

## 희생양극법에 의한 발전소 복수기의 음극방식효과에 대한 수치해석

김장순 · 배병홍 · 김의현 · 이충근 · 김종영

전력연구원 금속재료연구팀

### Numerical Analysis of Cathodic Protection Effect by Sacrificial Anode Attached to Condenser of Power Plant

Jang-Soon KIM, Byoung-Hong BAE, Eui-Hyun KIM, Chung-Keun LEE, Chong-Young KIM

Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

초 록 희생양극법에 의한 발전소 복수기 수실의 음극방식 효과를 수치해석을 이용하여 알아보았다. 복수기는 해수설비중의 하나로 여러 재질로 구성되어 있는데 방식을 하지 않은 경우 수실과 tubesheet와의 갈바닉 부식이 심하게 발생되며, 수실벽과 갈바닉 부식이 심하게 일어나는 부위에 희생양극을 부착하면 많은 방식효과가 있음을 알 수 있었다. 수치해석 결과의 타당성 검토로서 model test를 행한 결과 수치해석 결과와 실험치가 잘 일치하였다.

**Abstract** The effect of cathodic protection by the sacrificial anode attached to condenser waterbox of power plant was investigated using numerical analysis. The condenser is consisted of various materials. So in case of no protection, the serious galvanic corrosion between waterbox and tubesheet was observed. If sacrificial anodes were attached to the wall of waterbox or the area corroded galvanically, the large protection effect was showed. To demonstrate the validity of numerical analysis results, model test was executed. The numerical solution was consistent with the experimental value well.

### 1. 서 론

전기방식법은 음극방식법과 양극방식법 두 가지로 나눌 수 있다. 현재 발전소 해수설비 및 선박 등의 해양설비, 토양속의 가스배관 등에 주로 이용되고 있는 방식법은 음극방식법이다. 왜냐하면 양극방식법은 활성태 및 부동태 금속에만 적용가능하고 설치비용이 크며 유지 및 보수에 상당한 주의가 요구되나 음극방식법은 거의 모든 재질에 적용할 수 있고 유지 및 보수가 용이하므로 널리 적용되고 있다. 그러나 이 음극방식법을 방식 대상설비에 적용시 단순한 계산이나 과거의 경험에 의존해서 설계하므로 비효율적인 경우가 많다. 즉 음극방식 설비의 설계 및 운전시 최적 전극재질 선정, 최적합 부착위치의 선정 등이 부적합하며 부식부위의 예측 및 부식속도 평가가 어려우므로 예상치 못한 결과를 초래하여 막대한 경제적 손실 및 중대한 사고를 야기시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있는 것이다. 최근에는 computer를 이용한 수치해석기법이

매우 발달하여 이러한 문제들을 해결하는데 매우 유용한 기준들을 제시할 수 있게 되었으므로 본 연구에서는 음극방식효과를 수치해석법을 적용하여 평가하고자 한다.

음극방식법의 computer simulation을 최초로 시도한 학자는 Klingert<sup>1)</sup>등으로서 전류 및 전위분포 등의 전기장 해석을 통하여 부식현상을 해석하였다. 그후 1980년대에 들어 세계적으로 많은 학자들이 이 분야에 관심을 가지게 되었고 특히 해수설비를 운용하고 있는 전력회사 및 배관시설을 가지고 있는 여러 회사들이 많은 연구결과들을 내놓게 되었다. Baltimore 전력회사의 Cramblitt<sup>2)</sup>는 발전소 복수기의 수실에 적용되고 있는 음극방식법에 FDM(유한차분법)을 이용하여 이종금속 접합에 의한 부식 등의 예측을 가능케하였다. 또한 일본 Toshiba 연구소의 Kikuna<sup>3,4)</sup>등은 발전소의 해수설비에 적용되고 있는 음극방식 시스템에 FEM(유한요소법)을 적용하여 발전소의 방식설비 운전조건 설정에 많은 기준들을 제공하였다. 한편 최근에는 음극방식전용

해석프로그램의 출현으로 수치해석이 더욱 용이하게 되었다. 그 예로 Adey<sup>5)</sup>는 BEM(경계요소법)으로 이루어진 프로그램인 BEASY를 이용하여 방식에 관한 수치해석 결과를 발표하게 되었다. 그 외에도 여러 학자들은 위의 수치해석 기법을 음극방식법 뿐만 아니라 각종 재료의 분극 또는 부식경향 예측<sup>6,7)</sup>에도 적용하고 있어 방식대상 설비의 설계 및 운전에 많은 기여를 하고 있다. 본 연구에서는 발전소에서 운용중인 해수설비로서 터빈을 거친 증기를 해수로 응축시키는 복수기를 대상으로 시스템 모델링을 행하였다. 복수기는 여러가지 종류의 금속 조합에 의해 이루어져 있는 열교환기로서 갈바닉 부식을 피할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 이유에 의해 필연적으로 음극방식설비를 운용해야만 하는 복수기의 수실 및 입구측 순환수관 파이프의 부식의 정도를 computer modeling를 통하여 이곳에 희생양극을 설치한 경우 과연 어느 정도 방식효과가 있는지 알아보았다.

