

Analytic Verification of Optimal Degaussing Technique using a Scaled Model Ship

Dong-Jin Cho*

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

(Received 10 March 2017, Received in final form 5 April 2017, Accepted 7 April 2017)

Naval ships are particularly required to maintain acoustic and magnetic silence due to their operational characteristics. Among them, underwater magnetic field signals derived by ships are likely to be detected by threats such as surveillance systems and mine systems at close distance. In order to increase the survivability of the vessels, various techniques for reducing the magnetic field signal are being studied and it is necessary to consider not only the magnitude of the magnetic field signal but also the gradient of it. In this paper, we use the commercial electromagnetic finite element analysis tool to predict the induced magnetic field signal of ship's scaled model, and arrange the degaussing coil. And the optimum degaussing current of the coil was derived by applying the particle swarm optimization algorithm considering the gradient constraint. The validity of the optimal degaussing technique is verified analytically by comparing the magnetic field signals after the degaussing with or without gradient constraint.

Keywords : scaled model ship, underwater magnetic field, optimal degaussing technique, gradient constraint, finite element analysis

축소 모델 합정을 이용한 소자 최적화 기법의 해석적 검증

조동진*

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

(2017년 3월 10일 받음, 2017년 4월 5일 최종수정본 받음, 2017년 4월 7일 게재확정)

합정은 작전 운용관점에서 음향적 및 자기적으로 정숙성이 요구되며, 그 중에서 합정에서 발생하는 자기장 신호는 근거리에서 적의 감시체계 및 기뢰체계 등 위협세력에 의해 쉽게 노출되게 된다. 따라서 아함의 생존성 증대를 위하여 합정의 자기장 신호 저감을 위한 다양한 기법이 연구되고 있으며, 최근에는 단순히 자기장 신호의 크기 감소 뿐 만 아니라 자기장 신호의 변화율 성분에 대한 감소까지 추가적으로 요구되고 있다. 본 논문에서는 상용 전자기 유한요소해석 도구를 이용하여 합정 축소모델에 대한 유도 자기장 신호를 예측하고, 소자코일을 배치하였다. 그리고 기울기 구속조건을 고려한 입자 군집 최적화 알고리즘을 적용하여 소자코일의 최적 소자전류를 도출하였다. 기울기 구속조건 유무에 따른 소자 후 자기장 신호를 비교함으로써 최적 소자기법의 타당성을 해석적으로 검증하였다.

주제어 : 합정 축소모델, 수중 자기장, 최적 소자기법, 기울기 구속조건, 유한요소해석

I. 서 론

합정에서 발생하는 수중 자기장 신호는 감시체계 및 기뢰체계 등 적의 위협세력에 의해 탐지되기 쉽다. 아군 합정의 생존성 확보를 위하여 합정의 자기장 신호 저감을 위한 다양한 기법이 연구되고 적용되고 있다. 합정의 영구 자기장 성분을 감소시키는 탈자기법과 잔류 영구 자기장 성분 및 유도 자기장 성분을 감소시키는 소자기법은 가장 일반적으로 적용

되는 기법이다[1, 2]. 일반적으로 잠수함을 포함한 소형 합정의 경우, 함 자체 전원 용량 및 장비 설치 공간의 부족으로 소자장비(Degaussing System)를 탑재하는 데는 많은 제약이 있으며, 근해 작전 임무 수행으로 소자장비 운용의 효율성이 또한 낮았다. 하지만 적 위협 무기체계의 탐지 능력이 지속적으로 고도화됨으로 인해 아함의 은밀성이 각별히 요구되는 전장 환경 변화를 고려한다면, 미래 건조 예정인 합정에서는 소자장비를 필수적으로 탑재하고 최적화된 소자기법을 적용하여 합정 자체의 스텔스 성능 향상은 물론 전투력 향상에도 기여할 필요가 있다.

소자는 합정 내부에 종축(Longitudinal), 수직(Vertical), 횡

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-55-540-6404,

Fax: +82-55-542-3737, e-mail: djcho@add.re.kr

축(Athwartship) 방향으로 다수의 소자코일을 배치하고 전류를 인가하여, 합정에서 발생하는 자기장 신호와 크기는 같으나 방향은 반대인 보상 자기장 신호를 발생시킴으로써, 잔류 영구 자기장 성분과 유도 자기장 성분을 최소화하는 기법이다[3]. 따라서 합정의 소자 최적화는 적의 위협세력에 탐지되지 않기 위하여, 합정 자기장 신호를 최대한 상쇄할 수 있도록 각 소자코일별 최적 소자전류를 인가하는 것이다[4].

