ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 36(5), 429-438 (2026) https://doi.org/10.4283/JKMS.2026.36.5.429

Effect of Winding Spacing in Discretely Arranged Deperming Coils on Spatial Magnetic Field Distribution and Deperming Performance

Sang Hyeon Im*
Department of Electrical Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Republic of Korea

(Received 3 August 2026, Received in final form 22 October 2026, Accepted 22 October 2026)

A two-dimensional FEM framework coupled with an axial scalar Preisach hysteresis model was used to investigate the effect of winding spacing in discretely arranged deperming coils on the magnetic-field distribution and deperming performance of an SM45C specimen. Nine spaced-coil configurations with normalized gaps of 2.73–8.82% were compared with a dense reference coil. In the air-core condition, the mean absolute vertical field in the central specimen region increased from 348.8 to 851.4 A/m, while the axial component remained near 2 kA/m. With a linear magnetic specimen, the central-region mean field of the spaced coils was 2.9–4.3% lower than that of the reference coil, whereas the coefficient of variation increased from 1.26% to 4.11%. Across five deperming protocols starting from 5,000 A/m, all 45 spaced-coil cases reduced the residual peak field by 2.53–11.93%. C15 showed robust performance, and its final minor-loop area was 12.7% smaller.

Keywords : deperming, magnetic signature, discrete coil, winding spacing, Preisach model, SM45C

이산 배치 탈자 코일의 권선 간격이 공간 자기장 분포 및 탈자 성능에 미치는 영향

임상현*
동의대학교 전기공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176, 47340

(2026년 8월 3일 받음, 2026년 10월 22일 최종수정본 받음, 2026년 10월 22일 게재확정)

본 연구에서는 실제 함정 적용에서 발생할 수 있는 이산 배치 탈자 코일의 권선 간격이 자기장 분포와 탈자 성능에 미치는 영향을, x방향으로 탈자 자기장을 인가하고 x-z 평면의 공간 자기장을 2차원 FEM으로 계산하는 Preisach-FEM 해석을 통해 분석하였다. 시편 길이 대비 간격비 λg = 2.73~8.82%인 9종의 간격 코일과 촘촘한 기준 코일을 비교하였으며, 설계 단계에서는 모든 코일의 중심 자기장을 2,000 A/m로 정규화하여 형상에 따른 공간 분포만을 비교하였다. 공심 상태에서 시편 중앙 100 mm 구간의 평균 |Hz|는 간격 증가에 따라 348.8 A/m에서 851.4 A/m로 증가한 반면, 평균 |Hx|는 약 2 kA/m 수준을 유지하였다. 선형 자성 시편을 삽입하면 간격 코일의 중앙부 평균 자기장은 기준 코일보다 약 2.9~4.3% 낮은 범위로 나타났으나, 변동계수는 1.26%에서 최대 4.11%로 증가하여 권선 주기에 대응하는 공간적 변조가 유지되었다. 초기 인가 자기장 5,000 A/m에서 시작하는 5종의 탈자 프로토콜을 적용한 결과, 45개 모든 간격 코일 조건에서 기준 코일보다 낮은 잔류 자기장이 나타났으며 감소율은 2.53~11.93%였다. C15는 프로토콜 변화에도 강건한 성능을 보였으며, 시편 중앙의 최종 minor-loop 면적은 기준 코일보다 12.7% 작았다.

주제어 : 탈자, 자기 신호, 이산 배치 코일, 권선 간격, Preisach 모델, SM45C

I. 서 론

함정은 강자성 선체가 지구 자기장 및 운용 이력에 의해 자화되면서 고유의 자기 신호를 형성하며, 이러한 신호는 자기 기뢰 및 자기 탐지 체계에 대한 취약성을 증가시킬 수 있다. 함정의 영구 및 잔류 자기 성분을 저감하기 위해 감쇠 교번 자기장을 인가하는 탈자(deperming)가 널리 사용되며, Preisach 기반 히스테리시스 모델과 유한요소법을 이용한 수치해석은 탈자 과정의 비선형 자화 이력을 해석하는 데 활용되어 왔다[1-5].

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-51-890-2434, e-mail: ish@deu.ac.kr

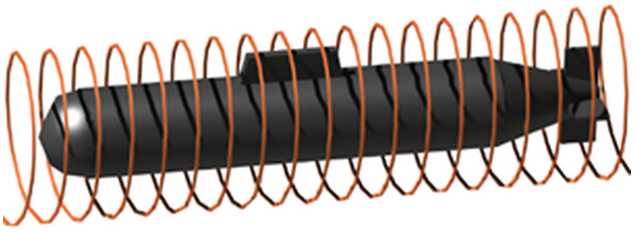


Fig. 1. (Color online) Conceptual illustration of discretely arranged deperming coils around a ship hull.

기존 탈자 연구에서는 표적보다 길고 권선 간격이 작은 솔레노이드 코일을 사용하여 표적 영역에 가능한 한 균일한 축방향 자기장을 형성하는 경우가 많다[3,4]. 그러나 실제 함정의 탈자 코일은 선체 구조, 설치 공간 및 배선 제약으로 인해 연속적으로 조밀하게 감기기 어렵고, Fig. 1과 같이 여러 개의 코일이 일정 간격을 두고 이산적으로 배치될 수 있다. 이 경우 코일 중심에서 동일한 목표 자기장을 확보하더라도 실제 표적 위치에서는 권선 사이의 자기장 리플과 수직 성분이 발생할 수 있으며, 자성체가 삽입되면 반자장과 자화에 의해 내부 자기장 분포가 다시 변화한다.

