

선체 부식 및 부식 방지장치에 의한 수중 전기장 신호 해석 방안 연구

A Study on Analysis Method of Underwater Electric Field Signature due
to Ship's Corrosion and Corrosion Protection System

정 현 주*
Chung, Hyun-Ju

양 창 섭*
Yang, Chang-Seob

전 재 진*
Jeon, Jae-Jin

ABSTRACT

The galvanic corrosion of a vessel, or systems fitted to minimize the ship's corrosion such as ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) system and sacrificial anodes, can lead to significant electrical current flow in the sea. The presence of vessel's current sources associated with corrosion will give rise to detectable electric field surrounding the vessel and can put it at risk from mine threats. For this reason, it is necessary to design corrosion protection systems so that they don't only prevent a hull corrosion but also minimize the electric field signature.

In this paper, we describe theoretical backgrounds of underwater electric field signature due to corrosion and corrosion protection system on naval vessels and analysis results of the electric field according to the ship's hull and it's propeller coating damage and ICCP anode displacement.

주요기술용어(주제어) : Galvanic Corrosion(갈바닉 부식), Electric Field(전기장), Sacrificial Anode(희생 양극), Impressed Current Cathodic Protection System(능동 부식방지장치)

1. 머리말

함정에 의해 수중에서 발생하는 전자기장 신호는 기뢰 체계 및 감시체계의 센서들을 통해 쉽게 탐지되므로 함정 생존성에 큰 위협이 되고 있다. 함정에서 발생하는 수중 전자기장 신호원(Underwater Electro-magnetic Field Signature)들을 발생 원인별로 분

류하면 강자성 재질의 선체 및 탑재장비에 의한 정(Static) 자기장, 선체와 프로펠러의 이종 금속 간에 전위차에 의해 발생하는 갈바닉 부식 및 이를 방지하기 위한 부식 방지장치에 의한 정 전기장/자기장, 프로펠러(Propeller)의 회전에 의한 부식 및 부식 방지 전류의 변조에 의한 교류(Alternate) 전기장/자기장, 함내 전력공급장치(모터, 발전기, 배전반, 전력선 등)에 의한 교류 전자기장 신호등으로 구분될 수 있다^[1~6]. 과거의 감응 기뢰체계 및 감시체계들은 주로 강자성 선체에 의한 정 자기장 신호를 탐지하여 왔다. 그러나 자기처리 및 소자 등을 통하여 정 자기장 신

† 2008년 2월 22일 접수~2008년 4월 4일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : hyunju30@add.re.kr

호에 대한 함정의 자기 스텔스 능력이 지속적으로 향상되고, 최근에는 정 자기장 신호 외에 정 전기장 및 교류 전기장/자기장 신호를 탐지할 수 있는 다양한 센서들이 개발되어 디지털 신호처리 기술들과 접목됨으로써 표적 식별 능력 또한 크게 향상되었다^[7-8]. 특히, 함정 선체의 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion) 및 ICCP(Im impressed Current Cathodic Protection) 장비, 희생 양극(Sacrificial Anode) 등과 같은 선체 부식방지장치들은 해수를 통해 직접적인 부식전류 및 부식방지전류를 형성하게 되고 이로 인해 수중 전자기장 신호를 발생시켜 위협무기체계의 주요 탐지원이 될 수 있다. 그러므로 함정 부식방지장치를 이용한 함정의 선체 부식방지 연구와 더불어 수중에서 발생하는 전자기장 신호를 최소화하기 위한 노력이 필요하지만 지금까지 국내에서는 관련분야의 연구가 극히 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 함정 선체의 갈바닉 부식 및 부식방지장치에 의해 수중에서 발생하는 정 전기장 신호의 발생원리 및 특성을 자세히 소개하고, 선체 부식 및 부식방지장치에 의한 수중 전자기장 해석 도구인 FNREMUS 소프트웨어를 이용하여 반 원통 형태의 함정 등가모델에 대해 선체 도장 손실(Coating Damage) 및 ICCP 장비의 양극(Anode) 배치 변화에 따른 선체 표면의 전위 분포 및 임의 수심에서의 전기장 신호 분포 예측 결과들에 대해 상세히 기술하고자 한다.

2. 이론적 배경

가. 선체 갈바닉 부식

부식(Corrosion)이란 금속 표면의 원자가 그 결정 격자를 이탈해서 주변 환경(해수, 토양등)과 전기화학적 또는 화학적 반응을 일으킴으로써 금속이 손상을 받는 현상이다. 이처럼 부식의 가장 중요한 특징은 전기 화학적 과정(Electrochemical Mechanism)에 의해 발생한다는 것이고 이러한 전기화학적 과정에서 요구되어지는 조건은 양극, 음극, 연결회로 및 전해질 용액이다.

선체의 부식은 부식의 여러 현상 중에서 갈바닉

부식에 해당된다. 갈바닉 부식은 두개의 서로 다른 금속이 쌍을 이룬 상태로 전해질 용액(부식용액) 내에 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 보호받게 되는 현상을 의미한다.

그림 1은 Ag/AgCl(은-염화은) 전극을 기준전극으로 하여 측정된 주요 금속들에 대한 해수 환경에서의 갈바닉 전위 특성을 나타낸다. 여기서 부식되기 쉬운 금속, 즉 상대적인 전위가 (-)인 금속을 양극이라 표현하고 부식으로부터 보호되는 금속, 즉 상대적인 전위가 (+)인 금속을 음극이라 한다.

