

논문

## 선박내연기관용 해수냉각파이프라인 내면의 전기방식에 관한 연구

김성종\* · 남정길\* · 문경만\*\*

A study on the cathodic protection of sea water cooling pipe lines inner  
side for marine internal combustion engine

S. J. Kim\* · J. K. Nam\* · K. M. Moon\*\*

〈목 차〉	
Abstract	
1. 서론	3-1-2. 파이프직경이 200mm인 경우
2. 실험방법	3-1-3. 파이프직경이 300mm인 경우
3. 실험결과 및 고찰	3-2. 실험결과의 이론적 해석
3-1. 파이프 직경 변화에 따른 방식가능 거리	4. 결론
3-1-1. 파이프직경이 100mm인 경우	※참고문헌

### Abstract

Sea water has been widely used as cooling fluid of marine engine. But sea water cooling pipe line of marine internal combustion engine is exposed to severe corrosive environment condition by using sea water, therefore corrosion protection of inner side in sea water pipe line is being generally carried out zinc or rubber coating. It has been

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 재료공학과 교수

sometimes reported that the life of pipe line inner side has been significantly shortened by corrosion such as pitting, erosion, cavitation etc. However, there is few paper on economical optimum protection method of inner side in sea water pipe line. In this study, By using ICCP(impressed current cathodic protection), one of the cathodic protection method, the relation between potential distribution of sea water pipe line inner side and supplied cathodic current was investigated.

Key words : Internal combustion engine(내연기관), Cathodic protection(전기방식), Sea water pipe lines(해수 파이프라인)

## 1. 서 론

선박내연기관(Marine internal combustion engine)의 냉각용 유체 및 각종 유체의 냉각에는 대부분 해수를 사용한다. 그러나 해수는 염분농도가 높기 때문에 전도성이 좋고 염화물이온을 포함하는 것 등의 이유에 의해 국부적인 부식을 동반하기 쉽다. 또한, 해수중 부착생물이 여러작용을 하기 때문에 강이 해수에 잠겼을 때 부식량은 일반적으로 담수의 2배(0.1-2mm/Year)정도로 알려져 있다. 이에 대한 방지법의 하나로서 금속체 표면에 적절한 방식전류를 공급하여 부식을 경감 또는 방지시키는 전기방식법(Cathodic protection method)이 대단히 유효한 수단으로서 선미부나 열교환기 커버에 방식아연판을 적용하고 있다. 그러나 대부분의 배관계에서는 아연도금 및 고무코팅을 하여 내면의 방식을 행하고 있으나, 아연도금의 경우 건조된지 몇 년 되지 않아 파이프의 공식현상이 자주 발생하고 고무코팅의 경우 용접 등의 열로 인해 고무코팅이 탈락되어 떨어져 나감으로 인해 부식이 발생한다. 이를 방지하기 위해 본 연구에서는 파이프 내면에 음극방식법중 외부전원법을 적용하여 불용성 양극이 해수 파이프라인 내면 방식에 미치는 영향을 연구 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 직경 100mm, 200mm, 300mm, 길이 4m인 PVC 파이프를 길이방향으로 30mm정도 잘라내고, 두께가 0.6mm인 나강판을 PVC 파이프 내측면에 원주방향으로 밀착하도록 Fig.1과 같이 설치한 후 자연해수를 채웠다. 또한, PVC 파이프 중앙에서 좌, 우측 방향으로 방식유효거리를 측정하기 위해 파이프 외면에 20cm 단위로 위치를 표시하였다.

그리고 Potentiostat로부터 100 ~ 800mA 범위내에서 공급된 전류는 중앙에 설치된 백금양극으로 전해지며, 백금양극에서는 나강판면으로 방식전류가 흐르게 된다. 그리고 이때의 전위 분포를 측정하여 최적공급전류와 방식유효거리를 측정하였다.