따라서 탈자 코일 설계에서 중요한 질문은 단순히 “얼마나 균일한 공심 자기장을 형성하는가”가 아니라, “자성체가 없는 설계 단계에서 동일한 명목 자기장을 갖도록 설정된 코일이 실제 자성 표적에 적용될 때 어떠한 내부 자기장 이력과 탈자 성능 차이를 만드는가”이다. 실제 코일의 인가 전류는 통상 목표 자기장과 코일 형상·권선수를 기준으로 산정되며, 특정 표적 내부의 국부 자기장을 사전에 일치시키기 위해 코일별 전류를 다시 보정할 경우 필요한 전류는 표적의 투자율, 형상 및 자화 상태에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 표적 의존적인 내부장 일치 조건이 아니라 공심 설계조건을 공통 기준으로 채택하였다. 특히 탈자 성능은 재료의 히스테리시스 경로에 의존하므로, 동일한 공심 설계조건이 실제 자성 표적에서 어떠한 비선형 내부장 이력을 형성하는지를 직접 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 SM45C 중공 원통을 대상으로 촘촘한 기준 코일과 9종의 이산 배치 코일을 비교하였다. 먼저 시편이 없는 상태에서 코일 중앙선의 목표 자기장을 2,000 A/m로 맞춘 뒤, 실제 시편 위치에서 권선 간격에 따른 Hx 및 Hz 성분 변화를 분석하였다. 다음으로 자성 시편을 삽입하여 내부 자기장 분포의 공간적 변조를 비교하였다. 이어서 초기 인가 자기장 5,000 A/m에서 시작하는 36, 32, 28, 24 및 20샷 선형 감쇠 프로토콜을 적용하여 검토된 감쇠 분해능 범위에서 간격 코일의 상대적 성능이 유지되는지 확인하였다. 마지막으로 대표 위치의 국부 Bx-Hx 이력을 이용하여 동일한 공심 설계조건에서 실제 내부 자기장 이력이 어떻게 달라지는지를 비교하였다. 본 연구에서는 자기장 진폭과 공간 분포의 기여도를 독립적으로 정량 분리하지 않으며, 관찰된 내부장 차이와 잔류 자기장 변화의 상대적 경향을 중심으로 해석하였다.

II. 해석 모델 및 방법

1. Preisach-FEM 해석 프로그램

본 연구에서는 자체 개발한 Preisach-FEM 해석 프로그램을 사용하였다. 해석은 x-z 직각좌표계의 2차원 평면 모델로 수행하였으며, x축은 시편의 길이방향, z축은 수직방향으로 정의하였다. 공간 자기장 계산은 자기정적 조건에서 2차원 FEM으로 수행되며, H_x와 H_z 성분을 함께 고려하였다. 모든 코일 모델에는 동일한 외곽 해석영역과 경계조건을 적용하였다. Preisach-FEM 프레임워크 자체는 선행 연구에서 실험 및 해석 결과와 비교되어 잔류 자기장 분포와 탈자 경향을 재현한 바 있다[5-8].

탈자 이력은 축방향 B_x-H_x 응답에 대해 스칼라 Preisach 모델을 적용하였다. 각 감쇠 단계에서 FEM으로 계산된 국부 H_x를 이용하여 Preisach 자화상태를 갱신하고, 이를 다음 FEM 계산에 반영하는 방식으로 연성하였다. 모든 조건에는 동일한 SM45C 재료모델을 적용하였다. H_z는 2차원 FEM에서 공간적으로 계산되지만, 횡방향 성분에 대한 독립적인 벡터 히스테리시스 및 회전자화 효과는 본 모델의 범위에 포함되지 않는다.

2. 코일 및 시편 모델

Fig. 2는 해석 모델의 형상을 나타낸다. 기준 모델은 촘촘한 권선을 등가적으로 표현한 연속 전류 시트형 기준 코일이며, 비교 모델은 권선 수를 27개에서 11개까지 감소시키면서 축방향 배치 간격을 증가시킨 9종의 이산 배치 코일이다. 본 연구의 권선 간격 d는 인접 이산 권선 중심선 사이의 축방향 거리로 정의하였다. 모든 간격 코일은 홀수 개 권선을 x = 0을 기준으로 대칭 배치하여 시편 중심에 하나의 권선이 위치하도록 하였으며, 나머지 권선은 ±d, ±2d, …의 위치에 배치하였다.

솔레노이드 길이는 557 mm, 직경은 60.4 mm이며, SM45C 시편은 길이 Ls = 298 mm, 외경 44 mm, 두께 1 mm의 중공 원통으로 모델링하였다. 시편 두께를 1 mm로 설정한 것은 두께가 두꺼운 경우 형상에 의한 반자장이 과도하게 커져 인가 자기장이 시편 내부로 충분히 침투하지 못하기 때문이다. 탈자 후 잔류 자기장은 시편 중심에서 수직 하방 160 mm에 위치한 센서선(x = –1,500~1,500 mm)에서 계산하였다.

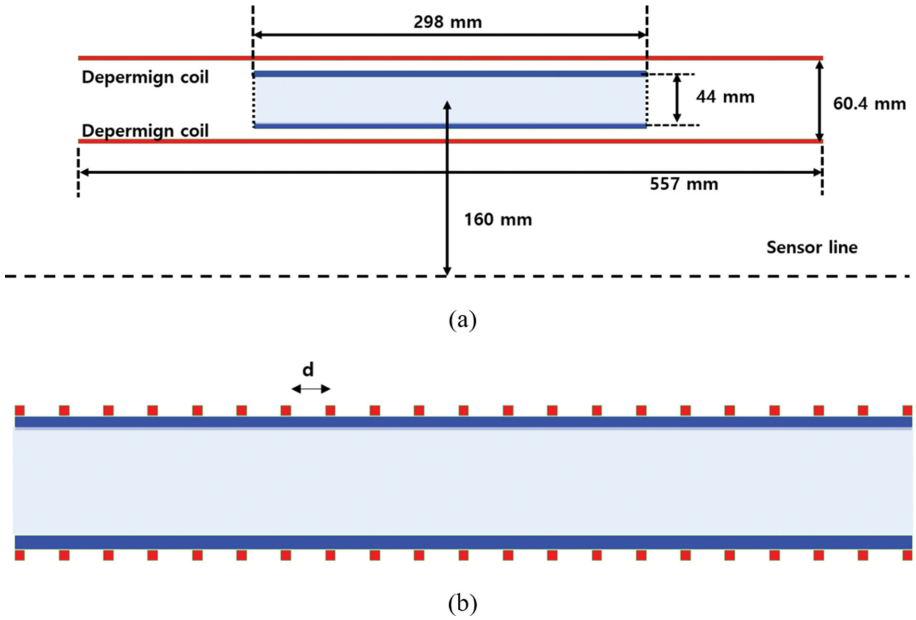


Fig. 2. (Color online) Analysis models: (a) densely wound reference coil with dimensions and sensor geometry, (b) discretely spaced coil with winding gap d. All other dimensions are identical to (a).

Table I. Specifications of the analyzed coil models and applied current density at H_o = 5,000 A/m.

