

Performance Analysis of Closed-Loop Degaussing on Magnetization Change of a Ship

Jaegyong Mun, Yejin Kwak, HaeKyun Yoon, and Dong-Hun Kim*

Department of Electrical Eng., Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Chang-Seob Yang and Hyun-Ju Chung

The 6th R&D Institute - 3, Agency for Defense Development, Jinhae P.O. Box 18 Changwon 51678, Korea

(Received 2 August 2020, Received in final form 26 August 2020, Accepted 27 August 2020)

In this paper, the performance of the proposed closed-loop degaussing technique is analyzed through testing a mockup replicating a magnetic field condition of a ship due to the variation of on-board equipment's or hull's magnetization. In order to change a magnetic field condition of the mockup, a certain electric current is applied to triaxial coils installed in a nonmagnetic laboratory. Before and after the artificial field condition, degaussing current values are respectively derived from closed-loop degaussing algorithm and then applied to individual degaussing coils. The effectiveness of the proposed degaussing technique is verified by comparison of the magnitude of field signals generated on a certain depth of water.

Keywords : degaussing, magnetization, magnetic field, optimum design

함정의 자화조건 변화에 대한 폐회로 소자 성능 분석

문재경 · 곽예진 · 윤해균 · 김동훈*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 대학로 80, 41566

양창섭 · 정현주

국방과학연구소 제6기술연구본부 3부, 경남 창원시 진해구 진해우체국 사서함 18호, 51678

(2020년 8월 2일 받음, 2020년 8월 26일 최종수정본 받음, 2020년 8월 27일 게재확정)

본 논문에서는 탑재장비나 선체의 자화 변화로 기인한 함정의 자기장 조건 변화를 모사한 모형함정 시험을 통해 제안된 폐회로 소자 기법의 성능을 분석하였다. 함정의 자화조건 변화는 비자성 실험실에 설치된 3축 방향의 코일에 특정 전류를 인가하여 모형함정 주위에 인위적인 자기장 환경을 조성하여 모사하였다. 이러한 인위적인 자기장을 인가한 전·후의 폐회로 소자 알고리즘을 통해 도출된 소자전류를 모형함정 내 설치된 소자코일에 인가하여 특정 수심에서의 발생하는 자기장 신호 크기의 비교를 통해 제안된 소자기법의 유효성을 검증하였다.

주제어 : 소자, 자화, 자기장, 최적설계

I. 서 론

강자성체 선체로 건조된 함정은 선체에 잔류하는 영구자화 성분과 지자계에 의해 선체에 유도되는 유도자화 성분으로 인해 함정 주위의 수중 자기장의 분포가 왜곡된다. 이러한 수중 자기장 외란신호는 고성능 자기센서를 탑재한 현대식 어뢰, 기뢰 및 수중 탐지장치 등에 쉽게 노출될 수 있기 때문

에 함정의 원활한 작전수행과 안전운항에 큰 장애요소로 대두되고 있다. 따라서 선진국을 중심으로 함정 주위에서 발생하는 수중 자기장 외란신호를 저감하기 위해 탈자(deperming)와 소자(degaussing)로 구성된 자기정숙화 기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다[1,2].

탈자는 선체에 존재하는 영구자화에 의해 발생하는 수중 자기장 외란신호를 저감하기 위한 기술로써 함정 주위에 배치된 탈자코일에 특정한 프로토콜에 의해 정해진 탈자전류를 인가하면서 수행된다[3]. 반면 소자는 탈자처리 후 선체에 잔류하는 영구 자기장 성분과 지자계 하에 유도되는 선체의 유도

자기장 성분을 최소화 하는 기술이다. 합 내에 탑재된 소자시스템은 다수 개의 소자코일, 이를 구동하기 위한 직류전원 및 코일 전류제어 장치 등으로 구성된다. 소자시스템은 합정에서 발생하는 자기장 신호와 크기가 같고 방향이 반대인 소자코일 자기장을 발생시켜 수중 자기장 외란신호를 최소화하는 원리를 이용한다[4]. 이를 구현하기 위해 다수 개의 소자코일 전류를 교정하는 방식에 따라 개회로 소자(open-loop degaussing: 이하 OLDG)와 폐회로 소자(closed-loop degaussing: 이하 CLDG)로 구분된다[5,6].