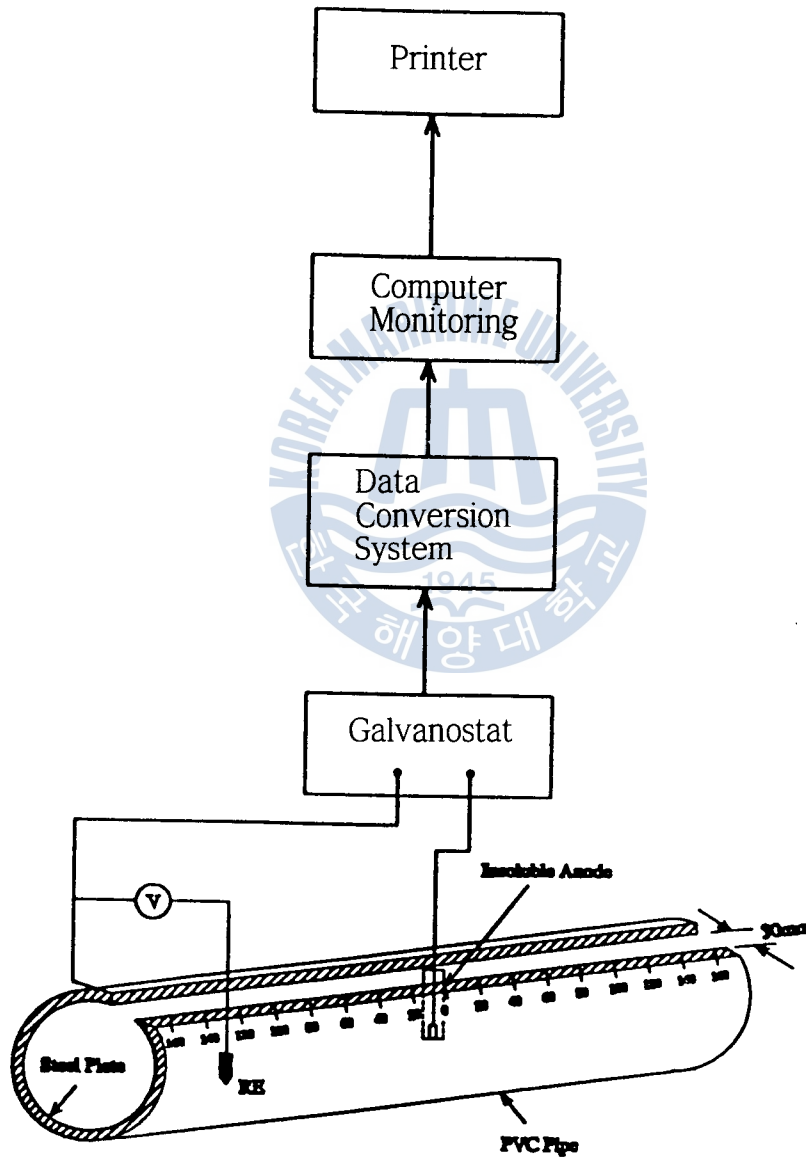


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 파이프 직경변화에 따른 방식가능거리

##### 3.1.1 파이프 직경이 100mm인 경우

Table 1에서는 파이프 내경이 100mm인 경우 측정된 전위데이터를 보여주고 있다.

Table 1 Potential of sea water pipe inner side dia 100mm at static condition.

거리(cm) 공급전류 (mA)	(단위:V/SCE)								
	0	20	40	60	80	100	120	140	160
100	-1.040	-0.816	-0.750	-0.736	-0.726	-0.709	-0.714	-0.728	-0.733
200	-1.166	-0.877	-0.763	-0.742	-0.732	-0.716	-0.716	-0.730	-0.735
300	-1.332	-0.906	-0.770	-0.745	-0.735	-0.720	-0.717	-0.729	-0.735
400	-1.384	-0.919	-0.777	-0.747	-0.738	-0.724	-0.718	-0.727	-0.734
500	-1.494	-0.938	-0.786	-0.749	-0.741	-0.727	-0.719	-0.725	-0.732
600	-1.577	-0.944	-0.787	-0.750	-0.742	-0.730	-0.721	-0.724	-0.731
700	-1.619	-0.954	-0.788	-0.751	-0.744	-0.732	-0.723	-0.724	-0.731
800	-1.660	-0.961	-0.790	-0.752	-0.744	-0.732	-0.724	-0.725	-0.730

Figure 2는 파이프내경이 100mm인 경우 각 공급전류에서 각각의 거리에 따른 음분극 전위를 나타낸 그래프이다. 거리 0cm인 양극 직하점에서는 공급전류가 증가할수록 비(卑) 방향으로 이동하며, 거리가 멀어질수록 공급전류가 감소하여 음분극이 감소하고 있다. 그리고 120cm이상에서는 부식전위 상태에 있는 것으로 사료된다.

