표면의 거칠기 효과를 제거하였으며 실험 전 -1,000mV으로 30분간 음극전위를 인가하여 시편 장착도중 형성된 산화막을 제거하였다. 부식전위는 동적 분극 곡선에서 산화 전류 밀도와 환원 전류 밀도의 절대값이 같아지는 지점에서 전위를 측정하였고 부식전류는 부식전위 근처에서 선형분극 방법을 이용하여 측정하였으며 한계전류밀도는 각각의 조건에 대하여 앞 절과 동일한 방

Table 1. Experimental conditions

	Static (0rpm)				Rotating (1000-3000rpm)			
	O.S.		D.A.		O.S.		D.A.	
	N	Alk	N	Alk	N	Alk	N	Alk
D.C.	P	P	P,T,S,L	P,T,S,L	P	P	P,T,S,L	P,T,S,L
A.C.	EIS		EIS	EIS				

O.S : Oxygen Saturated, D.A. : De-Aerated,  
 N : Neutral, Alk : Alkaline solution  
 P : Polarization curve, T : Tafel extrapolation,  
 S : Stern-Geary, L : Limiting current  
 EIS : Electrochemical Impedance Spectroscopy

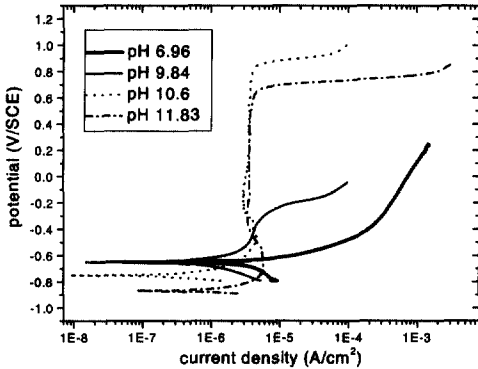


Fig. 1. Electrochemical results of SA106 Gr.C steel in static condition

법으로 측정하였다. Table 1에 각 실험에 사용된 조건을 실었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 pH에 따른 배관재의 부식거동

Fig. 1은 탈기된 분위기에서 유속이 없는 상태의 pH에 따른 배관재의 부식실험 결과이다. 부식전위는 pH가 증가할수록 34mV/pH의 기울기로 감소하는 Nernstian 거동을 보이고 있다. 중성상태에서는 전위가 증가할수록 용해반응이 진행된다가 pH 9.84에서 10.4까지는 불완전하게 피막이 형성되었다. pH가 10.4에서 증가할수록 보호피막의 형성이 발달하였으며 형성된 보호피막도 그 구조가 매우 안정함이 평균 피막 투과 전류밀도를 통하여 관찰되었다.

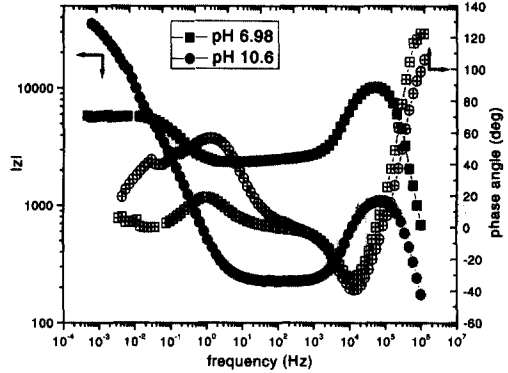


Fig. 2. Bode plot of low alloy steel in alkaline solution

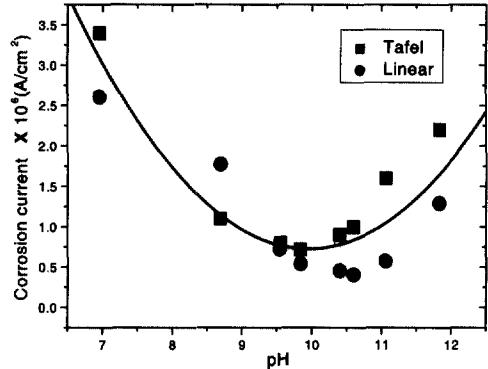


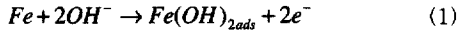
Fig. 3. Results of Tafel and linear polarization with pH difference in static condition