Model	No. of windings	Gap d (mm)	λg (%)	Applied J_0 (A/mm^2)
Dense	–	–	– (reference)	6.970
C27	27	8.14	2.73	25.061
C25	25	9.08	3.05	27.141
C23	23	10.20	3.42	29.597
C21	21	11.54	3.87	32.543
C19	19	13.18	4.42	36.137
C17	17	15.225	5.11	40.613
C15	15	17.857	5.99	46.329
C13	13	21.367	7.17	53.860
C11	11	26.28	8.82	64.031

3. 정규화 간격 및 코일 설계 조건

권선 간격의 규모 의존성을 줄이기 위해 간격 d를 시편 길이 Ls로 정규화한 간격비를 사용하였다.

$$\lambda g = d/Ls \times 100\ (\%) \quad (1)$$

해석 범위는 λg = 2.73~8.82%이다. 코일 설계 단계에서는 실제 탈자설비에서와 같이 자성 표적의 내부장을 사전에 역산하여 맞추는 대신, 자성체가 없는 선형 정자계 조건에서 각 코일의 솔레노이드 중심 자기장이 2,000 A/m가 되도록 코일 영역의 인가 전류밀도를 정규화하였다. 이는 동일한 명목 설계 자기장을 형성하도록 설정된 서로 다른 권선 배치가 실제 표적에서 어떤 자기장 재분포와 탈자 결과를 만드는지를 비교하기 위한 기준이다. 해석 프로그램에서 코일 excitation은 전류밀도 J_o로 부여되며, H_o = 5,000 A/m의 초기 탈자장에 대응하는 각 모델의 J_o는 Table I에 제시하였다. 권선 수가 감소할수록 동일한 명목 공심 자기장을 형성하기 위해 요구되는 전류밀도는 증가한다. 시편 삽입에 따른 정적 분포를 비교할 때에는 동일 형상의 시편에 비투자율 μr = 1,000의 선형 재료모델을 적용하여 코일 배치와 반자장에 따른 공간 분포 차이를 분리해 평가하였다.

4. 탈자 프로토콜

탈자 해석에서는 SM45C의 비선형 히스테리시스 특성을 고려하였다. 모든 코일을 동일한 높은 자기장 영역에서 시작시키기 위해 초기 인가 자기장 H_o를 5,000 A/m로 설정하였다. 이 값은 완전 포화를 보장한다는 의미가 아니라, 비교 코일 모두에 동일하게 적용한 충분히 큰 초기 자화 조건이다. 본 해석에 적용한 SM45C의 major B-H 곡선은 Fig. 3에, Preisach density distribution은 Fig. 4에 제시하였다. 재료모델의 주요 자기특성은 B_s = 1.67 T, B_r = 1.15 T, H_c =

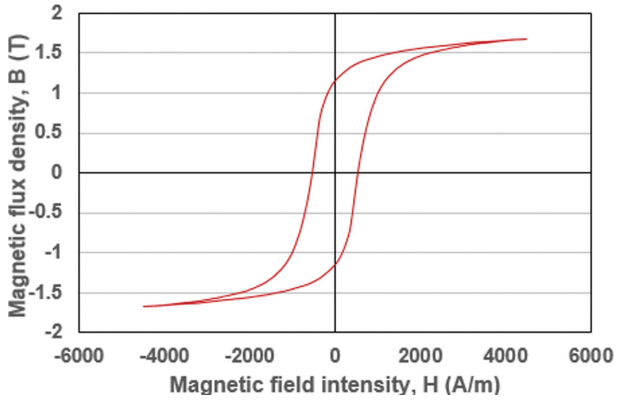


Fig. 3. (Color online) Major B-H hysteresis loop of SM45C used for the material model. The initial deperming field H_0 = 5,000 A/m corresponds to a high-field state; complete saturation is not assumed.

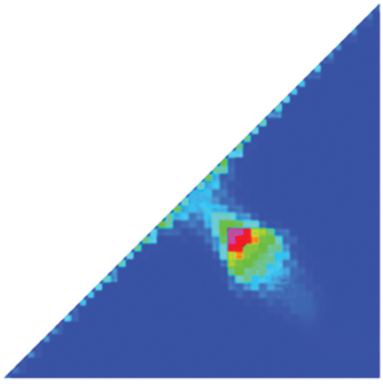


Fig. 4. (Color online) Preisach density distribution of SM45C used in the present Preisach-FEM analysis.

534.60 A/m이며, H_0는 Hc의 약 9.35배에 해당한다. Fig. 4의 density distribution은 본 연구에서 사용한 SM45C Preisach 재료모델이 실제 density 기반으로 구성되어 있음을 보여주는 보조 자료이다. 따라서 H_0 = 5,000 A/m는 엄밀한 완전 포화를 가정하기 위한 값이 아니라, 모든 비교조건을 충분히 큰 비선형 초기 자화 상태에서 시작시키기 위한 공통 기준으로 설정하였다. 이후 인가 자기장의 극성을 교대로 반전하면서 진폭을 선형적으로 감소시켰다. 감쇠 분할수 N은 36, 32, 28, 24 및 20으로 설정하였으며, 본 연구에서 N의 변화는 선형 감쇠 파형의 분해능($\Delta H = H_o/N$)을 변화시키기 위한 것이다.

$$H_x^{(k)} = (-1)^k \, H_o \, (1 - k/N), \; k = 0, \, 1, \, \ldots, \, N \tag{2}$$

여기서 k는 감쇠 단계, N은 0까지 도달하는 감쇠 구간 수이다. k = 0부터 N – 1까지가 실제 비영(非零) 인가 단계이며, k = N은 진폭이 0이 되는 종료점을 나타낸다. 따라서 본문에서 36, 32, 28, 24 및 20샷으로 표기한 조건은 각각 N = 36, 32, 28, 24 및 20의 감쇠 구간을 의미한다. 스텝당 진폭 감소량 $\Delta H = H_0/N$은 각각 138.9, 156.3, 178.6, 208.3 및 250.0 A/m이다. 본 논문에서 논의하는 프로토콜 강건성은 이 선형 감쇠 계열과 N = 20~36 범위에 한정된다.

5. 평가 지표

정적 자기장 분포의 Mean, CV, Min 및 Max는 모두 시편 길이 방향 중앙 100 mm($|x| \le 50$ mm) 구간에서 산출하였다. 시편 끝단의 강한 반자장 영향을 별도로 확인하기 위한 max |Hz| 지표만 중앙 90% 구간에서 평가하였다. 따라서 Table III의 Mean, CV, Min 및 Max와 중앙 90%의 max |Hz|는 서로 다른 평가구간을 사용한다.

$$CVH = \sigma(|H|)/mean(|H|) \times 100 \; (\%) \tag{3}$$

탈자 후 성능은 센서선에서 합성 잔류 자기장의 최대값을 대표 지표로 사용하였다.

$$Bres,peak = max \; [Bx(x)^2 + Bz(x)^2]\text{^}(1/2) \tag{4}$$

또한 |Bx|max, |Bz|max 및 Bres,RMS를 함께 계산하여 축방향과 수직방향 잔류 자기 성분의 변화를 비교하였다. 센서선은 x = –1,500~1,500 mm 범위에서 30 mm 간격, 총 101개 위치로 샘플링하였으며, Bres,RMS는 이 101개 전 평가점에 대해 계산하였다. 프로토콜 변화에 대한 간격별 성능 순위의 일관성은 Kendall의 일치계수 W를 보조 지표로 사용하였다. W는 반올림 전 Bres,peak 원자료의 순위를 이용해 계산하였으며, 검토된 데이터에서는 동순위가 발생하지 않았다. 표의 잔류 자기장은 가독성을 위해 소수점 첫째 자리까지 표시하되 감소율과 순위 계산에는 반올림 전 원자료를 사용하였다.