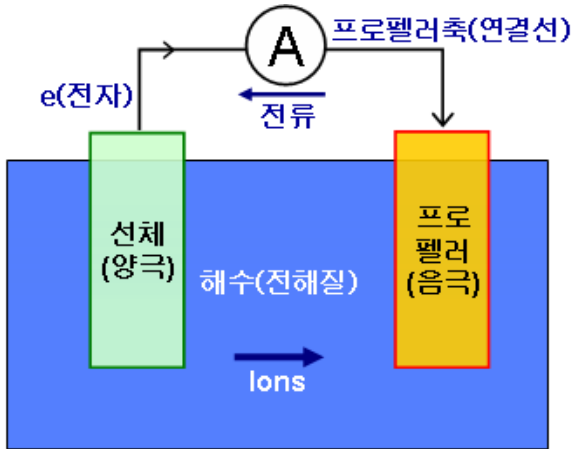
	은(Silver)	0.10V	(음극)
프로펠러	NAB	-0.24V	
	구리(Coper)	-0.24V	
	수소(Hydrogen)	-0.25V	
선체	철(Iron)	-0.59V	Active (부식이 되기 쉽다)
희생양극	아연(Zinc)	-1.06V	
	마그네슘(Mg)	-1.60V	(양극)

[그림 1] 해수 환경에서의 갈바닉 전위(Ag/AgCl 전극 기준)

보통 함정 프로펠러의 재질로는 청동합금(NAB : Nickel Aluminum Bronze)이 사용되고, 선체(hull)는 철(Iron)로 제작된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 Ag/AgCl 전극을 기준으로 한 해수에서의 NAB의 갈바닉 전위는 약 -0.24V이고 철의 갈바닉 전위는 약 -0.59V이다. 따라서 철의 갈바닉 전위가 NAB에 비해 상대적으로 (-) 전위를 가지므로 철은 산화되어 부식이 일어나는 양극이 되며, NAB은 부식으로부터 보호되어 음극이 된다.

그림 2는 선체 갈바닉 부식의 원리를 나타내는 그림이다. 프로펠러에 비해 상대적으로 (-) 전위를 가지는 선체는 이온화($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$)되어 전자는 프로펠러 축계를 거쳐 프로펠러로 이동하고 철 이온은 해수를 통해 프로펠러로 이동한다. 이러한 원리로 선체-해수-프로펠러-프로펠러 축계-선체로 연결

되는 페루프를 형성하며 전류가 흐르게 되고 이 전류에 의해 함정으로부터 전기장 신호(SE Field : Static Electric Field) 및 자기장 신호(CRM Field : Corrosion Related Magnetic Field)가 발생된다.



[그림 2] 갈바닉 부식 모델

나. 선체 부식방지 장치

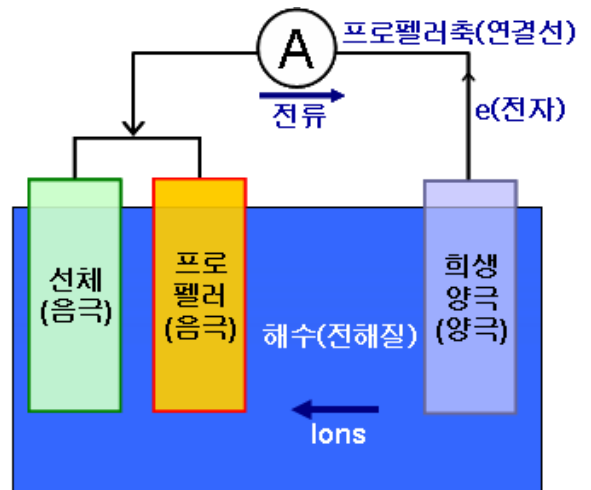
선체의 부식을 방지하기 위한 방법으로는 일반적으로 선저 표면에 내부식성 도료를 도장하여 1차적인 부식을 방지하는 방법이 사용되고 있지만, 이러한 방법은 장기적인 함정 운용에 따른 국부적인 도료 손상에 의해 선체의 부식이 초래된다. 따라서 일반적으로 함정 선체는 선체보다 갈바닉 전위가 낮은 금속들을 인위적으로 부착하여 선체를 보호하는 수동 부식방지 장치와 비소모성 양극 및 기준 전극을 통해 선체 표면의 전위를 부식이 일어나지 않는 전위 조건으로 항상 유지시켜 주는 능동 부식방지장치가 있다.

1) 수동부식방지장치

수면하 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.

그림 1에서 알 수 있듯이 해수에서 아연의 갈바닉 전위는 약 $-1.06V$ 이고, 마그네슘의 갈바닉 전위는 약 $-1.60V$ 로서 선체의 갈바닉 전위($-0.59V$) 보다 약 0.5

$\sim 1.0V$ 정도 낮다. 따라서 이러한 금속을 선체에 부착하면 그림 3과 같이 선체 및 프로펠러는 음극이 되고 선체에 부착된 금속들은 양극이 되어 선체보다 먼저 부식이 일어나므로 선체는 부식으로부터 보호받게 된다. 여기서 선저에 부착되는 금속들은 선체보다 먼저 부식이 발생하여 선체 자체의 부식을 방지하게 되므로 희생양극이라 하고, 갈바닉 부식의 경우처럼 해수에서 전기장과 자기장을 발생시키는 주요인이 된다. 그림 3은 희생양극에 의한 갈바닉 부식 원리를 나타내며, 그림 4는 실제 함정 선체에 설치된 금속(아연) 판들을 보여주고 있다.



