

비등방성을 고려한 고온초전도 솔레노이드 마그네트의 임계 전류 특성

김준선 나완수 권영길* 손명환* 류강식*
 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀*

Critical current characteristic of solenoid magnet with anisotropic HTS tapes

Joonsun Kang Wansoo Nah Young-Kil Kwon* Myoung-Hwan Sohn* Kang-Sik Ryu*
 Sungkyunkwan University Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract - 비등방성 고온 초전도 테이프는 자장의 세기뿐만 아니라 방향에 따라서도 임계 전류 값이 영향을 받는다. 이러한 비등방성 고온 초전도 테이프를 권선된 솔레노이드 마그네트의 임계 전류 특성 및 임계 전류를 결정짓는 위치를 알아내기 위해, 솔레노이드 모델의 자장 분포 및 수직 자장 성분과 평행 자장 성분을 구하고 임계 전류는 비선형 방정식을 수치적인 방법을 이용하여 예측해보았다.

1. 서 론

일반적으로 등방성 선재로 된 마그네트의 경우 임계 전류 값에 크게 영향을 미치는 최대 자장 값의 위치가 마그네트 가장 안쪽 중앙으로 알려져 있다. 하지만 비등방성 테이프의 경우 테이프에 대한 자장의 크기뿐만 아니라 방향에 따라서도 임계 전류 특성이 다르게 나타난다. Bi-2223 테이프의 경우 c 축에 평행한($\theta = 0$) 자장에서 c 축에 수직인($\theta = 90$) 자장으로 갈수록 자장의 방향 성분에 의한 임계 전류 감소가 크게 나타난다[2-4]. 이러한 비등방성 초전도 솔레노이드 마그네트의 경우 자장에 가장 취약한 부분은 c 축에 수직인 자장 성분이 크게 영향을 미치는 솔레노이드의 위, 아래 가장 자리로 알려져 있다. 본 논문은 이러한 비등방성 Bi-2223 테이프를 이용한 고온 초전도 솔레노이드 마그네트의 임계 전류 특성을 알기 위해, 간단한 솔레노이드 마그네트 모델을 이용하였고, 이 모델에 대해서 수치적인 방법으로 임계 전류 특성을 계산하였다. 계산을 위해 특정 선재에 대한 데이터를 이용하였다.

2. 본 론

2.1 Bi-2223 테이프의 사양

본 논문의 계산에 사용된 61심 Bi-2223 테이프의 사양은 다음과 같다. 단면은 $0.25\text{ mm} \times 4.1\text{ mm}$ 이고, 은:초전도체 비율은 4:1이다. 그리고 100 m 길이 선재를 77 K에서 $E_c = 1\ \mu\text{V cm}^{-1}$ 기준을 이용했을 때의 임계 전류는 37 A이다[2].

등방성 테이프의 경우 임계 전류는 자장의 방향과 무관하기 때문에 자장에 대한 함수, $I(B)$ 로 표현할 수 있지만, 비등방성 테이프의 경우 자장의 방향에 대해서도 영향을 받기 때문에 자장의 크기, B 와 방향, θ 에 대한 함수, $I(B, \theta)$ 로 표현할 수 있다. 이러한 비등방성 테이프의 임계 전류에 대한 실험식은 다음과 같다[2].

$$I_c(B, \theta) = m_1(\theta) - m_2(\theta)(1 - e^{-m_3(\theta)B^{1/5}}) \quad (1)$$

여기서 m_1 , m_2 , 그리고 m_3 는 실험 데이터에 의해 구해지는 값이며, 다음 식 (2)와 같이 Lagrange

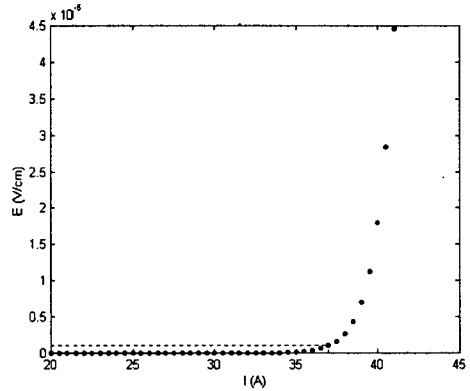


그림 1. 77 K에서의 Bi-2223 테이프의 E-I 특성 곡선.

