

발전소 복수기의 최적 방식조건 설정에 관한 수치해석 연구

김장순 · 김의현 · 김종영

전력연구원 금속재료그룹

Numerical Analysis of the Best Protective Condition Establishment in the Power Plant Condenser

Jang-Soon Kim, Eui-Hyun Kim and Chong-Young Kim

Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

초 록 전기방식법중의 하나인 음극방식법은 많은 해수설비를 갖추고 있는 발전소에 적용되고 있는 설비지만 운용의 측면에서는 적절하지 못한 방식조건으로 많은 문제점이 노출되고 있다. 본 연구에서는 해수설비중의 하나인 발전소 복수기의 음극방식설비를 해석 대상으로 하여 가장 많이 사용되는 희생양극 재질인 Zn 양극을 입구측 파이프, 수실벽 및 천정등 여러위치에 부착한 경우 전위분포 및 전류밀도분포를 구하여 최적방식조건을 찾아보았다. 또한 전류밀도값을 Faraday 법칙을 이용 부식속도로 환산하여 galvanic 부식정도와 방식정도를 평가하였다. 그 결과 희생양극을 galvanic 부식이 심하게 일어날 것으로 예상되는 위치에 부착하면 방식효과가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

Abstract In the power plant condenser consisted of various materials the most used sacrificial anode is Zn electrode. As the present operating method is mostly based on the rule of thumb, many problems have been caused. In this model of the cathodic protection system in condenser, the potential and the current density distribution of it were compared with them of no protection case through the numerical analysis. Also the effect by changing of the place where Zn anodes are attached was discussed. And the corrosion rate corresponding to the effect was estimated. The results showed that the protection effect varied according to the anode position. Consequently, the numerical analysis result demonstrated that if the anodes were arranged in the proper place, the corrosion rate could be considerably reduced.

1. 서 론

희생양극법은 이중금속간의 전위차를 이용하여 피방식 구조물보다 전위가 낮은 금속을 전기적으로 연결해 두 금속의 전위차만큼 양극에서 음극인 피방식구조물로 전해질을 통해 방식전류를 흐르게하는 방법이다. 이 방식법은 외부에서 직류전원장치를 이용하여 강제로 피방식 구조물에 방식전류를 공급해 주어 방식하는 외부전원법보다 설치가 쉽고 유지보수가 용이하며 전류분포가 균일하고 설치면적을 최소화할 수 있다는 장점때문에 널리 사용되고 있다. 발전소 복수기의 경우 수실이 철합금 계통이고 tubesheet와 tube가 동합금이면 희생양극법에 의한 방식법이 많이 사용되고

있다고 보고되고 있다¹⁾. 양극재료로는 Mg, Al, Zn 등이 널리 사용되고 있으며 양극의 접지저항을 낮추어 전류발생을 많게 하기위해 backfill에 넣어서 사용하는 예가 많다²⁾. Mg 양극을 사용하여 방식을 하는 경우 Mg는 해수에서의 자연전위가 -1600mV 이기 때문에 피방식 구조물과의 전위차이가 Zn나 Al보다 커서 많은 방식전류를 공급해 줄 수 있다. 하지만 수실과 tubesheet에 갈바닉부식을 막기 위해 사용된 고무라이닝이나 코팅층을 disbonding하는 경향때문에 널리 사용되지 않고 있다. 또한 이 재료는 전기화학적 효율이 40~50%로 낮으므로 Zn나 Al보다 방식효과는 크

지만 다량의 양극을 부착해야 된다는 단점을 가지고 있다. 한편 Al 양극은 Zn나 Mg보다 많은 방식전류를 공급하지 못하며 전기화학적 효율도 Zn보다 낮은 80%이기에 널리 사용되지 못하고 있다. 그러나 적당히 합금화되어 사용된다면 Zn에 가까운 효율을 발생시킬 수 있으므로 합금으로 사용되는 예는 종종 있다. Zn는 전기화학적 효율이 90%이며 Mg 양극의 1/3크기로 같은 방식전류를 공급할 수 있으며 높은 염도의 해수에서도 Mg보다 더욱 효과적인 방식이 가능하다. 그러나 Zn는 표면이 부동태화 되면 방식전류를 피방식구조물에 공급하기가 어려워지므로 부동태화 되지 않도록 유의할 필요가 있다. 위의 이유에 의해 Zn가 희생양극 재질로서 해수설비 방식에 가장 많이 사용되고 있다.

현재 Zn 양극을 사용하는데 있어서 양극을 배열하거나 부착위치를 선정하는 기준은 현재까지 rule of thumb에 의해 운용되고 있다. 즉 균일한 방식전류 분포를 얻기 위해 대칭배열을 하고 있으며 가능한 tubesheet에 가깝고 교체가 쉽게 이루어질 수 있는 위치에 과거의 경험을 기초로 부착하고 있는 실정이다. 예를 들면 양극이 bayonet 모양인 경우 수실과 tubesheet 사이의 중앙에 위치시키며 방식전류가 흘러가는 범위는 양극표면과 피방식 구조물의 가장 가까운 부위사이의 최소거리의 2.5배이다라는 단순한 계산이나 경험에 의해 양극을 배열하고 있다. 그러므로 불필요한 양극부착에 따른 과방식, 예상치 못한 미부착 양극위치에서의 부식손상등이 일어날 수 있다.

