

## 해군 수상함정 ICCP 작동 운용성 검증에 관한 연구

최상민<sup>†</sup> · 조규룡<sup>1</sup> · 이지혁<sup>2</sup> · 백용관<sup>3</sup>

(Received January 11, 2019 ; Revised March 13, 2019 ; Accepted March 21, 2019)

### Interoperability verification for ICCP of naval surface vessel

Sang-Min Choi<sup>†</sup> · Kyu-Lyong Cho<sup>1</sup> · Ji-Hyeog Lee<sup>2</sup> · Yong-Kawn Beak<sup>3</sup>

**요약:** 해군의 수상함정은 다양한 항로와 해역에서 작전 업무 수행을 실시하며, 부식이 되기 쉬운 가혹한 해수 환경에 노출되어 있다. 해군 운용 함정들은 부식을 방지하기 위하여 여러 가지 방법의 방식 기술을 적용하고 있으며, 그 중 대표적인 방식기술은 외부전원식 음극방식장치인 ICCP이다. 하지만, 해군 수상함정들의 정기 및 수시 상가 시 선체 부식 현상이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 선체의 부식은 함 작전운용능력 저하 및 함 수명에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 요소로서 효율적인 ICCP 작동은 반드시 필요하다. 본 논문에서는 한국 해군의 대표적인 수상함정 2척을 대상으로 전기장 해석을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 ICCP 작동 운용성 검증에 대해 연구하였다.

**주제어:** 수상함, 부식, 외부전원식 음극방식장치(ICCP), 해군, 전기장 해석

**Abstract:** Naval surface vessels are exposed to harsh marine environments and tend to corrode because they travel in various routes and areas of the sea. The Republic of Korea (R.O.K.) Navy employs various methods to protect ships from corrosion. A typical method of protection against corrosion is impressed current cathodic protection. However, for naval surface vessels, hull corrosion occurs during regular and occasional docking. Hull corrosion degrades the operational capability and lifetime of ships. Therefore, efficient impressed current cathodic protection is essential. In this study, an electric-field analysis was performed on two representative surface vessels of the R.O.K. Navy.

**Keywords:** Naval surface vessel, Corrosion, Impressed current cathodic protection, R.O.K Navy, Electric field analysis

## 1. 서론

대한민국 해군 함정은 함의 운용 상태를 기준으로 수상함과 수중함으로 분류하며, 세부적으로는 작전 운용성에 따라 구축함, 호위함, 상륙함, 지원함 등으로 나뉜다. 각 함정들은 다양한 해역과 항로, 운항 조건에서 작전을 수행하며 항시 선체 내·외부에 해수에 의해 부식이 되기 쉬운 가혹한 환경에 노출되어 있다. 함정의 부식에는 다양한 원인이 있지만, 주요 부식 원인은 염분이 포함된 대기 부식과 해수에 의한 부식, 프로펠러나 펌프 임펠러의 회전에 기인한 캐비테이션 등이 있다[1]. 이 중 해수에 의한 부식은 담수에 비해 부식성이 심하게 나타나는데, 이는 해수에 포함된 염화나트륨(NaCl)의 함량에 의해 주로 결정되는 것으로서 해수 내의 염화나트륨(NaCl) 농도인 3.5%에서 금속에 대한 부식성이 가장 강한 경향을 나타낸다[2]. 이러한 부식을 방지하기 위하여 함정에서는 다양한 방법의 방식 기술

을 적용하고 있다. 대표적으로는 선체 내·외부 및 구조물 전면에 걸쳐 방청, 방오도로 등을 도포하여 방식을 실시하고 있다. 하지만, 선체 도장에 의한 방식은 해양생물들에 의한 손상 및 캐비테이션, 기타 구조물에 의한 기포 발생 등 다양한 외부 영향으로 인하여 손상되어 유지·보수가 지속적으로 필요하여 영구적으로 사용할 수 없다. 따라서 해군 함정은 약 20여 년 전부터 도장에 의한 방식 외에도 선체 부식 방지를 위하여 외부전원식 음극방식장치(Impressed Current Cathodic Protection, 이하 ICCP)를 사용하고 있다.

