

## 선체 부식에 의한 수중 전기장 신호 특성 모델링 기법 연구

정현주, 양창섭, 전재진  
국방과학연구소

### A Study on the Modelling Method of Underwater Electric Field Signature due to Ship's Corrosion

Hyun-Ju Chung, Chang-Seob Yang, Jae-Jin Jeon  
Agency for Defense Development

**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 ICCP anode arrangement.

#### 1. 서 론

과거 자기장 신호를 탐지하는 기뢰체계 및 수중 감시체계들은 주로 강자성 선체에 의한 정 자기장 신호를 탐지하여 왔다. 그러나 자기차폐 및 소자 등을 통하여 정 자기장 신호에 대한 함정의 스텔스 능력이 지속적으로 향상되고, 최근에는 정 자기장 신호 외에 정 전기장 및 교류 전기장/자기장 신호를 탐지할 수 있는 센서들이 개발되어 무기체계에 적용되고 있다[1~2]. 특히, 함정 선체의 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion) 및 ICCP(Impressed Current Cathodic Protection) 장비, 희생양극(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[3~4]. 그러므로 선체 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 소개하였고, 또한 선체 부식 및 부식방지장치에 의해 발생하는 수중 전자기장 신호 해석 도구인 FNREMUS 소프트웨어를 이용하여 반 원통 형태의 함정 등가모델에 대해서 선체 부식 및 부식방지장치에 의한 수중 전기장 신호 예측 결과를 기술하였다.

#### 2. 선체 부식 및 부식방지장치의 특성

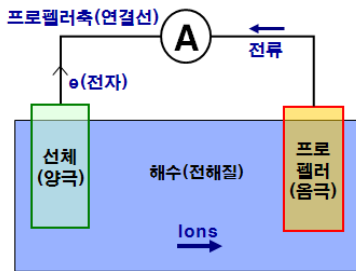
##### 2.1 갈바닉 부식

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 낮은 전위(이온화 경향이 큼)를 가지는 금속이 우선적으로 부식되고 높은 전위(이온화 경향이 작음)를 가지는 다른 한 금속은 부식으로부터 보호받게 되는 현상을 의미한다.

일반적으로 함정 프로펠러의 재료로는 청동합금(NAB, Nickel Aluminum Bronze)이 사용되고 있으며, 선체(Hull)는 철(Iron)로 제작된다. 은-염화는 전극을 기준으로 한 해수에서의 청동합금의 갈바닉 전위는 -0.24V이고 철의 갈바닉 전위는 -0.59V이다. 따라서 철의 갈바닉 전위가 청동합금에 비해 상대적으로 낮은 전위를 가지므로 철은 산화되어 부식이 일어나는 양극이 되며, 청동합금은 부식으로부터 보호되는 음극이 된다.

그림 1은 선체 갈바닉 부식의 원리를 나타내는 그림이다. 프로펠러에 비해 상대적으로 낮은 전위를 가지는 선체는 이온화( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ )된다. 이온화 과정에서 발생된 전자는 프로펠러 축계를 거쳐 프로펠러로 이동하고 철 이온은 해수를 통해 프로펠러로 이동한다. 이러한 원리로

선체-해수-프로펠러-프로펠러 축계-선체로 연결되는 폐 루프(Closed loop)를 형성하며 전류가 흐르게 되고 이 전류에 의해 함정으로부터 전자기장 신호 및 자기장 신호가 발생된다[5].

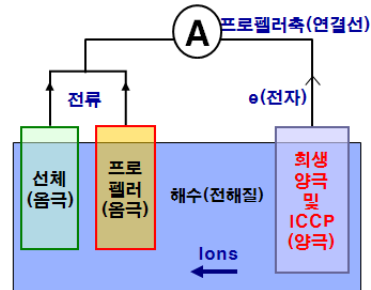


<그림 1> 선체 갈바닉 부식 모델

##### 2.2 선체 부식방지장치

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 금속들을 인위적으로 부착하여 선체를 보호하는 수동 부식방지장치와 기준 전극을 통해 선체 표면의 전위를 모니터링하고 비소모성 양극을 통해 전류를 흘려줌으로서 선체 부식이 일어나지 않는 전위 조건으로 항상 유지시켜 주는 능동 부식방지장치가 사용되고 있다.