합정에 대한 자기적 탐지 방법을 살펴보면, 측정 위치에서 자기장 신호의 크기는 물론 자기장 신호의 변화되는 성분을 함께 고려할 수 있다. 단순히 자기장 신호의 크기만으로 탐지하는 방법은 복잡한 수중 환경에서 존재하는 환경 자기장 신호, 주변 자성체 장비에 의해 센서에 유기되는 각종 노이즈 성분들에 의해 오 탐지 또는 미 탐지 가능성이 있게 된다. 따라서 자기장 신호의 변화되는 성분을 함께 고려함으로써 대상 합정의 정확한 탐지 및 식별이 가능하게 된다. 또한 피탐지 관점에서 자기장의 크기를 최소화하는 것과 더불어 자기장의 변화되는 성분이 정해진 기준을 만족하도록 제어함으로써 위협원으로부터 아합의 탐지 가능성을 감소시킬 수 있게 된다. 따라서 최적 소자기법을 적용함에 있어 소자 후 자기장의 크기를 최소화하는 것뿐 아니라 기울기 구속조건을 만족하는 최적 소자전류를 산출하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 합정 축소 모델을 대상으로 먼저 유한요소 해석을 통해 모델합의 유도 자기장을 계산하고, 모델합의 유도 자기장의 신호 형태, 내부 공간 및 소자코일 간 간섭 등을 종합적으로 반영하여 소자코일을 설계하였다. 그리고 소자코일에 일정한 기저력을 인가하여 발생하는 각 코일별 코일 효과(coil effect)를 계산하고, 이를 바탕으로 최적 소자기법을 이용하여 합정의 유도 자기장을 최소화할 수 있는 최적 소자전류를 도출하였다. 본 연구에 적용된 최적 소자기법은 입자 군집 최적화 알고리즘(Particle Swarm Optimization)에 근거를 두고 있으며, 목적함수가 되는 자기장 신호의 크기 뿐 아니라 자기장 신호의 변화 성분을 고려할 수 있도록 기울기 구속조건을 적용하였으며, 기울기 구속조건 유/무에 따른 소자 후 자기장 신호를 비교함으로써 최적 소자기법의 타당성을 해석적으로 검증하고자 한다.

II. 최적 소자기법

1. 입자 군집 최적화 알고리즘(PSO, Particle Swarm Optimization)

입자 군집 최적화 알고리즘은 일종의 확률론적 최적화 알고리즘으로, Kennedy and Eberhart에 의해 처음 제안되었다[5]. PSO는 새들이 먹이를 찾아 무리 행동(flocking behavior)을 하는 것에 착안하고 있으며, 입자(새)들이 이동해가는 과

정에서 각 입자가 경험한 최적점(pBest)과 군집 전체가 경험한 최적점(gBest)에 영향을 받아 움직이며, 전역 최적점을 찾는데 효과적이다[6]. 최적점이 한개만 존재하는 단순한 형태의 목적함수의 경우 결정론적 최적화 알고리즘의 적용으로도 신속하고 정확하게 최적 소자전류를 산출이 가능하지만, 본 논문에서는 다양한 구속조건을 적용하기 위해 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용하였다[7, 8].

2. 목적함수

$$F = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n |B_{i,j}^{degaussed}|^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n |B_{i,j}^{measured} + B_{i,j}^{coils}|^2 \quad (1)$$

식(1)은 최적 소자기법의 목적함수를 나타낸다. 아래첨자 i 는 자기장의 각 축을 의미하며 총 X, Y, Z의 3축이 존재한다. j 는 측정선 상의 측정점 번호, n 은 측정점의 총 개수를 나타내며, 자기장 신호는 n 개의 유한한 측정점에서 관측된다. $B^{measured}$ 는 합정의 측정 자기장, B^{coils} 는 소자코일에 의한 보상 자기장을 의미한다. 따라서 최적 소자기법은 소자코일별 인가되는 전류의 조합을 통해, 합정 자기장과 크기는 같고 방향이 반대인 보상 자기장 신호를 가장 근접하게 계산함으로써, 소자 후 자기장 신호 $B^{degaussed}$ 를 최소화하게 된다.

3. 기울기 구속조건

최적 소자기법 적용 시, 자기장의 미분(변화율) 성분에 대한 구속조건을 적용하기 위해서는 합정의 운항에 따른 합정과 탐지체계 간 상대속도에 대한 고려가 필요하다. 실제 합정의 최적 소자전류를 도출하는 작업은 보통 합정이 정박해 있는 상태에서 이루어지고, 합정과 측정점 사이에 상대속도가 존재하지 않는다. 따라서 측정점에서 관측되는 정 자기장 신호의 크기만이 활용된다. 반면, 합정 운항 시에는 합정과 탐지체계 간 상대속도가 존재하게 되고, 합정에서 발생하는 정 자기장 신호는 동일하더라도 상대속도에 따라 관측점에서 자기장의 미분 성분이 다르게 관측되게 된다. 합정이 정박된 상태에서 이루어지는 최적 소자전류 산출 단계에서 미분 성분에 대한 구속조건을 추가적으로 적용하기 위해서는 미분 성분에 대한 계산 방법과 구속조건에 대한 기준이 필요하다. 본 연구에서는 자기장의 미분 성분을 기울기로 정의하고, 구속조건에 대한 기준은 상대속도를 고려하여 상수로 정하였다.