III. 코일 설계 단계의 자기장 분포

1. 솔레노이드 중앙선의 자기장 정규화

시편이 없는 상태에서 모든 코일의 솔레노이드 중심점 기준 2,000 A/m 정규화 조건이 충분히 만족되었다(2,000.0~2,002.6 A/m). 이 결과만 보면 각 코일은 동일한 인가장 조건을 형성하지만, 실제 시편이 위치하는 반경에서는 권선 배치에 의해 벡터 자기장 성분이 달라진다.

2. 시편이 없는 조건에서 시편 위치의 Hx 및 Hz 성분

시편 위치의 중앙 100 mm 구간에서 촘촘 코일의 평균 |Hx|는 1,999.4 A/m, 평균 |Hz|는 1.9 A/m로 거의 순수한 길이 방향 자기장을 형성하였다. 반면 간격 코일에서는 평균 |Hx|가 대체로 약 2 kA/m 수준을 유지하면서 평균 |Hz|가 간격 증가에 따라 348.8 A/m에서 851.4 A/m로 증가하였다(Table II, Fig. 5(a)). 즉 중심점 자기장 정규화는 실제 시편

Table II. Field components in the central 100-mm region at the specimen position under the air-core condition.

Model	λg (%)	Mean |Hx| (A/m)	Mean |Hz| (A/m)	|Hz|/|Hx|
Dense	–	1999.4	1.9	0.001
C27	2.73	2000.9	348.8	0.174
C25	3.05	2006.3	380.9	0.190
C23	3.42	1973.0	423.6	0.215
C21	3.87	2018.6	497.7	0.247
C19	4.42	2011.6	545.0	0.271
C17	5.11	1951.5	599.3	0.307
C15	5.99	2036.0	737.7	0.362
C13	7.17	2027.3	795.5	0.392
C11	8.82	1888.2	851.4	0.451

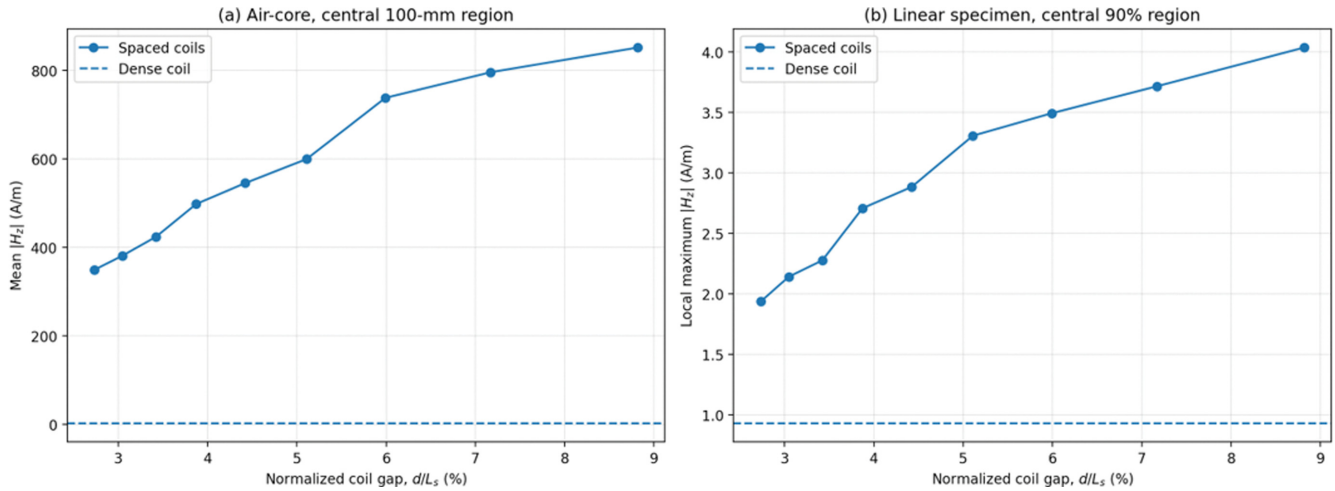


Fig. 5. (Color online) Vertical field component versus normalized coil gap: (a) mean absolute value in the central specimen region under the air-core condition, (b) local maximum within the central 90 % of the linear magnetic specimen (μr = 1,000).

위치의 벡터 자기장 분포를 동일하게 만들지 못하며, 간격 증가의 주요 특징은 수직 성분의 증가와 국부 자기장 리플의 형성으로 나타났다.

9개 간격 코일에서 중앙 100 mm 평균 |Hz|와 정규화 간격비 사이의 선형 상관은 결정계수 R^2 = 0.954로 강한 증가 경향을 보였다. |Hz|/|Hx| 비는 C27의 0.174에서 C11의 0.451까지 증가하였다. 이는 이산 권선 사이에서 자속선의 방향이 축방향에서 벗어나는 효과가 간격 증가와 함께 커짐을 보여준다.

한편 코일 중심으로부터 시편 위치까지의 축방향 자기장 전달률은 촘촘 코일 100.0%, 간격 코일 평균 99.5%로 뚜렷한 차이가 없었으며 간격비와의 상관도 약하였다(R^2 = 0.212). 즉 공심 조건에서 권선 간격의 효과는 축방향 성분의 세기 변화가 아니라 수직 성분의 발생으로 나타난다.

3. 시편 삽입 후 내부 자기장 분포

자성 시편을 삽입하면 공심 상태에서 크게 나타났던 공간적 차이가 내부 자기장에서는 상당 부분 압축되었다. 중앙 100 mm 구간의 평균 |H|는 촘촘 코일에서 288.6 A/m였으며, 간격 코일은 276.3~280.2 A/m 범위였다. 그러나 촘촘 코일의 변동계수가 1.26%인 데 비해 간격 코일은 1.53~4.11%로 증가하여 권선 주기에 대응하는 국부 변조가 유지되었다(Table III).