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 -1.06V이고, 마그네슘의 갈바닉 전위는 약 -1.60V로서 선체의 갈바닉 전위(-0.59V) 보다 약 0.5~1.0V정도 낮다. 따라서 이러한 금속을 선체에 부착하면 그림 2와 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 희생양극이라 하고, 갈바닉 부식의 경우처럼 해수에서 전기장과 자기장을 발생시키는 중요한 요인이 된다.



<그림 2> 희생양극에 의한 갈바닉 부식 모델

능동부식방지장치는 인위적으로 전류를 발생시켜 선체 표면의 전위를 부식이 발생되지 않는 일정한 전위로 유지하여 선체를 부식으로부터 보호하는 장치로서 능동 음극보호장치로도 불린다. 일반적인 능동 부식방지장치로는 ICCP(Impressed current cathodic protection) 장비가 있다. 은-염화는 전극을 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 음극 부식방지장치의 경우는 희생양극이 시간이 경과함에 따라 점진적으로 소모됨으로 인해 함정 상가 시 정기적인 정비 및 교체가 필수적이지만, 능동 음극부식방지장치는 비소모성 양극 금속, 기준 전극 및 전원 공급기를 사용함으로써 초기 설치비용은 수동 음극부식방지장치보다 증가하지만 유지비용이 감소한다는 장점이 있어 최근 대부분의 해군 함정들에서는 능동 음극부식방지장치를 많이 사용하고 있다. 그림 2는 선체 부식 방지장치에 의한 갈바닉 부식 모델을 보여준다.

### 2.3 수학적 이론

전기화학적 부식에서 부식이 진행되는 동안 양극에서 방출되는 전류와 음극에서 흡수되는 전류는 동일하므로 부식과정에서의 전류는 다음 식 (1)과 같은 연속방정식으로 정의될 수 있다.

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $J_x, J_y, J_z$ 는 각 축별 전류밀도[A/m<sup>2</sup>]를 나타낸다. 그리고 관심대상인 수중에서의 전기장 세기는 다음 식 (2)로 주어진다.

$$E = -\nabla V, \quad J = \sigma E \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 전기장 세기[V/m],  $V$ 는 전위[V],  $J$ 는 전류밀도[A/m<sup>2</sup>],  $\sigma$ 는 해수의 전기 전도도[S/m], 를 나타낸다. 식 (2)를 식 (1)에 대입함으로써 다음 식 (3)과 같이 Laplace 방정식으로 정리되고 이러한 Laplace 방정식은 부식 및 부식 방지장치에 의한 해수에서의 수중 전기장 신호를 해석하는데 있어서 지배 방정식(governing equation)으로 활용된다.

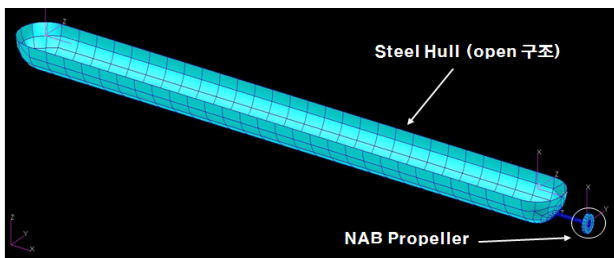
$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (3)$$

## 3. 경계요소 해석 도구를 이용한 전기장 신호 해석

### 3.1 등가모델 함정의 형상 모델링

본 논문에서는 부식 및 부식방지장치에 의한 수중 전자기장 신호 해석을 위하여 먼저 그림 3과 같이 길이 115m, 빔폭 10m, 흘수 5m인 수상함 형태의 3차원 등가 모델을 상용 Pre-processor용 도구인 PATRAN을 이용하여 생성하였으며, 해석에서 사용된 모델은 반 원통 형태이고 프로펠러는 원반(Disc) 모양으로 간략화하여 구현하였다. 해수에서 선체의 부식에 의한 수중 전자기장 신호를 해석하기 위해서는 해수와 접촉되어 전기화학적 반응을 야기하는 수면하 함정 형상만이 요구되며, 수중에서 전파되는 전기장 신호는 해수(Sea)와 공기(Air)간의 상이한 전도도 특성으로 인하여 해수면에서 반사되는 특성을 가지므로 수상함의 경우 수치해석 시 대칭 구조(Symmetry) 해석을 하게 된다. 따라서 함정 형상에서 수면과 접촉되지 않는 선체의 윗면은 그림 4와 같은 개방된 구조를 가져야 한다.