$$G_{i,j}^{degaussed} = \frac{B_{i,j}^{degaussed} - B_{i,j+k}^{degaussed}}{k*d} \quad (2)$$

$$|G_{i,j}^{degaussed}| < C_{gradient} \quad (3)$$

식(2)는 기울기, 즉 자기장 신호의 미분 성분에 대한 계산식이다. n 개의 측정점에서 계측되는 자기장 신호로부터 기울

기를 계산하기 위하여, k 개의 측정점 간의 거리와 자기장 변화를 이용하였다. k 는 기울기 계산 기준이 되는 측정점 개수, d 는 측정점 1개간의 거리를 의미한다. 각 측정점에서 자기장 신호의 기울기 $G^{degaussed}$ 는 자기장 변화량을 거리로 나누어 주어 구한다. $C_{gradient}$ 는 기울기 구속조건 상수로 대상 합정과 탐지체계 간의 상대속도를 고려하여 적용한다. 식(3)은 기울기 구속조건 적용 식으로, 각 측정점에서 자기장 신호의 기울기가 기준 $C_{gradient}$ 이하가 되도록 구속조건을 적용한다.

4. 탐색과정

기울기 구속조건을 적용한 PSO의 탐색과정은 다음과 같으며, Fig. 1은 전체 흐름도를 나타낸다.

1) 초기화

입자의 개수, 변수(소자 전류)의 탐색 범위, 기울기 구속조건 등 PSO 탐색조건을 정의하고, 입자들의 초기 위치와 속도를 무작위로 생성한다.

2) 구속조건 만족여부 판별 및 적합성(Fitness) 평가

입자별로 구속조건 만족여부를 판별하고, 만족하는 입자의 경우 적합성을 목적함수 자체로 평가하고, 불만족하는 입자의 경우 불이익(Penalty)을 주어 평가한다.

3) pBest, gBest 갱신

각 입자별로 현재 위치에서의 적합성이 이전 pBest의 적합성보다 개선되면, pBest를 갱신한다. 현재 gBest의 적합성이

이전 gBest의 적합성보다 개선되면, gBest를 갱신한다.

4) 속도 및 위치 갱신

각 입자별로 pBest와 gBest를 기준으로 하여 새로운 속도를 계산하고 위치를 갱신한다.

5) 반복 및 종료조건

위의 과정을 반복하며, 모든 입자들이 gBest로 수렴하거나, 최대 반복 횟수에 도달하면 종료한다.

III. 축소 합정 소자코일 설계

합정용 소자장비의 소자 성능은 전원장비의 용량, 소자코일의 개수, 위치, 형상, 최적 소자전류(산출기법)에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 소자코일의 개수를 V 코일, A 코일, L 코일 각각 4, 3, 8개로 선정하고, 해당 개수의 소자코일 운용을 위한 전원장비의 용량은 충분하다고 가정하였다.

1. 대상합정 해석조건

합정의 유도 자기장은 합정이 위치한 위도와 선수 방향에 따라 달라진다. 위도가 정해지면, 수평, 수직 방향의 지구자기장의 크기가 결정되고, 수직방향 유도 자기장(IVM)이 결정이 된다. 또한 선수 방향이 결정되면, 수평 방향 지구자기장에 의하여 종축 방향 유도 자기장(ILM)과 횡축 방향 유도 자기장(IAM)이 결정된다. 임의의 위도 및 선수 방향에 따라 소자 성능을 만족하기 위해서는 각 방향별 최대 유도 자기장을 기준으로 소자전류를 산출하게 된다.

Table I과 Fig. 2는 최적 소자기법의 타당성 검증을 위하여 제작된 합정 축소 모델의 제원 및 형상을 보여주고 있으며, Table II는 합정의 유도 자기장 예측을 위하여 유한요소해석에 사용된 지구자기장 크기를 포함한 입력 정보를 나타낸다. 선체 비투자율(relative permeability)은 300으로 가정하였고, 실험실(진해 지역)의 위도 및 경도를 반영하여 지구 자기장의 수평 방향은 31,000 nT, 수직 방향은 39,000 nT를 적용하였다.

Table I. Specification of scaled model ship.

	Length	Width	Height	Thickness
Size [mm]	1700	265	320	1

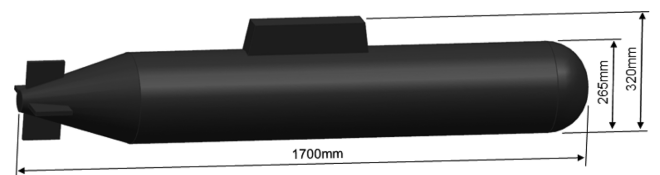


Fig. 2. Scaled model of ship.

