ICCP 양극 배치 변화에 따른 수중 전자기 신호 변화 분석

이상규* · 정현주 · 양창섭

국방과학연구소 제6기술연구본부

Analysis on Variations in Underwater Electromagnetic Signals of a Surface Ship as Varying Placement of ICCP Anodes

Sangkyu Lee*, Hyun-Ju Jung, and Chang-Seob Yang

The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Changwon 51678, Republic of Korea

Abstract: The impressed current cathodic protection (ICCP) is widely used for preventing galvanic corrosion and it strongly influences the underwater electromagnetic signals of a surface ship. For military use, the signals should be reduced to avoid threats such as modern naval weapons triggered by the signals. We analyzed the underwater electric field (UEF) and corrosion related magnetic field (CRM) of a surface ship with four pairs of ICCP anodes using the boundary element method and varying the anodes placement in a longitudinal direction. The currents applied on ICCP anode pairs was optimized to minimize the UEF under corrosion protection of the hull using sequential linear programming at each placement of the anodes. As a result, UEF and CRM decreased as the root mean square of the distances between ICCP anode pairs on the hull decreased, but they were not intimately related to the total amount of the currents from the ICCP anodes under the optimized condition.

(Received April 26, 2018; Accepted June 25, 2018)

Keywords: galvanic corrosion, cathodic protection, ICCP, UEMS, UEF, CRM

1. 서 론

수상함 선체는 해수에서 전기화학적 반응에 의해 갈바닉 부식이 발생한다. 대부분의 수상함의 선체와 프로펠러는 각각 강철(steel)과 청동합금(nickel aluminum bronze, NAB)으로 제작되어 전기적으로 연결된 상태에서 해수에 노출되고, 부식 전위가 프로펠러에 비해 낮은 선체는 양극이 되어 산화 반응에 의한 부식이 촉진된다 [1]. 이와 같은 갈바닉 부식은 수상함 선체의 구조적 안전성에 치명적인 문제를 야기하고 유지보수 비용을 증가시킨다. 또한, 갈바닉 부식은 수상함 선체와 프로펠러 사이에서 해수를 통해 흐르는 부식 전류에 의해 수중 전자기 신호 (underwater electromagnetic signal, 이하 UEMS)를 발생시켜서 전자기 신호 감응 수중 무기체계 등에 의해 아 해군 함정의 생존성에 큰 위협이 된다 [2,3].

일반적으로 함정에서는 갈바닉 부식을 방지하기 위한 다양한 수단이 적용된다. 가장 일반적인 내부식성도료를 이용한 선체 도장의 경우 부식 방지에 가장 효과적인 방법이나 함정 운항에 따른 도장 손실이 불가피하여 선체 방식에 한계가 있다. 따라서, 선체 도장에 추가적으로 선체 부식 발생이 예상되는 위치에 아연(zinc) 희생 양극을 붙이는 희생양극법 음극방식(sacrificial anode cathodic protection, SACP)과 선체에 부착된 양극으로 해수를 통해 선체에 전류를 인가하는 외부전원법 음극방식(impressed current cathodic protection, ICCP)이 적용된다 [1]. 이와 같은 음극 방식은 방식에는 효과적이거나 방식 전류에 의한 UEMS 발생으로 해군 함정의 생존성에는 취약할 수밖에 없다.

한편, 함정의 생존성 향상을 위해 선체 부식과 부식방지 장치에 의한 UEMS 해석, 특성 분석 및 감소 방안에 대한 연구는 군사 선진국을 중심으로 지속적으로 수행되어 왔으며, 경계요소법(boundary element method, BEM) 또는 유한요소법(finite element method, FEM)기반의 수치 해석 기법으로 해양 환경 변화와 ICCP 양극 pair 수 변

*Corresponding Author: Sangkyu Lee
[Tel: +82-55-540-6415, E-mail: pomula@add.re.kr]
Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

화 등에 의한 UEMS 변화를 분석하는 연구가 진행되고 있다 [2-6]. 대부분의 수상함에 적용되는 ICCP의 양극 배치 변화는 동일한 선체 방식 조건에서도 UEMS 변화를 유발하는데, 수상함 선체의 ICCP 양극 1 pair의 위치와 양극의 인가 전류 변화에 따른 함정의 UEMS 변화에 대한 연구 결과가 발표 되었으나 복수의 ICCP 양극 배치 변화에 대한 UEMS 변화 분석에는 한계가 있다 [7-9].

