

## Magnetic Stability Analysis of Flash-KD Deperming Protocol for Scaled Submarine Model

Ki-Woong Bae\*, Hyun-Ju Chung, Chang-Seob Yang, and Woo-Jin Jeong

Agency for Defense Development, Jinhae P. O. Box 18 Changwon 51678, Korea

(Received 23 May 2018, Received in final form 25 June 2018, Accepted 26 June 2018)

The Anhyseretic deperm protocol has many benefits for decrease of the permanent magnetization for Korean naval vessels, for example, the simplicity of its procedure, short treatment time, and the creation of permanent vertical magnetization. However, the permanent vertical magnetization created by Anhyseretic deperm protocol suffers from low magnetic stability. On the other hand, the Flash-D protocol shows higher magnetic stability compared to Anhyseretic deperm protocol but it is complex and requires long treatment time. In this paper, a Flash-KD protocol which omitted the second stage of Flash-D protocol was used to deperm a scaled model submarine. The experiment showed that the stability of magnetization created by the Flash-KD protocol is similar to that of Flash-D protocol, while it is superior compared to that of Anhyseretic deperm protocol. Further investigation will be followed to apply the Flash-KD protocol to Korean naval vessels.

**Keywords** : deperming protocol, magnetization stability, scaled-model submarines

### 잠수함 모델을 이용한 Flash-KD 프로토콜의 탈자 안정도 분석

배기웅\* · 정현주 · 양창섭 · 정우진

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

(2018년 5월 23일 받음, 2018년 6월 25일 최종수정본 받음, 2018년 6월 26일 게재확정)

기존 국내 함정에 대한 영구 자기장을 감소시키는 방법으로 사용되고 있는 Anhyseretic deperm 탈자 프로토콜은 1단계로 구성되어 있어, 프로토콜이 간단하고, 자기 처리 시간이 적게 걸리는 장점이 있으며, 효과적으로 수직 방향 영구 자화를 착자시킬 수 있는 장점을 가진다. 하지만 Anhyseretic deperm 프로토콜을 이용하여 생성된 수직 영구 자기장은 약하게 착자된 수직 방향 자화로 인해 낮은 자기적 안정도를 가질 수 있다. 한편, Flash-D 탈자 프로토콜은 Anhyseretic deperm 프로토콜에 비해 강하게 착자된 수직 방향 자화로 인해 수직 자화의 안정도가 높지만, 자기처리 절차가 복잡하고 긴 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 Flash-D 프로토콜의 2단계 과정을 생략한 Flash-KD 프로토콜을 적용하여 잠수함 모델에 대한 탈자실험을 수행하였다. 시험 결과, 생성된 수직 자화의 안정도가 기존 Flash-D 프로토콜과는 유사한 수준이며, Anhyseretic deperm 프로토콜에 비해서는 우수함이 확인되었다. 향후 제안된 프로토콜의 실험 적용을 위해 추가 검증시험을 실시할 예정이다.

**주제어** : 탈자 프로토콜, 자화 안정성, 잠수함 모델

### I. 서 론

강자성체로 제작된 함정은 큰 영구 및 유도 자기장을 함정 외부로 발생시키고, 어뢰, 기뢰, 항만감시체계 자기센서, 등 자기장을 검출하는 센서의 탐지 위협에 쉽게 노출된다. 따라서 함정의 작전 능력을 유지하는 동시에 다양한 위협으로부터

터 함정을 보호하기 위해서는 함정 발생 자기장을 감소시키는 것이 중요하다[1].

함정 발생 자기장은 영구 자화(PM, Permanent Magnetization), 유도 자화(IM, Induced Magnetization)에 의한 자기장, 와전류 자기장, 표류 자기장 등으로 구분할 수 있다. 이 중, 영구 자기장과 유도 자기장은 각각 수평 성분 영구 자화(PLM, Permanent Longitudinal Magnetization), 수직 성분 영구 자화(PVM, Permanent Vertical Magnetization), 수평 성분 유도 자화(ILM, Induced Longitudinal Magnetization), 수직

성분 유도 자화(IVM, Induced Vertical Magnetization)로 구분할 수 있다.

ILM은 합정의 선수 방향에 따라 바뀌므로 탈자를 통해 제거하기 어렵지만, IVM은 제한된 작전 해역에서 항해하는 합정에서는 크게 변화하지 않으므로, 탈자를 통해 충분한 보상이 가능하다. 구체적으로, 합정 수직 영구 자화를 PVM이 -IVM이 되도록 생성하면, PVM과 IVM이 서로 상쇄될 수 있다. PVM을 -IVM이 되도록 조정하는 방법은 참고문헌 [2]에서 언급된 해석적인 방법을 이용할 수 있다.