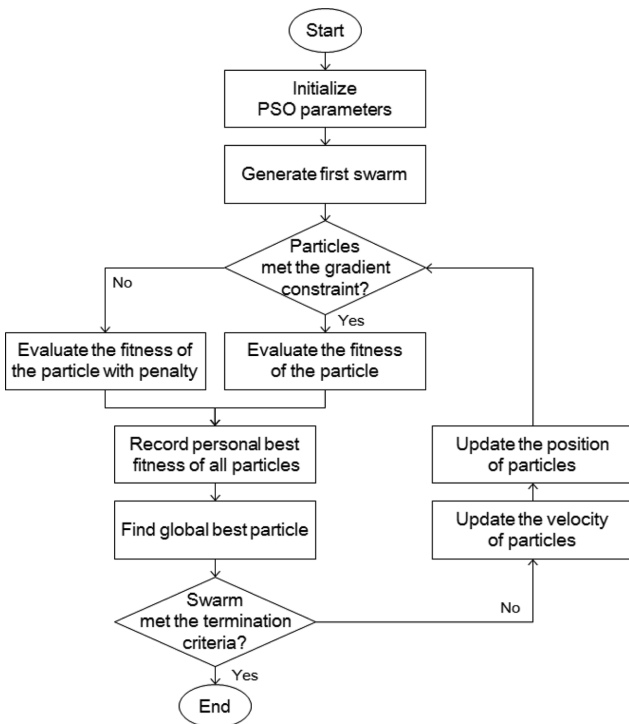


Fig. 1. Flowchart of PSO with gradient constraint.

Table II. FEM information for calculating induced magnetic flux density.

Sensor distance [mm]	Relative permeability (μ_r)	Applied earth magnetic field [nT]	
		Horizontal	Vertical
265	300	31,000	39,000

2. 해석결과

합정 축소 모델의 유한요소 해석결과, IVM과 ILM은 각각 Fig. 3, Fig. 4와 같으며, Table III에 각 축별 최대값을 나타낸다. 합정의 수직방향 유도자화에 의해 선체 keel line에서

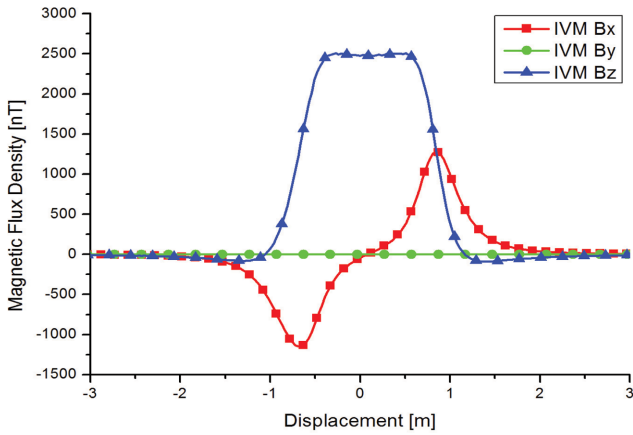


Fig. 3. (Color online) Calculated induced vertical magnetic flux density (IVM) at sensor position.

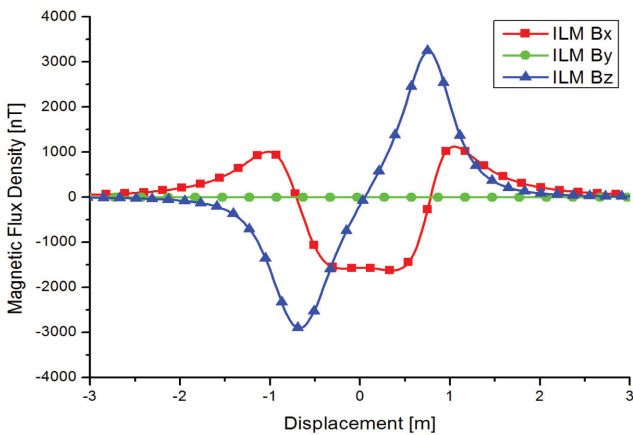


Fig. 4. (Color online) Calculated induced longitudinal magnetic flux density (ILM) at sensor position.

Table III. FEM result of magnetic flux density.

	Max magnetic field density [nT]	
	IVM	ILM
X_axis	1275.8	1623.4
Z_axis	2509.2	3249.9

최대 빡폭(265 mm) 거리만큼 떨어진 센서위치에서 측정되는 IVM은 X축 방향으로 종 모양(Bell-shaped)의 신호 형태, Z축 방향으로 대칭 신호 형태를 나타낸다. 마찬가지로 이유로 ILM은 센서위치에서 X축 방향으로 대칭 신호 형태, Z축 방향으로 종 모양 신호 형태를 나타낸다.