OLDG는 수중에 매설된 자기센서에서 측정된 신호를 수집/분석하고 이를 기반으로 최적 소자전류를 도출하는 자기측정 처리시설(magnetic measurement & treatment facility: 이하 MMTF)을 이용한다[1]. 그러나 OLDG는 합정 운항 중에 발생하는 기계적/열적 스트레스에 의해 선체나 탑재장비에서 발생하는 영구자화 변화에 기인한 자기장 신호의 보상은 매우 어렵다[1-6]. 이에 반해, CLDG는 OLDG의 단점을 해결하기 위해 정박/운항 중에 합정 내에서 발생하는 자기장 변화를 측정하여 수중 자기장 외란신호를 실시간으로 제어하는 방식이다[7-9].

본 논문에서는 합정 내의 자기장 조건 변화를 모사한 모형 합정 시험을 통해 [9]에서 제안한 CLDG의 소자전류 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 합정의 자화조건 변화는 비자성 실험실에 설치된 3축 방향의 코일에 특정 전류를 인가하여 모형합정 주위에 인위적인 자기장 환경을 조성하였다. 이러한 인위적인 자기장을 인가한 전·후의 특정 수심에서의 발생하는 자기장 외란신호 크기의 비교를 통해 제안된 CLDG 기법의 유효성을 확인하였다.

II. 폐회로 소자 원리

본 장에서는 [9]에 제시하였던 CLDG 운영의 핵심기술에 해당하는 소자코일 전류의 도출 원리와 제어 알고리즘에 대한 간략히 살펴보기로 한다.

1. 소자전류 제어원리

Fig. 1과 같이 외부 지자계 조건에서 제어영역 내부에 전자석(electromagnet) 코일의 배치와 상이한 자성체 배치를 가정한다.

이때 제어영역 외부의 특정 거리에서 측정되는 자기장 신호는 지자계와 제어영역에 포함된 자성체의 자화에 기인한 자기장 성분의 벡터 합으로 표현된다. 따라서 내부 자성체들에 의해 제어영역 외부에서 발생한 자기장 외란신호의 크기를 제어하기 위해 제어영역 표면에 Fig. 1과 같이 다수 개의 3축 자기센서($M_1 \dots M_n$)가 배치된다. 이러한 내부 센서(on-board

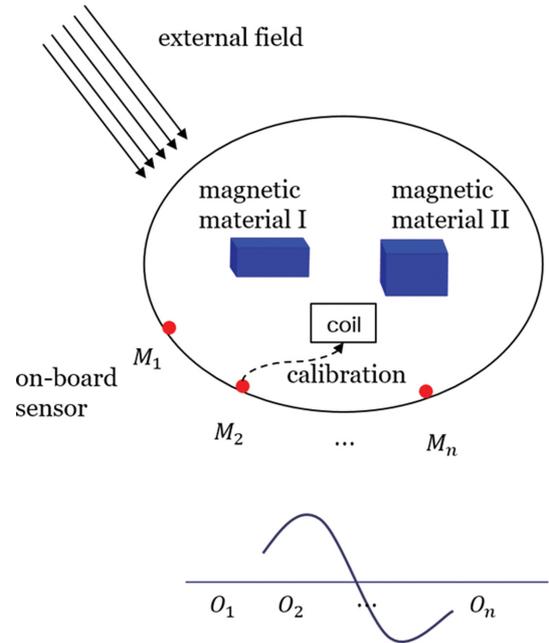


Fig. 1. (Color online) Basic principle for controlling degaussing currents.

sensors)에서 측정된 신호를 기반으로 전자석의 전류를 제어하여 자성체에서 발생하는 합정 외부의 유도자기장 크기를 최대한 상쇄시킨다[9].