해군 함정들은 선체 도장 및 ICCP를 작동하여 선체에 대한 방식을 실시하고 있지만, 함정 정기·수시 상가 시 선체 외판에 잦은 부식이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 선체 부식은 함 작전 운용 능력 저하뿐만 아니라 선체균열, 파공 현상 등을 발생시킬 수 있는 치명적인 결함이며 심각하게는 함의 침몰에 영향을 미칠 수 있는 요소이다[2]. 이러한

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1074-6327>): Researcher, Defense Agency for Technology and Quality, 1000, Bangeojinsunhwan-doro, Dong-gu, Ulsan, 44032, Korea, E-mail: cscsm90@daq.re.kr, Tel:052-202-0933

1 Ph.D Graduation, Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: kyulyong@daq.re.kr, Tel: 055-734-6581

2 M.S Degree, Department of Electrical Engineering, University of Southern California, E-mail: sangcal@daq.re.kr, Tel: 052-202-0982

3 M.S Degree, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Osaka University, E-mail: melumoon@daq.re.kr, Tel: 052-202-0933

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부식 및 사고를 예방하기 위하여 해군에서 실제 운용하고 있는 대표적인 두 수상함정을 선정하여 전기장 해석을 통해 ICCP 운용성 검증을 수행하였다. 검증 객관성 향상을 위해 조건을 여러 가지로 선정하여 해석을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 해군 수상함정에서 실제 사용 중인 ICCP 운용성 검증을 목적으로 한다. 본 연구를 통하여 소요군에서 우려하고 있는 ICCP 운용성에 대한 간섭 및 상쇄 현상에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다.

## 2. ICCP 운용성 검증 방안

### 2.1 현 실태 및 문제점

해군 함정에 적용되는 기준전극 및 양극의 수량과 재질은 건조 시기 및 함 크기에 따라 조금씩 차이는 존재하나, 주로 기준전극의 재질은 순수 아연(Pure Zinc) 및 은/염화은(Ag/AgCl)을 사용하고 있으며, 양극은 백금/티타늄(Pt/Ti)을 주로 사용하고 있다.

해군에서는 조금 차이는 있지만 통상적으로 함정 수명 주기로 30년으로 정의하고 있다. 소요군에서 함 수명 주기 동안 함정의 선체와 장비의 성능유지 및 수명 연장을 위하여 함정 정비를 수행한다[3]. 함의 수면하 선체 및 구조물 정비를 위하여 상가 정비를 수행하는데, 그 과정에서 Figure 1과 같이 선체 구조물 및 ICCP 시스템용 양극 및 기준전극 부위에 잦은 부식이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



Figure 1: The case of corrosion rudder and ICCP of ○○ ship

### 2.2 ICCP의 이론

함정 선체 내·외부에서 발생하는 부식은 부식의 다양한 형태 중 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion)에 해당된다. 갈바닉 부식은 두 개의 서로 다른 금속 또는 합금이 전해질 속에서 일어나는 전기화학 작용이며, 두 금속 사이에 전위차가 존재하고 직접 접촉되거나 외부 전도체에 의해 연결되면 상대적으로 고전위인 금속이 음극화되어 Figure 2와 같이 양극과 음극에서 전위차로 인한 전자의 이동으로 발생하는 부식 형태이다.

ICCP는 이러한 해수와 선체 간 전위차 발생을 억제하여 부식을 방지하는 원리이며, Figure 3은 ICCP 시스템의 계통도이다.

