

함정의 선체 부식에 의한 수중 전자기 신호 예측에 관한 연구

A Study on Underwater Electro-magnetic Signature Prediction Due to Hull Corrosion of a Naval Ship

정 현 주*	양 창 섭*	주 혜 선**	전 재 진*
Hyun-Ju Chung	Chang-Seob Yang	Hae-Sun Ju	Jae-Jin Jeon

Abstract

Corrosion currents flow through the seawater due to the different electrochemical potential between a hull and a propeller under the draft line of ship. Additionally, in order to protect the hull and other sensitive anodic parts of the ship from corrosion, the corrosion protection system, called impressed current cathodic protection(ICCP) equipment has been installed in most naval ships. Those currents could be harmful to the electromagnetic silencing of the naval ship because sea mines are triggered by even a feeble field value. In this paper, we described electric and corrosion related magnetic fields by ship's galvanic corrosion and a corrosion protection system, and prediction results of electric and corrosion related magnetic fields at any depth for the model ship.

Keywords : Corrosion Current(부식 전류), Corrosion Protection System(부식방지장치), Impressed Current Cathodic Protection(강제 전류 음극 보호), Electric Field(전기장), Corrosion Related Magnetic Field(부식 관련 자기장)

1. 서론

함정을 위협하는 수중 무기체계 및 수중 감시체계에 사용되는 전자기 신호원으로는 강자성 선체에 의한 정 자기장(Static Magnetic Field)이 대표적이다. 그러나 함정 자기처리(Deperming) 및 소자(Degaussing)와 같은 함정의 정 자기장 신호에 대한 스텔스 능력이 지속적으

로 향상되면서 새로운 신호원을 탐지해야 할 필요성이 대두되고 있다.

이미 미국, 영국, 러시아 등과 같은 군사 선진국들은 1970년대부터 함정으로부터 발생하는 새로운 감응 신호원의 하나로서 함정 선체의 부식 및 부식방지장치에 의해 해수에 형성되는 수중 전자기 신호를 탐지하기 위한 무기체계 연구를 지속적으로 수행하여 왔다. 그 결과로 최근에는 정 자기장 외에 정 전기장 및 교류 전기장/자기장을 탐지할 수 있는 센서들이 개발되어 이미 무기체계에 적용되고 있는 것으로 보고되고 있다^[1,2]. 아울러 이에 대항하기 위한 방안으로 선체 부식에 의한 수중 전자기 신호를 최소화하여 함정의 생존성을

† 2012년 1월 30일 접수~2012년 3월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 부산대학교(Pusan National University)

책임저자 : 정현주(hyunju30@add.re.kr)

극대화하기 위한 노력도 병행하고 있다^{3,4)}. 그러나 국내 현실은 지금까지 관련 분야의 연구가 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 선체의 부식 및 부식방지장치에 의해 수중에서 발생하는 전자기 신호의 발생원리 및 특성을 소개하였다. 그리고 신조 함정의 설계 단계에서 수중 전자기 신호 특성 해석 및 감소대책 연구의 목적으로 수행된 선체 부식 및 부식방지장치의 양극 배치에 따른 선체 표면의 전위 분포, 임의의 수심에서의 전기장 및 부식에 의한 자기장(CRM Field : Corrosion Related Magnetic Field) 분포 예측 방안과 그 결과들을 기술하고자 한다.

2. 이론적 배경

가. 갈바닉 부식

부식의 여러 종류들 중에서 선체의 부식은 갈바닉 부식에 해당된다. 갈바닉 부식은 두개의 서로 다른 금속이 쌍을 이룬 상태로 전해질 용액(부식용액)에 놓이게 되면 두 금속의 갈바닉 전위(Galvanic Potential)차에 의하여 상대적으로 (-) 전위(이온화 경향이 큼)를 가지는 금속이 우선적으로 부식되고 (+) 전위(이온화 경향이 작음)를 가지는 다른 한 금속은 부식으로부터 보호된다. Fig. 1은 은-염화은(Ag/AgCl) 전극을 기준전극으로 하여 측정된 대표적인 금속들의 해수에서의 갈바닉 전위를 나타낸다. 여기서 부식되기 쉬운 금속, 즉 상대적인 전위가 (-)인 금속은 양극이라 하고, 상대적으로 부식으로부터 보호되는 금속, 즉 상대적인 전위가 (+)인 금속은 음극이라 부른다.

일반적으로 함정 프로펠러의 재질은 청동 합금 계통(NAB : Nickel Aluminum Bronze)이고, 선체(Hull)는 철(Iron)이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 해수에서의 NAB의 갈바닉 전위는 -0.24 V이고 철의 갈바닉 전위는 -0.59 V이다. 따라서 철의 갈바닉 전위가 NAB에 비해서 상대적으로 (-) 전위를 가지므로 철은 산화되어 부식이 되고, NAB은 부식으로부터 보호된다.