특히 C15(λg = 5.99%)는 중앙 100 mm 평균 |H|가 280.2 A/m로 촘촘 코일보다 약 2.92% 낮지만, 시편 중심점의 |H|는 295.5 A/m로 촘촘 코일(292.7 A/m)보다 오히려 약간 높았다. 이는 간격 코일의 특성이 단순한 전체 자기장 감소가 아니라 위치에 따라 높은 영역과 낮은 영역이 반복되는 공간적 변조임을 의미한다(Fig. 6).

수직 성분 역시 시편 자화와 반자장에 의해 공심 대비 크게 감소하였지만, 중앙 90% 구간의 국부 |Hz| 최대값은 촘촘 코일의 0.93 A/m에서 C27의 1.94 A/m, C15의 3.49 A/m, C11의 4.04 A/m로 단조 증가하였다(Fig. 5(b), Fig. 7). 최대 간격 조건에서는 촘촘 코일의 약 4.3배에 달한다. 따라서 자성 시편이 존재하더라도 이산 권선에 의한 성분별 공간 변조는 완전히 사라지지 않는다.

Table III. Internal magnetic-field characteristics with the specimen present.

Model	λg (%)	Mean |H|, central 100 mm (A/m)	CVH, central 100 mm (%)	Min |H|, central 100 mm (A/m)	Max |H|, central 100 mm (A/m)	Max |Hz|, central 90% (A/m)
Dense	–	288.6	1.26	280.5	292.7	0.93
C27	2.73	279.8	1.53	268.9	287.1	1.94
C25	3.05	279.9	1.57	271.4	287.8	2.14
C23	3.42	279.7	1.77	269.1	288.6	2.28
C21	3.87	280.1	1.73	268.3	289.7	2.71
C19	4.42	280.2	1.88	271.0	291.2	2.88
C17	5.11	279.8	2.36	267.5	293.1	3.31
C15	5.99	280.2	2.39	266.0	295.5	3.49
C13	7.17	279.6	2.91	268.3	298.7	3.72
C11	8.82	276.3	4.11	260.8	302.3	4.04

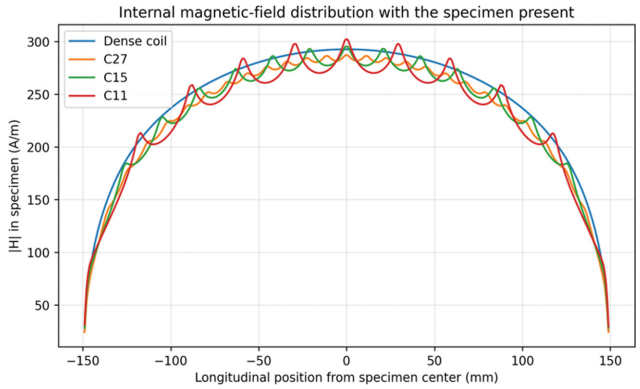


Fig. 6. (Color online) Internal magnetic-field magnitude along the linear magnetic specimen (μr = 1,000) for representative coil configurations, showing the periodic spatial modulation of the spaced coil.

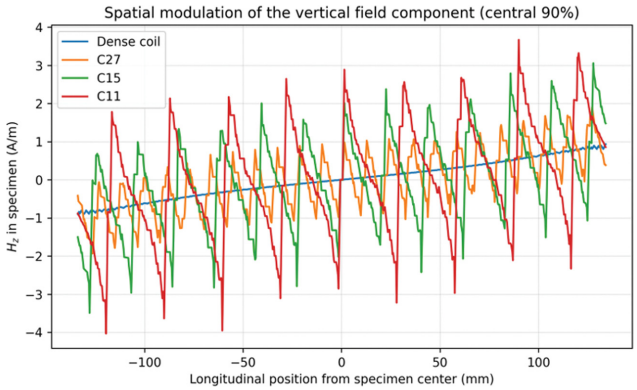


Fig. 7. (Color online) Spatial modulation of the vertical field component Hz with the linear magnetic specimen (μr = 1,000).

IV. SM45C 탈자 해석 결과

1. 합성 잔류 자기장

SM45C 시편에 대한 기준 격자 탈자 해석 결과, 9개 간격 코일 × 5개 프로토콜의 총 45개 조건에서 모두 촘촘 코일보다 낮은 Bres,peak가 나타났다(Table IV, Fig. 8). 감소율은 2.53~11.93%이며 전체 평균은 6.22%였다. 다만 이 범위의 최소값과 같이 수 퍼센트 수준의 작은 차이는 수치 분해능의 영향을 받을 수 있으므로, 본 연구에서는 개별 최소 감소율 자체보다 여러 간격·프로토콜에서 반복적으로 나타나는 상대적 경향을 중심으로 해석하였다.

샷수를 변화시킨 목적은 서로 다른 탈자법 전반을 대표하기 위한 것이 아니라, 동일한 선형 감쇠 형식에서 감쇠 분해능이 바뀌어도 간격 코일의 상대적 경향이 유지되는지를 확인하기 위한 것이다. 각 프로토콜에서 절대 잔류 자기 수준

Table IV. Peak residual magnetic field Bres,peak (μT) after deperming. Values in parentheses are reduction ratios (%) relative to the dense coil.

Model	λg (%)	36 shots	32 shots	28 shots	24 shots	20 shots
Dense	–	53.6	59.8	73.5	94.2	115.8
C27	2.73	50.2 (6.2)	56.9 (4.9)	68.3 (7.1)	88.1 (6.4)	111.8 (3.5)
C25	3.05	49.3 (8.0)	57.0 (4.7)	68.6 (6.7)	87.6 (7.0)	110.8 (4.4)
C23	3.42	50.1 (6.4)	57.8 (3.4)	68.7 (6.6)	88.6 (6.0)	112.2 (3.1)
C21	3.87	50.3 (6.1)	57.6 (3.8)	69.2 (5.9)	90.7 (3.7)	112.9 (2.5)
C19	4.42	50.1 (6.4)	57.8 (3.4)	68.7 (6.6)	89.3 (5.1)	112.8 (2.6)
C17	5.11	50.2 (6.3)	57.5 (3.9)	67.3 (8.5)	88.6 (5.9)	111.7 (3.5)
C15	5.99	47.2 (11.9)	55.5 (7.3)	65.7 (10.7)	85.0 (9.8)	106.7 (7.9)
C13	7.17	49.7 (7.3)	57.4 (4.0)	67.8 (7.8)	87.9 (6.6)	111.0 (4.2)
C11	8.82	48.1 (10.3)	56.5 (5.5)	65.6 (10.8)	85.3 (9.4)	106.9 (7.7)

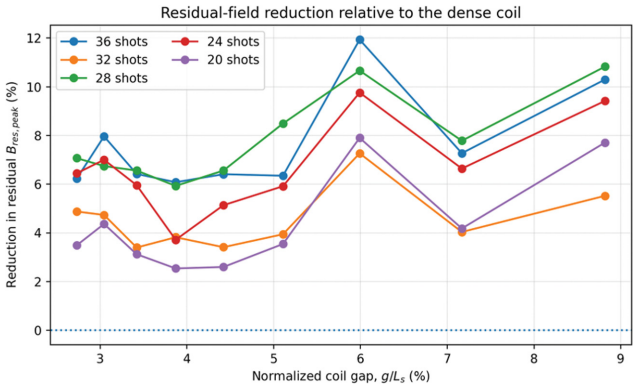


Fig. 8. (Color online) Reduction in peak residual magnetic field relative to the densely wound reference coil.