본 논문에서는 임의 수상함에 대해서 BEM 기반의 상용 수치해석 소프트웨어인 BEASY를 이용하여 4-pairs ICCP 양극의 배치 변화에 따라 동일한 선체 방식 조건에서 선체 부식과 부식방지장치에 의한 UEMS로 대표되는 수중 전기장(underwater electric field, 이하 UEF)과 부식에 의한 자기장(corrosion related magnetic field, 이하 CRM)의 변화를 분석한 결과를 기술하였다.

2. 해석방법

2.1 해석모델 및 해석 조건

수상함의 ICCP 전극 배치 변화에 따른 UEMS 변화를 수치적으로 해석하기 위해 그림 1(a)와 같은 임의의 수상함 수면 하 형상 모델을 사용하였다. 수상함 모델의 길이는 약 108 m, 폭은 약 13 m, 흘수는 약 4 m이며, UEMS를 분석하기 위한 관측 평면(observation plane)은 수면 아래 14 m로 가정하였으며, 관측 평면의 길이와 폭은 각각 300 m와 200 m이다. ICCP 양극은 선체의 길이방향으로 배치 변화가 가능하도록 약 11 m 등 간격으로 좌/우현에 10개의 pairs가 모델링 되었고, 선수에서 선미방향으로 1번부터 10번까지 ICCP 양극 pair 번호를 설정하였다. 희생 양극(sacrificial anode)은 프로펠러 부근의 선체 방식을 위해서 수상함 선미부에 배치하였다. 그림 1(b)는 해석 격자

를 설정한 수상함의 BEM 해석 모델이며, 해석을 위한 해수 경계 영역은 가로, 세로, 깊이가 각각 600 m, 600 m, 500 m인 직육면체로 모델링하였으며, 해수의 전기 전도도(electrical conductivity, σ)는 4 S/m로 가정하였다.

해석 모델의 각 구성 요소별 재질, 면적, 부식 전위는 표 1에 나타내었고, 각 구성 요소의 표면 경계 조건은 그림 2에 나타낸 분극 곡선을 적용 하였다. 선체의 분극 곡선은 함정의 운항 중 도장 손실을 고려하여 최대 도장 손실 값으로 보고되는 15%를 적용한 결과이고 [3], 프로펠러와 희생 양극의 분극 곡선은 선체 도장이 되어 있지 않는(bare) 상태를 적용한 결과이다.

등방성이고 균일한 해수 영역에서 수상함의 부식 및 부식방지 장치에 의한 UEMS는 전위 ϕ 에 대한 라플라스 방정식(Laplace equation)인 식 (1)에 의해 결정되는데 위에 언급된 해석 모델의 경계조건을 적용하여 수치적 해를 도출할 수 있다 [3].

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

UEF는 전기장도(electric field intensity) $\mathbf{E}$ 로 나타내며 식 (2)와 같이 전위의 구배(gradient)로 정의된다. 그리고 $\mathbf{E}$ 는 전류 밀도 $\mathbf{J}$ 와 식 (3)과 같이 비례 관계에 있다.

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

CRM은 자속밀도(magnetic flux density) $\mathbf{B}$ 로 나타내며, 식 (4)로 정의되는 벡터 포아송 방정식(vector Poisson's equation)으로부터 해수의 투자율 μ 와 식 (3)에서 구한 $\mathbf{J}$ 를 이용해서 벡터 포텐셜(vector potential) $\mathbf{A}$ 를 구한 후 최종적으로 식 (5)를 이용해서 $\mathbf{B}$ 가 계산된다 [9,10].

Fig. 1. Analysis model: (a) schematic and (b) BEM model.

Table 1. Material, area and corrosion potential (E_{corr}) of components in the analysis model.

Component	Material	Area (m ²)	E_{corr} @ seawater (V vs. Ag/AgCl)
Propeller	NAB	44	-0.22
Hull	HY-80	1560	-0.64
Sacrificial anode	Zinc	3	-1.230

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

2.2 ICCP 양극 배치 경우 선정 및 해석 모델

4-pairs ICCP 양극이 배치된 수상함에 대한 UEMS 해석을 위해 그림 1에서 나타난 10 pairs로 모델링된 ICCP 양극 중에서 4 pairs를 선택하고, 나머지 6 pairs는 선체의 분극 곡선 조건을 적용하여 선체로 모델링하였다. 선택된 4-pairs ICCP 양극의 pair 번호 사이의 간격에 대한 제곱 평균 제곱근(root mean square, RMS) 값 d_{rms} 를 식 (6)과 같이 정의했다.

$$d_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - X_{j-1})^2}{n}} \quad (6)$$

여기서, j 가 1~4 범위에서 X_j 는 선체에 배치된 4-pairs ICCP 양극에 대해서 선수방향에서부터 j 번째에 배치된 ICCP 양극 pair 번호이고, X_0 와 X_5 는 각각 1과 10이며, n 은 5이다. d_{rms} 가 작을수록 ICCP 양극 pair 사이의 간격이 균일하게 된다.