Fig. 2는 해수에서 갈바닉 부식 현상이 일어나는 원리를 보여주는 그림으로 서로 다른 갈바닉 전위를 가지는 선체와 프로펠러가 해수(전해질) 내에 존재하고, 여기서 두 금속은 프로펠러 축계로 서로 연결되어 있다. 여기서 상대적으로 (-)전위를 가지는 선체는 이온화($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)되고, 이온화 과정에서 발생한 전

자는 프로펠러 축계를 통하여 상대적으로 (+) 전위를 가지는 프로펠러로 이동한다. 따라서 부식 전류는 전자의 이동 경로와는 반대로 선체-해수-프로펠러-프로펠러 축계의 폐 루프를 통해 흐르게 되며, 이러한 전류에 의해서 다음 식 (1)과 같이 전기장과 아울러 부식에 의한 자기장이 해수에서 발생된다.

$$J = \sigma E, \nabla \times B = \mu J \tag{1}$$

여기서, J 는 전류밀도[A/m²], σ 는 해수에서의 전기전도도[S/m], E 는 전기장 세기[V/m], B 는 자속밀도[T], 그리고 μ 는 재료의 투자율[H/m]을 나타낸다.

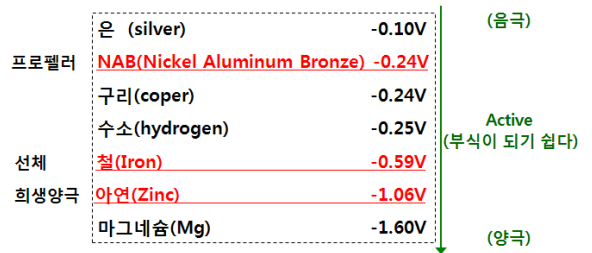


Fig. 1. Galvanic potential in the seawater(Ag/AgCl electrode is reference electrode)

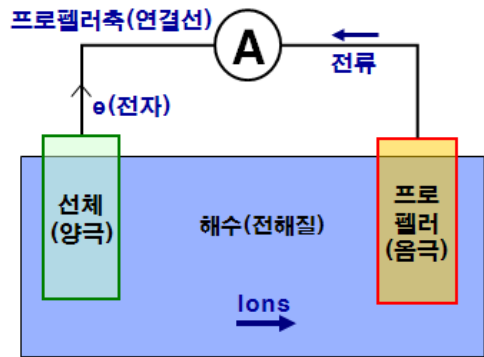


Fig. 2. Galvanic corrosion model in the seawater

나. 선체 부식 방지장치

선체의 부식을 방지하기 위한 방법으로는 일반적으로 선체 표면에 내부식성 도료를 도장하여 1차적인 부식을 방지하는 방법이 사용되고 있지만, 이러한 방법은 함정 운용 과정에 따른 국부적인 도료 손상에 의해 선체의 부식을 초래하게 된다. 따라서 일반적으로 함정 선체는 선체보다 갈바닉 전위가 낮은 금속

들을 인위적으로 부착하여 선체를 보호하는 수동 부식방지장치와 기준 전극을 통해 선체 표면의 전위를 모니터링하고 비소모성 양극을 통해 전류를 흘려줌으로써 선체 부식이 일어나지 않는 전위 조건으로 항상 유지시켜 주는 능동 부식방지장치가 사용되고 있다^[5].

수동 부식방지장치는 수면 하 선체 표면에 선체보다 갈바닉 전위가 낮은 금속들(아연, 마그네슘, 알루미늄)을 부착하여 이러한 금속들이 강철 선체보다 먼저 부식이 일어나도록 하는 장치로서 수동음극보호(Passive Cathodic Protection)장치라고도 한다. 해수에서 아연의 갈바닉 전위는 약 -1.06 V이고, 마그네슘의 갈바닉 전위는 약 -1.60 V로서 선체의 갈바닉 전위(-0.59 V) 보다 약 0.5 ~ 1.0 V 정도 낮다. 따라서 이러한 금속을 선체에 부착하면 Fig. 3과 같이 선체 및 프로펠러는 음극이 되고, 선체에 부착된 금속들은 양극이 되어 선체보다 먼저 부식이 일어나므로 선체는 부식으로부터 보호받게 된다. 여기서 선체에 부착되는 금속들은 선체보다 먼저 부식이 발생하여 선체 자체의 부식을 방지하게 되므로 희생양극(Sacrificial Anode)이라 하고, 갈바닉 부식의 경우처럼 해수에서 전기장과 자기장을 발생시키는 중요한 요인이 된다.

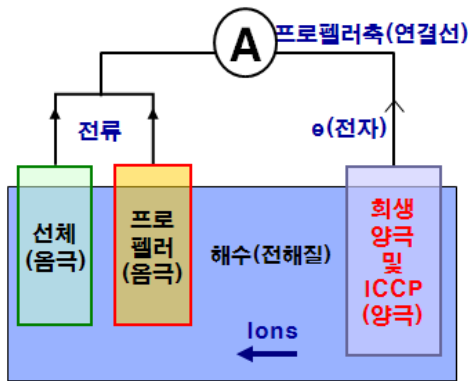


Fig. 3. Galvanic corrosion model due to corrosion protection equipment in the seawater

능동부식방지장치는 선저표면의 전위를 부식이 발생되지 않는 일정한 값으로 유지하여 선체를 부식으로부터 보호하는 장치로서, ICCP(Imposed Current Cathodic Protection) 장치가 여기에 해당된다. 일반적인 함정 선저 전위는 Ag/AgCl 재질의 기준 전극을 사용하여 측정 시 약 -0.6 V이며, 청동 프로펠러의 경우는 약 -0.2

V이므로 선저 표면 전위를 약 -0.8 V 내외로 유지한다면 선체를 부식으로부터 보호할 수 있다. 선저 표면 전위를 더욱 낮추게 되면 부식방지 측면에서는 보다 우수한 효과를 얻을 수 있지만, 이는 해수에서의 전기장 발생 증가와 선저 표면 도료 손상을 가져오는 단점이 있어 대부분의 함정에서는 -0.75 V에서 -0.90 V 정도의 범위에서 선체 전위를 유지하도록 규정하고 있다.