Anhysteretic deperm, Flash-D 등의 기존의 합정 탈자 프로토콜들은 PVM이 -IVM이 되도록 PVM을 조절하는 방법을 사용하고 있다. Anhysteretic deperm 프로토콜은 2002년 Baynes 등에 의해 최초 제안되었으며[3], 1단계 탈자 절차로 구성되므로 단순하지만, 최종적으로 약하게 생성된 PVM으로 인해 시간이 경과함에 따라 자화 상태가 쉽게 변할 수 있다. 이에 반해 Flash-D 프로토콜은 강한 수직 바이어스를 이용하여 IVM을 상쇄하는 PVM을 강하게 생성하는 방법으로, 생성된 PVM의 안정도는 높지만, 3단계 탈자 절차로 구성되어 있어 프로토콜이 복잡하고 처리 시간이 오래 걸리는 단점을 가진다[4,5].

본 논문에서는, 별도 제작된 잠수함 축소 모델과 기존의 국방과학연구소 자기실험실을 활용하여 기존의 Anhysteretic deperm 및 Flash-D 탈자 프로토콜과 기존 문헌[6]에서 제안된 Flash-KD 프로토콜의 PVM 안정도 비교 시험을 실시하였으며, 이를 통해 Flash-KD 프로토콜의 탈자 안정도가 우수함을 확인하였다.

## II. Flash-KD 탈자 프로토콜

서론에서 언급한 바와 같이 Baynes 등이 문헌[3]에서 제안한 Anhysteretic deperm 프로토콜은 처리 절차가 간단하지만, PVM 안정도가 낮은 한계를 가지고 있으며, Flash-D 프로토콜은 PVM 안정도는 높지만, 처리 절차가 복잡한 한계가 있다.

Anhysteretic deperm 프로토콜은 Fig. 1과 같이 수평 탈자 코일에 극성이 반대이면서 크기가 작아지는 전류 샷을 인가하는 동시에, 수직 탈자 코일에는 균일한 수직 방향 전류(수직 바이어스)가 인가된다. 그 결과, 수평 탈자가 끝나는 시점에서 PVM이 생성된다. 일반적으로 탈자가 종료되는 시점에서 -IVM과 비슷한 크기의 PVM이 생성되기 위해서는 수직 지구자기장 크기에 해당하는 30 A/m 정도의 약한 수직 바이어스 자기장을 인가해야 한다. 하지만 이렇게 약한 바이어스로부터 생성된 PVM은 외부 자기장 변화에 의해 쉽게 풀릴 수(creeping) 있다.

한편, Flash-D 탈자 프로토콜은 Fig. 2와 같이 세 가지 단

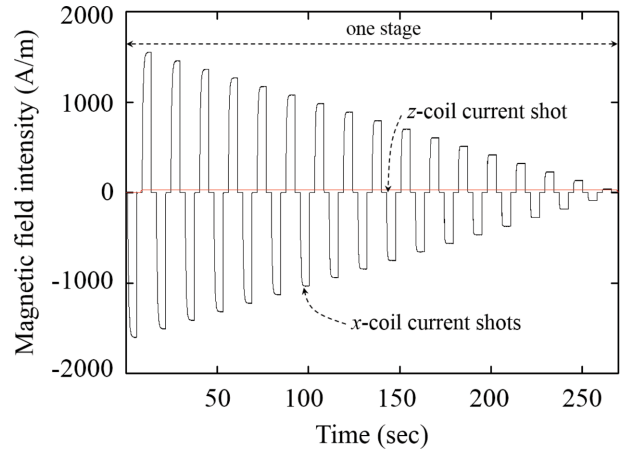


Fig. 1. (Color online) Current shots of the Anhysteretic deperm protocol.

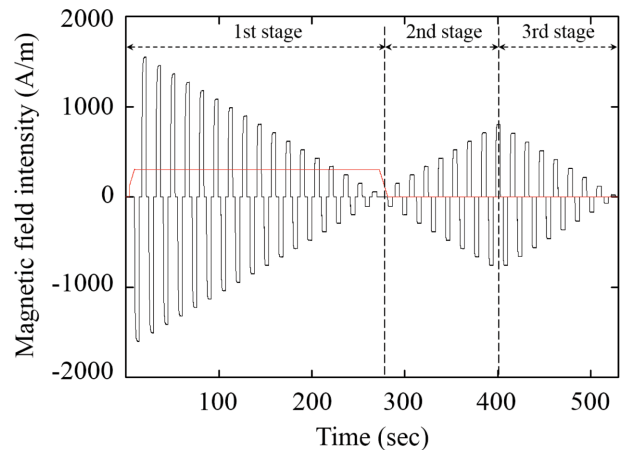


Fig. 2. (Color online) Current shots of the Flash-D protocol.

계의 과정을 통해 합정 탈자를 수행한다. 먼저 첫 번째 단계 탈자 과정에서는 300 A/m 정도의 강한 수직 바이어스 자기장을 인가한다. 두 번째 단계부터는 수직 바이어스를 제거하고, 수평 인가 전류의 크기를 증가시킨 후, 마지막 세 번째 단계에서 수평 전류 샷 크기를 다시 감소시킨다. 즉, 첫 번째 단계에서 강한 수직 바이어스를 통해 강한 지구와 약한 지구를 동시에 생성하고, 두 번째 단계와 세 번째 단계 과정에서 자기적인 요동(shaking)을 유발하여 약한 지구는 풀리게 되고 강한 지구들만 살아남도록 함으로써, PVM의 안정도를 높일 수 있다.