최근에는 컴퓨터 수치해석 기법이 매우 발달되어 위에서 언급한 문제들을 해결하는데 매우 유용한 기준들을 제시하게 되었다^{3,4)}. 즉 부식위치의 파악과 부식속도 예측, 최적합 양극 부착위치 및 재질, 개수선정등이 가능해져 이미 외국에서는 이 방법을 동원해 음극방식 설계에 도입하고 있는 실정이다^{5,6)}.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 터빈을 거친 고온의 습증기를 해수로 응축시켜 열교환이 이루어지도록 이중금속조합으로 구성되어 있는 발전소 복수기를 대상으로 Zn 희생양극이 설치되어 있는 경우 방식효과를 수치해석 기법이 유한요소법인 ANSYS(Swan-

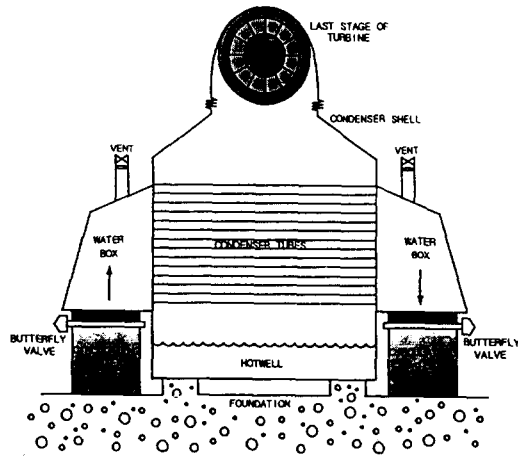


Fig. 1. Two-dimensional representation of condenser in thermal power plant

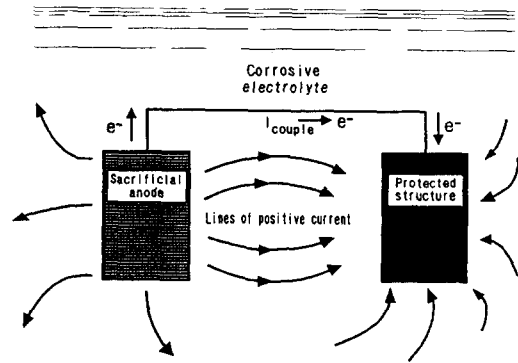


Fig. 2. Cathodic protection with a sacrificial anode

son Analysis System) 프로그램을 도입하여 전위분포 및 전류밀도분포를 구하여 부식부위 및 부식속도를 예측하고 또한 방식정도를 평가하였다.

본 연구의 수치해석 결과에 대한 타당성은 이미 게재된 논문⁷⁾에서 입증되었으며 이에 의거 수치해석 과정을 Zn 희생양극 부착에 따른 방식해석에 도입하게 된 것이다.

2. 수학적 모델

Fig. 2에 나타난 희생양극법의 원리는 원래 갈바닉 부식현상을 이용한 방식법으로 실제 갈바닉 조합으로 구성된 설비의 부식속도는 자기 부식속도와 갈바닉 부식속도의 합으로 나타낼 수 있다.

하지만 자기 부식속도는 갈바닉 부식속도에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 이 갈바

닉 부식속도는 anode의 표면을 가로질러 흐르는 전류밀도에 비례하므로 부식해석 문제는 anode와 cathode의 상호작용에 의한 갈바닉 전계(electrogalvanic field)를 계산하는 것으로 압축될 수 있다. 그러므로 전해질내에 이온들의 손실과 축적이 없다고 가정하면 전해질내의 전위 ϕ 는 Laplace 방정식을 따른다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

한편 경계를 가로질러 흐르는 전류밀도는 i 로 표시하면 아래 식과 같이 표시할 수 있다.

$$i = -\kappa \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (2)$$

κ : 전기전도도 n : 단위 내향 법선벡터

식 (1)을 풀기위해 경계조건을 Fig. 3의 전해질영역 전체표면을 대상으로 정리하면

경계 Γ_1 에서 $\phi = \phi_0$

경계 Γ_2 에서 $i = i_0$

경계 Γ_{3a} 에서 $\phi = -f_a(i)$

경계 Γ_{3c} 에서 $\phi = -f_c(i)$

과 같고 여기서 ϕ_0 와 i_0 는 이미 알고 있는 전위와 전류밀도값이고, $f_a(i)$ 와 $f_c(i)$ 는 anode와 cathode 금속에 대해 실험으로 결정된 분극곡선을 표시하는 비선형함수이다.

위의 지배방정식과 경계조건들을 이용해 anode 전극에서 cathode 전극으로 전류가 흐를때 전해질에 형성되는 전위분포와 전류밀도값을 알아내어 cathode 금속의 특정위치에서의 부식경향과 부식속도, 방식정도를 아래의 Nernst식과 Faraday식으로 평가할 수 있는데,

$$E = E_0 - \frac{0.059}{n} \log \frac{a_{red}}{a_{oxid}} \quad (3)$$

E : 금속의 전위

E_0 : 표준 수소전극 전위

n : 반응에 참여하는 전자들의 수

a_{red} : 환원된 종의 활동도

a_{oxid} : 산화된 종의 활동도

$$r = \frac{ia}{nF} \quad (4)$$

r : 부식속도

i : 전류밀도

a : atomic weight n : 당량수

F : Faraday 상수

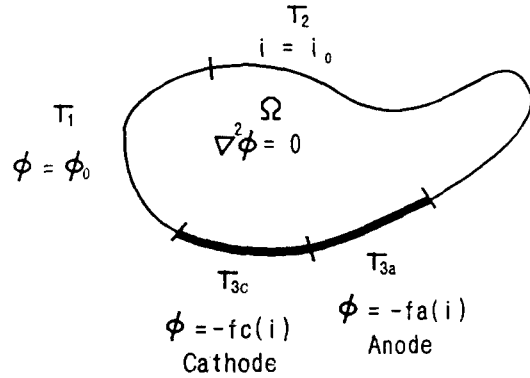


Fig. 3. Boundary condition of galvanic corrosion problem

일례로서 해수에서의 전위값을 알고 있는 경우 해석에 의해 이 값보다 낮은 전위값을 갖는 부위는 방식이 되며 높은 전위값을 나타내는 영역은 부식이 일어나거나 부식경향을 나타낸다고 할 수 있다. 이상의 관계에 의해서 피방식금속의 위치별 전위와 전류밀도, 부식속도 등을 수치해석으로 구해 희생양극 부착에 따른 방식효과를 평가할 수 있다.