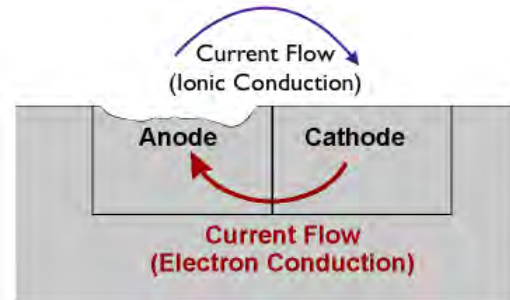


Figure 2: Principle of galvanic corrosion

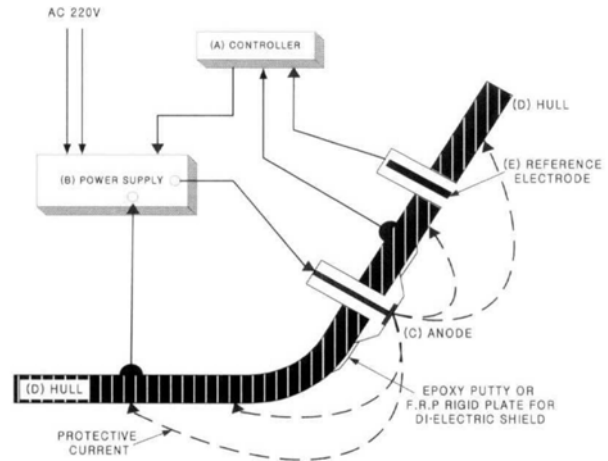


Figure 3: Schematic of the ICCP system for ship

함정의 배전반으로부터 공급되는 전원 AC 220V는 자동 정류기를 거쳐 시스템에 필요한 전원 DC 24V로 정류되어 선체의판에 부착되어 있는 양극을 통해 방식전류로 흘러 보내진다. 제어기(A)는 기준전극 각각의 직류전압 신호치를 감지하여 전원공급장치(B)로 보낸다. 전원공급장치는 수신된 신호치를 기준으로 하여 최적의 + 직류전류를 양극(C)과 해수를 통해 선체로 흘러주어 선체를 방식하게 된다. 이때 흐르는 전류의 양은 해수 중 선체(D)의 부식전위에 영향을 주게 되는데, 설치된 기준전극(E)에서 선체의 전위를 측정하여 선체 부식방지를 위한 가장 이상적인 방식전위 수준을 유지할 수 있도록 제어기를 통해 전류량을 끊임 없이 조정한다. 측정 방식 전위 수준을 위한 적정 방식전류량을 제어함으로써 선체의 부식방지를 도모하는 원리이다 [4]. 이때, 방식전위보다 낮은 전위를 유지할 경우 원자성 수소와 분자성 수소의 영향으로 수소취화가 발생하여 취성 파괴를 일으킨다[1]. 따라서 적정 방식전위를 꾸준히 유지하며 전류를 흘려주는 것이 가장 주요한 ICCP 시스템의 원리이자 목적이다. 해군에 설정되어 있는 ICCP 시스템은 함에 설치된 제어기 및 컨트롤러가 통합기관제어장치(Engineering Control System)와 연동되어 실시간으로 원격 조정이 가능토록 되어있다. 현재 운용중인 대다수의 해군 함정들은 방식을 위한 기준전극의 전위는 함마다 조금 차이는 발생하나 -760mV/SSCE 에서 -900mV/SSCE 수준을 유지하고 있다.

2.3 전기장 해석 모델 선정

해군 함정 ICCP 운용성 검증을 위하여 상대적으로 원양작전/파병 수행 업무 빈도가 잦은 △△함과 ◎◎함을 선정하였다. 함정의 ICCP 양극 및 기준전극이 설치된 위치는 각 함정의 외부전원식 음극방식장치 배치도를 기준으로 모델링 하였으며, 두 함정은 함수 선에 맞추어 복선 계류하는 것으로 가정하였다. 전기장 해석 모델링한 결과는 Figure 4와 같다.

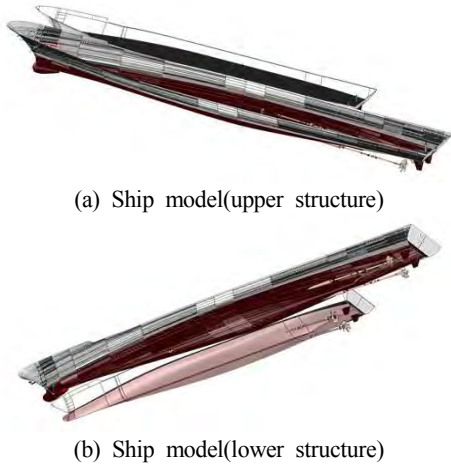


Figure 4: Result on ship modeling

전기장 해석은 ANSYS Maxwell을 이용하였으며, 해석을 위해 전체 Maxwell 방정식 중 일부를 지배방정식으로 사용하였다.

$$\vec{J}(x,y) = \sigma \vec{E}(x,y) = -\sigma \nabla \phi(x,y) \tag{1}$$

여기서  $\vec{J}(x,y)$ 는 전류 밀도,  $\vec{E}(x,y)$ 는 전기장의 세기,  $\sigma$ 는 전기전도도 (S/m),  $\phi(x,y)$ 는 전계 스칼라 포텐셜이다. 전기장 해석은 수식 (2)과 같이 ‘정상상태에서 미소영역의 전하량이 해석영역내의 전류와 같아야 한다’는 가정을 기본으로 한다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

ANSYS Maxwell에서 계산한 필드 데이터는 아래 수식 (3)의 전계 스칼라 포텐셜  $\phi$ 이다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \tag{3}$$

2.4 전기장 해석 조건

ICCP 운용성 검증 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 두 함정에 대해 운용 환경, 운용 조건, 수심 및 해수의 전기적 물성(도전율, 유전율)을 다르게 하여 전기장 해석을 수행하였다. 해석 조건은 Table 1과 같으며, Case 1에 적용한 기지 내 계류 조건은 한반도 진해 해군 기지로 기준하였으며, ‘가덕도 조위관측소’ 염분데이터의 1년간 평균값을 적

용하였다. Case 2에 적용한 작전 지역은 원양/파병 작전 업무를 주로 수행하는 걸프만 지역 해수 조건으로 해석을 수행하였다. 마지막으로 Case 3에서는 두 함정의 ICCP의 운용성 확인을 위해 단일 함정만 각각 작동한 경우에 대한 전기장 해석을 수행하였다.