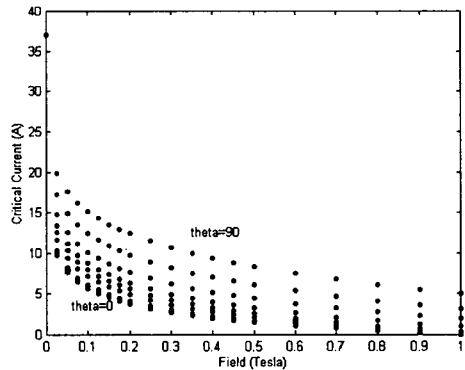


그림 2. c 축의 각도에 따른 Bi-2223 테이프의 $I_c - B$ 특성 곡선.

interpolation polynomial로 표현된다.

$$m_j(\theta_i) = \sum_K m_j(\theta_K) \prod_{l \neq K} \frac{\theta_i - \theta_l}{\theta_K - \theta_l} \quad (2)$$

여기서 $j = 1, 2, 3$ 이고 $m_j(\theta_K)$ 는 θ_K 의 $I_c - B$ 실험 데이터로부터 구할 수 있다. 그림 2는 자장 각도에 따라서 식 (1)과 실험 데이터에 의한 $m_i(\theta)$ 를 이용한 $I_c - B$

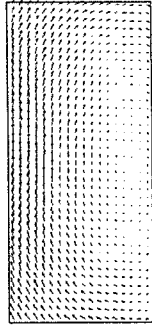


그림 3. 솔레노이드 마그네트의 자장 분포.

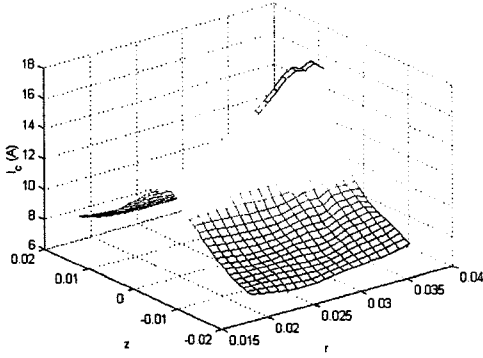


그림 4. 솔레노이드 마그네트 모델의 임계 전류 I_c 분포 특성.

곡선이다. 그림 2에서 θ 값이 90° 에서 0° 로 갈수록 임계 전류 값은 자장 B 에 대해 감소함을 알 수 있다.

2.2 솔레노이드 마그네트 모델

솔레노이드 마그네트의 임계 전류 특성을 알아보기 위하여 Bi-2223 테이프를 구성된 8 turns, 40 layers의 모델을 이용하였다. 솔레노이드의 내부 반경은 18 mm, 외부 반경은 36 mm, 그리고 높이는 40 mm이다.

솔레노이드 마그네트의 자장은 균등하게 분포된 링 모양의 자장을 합함으로써 구할 수 있다. 가상의 얇은 필라멘트들의 구성으로 가정하여 반지름 r 방향의 테이프 수를 N_r , z 축 방향의 테이프 수를 N_z , 총 N 턴이라고 했을 때, 마그네트의 r 방향과 z 방향의 자장은 다음 식 (3)과 (4)처럼 나타낼 수 있다.[1,3]

$$B_r = I \frac{N}{N_r N_z} \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=0}^{N_r} \sum_{j=0}^{N_z} f_1 [f_2 E(k_{ij}) - K(k_{ij})] \quad (3)$$

$$B_z = I \frac{N}{N_r N_z} \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=0}^{N_r} \sum_{j=0}^{N_z} g_1 [g_2 E(k_{ij}) - K(k_{ij})] \quad (4)$$

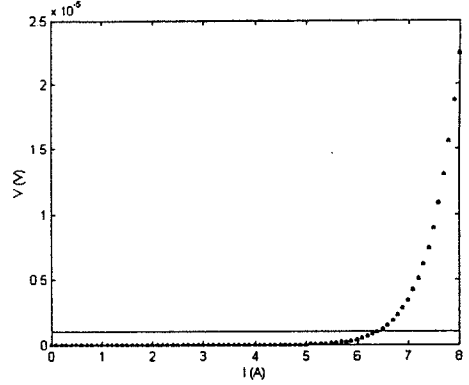


그림 5. 솔레노이드 마그네트의 $I-V$ 특성 곡선.

$$f_1 = \frac{z - b_{ij}}{r \sqrt{(a_{ij} + r)^2 + (z - b_{ij})^2}}$$

$$f_2 = \frac{a_{ij}^2 + r^2 + (z - b_{ij})^2}{(a_{ij} - r)^2 + (z - b_{ij})^2}$$

$$g_1 = \frac{1}{\sqrt{(a_{ij} + r)^2 + (z - b_{ij})^2}}$$

$$g_2 = \frac{a_{ij}^2 - r^2 - (z - b_{ij})^2}{(a_{ij} - r)^2 + (z - b_{ij})^2}$$

여기서 $K(k_{ij})$, $E(k_{ij})$ 는 완전 타원 적분을 나타내며, k_{ij} 는 다음과 같다.