한편 Flash-D 프로토콜의 2단계 절차를 생략하여 높은 자기적 안정도를 가지면서 탈자 절차가 용이한 Flash-KD 방법이 Fig. 3과 같이 제안되었으며[6], 본 연구에서는 Flash-KD 탈자 프로토콜의 기존 탈자 프로토콜 대비 자기적 안정도를 잠수함 모델 실험을 통해 제시하였다.

Flash-KD 프로토콜에서는 Flash-D의 두 번째 단계에 해당

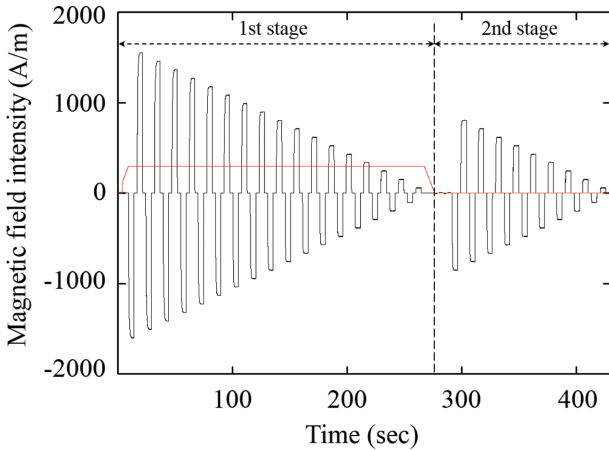


Fig. 3. (Color online) Current shots of the proposed Flash-KD protocol.

하는 과정을 생략한다. 즉, Flash-D의 두 번째 단계에서와 같이 수평 전류 샷 크기를 증가시키지 않고, 바로 세 번째 단계에 해당되는 큰 수평 전류 샷을 인가한 후 점차 감소시킨다. Flash-KD도 Flash-D와 마찬가지로 300 A/m 정도의 강한 수직 바이어스 자기장을 인가하므로, 약한 지구부터 자화가 풀리게 된다. 그 결과 약한 지구는 사라지고 최종적으로는 강한 지구들만 남게 되어, Anhyseretic deperm 프로토콜에 비해 생성된 PVM의 안정도가 높은 특징을 갖게 된다.

### III. 실험 방법 및 결과

본 논문에서는 Flash-KD 프로토콜과 기존의 Anhyseretic deperm, Flash-D 프로토콜의 탈자 성능을 비교하여 Flash-KD 프로토콜의 안정도를 분석하였다. 구체적으로, 여러 탈자 프로토콜로 생성된 수직 자화의 안정도를 비교하기 위해, 각각의 프로토콜을 이용하여 비슷한 탈자 성능을 갖도록 탈자한 다음, 인위적으로 강한 수직 환경 자기장에 노출시키고 자화가 풀리는 정도를 비교 측정함으로써 안정도를 분석하였다.

탈자 프로토콜의 안정도 비교를 위해, Anhyseretic deperm, Flash-D, Flash-KD 프로토콜에 대해 잠수함 모델의 탈자를 진행하였다. 각각의 탈자 프로토콜의 전류 인가 방법은 Fig. 1~Fig. 3에 나타내었으며, 각 프로토콜에 인가된 전류의 세부 정보는 Table I에 요약하였다. 본 논문에서는 하나의 잠수함 모델을 이용하여 반복적으로 실험을 수행하였으며, 각 프로토콜 실험 후에는 수직 자화가 착자되어 있으므로, 각 프로토콜 실험이 끝난 다음에는 PVM을 완전히 제거한 후에 다음 프로토콜에 대한 실험을 진행하였다.

탈자 성능 실험에 사용한 잠수함 축소함 모델은 SS400 재질이며, 길이 1.70 m, 직경 0.27 m의 크기로 제작되었다.

Table I. A summary of the procedures for the three deperming protocols.

|           |                      | Deperming Protocol |         |          |
|-----------|----------------------|--------------------|---------|----------|
|           |                      | Anhyseretic        | Flash-D | Flash-KD |
| 1st stage | Start field (A/m)    | 1600               | 1600    | 1600     |
|           | End field (A/m)      | 40                 | 57      | 57       |
|           | Vertical field (A/m) | 30                 | 300     | 300      |
|           | No. of shots         | 34                 | 34      | 34       |
| 2nd stage | Start field (A/m)    | -                  | 104     | 852      |
|           | End field (A/m)      | -                  | 805     | 57       |
|           | Vertical field (A/m) | -                  | 0       | 0        |
|           | No. of shots         | -                  | 16      | 18       |
| 3rd stage | Start field (A/m)    | -                  | 758     | -        |
|           | End field (A/m)      | -                  | 15      | -        |
|           | Vertical field (A/m) | -                  | 0       | -        |
|           | No. of shots         | -                  | 16      | -        |

Table II. 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<br>Diameter 0.5 m | -             | 900        | 447 A/m            |
| Z-coil | Length 2.2 m<br>Width 1.2 m    | 0.8 m         | 60         | 63.4 A/m           |