수동부식방지장치의 경우는 희생양극이 시간이 경과함에 따라 점진적으로 소모됨으로 인해 함정 상가 시 정기적인 정비 및 교체가 필수적이다. 반면에, 능동부식방지장치인 ICCP 장치는 선저에 주요 부위에 장착된 기준전극(Reference Electrode) 각각에서의 직류 전압을 감지하고, 선체 전위가 -0.8 V가 유지되도록 ICCP 양극과 해수를 통해 강제로 선체외부에 전류를 흘려줌으로써 선체를 부식으로부터 보호하게 한다. ICCP 장치는 비소모성 양극 금속, 기준 전극 및 전원 공급기를 사용함으로써 초기 설치비용은 수동 음극부식방지장치보다 증가하지만 유지비용이 감소한다는 장점이 있다. 따라서 최근 대부분의 해군 함정들에서는 능동 음극부식방지장치를 주로 운용하고 있다.

다. 분극 곡선(Polarization Curve)

분극 곡선은 부식 과정에서의 금속의 전위와 전류 밀도의 관계를 그래프로 나타낸 것으로서 해양 환경 조건을 가변하면서 실험적인 방법을 통해 구하게 되지만 분극 특성 실험 결과들은 대부분 비선형 특성을 나타내므로 실제 수학적 방정식으로 표현하기는 어렵다.

일반적으로 분극 현상은 양극 분극과 음극 분극으로 구분되며, 양극 분극(Anodic Polarization)은 부식이 되는 금속(Corroding Metal)에서의 전류와 전위의 관계이고, 음극 분극(Cathodic Polarization)은 부식으로부터 보호되는 금속(Non-corroding Metal)의 전류와 전위의 관계로서 부식 과정에서 발생하는 부식 전류에 의한 전위를 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 대상 함정의 재질에 대한 정확한 분극 곡선을 확보하는 것은 부식에 의한 수중 전자기 신호 해석에 있어서 매우 중요하다. 함정의 선체는 주로 AH36, HY80 계열의 철(Steel) 재질로 제작되고, 프로펠러의 경우에는 청동 합금(NAB)으로 만들어진다. Fig. 4는 해수에서의 HY80 계열의 철과 청동 합금의 분극 곡선을 근사화하여 나타낸 것이다.

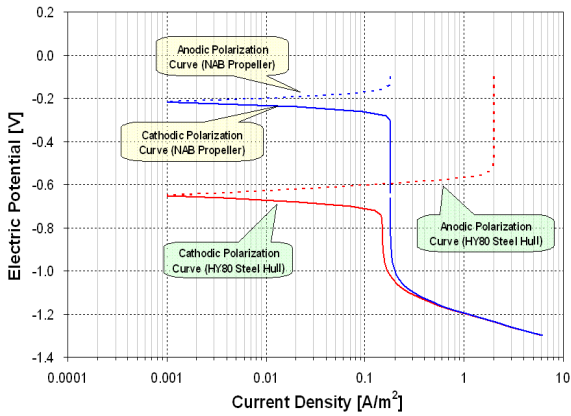


Fig. 4. Polarization curves of HY80 steel hull or NAB propeller in the seawater

라. 지배방정식(Governing Equation)^[5]

전기화학적 부식에서 부식이 진행되는 동안 양극에서 방출되는 전류와 음극에서 흡수되는 전류량은 동일하다. 따라서 부식과정에서의 전류는 다음 식 (2)와 같은 전류의 연속방정식으로 정의된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

여기서, J_x, J_y, J_z 는 각 축별 전류밀도[A/m²]를 나타낸다. 그리고 관심 대상인 수중에서의 전기장 세기는 식 (3)으로 주어진다.

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

여기서, \mathbf{J} 는 전류밀도[A/m²], V 는 선체 표면 전위[V], σ 는 매질(해수, 공기, 해저)의 전기 전도도[S/m], \mathbf{E} 는 전기장의 세기[V/m]를 나타낸다.