Table 1: Application each case of electric field analysis

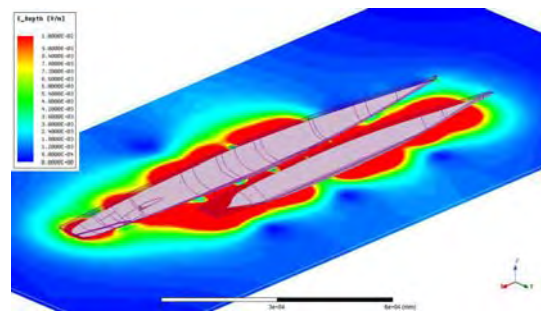
Classification	Sea water conditions	Operation ICCP conditions
Distribution by sea water	Case 1 In-Base Mooring (Conductivity : 4 S/m)	Double operation
	Case 2 In- Operational Area (Conductivity : 7 S/m)	Double operation
Distribution by Operation conditions	Case 3 In-Base Mooring (Conductivity : 4 S/m)	Single operation

3. 전기장 해석 결과

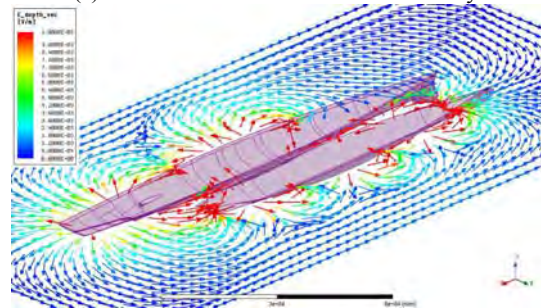
3.1 해수별 전기장 분포 해석 결과

3.1.1 기지 내 계류(도전율 : 4 S/m)

Figure 5에서부터 Figure 7까지는 Case 1에 대한 △△함과 ◎◎함의 전기장 분포 해석 결과이다. 해석 결과, 각 함정에서 발생하는 전기장 세기의 상쇄 현상이 발생하지 않았으며, 전기장 벡터의 증감 현상이 없는 것으로 보아 두 함정 간 ICCP 운용에 있어 전기장 간섭이나 상쇄 현상은 발생하지 않는 것을 검증할 수 있었다. 수심이 깊어질수록 전기장 세기가 약화되는 것도 확인할 수 있었다.

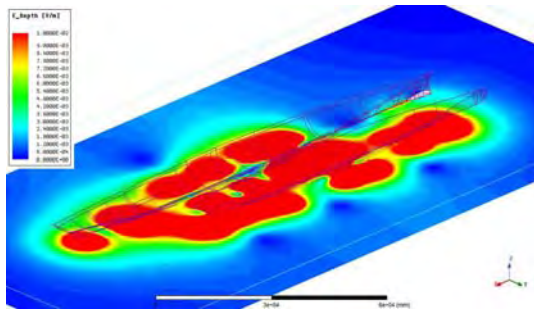


(a) Distribution of electric field intensity

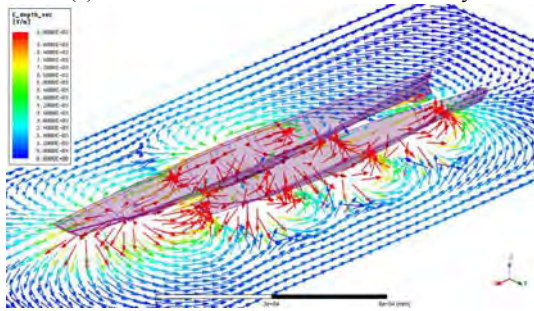


(b) Vector of electric field intensity

Figure 5: Result on electric field analysis (Depth: 1m)



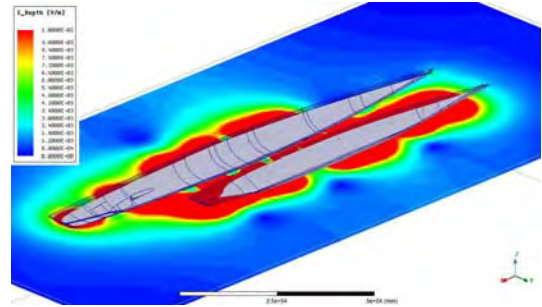
(a) Distribution of electric field intensity