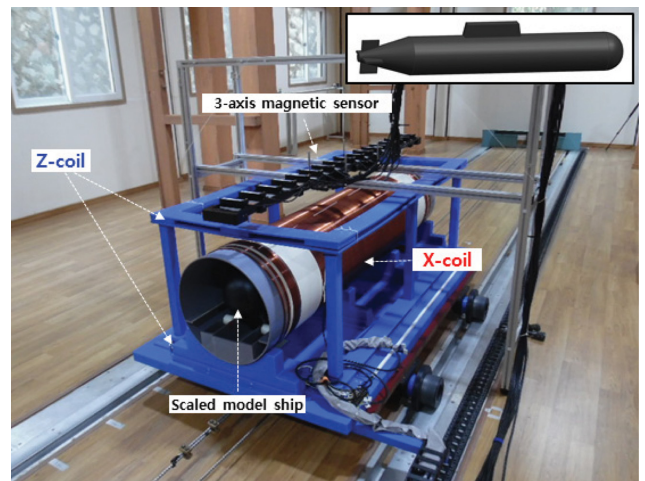


Fig. 4. (Color online) The experiment setup for the scaled model ship (Inset is the scaled model ship).

Table II는 축소함의 탈자를 위하여 자체 제작된 축소함용 탈자 장치의 X-coil과 Z-coil의 세부 사양이고, Fig. 4는 축소함의 탈자 시험을 위하여 제작된 탈자 시험 장치를 보여주는 사진이다. X-coil은 Solenoid 형태로 제작하였고, Z-coil은 직사각형 형태로 제작하여 X-coil 위, 아래 0.8 m 간격으로 설치하였다. 축소함으로부터의 자기장은 Fig. 4와 같이 축소함

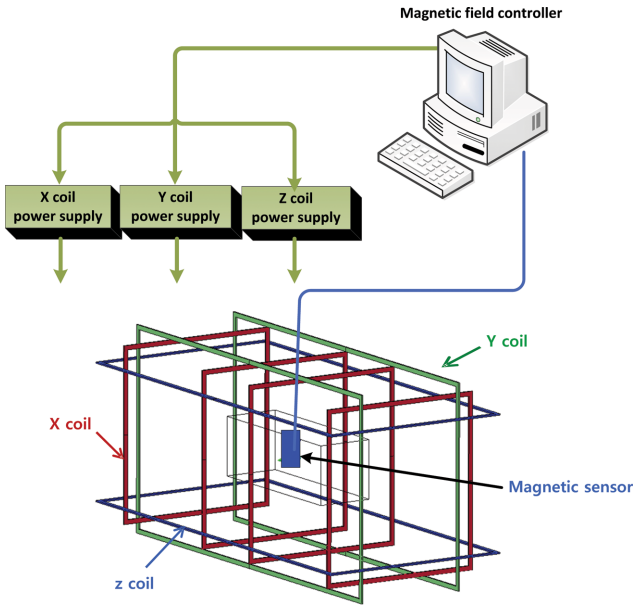


Fig. 5. (Color online) The experimental setup for earth magnetic field compensation coils.

위 0.29 m만큼 이격되어 설치된 3축 자기센서(Bartington Instruments, Mag690, 측정범위  $\pm 100 \mu\text{T}$ )를 이용하여 축소함을 북  $\rightarrow$  남 방향으로 이동하면서 측정하였다.

또한, Fig. 5와 같이 국과연 비자성 실험실 내부에 설치된 지구 자기장 모사장치를 이용하여 지구자기장을 제거한 상태에서 탈자를 수행하였다[7]. 국과연 비자성 실험실은  $\pm 3 \text{ m}$  공간 내에서 수만 nT 수준인 지구 자기장을 약 97%(잔류 자기장 3%) 수준까지 균일하게 제거할 수 있다. 실험실은 북쪽이 +x 방향, 동쪽이 +y 방향, 아래쪽이 +z 방향이 되는 좌표계를 이용하였다.

X 코일에 인가되는 전류의 잡음 수준은 2 A/m, Z 코일 전류 잡음은 1 A/m 이하인 수준이다. Table 에서 보였듯이, X 코일은 최소 40 A/m, 최대 1600 A/m의 전류가 필요하고, Z 코일은 최소 0 A/m, 최대 300 A/m 정도의 전류가 필요하다. 따라서 X, Z 코일 잡음 수준은 탈자 프로토콜에서 필요로 하는 자기장 값을 비교적 정확하게 인가할 수 있는 수준이다.

잠수함 모델에 대한 Anhyseretic deperm, Flash-D, Flash-KD 프로토콜의 시험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 F-D는 Flash-D를 의미하고, F-KD는 Flash-KD를 의미한다. Fig. 6에서 + 부호가 함정 선수 방향에 해당한다. 잠수함 모델의 수직 자화 안정도를 비교하기 위해 각각의 프로토콜의 초기 자기장의 형태는 유사하게 만든 후 시험을 진행하였다.