식 (3)은 다시 아래 식 (4)로 변환되고, 식 (4)를 식 (2)에 대입하게 되면 식 (5)를 구할 수 있게 된다. 또한 식 (5)는 식 (6)의 Laplace 방정식으로 정리될 수 있다.

$$\mathbf{J} = -\sigma \left(\mathbf{a}_x \frac{\partial V}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial V}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\sigma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 V = \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (6)$$

Laplace 방정식이 전기화학적 부식에서 지배 방정식(Governing Equation)으로 사용될 때 Fig. 5와 같이 음극 표면(Γ_1), 양극 표면(Γ_2), 페인트 도장으로 인해 전기적으로 절연이 되는 경계면(Γ_3), 해수와 공기의 경계면(Γ_4), 및 해수와 해저의 경계면(Γ_5) 등은 수치해석 모델의 경계조건(Boundary Condition)이 된다. 특히, 정상상태(Steady State)에서는 페인트 도장으로 인해 전기적으로 절연이 되는 경계면, 양극 표면, 음극 표면 등에서는 아래 식 (7) ~ 식 (10)과 같이 일정한 전위를 가지게 된다.

$$V(\mathbf{r}) = 0 \quad (\text{도장이 된 선체표면, } \mathbf{r} \in \Gamma_1) \quad (7)$$

$$V(\mathbf{r}) = V_a \quad (\text{양극 표면, } \mathbf{r} \in \Gamma_2) \quad (8)$$

$$V(\mathbf{r}) = V_c \quad (\text{음극 표면, } \mathbf{r} \in \Gamma_3) \quad (9)$$

$$\nabla^2 V(\mathbf{r}) = 0 \quad (\text{해수, } \mathbf{r} \in \Omega) \quad (10)$$

여기서, \mathbf{r} 은 측정하고자 하는 위치좌표 벡터, V_a 는 양극에서의 전위, V_c 는 음극에서의 전위를 나타낸다.

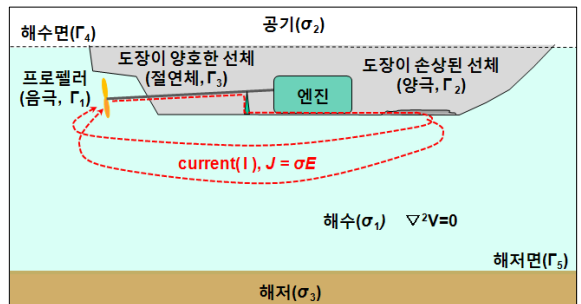


Fig. 5. Boundary condition of computational model for the underwater electro-magnetic signature analysis due to hull corrosion

도장 손실이 전혀 없는 선체 표면은 전류가 흐르지 않으므로 식 (7)은 다음 식 (11)과 같은 결과를 가진다.

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \sigma \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = -\sigma \mathbf{n} \cdot \nabla V = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

여기서, \mathbf{n} 은 선체 표면과 수직방향인 단위법선벡터를 나타낸다. 식 (8)과 식 (9)의 양극 및 음극에서의 전류밀도는 식 (12)와 식 (13)과 같이 정리된다.

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_a = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = f_a(V) = C_2 \quad (12)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_c = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = f_c(V) = C_3 \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 f 의 함수로 표시된 전위와 전류밀도 사이의 관계는 Fig. 4의 각 재질별 분극 곡선에 의해서 결정되며, 구하고자 하는 임의 위치 (\mathbf{X})에서의 전위 값은 아래 식 (14)로부터 계산된다.

$$V(\mathbf{X}) = \int_{\partial\Gamma_1, \partial\Gamma_2} \left[(G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \frac{\partial V(\mathbf{Y})}{\partial n} - V(\mathbf{Y}) \frac{\partial G(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\partial n}) \right] ds \quad (14)$$

$$G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{4\pi|\mathbf{X} - \mathbf{Y}|} \quad (15)$$

여기서 \mathbf{X} 는 전기장 세기를 구하고자 하는 위치에서의 위치 좌표 벡터이고, \mathbf{Y} 는 경계면 Γ_1, Γ_2 표면의 위치 좌표 벡터이다. 이렇게 구한 전위 값을 식 (3)의 $\mathbf{E} = -\nabla V$ 에 대입하면 전기장 세기를 구할 수 있다. 또한 임의 위치에서의 전기장 세기를 계산하는데 있어서 추가적인 고려 사항으로는 해수면 경계(Γ_4) 및 해저면 경계(Γ_5)에서 공기, 해수, 해저면과 같은 매질의 전도율 차이에 의한 영상 전류원의 효과도 반영되어야 한다.

3. 선체 모델링 및 해석 조건

선체 부식에 의한 수중 전자기 신호 해석에서 주 관심 영역은 선체와 해수가 접하는 부분이므로 경계요소 해석 기법을 이용하여 전자기 신호를 해석한다. 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 경계요소 해석 수행을 위한 수면 아래 선체의 전산 모델을 surface geometry 형태로 제작하였다. 그리고 주 추진 프로펠러의 경우, 프로펠러의 blade를 실제 형상과 동일한 형태로 제작한다면 교류 전기장 특성 해석에 있어서는 해석의 정밀도를 다소 향상시킬 수 있겠지만, 본 논문에서 제시할 정

전기장 특성 해석과 관련해서는 프로펠러의 형상보다 해수에 노출되어 부식 전류가 흐르는 전극이 되는 선체 및 주 추진 프로펠러의 표면적을 정확하게 모델링하는 것이 해석의 정확도를 향상시키는데 더 중요한 요소 중의 하나이다. 따라서 geometry 생성과 요소 분할 등의 편리성을 위해 주 추진 프로펠러는 원반 형태로 간략화 하였다. 모델 함정의 전자기 신호 해석에 사용된 선체 및 주 추진 프로펠러가 해수와 접촉되는 표면적은 Table 1과 같다.