Fig. 2는 pH에 따른 정상상태 (open circuit potential)의 전기화학적 임피던스 값이다. 고주파와 중간 주파수 영역에서 각각 pseudo-capacitance와 inductance 거동을 보이다가 pH 6.98은 0.19Hz 이하, pH 10.6은 1.38Hz 이하부터 전극표면에서의 전자이동에 근간을 둔 활성화 반응이 나타남을 관찰하였다.

Fig. 3은 pH에 따른 Tafel 외삽법과 선형분극법을 이용한 배관재의 부식전류밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 Tafel 외삽법과 선형분극법 공히 같은 경향성을 보이고 있음이 확인되었고 local minima인 pH 10.4 이상부터는 정상상태의 부식전류밀도가 높아짐을 관찰하였다. 이는 수산화 이온의 양이 증가할수록 정상상태(steady state)에 철 표면 에 교환되는 산화전류와 환원전류의 절대값이 커져

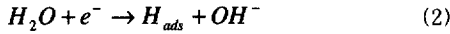
서 그 결과 부식전류의 값이 커지는 alkaline corrosion의 경향이 발생하는 것으로 보여진다. 일반적으로 alkaline corrosion인 경우, 다음 식에 의하여 지배된다.<sup>3,4)</sup>

Anodic Reaction :



$$i_a = 2k_a F [OH^-]^\alpha \exp\left(\frac{FE}{RT}\right)$$

Cathodic Reaction :



$$i_c = -k_c F [H_2O] \exp\left(-\frac{FE}{2RT}\right)$$

위의 반쪽반응이 부식전위 하에서 전하보존의 법칙에 따른다고 가정할 경우, 부식전위와 부식전류는 다음과 같은 식으로 도출된다.<sup>4)</sup>

$$E_{corr} = \frac{4.6RT}{3F} \left( \log \frac{k_c}{k_a} - \log \frac{[H_2O]}{[OH^-]^\alpha} \right) \quad (3)$$

$$i_{corr} = 2k_a F \left( \frac{k_c}{k_a} \right)^{0.67} [H_2O]^{0.67} [OH^-]^{0.33\alpha} \quad (4)$$

$\alpha$  값은 산화반응의 세기 및 형성된 산화막의 전극 표면의 coverage에 따른 전하 투과도의 변화에 좌우되는 계수로서 강염기 수용액인 경우 일반적으로 1.5에서 2의 값을 가진다.<sup>3)</sup> 본 연구에서 pH에 대한 전위의 변화량으로 측정된  $\alpha$  값은 약 1.16으로 이는 Fig. 3에서 구한 약염기성 영역에서의 pH에 대한 부식전류의 증가분 0.446A/cm<sup>2</sup>pH에 일치하는 거동을 보인다.

Fig. 4는 pH 10.4와 pH 11.8일 때의 양극 분극 곡선의 일부분이다. 여기서 pH의 변화에 따라 피막 형성 초기에 특이한 peak 2개가 형성됨을 관찰하였다. Fig. 5는 pH 10.6 일 때의 인가전위의 천이에 대한 배관재의 전기화학적 임피던스 그래프이다. 여기서 전위의 인가에 따라 저주파에서 loop이 형성되는 현상을 보였으며 정상상태의 전위에서는 capaci-

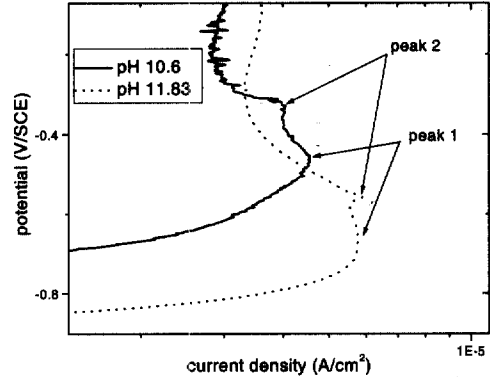


Fig. 4. Magnified section at active-passive transition regime of polarization curve in alkaline solution

