

## Two-Stage Demagnetization Method for the Reduction of Magnetic Signature from a Naval Ship

Hyun-Ju Chung\*, Gi-Woong Bae, and Chang-Seob Yang

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

(Received 9 April 2018, Received in final form 22 June 2018, Accepted 25 June 2018)

There is the Flash-D demagnetization method as conventional demagnetization method for a naval ship without a degaussing system. It is the method for reducing magnetic fields from the ship as obtained the reverse permanent vertical magnetization (PVM) that counteracts the induced vertical magnetization (IVM) in the target ship due to the earth's magnetic field. However, it is a little difficult to use in a real ship because it involves three-stage protocol and the procedure is also very complex. Therefore, in this paper, we propose the Flash-KD demagnetization method configured with two-stage demagnetization protocol for enhancing the difficulty in a practice of the conventional Flash-D demagnetization method. In the first stage of Flash-KD method, we obtain a very strong PVM. In the second stage, we gain the wanted PVM for compensating the IVM with minimization of a permanent longitudinal magnetization as adjusting the value of a horizontal start field and the total applied field number of the second stage. The proposed method has been applied to a scaled model ship to verify the performance. As a result of that, we could determine successfully the protocol which can remove VM.

**Keywords :** The reduction of magnetic signature, Flash-D, Two-stage demagnetization protocol, PVM (Permanent Vertical Magnetization), IVM (Induced Vertical Magnetization)

### 함정 자기신호 저감을 위한 2단계 탈자 기법

정현주\* · 배기웅 · 양창섭

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

(2018년 4월 9일 받음, 2018년 6월 22일 최종수정본 받음, 2018년 6월 25일 게재확정)

일반적으로 군사 선진국에서는 소자장비가 미 탑재된 함정의 자기신호를 저감하기 위한 방법으로 Flash-D 탈자 기법이 적용되고 있다. Flash-D 탈자 기법은 지자기 노출 환경 하에서 함정에 발생하는 수직 유도자화(IVM)를 상쇄시킬 수 있는 수직 영구자화(PVM) 성분을 함정 선체에 만들어 줌으로써 함정 발생 자기장을 감소시키는 탈자 기법이다. 그러나 Flash-D 탈자는 3단계 프로토콜로 구성된 탈자 기법으로 절차가 다소 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Flash-D 탈자 기법을 보완할 수 있는 방법으로 2단계 탈자 프로토콜로 구성된 Flash-KD 탈자 기법을 제안하였다. Flash-KD 탈자 기법의 첫 번째 단계에서는 Flash-D 탈자의 첫 번째 단계와 같이 매우 강한 PVM을 함정 선체에 생성시킨다. 그리고 두 번째 단계에서는 함정에 인가되는 수평방향 시 작 자기장의 크기와 자기장 인가 횟수를 조정함으로써, 이미 함정 선체에 생성된 강한 PVM의 크기를 -IVM이 되도록 감소시킨다. 이와 같이 제안된 Flash-KD 기법은 잠수함 형태의 축소함을 대상으로 적용되었고, 그 결과 PVM이 -IVM이 되어 수직성 분 자기장이 상쇄되는 프로토콜을 성공적으로 확인할 수 있었다.

**주제어 :** 자기신호 저감, Flash-D, 2단계 탈자 프로토콜, 수직방향 유도자화, 수직방향 영구자화

### I. 서 론

지구자기장 환경 하에서 강자성 재료의 합정 선체로부터 발생하는 자기장은 수중 기뢰 및 항만감시체계 등과 같이 근거리에서 적을 탐지하는 수중무기체계의 대표적인 탐지 신호원이 된다. 따라서 대부분의 합정은 생존성 증대를 위하여 탈자(Deperming) 및 소자(Degaussing) 등과 같은 자기처리 과정을 통해 합 발생 자기장을 감소시키고 있다 [1-3].

탈자는 합정 선체에 분포하는 영구자화(이하 PM, Permanent Magnetization)에 의한 자기장을 감소시키기 위한 방법으로, 합정 외부에서 선체를 자기적으로 포화시킬 수 있을 정도의 강한 시작 자기장을 수평방향으로 인가한 뒤 정해진 프로토콜에 따라서 극성 변화와 함께 그 크기를 일정 비율로 서서히 줄여가면서 선체에 잔류하는 영구자화를 최소화하는 방법이다[4-6]. 소자는 탈자 후 합정 선체에 잔류하는 영구자화와 지구자기장에 기인한 합정 선체의 유도자화(이하 IM, Induced Magnetization)에 의한 자기장을 감소시키기 위한 방법으로 합정 내부에 3축 방향으로 설치된 소자코일을 이용하여 합정 선체로부터 발생하는 자기장과 반대 방향의 자기장을 생성함으로써, 전체 합정 발생 자기장을 감소시키는 방법이다[2,3].

이와 같이 유도자기장을 감소시키기 위해서는 합정에 소자장비를 탑재하는 것이 필요하지만, 일반 재래식 중/소형 잠수함 등은 소자장비 운용에 따른 전력소모 증대 및 소자코일 설치에 필요한 합 내부의 공간 제한 등으로 소자장비가 미 탑재되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 합정의 경우, Anhyseretic Deperm 탈자를 통해 영구자기장은 감소시킬 수 있지만, 유도자기장은 보상이 불가능하므로 합정 자기장 감소에는 한계가 있다.

위와 같은 문제점을 제한적으로 극복하기 위한 탈자기법으로 군사 선진국들에서는 Flash-D 탈자 기법이 사용되고 있다[7]. 이는 합정 선체의 수직 유도자화(이하 IVM, Induced Vertical Magnetization)와 그 크기는 유사하고 방향이 반대인 수직 영구자화(이하 PVM, Permanent Vertical Magnetization)를 합정 선체에 인위적으로 만들어줌으로써, 합정 전체의 수직 자화 성분을 상쇄시키는 탈자 기법이다. 그러나 Flash-D 기법은 3단계 프로토콜로 구성되어 있고 탈자 중 합정의 PVM 성분에 의한 자기장 변화를 정확히 측정해야 하는 등 그 절차가 다소 복잡하다.