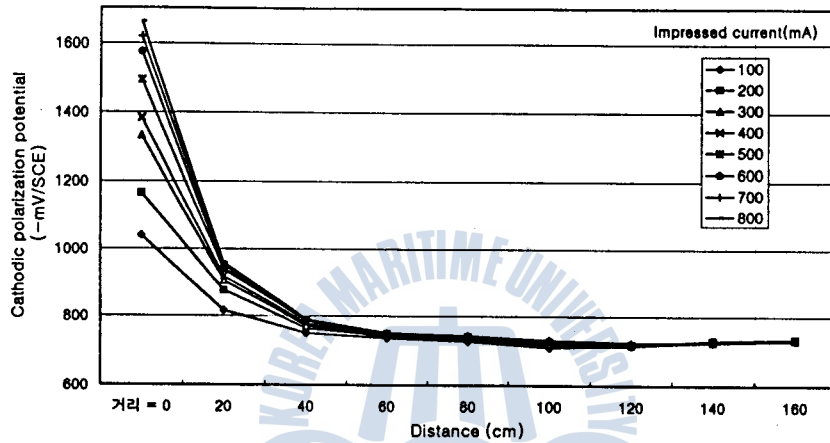


Fig.2 Relationship between cathodic polarization potential and distance at each impressed current in the case of pipe inner side dia 100mm.

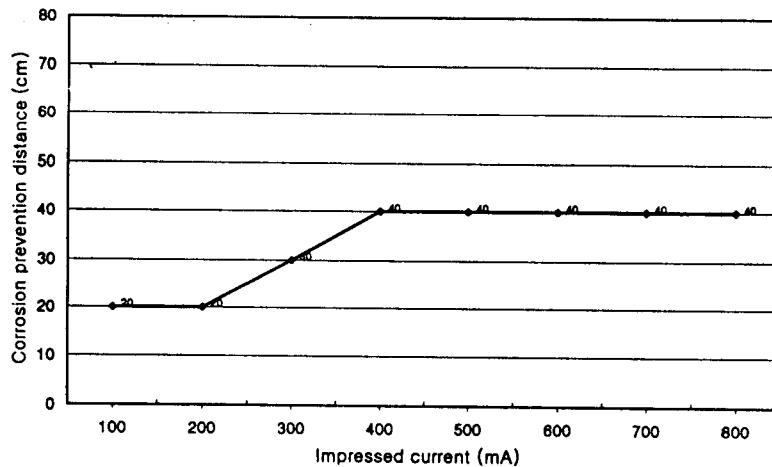


Fig.3 Relationship between corrosion prevention distance and impressed current at pipe inner side dia 100mm.

Figure 3은 파이프내경이 100mm인 경우 공급전류 변화에 따른 방식가능거리를 나타낸 그래프이다. 공급전류가 100mA, 200mA에서의 방식가능거리는 20cm였고, 300mA일때는 30cm, 그리고 400mA이상에서는 40cm였음을 알 수 있다. 따라서, 파이프 내경이 100mm인 경우의 최적공급전류는 400mA라 생각된다.

### 3.1.2 파이프 직경이 200mm인 경우

Table 2은 파이프 내경이 200mm인 경우 측정한 전위데이터이다. Figure 4는 파이프 내경이 200mm인 경우 각 공급전류에서 각각의 거리에 따른 음분극 전위를 나타낸 그래프이다. 100mm인 경우와 유사하게 거리 0cm인 양극직하점에서는 공급전류가 증가할수록 비(卑)방향으로 이동하며, 거리가 멀어질수록 공급전류가 감소하여 음분극이 적어지고 있으며, 160cm이상에서는 부식전위 상태에 있는 것으로 사료된다. Figure 5는 파이프 내경이 200mm일 때 공급전류변화에 따른 방식가능거리를 나타낸 그래프이다. 공급전류가 100mA, 200mA인 경우 방식가능거리는 120cm였고, 300mA일때는 130cm 그리고 400mA이상에서는 140cm였음을 알 수 있다. 따라서, 200mm인 경우도 최적공급전류는 400mA라고 판단된다.

Table 2 Potential of sea water pipe inner side dia 200mm at static condition.

(단위 : V/SCE)

거리 (cm)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
공급전류									

Figure 2는 파이프내경이 100mm인 경우 각 공급전류에서 각각의 거리에 따른 음분극 전위를 나타낸 그래프이다. 거리 0cm인 양극 직하점에서는 공급전류가 증가할수록 비(卑) 방향으로 이동하며, 거리가 멀어질수록 공급전류가 감소하여 음분극이 감소하고 있다. 그리고 120cm이상에서는 부식전위 상태에 있는 것으로 사료된다.

