

Verification of Optimum Degaussing Technique through the Mock-up Test of a Ship

Dong-Wook Kim, Nak-Sun Choi, and Dong-Hun Kim*

Department of Electrical Eng., Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Chang-Seob Yang and Hyun-Ju Chung

The 6th R&D Institute - 2, Agency for Defense Development, Jinhae P.O. Box 18 Changwon, Gyeongnam 645-600, Korea

(Received 25 June 2014, Received in final form 4 August 2014, Accepted 6 August 2014)

In this paper, a optimum degaussing technique, which can minimize an underwater magnetic field anomaly generated by the ferromagnetic hull, was verified through the mock-up test of a ship. To predict degaussing field signals due to the degaussing coils installed in a ship, individual coil effects were measured. Exploiting the linearity of coil effects and analytical sensitivity formula, optimum degaussing current values fed to individual coils were decided. To identify degaussing performance of the proposed method, the obtained degaussing currents were applied to the coils. Then the field anomaly signals were measured and analyzed before and after degaussing. Experimental results show the magnitude of the field signal after degaussing is reduced up to 95% of that before degaussing.

Keywords : sensitivity, degaussing, inverse problem, magnetic field, magnetization

축소 합정을 이용한 최적 소자기법 검증

김동욱 · 최낙선 · 김동훈*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 산격동, 702-701

양창섭 · 정현주

국방과학연구소 제6기술연구본부 2부, 경남 창원시 진해구 진해우체국 사서함 18호, 645-600

(2014년 6월 25일 받음, 2014년 8월 4일 최종수정본 받음, 2014년 8월 6일 게재확정)

본 논문에서는 축소 합정을 이용한 소자시험을 통하여 강자성체 선체에 의해 발생하는 수중 자기장 왜곡신호를 최소화할 수 있는 최적 소자기법의 타당성을 검증하였다. 소자코일에 의해 발생하는 소자 자기장 신호를 예측하기 위하여, 축소 합정 내에 설치된 개별 소자코일에 대한 코일효과를 측정하였다. 코일효과와 해석적인 민감도 식을 기반으로 각 소자코일에 인가해야 할 최적 소자전류를 도출하였다. 확립된 최적 소자기법의 성능 검증을 위하여, 도출된 최적 소자전류를 축소 합정의 소자코일에 인가하여 발생하는 소자 전·후의 자기장 왜곡신호를 측정하고 분석하였다. 시험결과 소자 후 자기장 왜곡신호의 크기는 소자 전에 비해 95% 정도 감소함을 확인하였다.

주제어 : 민감도, 소자, 역문제, 자기장, 자화

I. 서 론

최근 반도체 및 IT산업의 급성장을 기반으로 탐지 수단이 다양화, 고지능화 및 고성능화가 되어감에 따라 기뢰(mine)는 함정 운항 및 기능 수행에 있어 큰 위협요소로 대두 된다. 특히 현대식 기뢰에는 지자계(earth magnetic field)의 수천~

수만분의 일의 정밀도를 갖는 고감도 자기센서 장착이 보편화 되는 추세이다. 따라서 강자성체로 이루어진 함정 선체 및 탑재장비에 의해 발생하는 수중 자기장 왜곡신호는 현대식 기뢰의 가장 손쉬운 탐지 대상이다.

선진국에서는 1990년대 초부터 함정에서 발생하는 수중 자기장 신호저감을 위한 다양한 연구를 전략적으로 수행하고 있다[1-3]. 또한, 함정의 자기정숙화(magnetic silencing)를 실현하기 위하여 탈자(deperming) 및 소자(degaussing)와 관련된 독자적인 자기처리시설을 운영하고 있다. 반면 국내에서는 현

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-53-950-5603,

Fax: +82-53-950-5603, e-mail: dh29kim@ee.knu.ac.kr

대식 함정 자기측정 및 자기처리 시설 구축사업이 진행되고 있지만 이와 관련된 국내 연구는 초기 도입단계에 머물러 있다. 따라서 국내에서도 함정 건조과정에서 선체에 남아 있는 영구자화, 지자기 하에서 강자성체로 구성된 선체에 유도된 유도자화 및 탑재장치에 의해 발생하는 수중 자기장 왜곡신호를 제어할 수 있는 함정 자기정숙화와 관련된 독자기술 확보를 위한 지속적인 연구가 요구된다[4].