본 연구에서 사용한 package는 구조 및 전기장 등의 해석 프로그램인 ANSYS(Swanson Analysis System)로 이 프로그램의 수치해석 기법은 유한요소법이다. 한편 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 model test를 행하였다.

## 2. 음극방식과 수치해석

금속의 부식은 전류가 전해질로 유출되는 부위에서 발생한다. 그러므로 전류가 유출되는 현상을 강제적으로 막을 수 있다면 부식을 억제할 수 있는 것이다. 희생양극법은 부식경향이 더욱 높은 금속을 구조물에 접촉시켜 대신 부식이 일어나도록 하는 방법이며 외부전원법은 금속구조물에 강제적으로 전류를 흐르게 하여 부식을 억제하는 방법이다. Fig. 1에 그 개요를 나타내었다.

전류를 발생원인 anode 전극으로부터 전해질을 통해 cathode 전극으로 흐르게 하면 전해질에 전위장이 형성된다. 이렇게 형성된 전위장내에서, cathode 금속의 특정위치에서의 전위와 그곳의 전류값을 알아내어 부식 위치, 부식영역의 크기, 방식상태 등을 해석할 수 있다. 이때 전위장내의 전해질인 해수는 균질한 것으로 가정되며, 전류의 발생과 흡수가

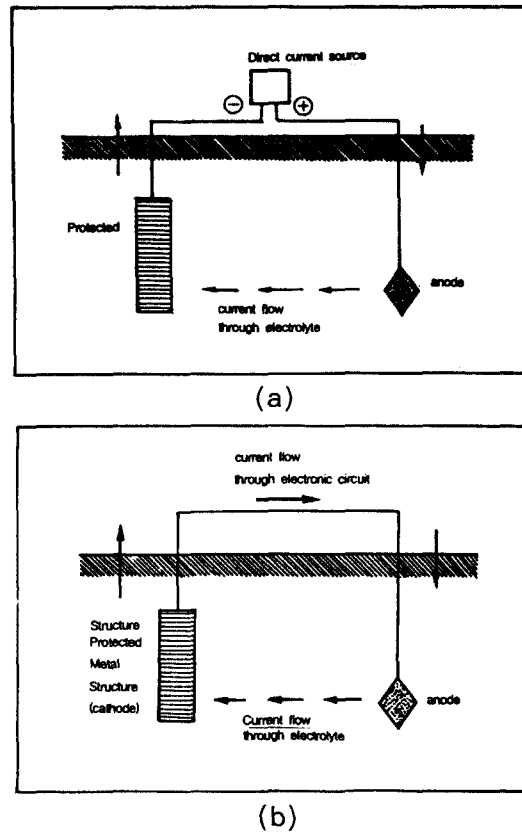


Fig. 1. Schematic illustration of cathodic protection system

- (a) impressed current technique
- (b) sacrificial anode technique

없고 전기전도율의 등방성이 보존되기 때문에 전위  $\phi$ 는 Laplace 식에 따른다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots\dots\dots 1)$$

또한 cathode 및 anode 금속에 접해 있는 해수의 경계면에서는 해수에서 금속으로 또는 역으로 전류가 유출하는 현상에 의해 전위와 일정한 상관관계 즉 분극특성을 나타내므로 이를 경계조건으로 하여 전위장의 분포를 구할 수 있다. 한편 금속의 부식과 전위와의 상관관계는 아래의 Nernst식에 의해 평가할 수 있는데,

