

Real-Time Closed-Loop Degaussing Technique for a Minesweeper

Byungsu Kang and Dong-Hun Kim*

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

Chang-Seob Yang, Hyun-Ju Chung, and Dong-Wook Kim

The 6th R&D Institute - 3, Agency for Defense Development, Changwon 51678, Korea

(Received 9 May 2017, Received in final form 8 June 2017, Accepted 10 June 2017)

In this paper, an efficient closed-loop degaussing technique is proposed to control real-time degaussing currents required for a minesweeper. To achieve this, new principle and algorithm for controlling degaussing currents are presented, and they are compared to conventional ones. To validate the proposed method, a minesweeper mockup is tested by means of a rigorous numerical simulation. Results show that the method successfully yields satisfactory degaussing performances for several course angle changes of the mockup.

Keywords : degaussing, inverse problem, magnetic field, magnetization

소해함을 위한 실시간 폐회로 소자 기법

강병수 · 김동훈*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 대학로 80, 41566

양창섭 · 정현주 · 김동욱

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

(2017년 5월 9일 받음, 2017년 6월 8일 최종수정본 받음 2017년 6월 10일 게재확정)

본 논문에서는 기뢰 소해함에 요구되는 실시간 소자전류 제어를 위한 효율적인 폐회로 소자 기법을 제안하였다. 이를 위해 새로운 형태의 소자전류 제어 원리 및 알고리즘을 제시하고 이를 기존 방식과 비교/분석하였다. 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해서 축소 함정과 정밀 수치모사 기법을 활용하여 침로각 변화에 대한 소자성능 유지여부를 확인하였다.

주제어 : 소자, 역문제, 자기장, 자화

I. 서 론

일반적으로 소해함(minesweeper)은 기뢰(mine)로부터 함정을 보호하기 위하여 최소한의 자성재질을 사용하여 건조된다. 선체는 나무나 비 자성재질을 사용하는 반면 엔진, 발전기 등의 내부 장비들은 비교적 낮은 자기특성을 갖는 재질로 제작된다. 그러나 자성재질의 사용량이 비록 작을지라도 기뢰의 기폭을 야기 시키기에 충분한 수중 자기장 왜곡 신호가 발생한다. 이는 현대식 기뢰가 나노테슬라(nanotesla) 단위의 미세

한 자기장도 감지할 수 있는 고감도 자기센서를 장착하고 있기 때문이다. 따라서 함정에서 발생하는 수중 자기장 신호를 줄이기 위해서 필수적으로 소자시스템(degaussing system)의 탑재가 요구된다[1-8].

함 내에 탑재된 소자시스템은 다수 개의 소자코일, 이를 구동하기 위한 직류전원 및 코일 전류제어 장치 등의 기본구성을 갖는다. 소자시스템은 함정에서 발생하는 자기장 신호와 크기가 같고 방향이 반대인 소자코일 자기장을 발생시켜 수중 자기장 왜곡신호를 최소화하는 원리를 이용한다. 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[1-8].

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

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

Fax: +82-53-950-5600, e-mail: dh29kim@ee.knu.ac.kr

OLDG는 수중에 매설된 자기센서에서 측정된 신호를 수집/분석하고 이를 기반으로 최적 소자전류를 도출하는 자기측정 처리시설(magnetic measurement & treatment facility: 이하 MMTF)을 이용한다[1]. 합정의 위치변화에 따른 지자계 변화에 기인하여 유도되는 탑재장비의 유도자화(induced magnetization) 변화에 의한 자기장 신호는 쉽게 보상할 수 있다. 그러나 합정 운항 중에 발생하는 기계적/열적 스트레스에 의해 발생하는 탑재 장비 내의 영구자화 변화에 의한 자기장 신호의 보상은 매우 어렵다. 이러한 제약으로 인하여 OLDG는 정기적으로 MMTF를 이용하여 소자코일 전류의 재교정이 요구된다[1-6].

