ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 27(6), 226-233 (2017) https://doi.org/10.4283/JKMS.2017.27.6.226

The Effects of Initial Magnetic Field on Anhysteretic Deperming Performance

Sang-Hyun Kim, Jong-Wang Kim, and Hyang-Beom Lee*
School of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

Hyun-Ju Chung
The 6th R&D Institute-3rd Directorate, Agency for Defense Development, Changwon 51678, Korea

(Received 18 October 2017, Received in final form 13 December 2017, Accepted 13 December 2017)

This paper investigated the effect of initial magnetic field on the performance of the Anhysteretic deperming protocol for the magnetic stealth of the vessel. Parameter selection is very important because the deperming performance of the Anhysteretic deperming protocol changes according to the parameters. The initial magnetic field plays a role in arranging the vessel magnetization in a specific direction. In this paper, we have experimented with changing the initial magnetic field size by using the end magnetic field search method for the reduced vessel in the laboratory environment. Experimental results show that as the initial magnetic field decreases in the same number of shots, the magnitude of the end magnetic field, which is superior in deperming performance, increases.

Keywords : deperming protocol, magnetic silence, underwater magnetic field, initial magnetic field

초기 자기장이 Anhysteretic 탈자 프로토콜 성능에 미치는 영향

김상현 · 김종왕 · 이향범*
숭실대학교 전기공학과, 서울시 동작구 상도로 369, 06978

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

(2017년 10월 18일 받음, 2017년 12월 13일 최종수정본 받음, 2017년 12월 13일 게재확정)

본 논문은 함정의 자기 스텔스를 위하여 초기 자기장이 Anhysteretic 탈자 프로토콜 성능에 미치는 영향을 연구를 하였다. Anhysteretic 탈자 프로토콜은 파라미터에 따라 탈자 성능이 변하기 때문에 파라미터 선정이 매우 중요하다. 그 중 초기 자기장은 함정의 자화를 특정 방향으로 배열시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 실험실 환경에서 축소 함정을 대상으로 종료 자기장 탐색 방법을 이용하여 초기 자기장 크기를 변경하면서 실험을 진행하였다. 실험 결과 동일한 샷 수에서 초기 자기장이 감소할수록 탈자 성능이 우수한 종료 자기장의 크기는 증가하였다.

주제어 : 탈자 프로토콜, 자기정숙화, 수중 자기장, 초기 자기장

I. 서 론

최근 해양전은 레이더 중심의 전투에서 스텔스 중심의 전투로 변하고 있는 추세이다. 함정의 스텔스 기술은 열, 자기장, 음향 신호를 최소화 하는 기술이다. 해양에서는 함정을 제외한 금속성분이 존재하지 않기 때문에 수중 자기장 신호 감소 기술이 가장 중요한 기술이다. 수중 자기장 신호 감소 기술은 함정에서 발생하는 자기장 신호를 최소화하여 지구 자기장 내에서 운항중인 함정이 지구 자기장을 교란시키지 않고 자기 감응식 기뢰의 센서에 지구 자기장 성분만이 측정되는 방법이다. 함정에서 발생하는 신호를 최소화시키기 위한 기술로 탈자(Deperming)와 소자(Degaussing)방법을 이용한다 [1, 2].

탈자 방법은 탈자 코일에서 함정에 인가하는 자기장을 점점 감소하는 크기로 왕복함에 따라 내부에 잔류 자화 성분을

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-2-820-0641,
Fax: +82-2-817-7961, e-mail: hyang@ssu.ac.kr

최소화 하는 방법이다. 소자 방법은 함정 내부에 3축 방향의 코일을 설치하여 유도 자기장의 반대되는 방향으로 전류를 인가하여 자기장을 상쇄시키는 방법이다. 그러나 소자 방법과 달리 탈자 방법은 B-H Curve의 비선형 영역까지 자기장을 인가해야 하며, 비선형 특성을 고려한 탈자 프로토콜을 적용해야 하는 어려움이 있다[3, 4].

이러한 기술의 개발을 위해 선진국에서는 1990년대부터 다양한 연구를 통해 기술력을 확보하고 있지만 국내 기술력은 선진국에 비하여 미흡하다.

본 논문에서는 함정의 자기장 신호를 최소화하기 위한 방법 중 하나인 탈자 방법의 효율성을 높이기 위해 축소 함정을 대상으로 초기 자기장이 Anhysteretic 탈자 프로토콜 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

II. 관련 이론

1. 함정의 잔류 자화

함정의 잔류 자화 성분은 강자성체에 존재하는 자구벽의 가역(Reversible)과 비가역(Non-reversible) 이동에 의하여 발생한다. Fig. 1[5]은 자구벽의 가역과 비가역적인 이동에 대한 그래프를 나타내었다. 외부에 자기장이 없을 경우 에너지가 최소인 1번 위치에 자구벽이 존재한다. 약한 자기장이 인가될 경우 자구벽은 1번 위치에서 2번 위치 이전까지 이동하게 된다. 자기장이 제거되면 자구벽은 1번 위치로 돌아오게 되며, 이를 자구벽의 가역적 이동이라 한다. 만약 자기장이 자벽을 2번 위치까지 이동시킬 정도로 충분하다면 자벽은 3번 위치까지 비가역적 이동을 하게 된다. 또한 자기장을 0으로 줄이면 자구벽은 1번 위치로 되돌아가지 않고 4번 위치로 되돌아가게 되며, 4번 위치의 에너지 크기를 갖는 잔류 자화 성분이 발생하게 된다. 이때 위치 1로 되돌아가기 위해서는 6번 위치까지 비가역적 이동을 할 수 있게 반대 방향의 자기장을 인가해주면 된다[5]. 함정의 잔류 자화 크기는 탈자 프로토콜 인가 시 양의 전류를 인가했을 때 남아있는 잔류 자화 성분과 음의 전류를 인가했을 때 남아있는 잔류 자화 성분의 합에 따라서 잔류 자화 크기와 방향이 결정된다.