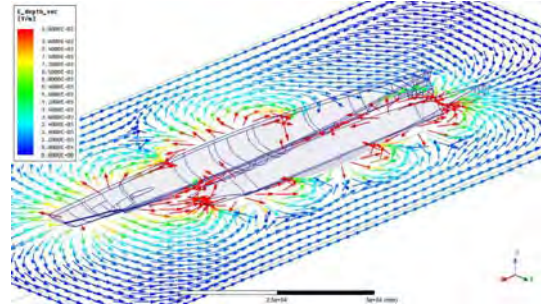
(b) Vector of electric field intensity

Figure 6: Result on electric field analysis (Depth: 5m)

또한, Case 1과 Case 2의 전기장 분포가 유사하게 나타난 것으로 보아 해수의 온도나 도전율로 인한 ICCP 운용성에 대한 차이는 미비한 것을 검증할 수 있었다. 따라서 작전 지역 계류 상황에서도 기지 내 계류 상황과 동일하게 ICCP를 작동하는 것이 타당하다고 판단되었다.

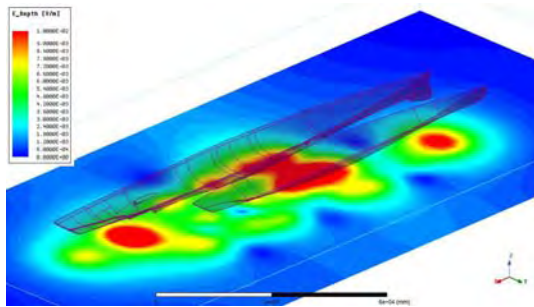


(a) Distribution of electric field intensity

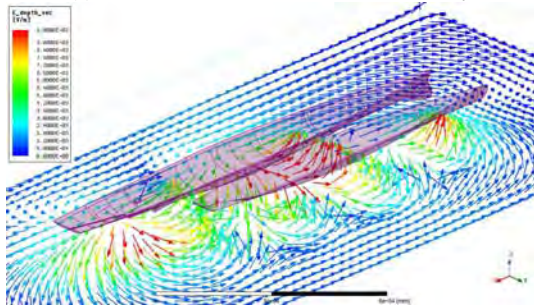


(b) Vector of electric field intensity

Figure 8: Result on electric field analysis (Depth: 1m)

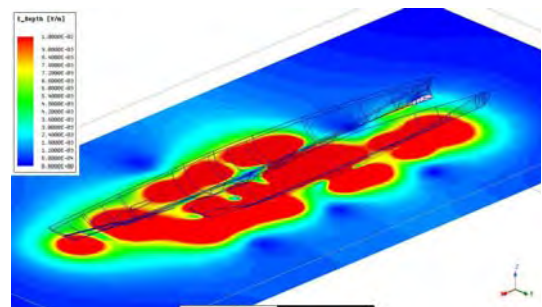


(a) Distribution of electric field intensity

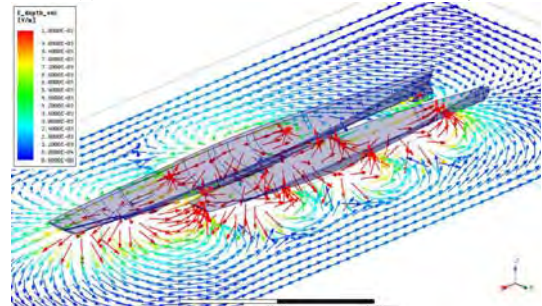


(b) Vector of electric field intensity

Figure 7: Result on electric field analysis (Depth: 10m)



(a) Distribution of electric field intensity



(b) Vector of electric field intensity

Figure 9: Result on electric field analysis (Depth: 5m)

3.1.2 작전 지역 계류 (도전율 : 7 S/m)

Figure 8에서부터 Figure 10까지는 Case 2에 대한 △△함과 ◎◎함의 전기장 분포 해석 결과이다. 해석 결과, Case 1과 마찬가지로 각 함정 간, 복선 계류로 인한 전기장의 상쇄나 상쇄 현상은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