3. 소자코일 설계

축소 합정의 소자코일 개수는 V, A, L 소자코일별 각각 4, 3, 8개로 한정하였으며, 합정 형상에 따른 내부의 가용 공간, 각 소자코일 조립체간의 간섭 등 설계 제한 사항을 고려하여 설계하였다. Fig. 5는 V, A, L 소자코일의 최종 설계 결과를 나타낸다. 최적 소자전류를 산출하기 위해서는 설계된

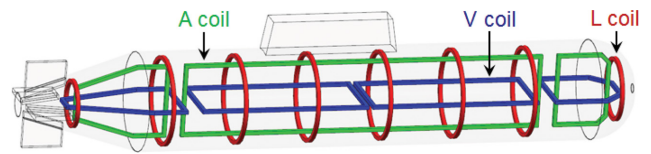
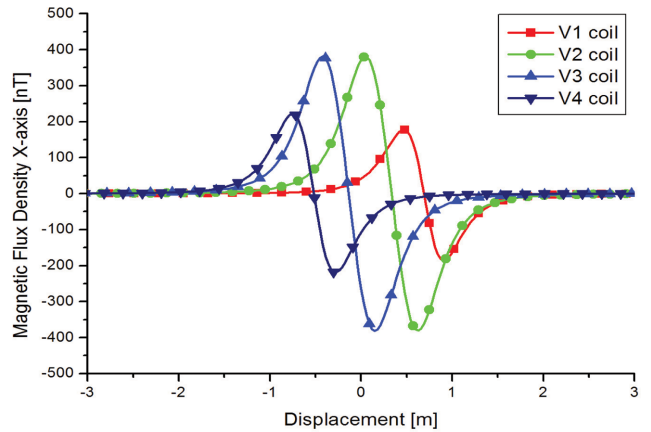
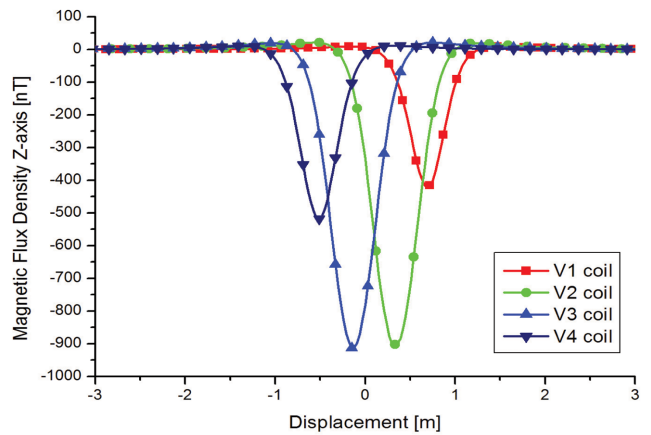


Fig. 5. (Color online) Design result of degaussing coils for ship.

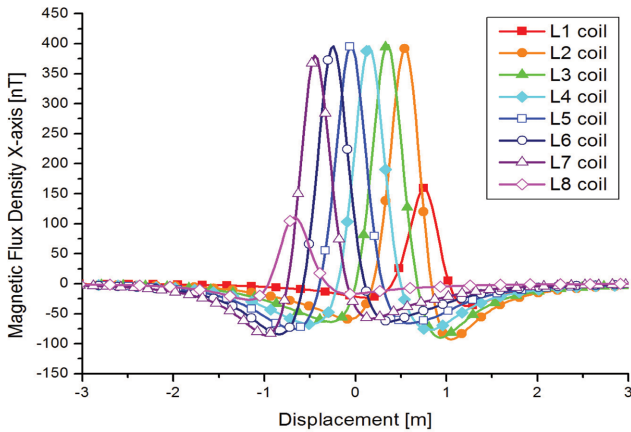


(a) V coil effects forward X-axis

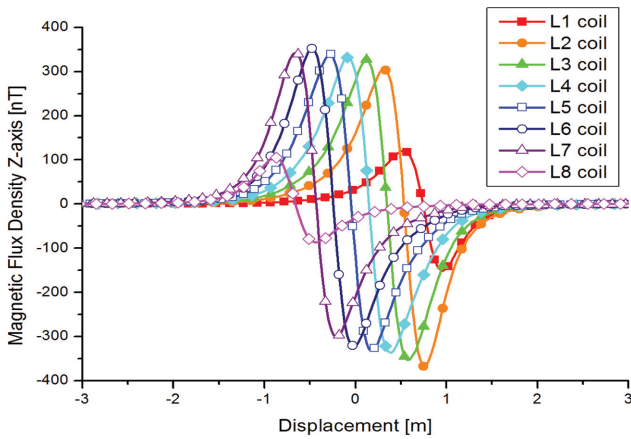


(b) V coil effects forward Z-axis

Fig. 6. (Color online) V coil effects for 10 AT at sensor position.