[그림 3] 희생양극에 의한 갈바닉 부식 모델



[그림 4] 선저에 설치된 아연판

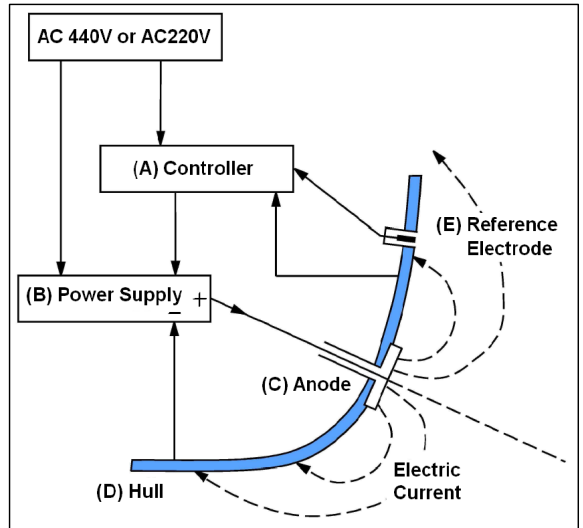
2) 능동부식방지장치(Active Cathodic Protection)

능동부식방지장치는 인위적으로 전류를 발생시켜 선체 표면의 전위를 부식이 발생되지 않는 일정한 전위로 유지하여 선체를 부식으로부터 보호하는 장치로서 능동 음극보호장치라고도 한다. 일반적인 능동부식방지장치로는 ICCP(Impressed Current Cathodic Protection) 장비가 있다.

Ag/AgCl를 기준 전극으로 사용하여 함정 선체 전위를 측정하면 약 -0.6V이며 청동 계통의 프로펠러의 경우는 약 -0.24V정도가 된다. 만일 선체 표면 전위를 -0.8V 부근으로 유지하게 된다면 선체를 부식 현상이 발생하지 않는 불활성(Immune) 영역으로 유지할 수 있다. 만일 선체 표면 전위를 더욱 낮추게 되면 부식 방지측면에서는 더 우수한 효과를 얻을 수도 있지만 이로 인한 전기장 신호의 크기가 증가하고 선체 표면 도료의 조기 손상을 초래하는 단점이 있어 대부분의 세계 각국 함정에서는 -0.75V에서 -0.90V 정도의 전위를 유지하고 있다. 수동 음극부식방지장치의 경우는 희생양극이 시간이 흐름에 따라 소모되므로 함정 상가 시 정기적인 정비 및 교체가 필요하지만, 능동 음극부식방지장치는 비소모성 양극 금속, 기준 전극 및 전원 공급기를 사용함으로써 초기 설치비용은 수동 음극부식방지장치보다 높지만 유지비용이 감소하므로 최근 대부분의 해군 함정들에서는 능동 음극부식방지장치를 설치하고 있는 추세이다. 다음은 능동 음극부식방지장치인 ICCP 장비의 작동 원리를 나타낸다.

- ① 그림 5의 (A)Controller는 각각의 기준 전극(E)을 통해 선체 전위를 측정하여 (B)Power Supply로 보내준다. Power Supply는 수신된 전위를 기준으로 선체 전위가 -0.8V를 유지하기 위한 최적의 (+) 직류전류를 양극(C)을 통해 해수로 흘려줌으로서 선체를 부식으로부터 보호하게 한다.
- ② 양극(C)은 선체(D)를 관통하여 설치하고 방식전류(Protective Current)가 방출되어야 하므로 선체와 전기적으로 절연이 되어야 한다.
- ③ 기준전극(E)의 경우에도 선체(D)를 관통하여 설치하고 선체와 전기적 절연이 되어야 한다. 이 기준전극을 통해 선체가 부식으로부터 보호되는지

를 실시간으로 판단하게 된다. 이상과 같이 ICCP 장비는 선체의 부식을 방지하기 위하여 인위적으로 방식전류를 해수를 통하여 선체에 흘려주게 되므로 수중 전자기장 신호를 발생시키는 주요인이 된다.



[그림 5] ICCP의 개념도

다. 수학적 이론

전기화학적 부식에서 부식이 진행되는 동안 양극에서 방출되는 전류와 음극에서 흡수되는 전류는 시간에 무관하게 일정하므로 부식과정에서의 전류는 다음 식 (1)과 같이 연속방정식으로 정의된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

여기서, J_x, J_y, J_z 는 각 축별 전류밀도[A/m²]를 나타낸다. 그리고 관심대상인 수중에서의 전기장 세기는 식 (2)로 주어진다.

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{2}$$

여기서, \mathbf{J} 는 전류밀도[A/m²], V 는 전위[V], σ 는 해수의 전기 전도도[S/m], \mathbf{E} 는 전기장 세기[V/m]를 나타낸다.

식 (2)는 다시 아래 식 (3)으로 변환되고, 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 식 (4)를 구할 수 있게 된다. 따라서 식 (4)는 식 (5)의 Laplace 방정식으로 정리될 수 있다.

$$\mathbf{J} = -\sigma \left(\mathbf{a}_x \frac{\partial V}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial V}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$-\sigma \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) = -\sigma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (5)$$

Laplace 방정식이 전기화학적 부식에서 지배방정식 (governing equation)으로 사용될 때 다음 식 (6)~(8)과 같이 양극과 음극 및 도장이 된 선체 표면은 수치해석 모델의 경계조건이 된다.

$$\mathbf{J} = C_1 \text{ (도장이 된 선체표면)} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_a = C_2 \text{ (양극)} \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_c = C_3 \text{ (음극)} \quad (8)$$

여기서, \mathbf{J} 는 도장 손실이 전혀 없는 선체 표면의 전류밀도이고, \mathbf{J}_a 는 양극에서의 전류 밀도이며, \mathbf{J}_c 는 음극에서의 전류밀도를 나타낸다. 그리고 C_1, C_2, C_3 은 상수이다.