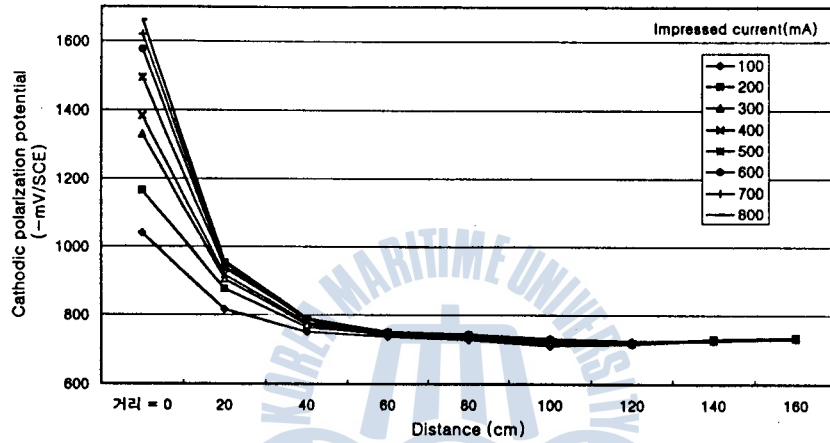


Fig.2 Relationship between cathodic polarization potential and distance at each impressed current in the case of pipe inner side dia 100mm.

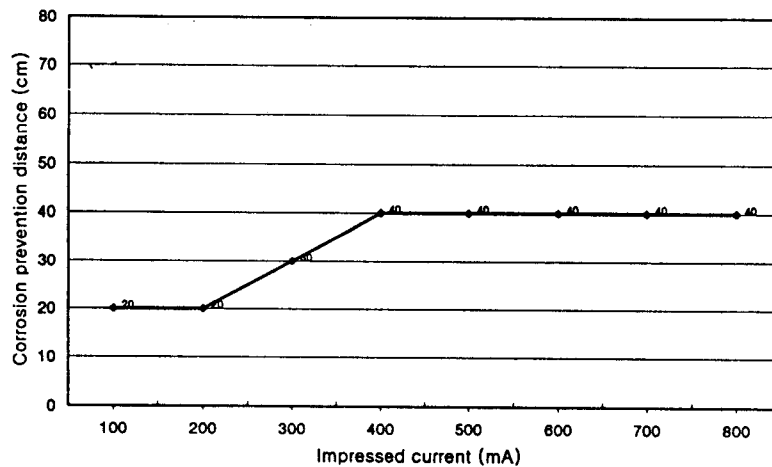


Fig.3 Relationship between corrosion prevention distance and impressed current at pipe inner side dia 100mm.

Figure 3은 파이프내경이 100mm인 경우 공급전류 변화에 따른 방식가능거리를 나타낸 그래프이다. 공급전류가 100mA, 200mA에서의 방식가능거리는 20cm였고, 300mA일때는 30cm, 그리고 400mA이상에서는 40cm였음을 알 수 있다. 따라서, 파이프 내경이 100mm인 경우의 최적공급전류는 400mA라 생각된다.

### 3.1.2 파이프 직경이 200mm인 경우

Table 2은 파이프 내경이 200mm인 경우 측정된 전위데이터이다. Figure 4는 파이프 내경이 200mm인 경우 각 공급전류에서 각각의 거리에 따른 음분극 전위를 나타낸 그래프이다. 100mm인 경우와 유사하게 거리 0cm인 양극직하점에서는 공급전류가 증가할수록 비(卑)방향으로 이동하며, 거리가 멀어질수록 공급전류가 감소하여 음분극이 적어지고 있으며, 160cm이상에서는 부식전위 상태에 있는 것으로 사료된다. Figure 5는 파이프 내경이 200mm일 때 공급전류변화에 따른 방식가능거리를 나타낸 그래프이다. 공급전류가 100mA, 200mA인 경우 방식가능거리는 120cm였고, 300mA일때는 130cm 그리고 400mA이상에서는 140cm였음을 알 수 있다. 따라서, 200mm인 경우도 최적공급전류는 400mA라고 판단된다.

Table 2 Potential of sea water pipe inner side dia 200mm at static condition.