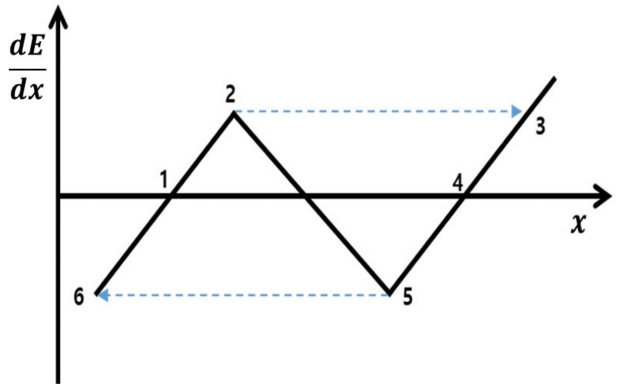

Fig. 1. (Color online) Reversible and non-reversible motion of the domain wall. The domain wall is moved due to a force dE/dx (E, energy). x is position of magnetic domain wall [5].

2. Anhysteretic 탈자 프로토콜

Anhysteretic 탈자 프로토콜은 함정의 잔류 자화 성분을 감소시키는 방법으로 Fig. 2와 같이 일정하게 감소하는 크기의 H Field를 교번하여 인가하는 방법이다[6]. Anhysteretic 탈자 프로토콜은 초기 자기장(Initial H Field), 종료 자기장(End H Field), 휴지기(Dead Time), 샷 인가 시간(Shot Applied Time), 샷 수(Shot Number)의 파라미터가 탈자 성능의 영향을 미친다. 또한 초기 자기장 크기와 샷 수 그리고 종료 자기장 크기가 정해지면 그에 따라 감소 자기장(Reduction H) 크기가 정해진다.

초기 자기장은 자성체인 함정을 특정 방향으로 자화시키는 역할을 한다. 또한 초기 자기장 크기에 따라 자화 크기도 달라진다. 예를 들면 Fig. 3와 같이 탈자 프로토콜인가 전의 자구구조를 나타내며, 이후 초기 자기장 인가 시 Fig. 4와 같이 자벽을 이동시켜 초기 자기장 방향으로 배열하게 된다[6]. 일반적으로 재질의 포화 자계 강도 값을 사용한다. 초기 자기

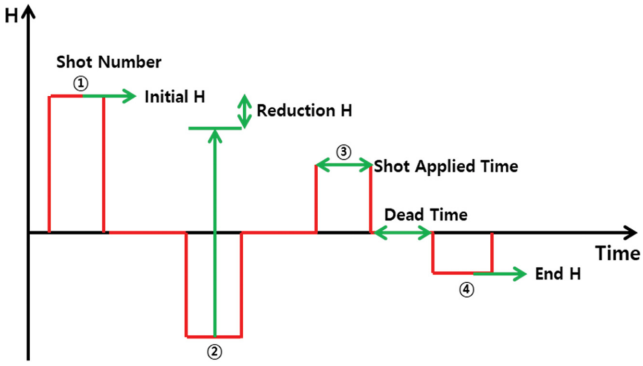

Fig. 2. (Color online) Anhysteretic deperming protocol.

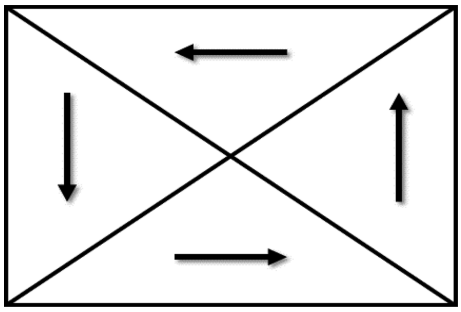

Fig. 3. Domain structure of Initial magnetization states.

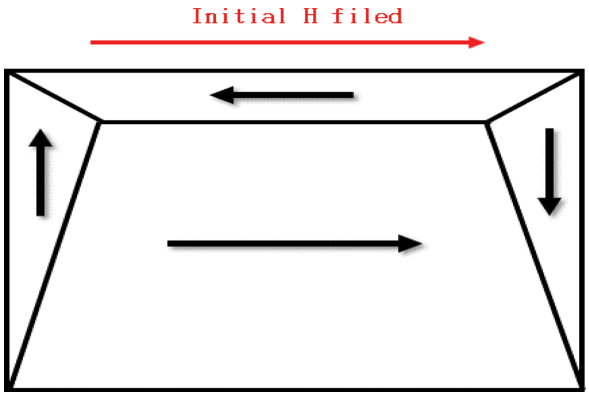

Fig. 4. (Color online) Domain structure after initial magnetic field application.

장의 크기는 클수록 좋으나, 그에 따라 탈자 코일에 인가되는 전류의 크기도 커지게 되므로 적절한 초기 자기장 크기를 선정해야 된다.