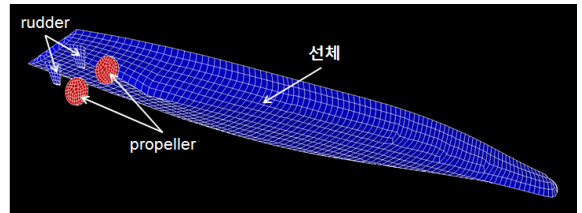


Fig. 6. Surface geometry and mesh of a model ship for the underwater electro-magnetic signature analysis due to hull corrosion

Table 1. 전자기 신호 해석을 위한 모델 함정 제원

항목	표면적[m ²]	재질	개수
주 추진 propeller	27.0/개	NAB	2
propeller를 제외한 수면 하 선체	1,780	steel	-

모델함의 부식에 의한 전자기 신호 해석에 필요한 조건은 다음과 같이 가정하였다. 일반적으로 함정 선체는 방식을 위한 목적으로 내부식성 도료를 이용하여 해수와 접하는 선체 표면을 코팅하지만 함정의 운행 과정에서 이러한 코팅이 손상을 받아서 해수와 접하게 된다. 이렇게 선체 표면의 코팅이 손상받아서 해수와 접하게 되는 것을 도장손실이라고 정의한다. 함정의 운항 중 선체의 도장 손실 범위는 수면 아래 선체 면적의 최대 15 % 정도가 되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 선체의 도장 손실을 선체 부식 및 전기장 측면에서 최악의 조건인 15 %로 가정하였으며, 프로펠러는 내 부식성 도료를 이용한 코팅이 이루어지지 않으므로 도장 손실이 100 %인 bare 상태로 설정하였다. 또한, 해석의 중요한 변수중의 하나인 해수의 전도율은 진해만의 경우, 겨울에는 약 3.5 S/m,

여름에는 약 4.5 S/m이므로 겨울과 여름의 평균치인 4 S/m라고 가정하였으며, ICCP의 양극 배치는 Fig. 7과 같이 2 pairs, 3 pairs 및 4 pairs로 배치한 세 가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 그리고 해석은 수중 전자기 신호 전용 해석 도구인 영국 FNC사의 FNREMUS 소프트웨어를 사용하였다⁶⁾.

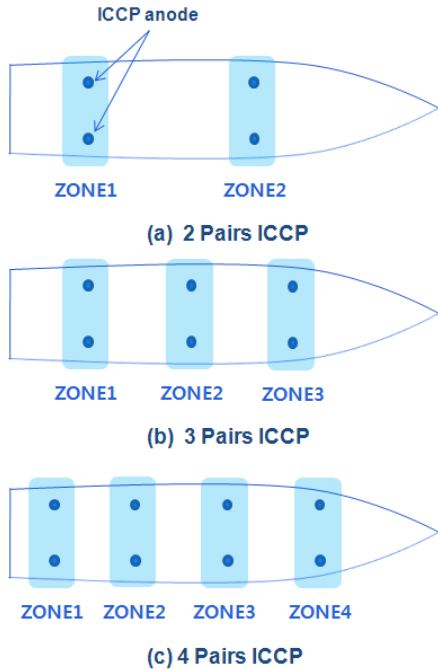


Fig. 7. ICCP anode arrangement

4. 해석 결과

본 논문에서는 부식방지장치(ICCP)가 동작하지 않는 경우와 부식방지장치가 동작하는 경우로 구분하여 해석을 수행하였다. 그리고 선체의 부식 상태를 확인하기 위한 선체 표면의 전위분포와 임의의 수심에서의 전기장 및 부식 관련 자기장 특성을 예측하였다. 여기서 부식방지장치가 동작하지 않는 경우라 함은 순수하게 선체 자체의 부식 현상에 의한 선체 표면의 전위 및 임의의 수심에서의 수중 전자기 신호를 해석함을 의미한다.

가. 선체 부식 전위

Fig. 8은 ICCP를 동작시키지 않은 상태에서 해수를

통해 흐르는 선체와 프로펠러간의 부식 전류에 의한 선체의 전위 분포(Ag/AgCl 전극 기준)를 보여주는 그림이다. 일반적으로 Ag/AgCl 전극 기준 선체의 전위가 -0.75 V 이상이면 선체 부식이 발생되고, -0.9 V 이하이면 선체의 코팅이 파괴되는 것으로 알려져 있다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 ICCP가 동작하지 않는 경우, 모델함의 프로펠러를 제외한 선체 전위 분포는 $-0.531\text{ V} \sim -0.624\text{ V}$ 의 범위로서 선체의 부식 발생 조건을 충족하므로 선체 부식이 발생할 것으로 판단된다.