은 크게 달라졌지만, 기준 격자에서는 간격 코일이 촘촘 코일보다 낮은 잔류 자기를 보이는 방향이 5개 조건에서 반복되었다. 최소 개선율 조건의 수치 민감도는 6장에서 별도로 검토하였다.

2. 프로토콜 변화에 대한 간격별 성능의 강건성

간격 코일 중 C15(λg = 5.99%)는 36, 32, 24 및 20샷에서 가장 낮은 Bres,peak를 나타냈다. 28샷에서는 C11이 65.57 μT로 가장 낮았고 C15는 65.69 μT로 차이가 약 0.18%에 불과하였다. 5개 프로토콜에 대한 C15의 평균 감소율은 9.50%이며, 가장 불리한 프로토콜에서도 7.26%의 감소를 유지하였다. C11 역시 평균 8.75%의 감소를 보였다.

9개 간격 코일의 프로토콜별 Bres,peak 순위에 대한 Kendall 일치계수는 W = 0.833으로 나타났다. 이 값은 반올림 전 잔류 자기장 원자료를 이용하여 계산하였으며 동순위는 없었다. 따라서 W = 0.833은 N = 20~36의 동일 선형 감쇠 계열 안에서 간격별 상대 순위가 비교적 일관되었음을 의미할 뿐, 다른 감쇠 법칙이나 실제 운전조건 전반에 대한 물리적 강건성을 직접 증명하는 지표로 해석하지 않았다.

다만 C15와 C11 사이에 위치한 C13의 평균 감소율은 5.98%로 두 조건보다 낮아 간격비와 성능 사이에 단조 관계가 존재하지 않았다. 이는 단일한 간격비뿐 아니라 권선의 절대 위치, 권선 직하부와 권선 사이에서 형성되는 국부 Hx 분포, 그리고 탈자 중 각 위치의 히스테리시스 경로가 복합적으로 작용할 가능성을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 C15를 전역 최적값으로 제시하지 않고, 검토 범위에서 반복적으로 우수한 결과를 보인 대표 설계 후보로 제한하여 해석하였다. C15 인근의 세부 간격 최적화는 별도의 최적설계 문제로 남긴다.

3. 잔류 자기장의 성분별 특성

잔류 자기장을 Bx와 Bz 성분으로 분리하여도 간격 코일의 개선 경향은 유지되었다(Table V). C15의 5개 프로토콜 평균 감소율은 |Bx|max에서 9.78%, |Bz|max에서 10.20%, Bres,RMS에서 11.26%였다. 즉 C15의 성능 향상은 특정 성분 하나의 감소에 국한되지 않고 센서선의 축방향 및 수직방향 잔류 신호 모두에서 나타났다.

Table V. Reduction ratios (%) of the C15 coil relative to the dense coil for residual-field metrics.

Shots	Bres,peak	|Bx|max	|Bz|max	Bres,RMS
36	11.93	12.21	12.68	13.74
32	7.26	7.54	7.95	8.99
28	10.66	10.92	11.21	12.22
24	9.76	10.04	10.58	11.69
20	7.89	8.18	8.57	9.67
Mean	9.50	9.78	10.20	11.26

다만 |Bz|max/|Bx|max와 같이 서로 다른 공간 위치에서 발생하는 최대값의 비를 잔류 자화 벡터의 방향각으로 직접 해석할 수는 없다. 36샷 조건을 예로 들면 |Bx|max는 시편 중심 직하부(x = 0)에서, |Bz|max는 시편 단부 부근(x = ±150 mm)에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이를 잔류 자화 방향의 불변성으로 해석하지 않고, 두 성분의 최대 크기가 유사한 비율로 감소한다는 성분별 신호 특성으로 제한하여 해석하였다.

V. 자기장 분포와 탈자 성능의 관계

1. 정적 자기장 분포만으로 설명되지 않는 탈자 성능

정적 설계 해석에서 간격이 증가할수록 공심 시편 위치의 |Hz|와 공간적 리플은 명확하게 증가하였다. 시편 삽입 후에는 이러한 차이가 크게 압축되었으나, C15의 중앙 100 mm 평균 |H|는 촘촘 코일보다 약 2.92% 낮고 변동계수는 1.26%에서 2.39%로 증가하였다. 즉 C15가 더 균일하거나 더 큰 평균 내부 자기장을 형성하기 때문에 탈자 성능이 향상된 것은 아니다.

그럼에도 C15는 모든 프로토콜에서 촘촘 코일보다 낮은 잔류 자기를 보였다. 이는 정적 평균장이나 변동계수의 단일 지표만으로 비선형 탈자 결과를 충분히 설명하기 어렵고, 감쇠 교번 자기장이 진행되는 동안 형성되는 실제 내부 자기장 이력과 함께 해석할 필요가 있음을 시사한다. 이산 권선은 권선 직하부와 권선 사이에서 서로 다른 국부 자기장 분포를 만들 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 공간적 변조와 국부 진폭 차이의 기여도를 독립적으로 정량 분리하지 않았다.