종료 자기장의 크기는 종료 자기장 직전까지 남아있는 자화 성분을 상쇄시키는 역할을 한다. 따라서 탈자 프로토콜 선정 시 종료 자기장의 크기를 조절하면 우수한 탈자 프로토콜을 찾을 수 있다. 샷 수는 자구를 분할하는 크기를 결정하는 파라미터이다. 자구벽의 비가역 이동 구간을 결정하는 역할을 하며, 샷 수가 많을수록 자구 영역이 세밀하게 분해된다. 샷 인가 시간은 강자성체의 자기 점성 효과를 고려해서 충분한 시간을 인해 해주어야 한다. 자기 점성 효과는 자기장을 인가하였을 경우 강자성체의 자속밀도 값이 최고값에 도달할 때까지 시간이 지연되는 효과를 나타내며, 강자성체의 반자장과 부피에 영향을 받는다. 본 논문에서 사용된 축소 함정의 경우 반자장과 부피가 작아 수 ms 정도의 시간이면 충분하다. 그러나 실제 함정에서는 수 ks로 발생하기 때문에 측정 결과를 바탕으로 샷 인가 시간을 설정해야한다. 휴지기는 탈자 코일의 온도 상승을 고려하여 코일의 온도가 충분히 냉각될 수 있는 시간을 적용해야 한다. 실제 함정에서는 탈자 프로토콜의 전류가 수 kA 이상이 적용되기 때문에 코일의 온도 상승을 고려해야 된다.

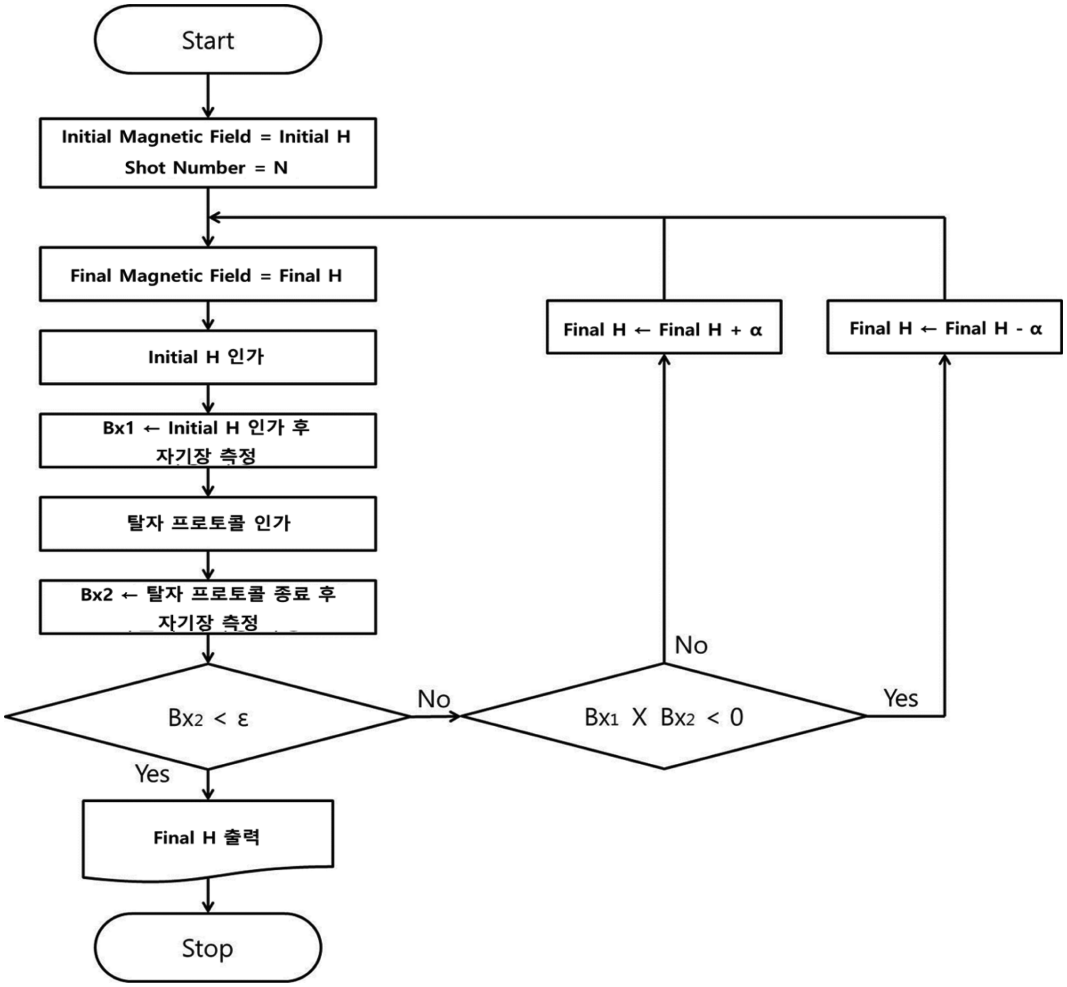

Fig. 5. Chart of Anhysteretic deperming protocol search [7].

3. 종료 자기장을 통한 Anhysteretic 탈자 프로토콜 탐색 방법

우수한 Anhysteretic 탈자 프로토콜을 탐색하기 위해서는 탈자 후 자화 방향이 바뀌는 종료 자기장의 크기를 탐색하면 된다. 앞서 설명한대로 종료 자기장의 크기는 종료 자기장 직전까지 남아있는 자화 성분을 상쇄시키는 역할을 한다. 따라서 종료 자기장의 크기를 조절함에 따라 함정의 잔류 자화 성분의 크기를 조절할 수 있다. 탈자 후 자화 방향이 초기 자기장 방향과 같을 경우 종료 자기장의 크기가 자화 방향을 반전시키지 못하기 때문에 종료 자기장의 크기를 증가시켜야 한다. 반대로 탈자 후 자화 방향이 초기 자기장 방향과 반대일 경우 종료 자기장의 크기를 감소시키면 된다.