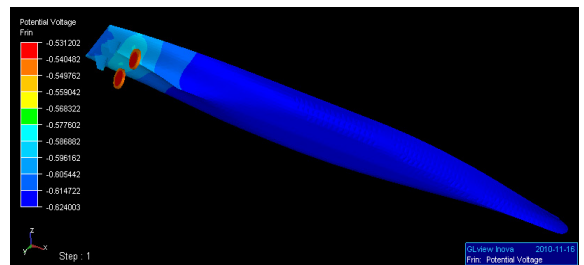


Fig. 8. Hull potential at no ICCP condition

반면, ICCP를 동작시켜 선체표면에 강제적으로 전류를 흘려줌으로서, 선체 표면의 전위가 -0.75 V 이하가 유지되도록 한 경우의 해석 결과를 살펴보자. Fig. 9 ~ Fig. 11은 ICCP 양극배치 조건에 따른 선체 전위 분포 해석 결과를 2차원으로 보여주는 그림이고, Fig. 12는 함정 중심축을 기준으로 ICCP 양극 배치 조건에 따른 선체 전위 분포 해석 결과를 보여준다. 여기서 ICCP를 동작시킨 경우 프로펠러와 ICCP 양극을 제외한 대부분의 선체 전위가 $-0.90\text{ V} \sim -0.79\text{ V}$ 범위에 존재함을 알 수 있다. 따라서 선체 방식 충족 전위 -0.75 V 이하를 만족함으로 선체가 부식으로부터 보호되는 조건임을 확인할 수 있다.

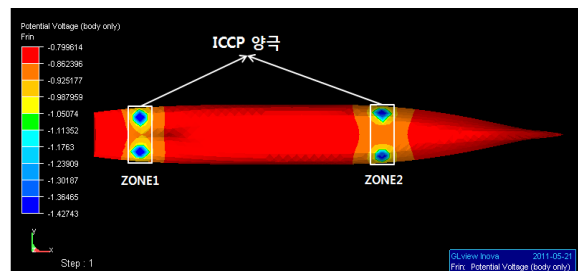


Fig. 9. Hull potential at 2 pairs ICCP arrangement

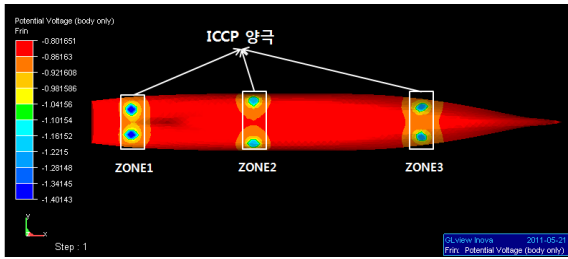


Fig. 10. Hull potential at 3 pairs ICCP arrangement

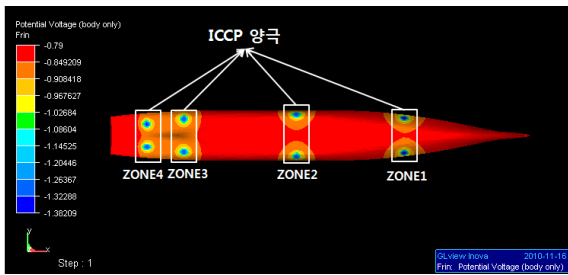


Fig. 11. Hull potential at 4 pairs ICCP arrangement

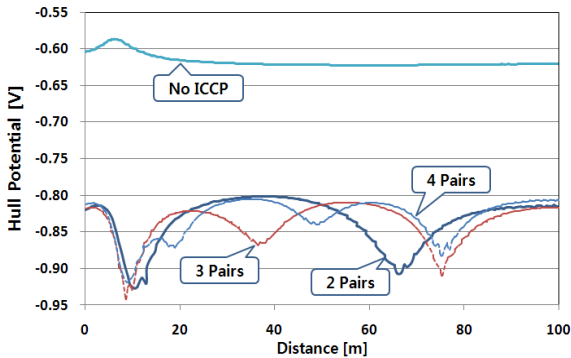


Fig. 12. Hull potential at the keel line of a ship as ICCP anode arrangement

나. 선체 부식에 의한 전기장

Fig. 13과 Fig. 14는 ICCP 동작 조건에 따른 함정 중 심축 아래 임의의 수심에서의 각 축별 전기장 해석 결과를 나타낸 것으로, 신호 크기 예측 결과는 해석 조건 별 상대적인 비교를 위해 정규화하여 나타내었다.

Table 2는 ICCP 동작 유무에 따른 전기장 세기의 최대 절대치 크기를 비교한 표로서 ICCP 미 동작 시와 동작 시 ICCP 양극 배치 조건별로 비교하면 ICCP 양극의 개수가 증가함에 따라 그 크기가 감소함을 알 수 있는데 4 pairs ICCP 양극 배치의 경우, 2 pairs 대비

수평 종축 성분(x축)은 대략 46 % 수준까지 감소하고, 수직 성분(z축)은 대략 42 % 수준까지 감소함을 알 수 있었다. 그리고 ICCP 동작 전과 4 pairs ICCP 양극 배치의 경우를 비교하면, 수평 종축성분은 비슷한 수준이나 수직성분은 4 pairs 배치의 경우 ICCP 미동작의 경우 대비 73 % 수준임을 알 수 있다. 이러한 결과는 ICCP 양극의 개수를 증대시키고 배치를 최적화 한다면, 함정으로부터 발생하는 전기장 세기를 ICCP 동작 전보다 더 감소시킬 수 있다는 것을 보여준다. 그리고 ICCP 양극 배치의 개수가 증가함에 따라서 전기장 세기가 감소하는 이유를 살펴보면, 부식조건에서 ICCP 양극으로부터 상대적으로 음극이 되는 선체와 프로펠러로 전류가 흐르게 된다. 이러한 전류의 경로는 ICCP 양극 개수의 증가와 함께 감소하게 되고, 전류 경로의 감소는 전기장의 신호원이 되는 전기 다이폴의 크기를 감소시키는 결과를 초래하므로 선체에 배치되는 ICCP 양극의 개수 증가와 함께 전기장 세기도 감소하게 된다.

