

## 비히스테리자화에 의한 강관의 탈자 기법 연구

### A Study on Demagnetization Technique of a Steel Tube using an Anhyseretic Magnetization

김영학\*                      양창섭\*\*                      신광호\*\*\*  
Young-Hak Kim              Chang-Seob Yang              Kwang-Ho Shin

#### Abstract

In this study, we investigated whether the anhyseretic demagnetization process would be applicable to remove a complicated magnetization of a steel tube as a part of the experimental earlier study for a deperming of naval vessel. The magnetic tube used in this study was a 10cm-long and 1cm-diameter steel tube, and magnetized with a E-shape ferrite core to form a nonuniform magnetization in it. In the anhyseretic demagnetization process, a dc magnetic field applied along the longitudinal direction of the tube decreased from  $\pm 3\text{kA/m}$  to zero-field with the step of  $\pm 300\text{A/m}$ . At the same time, an ac bias magnetic field with the frequency of 60Hz and the field intensity of 300A/m was excited along the circumstantial direction of the tube. It was found that the anhyseretic process was useful to demagnetize a small-object like a steel tube from the experimental results showing the residual magnetization reduced over 90%.

Keywords : Deperming(탈자), Anhyseretic Demagnetization(비히스테리시스 반자화), Residual Magnetization(잔류 자화)

#### 1. 서론

제 2차 세계대전이후로부터 수중 또는 해저에 부설되어 있는 적 자기 기뢰의 위협으로부터 함정의 안전을 보장받기 위한 방법으로 탈자(Deperming) 방법이 사용되어 왔다. 이는 함정 선체의 대부분이 강재로 되어 있고 강재는 지구 자계와 같은 외부자계에 의해

자화할 뿐만 아니라 열적 또는 기계적인 스트레스에 의해서도 쉽게 자화특성이 변화하는 성질을 가지고 있기 때문이다. 국내 함정의 경우에도 함정으로부터 발생하는 자계를 줄이기 위한 방법으로 정기적으로 자기처리시설에서 함정 탈자를 실시하고 추가로 함정 내부에 소자(Degaussing) 장비를 운용하고 있다.

함정의 자기처리는 지금까지 다수의 나라에서 관습적으로 Flash-D 탈자 방식의 복잡한 프로토콜에 따라 수행되어 왔다<sup>[1]</sup>. 이 방식은 자기 처리에 많은 시간이 소요되며, 자기처리 이후의 결과에 대해 이론적인 예측 또한 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 방식으로 비히스테리시스(Anhyseretic) 탈자 기법이 최근 제안되었으며, 축소 모델 시험을 통

\* 2008년 10월 29일 접수~2009년 1월 9일 게재승인

\* 부경대학교(Pukyong National University)

\*\* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*\*\* 경성대학교(Kyungsung University)

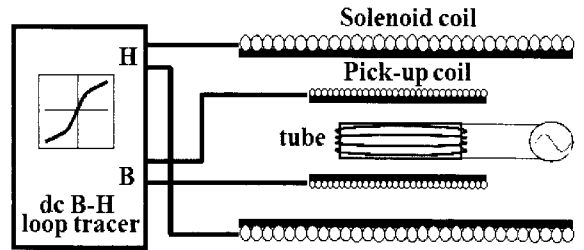
책임저자 : 김영학(kimyh@pknu.ac.kr)

해 자기처리가 성공적으로 수행될 수 있음이 증명되었다<sup>[1]</sup>. 이 두 종류의 탈자 방식은 합정의 수직방향으로 직류자계를 인가하고 길이방향으로 서서히 자계를 줄이는 방식으로, 자기 공학적으로는 직교바이어스 자계에 의해 자화과정에서 가역적인 회전이 일어나 자성체의 히스테리시스가 없어지는 현상을 이용하는 것이다. 즉 직교바이어스 자계를 이용하여 자성체인 합정의 잔류자화를 제거하는 방법이다<sup>[2]</sup>. 근본적으로 이 두 방식의 차이는 단지 자계의 인가 방법(Protocol)을 달리하는 것뿐이며, 합정이라는 자성체의 자기적인 성질에 대해서는 엄밀하게 고려하지 않고 있다. 실제 합정의 경우 형상이 복잡하며 제조과정에서의 가공과 같은 기계적인 응력과 용접과 같은 열적 응력을 가지고 있어 자기적으로는 매우 불균일한 자화상태, 즉 매우 큰 자기이방성 분산 특성을 가진다는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 보다 효율적인 합정의 자기처리를 위해서는 탈자 효과에 영향을 미치는 최대 자계의 크기, 자계의 인가방법, 코일의 설치 방법 등 중요한 파라미터들을 합정의 형상이나 자기 이방성 분산을 고려하여 결정하여야 한다. 또한 탈자에 의한 합정의 자기적인 상태를 이론적으로 예측하기 위해서도 자기 공학적인 엄밀한 접근이 반드시 필요하다.