따라서 본 논문에서는 위와 같이 Flash-D 탈자 기법을 보완하기 위한 방법으로 2단계로 탈자 프로토콜로 구성된 Flash-KD 탈자 기법을 제안하고, 잠수함 형태의 축소함을 대상으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

### II. 2단계 탈자 프로토콜로 구성된 Flash-KD 탈자 기법

일반적으로 알려진 합정 탈자 기법으로는 Anhyseretic Deperm, Flash-D 등이 있다. 소자장비가 탑재된 합정의 경우는 주로 Anhyseretic Deperm 탈자가 사용되고 있으며, 소자장비가 미 탑재된 합정은 Flash-D 탈자를 고려할 수 있다[4-7].

먼저 Anhyseretic Deperm 탈자를 간략히 살펴보면 Anhyseretic Deperm은 X-coil과 Z-coil을 이용하여 합정에 적절한 자기장(H field)을 인가함으로써, 합정의 영구자기장을 저감시키는 방법이다. Fig. 1은 합정 탈자가 수행되는 자기처리시설에서 X-coil이라 불리는 수평자장 발생코일과 Z-coil이라 불리는 수직자장 발생코일의 구성을 보여준다. Fig. 2는 Anhyseretic Deperm 탈자 과정에서 합정에 인가되는 수평 자기장의 프로토콜 예를 보여준다. Anhyseretic Deperm 탈자 프로토콜을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

① 합정 선수를 Fig. 1과 같이 북쪽 방향을 가리키도록 위치시킨다.

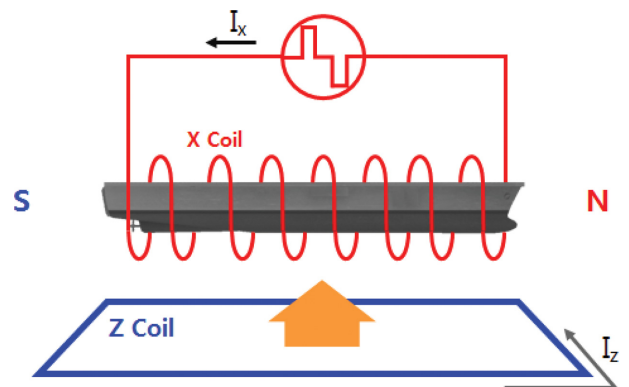


Fig. 1. (Color online) X-coil and Z-coil at a ship magnetic treatment facility. X-coil generates magnetic field at the horizontal direction and Z-coil generates magnetic field at the vertical direction.

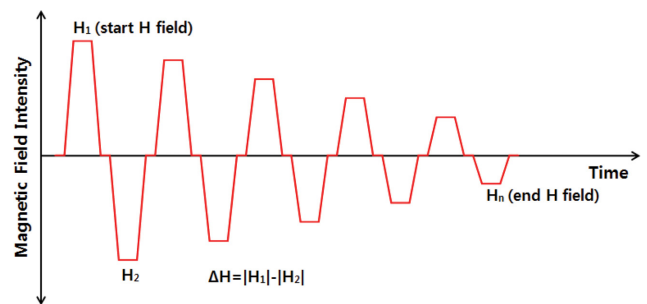


Fig. 2. (Color online) Magnetic fields applied to X coil according to time variation at the Anhyseretic Deperm protocol. The applied magnetic field is decreased at a constant rate with the change in polarity.

② X-coil과 Z-coil 코일에 바이어스(bias) 전류를 인가하여 지구자기장을 보상한다.

③ 지구자기장이 보상된 상태에서 Fig. 2와 같이 X-coil에 강한 전류를 인가하여 함정 선체를 충분히 포화시킬 수 있을 정도의 강한 시작 자기장( $H_1$ )을 발생시킨다. 따라서 시작 자기장( $H_1$ )의 크기는 클수록 좋으나 탈자 코일의 성능 한계를 고려하여 선체 재질 보자력( $H_c$ )의 4배 이상에 대응하는 크기를 가지도록 한다.

④ Fig. 2와 같이 전류의 극성 변화를 주면서 함정에 인가되는 X-coil 자기장을 일정 비율( $\Delta H$ )로 종료 자기장( $H_n$ )까지 감소시킨다. 극성 변화가 발생하는 구간에서는 일정 시간동안 휴지기를 가진다.

일반적으로 함정 건조 후 영구자기장은 유도자기장의 1배에서 3배 정도의 크기를 가지지만, Anhyseretic Deperm 탈자를 통해서 영구자기장의 크기는 유도자기장의 30% 이내 수준으로 감소된다. 따라서 소자장비가 탑재된 함정의 경우는 위와 같이 Anhyseretic Deperm 탈자를 통해서 영구자기장을 최소화시킨 후 잔류하는 영구자기장과 유도자기장은 함내에 설치된 소자코일을 이용하여 상쇄시킨다. 하지만 소자장비가 미 탑재된 함정은 유도자기장을 상쇄시킬 수가 없다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 군사 선진국에서는 Flash-D 탈자 기법을 소자장비 미 탑재 함정에 적용하고 있다. Flash-D 탈자 기법의 기본 개념은 Fig. 3과 같이 탈자 과정에서 수직 유도자화와 그 크기는 유사하고, 방향이 반대