3. 시스템 모델링

Fig. 4는 본 연구의 수치해석 대상인 발전소 복수기의 구조를 나타낸 것으로 해석대상의 크기를 양극의 크기와 함께 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 국내의 발전소 복수기가 수실 및 입구측 파이프는 탄소강, tubesheet와 tube는 Al Brass등 이종금속들의 조합으로 이루어져 있다. 그러므로 두 금속이 접해 있는 탄소강 부위에서 갈바닉부식이 심하게 일어날 가능성이 있으므로 방식을 하지 않으면 안될 상황이다. 본 연구에서는 현재 발전소에서 가장 많이 사용되는 희생양극 재질인 Zn를 사용하여 입구측 파이프에 부착한 경우, 수실벽 및 천정에 부착한 경우 갈바닉 부식영역 가까이에 부착한 경우등 Zn양극 부착위치에 따른 방식정도를 전위 및 전류밀도 분포등을 이용해 평가하였다.

4. 가정 및 경계조건

본 연구의 수치해석시 가정은 다음과 같다.

1) 전해질이 해수인 경우 초기에 anode 금속 및 cathode 금속은 해수에서의 자연전위값

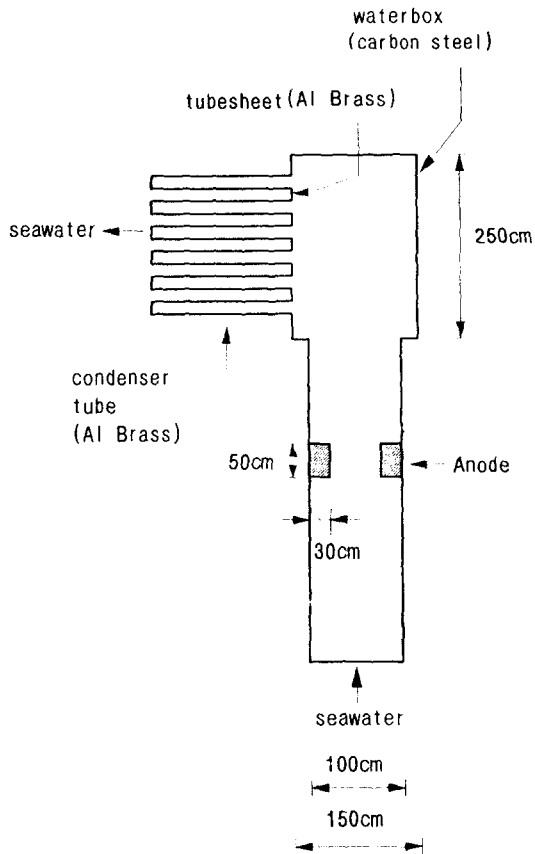


Fig. 4. Condenser for the simulation

을 갖게 되며 두 금속의 자연전위차에 해당하는 값만큼의 전류가 전해질을 통해 흐르게 된다.

2) 전해질을 통해 anode에서 cathode로 전류가 흐르게 되므로 cathode 금속의 각각의 위치에서는 분극을 일으키게 되어 전위값이 변하게 된다. 변화하는 전위는 cathode 금속의 분극곡선에 의해 결정된다.

위의 가정들을 기초로 하여 초기조건 및 경계조건을 입력하는데 특히 cathode 금속의 경계조건인 분극곡선은 해수의 성분, 온도, 유속, 금속표면상태등에 따라 영향을 받으므로 해석대상의 환경에 맞는 분극곡선을 구해야 한다.

본 연구에서는 탄소강과 Al Brass의 분극곡선이 경계조건으로 필요하다. Fig. 5와 Fig. 6에 각 금속의 분극곡선을 나타내었는데 이 두 곡선은 실제 발전소 복수기의 해수조건인 유속 2m/sec, 온도 20°C인 해수분위기에서 측정

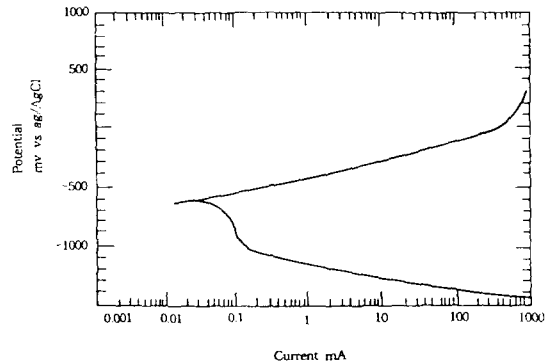


Fig. 5. Polarization curve for carbon steel in flowing seawater. The flow rate is 2(m/sec).

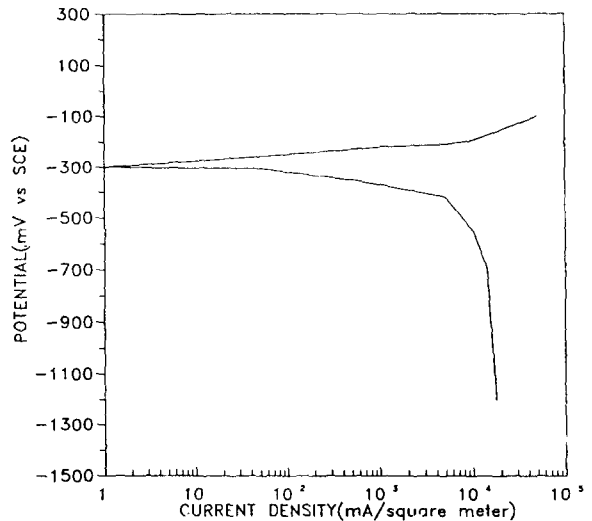


Fig. 6. Polarization curve for Al Brass in flowing seawater. The flow rate is 2(m/sec).

한 분극곡선이다⁸⁾.

그리고 Zn 양극의 해수에서의 자연전위값은 -1030mV로 일정하다고 간주하였다. 전해질인 해수는 균질한 전해질이라 가정하여 전기전도율이 0.01mho/cm인 값을 해석에 이용하였다. Table 1에 수치해석에 사용한 입력데이터를 정리하였다.