$$E = E_0 - \frac{0.059}{n} \log \frac{a_{red}}{a_{oxid}} \dots\dots\dots 2)$$

E : 금속의 전위 E<sub>0</sub> : 표준 수소전극 전위  
 n : 반응에 참여하는 전자들의 수 a<sub>red</sub> : 환

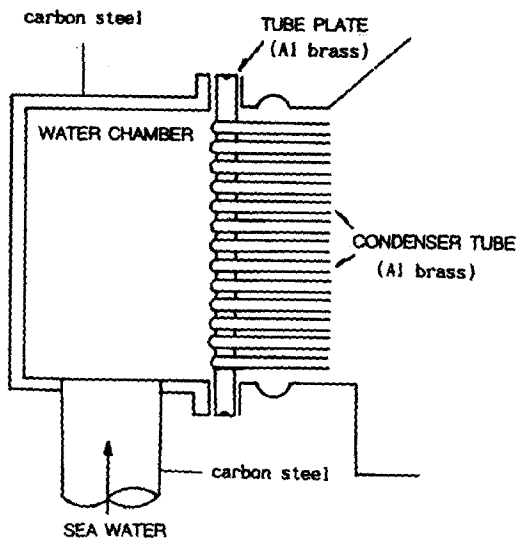


Fig. 2. Schematic illustration of condenser

#### 원된 종의 활동도

$a_{oxid}$ : 산화된 종의 활동도

일례로서 해수에서의 철의 자연전위는  $-655$  mV(vs SCE)이고 방식전위는 이보다 낮은  $-770$  mV(vs SCE)로 알려져 있다<sup>9)</sup>. 그러므로 실험 또는 수치해석에 의해 구해진 전위값이  $-770$  mV(vs SCE)보다 positive해지면 부식이 일어나며 더욱 positive해져  $0$  mV(vs SCE) 가까운 값에 도달되면 부식이 매우 심하게 일어남을 예측할 수 있다. 한편 전위값이  $-770$  mV(vs SCE)보다 negative해지면 방식영역에 들어가 있으며 더욱 negative해지면 과방식이 일어날 가능성을 또한 예상해 볼 수 있다. 이상의 관계에 의해서 전위분포 해석을 행하면 금속의 부식 가능성 여부와 방식의 정도를 알 수 있는 것이다.

### 3. 해석 대상의 모델링

Fig. 2는 발전소 복수기를 개략적으로 나타낸 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이, 터빈을 거친 고온의 습증기가 복수기관 외부를 통과하게 되고 수실로 유입된 해수가 관 내부를 흐르면서 열교환이 이루어지도록 구성되어 있다. 이러한 복수기의 해수유입 입구측 순환수관 파이프와 수실은 탄소강이, tubesheet와 복수기관 재질로서는 Al Brass가 사용되고 있다. 따라

서 본 연구의 복수기 모델링에도 이와 동일한 재질을 사용하였다. 그리고 희생양극을 설치한 것으로 가정하여 모델링한 경우 이 희생양극을 Al이라고 가정하여 복수기 수실 및 입구측 파이프, 부식이 많이 일어나는 부위에 부착한 경우 등 여러가지 경우에 관하여 해석을 행하였다. 냉각매체는 해수이며 이 전해질은 균질하다고 가정하였다. 본 연구에서는 모델을 약 7200개의 element로 mesh generation 하였으며 해의 수렴치는  $10^{-10}$ 으로 하였다.

### 4. 초기조건 및 경계조건의 설정

부식해석에 필요한 경계조건은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 즉 anode 금속의 전류값 또는 전위값, cathode 금속의 분극곡선, 전해질인 해수의 전기전도율 등으로 나뉘어진다. Anode 전극으로서 희생양극을 부착한 경우 해수중의 자연전위  $\phi$ 를 미리 알면 이 값을 anode에서의 경계조건으로 입력한다. 물론 외부전원법을 사용하는 경우 anode에 어떤 일정한 방식전류  $I$ 를 입력하는 경우 이 값을 입력하면 된다. Cathode부의 경계조건인 분극곡선은 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 영향을 미치는 인자로는 금속의 표면상태, 해수의 성분, 염도, 온도, 유속 등이다. 분극곡선은 이러한 인자들에 의해 변하므로 각 조건에서 많은 분극곡선을 측정해 모델설정에서 가장 알맞은 분극곡선을 경계조건으로 사용해야 한다.

따라서 본 연구에서는 탄소강과 Al brass 합금의 초기조건으로서 이들 합금의 해수중 자연전위값을 사용하였으며, 경계조건의 경우 유속이 2m/sec이고 온도가 20°C인 실제 복수기의 운전조건과 같은 해수분위기에서 측정된 Fig. 3<sup>7)</sup>과 Fig. 4<sup>9)</sup>에 나타낸 이들 합금의 분극곡선에서 얻은 전위값을 적용하였다. 그리고 Al 희생양극을 설치한 경우 anode의 전위를 Al의 해수중 자연전위 값인  $-780$  mV(vs SCE)로 일정하다고 간주하여 이를 Al의 초기조건과 경계조건으로 정하여 해석을 행하였다. 한편 본 연구의 수치해석 대상은 복수기의 수실 및 입구측 순환수관 파이프이므로 복수기관의 해석은 제외하였으며 따라서 관의 길이에 따른 전압강하는 고려하지 않았다.

전해질인 해수의 전기전도율은 해수성분이

나 온도 등에 의해 약간씩 변하나 본 연구에서의 해수의 온도는 20°C로 간주하였고 해수의 전기전도율은 일반적인 값인 0.03mho/cm로 하였다. Table 1에 본 연구의 수치해석에 사용된 입력 data를 요약하여 나타내었다.