도장 손실이 전혀 없는 선체 표면은 전류가 흐르지 않으므로 식 (6)은 다음 식 (9)와 같은 결과를 가진다.

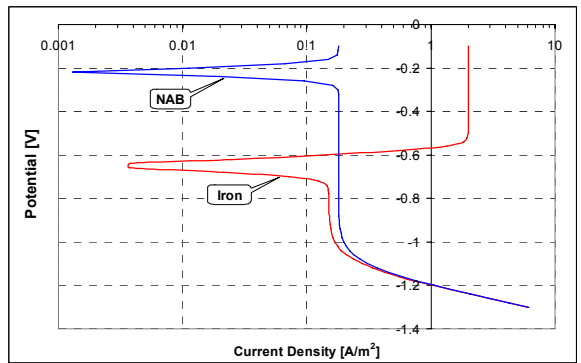
$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

여기서, \mathbf{n} 은 선체 표면과 수직방향인 법선벡터를 나타낸다. 식 (7)과 (8)의 양극 및 음극에서의 전류밀도는 식 (10)과 (11)과 같이 정리된다.

$$\mathbf{J}_a \cdot \mathbf{n} = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = f_a(V) = C_2 \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_c \cdot \mathbf{n} = -\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = f_c(V) = C_3 \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서 f 의 함수로 표시된 전위와 전류밀도 사이의 관계는 각 재질별 분극 곡선 (Polarization Curve)에 따라 비선형적인 특징을 가진다. 분극 곡선은 부식 과정에서 발생하는 전류밀도와 전위와의 관계로서 그림 6은 해수에서의 HY80계열의 철(iron)과 청동합금(NAB)의 분극 곡선을 나타낸다.



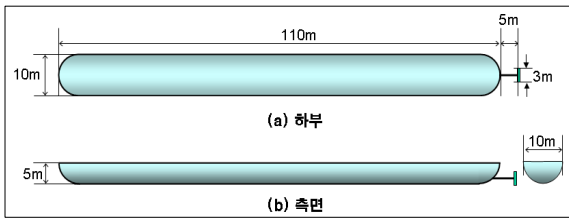
[그림 6] 철과 청동합금의 해수에서의 분극 곡선

3. 등가모델 합정의 형상 모델링

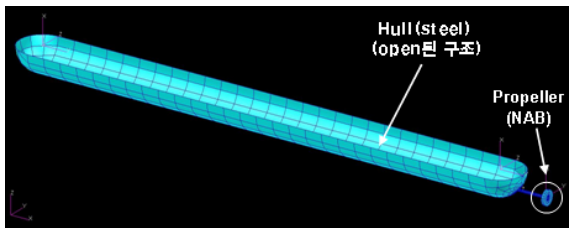
부식 및 부식방지장치에 의한 수중 전자기장 신호 해석을 위하여 먼저 그림 7과 같이 길이 115m, 빙폭 10m, 흘수 5m인 수상함 형태의 3차원 등가 모델을 상용 Pre-processor용 도구인 PATRAN을 이용하여 생성하였다. 본 해석에서 사용된 모델은 반 원통 형태이며 프로펠러는 원반(Disc) 모양으로 간략화 하였다. 해수에서 선체의 부식에 의한 수중 전자기장 신호를 해석하기 위해서는 해수와 접촉되어 전기화학적 반응을 야기하는 수면하 합정 형상만이 요구된다. 또한 수중에서 전파되는 전기장 신호는 해수(Sea)와 공기(Air)간의 상이한 전도율 특성으로 인하여 해수면에서 반사되는 특성을 가지므로 수상함의 경우 수치

해석시 대칭 구조(Symmetry) 해석을 하게 된다. 따라서 함정 형상에서 수면과 접촉되지 않는 선체의 윗면은 그림 8과 같이 개방된 구조를 가져야 한다.

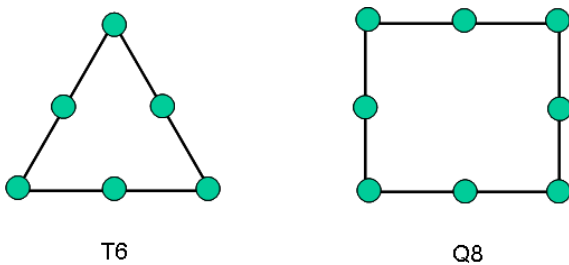
그림 8은 경계요소 해석을 위해 PATRAN에서 수행된 3차원 모델 함정의 형상과 분할된 요소(Element)를 나타내며, 제안된 모델에 적용된 요소의 형태는 T6(Triangular Six Noded Elements) 또는 Q8(Quadratic Eight Noded Elements) 형태의 표면 요소(Surface Element)이다. T6는 삼각형 형태의 요소로서 그림 9와 같이 6개의 노드를 포함하고 있으며 Q8은 사각형 형태의 요소로서 8개의 노드를 포함하고 있다. 제안된 모델에서 생성된 요소는 19개의 T6과 671개의 Q8로 구성되어 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 전기장 신호 해석에 있어서 중요한 변수중의 하나인 해수의 전도율(σ)은 4 [S/m]로 가정하였다.