함정 자기정숙화를 구현하기 위한 필수적인 자기처리기술로는 탈자와 소자기법이 사용되고 있다. 탈자는 선체에 존재하는 영구자화에 기인한 수중 자기장, 즉 영구 자기장 성분을 최소화시키기 위한 수단으로 규격화된 탈자절차에 따라 수행된다. 소자는 탈자처리 후 잔류하는 영구 자기장 성분과 지자기에 의해 발생하는 선체의 유도자화에 기인한 수중 자기장, 즉 유도 자기장 성분을 억제하기 위한 기술에 해당한다. 소자처리를 위해서는 함정 내부에 수직(vertical; 이하 V), 횡축(athwartship; 이하 A), 종축 방향(longitudinal; 이하 L)으로 다수의 소자코일이 배치된다. 그리고 각 소자코일에 최적의 전류를 인가하여 함정에서 발생하는 수중 자기장 왜곡신호와 같은 크기이나 반대방향의 보상 자기장, 즉 소자 자기장(degaussing field) 신호를 발생시킴으로써 선체에 의한 유도 자기장과 잔류 영구 자기장 성분을 감소시킨다[4, 5].

본 논문에서는 축소 함정과 소자장치 제작을 통하여 강자성체 선체에 의해 발생하는 수중 자기장 왜곡신호를 최소화할 수 있는 최적 소자기법과 이에 대한 성능 검증에 관한 연구를 수행하였다. 소자코일에 의해 발생하는 소자 자기장 신호를 예측하기 위하여, 축소 함정 내에 설치된 개별 소자코일의 코일효과(coil effect)를 측정하였다. 기자력(magneto motive force; mmf)에 대한 코일효과와 선형성과 해석적인 민감도 식을 기반으로 각 소자코일에 인가해야 할 최적 소자전류를 도출하였다. 이러한 절차에 의해 확립된 최적 소자기법의 성능 검증을 위하여, 도출된 최적 소자전류를 축소 함정의 소자코일에 인가하여 소자 전·후의 자기장 왜곡신호를 측정하고 분석하였다.

II. 최적 소자 기법

최상의 소자성능을 유지하기 위해서 함정 내부에 설치된 다수의 소자코일에 최적의 소자전류가 인가되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 최적 소자전류를 결정하기 위하여 선체의 차폐효과가 고려된 코일효과와 기자력 민감도를 이용한 소자전류 최적화 기법을 적용하였다.

1. 코일효과

코일효과는 함정 내에 설치된 소자코일에 일정 기자력을

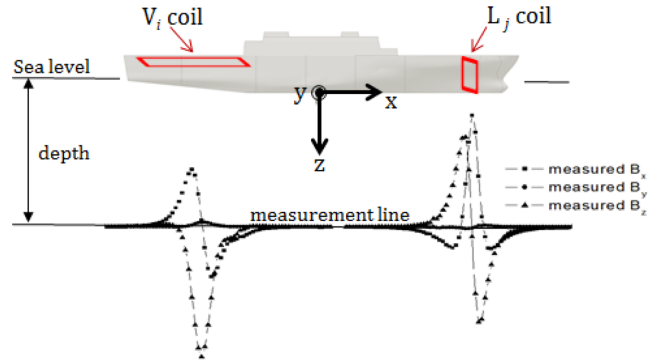


Fig. 1. (Color online) Illustration of coil effects for individual V and L coils.

인가하였을 때 발생하는 수중 자기장 신호를 의미한다. 따라서 코일효과는 선체 재질에 의한 차폐(shielding) 정도와 더불어 선체 형상과 소자코일의 크기 및 위치에 의해 그 특성이 달라진다. 각 소자코일에 해당하는 최적의 소자전류를 도출하기 위해서 상기 기술한 여러 가지 영향들을 포함한 정확한 소자코일 별 코일효과에 대한 정보가 요구된다. Fig. 1은 소자장치가 탑재된 축소 함정의 i 번째 V 코일과 j 번째 L 코일에 각각 기준 기자력을 인가하였을 때, 일정 수심에서 발생하는 코일효과에 해당하는 수중 자기장 신호를 도시하고 있다. 그림에서와 같이 소자코일 별 코일효과는 위치, 크기 및 성분에 있어 자기 독특한 신호분포를 나타낸다.