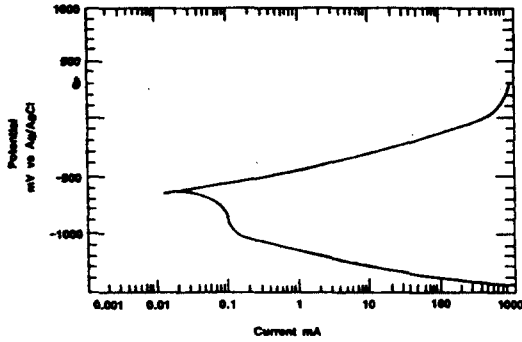


Fig. 3. Polarization curve for carbon steel in seawater

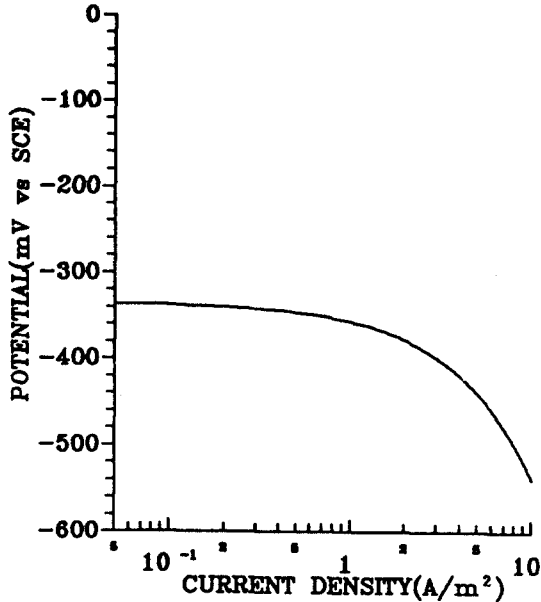


Fig. 4. Cathodic polarization curve for Al Brass in seawater

Table 1. Input data for simulation

	Al	탄소강	해수
밀도(kg/m³)	$2.7 \times 10^3$	$7.9 \times 10^3$	$0.997 \times 10^3$
비열(J/kg · K)	903	462	4179.6
열전도도(W/m · K)	220	76	0.609
고유저항(Ωm)	$2.9 \times 10^{-8}$	$9.8 \times 10^{-8}$	1/3
엔탈피(J)	201	25.1	$105 \times 10^3$

그리고 Table 2에는 수치해석시의 가정들을 정리하였다.

### 5. 수치해석 결과

Fig. 5는 희생양극이 설치되지 않은 복수기를 모의한 것으로서, 직경 3cm의 Al Brass 복수기 관, 150×150cm 크기의 탄소강 수실, 그리고 직경 50cm의 탄소강 순환수관이 접속되어 있는 계의 입구측의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 이로부터 희생양극이 설치되지 않은 경우, Al Brass 복수기관과 접촉되어 있는 탄소강 부위에서 갈바닉 효과에 의한 부식이 심하게 일어날 수 있음을 알 수 있다.

원래 탄소강은 해수에서의 자연전위가 -655mV(vs SCE)이고 Al Brass는 -340mV(vs SCE)이므로 식 2)에 의해 평가해 볼 때 이곳에서 부식이 심하게 일어난다고 쉽게 예상할 수 있으며, 다른 탄소강의 위치에서도 이곳의 전위값으로 보아 수실 및 입구측이 모두 부식 영역에 들어가 있다. 즉 희생양극법이든 외부 전원법이든 방식을 행해야 한다는 것을 암시해 주고 있다. 이러한 점은 Fig. 6의 결과로부터 확인할 수 있다. 전계의 세기란 어떤 벡터계에 단위전하를 놓았을 때 그에 작용하는 힘으로 정의되는데 이 전계의 세기값에 전기전도도를 곱해 주면 전류밀도값을 알 수 있게 된다. 이 관계로 보면 전계의 세기는 전류밀도에 비례하므로 그림에서 보았을 때 벡터길이 가 길면 전류밀도값이 크다고 할 수 있다. 그

Table 2. Assumptions for simulation

초기조건		경계조건	
탄소강의 해수에서의 자연전위	-655mV(vs SCE)	탄소강	해수중 탄소강 분극 곡선 전위(Fig. 3)
Al Brass의 해수에서의 자연전위	-340mV(vs SCE)	Al Brass	해수중 Al Brass 분극 곡선 전위(Fig. 4)
Al의 해수에서의 자연전위	-780mV(vs SCE)	Al	-780mV(vs SCE)로 일정
해수의 온도		20°C로 일정	
해수의 전기전도율		0.03mho/cm로 일정	