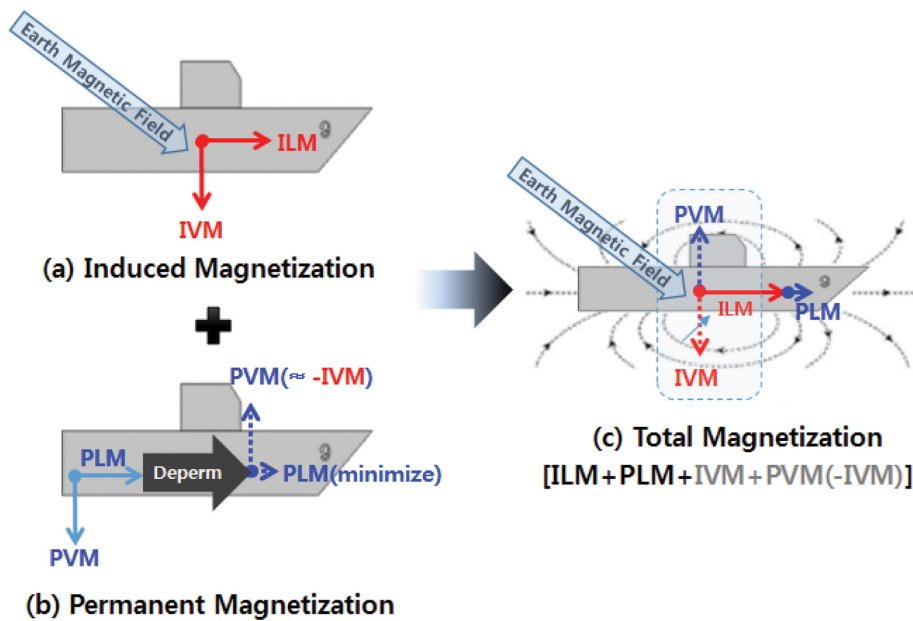
인 영구자화를 인위적으로 함정 선체에 만들어줌으로써, 함 발생 자기장을 저감시키는 방법이다. Fig. 3의 (a)에서 지구자기장 노출 환경에서는 함정 선체에 수평 유도자화(이하 ILM, Induced Longitudinal Magnetization)와 수직 유도자화(이하 IVM, Induced Vertical Magnetization)가 생성된다. 그리고 Fig. 3의 (b)와 같이 선체에 존재하는 영구자화는 탈자를 통해서 수평 영구자화(이하 PLM, Permanent Longitudinal Magnetization) 성분은 최소화되고, -IVM에 대응하는 수직 영구자화(이하 PVM, Permanent Vertical Magnetization)를 생성시키면, Fig. 3의 (c)와 같이 전체 수직방향 자화(이하 VM, Vertical Magnetization)는 상쇄되고, ILM과 탈자 후 잔류하는 미량의 PLM 성분만 남게 된다.

Fig. 4는 일반적인 Flash-D 탈자 프로토콜을 보여준다. Flash-D 탈자는 3단계 프로토콜로 구성된 탈자 기법으로 그 절차를 간략히 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째 단계는 Z-coil에 인가되는 자기장 크기를 제외하고는 Anhyseretic Deperm 탈자와 비슷하다.

① X-coil에 바이어스 전류를 인가하여 함정의 수평방향 지구자기장을 보상한다.

② Z-coil을 이용하여 수직 지구자기장과 극성은 반대이면서 크기는 10배 이상인 강한 자기장을 함정에 인가한다.

③ Anhyseretic Deperm 탈자와 동일하게 X-coil을 이용하여 수평방향으로 함정 선체를 충분히 포화시킬 수 있을 정도의 강한 시작 자기장을 발생시키고, 전류의 극성을 교번시



**Fig. 3.** (Color online) A basic concept for reducing ship's magnetic field by obtaining a PVM that counteracts the IVM in the ship due to the earth's magnetic field. (a) A IVM and a ILM are generated due to the earth's magnetic field. (b) During a demagnetizing process, a PVM that counteracts the IVM is obtained. (c) After the completion of demagnetizing process, the IVM is compensated by PVM, and only ILM and the minimized PLM are remained.

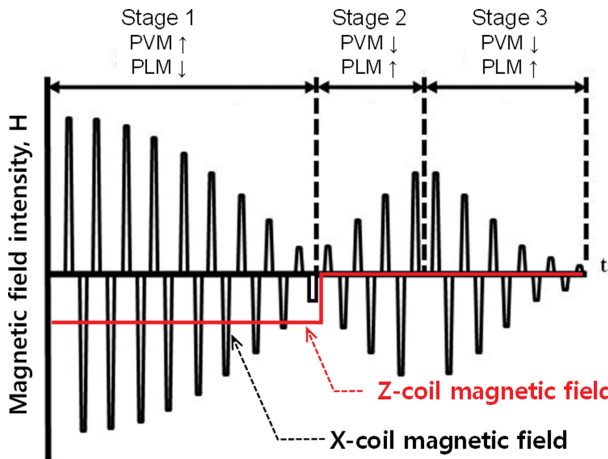


Fig. 4. (Color online) General Flash-D protocol with the protocol of three stages for magnetic field reduction of the naval ship without degaussing equipment.

키면서 종료 자기장까지 일정 크기의 비율로 감소시키면 첫 번째 단계는 종료된다.

첫 번째 단계가 종료되면 IVM과 반대 방향의 매우 강한 PVM 성분이 함정 선체에 생성되면서 PLM은 감소된다. 두 번째 단계에서는 이렇게 강하게 착자된 PVM 성분을  $-IVM$ 에 대응하는 PVM 성분으로 감소시키는 과정을 거치게 된다.

④ 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 함정에 강하게 인가된 수직 자기장을 지구자기장을 보상할 수 있는 수준으로 감소시킨다.

⑤ X-coil의 자기장을 첫 번째 단계와는 반대로 그 크기를 점진적으로 증가시키면서 PVM이  $-(IVM + \Delta PVM)$ 가 되는 지점을 탐색한다. 이 과정에서 PLM은 다시 증가하게 되고,

PVM이  $-(IVM + \Delta PVM)$ 이 되면 두 번째 단계는 종료된다.

⑥ 세 번째 단계에서는 증가된 PLM 성분을 감소시키기 위하여 두 번째 단계 종료 시 X-coil에 인가된 자기장을 다시 서서히 줄여가면서 PLM을 최소화시키고, 궁극적으로 두 번째 단계에서 생성된  $\Delta PVM$ 을 최소화시켜 PVM이  $-IVM$ 이 되도록 한다.