일반적으로 함정에서 발생하는 수중 자기장 왜곡신호의 크기는 수십 mG 정도로 함 내에 탑재된 소자 전원장치에 의해 공급되는 코일 기자력은 선체 재질의 자기적 선형성이 보장된 영역에서 운영된다. 이는 선체에 의한 자기 차폐효과와 소자코일의 코일효과 사이의 선형성이 보장됨을 의미한다. 이러한 자기적 선형성(magnetic linearity)을 이용하여 임의의 기자력에 대한 특정 소자코일에서 발생하는 코일효과를 예측이 가능하다. 예를 들면, 특정 코일에 인가되는 임의의 기자력 \mathcal{J} 에 의해 발생하는 j 번째 관측점에서 코일효과 i 성분 자기장 신호 B_{ij} 는 식(1)에서와 같이 기준 기자력과 그에 따른 코일효과를 사용하여 계산할 수 있다[3].

$$B_{ij} = B_{ij}^R \frac{\mathcal{J}}{\mathcal{J}_R} \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, \dots, np \quad (1)$$

여기서 \mathcal{J}_R 는 기준 기자력을, B_{ij}^R 는 기준 기자력에 대한 코일효과로 np 개의 관측점 중에서 j 번째 관측점에서 측정된 i 성분의 자기장 신호를 의미한다. 따라서 식(1)을 이용하게 되면 소자코일 별 인가되는 임의의 기자력에 대한 코일효과가 계산되며 이를 바탕으로 전체 소자코일에 의해 발생하는 관측점에서의 소자 자기장 신호를 합성할 수 있다.

2. 기자력 민감도를 이용한 최적 소자 전류

수십여 개의 코일로 구성된 소자장치에 대한 소자코일별 최적의 전류를 결정하기 위해서는 역문제(inverse problem) 해석이 요구된다. 다수 개의 미지변수를 갖는 역문제의 효율적인 처리를 위하여 본 연구에서는 민감도 해석기법을 적용한다. 전형적인 정자기장 문제에 대해 목적함수 F 는 식(2)와 같이 스칼라 함수 g 로 표현된다.

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

여기서 Ω 는 목적함수의 적분영역, \mathbf{B} 는 자기장 벡터, \mathbf{p} 는 시스템 파라미터 즉, 기자력 벡터를 의미한다.

소자코일의 기자력에 대한 해석적인 민감도 식을 유도하기 위해서는 주 시스템(primary system)인 맥스웰 방정식(Maxwell's equations)의 변분식을 목적함수 (2)에 추가하여 증대된 목적함수를 얻는다. 또한, 증대된 목적함수에 보조변수법과 라그랑지승수법을 적용하면 주 시스템과 보조 시스템(adjoint system)에 대한 변분식이 유도된다. 이러한 일련의 수학적 유도와 과정을 통해 도출된 민감도 식은 보조변수 λ 를 포함하는 식(3)과 같다. 따라서 보조시스템을 만족하는 보조변수를 구하면 각 소자코일의 기자력에 대한 민감도가 계산된다[6-8].

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \mathbf{p}} = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{p}} \cdot \lambda \right) d\Omega \quad (3)$$

여기서 \bar{F} 는 증대된 목적함수, \mathbf{J} 는 소자코일의 전류밀도 벡터를 의미한다.

도출된 기자력 민감도의 역문제 적용 시 편의성을 도모하기 위하여 기자력 벡터 \mathbf{p} 를 소자코일의 전류밀도 \mathbf{J} 와 등가로 가정하면 민감도 식이 다음과 같이 간소화된다.

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \mathbf{p}} = \int_{\Omega} (\mathbf{I} \cdot \lambda) d\Omega \quad (4)$$

여기서 \mathbf{I} 는 항등행렬(identity matrix)을 의미한다. 결국, 기자력 민감도를 계산하기 위해서는 주 시스템과 보조 시스템으로 구성된 듀얼 시스템(dual system)에 대한 해석이 요구된다. 보조 시스템의 구성과 보조변수의 계산 방법에 대한 자세한 설명은 참고문헌[6, 9]에서 다루었기 때문에 본 논문에서는 생략한다. 식(4)에 의해 계산된 민감도 정보를 활용한 반복 계산과정을 통하여 개별 소자코일의 최적 소자전류 값이 도출된다.