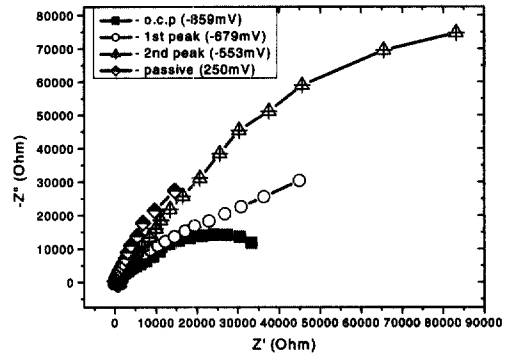


Fig. 5. Nyquist plot of low alloy steel in alkaline solution with applied potential

tive loop이 완전한 loop을 보이지 않고 어느정도 편심을 가지는 양상을 보이는 반면 전위의 상승에 따라 이러한 편심은 사라지고 완전한 loop을 보였다. 피막의 조직이 밀(dense)함에 따라 형성되는 피막의 capacitance의 기여도가 전체 부식회로에 미치는 영향이 큰 것으로 결부지어 생각하면 피막의 성질이 이미 산화현상이 시작되는 전위부터 형성되기 시작하는 것으로 볼 수 있다. Fig. 4에서 얻은 각각의 산화반응을 Potential-pH diagram에 도시하면 각 영역 공히 적철광(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 안정한 영역인 보호피막 형성 영역에 놓여있으며 이는 전극 표면이 열역학적으로 안정한 보호피막의 형성과 동시에 중간단계의 산화반응이 전극계면 경계에서 병렬로 일어나며<sup>5)</sup> 형성된 중간물이 침적반응<sup>6)</sup>을 통하여 보호피막을 완성하는 것으로 볼 수 있다. 이는

Table 2. Electrochemical impedance parameters for applied potential

pH	o.c.p.	1 <sup>st</sup> peak	2 <sup>nd</sup> peak	Passive
10.6				
R <sub>s</sub>	3.36 × 10 <sup>2</sup>	-2.303 × 10 <sup>3</sup>	5.144 × 10 <sup>3</sup>	1.254 × 10 <sup>2</sup>
R <sub>p</sub>	5.03 × 10 <sup>4</sup>	1.337 × 10 <sup>5</sup>	2.137 × 10 <sup>5</sup>	1.361 × 10 <sup>5</sup>
n	0.656	0.506	0.816	0.833

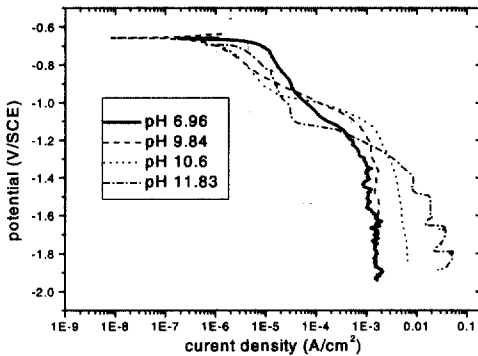


Fig. 6. Cathodic branch of low alloy steel with pH

Table 2에서 보듯이 전하교환 저항값 R<sub>p</sub>는 이미 peak가 형성되기 시작할 때부터 보호피막과 비슷한 값을 가지기 시작하는 현상을 뒷받침한다. 이는 중간 산화반응과 보호피막의 형성이 동시에 발생함을 의미한다.