그림 3은 경계요소 해석을 위해 PATRAN에서 수행된 3차원 모델 함정의 형상과 분할된 요소(Element)를 나타내며, 제안된 모델에 적용된 요소는 19개의 T6(Triangular six noded elements) 요소와 671개의 Q8(Quadratic eight noded elements) 요소로 구성되어 있다. 또한 해수에서의 전도율( $\sigma$ )은 4 [S/m]로 가정하였다.



〈그림 3〉 경계요소 해석을 위해 요소 분할된 모델 함정

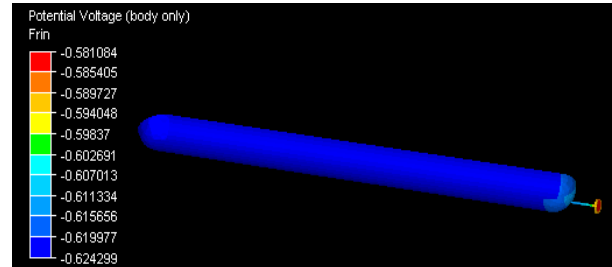
### 3.2 수치해석 결과

선체의 부식은 선체 및 프로펠러 표면의 도장 손실에 지배적이다. 따라서 본 논문에서는 선체의 도장 손실은 5%, 프로펠러의 도장 손실은 50%라고 가정하고 ICCP 장비가 미설치된 경우와 설치된 경우에 대하여는 -염화은 전극을 기준으로 한 선체 표면 전위 및 수심 20m 평면에서의 전기장 신호를 예측하였다. 본 논문에서의 경계요소법(BEM, Boundary element method)에 근거하여 영국 FNC(Frazer Nash

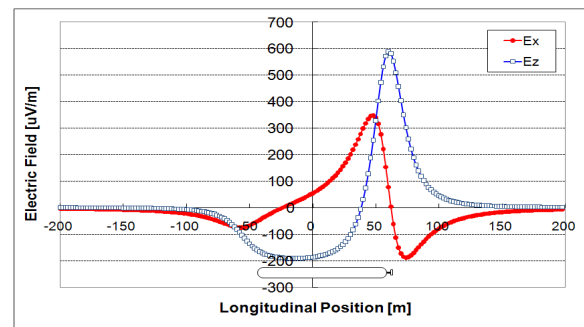
Consultancy)사에 의해 개발된 수중 전기장 신호 해석 도구인 FNREMUS를 사용하였다[6].

### 3.2.1 ICCP가 미설치된 경우

그림 4는 ICCP가 미설치된 경우의 선체 부식 전위를 3차원으로 보여주는 그림이고 그림 5는 함정 중심축 아래 수심 20m 위치에서의 X축(수평 종축)과 Z축(수직축) 전기장 신호를 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있듯이 ICCP가 미설치된 경우 -염화은 전극을 기준으로 예측된 선체 부식 전위는 약 -0.625V 정도로서 부식이 진행되고 있는 상태이고 전기장 신호는 그림 5에서 알 수 있듯이 선체로부터 방출된 전류가 흡수되는 프로펠러 부근에서 큰 값을 가짐을 알 수 있다.



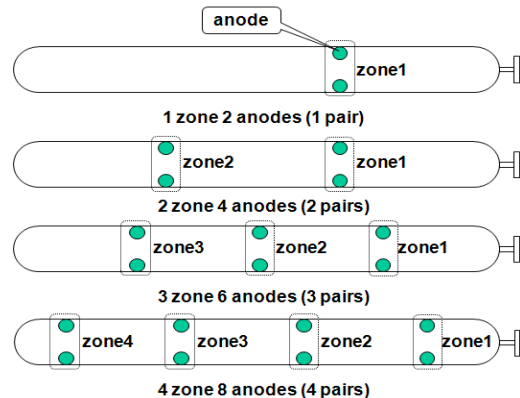
〈그림 4〉 ICCP가 미설치된 경우의 선체의 부식 전위



〈그림 5〉 ICCP가 미설치된 경우 함정 수미선 아래에서의 전기장 신호(수심 20m)