Fig. 5는 종료 자기장을 통한 Anhysteretic 탈자 프로토콜을 탐색 방법을 나타내는 순서도이다. 초기 자기장 인가 후 측정된 축소 함정의 자기장은 Bx 성분을 통해 탐색이 가능하다. 이때 Bx 성분의 최댓값을 Bx1이라고 한다. 탈자 프로토콜 인가 후 측정된 축소 함정의 자기장 Bx 성분의 최댓값을 Bx2 탈자 기준 조건인 ε 이하일 경우 탈자 프로토콜 탐색을 정지한다. 탈자 기준을 만족하지 못하였을 경우 Bx1 × Bx2의 부호에 따라 종료 자기장의 크기를 α 만큼 증가시키거나 감소시키면 우수한 Anhysteretic 탈자 프로토콜을 탐색할 수 있다. 함정의 비선형 재질 특성으로 인하여 α 값의 크기는 경험적인 요소가 반영된다[7].

III. 탈자 시스템

1. 축소 함정

실제 함정으로 실험할 수 없는 부분들을 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 축소 함정을 제작하였다. 기본적인 크기는 실제 모델을 약 1/100로 축소시킨 크기이며, 향후 소자 코일의 위치를 감안해서 높이와 폭을 1.5배로 증가시켰다. 축소 함정의 길이는 1,514 mm, 폭 303 mm, 높이 201 mm, 두께 0.6 mm이며, 재질은 냉연 강판인 SPCC-SD을 사용하였다.

Fig. 6. (Color online) The manufactured scale ship.

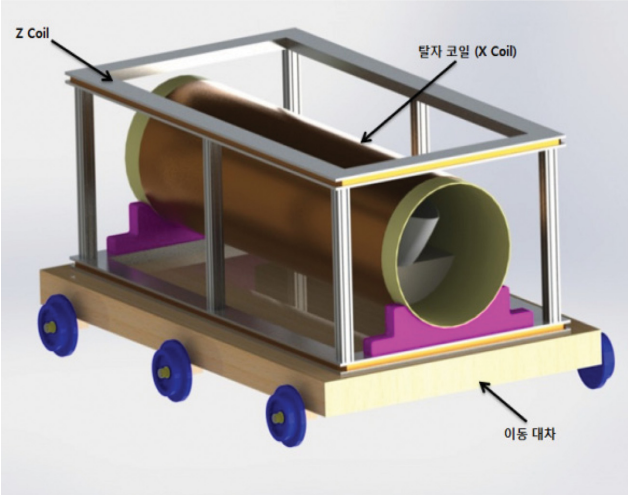

Fig. 7. (Color online) The manufactured deperming coil of scale ship.

Table I. Specification of scaled model X coil.

	Length	Full diameter	Turn number	Allowable current
X coil	1700 [mm]	500 [mm]	850 [Turn]	40 [A]

2. 축소 함정 탈자 코일

축소 함정에 탈자 프로토콜을 적용하기 위해서는 수평 방향의 탈자 프로토콜을 인가하기 위한 X Coil이 필요하다. X Coil은 좁은 면적에 강한 자기장이 필요하기 때문에 원통 솔레노이드 코일로 제작하였다. 향후 수직 방향의 자기장을 인가하기 위한 Z coil이 설치되어 있다. Fig. 7은 제작된 축소 함정 탈자 코일을 나타내고 있다.

축소 함정의 길이만큼 자기장 균일성을 갖는 원통 솔레노이드 코일을 만들려면 3000 mm 이상의 X Coil을 제작해야 한다. X Coil 길이를 감소시키고 코일 끝 부분에서의 자기장 균일도를 증가시키기 위해 2층 솔레노이드 형태의 코일로 설계하였다. Table I은 탈자 코일인 X Coil의 제원을 나타내었다.

3. 지구 자기장 보상 코일

초기 자기장 크기에 따른 Anhysteretic 탈자 프로토콜에 영향을 확인하기 위해서는 외부 요인인 지구 자기장에 대한 영향을 제거해야 된다. 남아 있는 잔류 자화 성분만을 측정하기 위해 자기장 보상 코일이 필요하다. Fig. 8는 지구 자기장 보상 코일의 형상을 나타내고 있다. 남북 방향 보상 코일은 자기장의 균일성을 위하여 4개의 코일을 이용하여 제작되었

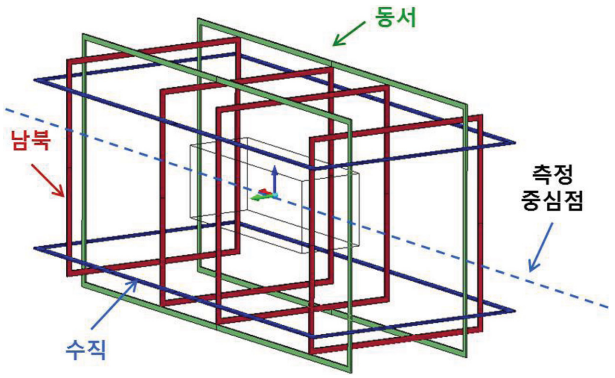

Fig. 8. (Color online) Compensation coil of earth magnetic field.