[그림 7] 등가모델 형상



[그림 8] 경계요소 해석을 위하여 분할된 모델함정



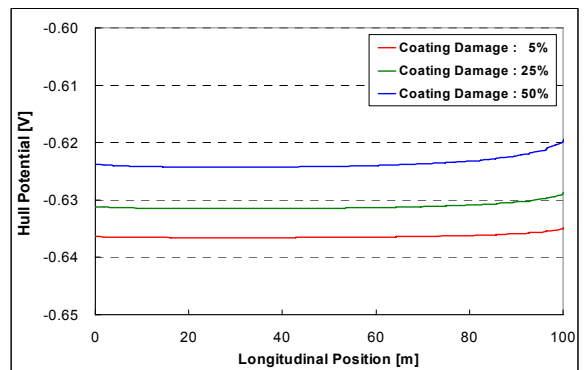
[그림 9] T6과 Q8 요소 형태

4. 해석 결과

선체의 부식은 선체 및 프로펠러 표면의 도장손실에 지배적이다. 따라서 본 논문에서는 ICCP장비가 미설치된 경우 선체의 도장 손실은 5%라고 고정하고 프로펠러의 도장 손실은 5%, 25%, 50%로 가변하면서 Ag/AgCl 전극을 기준으로 한 선체 표면 전위 및 수심 20m 평면에서의 전기장 신호를 예측하였으며, ICCP 장비가 설치된 경우는 선체의 도장 손실은 5%, 프로펠러의 도장 손실은 50%라고 가정하고 1 zone 2 anodes(1 pair), 2 zone 4 anodes(2 pairs), 3 zone 6 anodes(3 pairs) 등 3가지 경우의 ICCP 양극 배치에 의한 선체 표면 전위 및 수심 20m 평면에서의 전기장 신호를 해석하였다. 본 논문에서의 수치해석 방법으로는 경계요소법(BEM : Boundary Element Method)에 근거하여 영국 FNC(Frazer Nash Consultancy)사에 의해 개발된 수중 전자기장 신호 해석 도구인 FNREMUS를 사용하였다^[10].

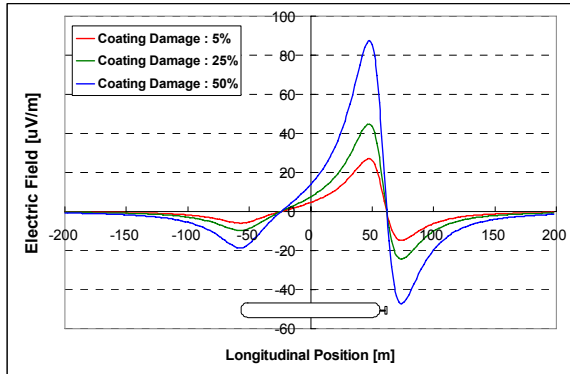
가. ICCP 장비가 미설치된 경우

그림 10은 프로펠러의 도장 손실에 따른 함정 킬선(keel line) 아래 선체표면에서의 전위 분포를 보여주고 있으며 그림 11과 그림 12는 프로펠러 도장 손실 변화에 따른 함정 중심축 아래 수심 20m 위치에서의 X축(수평 종축)과 Z축(수직축) 전기장 신호를 보여준다. 표 1은 프로펠러의 도장 손실에 따른 각 축별 최대 전기장 신호(절대치) 크기를 비교한 것이다.

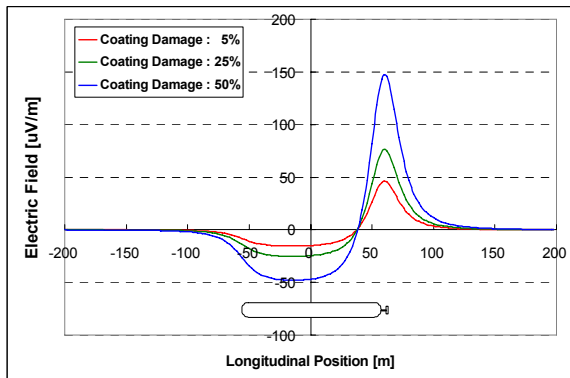


[그림 10] 프로펠러 도장 손실에 따른 선체 표면 전위 분포

선체의 도장 손실이 5%인 경우, 프로펠러의 도장 손실이 5%에서 50%까지 증가함에 따라 선체 킬선에 서의 전위는 -0.637V에서 -0.625V까지 증가하였고, X축과 Z축에서의 전기장 신호의 크기는 그림 11, 그



[그림 11] 프로펠러의 도장 손실에 따른 X축 전기장 신호(수심 : 20m, 선체도장 손실 : 5%)



[그림 12] 프로펠러의 도장 손실에 따른 Z축 전기장 신호(수심 : 20m, 선체도장 손실 : 5%)

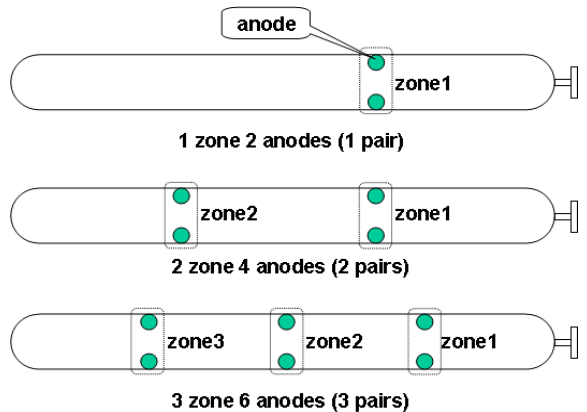
[표 1] 프로펠러의 도장 손실에 따른 전기장 신호(절대치) 최대값 비교[$\mu V/m$]