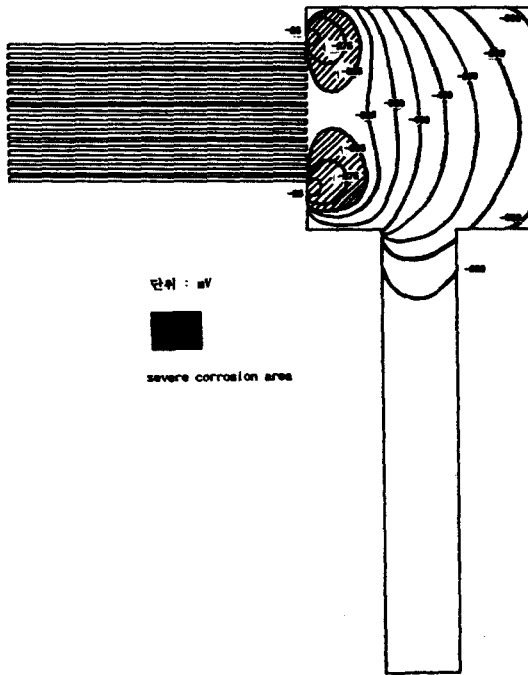


Fig. 5. Equipotential plot in case without sacrificial anode in condenser for simulation

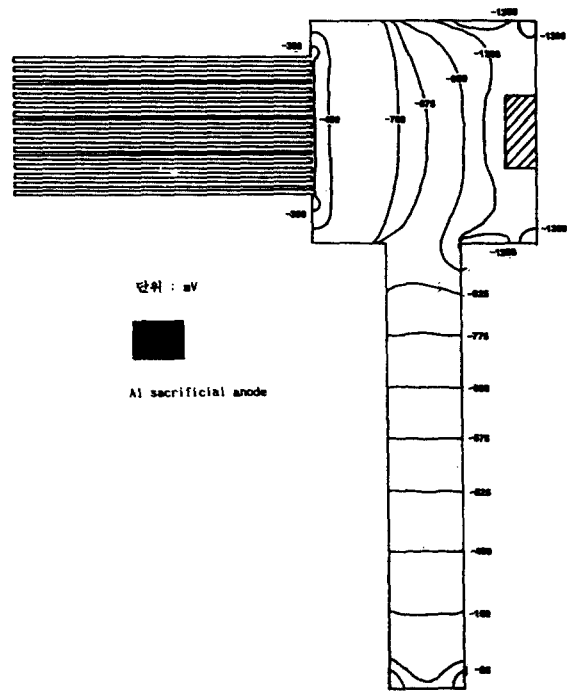


Fig. 7. Equipotential plot in case with one sacrificial anode at waterbox of condenser for simulation

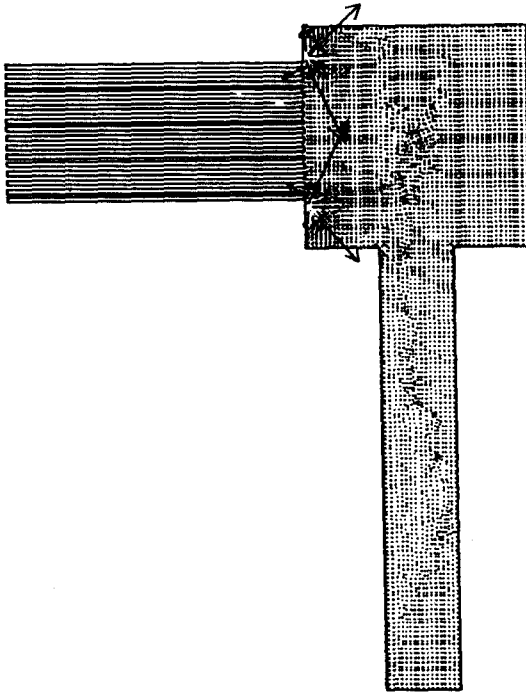


Fig. 6. Vector plot for electric field in case of Fig. 5

러므로 벡터의 길이가 긴 영역에서 전류유출이 커서 이곳에서 부식이 심하게 일어남을 확인케 해준다.

Fig. 7은 수실벽에  $\phi 30 \times 50\text{cm}$ 인 원통형의 Al 희생양극을 설치한 경우의 결과이다.

Fig. 5와 비교해 보았을 때 이중금속 접합에 의한 갈바닉 부식이 현저하게 감소했음을 알 수 있다. 또한 탄소강의 방식기준 전위값을  $-770\text{mV}$ (vs SCE)로 보면 수실의 2/3정도가 이 값 이하로서 탄소강의 방식전위 영역에 들어가 있으므로 전체적으로 부식영역이 상당히 감소하였음을 예측해 볼 수 있다. 이 사실은 Fig. 8에서도 확인할 수 있다.