위와 같이 Flash-D 탈자 기법을 이용하면 개념적으로는 IVM을 상쇄시킬 수 있으므로 소자장비가 미 탑재된 함정의 자기장 감소에 효과적이다. 그러나 Flash-D 탈자는 세 번째 단계에서 PVM이  $\Delta PVM$ 만큼 추가로 감소될 것을 고려하여, 두 번째 단계에서 PVM이  $-(IVM + \Delta PVM)$ 이 되는 지점을 탐색해야 하는 등 그 절차가 다소 복잡하다. 더욱이, 함정 자기처리시설과 같이 해저면에 설치된 자기센서는 지구자기장을 포함하여 함정의 영구 및 유도자기장을 동시에 측정하기 때문에 현실적으로 함정 자기처리시설에서 함정의 PVM 성분을 정확히 측정하는 것 또한 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 2단계 탈자 프로토콜로 구성된 Flash-KD 탈자 기법을 제안한다.

Fig. 5는 본 논문에서 제안된 Flash-KD 탈자 프로토콜을 보여준다. Flash-KD 탈자는 Fig. 5와 같이 2단계 프로토콜로 구성된다. 첫 번째 단계는 Flash-D 탈자의 첫 번째 단계와 동일하다. 그러나 Flash-KD 탈자는 3단계 프로토콜로 구성된 Flash-D 탈자와는 달리 두 번째 단계에서 첫 번째 단계에서 강하게 착자된 PVM 성분을  $-IVM$ 에 대응하는 PVM 성분으로 조정하는 과정을 바로 거친다.

① 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 함정에 강하게 인가된 수직성분 자기장을 지구자기장을 보상할 수 있는 수준으로 감소시킨다.

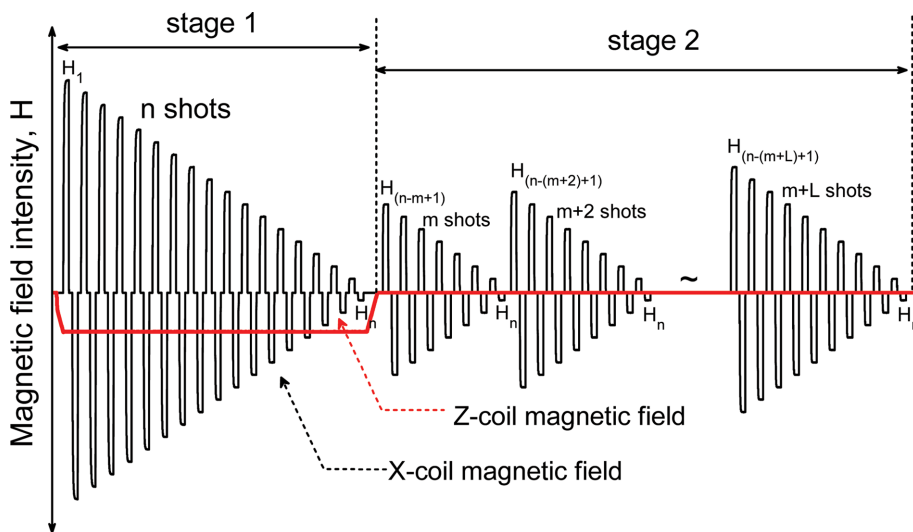


Fig. 5. (Color online) The proposed Flash-KD protocol with the protocol of two stages.

② X-coil 전류는 Fig. 5와 같이 첫 번째 단계에서 X-coil 에 적용된 프로토콜을 기준으로  $H_{n-m+1} \sim H_n$ 과 같이 m회의 자기장을 인가한 후, 해저면에 설치된 자기센서를 이용하여 수직방향 자화(이하 VM, Vertical Magnetization)에 의한 자기장 발생 유무를 확인함으로써, PVM이 -IVM이 되는 지점을 탐색한다.

③ VM에 의한 자기장이 관찰되면  $H_{n-(m+L)+1} \sim H_n$ 과 같이 X-coil로부터 함정에 인가되는 시작 자기장의 크기 및 인가 자기장의 횟수를 2회씩 증가시키면서 VM에 의한 자기장이 관찰되지 않을 때까지 ②의 과정을 반복 수행한다. 여기서 n 은 첫 번째 단계의 총 자기장 인가 횟수이고, (m+L)은 두 번째 단계에서의 인가 자기장 횟수를 의미한다. 그리고 두 번째 단계에서 인가 자기장의 감소 비율( $\Delta H$ )과 종료 자기장의 크기( $H_n$ )는 첫 번째 단계와 동일하다.

앞에서 언급되었듯이 PVM 성분만을 현재 국내 자기처리시설에서 측정하는 것은 매우 어려우므로 본 논문에서는 지구 자기장 노출 상태에서 함으로부터 발생하는 자기장 형태로부터 PVM+IVM  $\leq 0$ 이 되는지를 다음과 같이 추정하였다. 먼저 만일 PVM = -IVM이 되면 함정의 수직자화(PVM, IVM) 성분은 상쇄되고, 수평자화 성분(PLM, ILM)만 남게 된다. Fig. 6은 함정 아래에서 수평자화(이하 LM, Longitudinal Magnetization) 성분들에 의해 측정되는 자기장의 형태를 보여준다. LM 성분들은 함정 기준으로 종축 방향으로 배열되므로 함정 아래에서 자기장을 측정하면 Bx의 절대치가 가장 큰 종축방향 거리에서 Bz의 절대치는 0에 가까운 크기를 가지게 된다. 이렇게 LM 성분들에 의한 자기장을 측정된 결과로부터 Bx의 절대값이 가장 크고, Bz가 0인 종축방향 거리 좌표를 대상 함정의 자기적인 중심으로 정의할 수 있다. Bx는 함정의 자기적 중심에서 가장 큰 절대값을 가지면서 형태는 자기적 중심축을 기준으로 대칭이고, Bz는 함정의 자기적

중심에서 0에 가까운 크기를 가지지만 형태는 자기적 중심축을 기준으로 극성은 반대이고 절대값 최대치는 유사하다.