10-pairs ICCP 양극 중에서 4 pairs를 선택하는 경우의 수는 총 210가지인데, d_{rms} 변화에 따른 UEF와 CRM의 변화에 대한 경향을 파악하기 위해 d_{rms} 값의 최소값인

Fig. 2. Polarization curves of hull, propeller, and sacrificial anode.**Table 2.** Analysis cases for 4-pairs ICCP anodes placement.

No.	placement	d_{rms}	No.	placement	d_{rms}
1	'3,5,7,8'	1.84	15	'3,6,9,10'	2.14
2	'3,4,6,8'	1.84	16	'4,5,7,10'	2.14
3	'3,5,7,9'	1.84	17	'4,5,6,7'	2.05
4	'2,4,6,8'	1.84	18	'1,3,4,6'	2.24
5	'3,5,6,8'	1.84	19	'1,4,5,6'	2.32
6	'1,4,6,8'	2.05	20	'2,4,6,10'	2.24
7	'3,4,6,7'	1.95	21	'1,3,7,9'	2.24
8	'2,5,7,9'	1.95	22	'1,3,5,9'	2.24
9	'3,6,8,10'	2.05	23	'6,7,8,9'	2.41
10	'1,4,7,9'	2.14	24	'1,2,4,8'	2.24
11	'2,3,5,8'	1.95	25	'7,8,9,10'	2.79
12	'1,3,5,8'	2.05	26	'1,2,3,4'	2.79
13	'2,4,5,8'	1.95	27	'1,8,9,10'	3.19
14	'2,5,8,10'	2.14	28	'1,2,9,10'	3.19

1.84에서 최대값인 3.19를 포함하여 총 28가지의 ICCP 양극 배치 경우를 표 2와 같이 임의로 선정하였다.

각 해석 경우는 BEASY 프로그램(10.0r15)의 ICCP optimization 모듈을 이용해서 해석을 수행하였으며, 4-pairs ICCP 양극의 각 pair별 인가 전류는 목적함수를 관측 평면 내의 E 크기의 최대값으로 설정해서 순차 선형 계획법(sequential linear programming, SLP)을 이용하여 UEF를 최소화하도록 최적화하였다 [11]. 이 때, 구속조건으로 선체 전체의 전위 범위를 ISO 12473 [12]에서 규정한 방식 기준인 -1100 ~ -800 mV_{Ag/AgCl}로 설정하고 ICCP 양극의 각 pair당 전류 값의 범위를 0~50 A로 설정하였다.

각 해석 경우에서 BEASY Signature Toolkit의 CRM solver를 이용하여 4-pairs ICCP 양극에 위 해석에서 도출된 최적화된 전류를 인가한 해석을 수행해서 전위 분포, UEF, CRM 결과를 도출하여 ICCP 양극 배치 별 선체 방식 상태를 확인하고 UEMS 변화를 분석하였다.

2.3 기준전극 배치 및 해석 모델

최근 함정에서 운용되는 ICCP는 정전위(potentiostatic) 방식으로 선체 전위를 방식 범위 내로 유지되도록 선체의 특정 위치에 부착된 기준전극을 이용한 기준전극 위치의 선체 전위 값 모니터링을 통해 ICCP 양극의 인가 전류를 제어하는 시스템이다. 2.2절의 해석 모델은 선체 전 영역의 전위를 방식기준으로 설정하고 UEF가 최소화되도록 ICCP 양극 인가 전류를 최적화하였으나, 실험에 적용되는 ICCP 시스템은 기준전극 위치의 선체 전위를 특정 값으로 설정하고 ICCP 양극의 총 전류량이 최소화하도록 ICCP

Fig. 3. Surface ship model which have 4-pairs reference electrodes.

양극 각 pair별 인가 전류를 최적화한다. 따라서, UEMS가 최소화되도록 선정된 ICCP 양극 배치에 대한 실험의 ICCP 시스템에 적용성평가를 위해 2.2절의 해석 모델과 기준전극이 배치된 해석 모델과의 결과 비교가 필요하다.