반면, CLDG는 상기 기술한 OLDG의 불편함을 해소하기 위하여 정박운항 중에 합정에서 발생하는 수중 자기장 신호 변화를 실시간으로 제어하는 방식이다. 시스템 운영을 위해서는 함 내에 소자코일과 전원장치 이외에도 다수의 자기센서, 신호 수집/분석장치 및 최적 소자전류 제어장치 등이 포함되어야 한다. 따라서 CLDG는 탑재된 다양한 장치들을 이용하여 함 내에서 측정된 자기신호의 분석을 기반으로 수중 자기장 왜곡신호를 예측하고 이를 바탕으로 각 소자코일의 전류를 실시간으로 최적의 상태로 제어한다[7, 8].

본 논문에서는 기존 CLDG의 소자코일 제어 알고리즘을 개선할 수 있는 효율적인 소자코일 최적전류 도출 원리와 알고리즘을 제안한다. 제안한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 축소 소해함 모델을 사용하여 모의시험을 수행하였다. 또한, 각 지자계 변화에 따라 도출된 소자전류의 적합성을 판단하기 위하여 합정에서 발생하는 수중 자기장 신호를 유한요소 해석을 통해 도출하여 최적 소자성능 유지여부를 확인하였다.

II. 폐회로 소자 기법

본 장에서는 CLDG 운영의 핵심기술에 해당하는 소자코일 전류의 도출 원리와 제어 알고리즘 측면에서 기존 방식과 제안한 방식과의 차이점을 고찰한다.

1. 소자전류 제어원리

소자전류 제어원리를 설명하기 위해서 Fig. 1과 같이 동일한 외부 지자계 조건에서 제어영역 내부에 전자석(electromagnet)의 배치와 상이한 자성체 배치를 가정한다.

이때 제어영역 외부의 특정 거리에서 측정되는 자기장 신호는 지자계와 제어영역에 포함된 자성체의 유도자화에 기인한 유도자기장 성분의 벡터 합으로 표현된다. 따라서 이러한 내부 자성체에 기인한 자기장의 왜곡신호 즉, 유도자기장의 크기를 제어하기 위해 CLDG에서는 제어영역 표면에 Fig. 1과 같이 다수 개의 3축 자기센서($M_1 \dots M_n$)가 배치된다. 내부

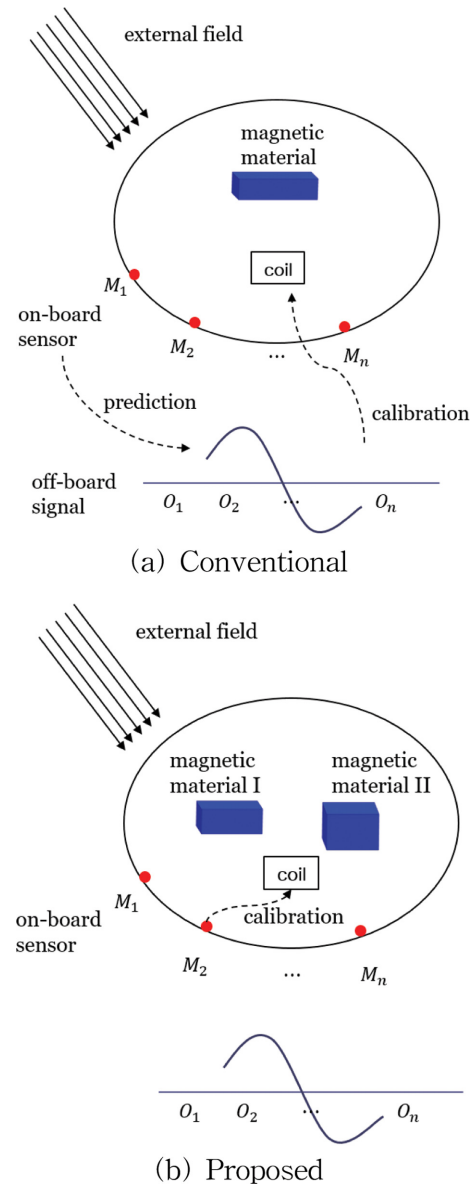


Fig. 1. (Color online) Principles for controlling degaussing currents.

센서들(on-board sensors)에서 측정된 신호를 기반으로 전자석의 전류를 제어하여 자성체에서 발생하는 합정 외부의 유도자기장 크기를 최대한 상쇄시킨다[7, 8].