도장손실 \ 축	X축	Y축	Z축
5%	27.3	17.1	46.6
25%	45.1	28.2	77.0
50%	88.1	54.5	149.4

림 12, 표 1에서 알 수 있듯이 절대값 기준으로 각 축별로 약 3배 정도 증가됨을 볼 수 있었다. 이는 갈바닉 부식 모델에서 음극에 해당하는 프로펠러의 면적이 증가함에 따라 선체의 부식이 더욱 활성화되고 이로 인한 부식전류 증가가 전기장 신호 증가를 야기한 것으로 판단된다.

나. ICCP 장비가 설치된 경우

함정에서 ICCP 장비를 설치하는 주 목적은 선체의 부식을 방지하는 것이지만 함정의 경우 이로 인하여 발생하는 전기장 신호는 적 위협세력의 탐지원이 되므로 이러한 신호를 줄이는 방안이 필요하다. 따라서 선체 부식방지 최적화 조건(기준전극에서의 선체전위 0.8V 유지)에서 선체 도장 손실은 5%, 프로펠러 도장 손실은 50%로 가정하고 ICCP 양극의 개수 및 배치 변화에 따른 선체표면 전위, ICCP 양극 전류 및 수심 20m에서의 전기장 신호를 예측하였다. ICCP의 양극은 그림 13과 같이 1 pair, 2 pairs, 3 pairs 등 3가지 경우로 가정하여 해석을 수행하였다.



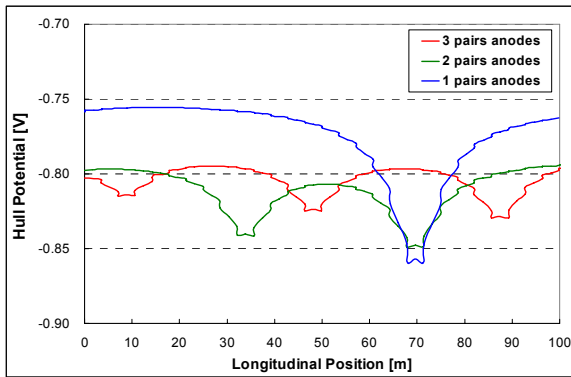
[그림 13] ICCP 장비의 양극 배치도

그림 14는 ICCP 양극 배치에 따른 함정 킬선 아래 선체표면 전위 분포를 비교한 것이다. 3 pairs 양극 배치의 경우는 함정 킬선 아래 선체 표면 전위 (-0.83V ~ -0.80V)가 1 pair 양극 배치의 선체표면 전위(-0.86V ~ -0.76V)보다 선체 전위가 초기 설정된 -0.8V기준으로 변동 폭이 적음을 확인할 수 있었고, 양극 배치 지점에서의 선체 전위 또한 3 pairs 양극

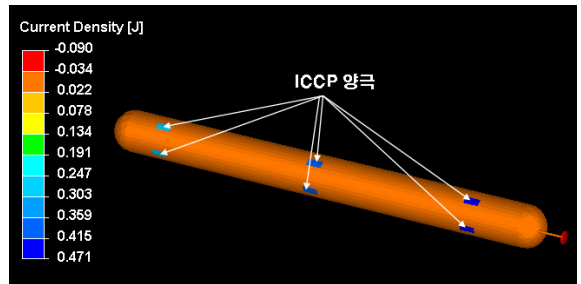
배치의 경우(-0.83V)가 1 pair의 경우(-0.86V)에 비해 -0.80V에 근접함을 알 수 있었다. 그림 15는 3 pairs 양극 배치의 경우에 대한 3차원 선체 표면 전위 분포를 보여주고 있으며, 표 2는 양극 배치에 따른 양극에서 방출되는 전류 값의 크기를 나타낸 것이다. 양극으로부터 방출되는 전체 전류 크기는 1 pair 배치는 14.8A, 2 pairs 배치는 14.6A, 3 pairs 배치는 14.4A로서 ICCP 양극 배치에 상관없이 거의 유사하지만 양극당 개별 전류 크기는 1 pair 양극 배치가 3 pairs 양극 배치보다 약 3배 정도 크다. 그림 16은 3 pairs 양극 배치인 경우의 선체 표면 법선 방향 전류 밀도 분포를 3차원으로 보여주는 것으로서 ICCP 양극으로부터 전류가 방출되고 이러한 전류는 ICCP 장비에 대해 음극인 선체와 프로펠러로 흡수됨을 알 수 있다.