한편 본 연구에서는 수치해석대상의 주요부분이 수실과 tubesheet와의 갈바닉부식이므로 튜브의 해석은 제외하였다.

5. 수치해석 결과 및 고찰

복수기 수실에 희생양극이 설치되지 않은 경우의 전위분포를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1. Input data for simulation

	Al-Brass	carbon steel	seawater	Zn
Density (kg/m ³)	8.33 × 10 ³	7.9 × 10 ³	0.997 × 10 ³	Zn
Specific Heat (J/Kg · K)	900	462	4179.6	394
Thermal Conductivity (W/m · K)	101	76	0.609	119.5
Resistivity (Ωm)	7.43 × 10 ⁻⁸	9.8 × 10 ⁻⁸	100	5.96 × 10 ⁻⁸

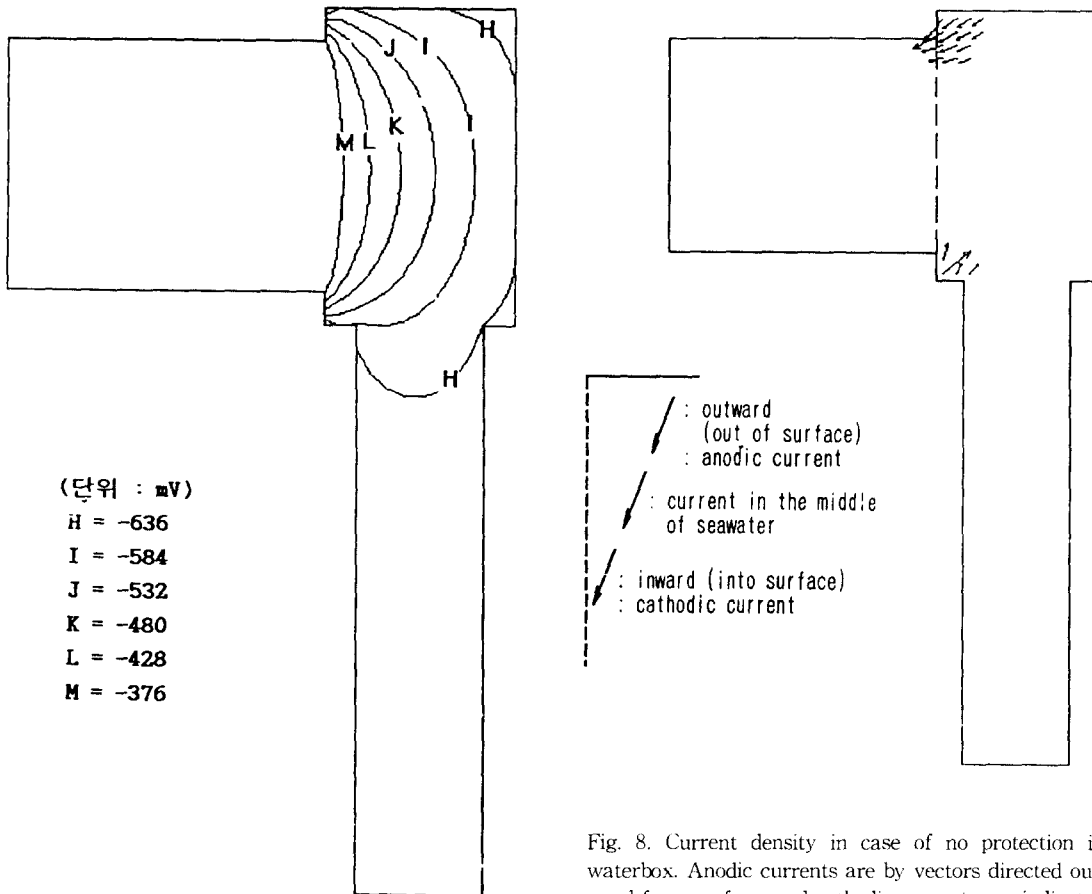


Fig. 7. Equipotential line in case of no protection in waterbox

위의 식 3)에 의해 평가해 볼 때 수실전체가 부식이 일어날 가능성을 보여주고 있다. 특히 Al Brass와 탄소강이 접촉되어 있는 탄

Fig. 8. Current density in case of no protection in waterbox. Anodic currents are by vectors directed outward from surface, and cathodic currents are indicated by inwardly facing vectors. The largest vector corresponds to a current density 0.2104(mA/cm²).

소강 부위에서의 등전위선이 조밀한 것으로 보아 이 부위에서 많은 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 그리고 입구측 파이프는 해수에서의 자연부식에 의해서 전위값이 상승했음을

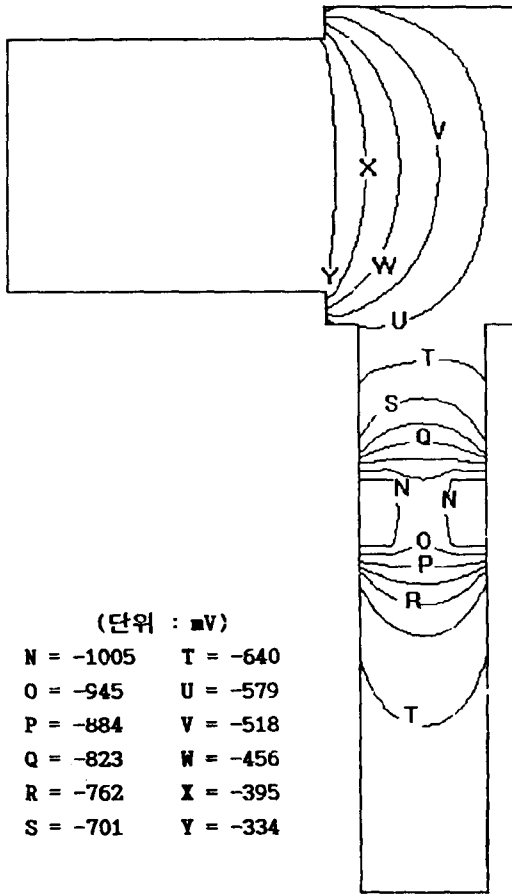


Fig. 9. Equipotential line in case of attaching Zn anodes to inlet pipe

보여주고 있다. 또한 Fig. 8에서 이러한 현상을 명확히 알 수 있다.