제안된 방식에서는 지자계 하에서 자성체 자화에 의해 발생하는 외부 자기장의 크기가 최소가 되는 조건에서 각 내부 센서의 측정 신호를 기준값으로 설정한다. 이런 경우에는 제어영역 내부의 자기적인 조건 변동이 발생할지라도 항상 내부 센서의 측정값이 미리 설정된 기준값을 유지할 수 있도록 전자석의 전류를 제어하면 제어영역 외부에서 관측되는 자기장의 크기에는 변동이 발생하지 않아 항상 최소 상태를 유지할 수 있게 된다.

2. 소자전류 제어 알고리즘

초기 CLDG 시스템의 관련 변수 설정과 시스템 정상동작 여부를 판단하기 위해서는 수중 자기장 신호 측정/분석이 가능한 MMTF를 이용한다. 본 절에서는 초기 시스템 변수 설정작업과 운항 중 실시간 소자전류 제어에 관련된 알고리즘을 살펴본다.

Fig. 2는 MMTF에서 수행되는 제안된 CLDG 방식의 시스템 변수의 설정과정을 도시한다.

- 현 지자계 조건에서 OLDG 기법을 사용하여 소자코일 전류 최적화 작업을 수행한다.
- 이때 각 내부 센서에서 측정되는 측정값을 내부 센서별 기준값으로 설정한다.
- 모든 소자코일 전류의 값을 다시 0으로 설정한다.

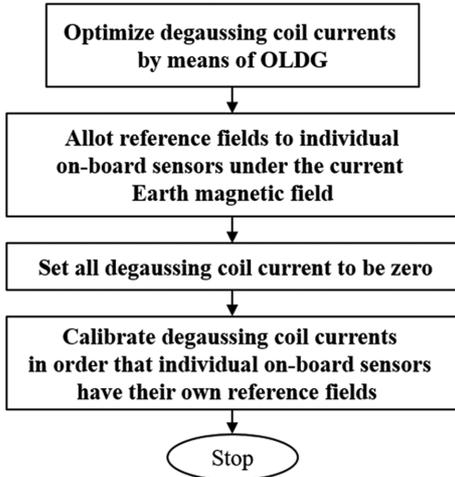


Fig. 2. Flow chart for calibrating a CLDG system at MMTF.

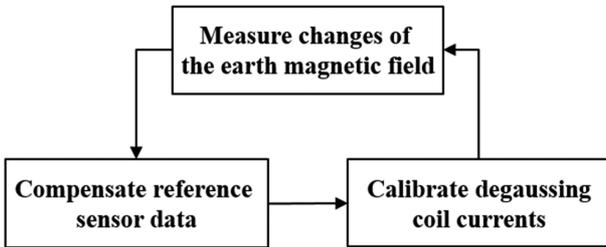


Fig. 3. CLDG block diagrams during a voyage.

d) 각 내부 센서가 미리 설정된 기준값이 측정되도록 소자 코일 전류를 다시 최적화한다.

이러한 시스템 변수의 설정 작업이 완료되면 운항 중에 사용되는 실시간 소자전류 제어 알고리즘은 Fig. 3과 같다. 함정에 설치된 별도의 자기센서를 이용하여 현 위치에서의 지자계를 측정하고, 지자계 변화에 해당하는 개별 내부 센서의 기준값을 보정한 후 소자전류를 재 교정하는 구조로 구성된다.

III. 폐회로 소자 성능 시험

함정의 탑재장비나 선체의 자화 변화로 기인한 함정의 자기장 조건 변화에 대한 제한한 CLDG 기법의 타당성과 소자 성능을 검증하기 위하여 모형함정을 이용하여 축소된 MMTF에서 실험을 진행하였다.