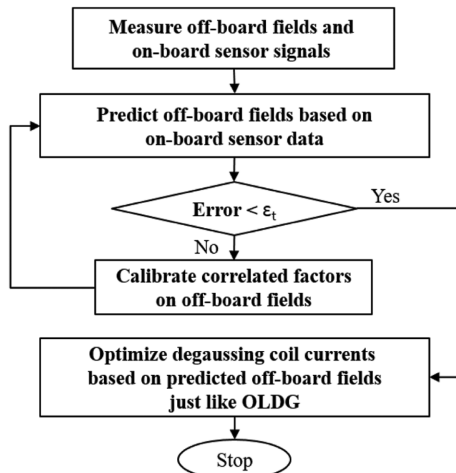
기존 CLDG 방식에서는 제어영역 내의 전자석의 전류를 제어하기 위해서 Fig. 1(a)에서 도시한 바와 같이 먼저 내부 센서 신호를 기반으로 외부 관측선 상의 유도자기장 신호를 예측한다. 그리고 예측된 유도자기장 신호를 이용하여 신호의 크기를 가능한 상쇄시키기 위해 제어영역 내부의 전자석 전류를 최적화한다. 반면, 제안된 CLDG 방식에서는 Fig. 1(b)와 같이 동일한 제어영역 내의 상이한 자성체 구성을 갖고 있을지라도 전자석을 이용하여 내부센서의 개별 신호를 Fig. 1(a)의 최적화된 상태와 동일하게 유지시키면 외부에서 측정

되는 신호는 같다는 원리를 이용한다.

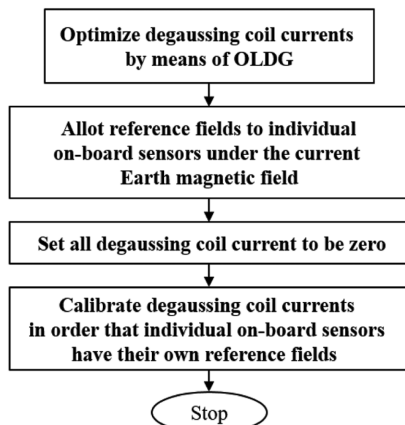
즉, 제안된 방식에서는 지자기 하에서 자성체에 의해 발생하는 유도자기장의 크기가 최소가 되는 조건에서 각 내부 센서의 측정신호를 기준값으로 설정하게 된다. 제어영역 내부의 자기적인 조건 변동이 발생할지라도 항상 내부센서의 측정값이 미리 설정된 기준값을 유지할 수 있도록 전자석의 전류를 제어한다. 따라서 기존 방식에서 사용하는 정밀한 외부 자기장 신호예측에 요구되는 3차원 역문제 해석과 그에 따른 관련 시스템 변수들의 교정 작업이 생략될 수 있어 제안된 방식은 실시간 소자전류 제어에 있어 그 효율성이 크다.

2. 소자전류 제어 알고리즘

CLDG는 OLDG와 달리 정기적인 소자시스템의 교정 작업이 요구되지 않는다. 그러나 초기 CLDG 시스템의 관련 변수 교정과 시스템 정상동작 여부를 판단하기 위해서는 수중 자기장 신호 측정/분석 및 시스템 교정인자 도출이 가능한



(a) Conventional



(b) Proposed

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

MMTF를 이용해야 한다. 본 절에서는 두 가지 CLDG 방식 사이의 초기 시스템 교정 작업과 운항 중 실시간 소자전류 제어에 관련된 알고리즘을 비교/분석한다.

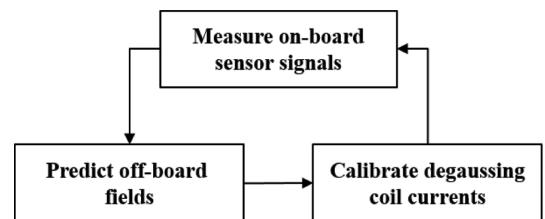
Fig. 2는 MMTF에서 두 가지 방식의 시스템 교정 작업을 비교한 순서도이다. Fig. 2(a)의 기존 방식의 교정 작업은 아래와 같다[7, 8].