III. 축소 소자 시험장치

최적 소자기법의 타당성 및 소자성능을 검증하기 위하여 축소 함정, 소자코일 및 전원장치 등을 제작하였다. 실제 함정

Table I. Specification of a mockup.

	Length	Width	Hight	Thickness
Unit (mm)	1514	303	210	0.6



Fig. 2. (Color online) A mockup of the ship.

의 소자 시스템 운영을 모사하기 위하여 함 내에 V 코일, A 코일 및 L 코일로 구성된 다수의 소자코일을 설치하였다.

1. 축소 함정 모델

Table I은 축소 함정의 제원이며 Fig. 2에 제시된 축소 함정의 크기는 실 함정의 100분의 1 크기이다. 축소 함정의 선체는 0.6 mm 두께의 냉연 강판을 햄머 단조(hammer forging) 방식을 사용하여 제작되었다. 이는 선체의 용접부위를 최소화하여 재료의 자기적 특성 변화를 가능한 억제하기 위함이다.

2. 축소 소자 장치

축소 소자장치는 3축 방향으로 배치된 다수의 소자코일과 각 코일에 기자력을 공급하는 전원장치로 구성되었다. L 코일은 종축방향 자기장, V 코일은 수직방향 자기장, A 코일은 횡축방향 자기장의 외곽신호를 주로 소자하는 역할을 담당한다. 따라서 일정 수준 이상의 소자성능을 보장하기 위해서 각 방향별 소자코일의 개수, 위치 및 단면적을 결정하기 위한 최적설계가 수행되었다.

최적의 소자코일 조합은 L 코일 7개, A 코일 3개, V 코일 4개로 구성되었으며 이를 바탕으로 각 코일의 설치 위치와 단면적이 결정되었다. Fig. 3은 축소 함정 내부에 3축 방향의 다수의 소자코일을 배치하기 위해 제작된 코일 보빈의 사진이다. Fig. 4에서는 코일 보빈을 제거하고 함 내에 실제 설치된 소자코일의 배열을 보여준다.

소자 코일용 전원장치는 전원 공급부, 모니터링 및 제어부

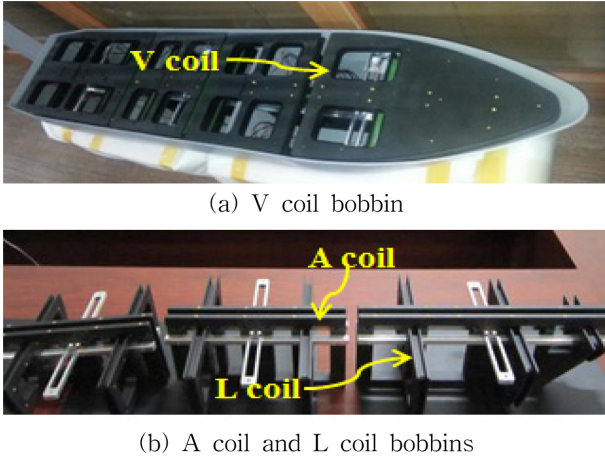


Fig. 3. (Color online) Three-type bobbins for degaussing coils.

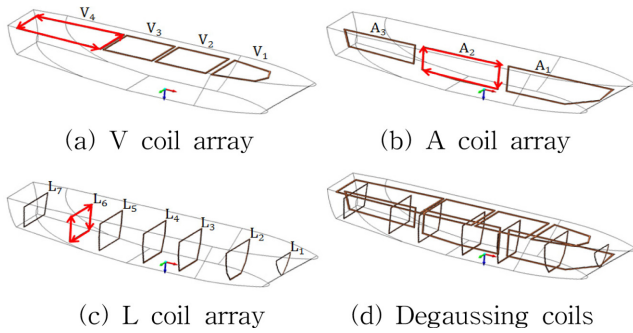


Fig. 4. (Color online) Schematic of degaussing coils installed inside the ship.