(a) L coil effects forward X-axis



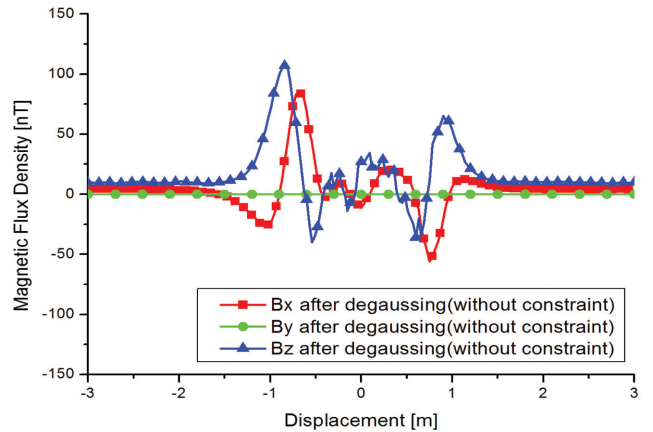
(b) L coil effects forward Z-axis

Fig. 7. (Color online) L coil effects for 10 AT at sensor position.

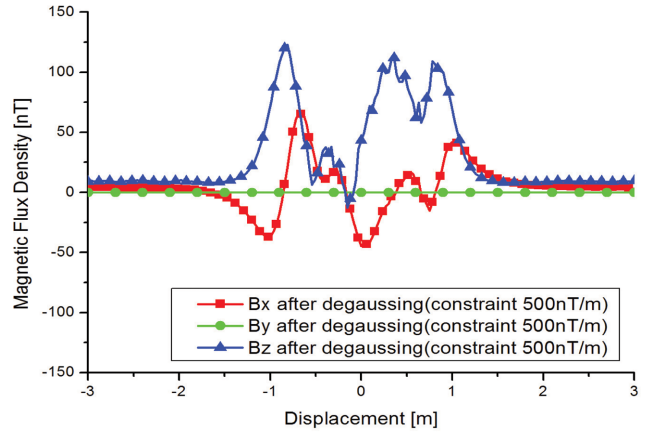
각 소자코일별 코일 효과 산출이 우선되어야 한다. 코일 효과는 소자코일에 일정한 기저력을 인가하였을 때 발생하는 자기장 신호를 의미하며, 유도 자기장과 마찬가지로 유한요소해석을 이용하여 산출하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 기저력 10 AT(Ampere-turns)을 인가하였을 때, V 코일과 L 코일의 방향별 코일 효과를 나타낸다.

IV. 축소 합성 최적 소자 결과

앞 장에서 계산한 코일 효과와 최적 소자기법을 적용하여, 축소 합성의 IVM과 ILM에 대한 최적 소자를 수행하였다.



(a) Without gradient constraint



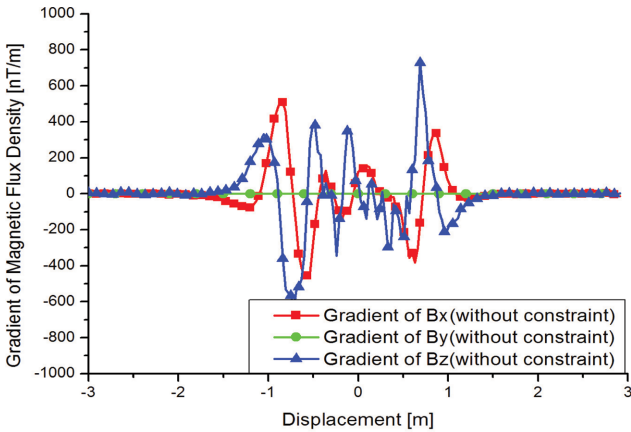
(b) With gradient constraint

Fig. 8. (Color online) Magnetic flux density at sensor position after IVM degaussing.

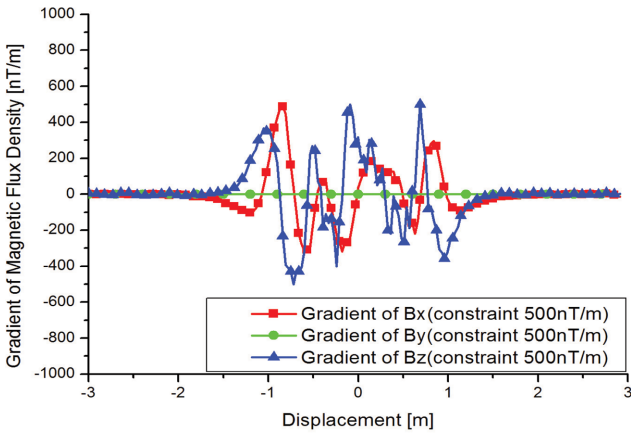
기울기 구속조건 적용 유무에 따라 각각 최적 소자전류를 도출하였고, 유한요소해석을 통하여 소자 결과를 비교하였다. 먼저 IVM에 대한 소자결과는 Table IV와 같고, IVM에 대한 기울기 구속조건은 500 nT/m로 가정하였다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 IVM에 대하여 기울기 구속조건 미적용 시와 적용 시의 소자 후 자기장 신호를 나타내고, Fig. 9(a)와 (b)는 각각의 기울기 값을 나타낸다. 기울기 구속조건 미적용 시에는 최대 자기장의 크기가 107.3 nT이고 기울기의 최대값은 728.2 nT/m이며, 기울기 구속조건 적용 시에는 최대 자기장의 크기가 123.5 nT, 기울기 최대값은 500 nT/m이다. 기울기 구속조건을 적용함에 따라 최대 자기장 크기는 15.1% 증가하

Table IV. IVM degaussing result.