즉, 두 금속이 접촉되어 있는 탄소강 부위에서 벡터의 길이가 Fig. 6과 비교해 보았을 때 상당히 감소한 반면 Al 희생양극에서 많은 방식전류가 공급되고 있음을 보여주므로 수실의 탄소강 부위가 Al 희생양극에 의해 방식되고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 9는 실제 발전소의 복수기를 모델링한 것으로  $125 \times 55\text{cm}$ 의 Al Brass tubesheet에 직경 3cm의 복수기 관들이 삽입되어 있으며 탄

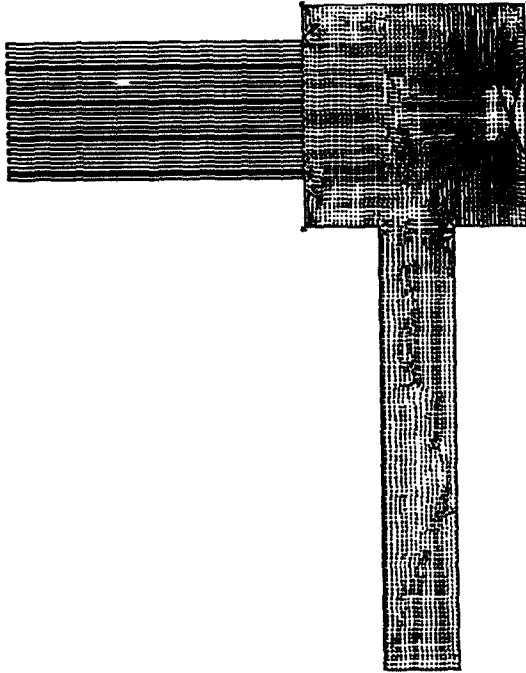


Fig. 8. Vector plot for electric field intensity in case of Fig. 7

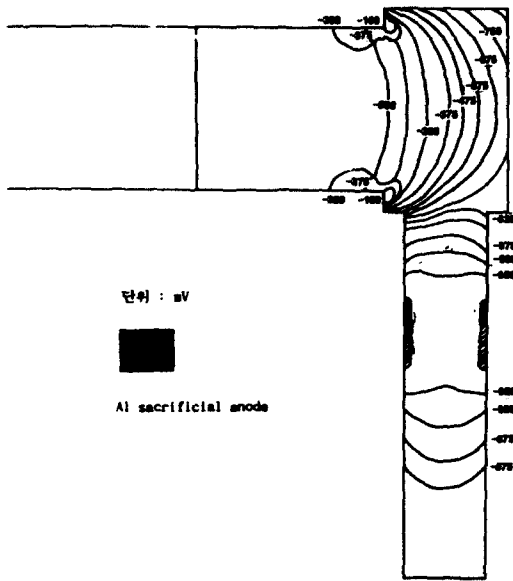


Fig. 9. Equipotential plot in case with sacrificial anodes at inlet pipe of Condenser in power plant

소강으로 되어 있는 수실에는 내경 50cm의 순환수관이 접속되어있는 경우로서 복수기의 입구측 순환수관에  $\phi 6.25 \times 25$ cm 인 Al 희생

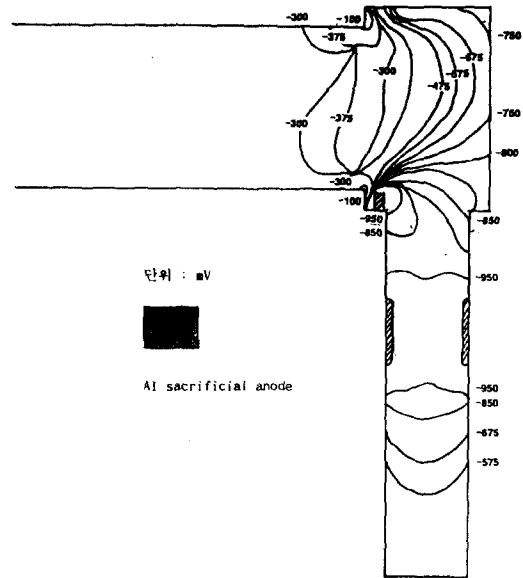


Fig. 10. Equipotential plot for the simulation in case with sacrificial anode in severe galvanic corrosion part of condenser in power plant

양극을 설치한 경우이다.

희생양극 효과가 미치는 범위는 그림에 나타난 것과 같이 방식상태임을 알 수 있다. 그러나 희생양극으로 부터 먼 곳에 위치한 탄소강은 부식영역에 있으며 탄소강과 Al Brass가 접촉되어 있는 곳에서는 탄소강쪽에서 부식이 심하게 일어남을 알 수 있다.

한편 Fig. 10은 갈바닉 부식이 심하게 일어나는 부위중 한쪽에 희생양극을 설치했을 때의 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 다른 갈바닉 부식영역에 비해 부식영역의 크기가 반이상 감소되어 있음을 알 수 있다. 즉 희생양극은 부식이 일어나는 경향을 감소시키는데 상당히 효과가 있음을 나타내 주는 것이다. 그러나 이 종금속 접합에 의한 갈바닉 부식을 완전히 막을 수 없으므로 다른 방법에 의해 이 현상을 억제해야 됨을 나타내 준다.