Fig. 6은 탈기된 분위기에서 정지한 상태의 pH에 따른 배관재의 한계전류밀도 그래프이다. 각 상태별 차이는 있으나 일정 전위 이하에서 농도 분극현상이 뚜렷이 나타나고 있다. 여기서 pH의 증가에 따라서 한계전류밀도의 양이 증가하는데 이는 pH가 증가할수록 환원반응에 참여하는 반응물(산화제, oxidizing agent)의 이온화도가 커짐에 기인하는 것으로 보인다.<sup>7)</sup> 탈기한 약염기에서의 환원반응과 이에 수반하는 한계전류밀도의 관계식은 식 (5)와 같다.

$$H_2O + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2 + OH^-, \quad i_L = -\frac{DzFC_b}{\lambda} \quad (5)$$

3.2 용존산소에 대한 배관재의 부식거동

Fig. 7은 용존 산소가 포화된 상태와 탈기된 상태에서의 부식전위의 결과이다. 회전속도가 증가할

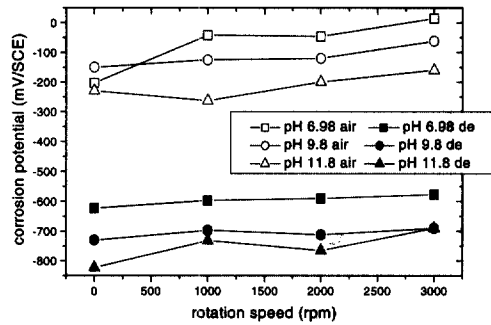
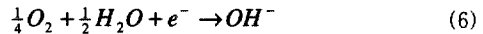


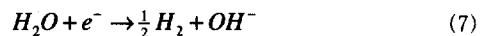
Fig. 7. Profiles of corrosion potential with oxygen content

수록 산소가 포화된 상태와 탈기된 상태 모두 부식 전위가 증가하고 있으며 산소가 포화된 상태가 탈기된 상태보다 부식전위가 높게 형성됨을 관찰하였다. 이는 금속의 산화 반응이 일정한 상태에서 산소가 있는 경우와 탈기된 경우의 환원 반응이 식 (6)과 (7)로 변환되기 때문에 전체 부식전위가 변화하는 것으로 볼 수 있다.

oxygen saturated :



oxygen depleted



용존 산소가 포화된 상태와 탈기된 상태에서 각각 회전속도에 따라 부식전위가 상승하는 현상이 관찰되었는데 이는 회전속도가 증가할수록 산화제(oxidizing agent)의 전극 표면으로의 확산이 원활해져 부식전위가 높게 형성되는 것으로 보인다. 그러나 회전속도에 따른 두 조건의 부식전위 상승률은 그리 높지 않았는데 이는 실험에 사용된 두 조건이 반응에 참여하는 두 산화제의 농도가 제한된 상태이기 때문에 회전속도에 따른 부식전위의 증가 기여분이 매우 낮은 것으로 판단된다. 용존산소에 따른 RCE를 이용한 부식전위 측정 실험 결과에 의하면<sup>8)</sup> 용존 산소가 매우 낮은 경우 (~2ppb)와 포화상태인 경우 (1000ppb~) 각각 회전속도에 따른 부식전위의 상승률이 낮았으며 중간 농도인 30에서 100ppb인 용존 산소 농도에서 회전속도에 따른 부식전위의 상승률이 높았다. 이는 중간 정도 산화제 농도인 30 ~ 100ppb의 용존 산소 환경에서 유속

에 따른 확산반응이 민감함을 보인다. 일반적으로 산소 포화인 경우 유속의 증가는 전극 표면으로의 확산에 의한 산소의 이동을 조장시켜 그 결과 부식 전위의 상승을 가져온다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 산소 포화인 수산화 조건과 산소를 제거한 조건 공히 유속에 따른 부식전위의 증가가 같은 비율로 일어났으며 이는 산소가 제거된 조건에서 음극반응이 물의 dissociation에 의한 활성화 반응 후 형성된 수소가 계면이나 수용액으로의 확산반응이 전체 반응속도에 개입하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 6에서도 나타나는데 낮은 pH와 달리 높은 pH에서의 cathodic 분극곡선은 인가전위의 절대값이 증가할수록 응답전류의 serration 현상을 보이며 그에 따라 한계전류밀도가 명확히 나타나지 않는 현상을 보인다. 이는 pH가 증가할수록 전극 표면에 대량의 수소기체가 형성되고 이것이 전하 교환을 방해하다 임계 부피에 이르러서 수소기체의 방출이 이루어지면 다시 전류밀도가 증가하게 되는 것으로 판단되어 수소기체에 의한 영향이 pH가 증가할수록 커지는 것으로 보인다.