1. 시험 장치 구성

Fig. 4의 비자성 실험실에 구축된 MMTF에서는 모형 함정에서 발생하는 자기장 외란신호의 측정과 분리, 탈자 및 소자 처리 기능이 수행된다. 수중 자기장 신호는 실험실 지하에 매설된 고감도 3축 자기장 센서에 의해 수집된다. 또한 시험 대상인 모형함정 주위에 인위적인 자기장 조건을 형성

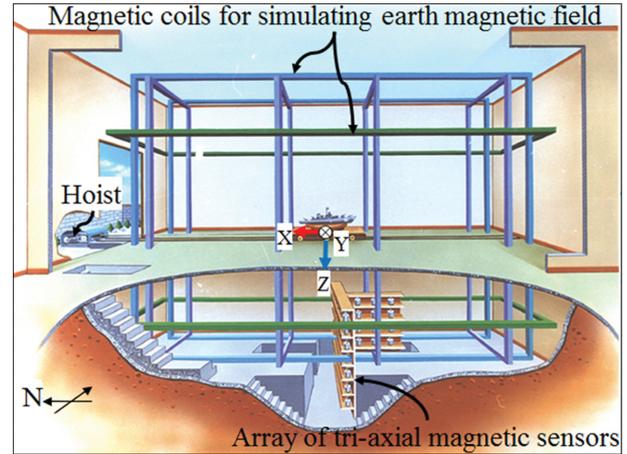
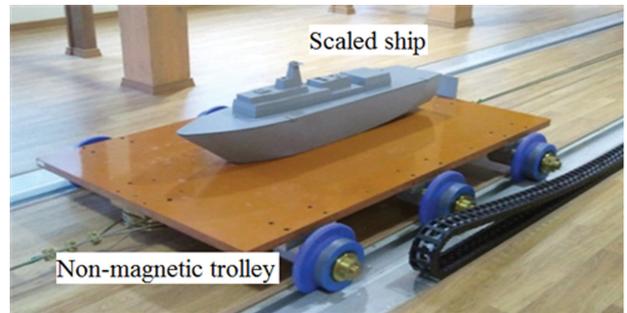
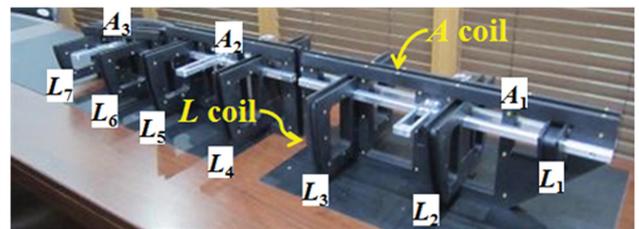


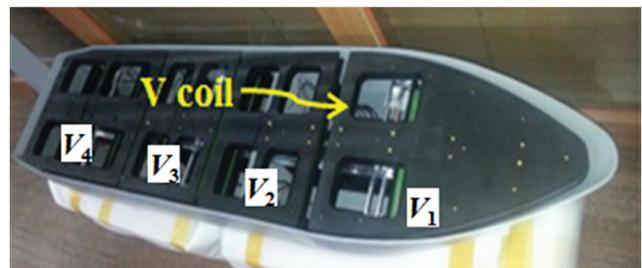
Fig. 4. (Color online) Schematic of a scale-down MMTF test room.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. (Color online) Photos of a model ship and degaussing coils: (a) Mockup, (b) L and A coil array, (c) V coil array.

하기 위해 3축 방향의 거대한 지자계 모사코일이 구축되어 있다. 본 실험에서는 모형함정의 선체 자화 변화를 모사하기 위해 지자계 모사코일을 이용하여 모형함정 주위에 지자계 이외에 추가적인 자기장을 인위적으로 인가하였다.