- a) 함 내에 설치된 내부센서 신호와 특정 수심에 매설된 센서에서 외부 자기장 신호를 측정한다.
- b) 내부센서 데이터를 기반으로 역문제 해석을 수행하여 외부 자기장 신호를 예측한다.
- c) 예측된 신호와 측정된 외부 자기장 신호의 차가 허용오차(ϵ_t) 이내이면 단계 e)를 수행하고 그렇지 않으면 단계 d)를 수행한다.
- d) 역문제 해석에 관련된 변수 교정 후 단계 b)를 다시 수행한다.
- e) OLDG 기법과 유사하게 예측된 외부 자기장 신호를 기반으로 소자코일 전류 최적화 작업을 수행한다.

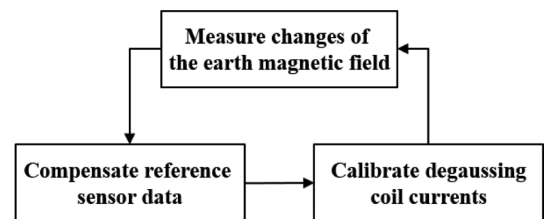
한편 제안된 방식의 시스템 변수의 교정 작업은 Fig. 2(b)에 제시된 바와 같다.

- a) OLDG 기법을 사용하여 소자코일 전류 최적화 작업을 수행한다.
- b) 현 지자기 조건에서 내부 센서 별 기준값을 설정한다.
- c) 모든 소자코일 전류의 값을 0으로 설정한다.
- d) 각 내부 센서가 미리 설정된 기준값이 측정되도록 소자코일 전류를 다시 최적화한다.

이러한 시스템 교정 작업이 완료되면 운항 중에 사용되는 실시간 소자전류 제어 알고리즘은 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)의 기존 방식에서의 소자전류 제어는 내부센서 신호를 측정



(a) Conventional



(b) Proposed

Fig. 3. CLDG block diagrams during a voyage.

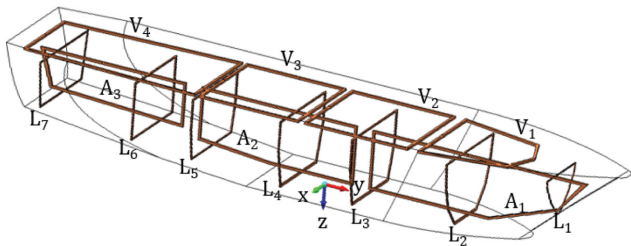


Fig. 4. (Color online) A minesweeper mockup with 14 degaussing coils.

하고 이를 기반으로 외부 자기장을 예측한 후, 소자전류를 교정하는 순환구조를 갖는다. 반면, 제안된 방식의 소자전류 제어는 Fig. 3(b)와 같이 함 상에 설치된 별도의 자기센서를 이용하여 지자계를 측정하고, 지자계 변화에 해당하는 개별 내부센서의 기준값을 보정한 후 소자전류를 교정하는 구조로 구성된다. 이때 Fig. 3(a)의 외부 자기장 예측을 위해서는 다소 복잡한 3차원 역문제 해석이 요구되지만 Fig. 3(b)의 지자계 변화에 대한 내부센서의 기준값 보상은 간단한 삼각함수를 적용하여 수행한다.

위에서 살펴본 바와 같이 CLDG 시스템의 교정 작업과 운항 중 실시간 소자전류 제어에 소요되는 절차도 기존 방식에 비해 제안된 방식이 훨씬 간편함을 확인할 수 있다.

III. 적용 사례

제안한 CLDG 기법의 타당성과 소자성능을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 축소 소해합 모델을 고려하였다. 축소함의 체원은 길이 1.51 m, 폭 0.30 m, 높이 0.21 m이다. 그리고 실제 함정의 소자 시스템 운영을 모사하기 위하여 함 내에 수직(z) 방향의 V 코일 4개, 횡축(x) 방향의 A 코일 3개 및 종축(y) 방향의 L 코일 7개로 구성된 소자코일을 설치하였다. Fig. 5는 함 내에 횡축 방향의 중심인 단면(x=0) 상에 설치