로 구성되었다. 전원 공급부는 ± 5 A 범위 내의 전류원을 발생시킬 수 있으며, 14개 단위로 구성된 전원 공급부는 커넥

터 보드를 통해 각각 개별 소자코일에 전원을 공급된다. 또한 각 소자코일별 인가되는 실시간 전류 제어와 측정을 위하여 DAQ(data acquisition) 보드와 LabView를 사용하여 별도의 모니터에서 소자장치의 모든 상태를 관측/통제할 수 있도록 하였다. Fig. 5는 소자 코일용 전원장치의 구성도를 나타낸다.

IV. 축소 합정 소자 시험

소자성능 시험은 지자체를 상쇄하여 축소 합정의 영구자장 신호를 측정할 수 있는 3축 지자체 보상 코일이 구축된 별도 실험실에서 수행되었다. 축소 합정의 선수는 북쪽으로 두어 횡축성분의 자기장 신호가 발생하지 않도록 설정하였다. 따라서 소자시험은 축소 합정에서 발생하는 수직방향과 종축 방향의 자기장 왜곡신호에 대해서 수행되었다.

1. 소자 시험장치 구성

축소 합정에 대한 소자시험은 Fig. 6에 제시된 3축 지자체 보상코일이 설치된 비자성 실험실에서 진행되었다. 시험장치는 축소 합정, 이동대차, 레이저 거리측정기 및 고성능 3축 자기센서로 구성되었다. 비자성재료의 제작된 전동식 이동대차 위에 축소 합정을 거치하여 축소 합정의 위치변화에 따라 관측되는 자기장 신호를 측정하였다. 축소 합정의 이동거리는 지자체 보상코일에 의해 자기장의 균일도가 보장되는 x축 상의 ± 3.5 m 범위 내로 제한하였다. 자기센서의 위치는 z축 상의 0.345 m에 설치되었으며 이는 축소 합정의 빔 깊이 (beam depth)에 해당한다.

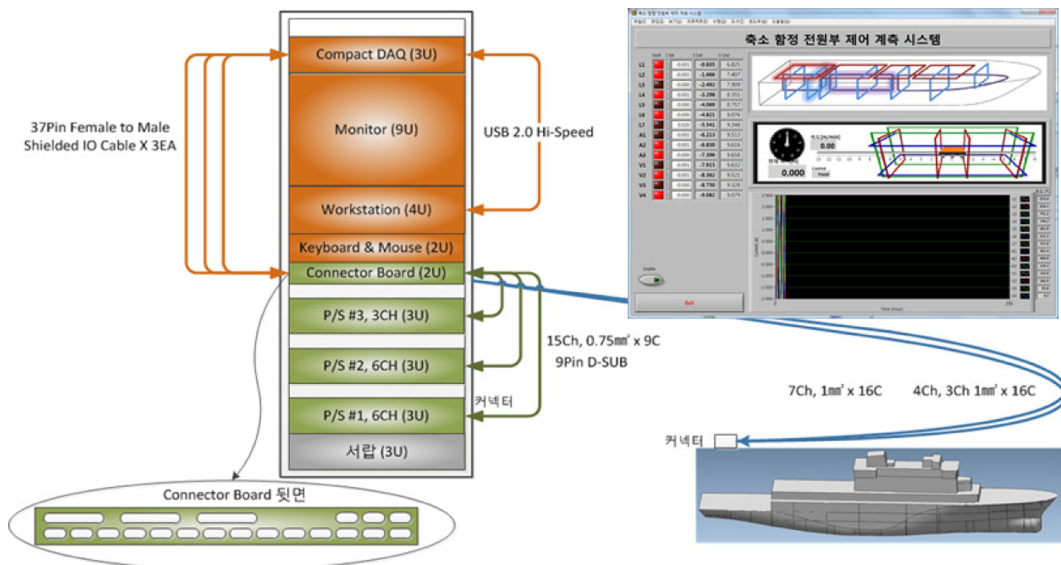


Fig. 5. (Color online) Schematic of a power supply unit.