따라서 Flash-KD 탈자 프로토콜의 두 번째 단계에서 함정 자기장의 형태와 자기적 중심에서의 자기장을 측정하여, Bz의 크기가 0에 근접하게 되는 지점을 확인하면, PVM의 크기가 -IVM이 되어 VM 성분이 상쇄되고 LM 성분에 의한 자기장만 잔류하는 프로토콜을 탐색할 수 있다.

### III. 탈자 시험방법 및 시험결과

#### 1. 축소함 및 축소함용 탈자 시험 장치

본 논문에서는 잠수함 형태의 축소함을 대상으로 Flash-KD 기법을 적용하여 제안된 탈자 기법의 성능을 확인하였다. Flash-KD 탈자 기법의 검증을 위한 잠수함 형태의 축소함은 SS400 재질로 제작되었으며, 길이는 1.70 m, 직경은 0.27 m, 두께는 1.6 mm이다. Fig. 7은 제작된 축소함의 사진을 보여준다.

Table I은 축소함의 탈자를 위하여 자체 제작된 축소함용 탈자 장치의 X-coil과 Z-coil의 세부 사양이고, Fig. 8은 축소함의 탈자 시험을 위하여 제작된 탈자 시험장치를 보여주는 사진이다. X-coil은 Solenoid 형태로 제작하였고, Z-coil은 직사각형 형태로 제작하여 X-coil 위, 아래 0.8 m 간격으로 설치하였다. 축소함으로부터의 자기장은 Fig. 8과 같이 축소함 위 0.29 m의 이격거리에 설치된 3축 자기센서(Bartington Instruments, Mag690, 측정범위  $\pm 100 \mu T$ )를 이용하여 축소함을 북  $\rightarrow$  남 방향으로 이동하면서 측정하였다. 또한, 탈자는

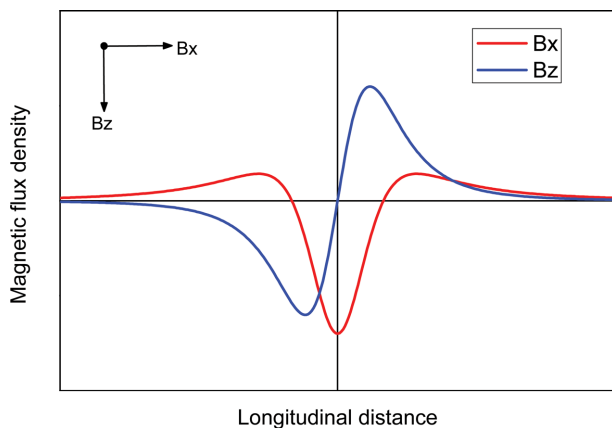


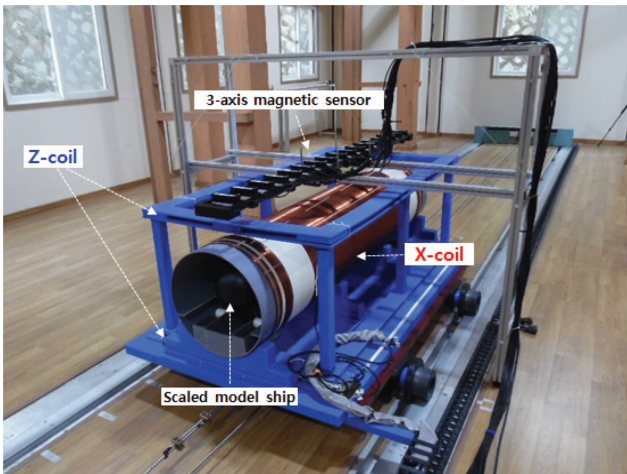
Fig. 6. (Color online) Magnetic Fields by longitudinal magnetization at the longitudinal distance below a ship.



Fig. 7. (Color online) A photograph of a scaled model ship fabricated for verifying the purposed Flash-KD method.

Table I. Coil specification of magnetic treatment equipment fabricated for demagnetization of a scaled model ship.

	Coil size	Coil distance	Coil turns	Coil H field at 1A
X-coil	Length 2.0 m Diameter 0.5 m	-	900	447 A/m
Z-coil	Length 2.2 m Width 1.2 m	0.8 m	60	63.4 A/m

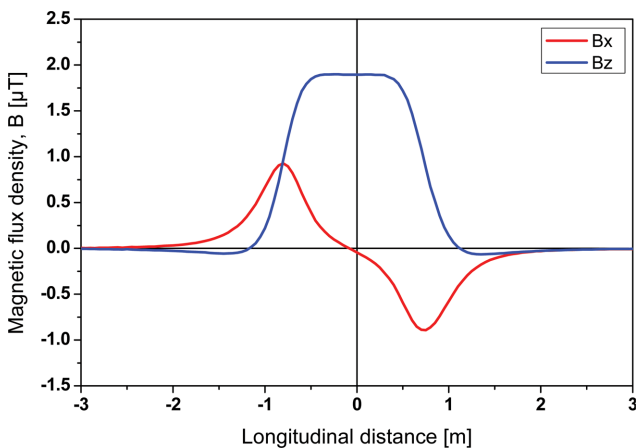


**Fig. 8.** (Color online) A photograph of the magnetic treatment equipment fabricated for demagnetization of a scaled model ship.

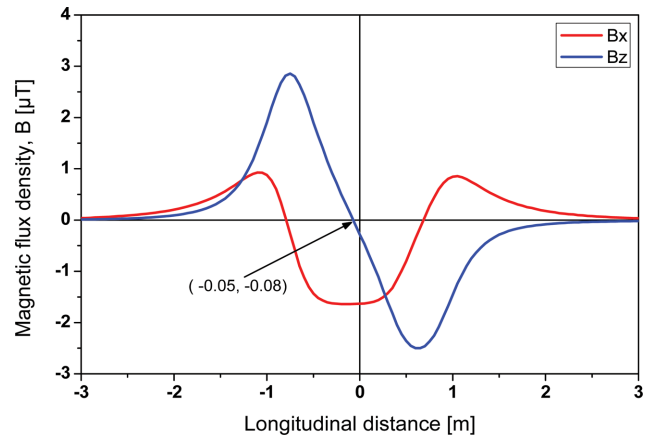
국과연 비자성 실험실 내부에 설치된 지구자기장 모사장치를 이용하여 축소함이 위치하는 공간 내에서의 지구자기장을 제거한 상태에서 수행되었다. 국과연 비자성 실험실은 ± 3 m 공간 내에서 지구 자기장을 대략 97%(잔류 자기장 3%) 수준까지 균일하게 제거할 수 있다[8].