2.2절의 해석결과를 바탕으로 UEMS가 최소화되도록 선정된 ICCP 양극 배치모델에 대한 방식 상태의 선체 표면 전위 분포에서 ICCP 양극 pair 사이의 전위 값이 가장 높은 영역(전위 값이 $-800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 에 가까운 영역)에 기준전극을 배치하였다. 이와 같이 기준전극 배치 시, 경험적으로 동일한 ICCP 양극 배치에서 방식되는 선체의 전위 분포는 유사한 형태를 가지는 것으로 판단되므로 선체 전위 영역의 전위를 방식 범위로 조절하기 위해 기준전극 위치의 선체 전위를 약 $-800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 값으로 설정할 수 있다.

그림 3은 그림 1의 수상함 모델에 한 번의 크기가 약 0.1 m인 정사각형으로 모델링 한 기준전극을 선체에 4 pairs로 배치한 기준전극이 배치된 해석 모델이다. 이 해석 모델은 실험에서 운용되는 정전위 방식 ICCP와 유사하게 기준전극의 전위를 선체 방식 범위인 $-1100 \sim -800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 로 설정하고 ICCP 양극의 총 전류량의 크기를 최소화하도록 ICCP optimization 모듈을 이용하여 ICCP 양극 pair 각각에 최적화된 인가 전류가 적용된 모델의 해석을 수행하였다. 그리고 해석결과로부터 선체 방식 상태, 기준전극 위치의 선체전위, UEMS를 분석하고 2.2절의 ICCP 양극 배치모델 해석결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ICCP 양극 배치 별 수중 전자기 신호 변화

그림 4(a)에 ICCP 양극의 28가지 배치 경우에 대한 UEMS 해석결과를 d_{rms} 변화에 따른 관측 평면 내의 수상함의 용골(keel) 위치에서 UEF와 CRM의 최대값 변화로 나타내었다. d_{rms} 가 커질수록 즉 4-pairs ICCP 양극 pair 사이 간격이 균일하지 않을수록 UEF와 CRM이 모두 증가하

는 경향을 가진다. 또한, d_{rms} 의 변화에 따라 UEF와 CRM의 크기가 최대 각각 약 3.4배와 약 6.7배 변하므로 d_{rms} 가 UEMS 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 한편, UEF와 CRM은 동일한 수준의 부식 또는 방식 전류 분포에 의해 발생하므로 두 값이 유사한 경향을 가지는 것과 210가지의 ICCP 양극 배치 경우 중 최소의 $d_{\text{rms}} (=1.84)$ 를 가지는 모든 배치의 해석결과가 다른 d_{rms} 의 결과에 비해

(a)

(b)

Fig. 4. Variation in electromagnetic fields as varying RMS of distances between ICCP anode pairs, d_{rms} (a) and ICCP current (b).

UEF 크기와 그 편차가 작다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(a)에 나타난 동일한 해석 결과를 그림 4(b)에서 ICCP 양극의 총 전류량의 크기 변화에 대한 UEMS의 크기 변화로 나타내었다. ICCP 양극 각 pair별 인가 전류는 UEF를 최소화 하도록 최적화 되었는데, ICCP 양극 배치 경우에 따라 ICCP 양극의 총 전류량의 크기 변화와 UEMS의 크기 변화가 부분적으로 비례관계가 있는 결과도 있으나 대부분 상관관계가 없는 것으로 판단된다. 이는 UEMS의 크기는 수중의 부식 및 방식 전류의 분포에 의해 결정이 되므로 UEMS의 크기는 ICCP 양극에 인가되는 총 전류량 보다는 ICCP 양극의 배치와 ICCP 양극 각 pair별 인가 전류 배분에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 따라서 UEMS 감소를 위해서는 ICCP 양극 간격을 균일하게 배치하고 ICCP 양극 각 pair별 인가 전류를 효과적으로 배분하는 것이 필요하다고 사료된다.

ICCP 미 적용한 경우와 d_{rms} 가 1.84로 최소가 되도록 ICCP 양극 pair를 '3,5,7,9'로 배치한 경우에 대해 선체 전위와 UEMS의 분포를 비교하였다. 그림 5(a)에 나타난 ICCP 미 적용한 경우의 선체 전위 분포는 약 $-1104 \sim -692$ mV_{Ag/AgCl}으로 희생 양극이 배치된 선미부를 제외하고 대부분 선체가 미방식 상태에 있으나, 그림 5(b)에 나타난 ICCP 양극이 배치되어 최적화된 전류가 인가된 경우에는 선체 전위 분포가 약 $-1071 \sim -816$ mV_{Ag/AgCl}으로 선체 전 영역이 방식 상태가 된다. 그림 6에서 관측 평면의 UEF와 CRM 분포가 ICCP 미적용 모델에 대해서는 선미부에 집중되고, ICCP 적용 모델에 대해서는 선체 길이방향으로 비교적 고르게 분포한다. 또한, '3,5,7,9' ICCP 적용의 경우 최대 UEF와 CRM값이 ICCP 미 적용한 경우 대비 각각 약 31%와 약 33% 수준으로 감소한다.