Fig. 8은 용존 산소의 함량에 따른 배관계의 전기화학적 임피던스 결과이다. 산소 포화인 경우 활성화 영역 외에 저주파에서 확산의 존재 반응이 나타남을 관찰하였다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 cathodic 반응이 산소의 이동에 의하여 지배함을 의미한다. 이러한 경향은 산소가 제거됨에 따라 어느 정도 나타나고 있는데 동일한 주파수 영역에서 활성화 loop의 크기가 커지게 될 뿐 아니라 확산에 의한 plateau의 신호가 부분적으로 관찰되는 것을 반영한다.

### 3.3 전기화학적 방법에 의한 FAC기구 분석

Fig. 9는 유속에 따른 부식전류의 변화 그래프이다. pH 6.96에서는 회전속도에 따라 어느 정도 부식속도가 증가하는 반면, pH 9.8 이상에서는 1000 rpm부터 부식전류가 포화되는 양상을 보인다. 이는 alkaline 환경에서 유속이 증가하여도 전체 부식전류의 상승을 저지하는 율속단계가 존재함을 보인다. 이러한 결과는 CO<sub>2</sub>를 포함한 2% NaCl 분위기에서 탄소강과 13% Cr 합금강에 대하여 선형분극법을 이용하여 부식속도를 구한 Denpo의 결과와 일치하

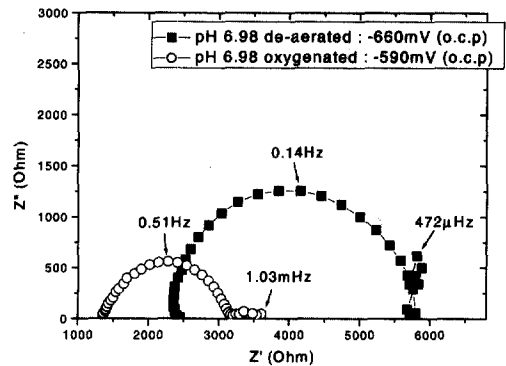


Fig. 8. Nyquist plot of low alloy steel with oxygen content

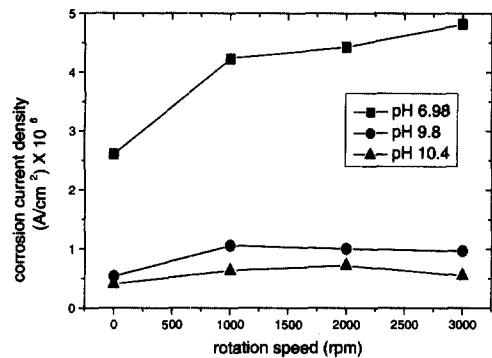


Fig. 9. Results of linear polarization with pH difference and rotating velocity

는 것으로 그는 부동태 피막이 형성되지 않는 탄소강에서는 회전속도의 증가에 따라 부식속도가 크게 증가하는 한편 부동태 피막이 안정한 13% Cr 강에서는 초기에는 부식속도가 증가하다가 어느 이상의 회전속도 (1000rpm) 이상에서는 부식속도가 증가하지 않는 정체현상을 일으키는 것으로 보고하고 있다.<sup>10)</sup>

그에 반해 유속에 대한 한계전류밀도의 거동은 유속이 증가할수록 한계전류밀도는 포화 없이 정으로 증가하는 양상을 보인다. cathodic branch에서의 지배 반응이 activation에 의한 반응보다 확산에 의한 산화제의 이동이 우세하다고 생각하면 부식전위 근처에서 상온 alkaline 용액에서의 전체 FAC 현상은 확산에 의한 반응보다는 철이 철 이온으로 산화하는 반응이나 철 표면에서 철이 수산화상