[표 2] ICCP 양극 배치에 따른 전류[A]

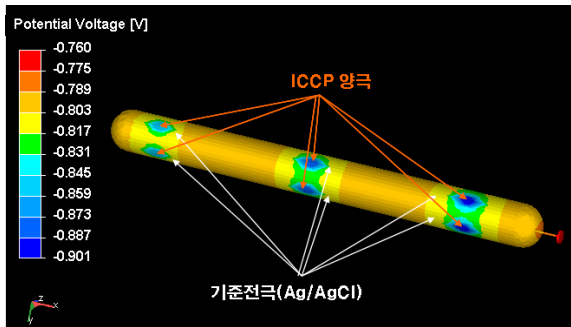
Anode	Current						Total Current
	zone 1		zone 2		zone 3		
1 pair	7.4	7.4	-	-	-	-	14.8
2 pairs	3.9	3.9	3.4	3.4	-	-	14.6
3 pairs	2.9	2.9	2.5	2.5	1.8	1.8	14.4



[그림 14] ICCP 양극 배치에 따른 함정 킬선 표면에서의 선체 전위 분포



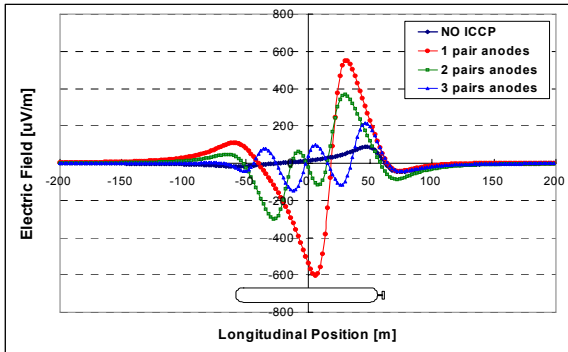
[그림 16] 선체 표면에서의 전류밀도 분포 (3-pairs 양극 배치)



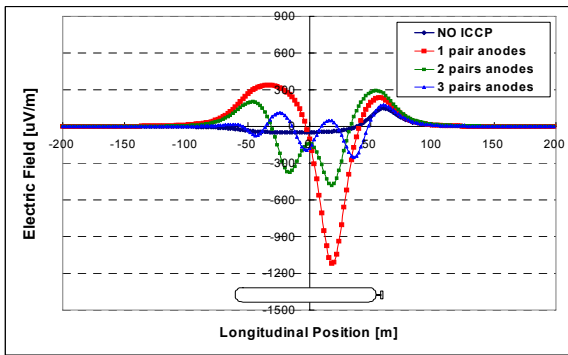
[그림 15] 선체 표면에서의 전위분포 (3 pairs 양극배치)

그림 17과 그림 18은 양극 배치에 따른 함정 중심 축 아래 수심 20m에서의 X축과 Z축 전기장 신호를 비교한 것이고, 표 3은 양극 배치에 따른 각 축별 최대 전기장 신호 크기를 서로 비교한 것이다. 양극 배치가 1 pair에서 3 pairs로 증가함에 따라서 X축과 Z축에서의 전기장 신호의 크기는 표 3과 같이 각 축별로 약 3배~5배까지 감소됨을 알 수 있었다.

이상의 연구결과를 종합하면 선체표면과 프로펠러의 도장 손실이 동일한 경우 선체 표면 전위를 0.8V로 유지하기 위해 필요한 전체 전류 크기는 양극 배치에 상관없이 약 14.4A~14.8A로서 비슷하였다. 그러나 양극을 배치하는 zone의 수가 증가하게 되면 개별 양극에서 방출되는 전류의 크기가 감소하고 zone의 증가에 따라 양극의 배치도 분산되므로 ICCP 양극으로부터 선체 및 프로펠러까지의 거리가 감소하여 상대적인 전기 다이폴의 크기(P)가 감소하므로 전기장 신호 또한 감소하게 된다. 식 (3)은 전기 다이폴에 의한 수중 전기장 신호 특성을 해석하기 위한 전계 방정식으로서 본 논문에서는 측정 위치로부터 해저면이 충분한 수심을 가진다는 가정 하에서 전도율 차이에 의한 전기장 신호의 반사 효과는 고려하지 않았다.



[그림 17] ICCP 양극 배치에 따른 X축 전기장 신호 (수심 20m)



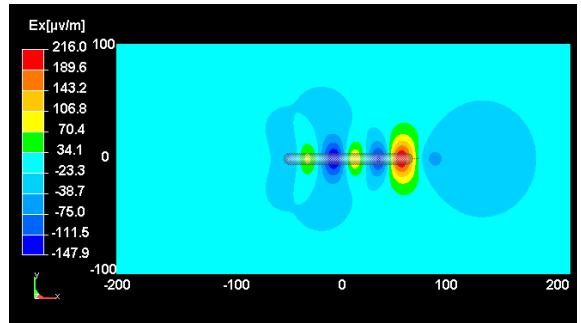
[그림 18] ICCP 양극 배치에 따른 Z축 전기장 신호 (수심 20m)

[표 3] ICCP 양극 배치에 따른 전기장 신호 최대값 (절대값) 비교

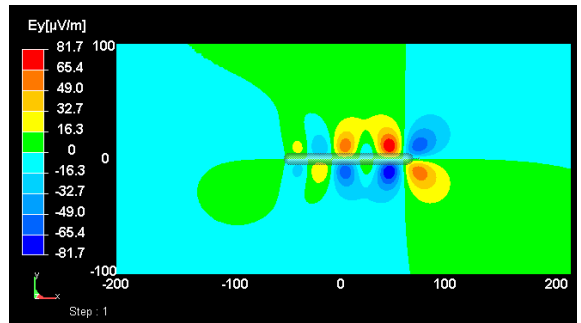
Anode	X축 [μV/m]	Y축 [μV/m]	Z축 [μV/m]
No ICCP	88	55	149
1 pair	607	402	1,137
2 pairs	372	170	449
3 pairs	216	82	256

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi\sigma r^5} \begin{pmatrix} 3x^2 - r^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - r^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - r^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