Fig. 5. Potential distributions on hull in the case of no ICCP (a) and 4-pairs ICCP anodes ('3,5,7,9') (b).

Fig. 6. UEF and CRM distributions on observation plane in the case of no ICCP (a) and 4-pairs ICCP anodes ('3,5,7,9') (b).

3.2 기준전극 배치모델 해석결과

그림 5(b)에 나타난 ICCP 적용 모델의 선체 전위 분포 결과를 바탕으로 선체 전위가 상대적으로 높은 지점인 선수 부 영역과 ICCP 양극 pair 사이 영역에 기준전극 4 pairs를 배치하였고, 이 기준전극 배치모델의 선체 전위와 UEMS의 분포를 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)에서 기준전극 위치의 선체 전위는 약 $-810 \sim -800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 이며, 전체 선체 전위 분포는 $-1071 \sim -798 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 으로 선체 최대 전위가 방식 기준보다 $2 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 높으나 대부분 선체는 방식 상태에 있으며, 기준전극 위치의 선체 전위 값을 $-800 \text{ mV}_{\text{Ag/AgCl}}$ 근방에서 조절하여 선체 전 영역의 전위를 방식 범위로 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7(b)에 나타난 관측 평면의 UEF와 CRM 분포를 그림 6(b)와 비교하면 전체적인 분포 형태가 변화되었는데, 그 이유는 표 3에 나타난 해석 시 적용된 ICCP 양극 pair별 인가 전류 값의 차이에 기인한 것으로 판단된다. ICCP 양극 pair별 인가 전류 최적화 조건과 방법의 차이로 ICCP 양극의 총 전류량은 기준전극 적용 후에 약 8% 감소했으나, 최대 UEF와 CRM 값은 각각 약 27%와 약 25% 증가했다.

수중 무기체계에 탑재되는 전자기장 센서는 주로 3축 벡터 센서가 사용되므로 UEMS를 3축 방향의 성분으로 구

분하여 분석할 필요가 있다. 수상함 모델은 좌/우 대칭 구조이므로 관측 평면 내의 수상함의 용골(keel) 위치에서 UEMS는 UEF의 x축 방향 성분 E_x 와 z축방향 성분 E_z , 그리고 CRM의 y축 방향 성분 B_y 로 구분할 수 있다. 그림 8에서 수상함의 용골(keel) 위치의 E_x , E_z , B_y 에 대해 ICCP와 기준전극 적용 여부를 구분하여 비교한 결과를 나타내었다. E_x , E_z , B_y 크기의 최대값이 발생하는 위치(distance)와 최대값이 ICCP 적용 전에는 각각 -39 m, -51 m, -36 m에서 0.68, 1, 1 이고 ICCP만 적용한 후에는 각각 -37.5 m, 45 m, -37.5 m에서 0.26, 0.31, 0.33 이고, ICCP와 기준전극을 모두 적용한 경우에는 -37.5 m, -27 m, -39 m에서 0.34, -0.38, 0.42이다. ICCP가 적용된 경우, 기준전극 적용 유/무에 따라 E_x , E_z , B_y 최대 크기가 각각 약 33%, 23%, 25%변화하는데 이는 앞서 언급한 ICCP 양극 pair별 인가 전류 최적화 조건과 방법의 차이에 기인한 것으로 판단된다. ICCP 적용 전/후를 비교하면 기준전극 적용 유/무와 관계없이 d_{rms} 값이 최소가 되도록 ICCP 양극 pair가 배치된 경우에는 ICCP 적용 후에 E_x , E_z , B_y 최대 크기가 약 50% 이하 수준으로 감소한다. 이는 기준전극이 배치된 실험과 유사한 정전위 방식의 ICCP 시스템 적용 유/무 보다 그림 4(a)에 나타난 ICCP 양극 배치 변화가 UEMS 변화에 주된 요인으로 분석되며 UEMS가 최

Fig. 7. Potential distributions on hull (a) UEF and CRM distributions on observation plane (b) in the case of 4-pairs ICCP anodes ('3,5,7,9') with reference electrodes.