## 6. 모델 시험

이상에서와 같은 수치해석 결과가 타당한지의 여부를 평가하기 위하여 모델 시험을 행하였다. 위의 수치해석 대상이었던 복수기는 커다란 구조물로서 직접 발전소에서 전위를 측

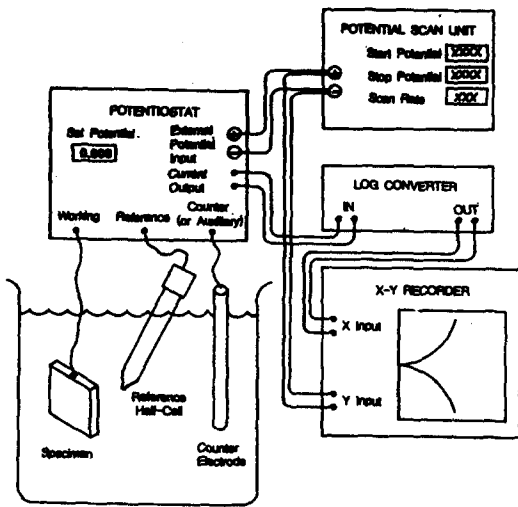


Fig. 11. Connection for polarization measurement

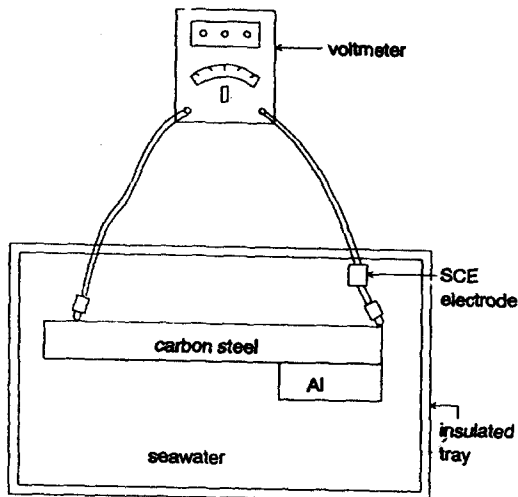


Fig. 12. Schematic diagram for potential value measurement

정하여 수치해석 결과와 비교한다는 것은 사실상 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 실제 발전소의 복수기에 사용되는 해수를 채취하여 분극실험과 전위값 측정시험을 행하였고 실험에 사용된 모델을 그대로 수치해석을 행하여 실험결과와 비교하여 보았다. Fig. 11과 Fig. 12에 각각 분극곡선 측정장치와 전위 측정 장치의 개략도를 나타내었다. 전위측정은 그림에서 보듯이 탄소강과 Al을 해수중에 접촉시켜 놓고 5분을 유지한 다음 voltmeter의 (+)극에 reference 전극인 S.C.E.를 연결하고,

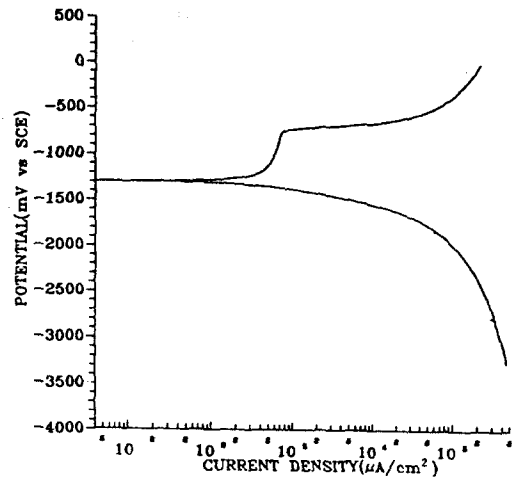


Fig. 13. Experimental polarization curve for Al in seawater

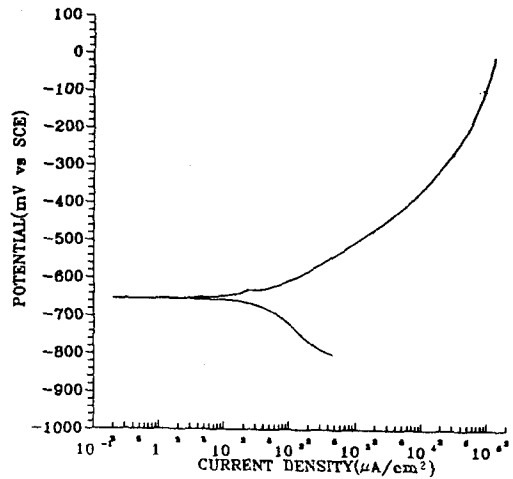


Fig. 14. Experimental polarization curve for carbon steel in seawater

-)극을 측정하고자 하는 탄소강의 길이 방향으로 이동하면서 voltmeter에 표시되는 전위값을 기록하였다.