Fig. 7은 Anhyseretic, Flash-D, Flash-KD 프로토콜로 각각 탈자 후 지구 자기장에 노출시킨 결과이다. 세 프로토콜 모두 탈자 후의 결과가 ILM 신호와 매우 유사한 형태를 가짐을 볼 수 있다. 이는  $PVM \approx -IVM$ 이 되어 VM이 영에

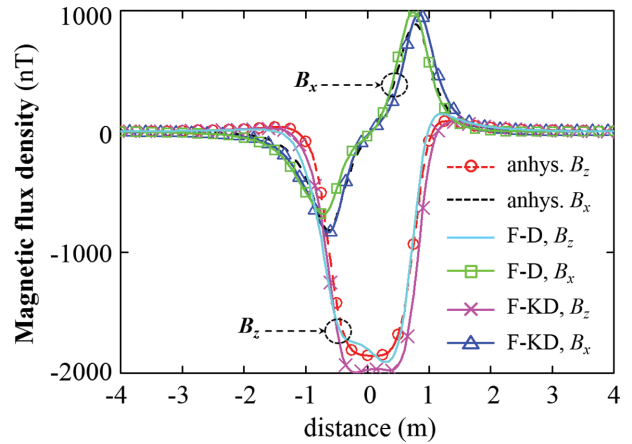
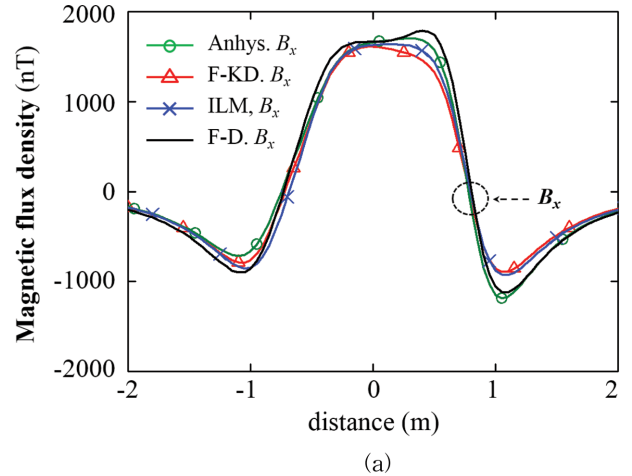
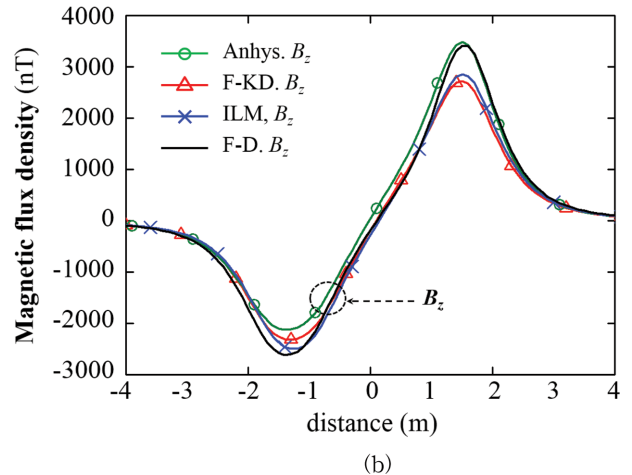


Fig. 6. (Color online) Magnetic flux density of the scaled model ship depermed by the three protocols.



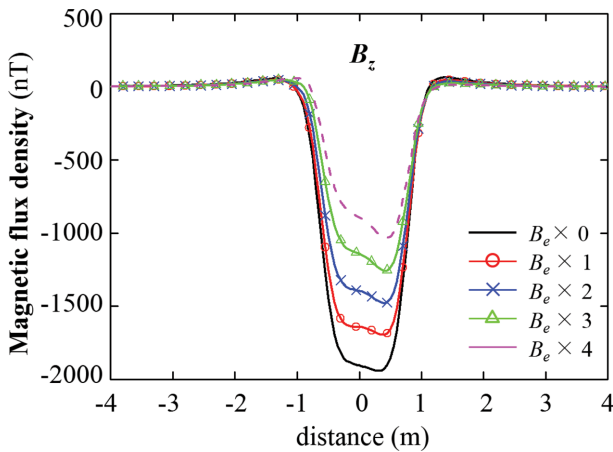
(a)



(b)

Fig. 7. (Color online) Magnetic flux densities of the scaled model ship depermed by the Anhyseretic, Flash-D, and Flash-KD protocols, (a) Bx fields, (b) Bz fields.

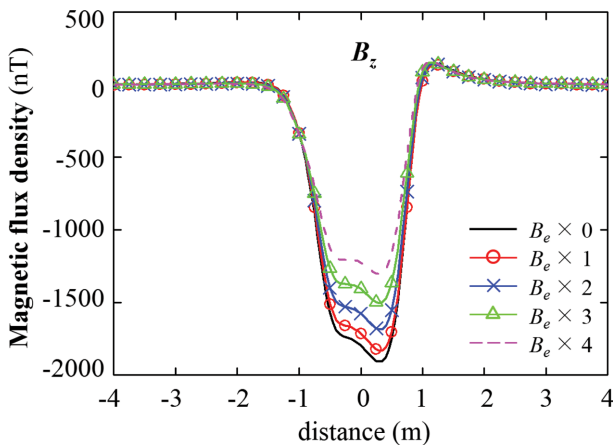
가깝게 되고, PLM 성분 또한 영에 가까운 값을 가져 전체적으로 탈자가 아주 잘된 상태를 의미한다. 수식으로는,  $PM +$