(단위 : V/SCE)

공급전류 (mA) \ 거리 (cm)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
100	-0.998	-0.926	-0.877	-0.843	-0.813	-0.792	-0.773	-0.762	-0.755
200	-1.108	-0.978	-0.916	-0.866	-0.827	-0.803	-0.780	-0.766	-0.756
300	-1.163	-0.998	-0.930	-0.880	-0.836	-0.803	-0.781	-0.767	-0.757
400	-1.197	-1.023	-0.938	-0.880	-0.839	-0.805	-0.782	-0.770	-0.758
500	-1.235	-1.029	-0.942	-0.882	-0.841	-0.807	-0.785	-0.770	-0.759
600	-1.317	-1.032	-0.944	-0.884	-0.842	-0.809	-0.786	-0.771	-0.760
700	-1.337	-1.038	-0.946	-0.886	-0.843	-0.811	-0.786	-0.774	-0.765
800	-1.384	-1.053	-0.951	-0.889	-0.844	-0.812	-0.790	-0.778	-0.760



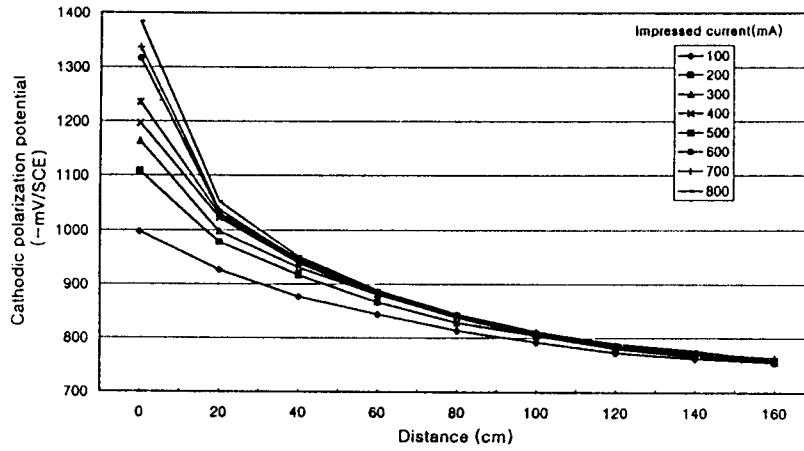


Fig.4 Relationship between cathodic polarization potential and distance at each impressed current in the case of pipe inner side dia 200mm.

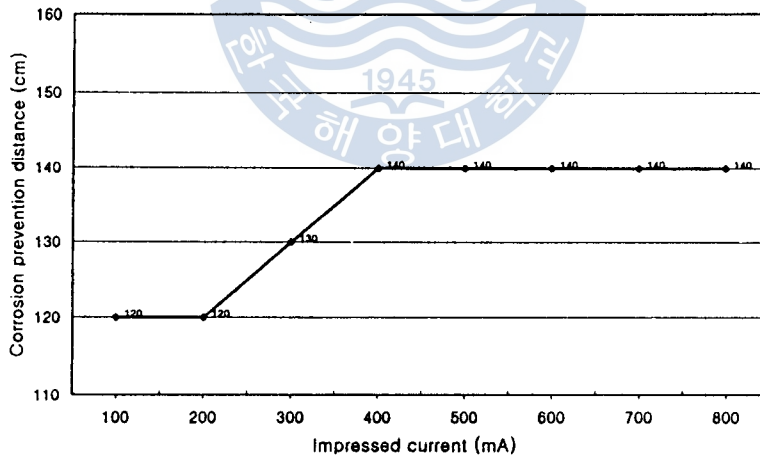


Fig.5 Relationship between corrosion prevention distance and impressed current at pipe inner side dia 200mm.

3.1.3 파이프 직경이 300mm인 경우

Table 3은 파이프 내경이 300mm인 측정된 전위데이터이다.

Table.3 Potential of sea water pipe inner side dia 300mm at static condition.

(단위:V/SCE)

거리 (cm) 공급전류 (mA)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
100	-1.004	-0.900	-0.854	-0.816	-0.792	-0.775	-0.767	-0.764	-0.761
200	-1.143	-0.970	-0.904	-0.843	-0.807	-0.787	-0.775	-0.767	-0.764
300	-1.230	-1.006	-0.928	-0.868	-0.823	-0.796	-0.784	-0.772	-0.765
400	-1.360	-1.040	-0.945	-0.880	-0.834	-0.804	-0.785	-0.775	-0.768
500	-1.440	-1.048	-0.952	-0.885	-0.838	-0.804	-0.790	-0.774	-0.766
600	-1.521	-1.073	-0.966	-0.890	-0.845	-0.814	-0.790	-0.778	-0.769
700	-1.633	-1.080	-0.979	-0.897	-0.843	-0.810	-0.788	-0.777	-0.768
800	-1.682	-1.084	-0.982	-0.899	-0.843	-0.812	-0.790	-0.777	-0.768