	Max magnetic flux density [nT]		Ratio [%]	Max gradient [nT/m]		Ratio [%]
	Without constraint	With constraint		Without constraint	With constraint	
X_axis	85.7	65.1	76.0	511.9	486.2	95.0
Z_axis	107.3	123.5	115.1	728.2	500.0	68.7



(a) Without gradient constraint

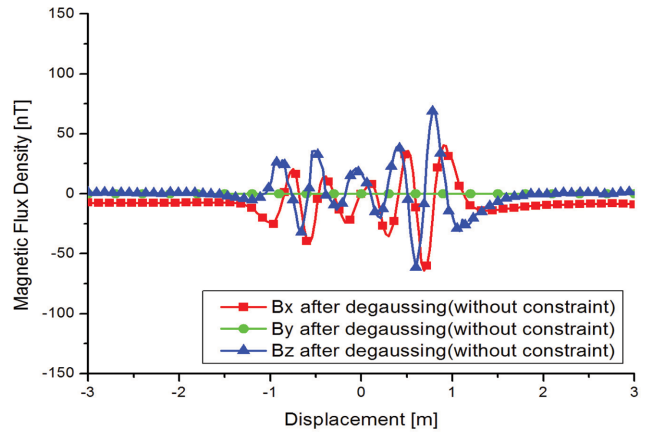


(b) With gradient constraint

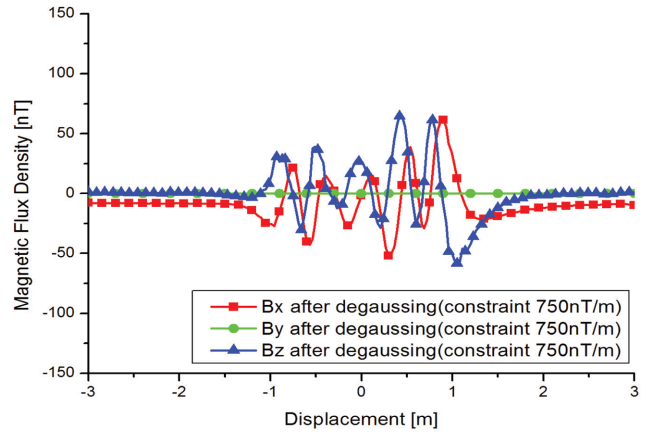
Fig. 9. (Color online) Gradient of magnetic flux density at sensor position after IVM degaussing.

였지만, 기울기 최대값 크기는 31.3% 감소하였고 기울기 구속조건 기준을 만족한다.

ILM에 대한 소자결과는 Table V와 같고, 기울기 구속조건은 750 nT/m로 가정하였다. Fig. 10(a)와 (b)는 각각 IVM에 대하여 기울기 구속조건 미적용 시와 적용 시의 소자 후 자기장 신호를 나타내고, Fig. 11(a)와 (b)는 각각의 기울기 값을 나타낸다. 기울기 구속조건 미적용 시에는 최대 자기장의 크기가 69.2 nT이고 기울기의 최대값은 887.5 nT/m이다. 기울기 구속조건 적용 시에는 최대 자기장의 크기가 64.5 nT, 기울기의 최대값은 750 nT/m이다. ILM 성분에 대한 소자 시에는 기울기 구속조건을 적용함에 따라 자기장의 크기는 6.8%



(a) Without gradient constraint



(b) With gradient constraint

Fig. 10. (Color online) Magnetic flux density at sensor position after ILM degaussing.

감소하고, 기울기 최대값 크기도 15.5% 감소하였다.

소자코일 설계 단계에서는 합정의 영구자화를 정확히 예측할 수 없기 때문에 영구자화 성분을 유도자화 성분의 일정 비율로 가정하여 고려하게 되며, 영구 자기장과 유도 자기장을 대상으로 한 최적 소자전류 산출 결과는 영구 자기장을 고려하지 않았을 때 보다 각 소자전류의 크기가 일정 비율로 증대된 결과를 나타낼 것이다. 실 환경에서는 탈자과정을 거친 후, 실측된 잔류 영구 자기장과 유도 자기장을 대상으로 최적 소자전류를 산출한다.

기존의 최적 소자기법은 소자 후 자기장의 면적을 최소화 하는 최적점을 찾았다면, 제안된 최적 소자기법은 기울기 구

Table V. ILM degaussing result.