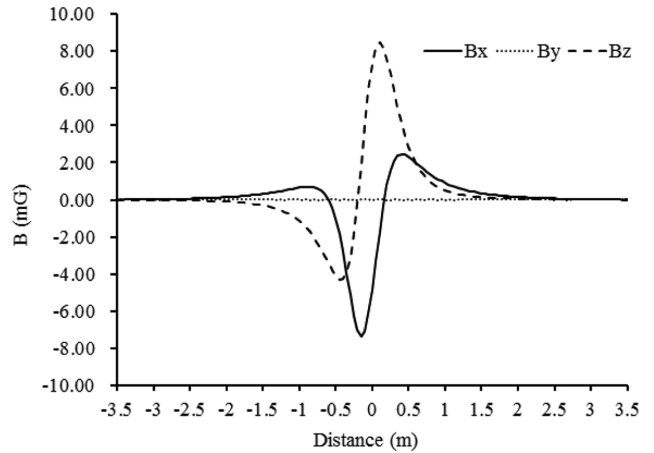


Fig. 6. Magnetic field anomaly before degaussing.

된 12개의 3축 자기센서 위치와 탑재 장비를 모사한 내부 자성체를 제시한다. 내부 자성체는 길이 0.30 m, 폭 0.08 m, 높이 0.15 m의 크기를 갖고 비투자율(relative permeability)은 310으로 가정하였다. 한편 지자계 하에서 내부 자성체의 유도자화에 의해 발생하는 수중 자기장 왜곡신호는 용골선(keel line)으로부터 0.345 m 아래의 측정선 상에서 관측하였다. 모의시험에서 측정되는 자기장 왜곡신호는 3차원 정밀 자기장 수치해석 도구인 MagNet을 사용하여 계산하였다[9].

1. 자기센서 기준값 설정

함 내에 탑재된 내부센서 별 기준값을 설정하기 위해 MMTF에서 수행되는 과정을 수치 모사하였다. Fig. 4에서 제시한 축소 함정의 종축(y) 방향을 자북(magnetic north)에 일치시켰다. 이때 $B_x = -41.34$ mG, $B_y = 307.50$ mG, $B_z = -381.41$ mG인 지자계 조건을 함정에 인가하였다. Fig. 6은 주어진 조건 하에서 내부 자성체의 유도자화에 의해 발생하는 관측선에서 측정되는 소자 전 자기장 왜곡신호의 세 가지

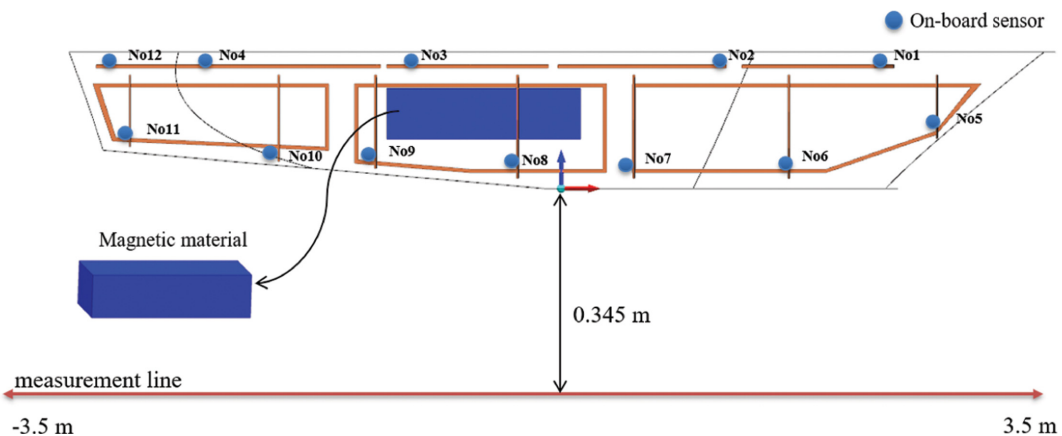


Fig. 5. (Color online) On-board sensors and a magnetic material.

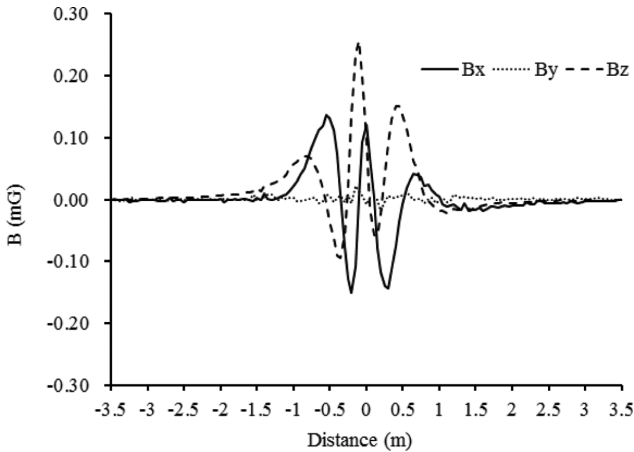


Fig. 7. Degaussed magnetic fields after OLDG.