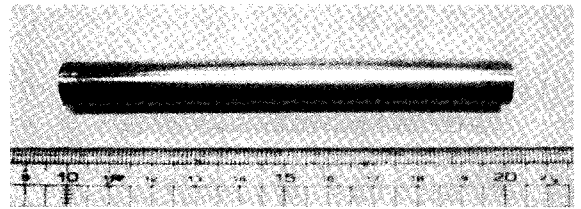
본 논문에서는 탈자에 이용되는 비히스테리시스 자화곡선에 따른 탈자 방식<sup>[3]</sup>을 일반적인 탈자 방식과 비교하였으며 자성체에 대한 착자 방법에 의한 자속 밀도의 불균일성과 강관의 한 쪽 끝에 기계적인 응력을 인가하였을 때 발생하는 불균일한 자기 이방성 분산이 탈자 결과에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

## 2. 실험방법

그림 1은 B-H loop tracer를 이용한 강관의 탈자를 위한 실험 구성을 개략적으로 나타낸 것이다. 탈자 시, 강관이 삽입된 픽업 코일을 솔레노이드 코일 안에 넣고 솔레노이드 코일을 B-H loop tracer의 자계 인가 단자(H 단자)에, 그리고 픽업 코일은 자속 검출단자(B 단자)에 연결하였다. 관의 탈자에 필요한 자계의 크기와 시간을 조정하였으며, 비히스테리시스 자화곡선을 실시간으로 확인하며 탈자를 진행하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용된 강관을 나타낸 것으로 크기는 길이가 100mm, 직경이 10mm, 두께는 0.5mm였다. 응력에 의한 자성체 관의 이방성을 강제적으로 부여하기 위



[그림 1] B-H loop tracer를 이용한 탈자 실험장치

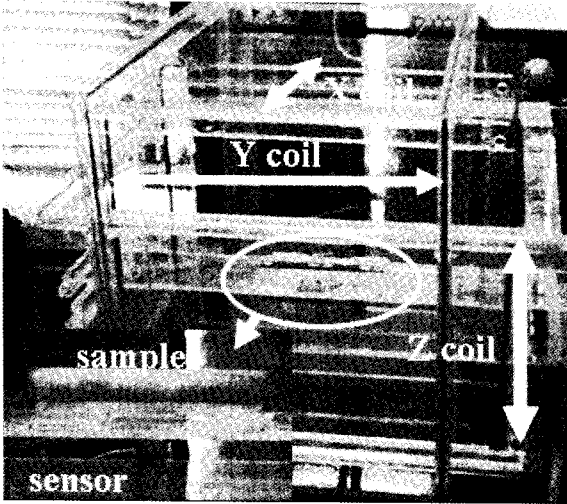


[그림 2] 실험에 이용된 강관

해 관의 한쪽 끝에 면적이  $3 \times 3 \text{mm}^2$ 인 부분에 약 1MPa의 응력을 원주의 중심 방향으로 인가하였다. 비히스테리시스 탈자 시 관의 길이 방향에 직교하는 관의 원주방향으로 자계를 인가할 수 있도록 9회의 코일을 감아 60Hz, 1A의 전류를 흘렸다. 솔레노이드 코일은 직경 2mm의 동선을 길이 400mm, 직경 48mm의 PVC 파이프에 345회 권선하여 제작하였으며 최대 15 A의 전류를 흘렸을 때 3000A/m의 자계를 발생시킬 수 있었다. 픽업 코일은 0.5mm의 동선을 길이 78mm, 직경 22mm의 PVC파이프에 144회 권선하여 제작하였다.