으며, 동서 방향과 수직 방향에 대한 코일은 사각 헬름홀츠 코일로 제작되었다. 따라서 남북, 동서, 수직 코일을 이용하여 모든 방향에서 지구 자기장 보상 전류를 인가하면 지구 자기장과 내부 자기장이 상쇄된다.

4. 자기장 측정 시스템

자기장 측정방법은 Fig. 9와 같이 고정되어 있는 1개의 자기센서를 이용하여 이동대차를 기동하면서 측정하는 방식이다. 자기 센서는 Bartington Instruments사의 Mag-03 Three-Axis Flux Gate Sensor를 사용하였다. 동작은 지구 자기장 보상 코일 안에서 남북방향으로 기동한다. 이동 대차의 이동거리는 –3.5 m에서 +3.5 m이며, 1개의 자기센서는 중앙으로부터 –1.9 m에 위치하고, 함정으로부터 수직으로 0.67 m 떨어져 있다.

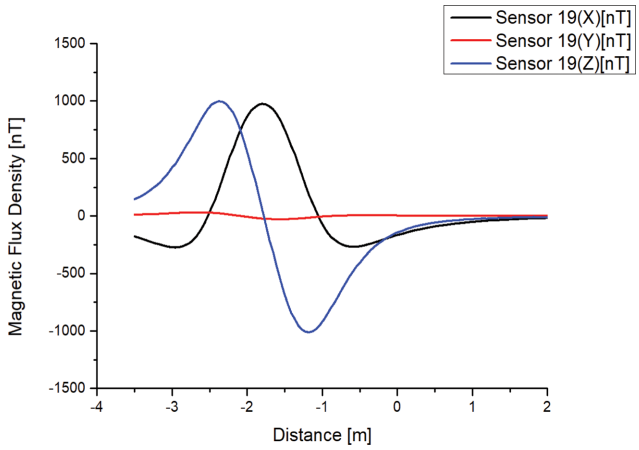

Fig. 10. (Color online) Initial magnetization.

IV. 실험 결과

1. Anhysteretic 탈자 프로토콜 실험 조건

실험실 환경에서 축소 함정을 대상으로 종료 자기장 탐색 방법을 이용하여 초기 자기장 크기를 변경하면서 실험을 진행하였다. Anhysteretic 탈자 프로토콜을 인가 하기 전에 실험의 재연성을 위하여 축소 함정의 초기 자화 성분이 항상 같게 만들기 위해 매번 +100.10 A/m의 자기장을 100초간 인가하여 Fig. 10과 같이 착자시켰다. Bx의 최댓값은 975.887 nT이며, Bz의 최대값은 998.670 nT이다. 착자는 실험 단계에서 동일한 자화 상태에서 실험하기 위해 사용하지만, 실제 함정에서는 사용하지 않는다.

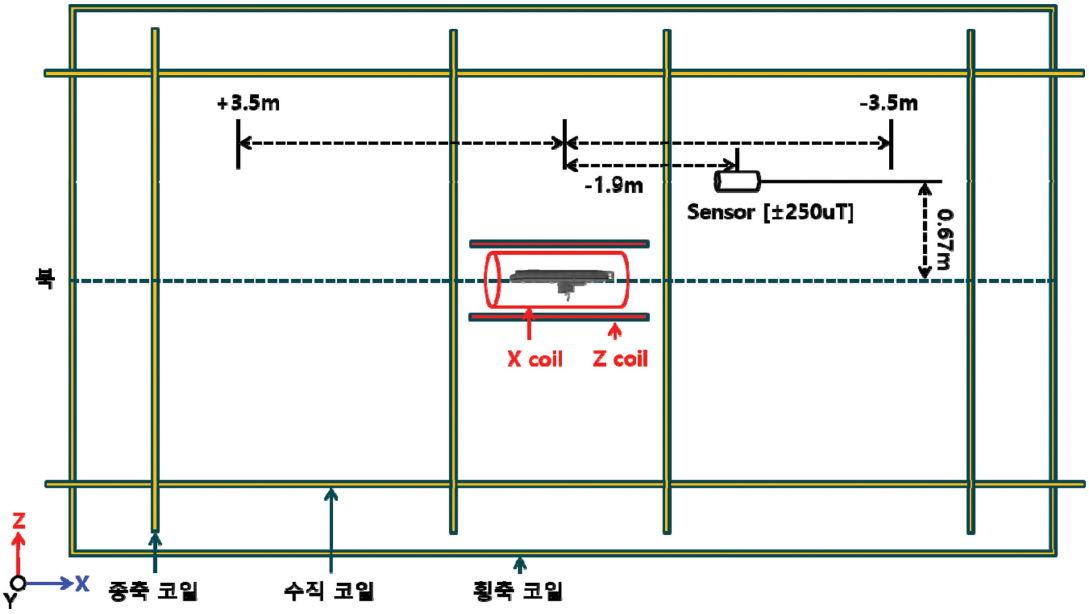

Fig. 9. (Color online) Magnetic field measurement system of scaled ship.

2. 종료 자기장을 통한 탈자 프로토콜 탐색

종료 자기장 탐색 방법을 통해 초기 자기장 크기를 200.20 A/m, 샷 수를 34 Shot으로 고정하고 종료 자기장 크기를 변화하여 우수한 탈자 프로토콜을 탐색하였다. Bx의 자화 방향의 변화를 통해 탈자 프로토콜 인가 후 자화의 합이 최소가 되는 종료 자기장의 크기를 찾는 것이다. Table II에 종료 자기장 크기에 따른 Anhysteretic 탈자 프로토콜 인가 후 자기장 신호를 측정한 데이터를 나타내고 있다. Fig. 11부터 Fig. 14는 각각 종료 자기장이 –4.48, –13.44, –35.83, –44.79 A/m에서 측정된 축소 함정의 자기장 신호이다. 종료 자기장의 크기를 감소시키면서 축소 함정의 자기장을 측정한 결과 종료 자기장이 –44.79 A/m에서 자화 방향이 반전되었다.