## 2. 시험결과

아래 Fig. 9, Fig. 10은 시험에 사용된 축소함정의 IVM 및 ILM에 의한 자기장 측정 결과를 보여준다. IVM에 의한 자기장은 지자기환경 모사장치를 이용하여 수직 지구자기장 보상 전후 측정된 축소함 자기장의 차로부터 구하였고, ILM에 의한 자기장 역시 지자기환경 모사장치를 이용하여 수평 지구자기장 보상 전후 측정된 축소함 자기장의 차로부터 구하였다. ILM에 의한 자기장 측정 결과를 살펴보면, 종축방향 거리가 -0.05 m 지점에서 수직방향 자기장(Bz)의 크기가



**Fig. 9.** (Color online) Magnetic fields by the induced vertical magnetization of a scaled model ship.

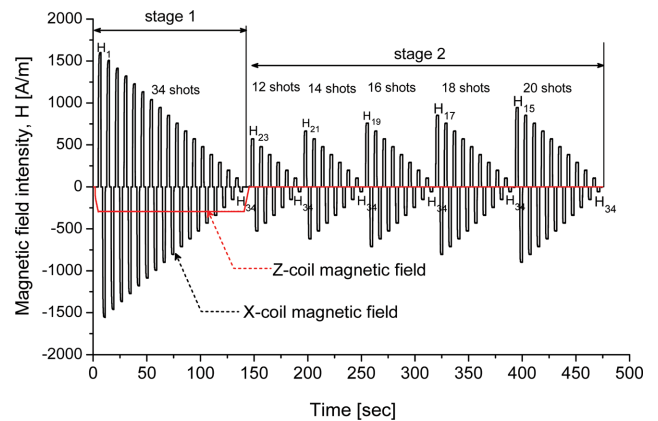


**Fig. 10.** (Color online) Magnetic fields by the induced longitudinal magnetization of a scaled model ship.

-0.08 μT로서 매우 작은 값을 가진다. 이는 본 논문에서 축소함의 자기적인 중심이 -0.05 m임을 의미한다.

Flash-KD의 궁극적인 목적은 Fig. 9의 IVM에 의한 자기장과 극성은 반대이면서 크기는 유사한 PVM을 만들어주고 PLM을 최소화시킴으로써, 합성 자기장을 저감시키는 것이다. 따라서 Flash-KD가 성공적으로 수행되면 지구자기장 노출 환경에서 축소함의 자기장은 Fig. 10의 ILM에 의한 자기장이 대부분을 차지할 것이다.

Fig. 11은 본 논문에서 축소함에 적용된 Flash-KD 탈자 프로토콜을 보여준다. 첫 번째 단계에서 축소함에 인가되는 X-coil의 시작 자기장은 축소함 제작에 사용된 SS400 재질의 보자력(Hc: 대략 350 A/m)을 고려하여 축소함이 자기적으로 포화될 수 있도록 1,650 A/m로 하였고, 감소 자기장은 50 A/m, 종료 자기장은 대략 50 A/m 그리고 총 자기장 인가 횟수는 34회로 하였다. Z-coil을 통해 축소함에 인가된 수직방향 자기장은 축소함이 위치하고 있는 대한민국 남해안 지역의 지



**Fig. 11.** (Color online) A Flash-KD protocol applied to a scaled model ship.

구자기장 수직성분(30.5 A/m)의 대략 10배에 해당하는 300 A/m이다. 그리고 두 번째 단계에서 수직방향 자기장은 제거하고, X-coil에 인가하는 자기장의 횡수를 Fig. 11과 같이 12회부터 2회씩 증가시키면서 PVM이 -IVM이 되는 시작 자기장 크기 및 인가자기장 횡수를 탐색하였다. 감소 자기장의 크기와 종료 자기장의 크기( $H_{34}$ )는 50 A/m로서 첫 번째 단계와 동일하다. 시작 자기장의 크기는 자기장 인가 횡수와 함께 증가한다. 즉, Fig. 11의 두 번째 단계에서 인가 자기장의 횡수가 12회인 경우, 첫 번째 인가 자기장의 크기는 Fig. 5 내의 수식( $n - (m + L) + 1$ )에 의해서 첫 번째 단계의  $H_{23}$ (600 A/m)에 해당되고, 인가 자기장의 횡수가 20회인 경우는 첫 번째 단계의  $H_{15}$ (1,000 A/m)에 해당된다.

Fig. 12는 본 논문에서 제안된 Flash-KD 탈자의 첫 번째

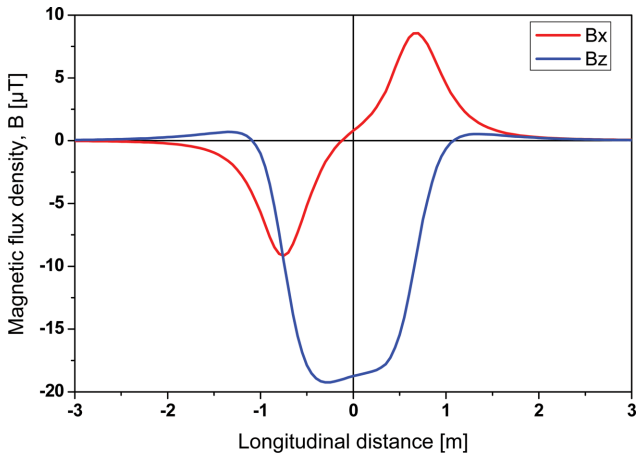


Fig. 12. (Color online) The magnetic fields from the scaled model ship after the completion of stage 1 on the Flash-KD protocol.