강관의 탈자 과정을 진행하기 전에 E자형 페라이트 요크에 강관을 접촉시키고, 페라이트 요크에 직류 전류를 흘려 착자시켰다. 일반적인 탈자의 경우, 관의 길이방향으로 3000A/m에서 영 자계(Zero-field)까지 루프 한 주기 당 300A/m씩 감소시키면서 자계를 인가하였다. 비히스테리시스 탈자의 경우, 원주방향으로 60 Hz, 300A/m의 교류자계를 인가한 상태에서 관의 길이 방향으로 3000A/m에서 0A/m까지 루프 한 주기 당 300A/m씩 감소시키면서 자계를 인가하였다. 이 경우, 탈자 시간은 B-H loop tracer에서 1루프 당 30 초로 설정하였다.

착자 전, 후에 관의 자화는 코발트(Co)를 주성분으로 하는 길이가 15mm, 직경이 0.125mm인 아몰퍼스 와이어를 이용하여 제작한 플럭스게이트 자계센서로 측정하였다. 측정 시, 관의 길이방향이 동서로 되게 하였고, 측정 중에 측정 공간에 존재하는 지구 자계를



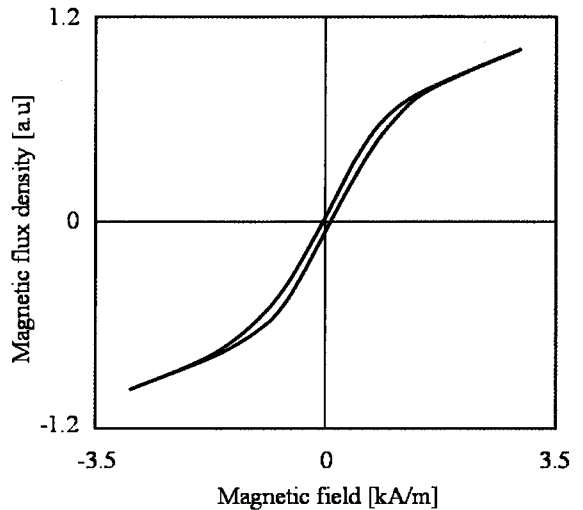
[그림 3] 3축 지구자기 보상 코일

제거하기 위해서 그림 3과 같은 3축 지구자기 보상코일을 이용하였다. 플럭스게이트 자계센서의 출력은 60 kHz의 인가 교류 전류의 제 2조파인 120kHz의 신호의 크기를 lock-in 증폭기를 이용하여 측정하였다. 이때, 강관과 센서 사이의 거리는 수직 측정 시에, 15 mm, 수평 측정 시에 20mm였다.

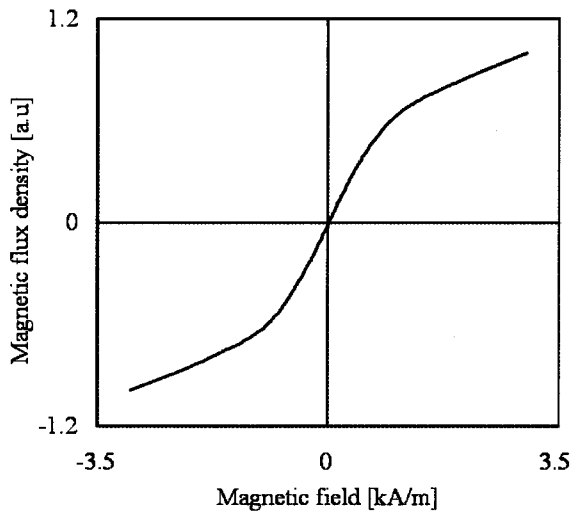
### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 탄소 강관의 히스테리시스 곡선을 B-H loop tracer를 이용하여 측정한 것이다. 그림에서 자속 밀도 B에는 픽업 코일의 공심에 의한 자속밀도도 함께 포함되어 있다. 그림 4(a)의 히스테리시스 자화 곡선에서는 270A/m 정도의 보자력  $H_c$ 을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 비히스테리시스 자화 곡선을 나타낸 것으로 관의 원주방향 자계에 의해 보자력이 상쇄되어 히스테리시스가 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 비히스테리시스 자화 곡선에서 강관 자체의 이력현상(혹은 보자력)이 나타나지 않은 것은 자속밀도를 측정하고자 하는 방향에 대해서 직각 방향으로 바이어스 자계를 인가함으로써 자화 과정이 회전자화(Rotation Magnetization)에 의해서 일어나도록 하였기 때문이다. 그림 5는 E자형 페라이트 코어를 이용하여 강관을 착자시킨 후, 강관의 길이 방향으로 10mm씩 이동하면서 튜브의 길이 방향과 폭 방향에서 발생하는 자속밀도를 측정한 것이다. 측정된 자속밀도