### 3.2.2 ICCP가 설치된 경우

함정에서 ICCP 장비를 설치하는 주 목적은 선체의 부식을 방지하는 것이지만 이로 인해 발생하는 전기장 신호는 위협세력의 탐지원이 되므로 실제 함정의 경우에는 선체의 부식방지 외에 선체로부터 발생하는 전기장 신호를 줄이는 것 또한 필요하게 된다. 따라서 선체 부식방지 최적화 조건(기준전극에서의 선체전위 0.8V 유지)에서 선체 도장 손실은 5%, 프로펠러 도장 손실은 50%로 각각 가정하고 ICCP 양극의 개수 및 배치 변화에 따른 선체표면 전위와 수심 20m에서의 전기장 신호를 예측하였다. ICCP의 양극은 그림 7과 같이 1 Pair, 2 Pairs, 3 Pairs, 4 Pairs 등 4가지 경우로 가정하여 해석을 진행하였다.



〈그림 6〉 ICCP 장비의 양극 배치도

그림 7과 8은 양극 배치에 따른 함정 수미선 아래 수심 20m에서의 X축과 Z축 전기장 신호를 나타낸 것이며 표 1은 양극 배치에 따른 각 축별 최대 전기장 신호의 절대값 크기를 정리한 것이다. 양극 배치가 1 Pair에서 4 Pairs로 증가함에 따라서 각 축별 최대 전기장 신호의 크기

는 절대값 기준으로 약 5~6배까지 감소됨을 알 수 있었고 4 Pairs 배치의 경우 ICCP 설치 전 전기장 신호 크기와 비교하면 X축은 1.3배, Y축은 1.17배, Z축은 1.19배 수준임을 알 수 있었다.

표 2는 ICCP양극 배치에 따른 양극에서 방출되는 전류 값의 크기를 나타낸 것이고 양극으로부터 방출되는 전체 전류 크기는 1 Pair 배치는 14.8A, 2 Pairs 배치는 14.6A, 3 Pairs 배치는 14.4A, 4 Pairs 배치는 14.4A로서 ICCP 양극 배치에 상관없이 거의 유사하지만 양극당 개별 전류 크기는 1 Pair 양극 배치가 4 Pairs 양극 배치보다 약 4배 정도 크다.

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 상대적으로 음극이 되는 선체 및 프로펠러까지의 전류 경로가 감소하여 상대적인 전기 다이폴의 크기(P)가 감소하므로 식 (4)에서 알 수 있듯이 전기장 신호 크기 또한 감소하게 된다. 식 (4)는 전기 다이폴에 의한 수중 전기장 신호 특성을 해석하기 위한 전계 방정식으로서 본 논문에서는 측정 위치로부터 해석면이 충분한 수심을 가진다는 가정 하에서 전도를 차이에 의한 전기장 신호의 반사 효과는 고려하지 않았다.

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

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

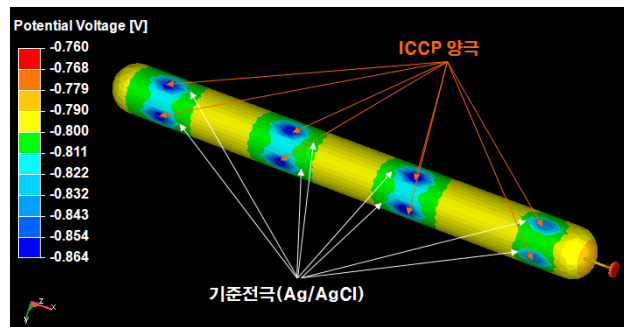
여기서,  $P_x, P_y, P_z$ 는 각 축별 전기 다이폴 크기[Am] 이고,  $E_x, E_y, E_z$ 는 각 축별 전기장 세기 [V/m]이며  $x, y, z$ 는 전기 다이폴로부터 측정 위치까지의 거리이다. 그림 9는 4 Pairs 양극배치에서 선체 전위 분포를 보여주는 것으로서 등가 모델의 선체 전위는 -0.86~-0.76V 정도로서 부식이 발생되지 않는 전위 분포를 유지하였다. 따라서 함정에 ICCP 장비를 설치할 경우, ICCP 양극 개수와 배치는 선체 부식 측면뿐만 아니라 함정 수중 전기장 신호 스텔스 측면에서도 아주 중요한 요소를 확인할 수 있었다.

