

기차력 민감도와 가상영역 내에 구축된 코일을 이용한 소자 코일의 전류 최적화

최낙선*, 정기우*, 양창섭**, 정현주**, 김동훈*
 경북대학교*, 국방과학연구소**

Optimization for Degaussing Coil Currents
 Utilizing Coils established in Virtual Area and Magnetomotive Force Sensitivity

Nak-Sun Choi*, Gi-Woo Jeung*, Chang-Seob Yang**, Hyun-Ju Chung**, Dong-Hun Kim*
 Kyungpook National University*, Agency for Defense Development**

Abstract - 합정 내부에 설치된 소자 코일의 기하학적 정보를 알 수 없을 때에도 소자 코일 전류 최적화를 수행하고자 코일 효과와 기차력 민감도를 이용한 최적화 기법을 바탕으로 가상영역 내에 구축된 코일을 이용하는 소자 코일 전류 최적화를 수행하는 기법을 제시하였다. 민감도 특성을 기반으로 가상영역 내에 임의의 소자 코일을 구축하였으며 이에 따른 특성을 분석하였다. 그리고 정상 상태의 소자상태, 전류 최적화 결과를 비교함으로써 제안한 기법의 활용 가능성을 확인하였다.

1. 서 론

음향과 마찬가지로 수중 탐지 수단 중에 하나로서 근거리에서 정확한 식별과 탐지를 가능하게 하는 합정의 정자기장 외란 신호는 크게 영구 자기장과 유도 자기장으로 분리된다. 전자의 경우 외부 탐자 전용 시설을 이용하여 합정 선체의 탐자를 수행한다. 반면에 후자의 경우 합정 내부에 설치된 소자 코일에 전류를 흘려 유도 자기장과 동일 크기지만 반대 방향인 자기장을 생성하여 소자를 수행한다. 이 때, 합정에서 발생하는 자기장은 수직방향 자기장(vertical magnetization: VM), 종축방향 자기장(longitudinal magnetization: LM), 횡축방향 자기장(athwartship magnetization: AM)으로 각 성분별로 구분되며, 선체 내부에 설치된 수직, 종축, 횡축 방향의 소자 코일을 이용하여 소자한다. 이와 더불어 합정 자기장에 맞는 소자 자기장을 생성하기 위해서는 적절한 소자 코일 전류를 결정하여야 한다. 소자 전류의 계산을 위해서 기존에 수행된 확률적인 방법이 아닌 코일 전류에 대한 목적 함수의 1계 미분 정보인 기차력 민감도를 이용한 최적화 기법과 각 소자 코일의 코일 효과를 통해 3차원 유한요소 해석을 배제하는 방법을 채택하였다[1~4]. 그리고 합정 소자를 효과적으로 수행하기 위해서는 합정 내부에 설치된 소자코일의 기하학적인 정보를 정확히 알고 있어야 한다. 하지만 자기정확화에 대한 중요성을 크게 인식하지 못 했을 때 건조된 합정의 경우 소자 코일은 장착되어 있지만 정확한 위치 및 설치 정보를 가지고 있지 않으며 또한 합 내부에 설치된 코일의 정보 자체가 중요한 군사기밀로써 접근이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기차력 민감도법과 코일 효과를 결합한 소자 코일 최적화 기법에 추가적으로 민감도의 특성을 이용한 가상의 영역을 구축함으로써 합정 내부에 설치된 코일의 기하학적 정보 없이 소자 코일의 최적화 전류를 산정하는 기법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 소자 코일 전류 모델링

소자 코일에 흐르는 단위 전류에 대해서 발생하는 소자 코일 자기장을 코일 효과(coil effect)라고 한다. 그리고 소자 코일 전류에 대한 자기장 변화의 선형성을 이용하여 각 코일별 전류에 대한 자기장을 예측하게 된다. 식 (1)에 코일 효과의 선형성을 나타내었다.

$$B_i = B_{ij} \frac{J}{J_R} \quad j = 1, \dots, np \quad (1)$$

여기서 J 는 각 코일의 기차력, R 은 코일 효과를 계산한 기준 기차력 그리고 i 와 j 는 벡터 성분과 측정 위치를 의미한다.