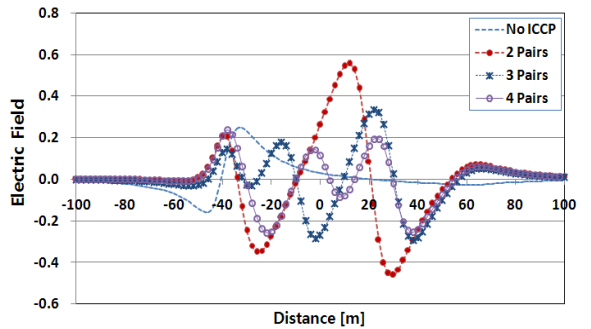


Fig. 13. Horizontal electric fields(E_x) below keel line of the ship as ICCP anode arrangement

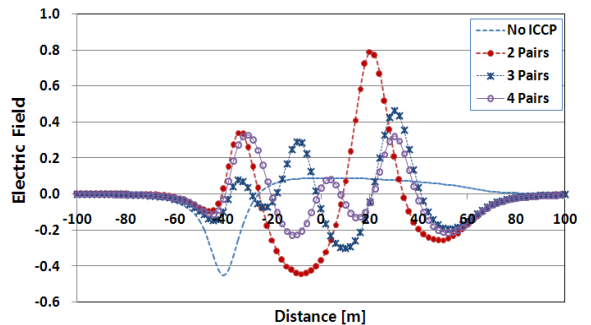


Fig. 14. Vertical electric fields(E_z) below keel line of the ship as ICCP anode arrangement

Table 2. Electric fields as ICCP operation condition

	수평성분(Ex)	수직성분(Ez)
ICCP 미 작동	0.25	0.45
2 pairs	0.56	0.79
3 pairs	0.33	0.46
4 pairs	0.26	0.33

결론적으로 ICCP 양극의 개수를 증대시키면 함정으로부터 발생하는 전기장 세기가 감소되므로 함정 스텔스 측면에서는 매우 유리하다. 따라서 현재 일반 상선의 경우는 선체 부식 측면만 고려하면 되므로 2 pairs ICCP 장치를 적용하고 있지만, 함정의 경우는 선체 부식 방지와 함께 생존성 측면도 고려해야 하므로 4 pairs 이상의 양극 배치를 가지는 ICCP 장치를 주로 운용하고 있는 실정이다.

다. 부식 관련 자기장(CRM field) 해석

선체 부식에 의한 전류가 선체-해수-프로펠러-프로펠러 축계의 폐 루프를 형성하며 흐르게 되면 이 전류에 의해 전기장과 함께 부식에 의한 자기장(이하 CRM 신호)도 발생된다. 따라서 임의의 수심에서 전기장 해석과 마찬가지로 부식방지장치(ICCP) 동작 조건에 다른 모델함의 CRM 신호 특성을 해석하고, 그 결과를 분석하였다.

Fig. 15와 Fig. 16은 ICCP 미 작동 시 동일한 수심에서 함정 중심축 아래와 함정 중심축으로부터 좌현으로 8 m 수평 이격된 위치에서의 CRM 신호를 각 축별로 보여준다. 신호의 크기는 전기장과 마찬가지로 해석 조건별 상대적인 비교를 위해 정규화하였다. 해수에서 부식에 의한 전류는 함정 종축 방향으로 흐르고 자기장은 전류와 직교하는 방향으로 발생되므로 Fig. 15에서 알 수 있듯이 함정 중심축 아래에서는 수평 횡축(y축) 성분이 가장 크고 나머지 성분은 거의 영에 가까운 크기를 가진다. 하지만 측정 위치가 함정 중심축으로부터 좌현 혹은 우현으로 이격된 위치에서는 Fig. 16과 같이 수평 횡축 성분은 상대적으로 작아지고 수평 종축(x축)과 수직(z축) 성분이 증가하는 특성을 가진다. ICCP 동작 유/무에 따른 CRM 신호 크기 비교는 함정 중심축 아래에서 가장 큰 크기를 가지는 수평 횡축 성분(By)을 대상으로 수행하였다. Fig. 17은 ICCP 동작 유/무에 따른 함정 중심축 아래에서의 수평 횡축 자기

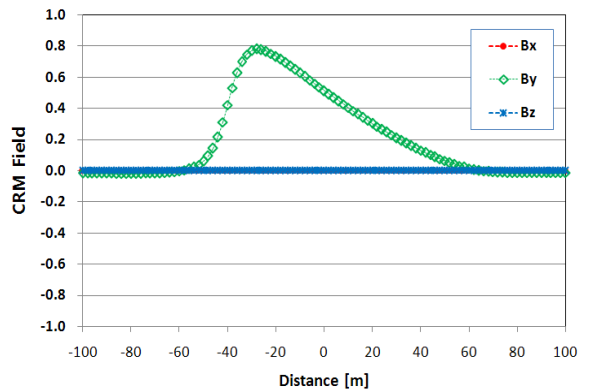


Fig. 15. CRM signature below keel line due to hull corrosion at no ICCP condition