로부터 관의 자화는 관 중심 부근의 넓은 범위에서 수직방향 자계가 크게 발생하고 있으며, 관 양끝으로 갈수록 수평방향의 자계가 강하게 발생하고 있어 E자형 페라이트코어로부터 발생하는 자계의 영향을 반영하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 자속밀도는 관의 중심에서 거의 대칭을 이루고 있으므로 관의 중심 부근에서는 자기모멘트가 관의 두께 방향으로 배열하



(a)

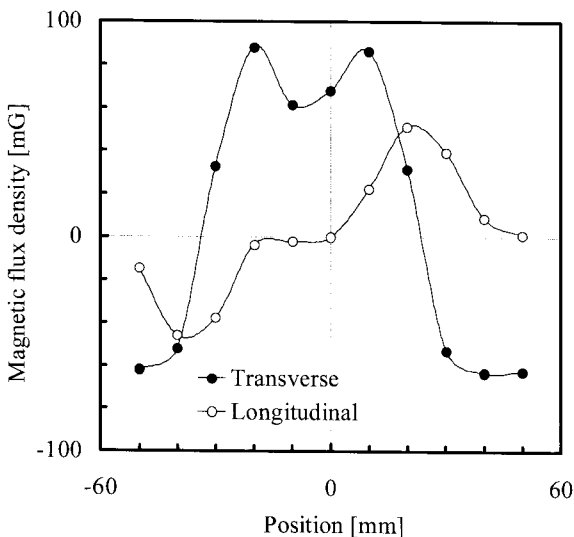


(b)

[그림 4] B-H loop tracer로 측정된 탄소강관의 히스테리시스 자화 곡선(a)와 비히스테리시스 자화 곡선(b)

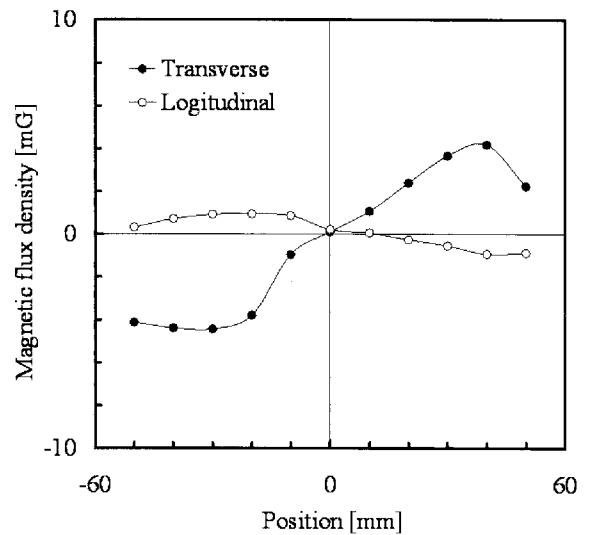
고 있고 양쪽 끝으로 갈수록 자기모멘트의 방향이 길이방향으로 향하는 성분이 많아지는 것으로 생각된다. 또한 그림 5의 결과로부터, 착자 시 발생한 탄소 강관의 자화는 초기에 인가한 응력에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이, 착자 후 강관으로부터 발생하는 최대 자속밀도는 길이 방향으로 88.1mG였으며 폭 방향으로는 51.4 mG였다.

그림 6은 착자된 관을 일반적인 탈자방법으로 탈자한 후에 관으로부터 발생하는 자계의 세기를 측정하는 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 탈자에 의해서 강관으로부터 발생하는 자속밀도가 크게 감소되었다는 것을 알 수 있다. 일반적인 탈자방법으로 처리된 경우, 강관으로부터 발생하는 최대 자속밀도는 길이 방향으로 4.4mG였으며 폭 방향으로는 0.9mG였으며, 탈자를 통해서 자속밀도가 길이 방향으로는 약 95% 감소하였으며 폭 방향으로는 약 98% 감소하였다는 것을 알 수 있다. 특히, 관의 중심 부근에서는 반자계가 작아 탈자 효과가 우수함을 알 수 있다. 그림 7은 비히스테리시스 탈자에 의해 처리된 강관의 자속밀도를 측정하는 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 길이방향성분의 자속밀도는 관 전체에 대해서 고르게 감소하였지만, 폭 방향의 자속밀도의 경우에는 관의 양쪽 끝부분에 대해 서로 다른 경향의 탈자 특성을 나타내고 있다. 이것은 강관의 한쪽 끝에 약 3MPa의 초기 압력을 인가하였기 때문이며 기계적인 응력이 인가된