본 연구에는 주어진 연구 환경을 고려하여 그림 1과 같이 3차원의 유한요소 합정모델을 이용한 수치해석 결과를 이용하였으며 수치해석으로부터 계산된 코일 효과는 선체의 의한 차폐 효과를 반영한다[5].

2.2 전류에 대한 기차력 민감도

소자 코일 전류의 최적화 문제를 수행하기 위해서 식 (2)와 같이 스칼라 함수인 목적함수 F 를 정의하였다.

$$F = \int_{\Omega} g(\vec{B}(\vec{p})) d\Omega \quad (2)$$

여기서 \vec{p} 는 시스템 파라미터 벡터, 스칼라 함수 g 는 시스템 파라미터의

음함수를 의미한다.

증대된 라그랑지법과 그린 정리를 바탕으로 암페어 법칙과 맥스웰 방정식의 변분식을 식 (2)에 더함으로서 증대된 목적함수를 도출하여 식 (3)과 같이 유도하였다.

$$-\int_{\Omega} [\nu \nabla \times \vec{A} \cdot \nabla \times \vec{\lambda}] d\Omega + \int_{\Omega} [\vec{J} \cdot \vec{\lambda}] d\Omega - \int_{\Gamma} [\nu \nabla \times \vec{A} \cdot \vec{\lambda}] d\Gamma = 0 \quad (3)$$

여기서 ν 는 자기저항, $\vec{\lambda}$ 는 보조 변수로서 벡터량을 가지는 라그랑지승수벡터를 나타낸다. 만약에 증대된 목적함수에서 시스템 파라미터 \vec{p} 가 미소변화 $\delta\vec{p}$ 만큼 변한다면 다음과 같이 표현되며 이로부터 설계변수에 대한 목적함수 변화인 민감도를 도출하였다.

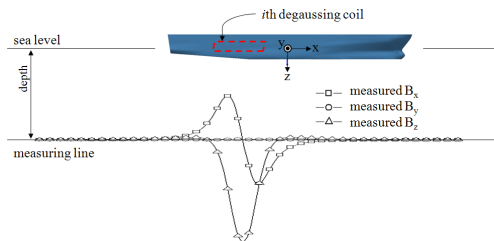
$$\begin{aligned} \dot{F} = & \int_{\Omega} [g_{\nabla \times \vec{A}} \cdot \nabla \times (\delta\vec{A} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial p} \delta p)] d\Omega \\ & - \int_{\Omega} [\nabla \times \vec{A} \cdot \nabla \times (\delta\vec{\lambda} + \frac{\partial \vec{\lambda}}{\partial p} \delta p)] \\ & + \nabla \times \vec{\lambda} \cdot \nabla \times (\delta\vec{A} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial p} \delta p)] d\Omega \\ & + \int_{\Omega} (\frac{\partial \vec{J}}{\partial p} \cdot \vec{\lambda}) d\Omega + \int_{\Omega} [\vec{J} \cdot (\delta\vec{\lambda} + \frac{\partial \vec{\lambda}}{\partial p} \delta p)] d\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $g_{\nabla \times \vec{A}}$ 는 $g_{\nabla \times \vec{A}} \equiv \frac{\partial g}{\partial \vec{A}}$ 로서 보조 시스템의 가상 소스이다.

식 (4)를 간략하게 나타내기 위해서 $(\delta\vec{A} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial p} \delta p)$, $(\delta\vec{\lambda} + \frac{\partial \vec{\lambda}}{\partial p} \delta p)$ 를 각각 $\vec{\lambda}$, \vec{A} 로 치환하여 \vec{A} 항을 포함하는 피적분항들과 $\vec{\lambda}$ 항을 포함하는 피적분항들로 구분하였다. 이 때 \vec{A} 를 포함하는 경우는 주 시스템의 변분식과 동일한 형태를 이루고 있으므로 생략된다. 또한 $\vec{\lambda}$ 항을 포함한 영역 적분항을 0으로 설정함으로써 보조 시스템을 정의하여 최종적으로 식 (5)와 같이 시스템 파라미터 p 를 전류밀도 \vec{J} 의 선형으로 가정하여 기차력 민감도식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\vec{J} = \vec{p} \Rightarrow \frac{\partial \vec{J}}{\partial p} = \int_{\Omega} (\frac{\vec{\lambda}}{N}) d\Omega \quad (5)$$

여기서 N 은 각 코일 턴수를 나타낸다.