Figure 6은 파이프 내경이 300mm인 경우 각 공급전류에서 각각의 거리에 따른 음분극 전위를 나타낸 그래프이다. 거리 0cm인 양극직하점에서는 100mA, 200mA인 경우와 유사하게 다소 과방식의 우려는 있으며, 비(卑)방향으로 이동하며, 거리가 멀어질수록 공급전류가 적어져서 음분극이 적게 된다. 160cm를 초과해야 부식전위 상태에 있는 것으로 판단된다. Figure 7은 파이프 내경이 300mm일 때 공급전류변화에 따른 방식가능거리를 나타낸 그래프이다. 공급전류가 100mA ~ 300mA에서는 방식가능거리가 110 ~ 140cm정도이고, 400mA이상에서는 150cm였음을 알 수 있다. 따라서, 파이프 내경이 300mm인 경우에서도 100mA, 200mA인 경우와 유사하게 최적공급전류는 400mA라고 생각된다.

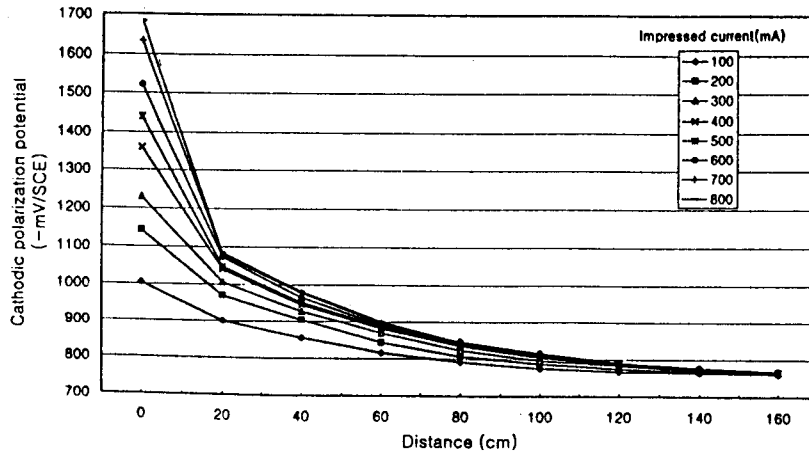


Fig.6 Relationship between cathodic polarization potential and distance at each impressed current in the case of pipe inner side dia 300mm

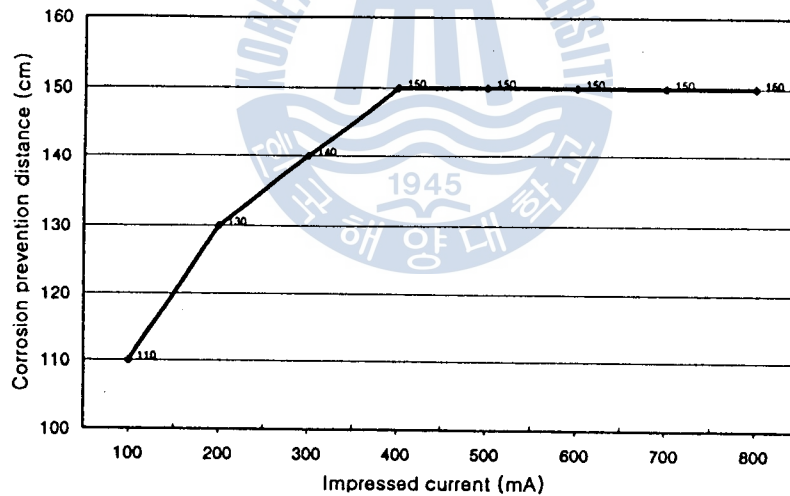


Fig.7 Relationship between corrosion prevention distance and impressed current at pipe inner side dia 300mm

### 3.2 실험결과의 이론적 해석

Figure 8은 지금까지의 실험결과를 직경의 변화와 공급전류 분포로 나타내고 있다. 즉 종합적으로 방식유효거리를 그림으로 모델링한 것이다.

이 그래프에서  $-770\text{mV/SCE}$  라인 이하는 방식가능전위이며, 파이프 내경이 100mm인 경우 방식가능거리가 40cm, 200mm인 경우가 120cm, 300mm인 경우 150cm임 알 수 있다.