Table II. Anhysteretic deperming protocol on changing final magnetic field.

No.	Shot nunber	Initial H [A/m]	Final H [A/m]	Bx [nT]
1	34	200.20	–4.48	194.1458
2	34	200.20	–13.44	175.3494
3	34	200.20	–35.83	39.6475
4	34	200.20	–44.79	–83.2138

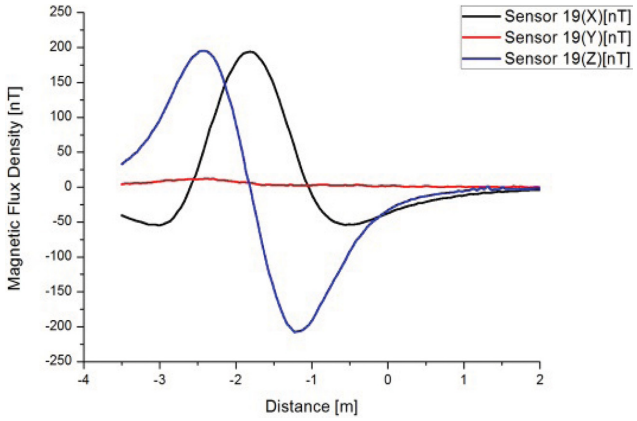

Fig. 11. (Color online) Magnetic field measurement data (Final H = –4.48 A/m).

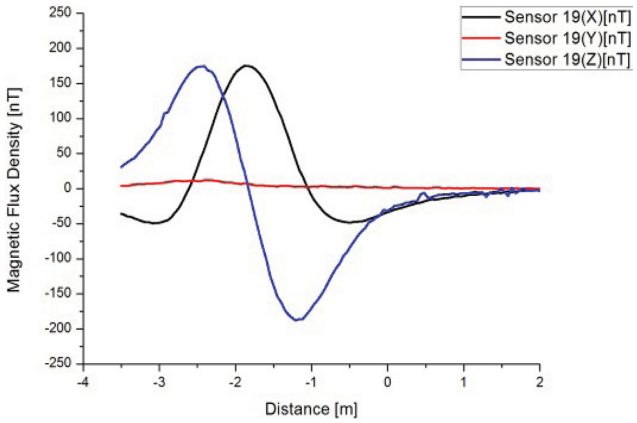

Fig. 12. (Color online) Magnetic field measurement data (Final H = –13.44 A/m).

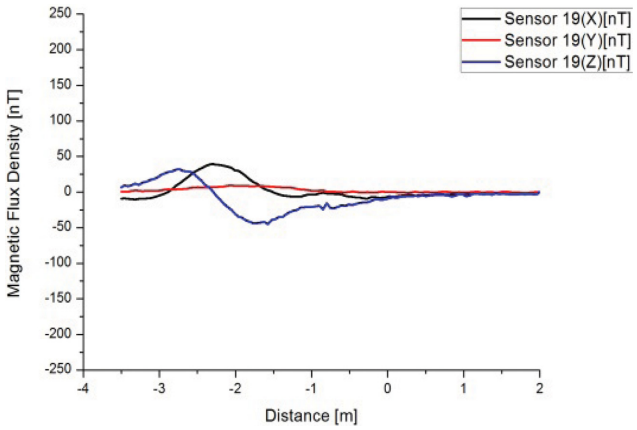

Fig. 13. (Color online) Magnetic field measurement data (Final H = –35.83 A/m).

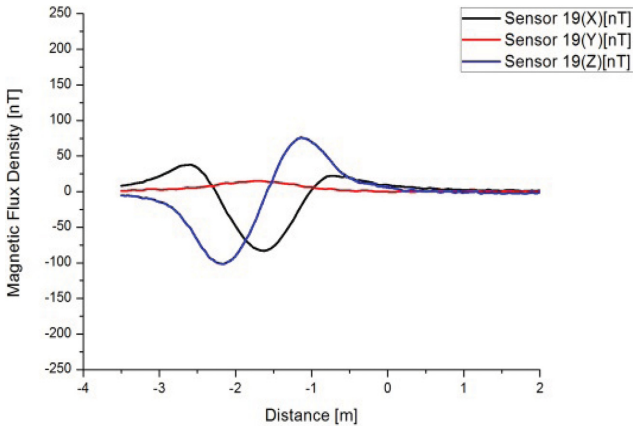

Fig. 14. (Color online) Magnetic field measurement data (Final H = –44.79 A/m).

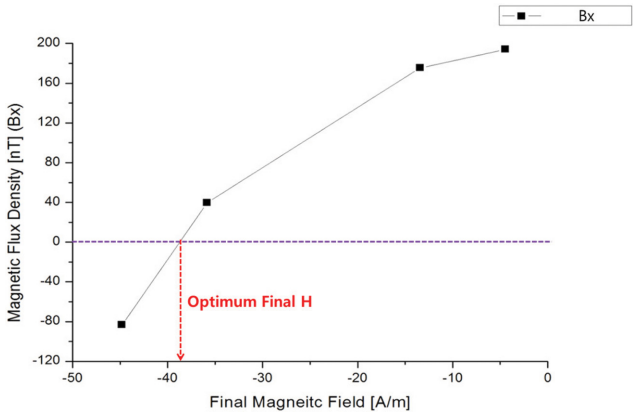

Fig. 15. (Color online) Magnetic field on changing final magnetic field.