(Hydrolysis reaction)에 의해 전자를 잃고 철 이온이 보호피막을 형성하게 되는 activation에 의한 반응이 전체 반응속도를 지배함을 알 수 있다. 전체반응이 물질전달 반응에 의하여 좌우되는 경우 무차원 물질전달 변수인 Sherwood number는 식 (4)와 같이 Reynolds number와 Schmidt number의 곱에 의하여 지배한다.<sup>11)</sup>

$$Sh = A \cdot Re^m \cdot Sc^n \quad (8)$$

부식계가 등온(isothermal condition)이고 용액의 농도가 희박한 상태에서 Sc의 값은 일정하다는 결과<sup>12,13)</sup>와 물질전달을 나타내는 척도인 물질전달계수 k는 농도 차에 의한 구동력에 대한 반응속도의 비임을 이용하여 식 (8)은 식 (9)과 같이 한계전류밀도를 이용하여 단순화할 수 있다.<sup>14)</sup>

$$k = \frac{m}{C_b - C_s} = \frac{i_L}{zFAC_b} = A' \cdot Re^m \quad (9)$$

위의 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 여기서 전체 반응이 물질전달 과정 단독에 의하여 좌우되는 경우 속도에 0.401의 지수로 비례하는 반면 산화와 물질전달반응의 직렬회로로 전체 반응이 구성되는 경우 속도에 0.112의 지수로 비례하며 이는 철 이온의 산화반응이 전체 FAC 과정을 지연시키는 구실을 담당함을 알 수 있다. Table 3은 pH에 대한 피막관련 인자이다. 여기서 double-layer capacitance는 pH의 증가에 따라 큰 폭으로 증가하였으며 capacitance의 증가는 activation barrier를 상승시키는 결과를 가져와서 전극 표면의 철 이온의 농도를 한정시켜 그 결과 속도장에 대한 부식속도의 민감도를 한정시키는 구실로 작용하는 것을 방증한다. 산화반응에 근거한 활성화 반응이 단순 전하고 환 반응에서 보호피막이 형성되는 반응으로 그 복잡성(degree of complexity)이 커질수록 유속에 대한 부식속도 의존성은 더 이상 나타나지 않게 된다.

일반적으로 전체 부식반응이 물질전달 반응에 전적으로 의존하는 경우 속도지수는 약 0.7의 값<sup>15)</sup>을 갖는다. 본 연구에서는 충분한 활성화 전위를 인가한 경우에서도 속도지수가 0.401로 비교적 낮은 값을 보였다. 아울러 부식계가 물질전달에 의해 지배받는 경우 분극곡선은 매우 작은 활성화 전위 영역

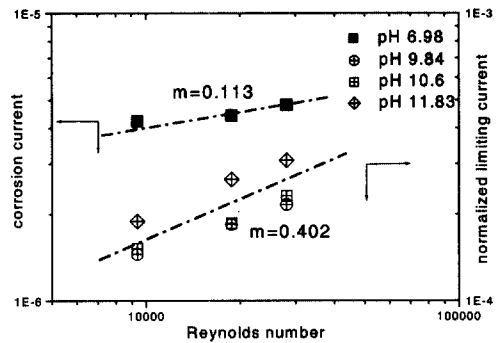


Fig. 10. velocity dependence of normalizing limiting current density and corrosion current in rotating condition

Table 3. Electrochemical impedance parameters for solution pH

Corrosion Potential	6.98	10.6
f <sub>max</sub>	0.139	0.0013
R <sub>p</sub>	5.74 × 10 <sup>3</sup>	5.03 × 10 <sup>4</sup>
C <sub>dl</sub>	1.98 × 10 <sup>-4</sup>	2.38 × 10 <sup>-3</sup>