따라서, 파이프 내경이 클수록 방식전위밀도가 균등해져 방식가능거리가 증가한다. 이를 증명하기 위해 Morgan의 파이프 방식유효거리와 직경과의 관계식을 통해 알아보면

$$\frac{S}{D} = 1 + 1/2 \cdot \sqrt{\frac{R}{\rho D}} \text{----- (1)}$$

여기서, S : 방식가능거리, D : 파이프 직경, R : 파이프 내면의 저항, ρ : 액의 비저항이다. 상기 (1)식에서 파이프내 방식가능거리는 파이프 직경에 비례함을 알 수 있었고, 액의 비저항(ρ)이 증가하면 방식가능거리가 감소하며, 파이프 내면 저항(R)이 증가하면 S/D가 증가하므로 파이프 내면을 도장하든가 음극분극에 의해서 침석물(沈析物)이 부착되면, 방식가능거리가 커짐을 알 수 있었다. 이상의 Morgan식에서와 같이 방식가능거리는 직경에 비례하는 것과 같은 실험의 유사성이 있었다.

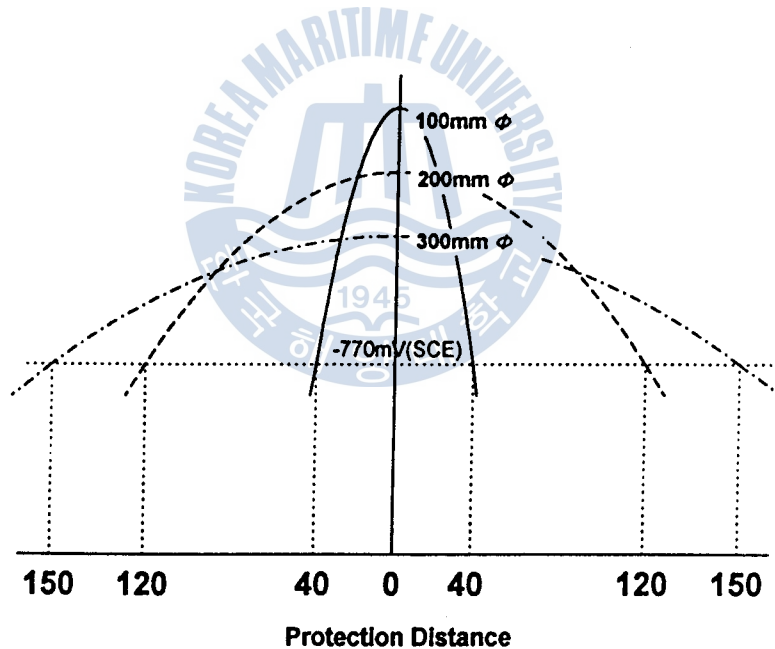


Fig.8 Relationship between pipe inner side dia and protection distance at supplied current 400mA.

Figure 9는 음극표면의 전류밀도분포에 관한 그래프이다. O는 양극의 직하점이고, P는 100mm 떨어진 지점이며 OC는 파이프 내경이 100mm, OB는 200mm, OA는 300mm인 경우의 양극 위치이다. 그리고 각 양극과 직하점 사이의 저항을 R<sub>1</sub>, 각 양극과 P점간의 저항을 R<sub>2</sub>라 한다. O인 지점에서의 인가전압  $V_0 = \eta_c + \eta_a + \Delta E$ ,  $\eta_a$ 는 거리에 상관없이 일정하

로  $V = \eta_c + \eta_d + \Delta E$ 이다. 그래서 임의의 점에서의 인가전압  $V_1 = V - \Delta E = \eta_c + \eta_d$ 에서  $\eta_{c0}$ 는 양극 직하점에서의 음분극이라 하고,  $\eta_{c1}$ 을 거리 100mm 떨어진 지점에서의 음분극이라 하면  $V_1 = \eta_{c0} + I_1 R_1 = \eta_{c1} + I_2 R_2$ 이라고 할 수 있다. 그러면

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2(V_1 - \eta_{c0})}{R_1(V_1 - \eta_{c1})} \quad (2)$$

이라 할 수 있다. 식 (2)에서 전류밀도비는 저항값의 비에 반비례하고 저항은 불용성양극 으로부터의 거리에 비례한다. 즉, 양극직하점에서 양극과의 거리와 양극에서 100mm 떨어진 지점의 거리비가 저항의 비가 된다.