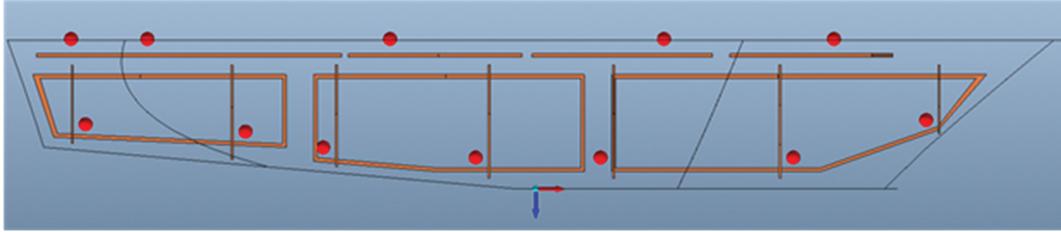


Fig. 6. (Color online) Schematic of onboard magnetic sensor arrangement marked with red circles.

Fig. 5(a)는 0.6 mm의 얇은 강판을 선체로 제작한 모형함정과 비자성 대차의 사진이다. 길이 1.51 m, 폭 0.30 m, 높이 0.21 m의 제원을 갖는 모형함정은 비자성 대차를 이용하여 자북과 자남 방향으로 천천히 이동시킨다. 이때 모형함정에서 발생하는 자기장 외란신호는 용골선(keel line)으로부터 0.345 m 아래에 위치한 3축 자기장 센서를 사용해 관측하였다. Fig. 5(b)와 (c)는 실제 함정의 소자 시스템 운영을 모사하기 위해 함 내에 설치된 종축(x) 방향의 A 코일 3개, 횡축(y) 방향의 L 코일 7개 및 수직(z) 방향의 V 코일 4개로 구성된 소자코일 배치를 보여준다. 각 소자코일은 그림에서와 같이 페라이트로 제작된 코일 보빈에 직경 1.0 mm의 에나멜동선을 수십 턴씩 감아 구성하였다. Fig. 6은 모형함정 내부에 설치된 12개의 3축 내부 자기장 센서들의 위치를 소자코일과 같이 도시하고 있다.

OLDG 방식을 적용하여 내부센서 별 기준값이 결정되면 함정의 자기장 조건 변화에 능동적으로 대응하기 위해 식(1)과 같이 정의된 목적함수 F 를 최소화하는 방향으로 각 소자코일의 전류가 제어된다.

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (B_{ij}^R - B_{ij}(I))^2 \quad (1)$$

여기서 i 와 n 은 내부 자기센서의 번호와 설치 개수를, j 는 자기장의 방향성분, I 는 소자코일에 인가한 전류벡터, 그리고 B^R 과 B 은 내부센서에 설정된 기준값과 측정 신호를 의미한다. 식(1)에 주어진 최적화 문제를 효율적으로 처리하기 위해 기존 CLDG 기법에서 사용한 해석적인 기자력 민감도 (magnetomotive force sensitivity) 식을 소자전류 최적화 기법에 적용하였다[10,11].

2. 폐회로 성능 분석

Fig. 7은 폐회로 소자를 시행하기 전 탈자 처리된 모형함정에서 발생하는 외란신호를 측정된 결과이다. 측정 단위는 mG로 외란신호를 영구 및 유도자기장 성분으로 분리 후, 모형함정에서 발생하는 유도자기장 크기의 최대치를 기준으로 정규화된 수치를 제시하고 있다. 즉, 탈자 처리 후에도 선체에 잔류하는 영구자화 성분에 의해 나타나는 외란신호가 전체 외

