

2G 선재를 이용한 5T급 고온초전도 마그넷 설계

구명환***, 김동락*, 최연석*, 이우호*, 신동원*, 김명수*, 차귀수**
 한국기초과학지원연구원*, Soonchunhyang University**

Design of 5T HTS Magnet using 2G Wire

Myunghwan Ku***, Dong Lak Kim*, Yeon Suk Choi*, Woo Ho Lee*, Dong Won Shin*, Myung Su Kim*, Guesoo Cha**
 Korea Basic Science Institute*, Soonchunhyang University**

Abstract - NMR이나 MRI와 같은 고자장을 필요로 하는 마그넷은 높은 운전전류를 갖는 초전도 선재를 이용하여 제작된다. 이때 마그넷은 여러 코일을 겹쳐서 제작하는 것이 일반적이고, 크게 내측마그넷과 외측마그넷으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 15T 외측마그넷 안에서 동작하는 5T급 내측마그넷의 설계 과정을 나타내었다. 내측마그넷은 2세대 고온초전도 선재를 이용하여 설계되고, 4.2K의 액체헬륨 안에서 동작한다. 마그넷의 임계전류는 초전도 선재의 I_c-B 특성을 고려하여 산정하였고, 임계전류를 바탕으로 운전전류를 결정하였다. 내측마그넷의 발생자장이 5T를 만족하는 운전전류와 마그넷의 형상을 계산을 통하여 제시하였다.

수평자장이라 한다. 초전도 선재의 임계전류는 수직자장에 의하여 감소되는 영향이 크다. 따라서 본 연구에서는 내측마그넷에 인가되는 수직자장의 크기를 고려하여 임계전류를 산정하였다.

그림 1에 4.2K에서 2G HTS 선재의 수직자장에 따른 임계전류의 특성을 나타내었다. 그림의 점으로 나타낸 부분은 선재 제작사에서 제공하는 데이터 이고, 곡선은 데이터를 수식으로 표현하기 위하여 보간한 것이다. 보간된 곡선의 수식은 식 (1)과 같다.

$$I_c = 462.18 \times B_{\perp}^{0.481} \quad (1)$$

1. 서 론

MRI나 NMR과 같은 고자장을 발생하는 마그넷은 초전도 선재를 이용하여 제작되는 것이 일반적이다[1]. 높은 전류를 인가할 수 있는 초전도선재는 마그넷의 부피와 무게를 줄이는 것이 가능하며 구리와 같은 상전도체의 저항에 의해 발생하는 손실을 줄이는 효과를 갖는다. 이러한 고자장용 마그넷은 일반적으로 단일 마그넷이 아닌 여러개의 마그넷을 겹쳐서 구성하게 된다. 이때 높은 자장이 발생하는 마그넷의 안쪽에는 고온초전도(HTS) 선재를 사용하고 바깥쪽에는 저온초전도(LTS) 선재를 사용하게 된다[2]. HTS 선재는 LTS 선재에 비하여 인가되는 자장에 의한 임계전류의 감소가 작다. 또한 액체헬륨 온도인 4.2K에서 매우 높은 임계전류를 가진다.

본 논문에서는 내측마그넷과 외측마그넷으로 구성되는 20T 급의 초전도 마그넷의 설계에서, 2G HTS 선재로 제작되는 내측마그넷의 설계 과정을 나타내었다. 외측마그넷은 솔레노이드 권선방법이 사용되었고 내측마그넷은 더블판케이프권선(DP) 방법이 사용되었다. 내측마그넷의 임계전류는 초전도 선재의 I_c-B 특성을 고려하여 산정되었고 임계전류의 70%인 동작전류를 인가할 때 5T를 발생하는 것을 목표로 하였다.