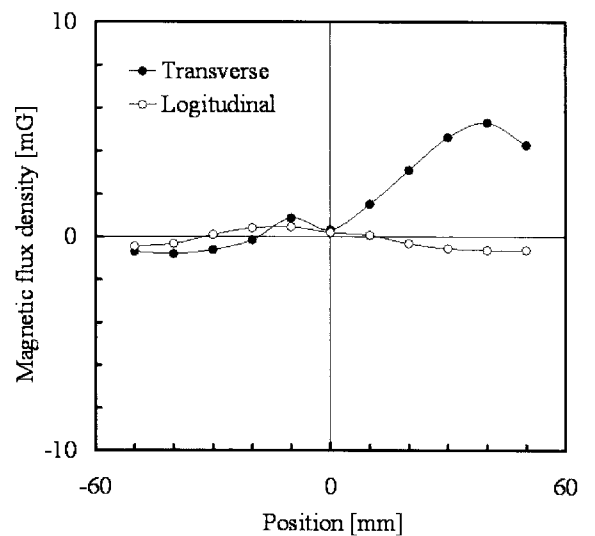


[그림 5] 착자 후 측정된 관의 위치에 따르는 자속밀도

부분은 상대적으로 탈자 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 기계적인 응력이 인가된 부분, 혹은 그 영향을 받은 부분에는 자기탄성에너지가 자성체에 추가됨에 따라 자기 이방성 에너지가 커졌고 탈자를 위해서 인가한 자계의 세기가 이 자기 이방성 에너지에 의한 자기 이방성 자계보다 작은 경우, 자성체의 완전한 탈자는 기대하기 어렵기 때문이다. 비히스테리시스 탈자방



[그림 6] 일반적인 탈자방법으로 처리된 관의 위치에 따른 자속밀도



[그림 7] 비히스테리시스 탈자방법으로 처리된 관의 위치에 따른 자속밀도

법으로 처리된 경우, 강관으로부터 발생하는 최대 자속밀도는 길이 방향으로 0.4mG였으며 폭 방향으로는 응력을 인가하지 않는 쪽은 약 0.8mG, 응력을 인가한 쪽은 약 5.3mG였다. 따라서 비히스테리시스 탈자 방법을 통해 자속밀도가 길이 방향으로 99% 이상 감소하였으며 폭 방향으로는 응력을 인가하지 않은 쪽은 약 99% 감소하였고 응력을 인가한 쪽은 약 94% 감소하였다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 자성체인 강관에 대한 비히스테리시스 자화곡선에 따른 탈자방식과 일반적인 탈자 방식을 비교하였으며, 자성체에 기계적인 응력을 인가하였을 경우 발생하는 불균일한 자기 이방성이 탈자의 결과에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 길이 방향의 자속밀도와 폭 방향의 자속밀도를 검토해 본 결과, 비히스테리시스 탈자 방식이 일반적인 탈자 방식에 비해 효과적이라는 것을 알 수 있었고, 응력이 인가되지 않은 경우 99% 이상의 탈자가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 조건으로 탈자를 할 경우, 응력이 인가된 부분은 응력이 인가되지 않은 부분에 비해 충분히 탈자가 되지 않음을 알 수 있었다. 이것

은 탈자를 성공적으로 하기 위해서는 관 전체의 자기 이방성 에너지의 분포에 대해 충분히 고려할 필요가 있음을 나타내고 있는 것이며, 향후 합정의 탈자를 위해서는 자성체인 합정의 자화구조와 동적 거동을 고려한 자기 공학적 검토가 반드시 필요하다는 것을 의미한다.

#### Reference

- [1] T. M. Baynes, G. J. Russel and A. Bailes, "Comparison of Stepwise Demagnetization Technique", IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No. 4, 2002.
- [2] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, New York, Wiley, p. 258, 1964.
- [3] H. J. de Wit, "On the Interaction between Anhyseretic Magnetization and Demagnetizing Fields in Iron Strips", J. Appl. Phys., Vol. 81, pp. 1838~1846, 1997. Dec.
- [4] Y. Bi and D. C. Jiles, "Measurement and Modeling of Hysteresis in Magnetic Materials Under the Action of an Orthogonal Bias Field", IEEE Trans. Mang. Vol. 35, pp. 3787~3789, 1999.