	Max magnetic flux density [nT]		Ratio [%]	Max gradient [nT/m]		Ratio [%]
	Without constraint	With constraint		Without constraint	With constraint	
X_axis	64.2	61.5	95.8	817.7	680.1	83.2
Z_axis	69.2	64.5	93.2	887.5	750.0	84.5

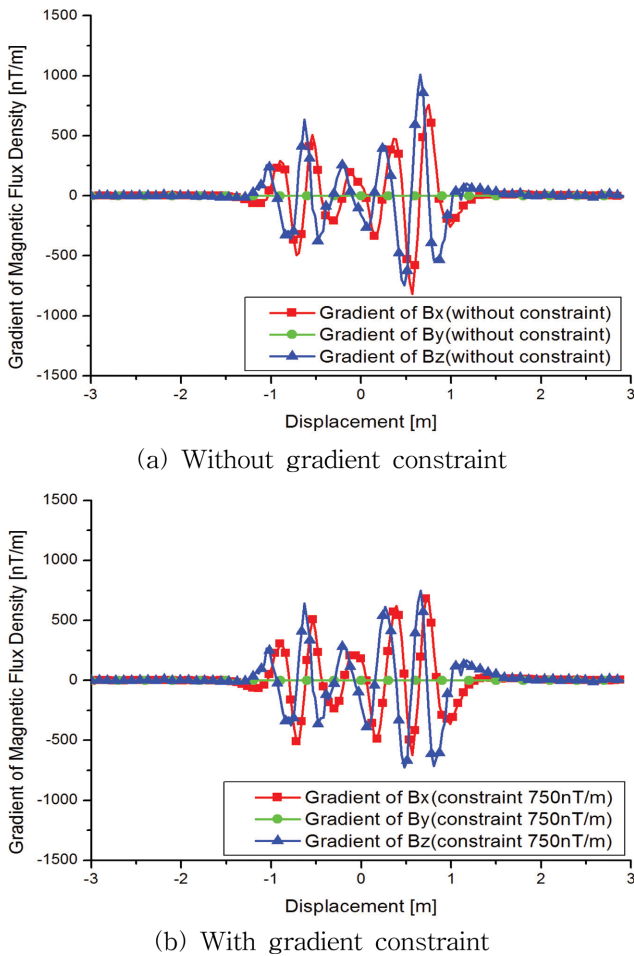


Fig. 11. (Color online) Gradient of magnetic flux density at sensor position after ILM degaussing.

속조건을 만족하면서 소자 후 자기장의 면적을 최소화하는 최적점을 찾는다. 경우에 따라 소자 후 자기장의 크기가 다소 증가될 수는 있지만, 자기장의 기울기 성분을 구속조건에 맞도록 감소시킬 수 있는 장점이 있다. IVM과 ILM 성분 에 대한 소자 결과에서 알 수 있듯이, 각기 다른 기울기 구속조건을 만족하는 최적 소자 전류를 산출하였으며, 향후 기울기 구속조건은 함정과 위협세력의 탐지 센서 간의 상대속도를 고려하여 임의로 변경 가능하다.

V. 결 론

본 논문에서는 기울기 구속조건을 적용한 입자 군집 최적화 알고리즘을 함정용 소자장비의 소자코일 최적 소자기법으로 제안하였고, 축소 모델 함정을 이용하여 타당성을 검증하였다. 먼저 유한요소해석을 통해 소자코일을 설계 배치하고, 코일 효과를 도출하였으며, 계산된 코일 효과와 최적 소자기법을 이용하여 수직방향 유도 자기장과 종축방향 유도 자기장을 대상으로 최적 소자 전류를 산출하였다. 또한 기울기 구속조건 유무에 따른 소자결과 비교를 통해, 기울기 구속조건을 적용한 최적 소자기법의 타당성을 해석적으로 검증하였다. 향후 모델 함정 내부에 소자코일이 설치된 축소모델 함을 자체 제작하여 제안된 최적 소자기법의 실험적 검증을 수행할 예정이다.

후 기

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

References

- [1] J. Holmes, Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signature, Morgan & Claypool (2006).
- [2] Official Website of the UNITED STATES NAVY <<http://www.navy.mil>>.
- [3] J. Holmes, Reduction of a Ship's Magnetic Field Signature, Morgan & Claypool (2008).
- [4] N.-S. Choi, G. Jeung, C.-S. Yang, H.-J. Chung, and D.-H. Kim, IEEE Trans. Magn. **48**, 419 (2012).
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks **4**, 1942 (1995).
- [6] H. Liu and Z. Ma, Int. Conf. Mechatronics and Automation 3133 (2007).
- [7] S. L. Ho, S. Yang, G. Ni, E. W. C. Lo, and H. C. Wong, IEEE Trans. Magn. **41**, 1756 (2005).
- [8] J. H. Seo, C. H. Im, C. G. Heo, J. K. Kim, H. K. Jung, and C. G. Lee, IEEE Trans. Magn. **42**, 1095 (2006).