성분을 나타낸다.

Fig. 2(b)의 제안한 CLDG 시스템 교정 작업에 따라 우선 기존 OLDG 방식을 사용하여 자기장 왜곡신호를 최소화할 수 있는 14개의 소자코일 별 최적전류값을 도출하였다. 본 연구에서는 해석적인 기자력 민감도(magnetomotive force sensitivity)에 기반한 소자전류 최적화 기법이 사용되었다[10-12]. Fig. 7은 OLDG 처리 후 관측선에서 측정된 자기장 신호로 초기 신호 대비 x방향과 z방향의 자기장의 크기가 97% 정도 감소함을 확인할 수 있다. 이때 특정 위치에 설치된 내부 자기센서에서 측정되는 자기장 성분을 Fig. 8과 같이 각 센서의 기준값으로 설정한다.

내부센서 별 기준값이 결정된 후, OLDG 방식에 의해 최적화된 소자코일의 전류를 0으로 재 설정한다. 제안된 기법에 따라 실시간 소자전류 최적화를 위해 식(1)과 같이 정의된 목적함수 F 를 최소화한다.

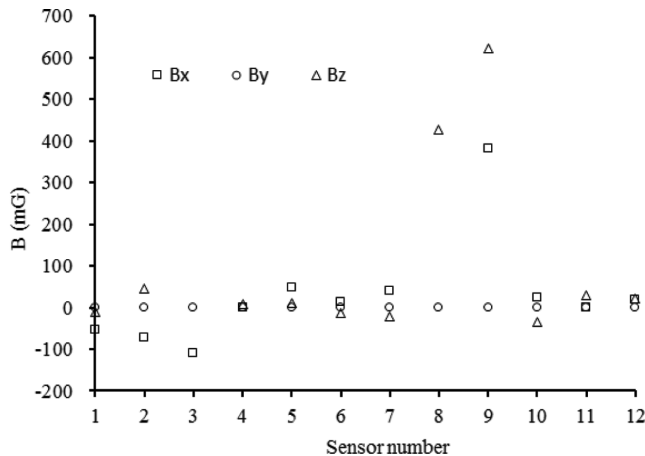


Fig. 8. Reference field values of individual on-board magnetic sensors.

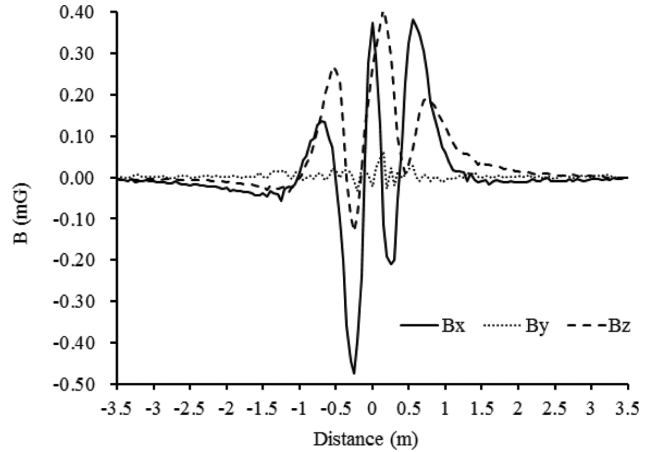


Fig. 9. Magnetic fields degaussed by the proposed CLDG technique.

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

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. Fig. 9는 식(1)의 결과로 도출된 소자전류에 의해 관측선에서 측정되는 자기장 신호를 나타낸다. Fig. 7의 OLDG 처리 후 소자성능에는 다소 못 미치지만 초기 자기장 왜곡신호 대비 x방향과 z방향의 자기장의 크기가 94% 정도까지 감소됨을 확인할 수 있다.

2. 침로각 변화에 대한 소자결과

지가계의 변화에 따라 제안된 기법의 소자성능이 유지됨을 확인하기 위하여 Fig. 10과 같이 선수방향을 그림 상의 왼쪽 방향으로 설정된 자북으로부터 일정간격으로 변경하였다.