즉, 파이프 내경이 100mm인 경우 OC는 50mm이므로  $\frac{CP}{OC} = \frac{R_2 C}{R_1 C} = \frac{11.1}{5} = 2.22$  이고, 파이프 내경이 200mm인 경우 OB는 100mm이므로  $\frac{BP}{OB} = \frac{R_2 B}{R_1 B} = \frac{14.1}{10} = 1.41$  이며, 파이프 내경이 300mm인 경우 OA는 150mm이므로  $\frac{AP}{OA} = \frac{R_2 A}{R_1 A} = \frac{18.02}{15} = 1.2$ 임을 알 수 있다. 상기의 식 (2)에서  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{CP}{OC}$  (파이프 내경이 100mm인 경우)  $= \frac{BP}{OB}$  (파이프 내경이 200mm인 경우)  $= \frac{AP}{OA}$  (파이프 내경이 300mm인 경우)이다. 그렇다면 파이프 내경이 100mm인 경우  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{11.1}{5} = 2.22$ 이다.

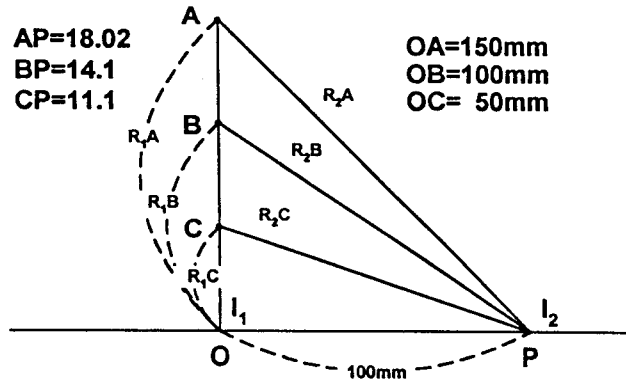


Fig.9 The current density distribution of cathode surface.

예를 들면 양극직하점의 전류밀도가 100mA이라고 가정할 경우,  $I_2$ 는 파이프 직경이 100mm인 경우  $I_2 = I_1/2.22 = 0.45I_1 = 45mA$ 이고, 파이프 직경이 200mm인 경우  $I_2 = I_1/1.41 = 0.71I_1 = 71mA$ 이며, 파이프 직경이 300mm인 경우  $I_2 = I_1/1.2 = 0.83I_1 = 83mA$ 가 되어 직경

이 클수록 멀리까지 방식전류가 공급되어 방식가능거리도 증가하게 된다.

본 실험은 해수냉각파이프라인 내면의 방식에 관한 기초적 연구로서 Morgan의 식에서와 유사성을 확인할 수 있었으나, Morgan의 식에서는 해수의 온도, 유속 등을 고려하지 않은 식이므로, 차후 유속, 온도 등의 변수를 도입한 실험을 한 후 실제 선박에 적용해서 검토해 볼 계획이다.

#### 4. 결 론

- 1) 공급전류가 증가할수록 양극 직하점의 분극전위변화는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 공급전류가 증가할수록 양극 직하점의 분극전위는 증가되어 과방식될 염려가 있으나 방식가능거리는 공급전류에 비례해서 증가하지 않는다.
- 3) 파이프 직경이 증가할수록 전류밀도의 분포가 균등하게 되어 방식가능거리는 증가하였다.
- 4) 본 실험의 결과 최적공급전류는 400mA이며, 방식가능거리는 파이프 내경이 100mm인 경우 40cm, 200mm인 경우 120cm, 300mm인 경우 150cm임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 濱田外治郎, 船舶と 海洋構造物の 防錆・防食技術と 施工法, pp 6-11, 48-53(1989)
2. 전대회·문경만, 두 개의 불용성양극에 의한 수중강대의 음극방식에 관한 연구, 한국해양대학논문집, 제14집(1979)
3. 전대회, 부식과 방식의 관리(보정판), pp 320-322, 557-559(1985)
4. 中川雅央, 電氣防食法の 實際, pp 237-247, 地人書館(1967)
5. W. von Baeckmann et al, Handbook of cathodic corrosion protection, Gulf publishing company, pp 265-289, 367-390(1997)
6. Denny A. Jones, Principles and prevention of corrosion, Maxwell Machillan International Editors, pp 437-474(1992)
7. John Morgan, Cathodic protection(second edition), NACE, pp 385-407(1987)