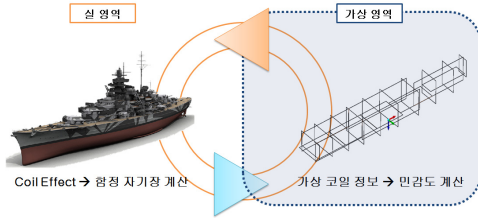


<그림 1> 소자 코일에 대한 코일효과 측정

2.3 가상영역을 이용한 최적화 알고리즘

민감도법의 특성으로 생성되는 가상영역에서 식 (5)를 통해 각 코일 전류별 기차력 민감도를 계산한다. 이 때, 최적화 문제에서 일계 미분 정보인 민감도의 값이 비슷하다면 도출되는 최적화 결과 역시 비슷한 수렴 결과를 가진다. 이러한 특성을 바탕으로 합정의 폭, 넓이, 길이를 바탕으로 가상영역에 임의의 소자 코일을 구축하였다. 주의할 점은 그림 2와 같이 가상영역에 구축된 코일은 오직 전류의 민감도 산출에만 이용된다. 즉, 소자 전류에 대한 소자 코일 자기장은 가상영역과 상관없이

수치해석으로 계산된 코일 효과의 선형성으로 예측된다. 소자 코일의 최적 전류를 찾기 위해서 수리탐색도로 Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS) 알고리즘에 기반을 둔 DOT를 연계하여 해석의 효율성, 정확성을 높였다[6~8].

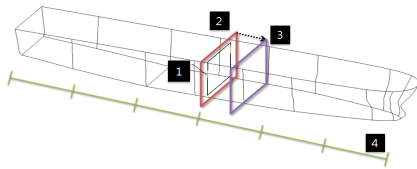


〈그림 2〉 가상영역을 통한 최적화 개념도

2.4 가상영역을 이용한 소자 전류 최적화의 검증

2.4.1. 가상영역 구축

소자 코일 전류 최적화에 적용된 기저력 민감도 기법의 특성을 기반으로 가상영역의 소자 코일에 대해 최적화의 성능을 분석하였다. 이를 위해 가상영역에 구축되는 임의의 코일 위치와 크기에 대해서 그림 3과 같이 가정하였으며 표 1에 자세히 기술하였다.



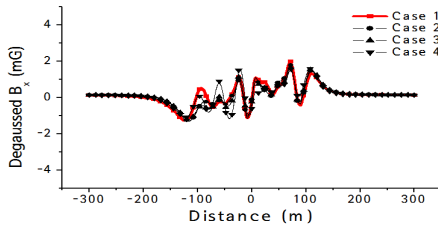
〈그림 3〉 위치 및 생성 조건에 따른 가상 코일

〈표 1〉 가상영역 내 소자 코일 생성 조건

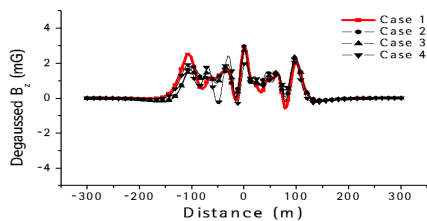
조건	
조건 1	정상적인 코일과 동일 위치와 크기
조건 2	위치는 동일하지만 가로/세로 길이에 대해서 임의 설정
조건 3	조건 2를 바탕으로 함정 길이 방향으로 코일 이동 (위치 변경 추가)
조건 4	함정의 폭, 넓이, 길이를 이용하여 임의 생성