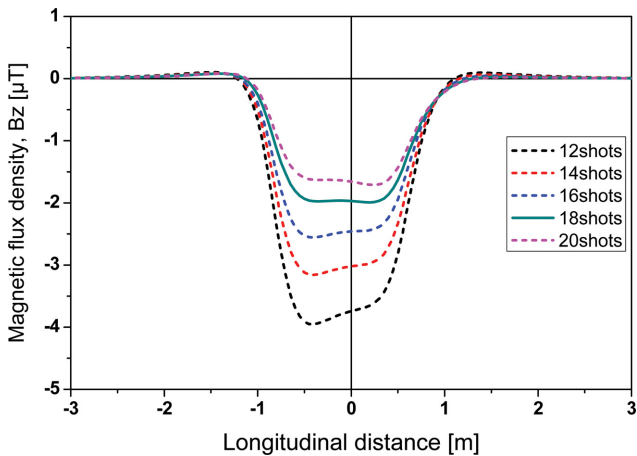


Fig. 13. (Color online) The vertical permanent magnetic fields ( $B_z$ ) from the scaled model ship as increasing the magnitude of initial applied magnetic field and the total shot number at the second stage of Flash-KD method.

단계 프로토콜 종료 후 지구자기장 노출 환경에서 축소함으로부터의 자기장이다. 지구자기장 노출 환경에서 측정된 자기장은 영구자기장과 유도자기장을 모두 포함한다. Fig. 12의 결과를 살펴보면, Fig. 9의 결과에서 보여준 축소함의 IVM에 의한 자기장 대비 극성은 반대이고 크기는 대략 10배 정도임을 알 수 있다. 이는 축소함 전체에 매우 강한 PVM이 착자되어 있음을 의미하는 결과이다.

Fig. 13과 14는 Fig. 11에서 제시된 Flash-KD 탈자 프로토콜의 두 번째 단계에서 축소함에 인가되는 시작 수평 자기장의 크기와 인가 자기장 횡수를 증가시켜감에 따라서 축소함으로부터 측정된 영구자기장 수직성분( $B_z$ )과 지구자기장 노출 환경에서 측정된 자기장의 수직성분( $B_z$ ) 변화 과정을 보여준다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 Flash-KD 탈자의 두 번째 단계 프로토콜에서 시작 자기장의 크기와 자기장 인가 횡수를 점진적으로 증가시켜 갈수록 PVM에 의한 자기장 크기 또한 점진적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10에서 언급되었듯이 PVM 성분이 -IVM 성분에 도달하게 되면 LM 성분만 잔류하므로 축소함의 자기적 중심(종축방향 거리:  $-0.05$  m)에서 측정된 자기장 수직성분( $B_z$ )은 0에 가까운 크기를 가지게 된다. Fig. 14를 살펴보면 인가 자기장 횡수가 18 shots인 경우, 축소함의 자기적 중심에서의  $B_z$ 는  $0.01 \mu T$ 로서 그 크기가 매우 작음을 알 수 있다. 이는 자기장 인가 횡수 18 shots에서 축소함의 PVM이 -IVM이 됨을 의미하므로 본 논문에서는 축소함을 대상으로 수행된 Flash-KD 탈자에 있어서 두 번째 프로토콜의 시작 인가 자기장 크기와 총 인가 자기장 횡수를 900 A/m와 18회로 결정할 수 있다.

Fig. 15는 Flash-KD 프로토콜 종료 후 PM에 의한 자기장과 -IVM의 의한 자기장을 비교한 결과로 그 형태와 크기가

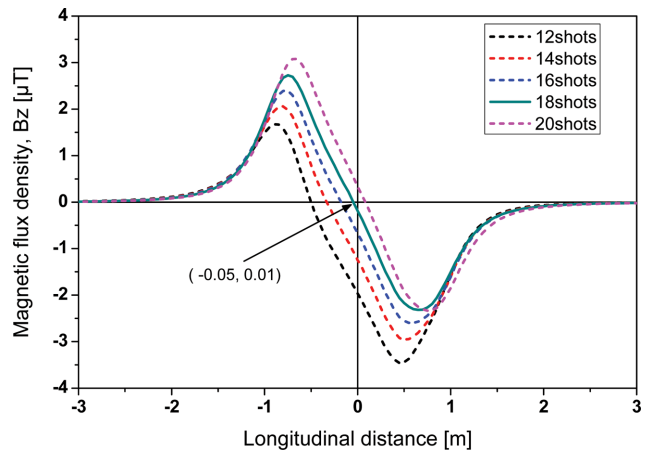


Fig. 14. (Color online) The vertical magnetic fields ( $B_z$ ) from the scaled model ship under the earth magnetic field as increasing the magnitude of initial applied magnetic field and the total shot number at the second stage of Flash-KD method.

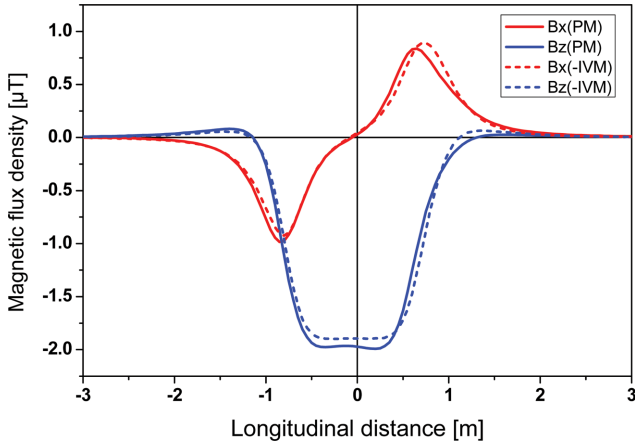


Fig. 15. (Color online) Magnetic fields by permanent magnetization of the scaled model ship after the completion of Flash-KD protocol and the reverse IVM of the scaled model ship.