Table III. Anhysteretic deperming protocol on changing initial magnetic field.

No.	Shot nunber	Initial H [A/m]	Final H [A/m]	Bx [nT]
1	34	200.20	−35.83	39.6475
			−44.79	−83.214
2	34	180.19	−35.83	53.176
			−44.79	−68.33
			−53.74	−169.91
3	34	160.17	−35.83	63.5986
			−44.79	−46.732
			−53.74	−145.42
4	34	120.13	−35.83	71.0611
			−44.79	−34.249
			−53.74	−130.1
5	34	100.10	−35.83	86.1321
			−44.79	33.2748
			−53.74	−118.11
6	34	80.08	−35.83	121.923
			−40.28	94.5119
			−44.79	59.638
			−49.27	36.5624
			−53.74	−54.823
7	34	60.06	−35.83	252.581
			−40.28	234.008
			−44.79	201.281
			−49.27	164.176
			−53.74	121.819
			−58.14	78.8572
8	34	44.79	−35.83	436.101
			−42.55	402.728

Fig. 15는 종료 자기장 변화에 따른 축소 함정의 자기장 신호인 Bx 성분 나타내고 있다. 따라서 탈자 성능이 우수한 종료 자기장의 크기는 자화 방향이 반전되는 구간에 존재하는 것을 알 수 있다.

3. 초기 자기장이 탈자 성능에 미치는 영향 분석

초기 자기장이 탈자 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 샷 수를 34 Shot으로 고정하고 종료 자기장 크기를 변화하여 탈자 프로토콜이 우수한 종료 자기장을 탐색하였다. Table III에 초기 자기장 크기와 종료 자기장 크기에 따른 Anhysteretic 탈자 프로토콜 인가 후 자기장 신호를 측정한 데이터를 나타내고 있다. 초기 자기장이 200.20 A/m~80.08 A/m에서는 자화 방향이 반전되는 구간을 찾았으나, 초기 자기장이 60.06 A/m와 44.79 A/m의 경우 자화 방향이 반전되는 구간을 찾을 수 없었다. Fig. 16부터 Fig. 17은 초기 자기장이 180.19 A/m일 때 자화 방향이 반전되는 종료 자기장에서 자기장 측정 데이터 이며, Fig. 18부터 Fig. 19는 초기 자기장이 44.79 A/m일 때 자화 방향이 반전되는 구간을 찾지 못한 자기장 측정 데이터를 나타내고 있다. Fig. 20은 초기 자기장과 종료 자기장

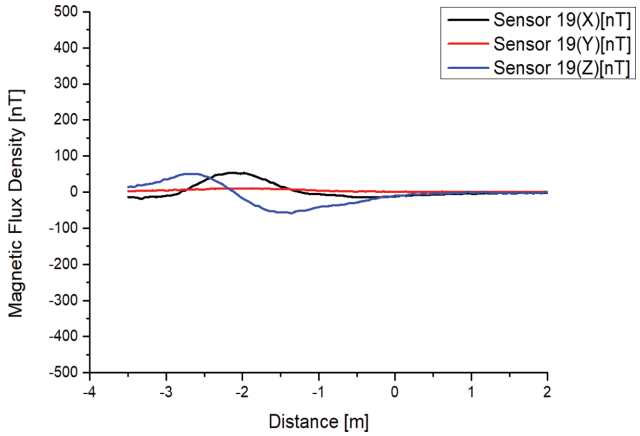

Fig. 16. (Color online) Magnetic field measurement data (Initial H = 200.20 A/m, Final H = −35.83 A/m).

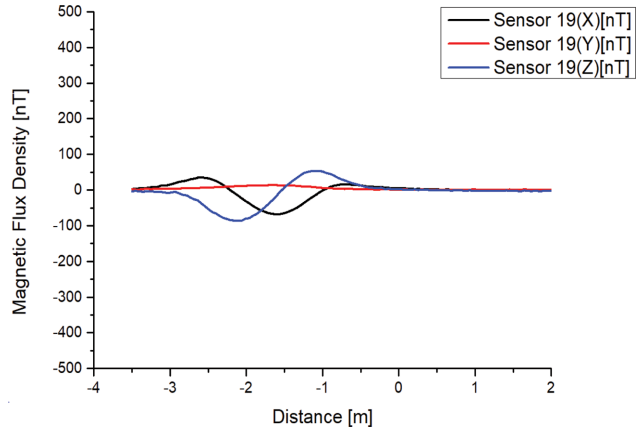

Fig. 17. (Color online) Magnetic field measurement data (Initial H = 200.20 A/m, Final H = −44.79 A/m).

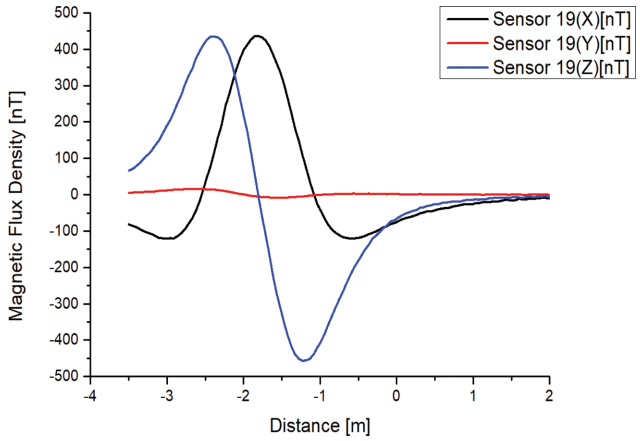

Fig. 18. (Color online) Magnetic field measurement data (Initial H = 44.79 A/m, Final H = −35.83 A/m).