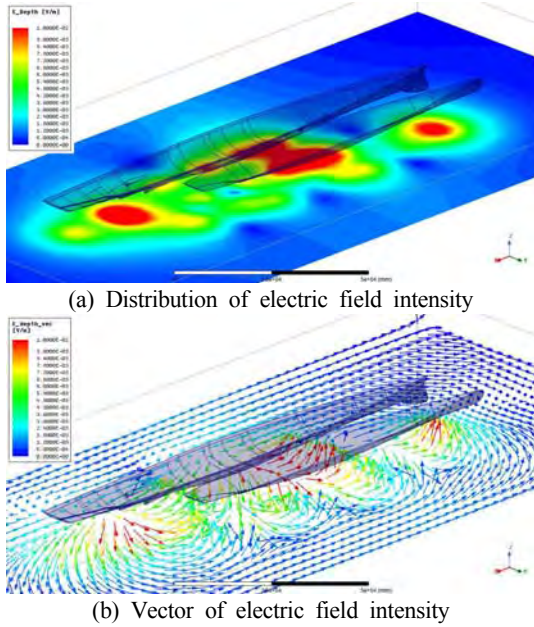


Figure 10: Result on electric field analysis (Depth: 10m)

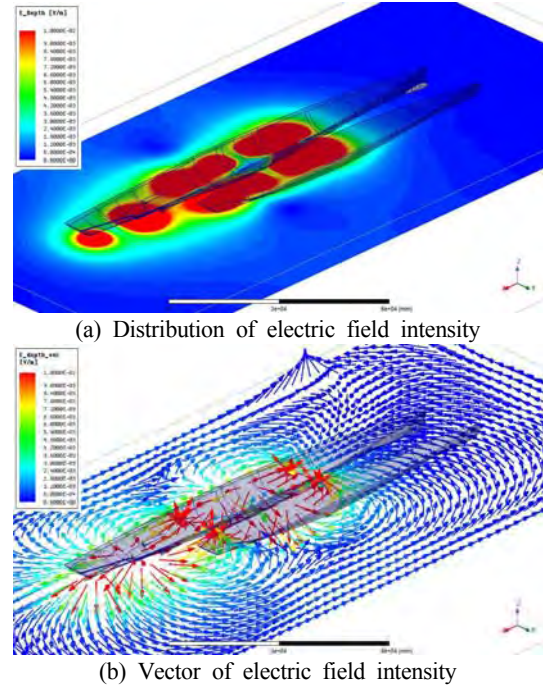


Figure 12: Result on electric field analysis (Depth: 5m)

### 3.2 운용조건 별 전기장 분포 해석 결과

#### 3.2.1 △△함 단일 작동 (도전율 : 4 S/m)

Figure 11에서부터 Figure 13까지는 Case 3중 △△함만 ICCP를 작동한 경우 전기장 분포 해석 결과이다. 해석 결과, △△함의 ICCP만을 작동하더라도 ◎◎함 주변까지도 전기장 세기가 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다만, △△함의 ICCP 위치가 선미와 중앙부분에 집중되어 있어 선수 쪽의 선체에 대한 방식이 효율적으로 되고 있지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 △△함의 ICCP 위치에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되었다.

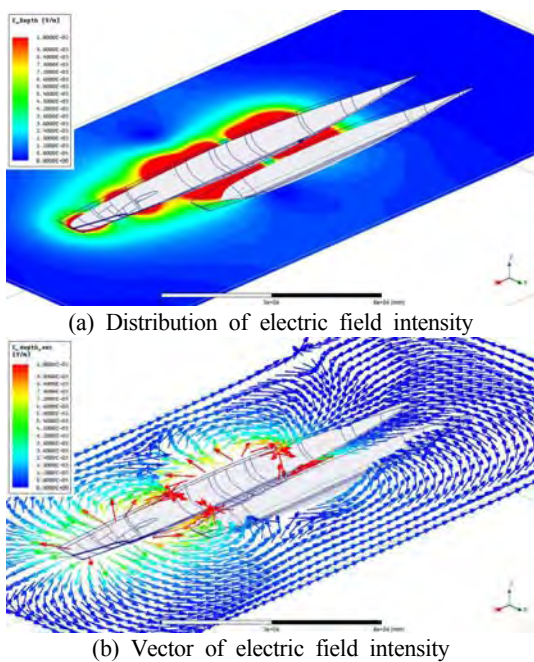


Figure 11: Result on electric-field (Depth: 1m)