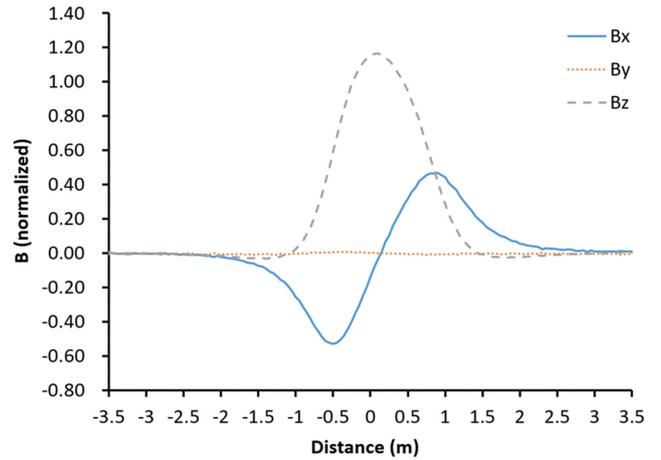


Fig. 7. (Color online) Magnetic field anomaly before degaussing.

란신호의 약 20% 정도를 차지하고 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 8은 실험 절차에 따라 모형함정에 제안한 CLDG 방식을 적용한 결과를 제시한다. Fig. 8(a)는 실험 위치의 지자계 조건($B_x = -41.34$ mG, $B_y = 307.50$ mG, $B_z = -381.41$ mG) 하에서 첫 번째 폐회로 소자 알고리즘을 적용한 결과 Fig. 7의 외란신호가 94% 정도 감소함을 확인하였다. 첫 번째 폐회로 소자 알고리즘을 적용하여 도출된 소자코일 전류를 유지한 상태에서 지자계 모사코일을 이용하여 z축 방향의 지자계 크기를 인위적으로 30% 증가시킨 결과는 Fig. 8(b)와 같

Table I. Degaussing coil currents after operating the proposed CLDG technique.

		Fist CLDG operation	Second CLDG operation
L coils (A·turns)	L ₁	0.49	0.48
	L ₂	0.28	0.28
	L ₃	0.41	0.41
	L ₄	0.53	0.52
	L ₅	0.59	0.59
	L ₆	0.58	0.59
	L ₇	0.55	0.55
V coils (A·turns)	V ₁	0.52	0.44
	V ₂	0.73	0.73
	V ₃	0.47	0.63
	V ₄	0.50	0.49