과 급격한 농도분극의 천이를 겪는다. 이에 반해 본 연구에서 얻어진 분극곡선은 비교적 큰 인가전위를 가해야 물질전달에 따른 농도분극의 거동을 보인다. 결국 한계전류밀도의 속도의존성이 다른 계에 비해 비교적 두드러지지 않은 점과 cathodic branch가 전위(potential)에 따른 점근선적(asymptotic) 거동을 보이지 않는 점은 준 부식계는 물질전달과 활성화 현상이 혼재되어 있으며 특히 활성화 반응이 전체 반응속도를 결정하는 반응임을 의미한다.<sup>16)</sup> 실제로 제안된 여러 FAC 예측 model에서 상온에서 유속에 따른 FAC 영향은 한계가 있는 것으로 보는데 이는 정상상태(corrosion potential)에서 철 표면에 산화되는 철 이온의 양이 한정되어 있기 때문에 이것이 유속에 대한 한정요인을 만들어 낸다는 결론과 일치한다.<sup>17)</sup> 가동 온도의 상승은 앞서 상술한 산화 반응을 어느 정도 활성화 시켜 부식속도의 민감성을 높이게 하는 구실로 작용할 수 있다.

#### 4. 결 론

Rotating Cylinder Electrode를 통하여 얻어진

약염기 분위기에서 저합금강 배관재의 유속에 따른 부식 인자는 이론으로 제시된 열역학적 영역에 잘 들어맞았다. 배관재는 pH 10.4 이상부터 반쪽 산화, 환원반응속도의 증가에 따른 alkaline 부식거동을 보였다. 또한 보호피막은 pH 9.8부터 형성되기 시작하였고 이의 성질은 10.4부터 안정해졌으며 이의 형성원리는 철 이온의 단계적인 산화반응으로 인한 수산화 철의 변환과 그에 수반하는 침적반응으로 구성되었다. 회전속도에 따라 확산에 의한 기구로 인하여 부식전위 및 용해전류의 증가현상이 관찰되었다. 전기화학적 분극곡선과 부식전류의 속도 의존성으로 FAC 과정을 구성하는 활성화 반응과 물질 전달 반응의 우선성을 연관지을 수 있었다. 전기화학적 방법에 의한 결과 본 부식계에서는 활성화 반응이 전체 FAC 반응을 제어하였으며 이는 제기된 여러 FAC 예측 model 과 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 전력연구원의 "중수로 피터관 및 핵연료채널 열화진단기술 개발" 과제와 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21에서 부분 지원하였음.

## References

1. K. A. Burill, and E. L. Cheluget, JAIF Int'l Conf. On Water Chemistry, p. 699, (1998).
2. D. R. Gabe, *J. of App. Electrochem.*, **28**, 759, (1998).
3. G. Bellanger, *J. of Nucl. Mat.*, **217**, 187, (1994).
4. J. Y. Zou, and D. T. Chin, *Electrochimica Acta*, **32**, p. 1751, (1987).
5. T. Misawa, *Corr. Sci.*, **13**, 659, (1973).
6. J. H. Kim and I. S. Kim, *J. of KNS*, **32**, 595, (2000).
7. M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3rd. Ed., 460, McGraw-Hill, (1987).
8. Y. J. Kim, C. C. Lin, and R. Phathania, Proc. of the Water Chemistry of Nuclear Reactors System 6, p. 139, BNES, (1992).
9. H. H. Huang, and T. H. Chuang, *Mat. Sci. and Eng.*, Vol. A292, p.90, 2000.
10. K. Denpo and H. Ogawa, *Corrosion*, **49**, 442, (1993).
11. M. Eisenberg, C. W. Tobias and C. R. Wilke, *J. of Electrochem. Soc.*, **101**, 306, (1954).
12. B. Poulson, "Predicting the Occurrence of Erosion Corrosion in Plant Corrosion", (1987).
13. M. Eisenberg, C. W. Tobias and C. R. Wilke, *ibid.*
14. B. Poulson, *Corrosion Science*, **23**, 391, (1983).
15. S. Neš ic, G. T. Solvi, and J. Enerhaug, *Corrosion*, **51**, 773, (1995).
16. S. W. Dean, *Material Protection*, Sept, 61, (1990).
17. B. Chexal, EPRI report TR-106611, p. 4-33, (1996).