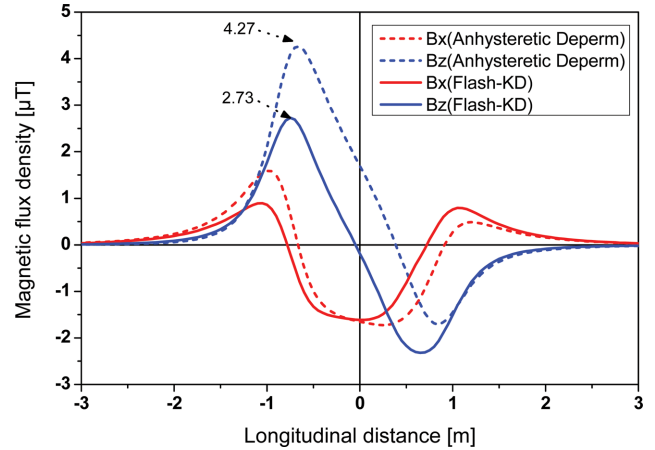


Fig. 17. (Color online) Magnetic fields from the scaled model ship under the earth's magnetic field after the completion of Flash-KD and Anhysteretic Deperm protocol.

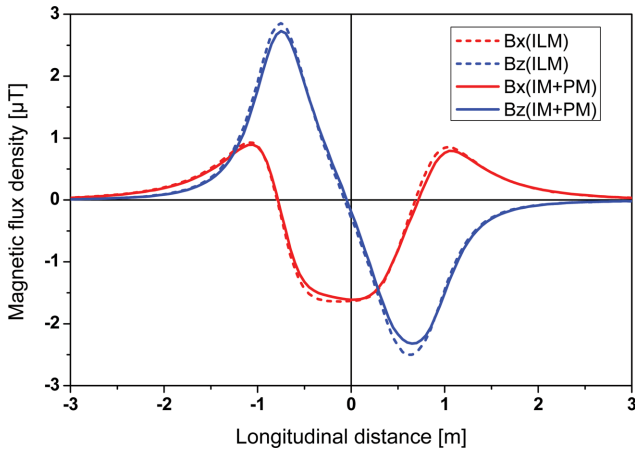


Fig. 16. (Color online) Magnetic fields by induced longitudinal magnetization of the scaled model ship and magnetic fields under the earth's magnetic field after the completion of Flash-KD protocol.

매우 유사하다. Fig. 16은 Flash-KD 탈자 후 지구자기장 노출 환경에서 측정된 축소함의 자기장과 Fig. 10의 ILM에 의한 자기장을 비교한 결과로 이 또한 형태와 크기가 매우 유사하다. 따라서 이 결과는 PVM에 의해 IVM이 잘 보상되었고, PLM 또한 최소화되었음을 의미한다.

아울러 제안된 기법의 성능을 소자장비 탑재함정에 주로 적용되는 Anhysteretic Deperm 기법과 비교를 위하여 Anhysteretic Deperm 탈자를 추가 수행하였다. 본 논문에서 적용된 Anhysteretic Deperm 탈자는 Flash-KD 기법의 첫 번째 단계에서 X-coil에 적용된 프로토콜과 동일하고, 지구자기장은 보상된 상태에서 탈자를 수행하였다. Fig. 17은 Flash-KD 기법과 Anhysteretic Deperm 기법을 축소함에 적용한 후, 지구자기장 노출 환경에서 축소함으로부터의 자기장을 비교한 결과이다. Fig. 17에서 Flash-KD 기법을 적용한

결과의 잔류 자기장(절대치 최대값)은 Anhysteretic Deperm 기법을 적용한 결과 대비 65% 수준으로 더 낮았다. 하지만 Flash-KD 기법은 Anhysteretic Deperm 기법과는 달리 지구 자기장 환경이 일정한 지역에서 작전을 수행하는 함정에만 제한적으로 적용이 가능하다. 이는 Flash-KD 탈자를 적용한 지역의 수직 지구자기장과 상이한 지역에서 함이 운용되면 함의 IVM 성분이 달라지기 때문이다. 따라서 Flash-KD 탈자는 소자장비가 미 탑재된 함정을 대상으로 작전 지역이 일정 지역에 한정된 함정에만 적용 가능하다는 한계가 있다. 이러한 한계는 Flash-D 기법 또한 동일하게 가지고 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 소자장비 미탑재 함정의 자기신호 저감을 위한 탈자 기법으로 2단계로 탈자 프로토콜로 구성된 Flash-KD 탈자 기법을 제안하고, 잠수함 형태의 축소함을 대상으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 그 결과 두 번째 프로토콜의 시작 자기장 900 A/m, 총 인가자기장 횟수 18회에서 PVM이 -IVM이 되어 수직 성분이 상쇄되는 프로토콜을 결정할 수 있었다. 따라서 Flash-KD 기법은 소자장비가 미 탑재된 함정의 자기신호 저감을 위한 목적으로 활용 가능하다. 하지만 Flash-KD 기법은 -IVM에 대응하는 PVM 성분을 만들어 줌으로써 함정 자기장을 저감시키는 방법이므로 수직 지구자기장이 일정한 지역에서 운용되는 함정에만 적용 가능하다는 한계도 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 방위사업청이 관리하고 국방과학연구소가 수행



하는 “함정자장제어기술” 과제의 일환으로 진행되었습니다[사업부호: 912461201].

### 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] N. S. Choi, G. W. Jeung, S. K. Jung, C. S. Yang, H. J. Chung, and D. H. Kim, IEEE Trans. Magn. **48**, 419 (2012).
- [4] Y. M. Kim, Y. J. Kim, and K. H. Shin, J. Magn. **18**, 326 (2013).
- [5] J. W. Kim, S. H. Kim, J. H. Kim, H. B. Lee, and H. J. Chung, J. Magn. **22**, 85 (2017).
- [6] S. H. Kim, J. W. Kim, H. B. Lee, and H. J. Chung, J. Korean Magn. Soc. **274**, 226 (2017).
- [7] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey, IEEE Trans. Magn. **38**, 1753 (2002).
- [8] H. J. Chung, C. S. Yang, and W. J. Jung, J. Magn. **20**, 62 (2015).