그림 하단에 표시된 벡터의 방향을 볼 때 탄소강의 표면에서 나오는 외향벡터는 anodic 전류, 즉 부식전류이며 해수를 통해 Al Brass 쪽으로 흘러가고 있다. 이때 Al Brass로 흘러들어오는 내향벡터는 cathodic 전류가 되며 이 전류는 cathode 금속을 방식시켜 준다. 이 원리에 의해 희생양극을 부착한 경우 희생양극에서 발생한 anodic 전류에 의해 cathode 금속은 방식전류인 cathodic 전류를 공급받아 방식이 되는 것이다. 그림을 보면 탄소강 부위에서 Al Brass 쪽으로 많은 부식전류가 흘러가고 있다. 가장 큰 부식전류 값은 2.104A/m² 이고 부식속도로 환산하면 2.39mm/y로서 심한 부식이 일어나고 있는 것이다. 이 값은

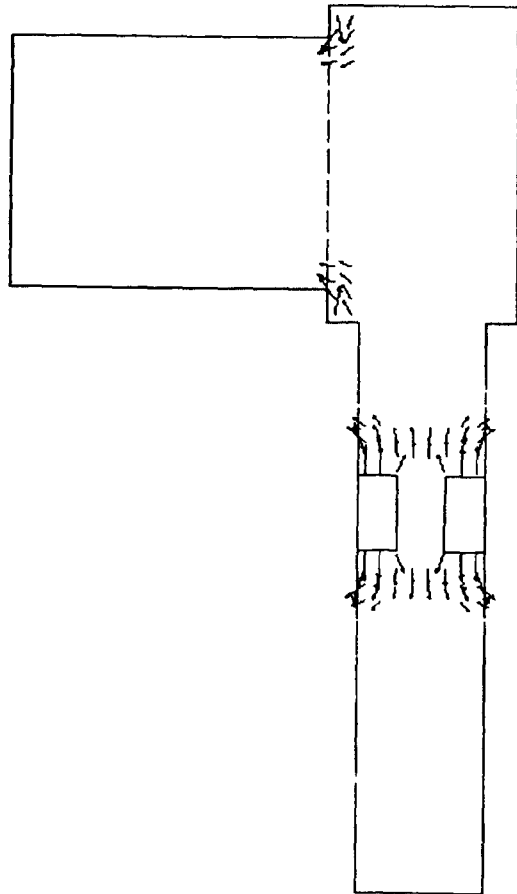


Fig. 10. Current density in case of attaching Zn anodes to inlet pipe The largest vector corresponds to a current density 0.1707(mA/cm²).

유동해수 분위기에서의 탄소강의 방식기준 전류 밀도값 0.15~0.3A/m²에 비해 너무 큰 값이므로 반드시 방식이 필요하다. Fig. 9는 입구측 파이프와 갈바닉 부식영역을 방식하기 위해 입구측 파이프에 30cm×50cm 크기의 Zn 양극을 부착한 경우의 전위분포이다.

등전위선 T까지 Zn에 의해 영향을 받고 있으며 나머지 부분은 부식이 일어나고 있음을 보여준다. Fig. 10은 Fig. 9의 전위분포를 가질 때의 전류밀도분포로서 갈바닉 부식이 심하게 일어나는 부위에서 전류밀도는 1.28A/m²이며 부식속도로는 1.46mm/y이다.

Fig. 8의 경우와 비교하여 부식속도는 상당히 감소하였으나 방식기준 전류밀도값 범위에 는 상당히 미달하므로 이 부위에서 부식이 심

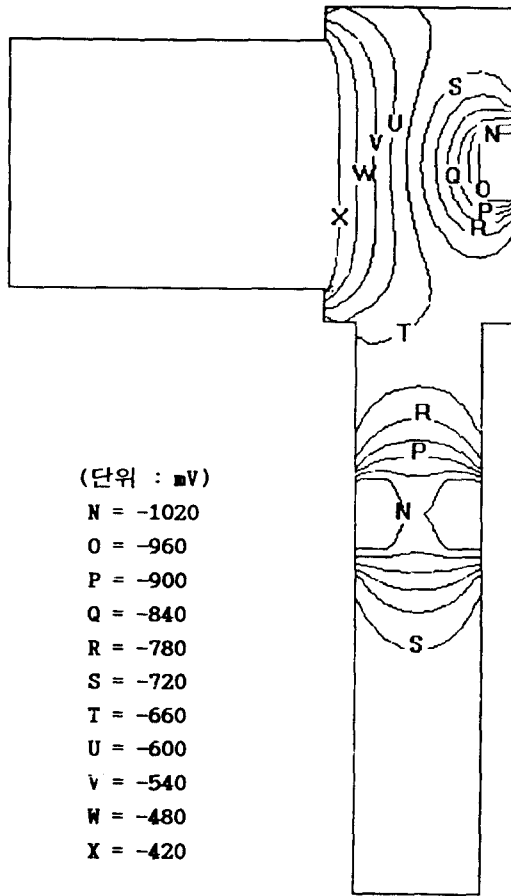


Fig. 11. Equipotential line in case of attaching Zn anodes to inlet pipe and waterbox wall

하게 일어남을 알 수 있다. 입구측 파이프와 갈바닉 부식영역을 동시에 방지하기 위해 입구측 파이프와 수실벽에 같은 크기의 Zn 양극을 부착한 경우 전위분포를 나타낸 그림이 Fig. 11이다.