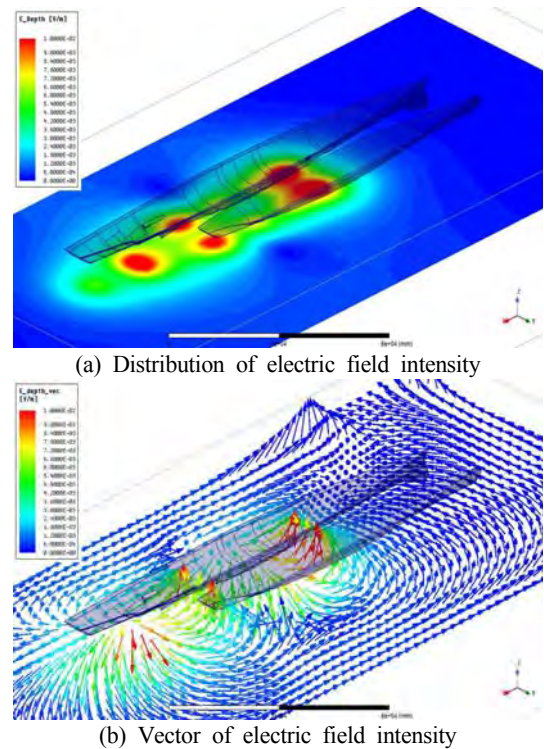
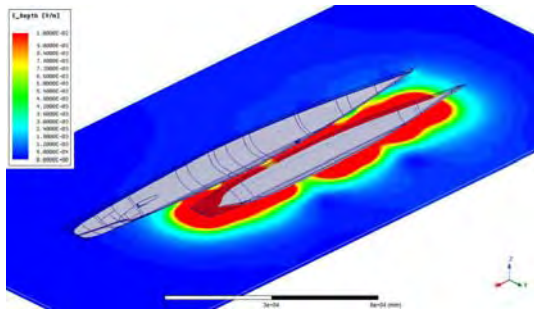


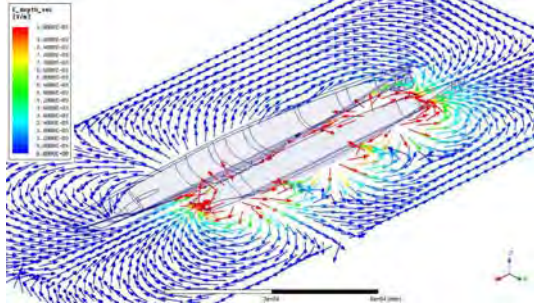
Figure 13: Result on electric-field (Depth: 10m)

#### 3.2.2 ◎◎함 단일 작동 (도전율 : 4 S/m)

Figure 14에서부터 Figure 16까지는 Case 3중 ◎◎함만 ICCP를 작동한 경우 전기장 분포 해석 결과이다. 해석 결과, 앞선 해석결과와는 확연히 다르게 △△함에는 전기장의 세기가 매우 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

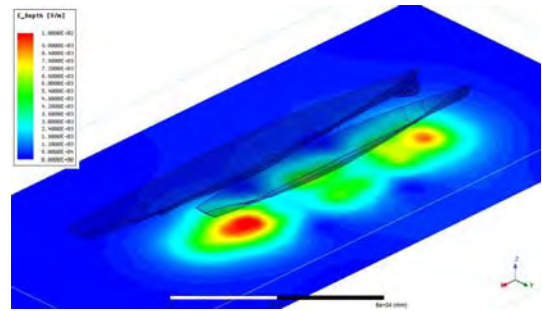


(a) Distribution of electric field intensity

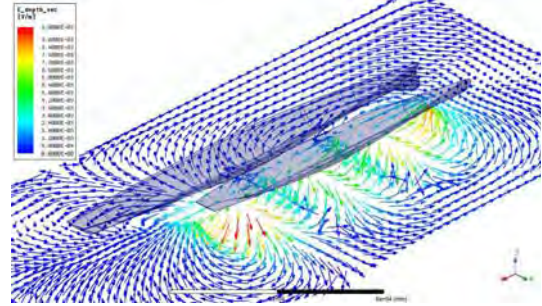


(b) Vector of electric field intensity

Figure 14: Result on electric field analysis (Depth: 1m)

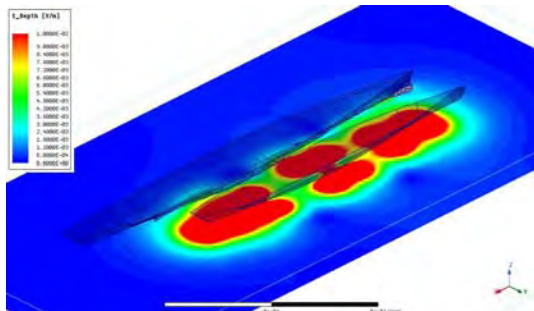


(a) Distribution of electric field intensity

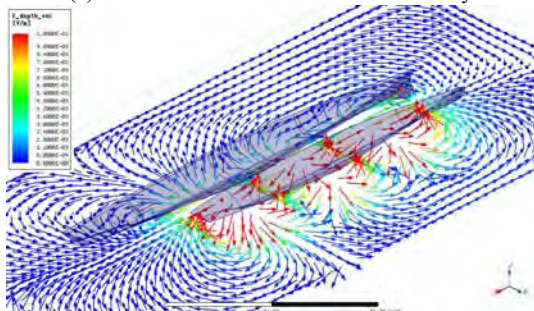


(b) Vector of electric field intensity

Figure 16: Result on electric field analysis (Depth: 10m)