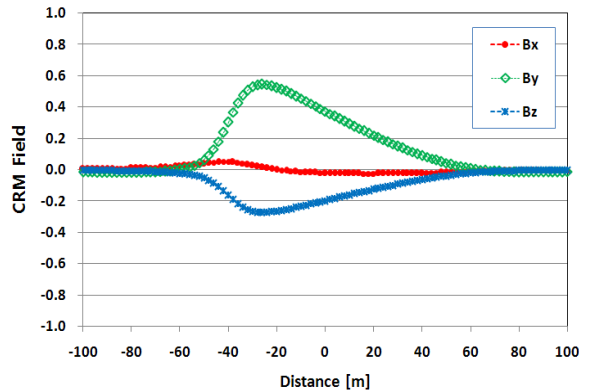


Fig. 16. CRM signature due to hull corrosion at the 8 m away position from below keel line at no ICCP condition

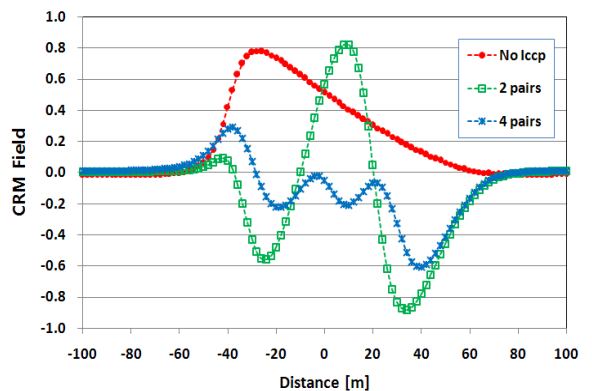


Fig. 17. Athwart CRM signature(By) as ICCP anode arrangement

장 성분을 비교한 그림이고, Table 3은 ICCP 동작 유/무에 따른 CRM 신호의 최대 절대값 크기를 비교한 표이다. 그림에서 알 수 있듯이 ICCP 양극 배치가 4 pairs인 경우는 ICCP 동작 전 대비 CRM 신호의 크기가 78 % 수준임을 알 수 있었고, 2 pairs 대비 CRM 신호의 크기가 69 % 수준까지 감소함을 알 수 있었다. 따라서 ICCP 동작 시 양극의 개수를 증대시키고 양극 별로 적절한 전류를 인가한다면 전기장과 같이 ICCP 미 동작 상태보다 낮은 수준의 CRM 신호를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Maximum CRM signature as ICCP anode arrangement

	NO ICCP	2 Pairs	4 Pairs
수평성분 (By)	0.78	0.88	0.61

5. 결론

본 논문에서는 선체의 부식 및 부식방지장치에 의해 수중에서 발생하는 전자기 신호의 발생원리 및 특성을 소개하였다. 그리고 신조 합정의 설계 단계에서 수중 전자기 신호 특성 해석 및 감소대책 연구의 목적으로 수행된 선체 부식 및 부식방지장치의 양극 배치에 따른 선체 표면의 전위 분포, 임의 수심에서의 전기장 및 부식에 의한 자기장 분포 예측 방안과 그 결과들을 제시하였다.

해석 결과, 최대 전기장 세기는 4 pairs 양극 배치의 경우, ICCP 동작 시는 미 동작 시 대비 수평 종축 성분은 대략 거의 비슷하고, 수직 성분은 대략 23 % 감소하는 수준임을 알 수 있었다. 그리고 부식 관련 자

기장의 최대 크기는 수평 횡축 성분 기준으로 22 % 감소하는 수준임을 알 수 있었다. 그러므로 ICCP 양극 배치를 최적화하면 ICCP 미 작동 시보다 부식 관련 전자기 신호의 크기를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로 본 연구를 통해 개발된 기법들을 활용하면 합정 설계단계에서의 대상 합정에서 발생하는 부식 관련 전자기 신호에 대한 예측이 가능함은 물론 합정에서의 전자기 정숙화 통계 및 대책 수립 시에도 활용이 가능하다. 아울러 본 연구 결과들은 향후 해상 자기 측정 시설에서의 실 합정에 대한 비교 시험을 통해 추가적으로 검증될 예정이다.

References

- [1] Richard Holt, "The Source of Electric Fields in Seawater, and Their Measurement", Warship Cathodic Protection 2001, 21~23 August 2001.
- [2] H. Jones, "Development of a Low A Noise Electric Field Sensor for Measurement and Ranging Applications", MARELEC 2004, 17~18th March 2004.
- [3] P. M. Holtham, I. G. Jeffrey, "ELF Signature Control", UDT 96, July, pp. 486~489, 1996.
- [4] 양창섭 외, "합정 발생 수중 전자기장 신호의 특성 및 측정 기법", 한국군사과학기술학회지, 제9권 제2호, pp. 11~19, 2006.
- [5] Godwin Kakuba, "The Impressed Current Cathodic Protection System", Master's Thesis, Technische Universiteit of Eindhoven, 2005.
- [6] A J Keddie, FNREMUS Detailed Modeller User Guide, Issue 4, FNC Dorking Surrey, 2007.