등전위선 S까지 방식이 이루어지고 있음을 알 수가 있다. 입구측 파이프 거의 대부분과 수실벽 전체가 방식이 되고 있다. Fig. 12의 갈바닉 부식영역에서의 최대 전류밀도값을 부식속도로 환산시 1.39mm/y이다.

수실벽에 Zn 양극을 부착하여 수실벽을 방지하는 것은 효과가 있지만 입구측 파이프에만 희생양극을 설치한 경우에 비해 갈바닉 부식영역은 커다란 방지효과가 없으며 아직도 방지기준에는 미달임을 알 수 있다. 위의 결과에 의해 갈바닉 부식영역에 가까운 수실 천

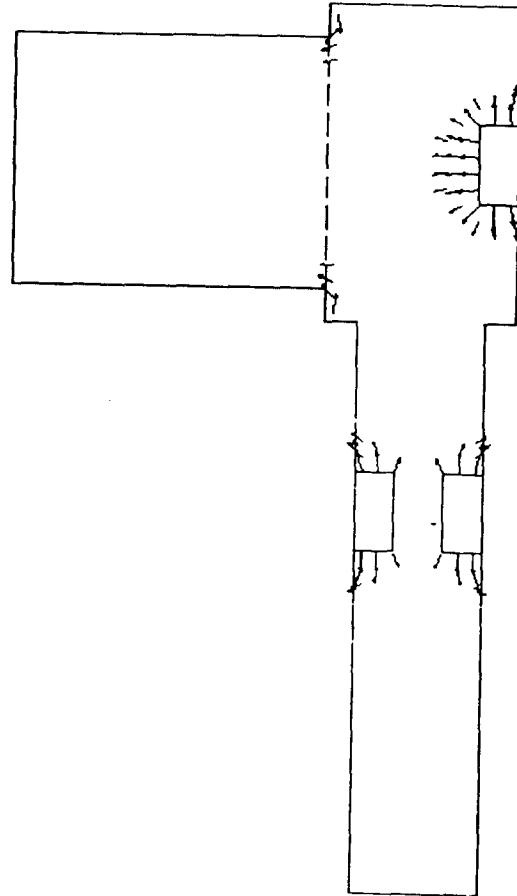


Fig. 12. Current density in case of attaching Zn anodes to inlet pipe and waterbox wall. The largest vector corresponds to a current density 0.2441 (mA/cm²).

정에 Zn 양극을 부착한 경우의 전위분포와 전류밀도분포를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다.

천정에 부착한 Zn 양극에 의해 갈바닉 부식영역을 제외한 수실전체가 대체로 방지되어 있음을 알 수 있다. 하지만 갈바닉 부식영역에서 탄소강의 부식속도를 평가해 볼때 1.33mm/y로서 이전의 경우보다 커다란 효과를 보지는 못했음을 알 수 있다. Fig. 15와 Fig. 16은 수실벽에 Zn 희생양극을 2개 부착한 경우 전위분포와 전류밀도분포를 나타내 주고 있다.

갈바닉 부식영역의 크기가 많이 감소되었음을 보여주고 있다. 하지만 부식속도는 1.32mm/y로서 갈바닉 부식영역에서는 여전히

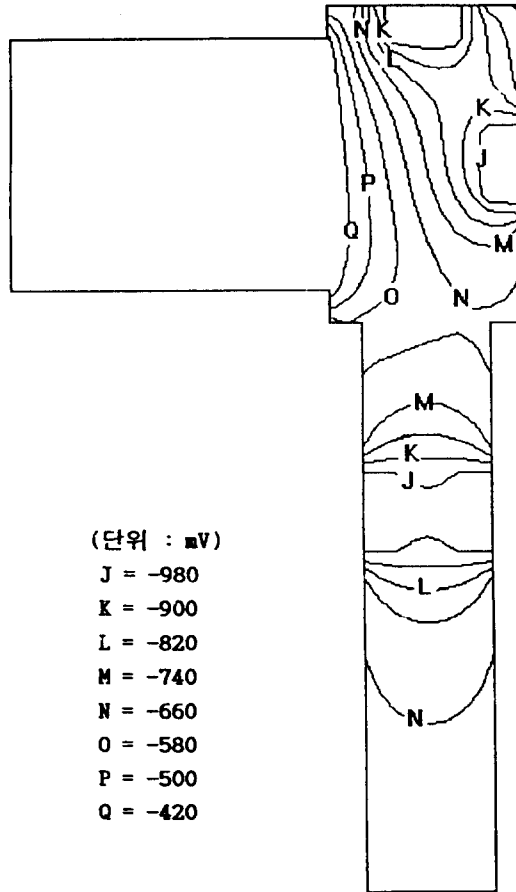


Fig. 13. Equipotential line in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof

부식이 심하게 일어나고 있음을 보여주고 있다. 위의 결과에 기인하여 Zn 희생양극을 입구측 파이프의 갈바닉 부식영역에 가장 가까운 위치에 부착시키고 파이프 중간과 하단에 부착한 경우의 전위분포와 전류밀도 분포를 Fig. 17과 Fig. 18에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 Al Brass tubesheet와 탄소강이 접촉되어 있는 부위에서 심한 전위값변화가 없으며 갈바닉 부식영역의 크기가 사라졌음을 보여주고 있다. 또한 이 부위에서의 탄소강의 전류밀도값은 $0.27 \times 10^{-11} \text{A/m}^2$ 으로서 이 값은 부식전류가 흐르지 않는다고 할 수 있을 정도의 아주 작은 값으로 최적방식이 이루어졌음을 알 수 있다. 즉 입구측 파이프와 수실의 갈바닉 부식영역에 Zn 희생양극을 알맞게 배열, 부착하면 수실