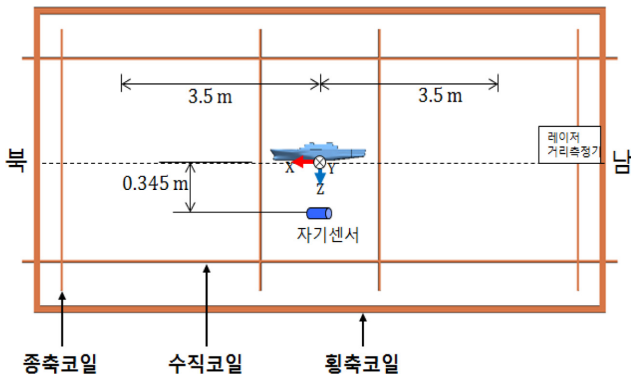
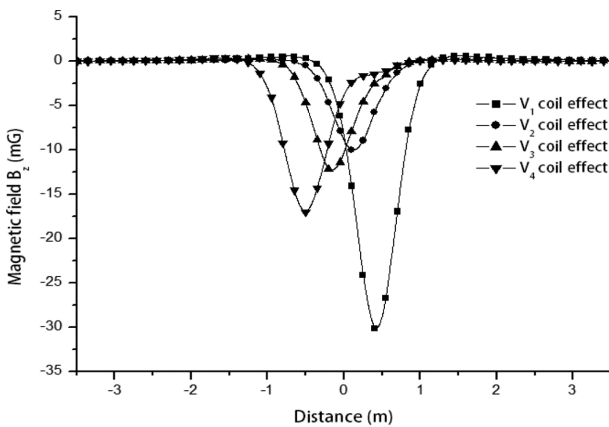


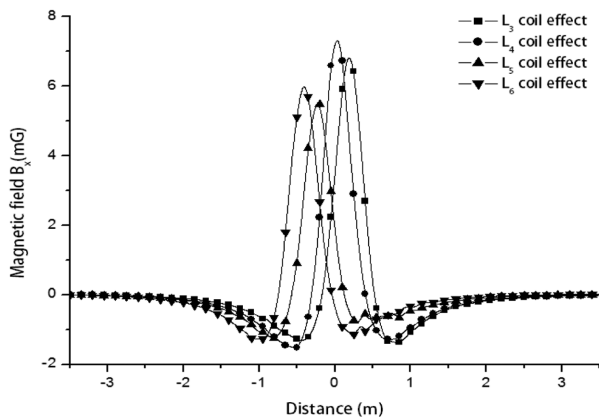
Fig. 6. (Color online) Experimental environment for validation.

2. 코일효과 선형성 검증

각 소자코일의 최적의 소자전류를 도출하기 위해서 우선 기준 기자력에 대한 개별 소자코일의 관측점에서의 자기장 신호인 코일효과를 측정해야 한다. 축소 합정 내에 설치된 V코일과 L코일에 각각 $0.5 \text{ A} \cdot \text{turn}$, $1 \text{ A} \cdot \text{turn}$ 의 기준 기자력을 인가하였을 때 나타나는 코일효과를 Fig. 7에 제시하였다.



(a) V coil effects for $0.5 \text{ A} \cdot \text{turn}$



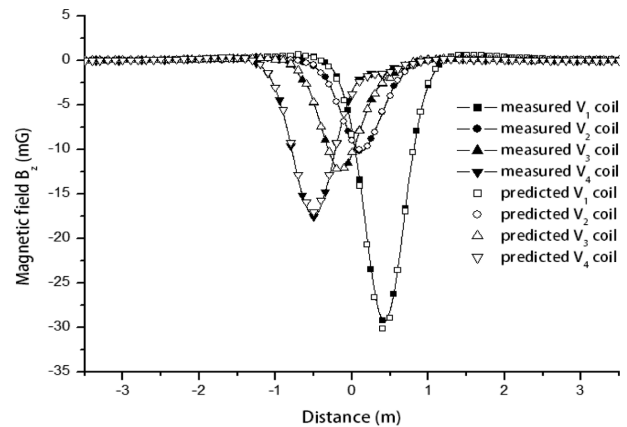
(b) L coil effects for $1 \text{ A} \cdot \text{turn}$

Fig. 7. Individual coil effects for reference mmf values.