Table 3. Applied currents on each pair of ICCP anodes of the analysis model with the '3,5,7,9' ICCP anode placement.

Analysis condition	Optimized applied current on each ICCP pair (A)				
	#3 pair	#5 pair	#7 pair	#9 pair	Total
Optimized for UEF reduction (without reference electrode)	8.0	7.0	9.1	3.6	27.7
Optimized for total current reduction (with reference electrode)	9.6	6.7	7.1	2.2	25.6

Fig. 8. The analysis results on variations in E_x (a), E_z (b), B_y (c) as varying distance along the keel line projected on the observation plane in the cases of no ICCP, 4-pairs ICCP (3,5,7,9) and 4-pairs ICCP (3,5,7,9) with 4-pairs reference electrodes (R.E.).

소화되도록 선정한 ICCP 양극 배치를 실험과 유사한 정전위 방식의 ICCP 시스템에 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

수상함의 4-pairs ICCP 양극 pair 배치 변화에 따른 UEMS 변화를 BEM 기반의 수치해석모델을 이용하여 분석하였다. 선체 방식 조건 하에서 UEMS 최대값을 최소화 하도록 ICCP 양극 pair의 인가 전류가 최적화 된 경우에는 UEF와 CRM은 선체 길이방향으로 ICCP 양극 pair 사이 간격이 균일할수록 감소되는 경향을 가지며 ICCP 배치 변화에 따라 UEMS의 크기가 최대 약 7배 차이가 난다. 또한, 최적화된 ICCP 양극의 총 전류량 크기는 UEMS의

크기와 밀접한 상관관계는 없는 것으로 확인되었다.

실험에서 운용되는 정전위 방식 ICCP와 유사하게 ICCP 양극 pair 사이 간격이 최소가 되도록 ICCP 양극을 배치한 상태에서 기준전극 위치의 선체 전위를 선체 방식 범위로 설정하여 ICCP 양극의 총 전류량을 최소화한 최적화 해석결과를 분석하였다. 위의 UEMS 최소화 경우와 비교하여 최적화된 ICCP 양극의 총 전류량 크기가 약 8% 감소했으나, UEMS의 크기는 최대 약 27% 증가되었다. 그러나 기준전극 적용 유/무에 관계없이 UEMS의 크기가 ICCP 미적용 경우에 비해서는 약 50% 이하 수준으로 감소를 알 수 있었다.

향후 실험적 검증 등의 후속연구가 진행된다면 본 연구 결과는 선체 부식과 부식방지장치에 의한 UEMS 감소를 통한 해군 함정의 생존성을 향상시키는 ICCP 양극 배치 설계에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청이 관리하고 국방과학연구소가 수행하는 “함정자장제어기술” 과제의 일환으로 진행되었습니다 [사업부호: 912461201].

REFERENCES

1. D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd ed., pp. 168-177, 439-448 Prentice Hall, NJ (1996).
2. H. J. Chung, C. S. Yang, and J. J. Jeon, *J. Kor. Inst. Mil. Sci. Tech.* **11**, 43 (2008).
3. H. J. Chung, C. S. Yang, H. S. Ju, and J. J. Jeon, *J. Kor. Inst. Mil. Sci. Tech.* **15**, 177 (2012).
4. Y.-S. Kim, K.-M. Kim, S. Lee, and J.-G. Kim, *Korean J. Met. Mater.* **55**, 348 (2017).
5. Y.-S. Kim, S. J. Ko, S. Lee, and J.-G. Kim, *Korean J. Met. Mater.* **55**, 591 (2017).
6. D. Schaefer, J. Dose, M. Pichlmaier, A. Rennings, and D. Erni, *IEEE J. Oce. Eng.* **41**, 105 (2016).
7. J. Wu, S. Xing, C. Liang, L. Lu, and Y. Yan, *Adv. Eng. Soft.* **42**, 902 (2011).
8. E. S. Diaz and R. Adey, *Boundary Elements XXIV*, pp. 1-16, WIT Press (2002).
9. S. Xing, J. Wu, and Y. Yan, *WIT Trans. Eng. Sci.* **65**, 69 (2009).
10. D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics* 2nd ed., pp. 232-234, Addison-Wesley (1989).
11. *Beasy Cathodic Protection Manual*, Beasy Software (2013).
12. *ISO 12473 1st ed.*, International Standard (2006).