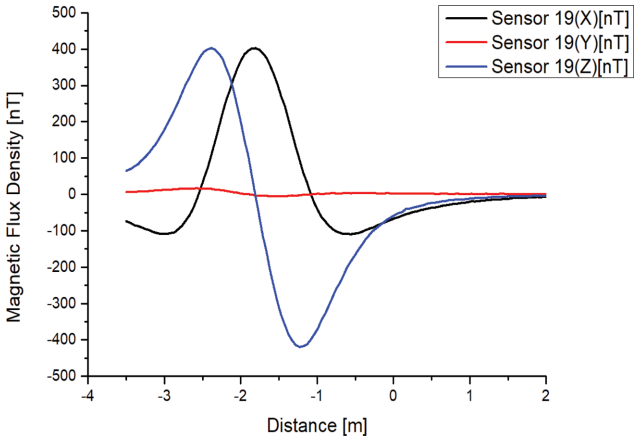

Fig. 19. (Color online) Magnetic field measurement data (Initial H = 44.79 A/m, Final H = –42.55 A/m).

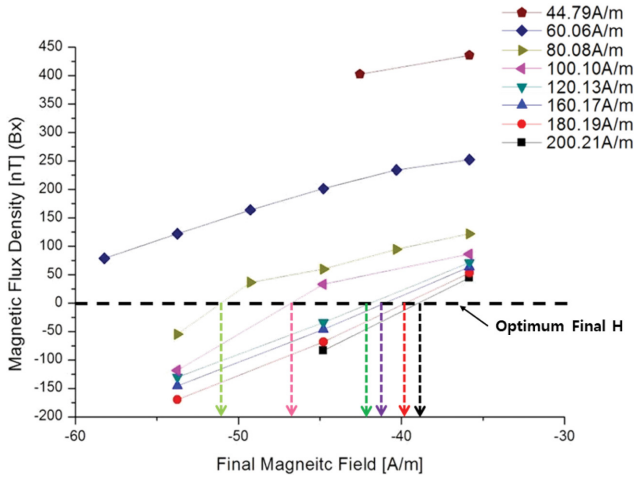

Fig. 20. (Color online) Magnetic field measurement data on changing initial magnetic field and final magnetic field.

변화에 따른 자기장 신호 Bx 성분을 나타내고 있다. 동일한 샷 수에서 초기 자기장이 감소할수록 탈자 성능이 우수한 종료 자기장의 크기는 증가하였다.

초기 자기장 100 A/m 이하인 결과는 Anhysteretic 탈자 프로토콜 인가 전 착자 자기장에 의해 초기 자기장이 100 A/m를 인가시킨 효과를 나타낸다. 60.06 A/m, 44.79 A/m의 탈자 프로토콜을 인가 후 자화의 크기는 착자 자기장의 크기인 100 A/m를 자화의 방향을 반전 시킬만한 크기가 부족하기 때문으로 사료된다. 따라서 초기 자기장이 60.06 A/m, 44.79 A/m인 결과도 착자 자기장을 인가하지 않았더라면 자화방향의 반전 가능성이 있다고 볼 수 있다.

V. 결 론

Anhysteretic 탈자 프로토콜은 함정의 재질과 형상 등을 고려하여 탈자 프로토콜을 적용해야 하지만 국내 기술력 부족으로 인하여 동일한 프로토콜 사용한다. 이에 국내 함정의 자기 스텔스 성능 향상을 위하여 종료 자기장 탐색 방법을 통해 초기 자기장이 Anhysteretic 탈자 프로토콜 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 축소 함정 대상으로 동일한 샷 수에서 초기 자기장의 크기가 감소할수록 탈자 성능이 우수한 종료 자기장의 크기는 증가하였다. 초기 자기장이 60.06 A/m, 44.79 A/m인 결과는 착자 자기장에 영향에 의해 우수한 탈자 프로토콜 탐색이 어려웠다. 그러나 착자를 하지 않는다 하더라도 함정의 내부 설비나 외부 요인으로 인해 100 A/m의 자기장에 노출 될 가능성이 높기 때문에 초기 자기장을 높은 쪽이 유리하다.

이러한 결과는 국내 함정의 재질과 형상에 따른 최적 탈자 성능을 나타내는 탈자 프로토콜을 선정하는데 기여할 것으로 판단된다. 또한 향후 국내 함정의 독자적인 탈자 기술 확보에 대한 연구로써 추후 자기 스텔스 기술 성능 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

This work was supported by the Agency for Defense Development (No. UD150009DD).

References

[1] J. Holmes, Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures, Morgan&Claypool (2008).
[2] S. J. Davidson, T. Bailey, A. Parker, R. Twelvetrees, and M. Turener, Advanced Signature Control System, Ultra Electronics PMES, United Kingdom (2000).
[3] 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).
[4] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey, Science & Technology (2002).
[5] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesly, Reading, MA (1972).
[6] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey, IEEE Trans. Magn. **38**, 1753 (2002).
[7] J. W. Kim, S. H. Kim, H. J. Chung, and H. B. Lee, J. Magn. **22**, 1 (2017).