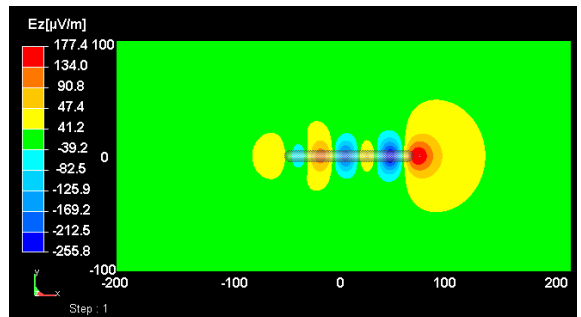
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$



[그림 19] 3 pairs ICCP 양극 배치에서의 전기장 신호 분포(수심 20m, X축)



[그림 20] 3 pairs ICCP 양극 배치에서의 전기장 신호 분포(수심 20m, Y축)



[그림 21] 3 pairs ICCP 양극 배치에서의 전기장 신호 분포(수심 20m, Z축)

여기서, P_x, P_y, P_z 는 각 축별 전기 다이폴 크기 [Am]이고, E_x, E_y, E_z 는 각 축별 전기장 세기 [V/m]이며 x, y, z 는 전기 다이폴로부터 측정 위치까지의 거리이다. 따라서 함정에 ICCP 장비를 설치할 경우, ICCP 양극 개수와 배치는 선체 부식 측면뿐만 아니라

라 함정 수중 전기장 신호 스텔스 측면에서도 아주 중요한 요소가 된다. 그림 19~21은 3 pairs ICCP 장비에 대한 X축, Y축, Z축 평면에서의 각 축별 전기장 신호 분포를 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 함정 선체의 갈바닉 부식 및 선체 부식방지 장치에 의해 수중에서 발생하는 정 전자기장 신호의 발생원리 및 특성을 소개하고, 함정 등가 모델을 가정하여 선체 도장 손실 및 ICCP의 양극 배치에 따른 선체의 전위 및 임의 수심에서의 전기장 신호 분포 예측 결과들을 제시하였다.

해석 결과를 종합하면 ICCP 장비가 미 작동된 상태에서 선체의 도장 손실 5%만을 가정한 경우, 프로펠러의 도장 손실이 5%에서 50%까지 증가함에 따라 수심 20m에서의 전기장 신호는 절대값 기준으로 각 축별로 3배 정도 증가함을 확인하였고, ICCP 장비가 작동 시에는 ICCP 양극 배치가 1 pair에서 3 pairs로 증가함에 따라서 전기장 신호의 크기는 절대값 기준으로 각 축별 약 3배에서 5배 정도 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서 함정 선체의 도장 손실 및 ICCP 장비의 양극 배치 조건의 변화는 선체의 부식 방지 측면 뿐만 아니라 함정 수중 전기장 신호에 대한 스텔스 측면에서도 중요함을 알 수 있었다. 따라서 신규 함정에서 ICCP 장비를 탑재할 경우 컴퓨터 시뮬레이션 등의 사전 예측을 통하여 부식 보호와 함께 수중 전기장 신호를 최소화할 수 있는 최적의 ICCP 장비의 양극 배치 조건을 알아내는 것이 필요하며, 현재 운용중인 함정에 대해서도 선체의 도장 손실 정도에 따른 선체 표면의 부식 전위 분포 및 전기장 신호 특성 등을 예측하고 대책을 세우는 것이 필요할 것으로 사료된다.

향후, 본 논문에서는 언급되지 않은 선체 부식 및 부식방지장치에 의한 수중 전기장 신호의 해저면 반사효과와 수동부식 방지장치(아연판)의 설치에 따른 수중 전기장 신호 예측 기법 및 부식 관련 자기장(CRM) 신호 예측 기법에 대한 추가 연구를 지속적으로 수행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] G. J. Webb, S. S. Tut, S. J. Davidson and A. J. Wilkinson, "Multi-influence electromagnetic and acoustic ranging", Conference Proceedings UDT Pacific 98, Sydney Convention Centre, Australia, pp. 11~14, 1998.
- [2] P. G. Rawlins, S. J. Davidson and P. B. Wilkinson, "Aspects of Corrosion Related Magnetic (CRM) Signature Management", Conference Proceedings UDT 1998, Wembley Conference Centre, London, UK, pp. 237~240, 1998.
- [3] P. G. Rawlins, S. J. Davidson, "Modelling of AC Vessel Signatures Using Time Dependent Dipoles", Marelec 99, pp. 257~265, 1999.
- [4] J. C. Hubbard, S. H. Brooks, B. C. Torrance, "Practical measures for the reduction and management of the electro-magnetic signatures of in-service surface ships and submarines", UDT 96, July, pp. 480~485, 1996.
- [5] P. M. Holtham, I. G. Jeffrey, "ELF signature control", UDT 96, July, pp. 486~489, 1996.
- [6] 양창섭 외, "함정 발생 수중 전자기장 신호의 특성 및 측정 기법", 한국군사과학기술학회, 제9권 제2호, pp. 11~19, 2006.
- [7] Richard Holt, "The Source of Electric Fields in Seawater, and Their Measurement", Warship Cathodic Protection 2001, 21~23 August 2001.
- [8] H. Jones, "Development of a Low a Noise Electric Field Sensor For Measurement and Ranging Applications", MARELEC 2004, 17-18th March 2004.
- [9] Godwin Kakuba, "The Impressed Current Cathodic Protection System", Master's Thesis, Technische Universiteit of Eindhoven, 2005.
- [10] A J Keddie, "FNREMUS Detailed Modeller User Guide", Issue 4, FNC Dorking Surrey.