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{4a_{ij}r}{(a_{ij} + r)^2 + (z - b_{ij})^2}}$$

이렇게 구한 마그네트의 자기 자장 (self field), B_{sf} 는 전류 I 에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{sf} = GI \quad (5)$$

마그네트의 ij 번째 테이프의 임계 전류에 대한 자장은 식 (1)으로 부터 나온다.

$$B_{lape} = \left[-\frac{1}{m_3(\theta)} \ln \left(\frac{m_2(\theta) - m_1(\theta) + I_c}{m_2(\theta)} \right) \right]^5 \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 ij 번째 테이프의 임계 전류 값을 구하기 위해서는 두 식이 같아야 하므로 다음과 같은 비선형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$G_{ij} I_{c_{ij}} = \left[-\frac{1}{m_3(\theta_{ij})} \ln \left(\frac{m_2(\theta_{ij}) - m_1(\theta_{ij}) + I_{c_{ij}}}{m_2(\theta_{ij})} \right) \right]^5 \quad (7)$$

여기서 m_1 , m_2 , m_3 는 식 (2)로부터 구할 수 있고, $G_{ij} = (1/I) \sqrt{B_{r_{ij}}^2 + B_{z_{ij}}^2}$ 이고 $\theta_{ij} = \tan^{-1}(B_{r_{ij}}/B_{z_{ij}})$ 이다. 비선형 방정식 (7)에서 I_c 는 Newton iteration

방법을 이용하여 계산하였다.

외부 자장이 없다고 가정하였을 때, 마그네트의 자기 자장에 의한 임계 전류 분포는 그림 4와 같다. 그리고 마그네트의 자장 분포는 그림 3과 같다. 그림 3과 그림 4에서 비교해 보면 알 수 있듯이 자장이 가장 큰 부분은 마그네트 가장 안쪽 중앙임을 알 수 있다. 하지만 임계 전류 값이 작게 나타나는 부분은 자장이 가장 큰 곳이 아닌 위, 아래 바깥쪽임을 알 수 있다. 그리고 그림 4에서 나타난 최소 임계 전류 값은 7.25 (A) 이다. 솔레노이드 마그네트에서의 이러한 임계 전류 특성은 Bi-2223 테이프의 비등성에 의해 테이프의 c 축에 평행한 자장 성분 때문이다.

위의 과정에서 얻은 각 테이프에 대한 I_c 값을 이용하여 임계 전류 값을 계산하기 위해서는 $I-V$ 특성을 알아야 한다. 길이 l 의 하나의 시편에 대한 $I-V$ 특성 곡선을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (8)$$

여기서 $V_c = E_c l$ 이며 n 값은 다음과 같다.

$$n(B, \theta) = \begin{cases} m_1(\theta) - m_2(\theta)(1 - e^{-m_3(\theta)B^{1/2}}) & \text{for } B \leq 0.35 T \\ m_1(\theta)B^{m_3(\theta)} & \text{for } B > 0.35 T \end{cases}$$

위의 식 (8)은 시편 하나에 대한 식이므로 솔레노이드 마그네트에 대한 식은 다음 식 (9)와 같이 각 테이프에 대한 V 값을 합함으로써 표현할 수 있다.

$$V = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} V_{c_{ij}} \left(\frac{I}{I_{c_{ij}}} \right)^n \quad (9)$$

여기서 $V_{c_{ij}} = \pi d_j E_c$ 이고 d_{ij} 는 ij 번 째 곡률 반지름이다.

앞의 계산 과정을 통해 얻은 임계 전류 값, I_c 는 그림 5에서 볼 수 있듯이 6.5 (A) 이다.

3. 결 론

본 논문에서는 비등방성 Bi-2223 테이프로 만들어진 솔레노이드 마그네트 모델의 임계 전류 특성에 대해 수치적인 방법을 통하여 알아보았다. 비등방성 테이프로 권선된 솔레노이드 마그네트는 등방성 초전도체로 만들어진 솔레노이드 마그네트에서 나타나는 임계 전류 특성과는 달리 자장의 반지름 방향 성분에 의해 임계 전류 특성이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Martin N. Wilson, "Superconducting magnets", 1983.
- [2] P Fabbriatore, C Priano, M P Testa, R Musenich, P Kovac, A Matrone, E Petrillo, and M Ariante, "Field distribution effect on the performances of coils wound with Ag/Bi-2223 tape", Supercond. Sci. Technol., 11, 304-310, 1998.
- [3] J Pitel and P Kovac, "Influence of external magnetic fields on critical currents of solenoids", Supercond. Sci. Technol., 10, 7-16, 1997.
- [4] M. Daumling and R. Flukiger, "Factors determining the magnetic field generated by a solenoid made with a superconductor having critical current anisotropy", Cryogenisc, 35, 867-870, 1995.