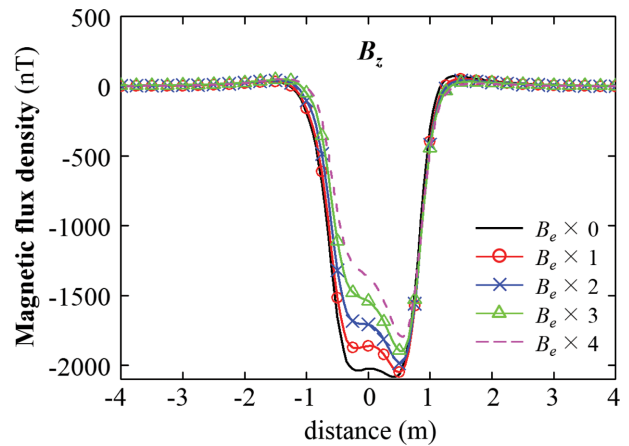
**Fig. 8.** (Color online) Vertical magnetic field ( $B_z$ ) of the scaled ship depermed by using the Anhyseretic deperm protocol ( $B_e$  means the earth vertical magnetic field.).

IM = PLM + PVM + IVM + ILM에서 ILM 성분만 남아 있는 상태이다. 즉, PLM은 제거된 상태, PVM은  $-IVM$  값으로 생성된 상태이며, 이 상태에서 인위적으로 수직 환경 자기장을 가변시키며 잠수함 모델의 수직 자화 안정도 비교 실험을 진행함으로써, 각 프로토콜의 PVM 안정도를 정확히 비교할 수 있다.

Fig. 8은 Anhyseretic deperm 프로토콜로 탈자한 후, 다양한 세기의 수직 환경 자기장에 노출한 결과이다. Fig. 8에서 수직 지구 자기장을  $B_e$ 로 정의하였다. Fig. 8을 보면, 환경 자기장 값이  $B_e$ 의 0배일 때는 축소함 중심(0 m)에서  $-1910$  nT의 큰 값을 갖지만,  $B_e$ 의 1배, 2배, 3배, 4배의 큰 환경 자기장에 노출되면서 값이 각각  $-1642$ ,  $-1410$ ,  $-1142$ ,  $-892$  nT로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 반대 방향으로 인가된 강한 수직 환경 자기장에 의해 탈자 프로토콜로 생성한 수직 자화가 풀리기 때문이다. 여기서,  $B_e$ 의 0배라는 것은



**Fig. 9.** (Color online) Vertical magnetic field ( $B_z$ ) of the scaled ship depermed by using the Flash-D protocol.



**Fig. 10.** (Color online) Vertical magnetic field ( $B_z$ ) of the scaled ship depermed by using the Flash-KD protocol.

지구 자기장이 완전히 보상된 상태를 의미한다. 즉, 환경 자기장이 영이 되는 상태이다.

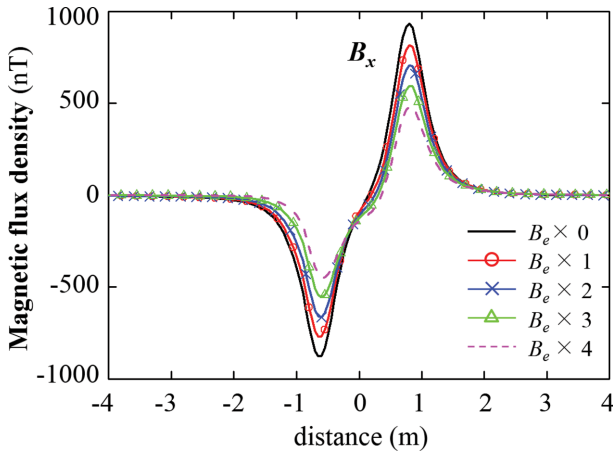
Fig. 9는 Flash-D 프로토콜로 탈자한 후, 수직 자기장에 노출한 결과이다. Fig. 9에서 환경 자기장이 0일 때에는( $B_e \times 0$ ) 축소함 중심(0 m)에서  $-1798$  nT의 큰 값을 갖지만,  $B_e$ 의 1배, 2배, 3배, 4배의 큰 환경 자기장에 노출되면서 값이 각각  $-1734$ ,  $-1593$ ,  $-1405$ ,  $-1240$  nT로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 8의 Anhyseretic deperm과 비교해서 Fig. 9의 Flash-D 프로토콜의 감소폭이 작음을 볼 수 있다. 이는 II장에서 설명한 대로 탈자 후 강한 수직 자화가 생성되어 자화가 덜 풀리기 때문으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 Flash-KD 프로토콜로 탈자한 후, 수직 자기장에 노출한 결과이다. Fig. 10에서 환경 자기장이 0일 때에는 축소함 중심(0 m)에서  $-2026$  nT의 큰 값을 갖지만,  $B_e$ 의 1배, 2배, 3배, 4배의 큰 수직 환경 자기장에 노출되면서 값이 각각  $-1861$ ,  $-1704$ ,  $-1556$ ,  $-1386$  nT로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기서 Flash-KD 프로토콜은 Anhyseretic deperm 프로토콜보다는 변화되는 감소폭이 작고, Flash-D 프로토콜과는 유사한 특성을 나타냄으로써 Flash-D 프로토콜과 마찬가지로 상대적으로 높은 자화 안정성을 가짐을 확인할 수 있다.