(a) Distribution of electric field intensity



(b) Vector of electric field intensity

Figure 15: Result on electric field analysis (Depth: 5m)

각 함정들의 ICCP를 단일 작동하였을 경우, 두 함정의 함형과 ICCP 양극의 설치 위치에 의해 전기장 세기의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 상대적으로 대형함정인 △△함에는 상대적으로 소형함정인 ○○함 보다 출력이 높은 ICCP가 설치되어 △△함 단일 작동 경우, 전반적인 전기장 세기가 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 하지만, △△함은 선미 쪽의 전기장의 세기가 강한 것을 확인하였다. 반대로 출력이 낮은 ○○함 단일 작동 경우, ○○함에

는 충분히 전기장 세기가 나타나지만 대형함정인 △△함에는 전기장 세기가 약한 것을 확인하였다. 또한, 단일 함정 ICCP 작동 시 ICCP 미작동 함정의 누설전류로 인한 간섭 현상은 전기장 벡터 세기의 증감 현상과 전기장 세기의 증폭 현상이 나타나지 않은 것으로 보아 간섭에 대한 영향은 없는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해군에서 운용하고 있는 수상함정들 중에서 원양작전 및 과병 업무 빈도가 잦은 대표적인 2척의 함정을 선정하여, 전기장 해석을 통하여 ICCP 운용성에 대하여 검증하였다. 전기장 해석 결과, 두 함정 간 간섭이나 상쇄 현상은 발생하지 않은 것을 검증하였으며, 해수의 전기적 물성에 따른 ICCP 운용성능의 차이는 미비한 것을 검증하였다. 또한, 수심이 깊어질수록 전기장 세기가 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 두 함정의 복선 계류 시 단일 함정 ICCP 작동에 대하여 해석한 결과, 함형의 크기 및 양극의 위치에 따라 운용 여부가 달라질 수 있음을 검증하였다. 복선계류 시, 단일 함정의 ICCP만 작동될 경우 누설전류에 의해 ICCP 과부하에 의한 변압기 소손, 양극 주변의 전식으로 인한 선체부위가 손상되거나 미방식영역이 확장되는 문제가 발생하게 되므로 ICCP 운용에 상당한 주의가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만, 본 연구에는 ICCP 작동 성능에 영향을 미칠 수 있는 요소인 함정 선체 표면의 상태 및 도장의 열화율 등은 고려되지 않았으며, 지구 전기장에 의한 ICCP 운용 영향성이 고려되지 않은 제한적인 연구를 수행하였다. 추후에 수상함정들이 항해 중 ICCP 작동 조건, 단순 복선 계류가 아

닌 다양한 계류조건 및 외부 환경조건 등을 추가로 적용하여 ICCP 작동 성능에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### Author Contributions

The following statements should be used “Conceptualization, S. M. Choi; Methodology, S. M. Choi and B. Y. Kawn; Validation, S. M. Choi and K. L. Cho; Formal Analysis, S. M. Choi; Investigation, S. M. Choi and J. H. Lee; Resources, S. M. Choi, K. L. Cho and B. Y. Kawn; Writing?Original Draft Preparation, S. M. Choi; Writing-Review & Editing, S. M. Choi; Visualization, S. M. Choi; Supervision, S. M. Choi; Project Administration, K. L. Cho”.

### References

- [1] S. J. Kim, “Apparatus on corrosion protection and marine corrosion of ship,” Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, vol. 44, no. 3, pp. 105-116, 2016 (in Korean).
- [2] W. D. Kim, T. W. Kang, D. H. Lee, S. H. Lee, and W. J. Chang, “Structural safety assessment considering the hull corrosion and damage of sunken ships,” The Korean Society for Marine Environment & Energy, pp. 44-49, 2016 (in Korean).
- [3] R.O.K. Navy, The Manual of Navy Ship Maintenance Regulations, Seoul, KOREA: R.O.K. Navy, 2015 (in Korean).
- [4] J. S. Oh and J. Y. Lee, “A study on the ICCP control and monitoring system for ship,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 28, no. 4, pp. 667-674, 2004 (in Korean).