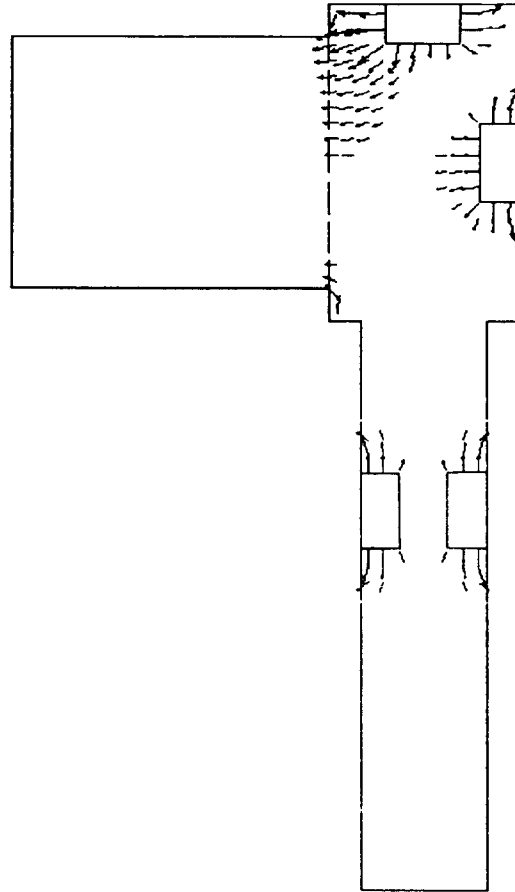


Fig. 14. Current density in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof. The largest vector corresponds to a current density 0.233 mA/cm^2 .

전체와 입구측 파이프전체를 최적 방식할 수 있음을 해석을 통하여 예측할 수 있다. 위의 수치해석 결과에 의한 갈바닉영역에서의 부식속도를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 알 수 있듯이 Zn 양극 부착위치에 따라 부식속도가 달라지며 어느 부위에 부착하느냐가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 즉 이전에 발전소에서 음극방식을 하고 있는 해수설비중에는 방식 대상면적과 희생양극에서 발생하는 방식전류를 계산하여 필요한 양극의 크기와 개수를 산정하여 고른 전류분포를 시킨다는 취지 아래 대칭배열을 해온 경우가 있다. 하지만 희생양극을 부착할 위치와 양극개수를 미리 수치해석으로 예측하여 설계한다면 불필요한 양극부착에 따른 경제적 손

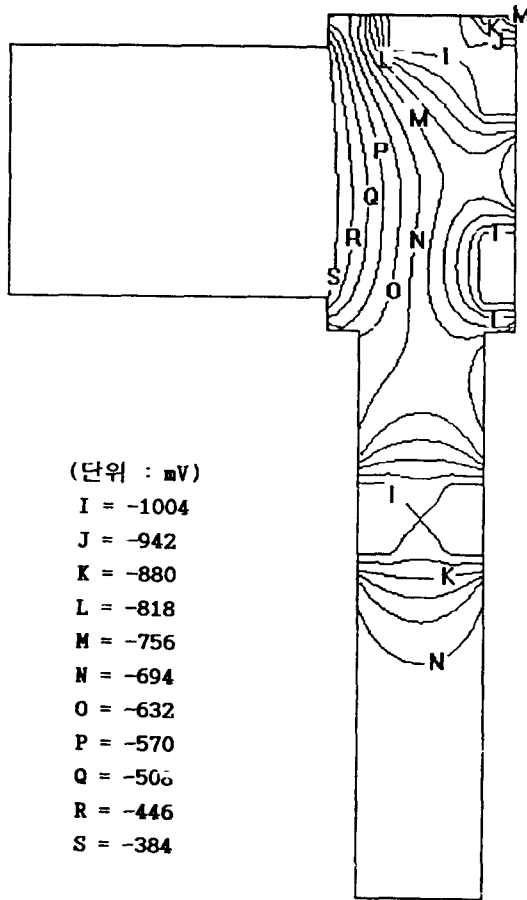


Fig. 15. Equipotential line in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof, specially 2 anodes in waterbox wall

실과 부착위치 선정오류에 의한 부식손상을 미리 막을 수 있기 때문에 최적방식효과를 이룰 수 있다. 이와같이 발전소 해수설비등 방식이 필요한 설비에는 수치해석 방법을 도입한다면 최적방식 설계에 유익하리라 생각된다.

6. 결 론

갈바닉부식과 음극방식 현상을 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 음극방식을 하지 않은 경우 Al Brass tubesheet와 탄소강 수실이 접촉되어 있는 탄소강 수실 부위에서 갈바닉부식이 심하게 일어남을 전위분포 및 전류밀도값으로 확인 할 수 있었다.

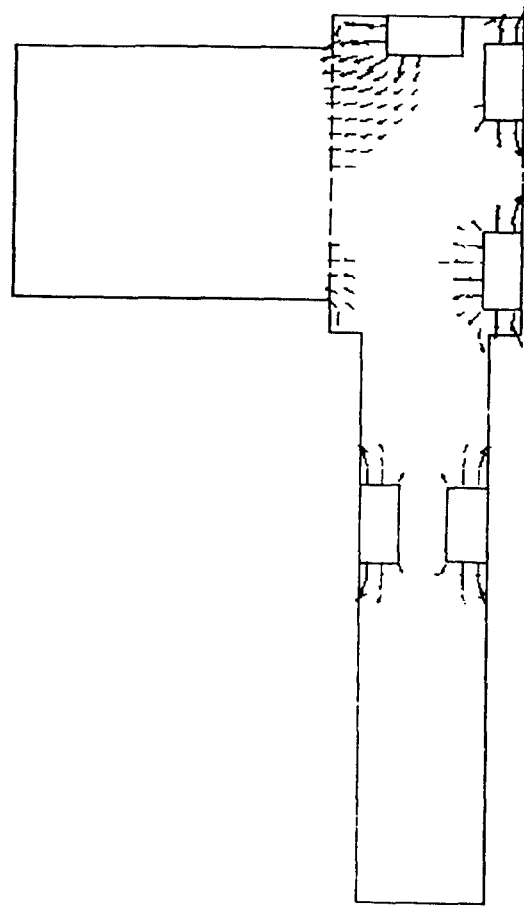


Fig. 16. Current density in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof, specially 2 anodes in waterbox wall. The largest vector corresponds to a current density $0.2318(\text{mA}/\text{cm}^2)$.