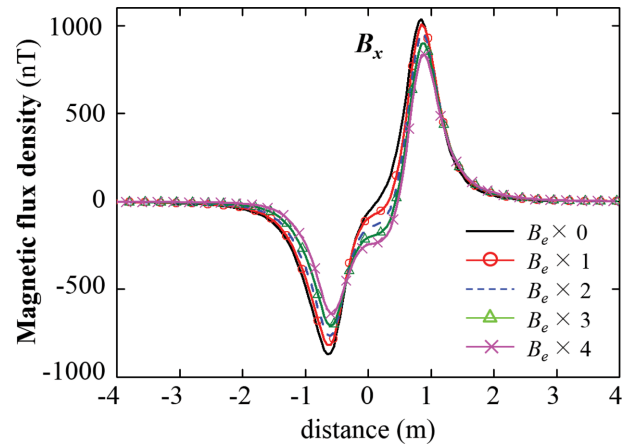
Fig. 8-Fig. 13은 각각의 탈자 프로토콜에 대해 환경 수직 자기장을 가변하면서 탈자 후 축소함 모델의 자기장 변화를 보여준다. 각각의 프로토콜에 대해 탈자 후 자기장 변화를 퍼센트로 환산하여 Table III에 나타내었다. Anhyseretic deperm 프로토콜은  $B_x$ ,  $B_z$  성분이 각각 약 47%, 53% 감소한데 반해, Flash-D 프로토콜은 각각 약 29%, 31% 정도로 감소하였다. 제안된 Flash-KD 프로토콜은 각각 약 18%, 32%로, 세 가지의 프로토콜 중 가장 안정적임을 알 수 있었다. 본 실험을 통해 제안된 Flash-KD 프로토콜이 Anhyseretic deperm 프로토콜에 비해서는 착자된 수직 자화의 안정도가 높으며,

**Table III.** Percentage magnetic field variations after exposure to environmental vertical magnetic fields for the three deperming protocols.

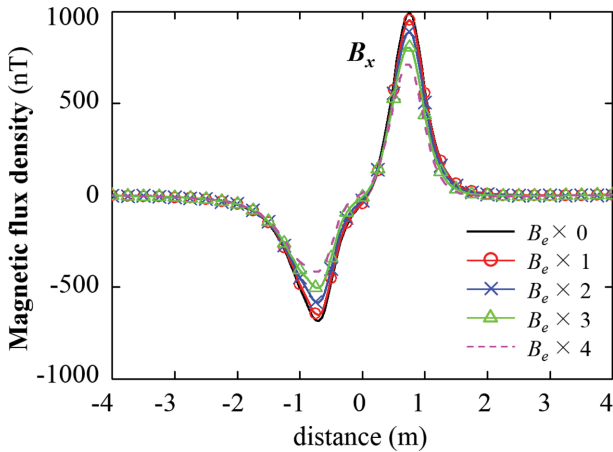
| unit: %                 | Vertical magnetic field            |                                     |                                     |                                      |                                      |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                         | 0 $\mu\text{T}$ ( $B_e \times 0$ ) | 39 $\mu\text{T}$ ( $B_e \times 1$ ) | 78 $\mu\text{T}$ ( $B_e \times 2$ ) | 117 $\mu\text{T}$ ( $B_e \times 3$ ) | 156 $\mu\text{T}$ ( $B_e \times 4$ ) |
| Anhysergetic deperm, Bx | 100                                | 88.7                                | 77.0                                | 65.0                                 | 52.9                                 |
| Anhysergetic deperm, Bz | 100                                | 86.0                                | 72.9                                | 59.8                                 | 46.7                                 |
| Flash-D, Bx             | 100                                | 93.5                                | 86.6                                | 80.6                                 | 71.2                                 |
| Flash-D, Bz             | 100                                | 96.4                                | 88.6                                | 78.1                                 | 68.9                                 |
| Flash-KD, Bx            | 100                                | 98.5                                | 94.2                                | 89.2                                 | 82.3                                 |
| Flash-KD, Bz            | 100                                | 91.9                                | 84.1                                | 76.8                                 | 68.4                                 |



**Fig. 11.** (Color online) Longitudinal magnetic field ( $B_x$ ) of the scaled ship depermed by using the Anhysergetic deperm protocol.



**Fig. 13.** (Color online) Longitudinal magnetic field ( $B_x$ ) of the scaled ship depermed by using the Flash-KD protocol.



**Fig. 12.** (Color online) Longitudinal magnetic field ( $B_x$ ) of the scaled ship depermed by using the Flash-D protocol.