2. 시편 중앙의 국부 B-H 이력 비교

36샷 조건에서 시편 중앙 x = 0의 국부 Bx-Hx 이력을

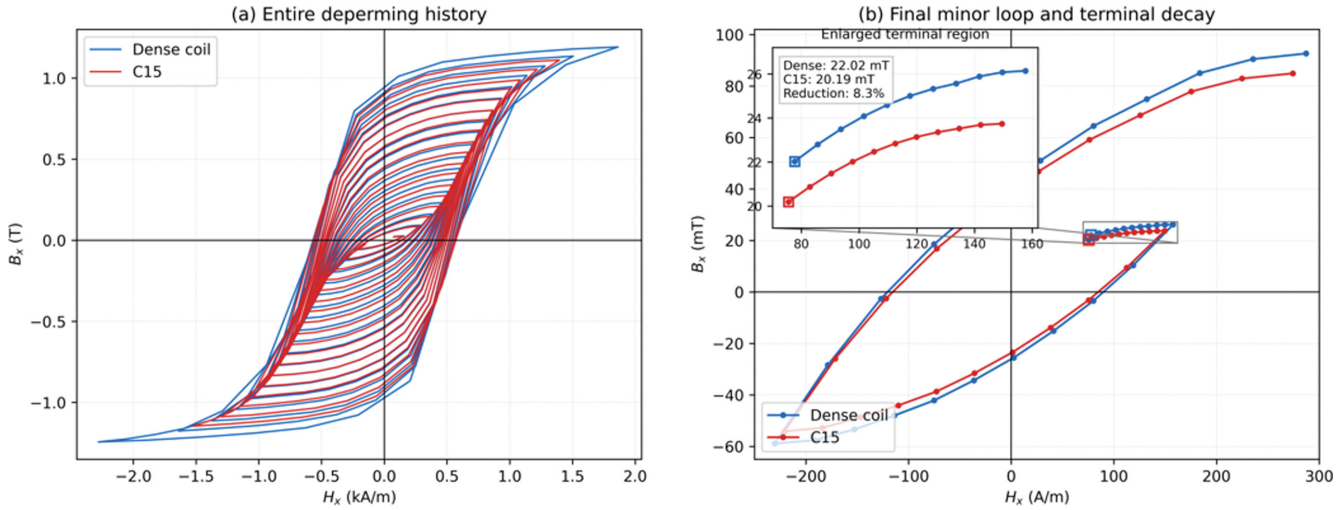


Fig. 9. (Color online) Comparison of local Bx-Hx trajectories at the specimen center (x = 0) under the 36-shot deperming protocol: (a) entire deperming history and (b) final minor loop and terminal decay. Squares denote the terminal points.

Table VI. Comparison of representative local B-H trajectory metrics at the specimen center (36 shots).

Metric	Dense	C15	Difference
Local peak |Hx| (A/m)	2277.6	1522.3	–33.2%
Local peak |Bx| (T)	1.244	1.146	–7.8%
Positive Br at Hx = 0 (mT)	42.86	39.41	–8.1%
|Negative Br| at Hx = 0 (mT)	26.12	23.75	–9.1%
Final Bx-Hx minor-loop area (normalized)	1.000	0.873	–12.7%
Terminal Hx (A/m)	77.65	75.52	–2.7%
Terminal Bx (mT)	22.02	20.19	–8.3%

촘촘 코일과 C15에 대해 비교하였다(Fig. 9, Table VI). 전체 탈자 이력에서 촘촘 코일의 국부 최대 |Hx|는 2,277.6 A/m, C15는 1,522.3 A/m로 C15에서 33.2% 낮았으며, 국부 최대 |Bx|는 각각 1.244 T와 1.146 T였다. Fig. 9(a)의 전체 궤적은 동일한 명목 공심 설계조건에서도 자성 시편 내부에 형성되는 Hx 감쇠 이력이 코일 배치에 따라 달라짐을 보여준다.

여기서 3.3절의 선형 정적 해석값(중심점 |H| 292.7 A/m 대 295.5 A/m)과 본 절의 비선형 국부 최대 |Hx|(2,277.6 A/m 대 1,522.3 A/m)는 크기와 대소 관계가 다르다. 정적 해석은 2,000 A/m 공심 설계조건에서 μr = 1,000의 선형 재료를 이용해 형상에 따른 공간 분포를 비교하기 위한 screening analysis인 반면, 탈자 해석은 H_o = 5,000 A/m에서 시작하는 Preisach 이력문제로서 재료상태와 자화이력이 매 단계 갱신된다. 따라서 선형 정적 해석의 중심장 유사성이 비선형 탈자 해석의 국부 peak Hx 유사성을 보장하지 않는다. 실제로 Dense는 C15보다 더 큰 국부 Hx와 Bx 영역까지 진행하며, 두 코일은 동일한 명목 공심 입력에서도 서로 다른 비선형 이력경로를 형성한다. 이러한 peak 차이는 별도로 부여한 입력조건이 아니라 동일한 공심 설계조건에서 나타난 해석 결과이며, 본 연구에서는 공심 설계기준에서 형성되는 실제 내부 이력의 차이를 비교하였다.

마지막 감쇠 구간의 양·음 분지에서 Hx = 0으로 선형 보간한 잔류 Bx는 촘촘 코일에서 +42.86 mT와 –26.12 mT, C15에서 +39.41 mT와 –23.75 mT였다. 두 분지의 공통 Hx 범위에서 사다리꼴 적분으로 계산한 최종 Bx-Hx minor-loop 면적은 C15에서 약 12.7% 작았다. 또한 마지막 기록점의 Hx는 각각 77.65 A/m와 75.52 A/m로 유사한 반면 Bx는 22.02 mT에서 20.19 mT로 8.3% 감소하였다. 다만 이러한 결과는 x = 0 한 위치의 국부 이력으로서 전체 시편의 잔류자화 분포를 직접 대표하는 인과 증거라기보다, 외부 잔류장 감소와 함께 관찰된 대표적인 국부 이력 차이로 해석하였다.

3. 설계적 의미

본 연구의 원래 설계 목적은 권선 간격을 증가시킬 때 어느 지점부터 촘촘 코일의 탈자 성능을 따라가지 못하는지를 확인하는 것이었다. 그러나 SM45C 결과에서는 최대 시험 간격 λg = 8.82%까지 기준 코일 대비 성능 저하가 발생하지 않았으며, 모든 간격 조건에서 오히려 잔류 자기가 감소하였다. 따라서 본 조사 범위에서는 단일한 성능 저하 임계 간격이 확인되지 않았다고 결론내리는 것이 타당하다.

Table VII. Mesh-sensitivity check for the minimum-improvement 20-shot condition.

Case	Baseline Bres,peak (μT)	Refined Bres,peak (μT)	Change (%)/interpretation
Dense, 20 shots	115.8	114.3	–1.3%
C21, 20 shots	112.9	113.3	+0.4%
C21 reduction vs. Dense	2.53%	0.84%	

이는 균일한 공심 자기장을 형성하는 촘촘 코일이 반드시 탈자 성능의 상한을 제공하지 않음을 의미한다. 특히 C15(λg = 5.99%)는 검토한 N = 20~36의 선형 감쇠 계열에서 반복적으로 낮은 잔류 자기장을 보여 실용적인 설계 후보로 볼 수 있다. Table I의 J_o는 동일한 공심 설계장을 형성하기 위해 권선 배치에 따라 요구되는 전류밀도가 크게 달라짐을 보여주며, 실제 적용에서는 권선 구조와 전기적·열적 설계조건을 함께 고려해야 한다.