이 경우, 자북을 기준으로 설정된 내부센서의 기준값은 외부 지자기 환경의 변화와 소자 시스템의 자기적인 선형성을

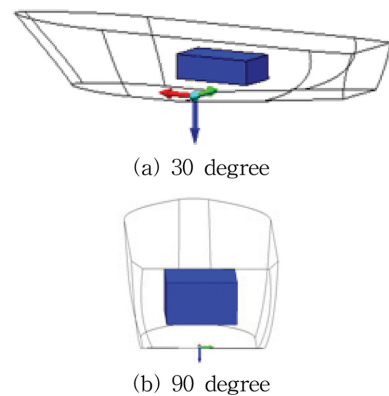


Fig. 10. (Color online) Illustration of the course angle change of a minesweeper mockup.

Table I. Degaussing coil currents due to the course angle changes.

		Course angle 30°	Course angle 60°	Course angle 90°
L coils (A · turns)	L ₁	0.058	0.034	0
	L ₂	0.192	0.111	0
	L ₃	-0.402	-0.232	0
	L ₄	4.215	2.434	0
	L ₅	2.789	1.610	0
	L ₆	-0.412	-0.238	0
	L ₇	0.088	0.051	0
A coils (A · turns)	A ₁	-0.053	-0.091	-0.105
	A ₂	-1.250	-2.164	-2.499
	A ₃	-0.148	-0.257	-2.96

Table II. Degaussing performance indices between two different techniques.

	Before degaussing	After OLDG	After CLDG
Max. B _x (mG)	7.35	0.15 97.9 %	0.47 93.6 %
Max. B _z (mG)	8.46	0.26 96.9 %	0.41 95.2 %

고려하여 식(2)와 같이 보정된다.

$$\tilde{B}_{ij}^R = B_{i1}^R \sin(\theta) + B_{i2}^R \cos(\theta) + B_{i3}^R \quad (2)$$

여기서 i 와 j 는 내부 자기센서의 번호와 자기장의 방향성분, 그리고 B^R 과 \tilde{B}^R 은 자북에서 설정된 내부센서 기준값과 침로각 θ 에서 보정된 기준값을 의미한다. 따라서 침로각의 변화에 따라 최적 소자전류의 도출을 위해서는 식(1)의 내부센서 기준값을 식(2)를 사용하여 간단히 보상하면 된다.

Table I은 침로각이 각각 30도, 60도, 90도 일 경우, 제안된 기법에 의해 도출된 소자코일 별 최적전류치를 나타낸다. 침로각의 변화에 따라 함정의 수직(z) 방향의 지자계 성분의 변화는 발생하지 않으므로 V 코일의 소자전류 변화도 야기되지 않아 제시한 표에서 제외하였다. 이러한 침로각 변화에 따라 도출된 최적전류에 의한 소자성능을 관측선에서 유효소해석을 통해 측정된 결과, Table II와 같은 결과를 얻었다. 즉, 제안된 기법에 의해 도출된 소자전류는 침로각의 변화에 따라서도 초기 함정 선수가 자북일 경우와 마찬가지로 소자성능을 유지함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존 폐회로 방식의 소자 시스템 운영 절차

를 간소화할 수 있는 새로운 소자전류 제어 원리 및 알고리즘을 제안하였다. 또한 축소 함정에 대한 정밀 수치모사 기법을 활용하여 외부 지자계 변화에 따른 제안된 기법의 실시간 소자성능이 유지됨을 확인하였다. 향후 제안된 기법의 실용화를 위해서 탑재 장비의 영구자화 변화와 관련된 추가 연구 및 이를 검증하기 위한 축소 함정 시험이 요구된다.

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] 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] MagNet User's Manual, Infolytica Corporation, Quebec, Canada (2012).
- [10] K. Lee, G. Jeung, C. Yang, J. Park, H. Kim, and D. Kim, IEEE Trans. Magn. **45**, 1478 (2009).
- [11] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, IEEE Trans. Magn. **48**, 419 (2012).
- [12] N. Choi, G. Jeung, S. Jung, C. Yang, H. Chung, and D. Kim, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 4904504 (2012).