2.4.2. 결과

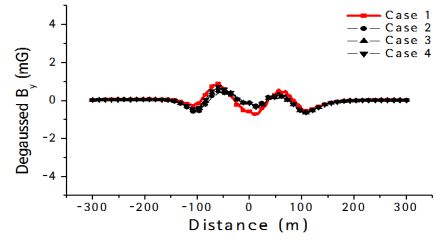
그림 4는 각 방향별 유도자기장 성분인 ILM, IAM, IVM에 대해서 소자 코일 전류 최적화를 수행 한 후 함정의 소자 상태를 나타낸 것으로서 소자코일의 정확한 기하학적 정보를 이용한 “조건 1”을 기준으로 다른 조건을 비교 시에 0.1 mG 정도의 차이로 만족할 만한 소자 성능을 나타낸다. 소자 성능과 함께 도출된 각 소자 코일별 도출된 최적 전류이다. 전류 또한 가상영역에 구축된 코일로 인해서 정확하게 일치하지는 않지만 정상 조건과 비교 시에 그 차이가 크지 않았다. 이러한 결과를 통해서 추가적인 가상영역 구축을 연계한 소자 코일 전류 최적화 기법의 가능성을 확인하였다.



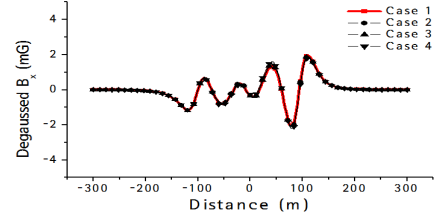
(a) ILM Bx



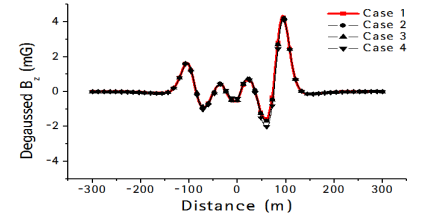
(b) ILM Bz



(c) IAM By



(d) IVM Bx



(e) IVM Bz

〈그림 4〉 가상영역 구축 조건에 따른 소자 결과

3. 결 론

본 논문에서는 함정 내부에 설치된 소자 코일의 정확한 위치정보를 알 수 없을 때 소자 코일의 전류 선정의 어려움을 극복하고자 코일 효과와 기저력 민감도를 이용하는 방법을 토대로 가상영역 내에 구축된 코일을 이용한 소자 코일 전류 최적화 기법을 제시하였다. 제안된 방법은 다양한 가상영역 구축 조건에 따른 소자 전류, 소자 상태를 정상 상태와 비교함으로써 제기 기법의 활용 가능성을 확인하였다. 향후 코일 효과를 통한 위치 보정, 세분화된 함정 구역을 이용한 가상영역 구축에 대한 지속적인 연구를 바탕으로 보다 안정된 기법의 개발연구를 수행할 것이다.

[감사의 글]

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방피탐지감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 양창섭, “함정에서 발생하는 수중 전자기장 신호 특성 예측 기법”. 경북대학교 대학원, 2008.
- [2] John J, Holmes “Reduction of a Ship’s Magnetic Field Signatures (1st Edition)”, Morgan & Claypool., 2008.
- [3] William Palmer(2008), “Closed-Loop Degaussing, Giving Navy Ships Advantage in Stealth”, Sea Frame, Volume4 Issue2, pp.16-18.
- [4] H. Liu and Z. Ma, “Optimization of vessel degaussing system based on poly-population particle swarm algorithm,” Proc .Int. Conf. Mechatronics and Automation, pp. 3133-3136, 2007.
- [5] MagNet User’s Manual, Infolytica Corporation, 2010.
- [6] Dong-Hun Kim, D. A. Lowther and J. K. Sykulski, “Efficient force calculations based on continuum sensitivity analysis”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no.5, pp. 1404-1407, May, 2005.
- [7] Dong-Hun Kim, J. K. Sykulski and D. A. Lowther, “A novel scheme for material updating in source distribution optimization of magnetic devices using sensitivity analysis”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no.5, pp. 1752-1755, May, 2005.
- [8] DOT User Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., Colorado Springs: USA, 2001.