### 7. 실험결과 및 고찰

Fig. 13, Fig. 14에 Fig. 11의 potentiostat를 이용해 분극실험을 행하여 얻은 Al과 탄소강의 분극곡선을 나타내었다. 전위 측정 실험으로 얻은 값과 수치해석으로 구한 값과의 비교를 위해 이 분극곡선들을 초기조건 및 경계조건으로 사용해야 하기 때문에 역시 5분동안 해수중에 유지후 scan rate를 10mV/s로 하여

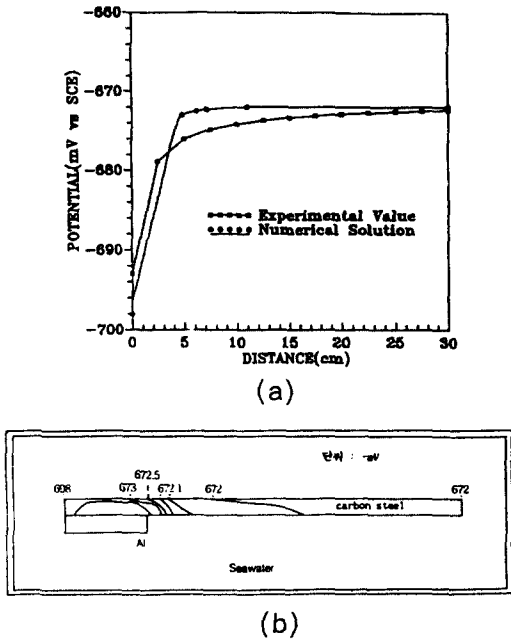


Fig. 15. a) Comparison of numerical solution with experimental value for model test b) Equipotential plot for model test

reference 전극인 S.C.E.를 사용하여 분극실험을 하였다.

그림에서 보듯이 Al의 해수에서의 부식전위  $E_{corr}$ 은  $-1300\text{mV}(\text{vs SCE})$ 이며 탄소강의  $E_{corr}$ 은  $-655\text{mV}(\text{vs SCE})$ 였다. 따라서 이 전위값을 초기조건으로 하고 탄소강의 cathodic polarization curve와 Al의 anodic polarization curve를 경계조건으로 하여 구한 수치해석치와 실험값사이의 비교결과를 Fig. 15에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 실험결과와 수치해석 결과값간에 약간의 차이가 나타나고 있으나 계기의 내부저항 및 실험변수의 오차 등을 감안할 때, 이들의 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 생각된다. 이상의 결과를 토대로 할 때 발전소 복수기의 방식방법중의 하나인 희생양극법의 수치해석 결과는 실제 운전중인 설비의 전위분포와 잘 일치할 것으로 여겨진다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 발전소 복수기의 부식거동 및 희생양극법에 의한

방식해석을 행하였고 이를 검증하기 위해 모델 시험을 한 결과

1) 방식을 하지 않은 경우 수실과 tubesheet가 이종금속으로 접합되어 있어 갈바닉 부식이 심하게 일어나며 Al 희생양극을 부착하여 수치해석을 한 경우는 수실과 tubesheet와의 갈바닉 부식은 많이 억제할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위한 방법으로 간단한 실험장치를 구성하여 분극실험 및 전위측정 실험을 한 결과, 경향이 수치해석 결과와 아주 유사하며 그 값도 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에 사용한 수치해석 방법은 많은 신뢰성을 가지고 있다고 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. J.A. Klingert, S. Lynn, and C.W. Tobias, *Electrochim. Acta.* 9, 297(1964)
2. G. Prentice, R.A. Holser, V.J. Farozic, R.B. Pond, Jr and K.L. Cramblitt, *Corrosion*, 1, 75(1990)
3. S. Inagaki, S. Wado, N. Kikuna, S. Shiode, T. Sasamoro, M. Miyazaki & Y. Nishino, *火力原子力發展*, 11, 1241(1988)
4. S. Inagaki, N. Kikuna, T. Satou, Y. Nishino & M. Miyazaki, *火力原子力發展*, 4, 401(1993)
5. R.A. Adey & s.M. Niku, *Computer Modeling in Corrosion*, pp. 248, ASTM, Philadelphia, (1992)
6. K.R. Trethewey & J.S. Keenan, *Computer Modeling in Corrosion*, pp. 113, ASTM, Philadelphia (1992)
7. C.A. Brebbia, *Topics in Boundary Element Research*, vol 7 *Electrical Engineering Applications*, pp. 65, New York(1990)
8. *Studies on the Current and Potential Distributions of Cathodic Protection Systems*, 中間報告書, pp. 11, 韓國電氣研究所(1993)
9. 川邊允志, 荒木道郎, 藤井哲, 清水潮, *復水器工學 handbook*, pp. 99, 愛智出版, 東京(1994)