Flash-D 프로토콜과의 비교에서도 우수함이 확인되었다.

$B_e \times 1$ 에서  $B_e \times 4$ 의 환경 자기장에 노출된 이후, Fig. 11, Fig. 12의 Anhysergetic deperm, Flash-D 프로토콜에 비해, Fig. 13의 Flash-KD는  $B_x$  성분의 변화가 비교적 크다. 구체적으로 PLM이 얼마나 더 생성되는지 알아보기 위해, 탈자 후 PLM은 0이 된다고 가정하자. 그렇다면, 다양한 환경 자

기장( $B_e \times 1 \sim 4$ )에 노출되었을 때, 선체 중심(0 m)에서의  $B_x$  값의 변화를 PLM이 얼마나 생성되었는지 파악하는 것대로 사용할 수 있다. 이 기준으로 보면, Anhysergetic deperm 프로토콜로 탈자한 경우(Fig. 8),  $B_e \times 4$ 일 때  $B_e \times 0$ 일 때에 비해 약 50 nT의 PLM이 생성되었다. 이는  $B_z$ 를 기준으로 보아도 비슷한 수치이다. Flash-KD 프로토콜로 탈자한 경우(Fig. 10),  $B_e \times 4$ 일 때  $B_e \times 0$ 일 때에 비해 약 160 nT의 PLM이 생성되었다. 즉, Flash-KD가 Anhysergetic에 비해 약 110 nT 정도 PLM 성분이 더 생성되었다고 볼 수 있다.

Anhysergetic deperm, Flash-D, Flash-KD와 같이 수직 자화를 생성하는 프로토콜은, 소자장비가 탑재되지 않은 함정에서 IVM을 상쇄시키는 PVM을 생성하기 위해 적용된다. 소자 장비가 탑재되지 않은 함정은 필연적으로 큰 ILM 값을 갖는다. 실험에 사용된 축소함의 경우, Fig. 7(a), (b)에서 볼 수 있듯이, ILM  $B_x$  성분의 피크가 1800 nT,  $B_z$  성분의 피크가 2800 nT 정도의 큰 ILM 값을 갖는다. 이런 상황에서 Flash-KD 프로토콜로 인해 추가적으로 생성되는 110 nT 정도의 PLM 성분은 무시할 수 있는 값으로 볼 수 있다.

이와 같이, Flash-KD 프로토콜이 Flash-D 프로토콜에 비해 추가적인 PLM 성분은 발생하지만, 탈자 처리 시간이 짧고, 절차가 간단하여 실용성이 높은 점 등을 종합할 때, Flash-

KD 프로토콜이 Flash-D 프로토콜에 비해 탈자에 유리한 점이 있다고 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 Flash-D 프로토콜보다 단순하고, 처리 시간이 빠르며, Anhysteretic deperm 프로토콜보다 수직 자화의 안정도가 높은 Flash-KD 프로토콜에 대한 안정도를 Anhysteretic deperm, Flash-D 탈자 프로토콜과의 비교 실험을 통해 분석하였다. 구체적으로, 잠수함 모델을 수직 지구 자기장의 1배에서 4배에 이르는 환경 자기장에 노출시켰을 때, Anhysteretic deperm, Flash-D, Flash-KD 프로토콜로 생성된 수직 자화의 변화를 측정하여 비교하였다. 측정 결과, Flash-KD 프로토콜의 자속 변화폭이 Anhysteretic deperm 프로토콜에 비해 더 작으며, Flash-D 프로토콜에 비해서는 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. 이는 제안한 Flash-KD 프로토콜이 Flash-D 프로토콜에 비해 간단하고 처리 시간이 빠르지만, 수직 자화 안정도는 Anhysteretic deperm 프로토콜보다 우수하고, Flash-D 프로토콜과는 유사하다는 것을 의미한다. 본 연구에서 제안하는 Flash-KD 프로토콜을 실 함정의 자기 처리 과정에 적용한다면, 기존의 프로토콜에 비해 수직 자화의 안정도가 높아지고, 짧은 시간에 자기 처리가 가능해 지므로, 자기 처리 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### References

- [1] J. Holmes, Reduction of a Ship's Magnetic Field Signature, Morgan & Claypool (2008) pp. 7~63.
- [2] I. D. Mayergoyz, Mathematical models of Hysteresis, Springer-Verlag, New York (1991) pp. 141~201.
- [3] T. M. Baynes, IEEE Trans. Magn. **38**, 4 (2002).
- [4] J. W. Kim, Deperming Method to Improve the Performance of Magnetic Stealth in Vessel, Ph. D. Thesis, Soongsil University, Korea (2016).
- [5] T. M. Baynes, Analysis of the Demagnetisation process and possible Alternative Magnetic Treatments for Naval Vessels, Ph. D. thesis, University of New South Wales, Australia (1989).
- [6] K. W. Bae, Two-stage Flash-KD protocol for mock-up submarines without degaussing coils, Korean Magnetic Society 2017 Winter Conference (2017) pp. 28~30.
- [7] H. J. Chung, J. Magn. **20**, 1 (2015).