VI. 해석의 한계 및 수치 검증

본 연구는 x-z 평면의 2차원 FEM과 축방향 Bx-Hx에 대한 스칼라 Preisach 모델을 기반으로 수행되었다. 따라서 실제 함정의 3차원 선체 형상, 코일 끝단 및 비대칭 배치에 따른 효과는 포함되지 않았으며, Hz의 공간 성분은 계산되지만 횡방향 벡터 히스테리시스와 회전자화 효과는 고려하지 않았다.

Fig. 9의 Bx-Hx 이력은 x = 0의 대표 위치에서 얻은 결과이므로, 국부 Hx 진폭 또는 minor-loop 면적의 차이를 전체 시편의 잔류 자화 변화에 대한 단일 인과 요인으로 해석하지 않았다. 동일한 공심 설계조건에서 발생하는 내부 Hx 이력, 공간적 변조 및 자화이력은 서로 결합되어 있으며, 이들의 개별 기여도 분리는 본 연구의 범위에 포함하지 않았다.

수치 민감도는 가장 작은 감소율이 나타난 C21-20샷 조건과 대표 성능조건인 C15-36샷을 대상으로 확인하였다. C21-20샷의 경우 elements 수를 약 59% 증가시켰을 때 Dense와 C21의 Bres,peak 차이는 2.53%에서 0.84%로 감소하였으나 상대적 순위는 유지되었다. 반면 C15-36샷에서는 refined mesh의 residual |Bx|,max가 Dense 53.099 μT, C15 47.010 μT로 11.47%의 감소율을 보였으며, 기준 격자의 12.21%와 유사하였다. 따라서 수 퍼센트 수준의 작은 차이는 정량적으로 신중히 해석하되, 대표 조건에서 나타난 약 10% 수준의 감소 경향은 격자 세분화 후에도 유지됨을 확인하였다.

VII. 결 론

(1) 시편이 없는 조건에서 모든 코일은 솔레노이드 중심에서 약 2,000 A/m가 되도록 정규화되었으나, 실제 시편 위치에서는 간격 증가에 따라 수직 성분과 공간 리플이 증가하였다. 중앙 100 mm 평균 |Hz|는 C27의 348.8 A/m에서 C11의 851.4 A/m까지 증가하였으며(R^2 = 0.954), 축방향 성분은 약 2 kA/m 수준을 유지하였다.

(2) 자성 시편을 삽입하면 내부 자기장의 평균값 차이는 약 3% 이내로 압축되었으나, 변동계수가 1.26%에서 4.11%로 증가하고 중앙 90% 구간의 국부 |Hz| 최대값이 최대 4.3배로 증가하여 권선 주기에 대응하는 공간적 변조가 유지되었다.

(3) 기준 격자에서 초기 자기장 5,000 A/m의 5종 선형 감쇠 조건을 적용한 결과 45개 간격 코일 조건 모두에서 Dense보다 낮은 Bres,peak가 관찰되었다(감소율 2.53~11.93%, 평균 6.22%). 다만 최소 차이 C21-20샷의 격자 세분화 검증에서는 성능 순위는 유지되었으나 감소율이 0.84%로 줄어, 수 퍼센트 수준의 작은 차이는 정량적으로 신중하게 해석해야 함을 확인하였다. 반면 대표 36샷 조건의 residual |Bx|max 감소율은 기준 격자 12.21%에서 세분화 격자 11.47%로 유사하게 유지되었다.

(4) C15(λg = 5.99%)는 기준 격자의 5개 프로토콜 중 4개에서 최저 잔류 자기를 보였고 평균 감소율 9.50%, 최악 조건에서도 7.26%를 유지하였다. Kendall 일치계수 W = 0.833은 N = 20~36의 동일 선형 감쇠 계열 내에서 상대 순위가 비교적 일관됨을 나타낸다. C13에서 감소율이 다시 낮아져 간격비에 대한 단조적 경향이나 전역 최적값으로 해석하지 않았다.

(5) 시편 중앙의 국부 Bx-Hx 이력 비교에서 C15의 국부 최대 |Hx|는 촘촘 코일보다 33.2% 낮았고, 최종 minor-loop 면적은 12.7%, terminal Bx는 8.3% 감소하였다. 이는 동일한 공심 설계조건이 실제 자성체 내부에서 서로 다른 이력경로를 형성함을 보여주는 대표적 국부 증거이며, x = 0 단일 위치의 결과만으로 전체 잔류 자화의 인과관계를 완전히 규명한 것으로 해석하지 않았다. SM45C 재료모델의 주요 자기특성은 B_S = 1.67 T, B_r = 1.15 T, Hc = 534.60 A/m이며, H_0 = 5,000 A/m는 Hc의 약 9.35배로 충분히 큰 공통 초기 자화조건으로 설정하였다.

이상의 결과는 실제 함정과 같이 이산 배치되는 코일을 공심 목표 자기장 기준으로 설계하더라도 자성 표적이 삽입된 실제 탈자 과정에서는 코일 배치에 따라 서로 다른 공간장과 히스테리시스 이력이 형성될 수 있음을 보여준다. 향후에는

3차원 선체 형상, 위치별 Bx-Hx 이력, Hz를 포함하는 벡터 히스테리시스, 실제 코일의 전기적·열적 설계조건 및 다양한 표적 재질에 대한 검증이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2026학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(202601620001).

References

[1] S. H. Im, H. Y. Lee, H. J. Chung, and G. S. Park, J. Magn. **23**, 680 (2018).

[2] H. S. Ju, H. Won, H. J. Chung, and G. S. Park, J. Magn. **19**, 43 (2014).

[3] H. S. Ju, H. J. Chung, S. H. Im, D. W. Jeong, J. W. Kim, H. B. Lee, and G. S. Park, IEEE Trans. Magn. **51**, 7301704 (2015).

[4] S. H. Im, H. Y. Lee, and G. S. Park, Energies **14**, 6295 (2021).

[5] S. H. Im and G. S. Park, Energies **15**, 2587 (2022).

[6] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey, IEEE Trans. Magn. **38**, 1753 (2002).

[7] G. S. Park, S. Y. Hahn, K. S. Lee, and H. K. Jung, IEEE Trans. Magn. **29**, 1542 (1993).

[8] H. Won, H. S. Ju, S. K. Park, and G. S. Park, IEEE Trans. Magn. **49**, 2045 (2013).