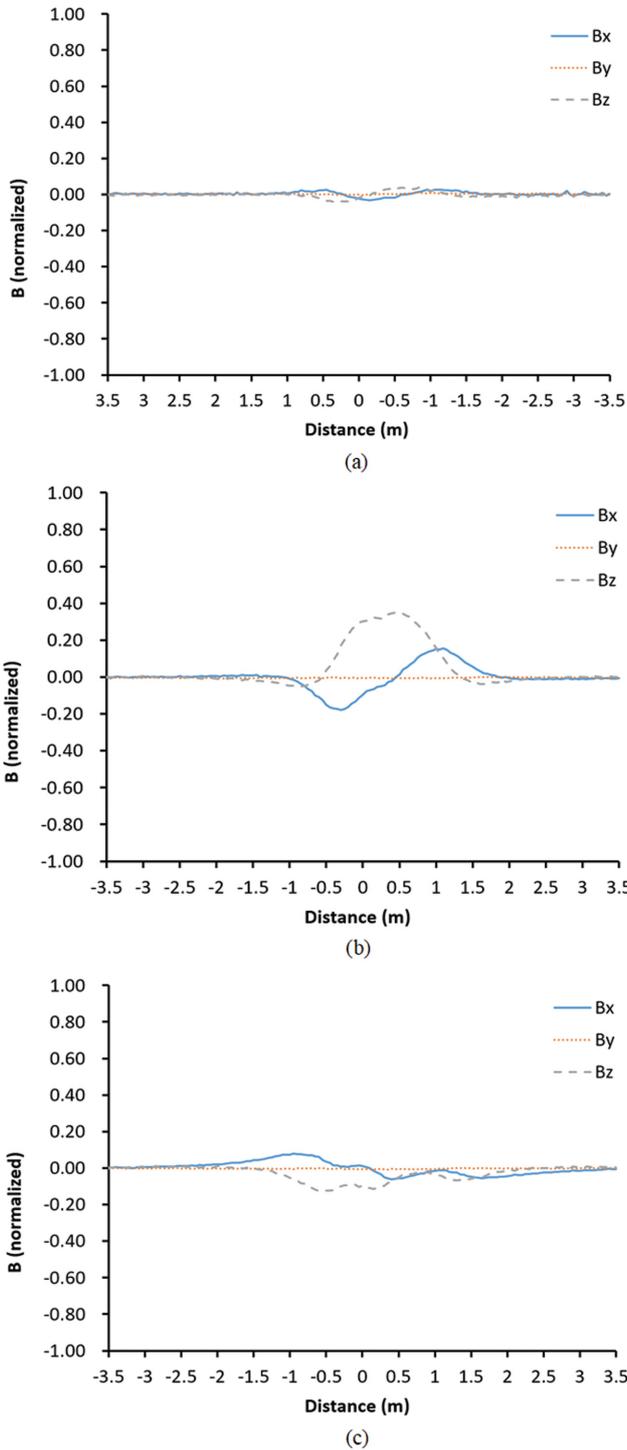


Fig. 8. (Color online) Magnetic field anomaly after operating the proposed CLDG technique: (a) First CLDG operation, (b) After generating additional magnetic field, (c) Second CLDG operation.

다. 이때 측정된 외란신호에서 인위적으로 인가한 자기장을 제거해 줌으로써 측정신호에는 선체의 유도자화 증가분에 의해 추가로 발생한 신호만이 포함된다. 선체의 자화변화에 기인하여 폐회로 소자 전의 외란신호가 68% 정도만 감소되어

소자 성능이 급격히 저하됨을 확인할 수 있다. Fig. 8(c)는 인위적인 추가 자기장을 인가 한 상태에서 폐회로 소자 알고리즘을 다시 적용한 결과 초기 외란신호 크기가 90% 정도가 감소되어 소자 성능이 다시 회복되는 것을 확인하였다. Table 1은 상기 실험 절차에 따라 폐회로 소자 알고리즘을 두 번 적용하여 도출된 소자코일별 최적 소자전류 값을 나타낸다. 두 가지 소자전류 값을 비교하면 인위적인 자기장의 인가 방향에 대응하기 위해 L 코일 보다는 V 코일의 전류 값 변동이 상대적으로 크다.

IV. 결 론

본 연구에서는 모형함정과 비자성 실험실에 구축된 MMTF 시설을 활용한 실험을 통해 선체 자화변화에 대한 폐회로 소자 성능이 효과적으로 유지됨을 검증하였다. 향후 제안된 기법의 실용화를 위해서 탑재장비나 선체 영구자화 변화와 관련된 보다 다양한 조건에서 추가 연구 및 이를 검증하기 위한 시험이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1089638).

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] J. Holmes, *Reduction of a Ship's Magnetic Field Signature*, Morgan & Claypool (2008).
- [4] Y. Vuillermet, O. Chadebec1, J. Coulomb, L. Rouve, G. Cauffet, J. Bongiraud, and L. Demilier, *IEEE Trans. Magn.* **44**, 1054 (2008).
- [5] C. Yang, Ph. D. Thesis, Kyungpook National University, Korea (2008).
- [6] H. Liu and Z. Ma, *Int. Conf. Mechatronics and Automation* 3133 (2007).
- [7] R. Wingo, J. Holmes, and M. Lackey, *Navel Eng. J.* 219 (1992).
- [8] L. Demilier, G. Cauffet, O. Chadebec1, J. Coulomb, and L. Rouve, *Marine system and Tech.*, Rome, Italy (2010).
- [9] B. Kang, D. Kim, C. Yang, G. Jeung, and D. Kim, *Korean J. Magn.* **27**, 98 (2017).
- [10] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 419 (2012).
- [11] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22**, 4904504 (2012).