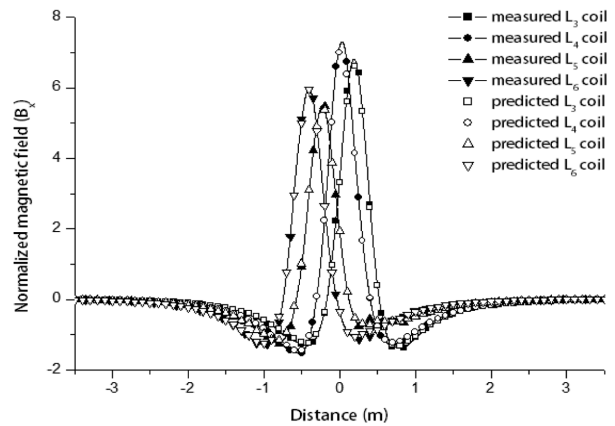
동일 기자력에 대한 설치된 코일들의 크기와 위치에 따라 코일효과의 분포 및 크기가 서로 상이함을 확인할 수 있다. 코일효과의 선형성을 이용한 식(1)을 검증하기 위하여 임의의 기자력을 각각 V코일과 L코일에 인가한 후 코일효과를 측정하였다. Fig. 8은 V 코일에 $1 \text{ A} \cdot \text{turn}$, L 코일에 $2 \text{ A} \cdot \text{turn}$ 의 기자력을 각각 인가하였을 때 측정된 소자코일 별 코일효과와 식(1)에 의해 예측된 신호를 비교한 결과이다. 임의의 기자력에 대한 코일효과의 예측신호는 2% 오차 범위 안에서 측정신호와 잘 일치하였다.

3. 소자성능 검증

소자코일 별 최적 소자전류를 결정하기 위하여 Fig. 6에 제시한 지자계 보상코일을 갖춘 비자성 실험실에서 측정된 자기장 신호로 표현된 식(5)와 같은 목적함수를 정의한다. 즉, 소자전류를 결정하기 위한 역문제는 관측선 상의 각 점에서 소자 전 측정된 축소 합정에서 발생하는 자기장 왜곡신호와 소자코일에 전류를 인가하여 발생하는 소자 자기장 신호의 합인 목적함수를 최소화하는 문제로 귀착된다[10].



(a) V coil effects for $1 \text{ A} \cdot \text{turn}$



(b) L coil effects for $2 \text{ A} \cdot \text{turn}$

Fig. 8. Comparison between predicted and measured coil effects.

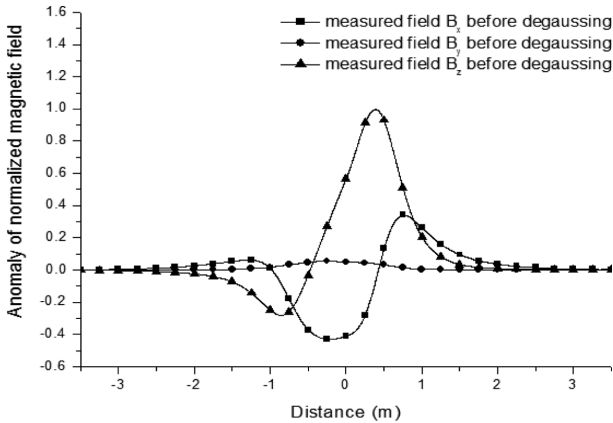


Fig. 9. Magnetic field anomaly before degaussing.

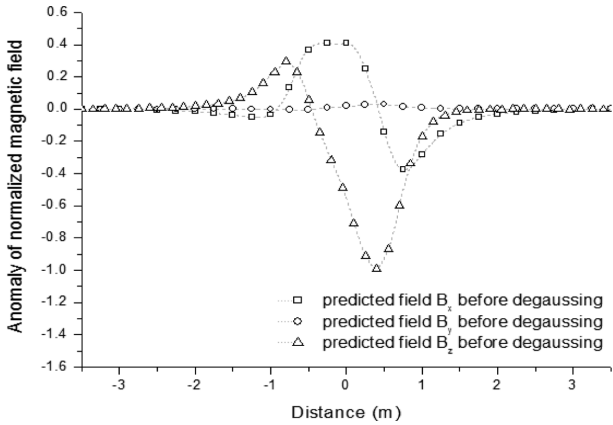


Fig. 10. Predicted degaussing fields before degaussing.

$$\text{minimize } F = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n |B_{ij}^{\text{measured}} + B_{ij}^{\text{coils}}|^2 \quad (5)$$

여기서 아래첨자 i 와 j 는 각각 자기장의 벡터성분과 측정선상의 축소 합정의 위치를 나타낸다. 따라서 최적 소자는 합정에 의한 자기장 왜곡신호와 크기는 같고 방향인 반대인 자기장 신호를 소자코일 별 인가되는 전류를 통하여 가장 근접하게 구현하는 것을 의미한다.