2) 수실 및 입구측 파이프를 Zn 희생양극을 부착하여 방식해석을 한 결과 입구측 파이프와 수실벽, 수실 천정에 6개의 양극을 정확히 배치하면 최적의 전위분포를 이룰 수 있고 갈바닉부식이 심하게 일어날 것으로 예측되는 부위에서의 부식속도도 거의 0에 가까운 값이 되어 최적방식이 이루어짐을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. G. A. Gehring, EPRI Research Project 1689-3, Topical Report(1983)
2. V. ASHWORTH, C.J.L.BOOKER, CATHODIC PROTECTION Theory and Practice, INSTITUTION OF CORROSION SCI-

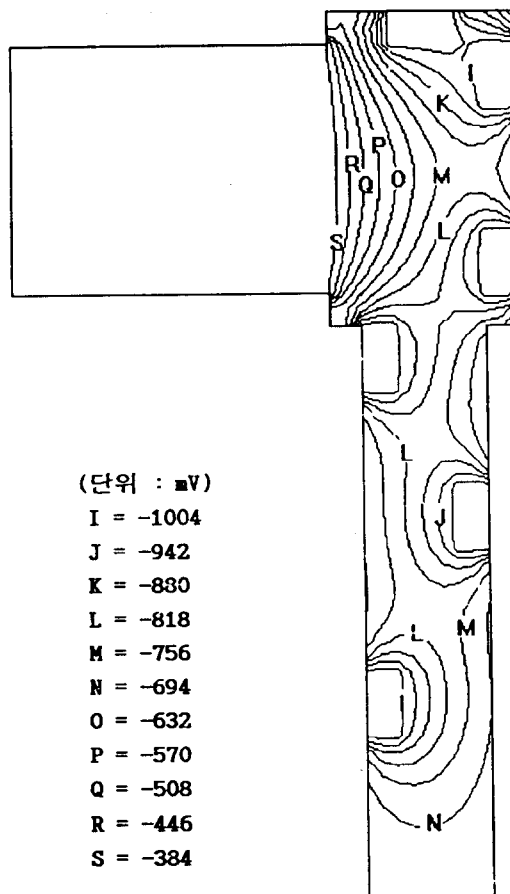


Fig. 17. Equipotential line in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof, specially 2 anodes in waterbox wall and 3 anodes in inlet pipe

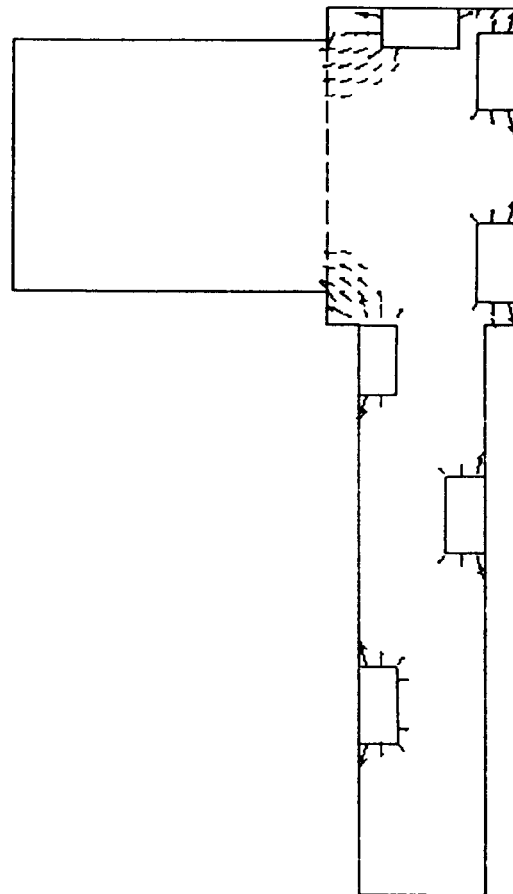


Fig. 18. Current density in case of attaching Zn anodes to inlet pipe, waterbox wall and roof, specially 2 anodes in waterbox wall and 3 anodes in inlet pipe. The largest vector corresponds to a current density 0.3021 (mA/cm²).

Table 2. Corrosion rate in galvanic corrosion area

Attached Position of Zn Sacrificial Anodes	Maximum Corrosion Rate in Galvanic Area (mm per year)
(No Protection)	2.39
Inlet Pipe : 2 anodes	1.46
Inlet Pipe : 2 anodes & Waterboxwall : 1 anode	1.39
Inlet Pipe : 2 anodes & Waterboxwall : 1 anode & Waterboxroof : 1 anode	1.33
Inlet Pipe : 2 anodes & Waterboxwall : 2 anodes & Waterboxroof : 1 anode	1.32
Inlet Pipe : 3 anodes & Waterboxwall : 2 anodes & Waterboxroof : 1 anode	nearly 0

- ENCE TECHNOLOGY, Birmingham(1986)
3. R.A.Adey & S.M.Niku, Computer Modeling in Corrosion, pp. 248, ASTM, Philadelphia, (1992)
 4. C.A.Brebbia, Topics in Boundary Element Research, pp. 99, New York (1990)
 5. S.Inagaki, N.Kikuna, T.Satou, Y.Nishino & M.Miyazaki, 火力原子力發電, 4, 401 (1993)
 6. G. Prentice, R.A.Holser, V.J.Farozic, R.B. Pond, Jr. and K.L.Cramblitt, Corrosion, 1, 75(1990)
 7. 김장순, 배병홍, 김의현, 이충근, 김종영, 한국재료학회지, 5(7), 842(1995)
 8. 川邊允志, 荒木道郎, 藤井哲, 清水湖 : 復水器工學 Handbook, pp. 99, 愛智出版, 東京 (1994)