<표 1> 양극 배치에 따른 각 축별 최대 전기장 신호 크기

양극 배치	X축[ $\mu\text{V}/\text{m}$ ]	Y축[ $\mu\text{V}/\text{m}$ ]	Z축[ $\mu\text{V}/\text{m}$ ]
No ICCP	352	220	596
1 Pair	2,428	1,608	4,548
2 Pairs	1,488	680	1,796
3 Pairs	864	328	1,024
4 Pairs	464	257	706

<표 2> ICCP 양극 배치에 따른 전류[A]

Anode	Current								Total Current
	zone 1		zone 2		zone 3		zone 4		
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
4 pairs	1.4	1.4	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	14.4



<그림 9> 선체 표면에서의 전위분포 (4 Pairs)

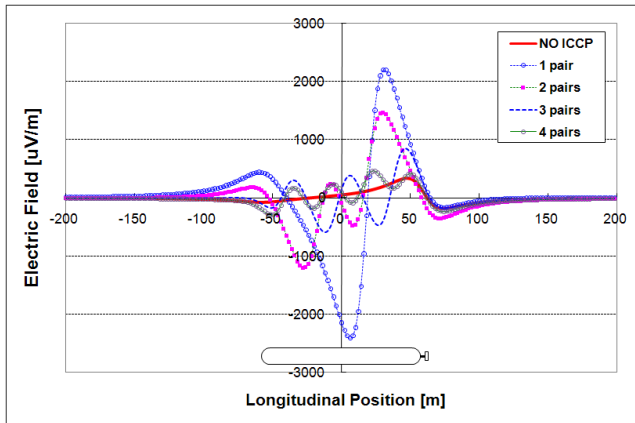
#### 4. 결 론

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

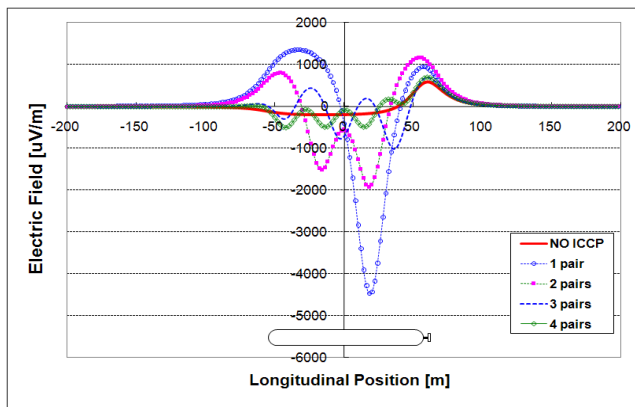
해석 결과를 종합하면 ICCP 양극 배치가 1 Pair에서 4 Pairs로 증가함에 따라 전기장 신호의 크기는 절대값 기준으로 각 축별 약 5배에서 6배 정도 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서 함정에서 ICCP 장비의 양극 배치 조건의 변화는 선체의 부식 방지 측면뿐만 아니라 함정 수중 전기장 신호에 대한 스텔스 측면에서도 중요함을 알 수 있었으므로 ICCP 장비를 탑재하는 신규 함정의 경우에는 모델링 및 시뮬레이션을 통해 선체 부식 보호는 물론 수중 전기장 신호를 최소화 할 수 있는 최적의 ICCP 장비의 양극 배치 조건을 알아내는 것이 필요하다. 아울러 현재 운용중인 기존 함정들에 대해서도 ICCP 장비의 운용 상태에 따른 선체 표면의 부식 전위 분포 및 전기장 신호 특성 등을 예측하고 감소 대책을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [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, "함정 발생 수중 전자기장 신호의 특성 및 측정 기법", 한국군사과학기술학회, 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 Keddle, "FNREMUS detailed modeller user guide", Issue 4, FNC Dorking Surrey.



<그림 7> ICCP 양극 배치에 따른 X축 전기장 신호 (수심 20m)



<그림 8> ICCP 양극 배치에 따른 Z축 전기장 신호 (수심 20m)