Fig. 9는 소자 전 축소 합정에서 발생하는 자기장 왜곡신호를 측정된 결과로 Fig. 6에 제시한 지자계 보상코일을 통해 분리한 영구 자기장의 크기는 왜곡신호 크기의 45% 정도이다. 식(5)를 최소화하는 해를 구해 소자코일 별 최적 전류를 인가했을 때 예측되는 소자 자기장 신호는 Fig. 10과 같다. Fig. 9의 측정된 자기장 왜곡신호와 Fig. 10의 예측된 소자 자기장 신호는 1% 내의 크기 오차를 갖고 성분이 서로 반대 방향임을 확인하였다. Table II는 V코일과 L코일 별 도출된 최적 소자전류를 나타낸다.

Fig. 11은 소자 후 축소 합정으로부터의 자기장 왜곡신호의 측정값과 최적 소자기법에 의해 예측된 값을 비교한 결과이

Table II. Degaussing coil current after optimization.

V coil			L coil		
No.	Current (A)	Turns	No.	Current (A)	Turns
1	0.690	43	1	0.794	67
2	0.653	16	2	0.548	37
3	0.929	21	3	0.819	29
4	0.212	18	4	1.190	31

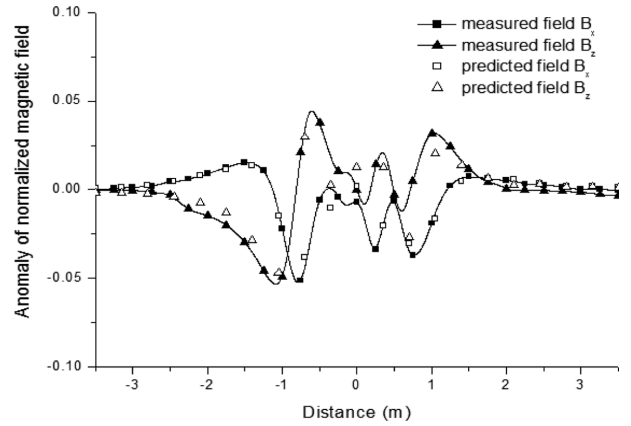


Fig. 11. Comparison between of predicted and measured magnetic fields after degaussing.

다. 소자 후 자기장 왜곡신호에 대한 예측값과 측정값 사이는 10% 정도의 오차를 보인다. 또한 축소 합정의 소자 전 왜곡신호의 크기는 소자 후 95% 정도 감소됨을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 축소 합정을 이용한 소자시험을 통하여 최적 소자기법의 타당성을 검증하였다. 시험결과 소자 전素격< 합정에서 발생하는 자기장 왜곡신호의 크기가 최적 소자기법에 의해 예측한 바와 같이 95% 정도 감소함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] O. Chadebec, J. Coulomb, J. Bongiraud, G. Cauffet, and P. Thiec, IEEE Trans. Magn. **38**, 1005 (2002).
 [2] J. Holmes, Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures, Morgan & Claypool (2006).

- [3] Y. Vuillemeret, O. Chadebec1, J. Coulomb, L. Rouve, G. Cauffet, J. Bongiraud, and L. Demilier, *IEEE Trans. Magn.* **44**, 1054 (2008).
- [4] C. Yang, Ph. D. Thesis, Kyungpook National University, Korea (2008).
- [5] H. Liu and Z. Ma, *Int. Conf. Mechatronics and Automation*, 3133 (2007).
- [6] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 419 (2012).
- [7] D. Kim, J. Sykulski, and D. Lowther, *IEEE Trans. Magn.* **41**, 1404 (2005).
- [8] K. Lee, G. Jeung, C. Yang, J. Park, H. Kim, and D. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 1478 (2009).
- [9] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **22**, 4904504 (2012).
- [10] J. Holmes, *Reduction of a Ship's Magnetic Field Signature*, Morgan & Claypool (2008).