2. 해석 모델

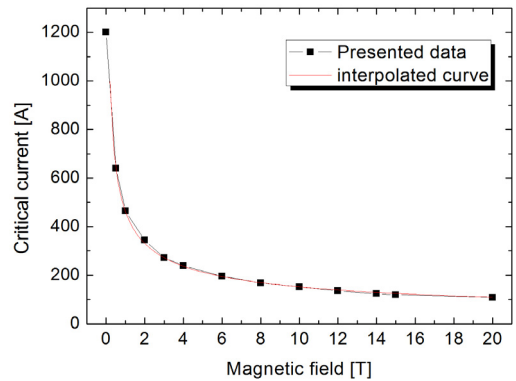
2.1 2G HTS 선재

초전도 선재는 저온초전도 선재와 고온초전도 선재로 구분된다. 저온초전도 선재에는 NbTi, Nb3Sn 등이 있으며, 본 연구의 외측마그넷에 사용되었다. 고온초전도 선재는 1세대(1G) 선재와 2세대(2G) 선재로 구분되며, 본 연구의 내측마그넷은 REBCO 계열의 2세대 선재가 사용되었다. 고온초전도 선재의 임계전류는 77K에서 외부자장이 인가되지 않을 때 80A이고, 실제 동작 온도인 4.2K에서는 액체질소 보다 약 15배 높은 임계전류를 갖는다. 표 1에 계산에 이용된 2세대 초전도 선재의 사양을 나타내었다.

<표 1> 2G 초전도 선재의 사양

초전도 선재	2G HTS (REBCO)
임계전류 [A]	80A (@ 77K, self field) 1200A (@4.2K, self field)
폭 [mm]	4
두께 [mm]	0.1
최소 구부림 직경 [mm]	11

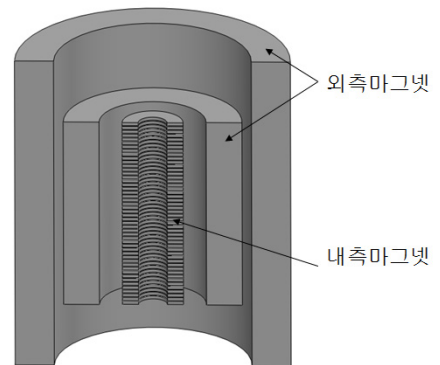
고온초전도 선재는 납작한 테이프의 형태로 되어있어 초전도 선재에 인가되는 외부자장에 대하여 이방성을 갖는다[3]. 선재의 넓은 면을 기준으로 수직으로 인가되는 자장을 수직자장, 수평으로 인가되는 자장을



<그림 1> 2G 초전도 선재의 I_c-B_{\perp} 특성

2.2 초전도마그넷

5T급의 고온초전도 내측마그넷은 15T를 발생하는 외측마그넷 안에서 동작한다. 따라서 내측마그넷의 설계는 외측마그넷의 형상을 고려하여야 하고, 이로 인해 마그넷의 높이와 외경에 제한이 생긴다. 외측마그넷은 LTS 선재를 이용하여 이중의 구조로 되어있다. 외측마그넷의 안쪽 코일의 높이는 240mm이고, 바깥쪽 코일의 높이는 400mm이다. 내측마그넷의 내경은 35mm이고 외경은 74mm이다. 외경은 저온 용기의 크기인 80mm를 고려하였고, 전원선의 들어갈 공간을 고려하여 6mm의 여유를 두었다. 높이는 최대 239mm로 외측마그넷의 가장 낮은 높이인 240mm를 넘지 않도록 하였다. 내측마그넷의 높이는 DP의 개수에 의해 결정되는 것으로 최대로 24개의 DP를 사용하는 것이 가능하다. 그림 2에 마그넷의 단면을 나타내었다. 또한 표 2에 마그넷의 사양을 나타내었다.



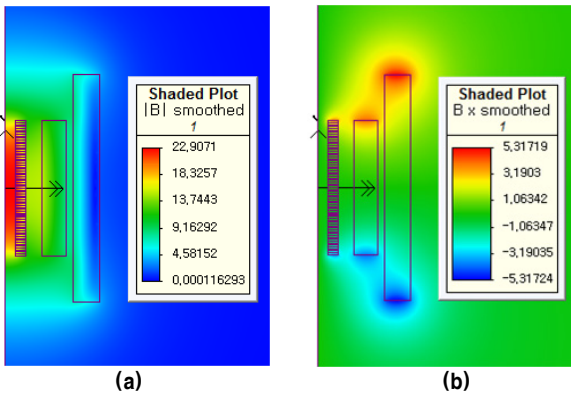
<그림 2> 초전도 마그넷의 형상

〈표 2〉 마그넷의 사양

	내측마그넷	외측마그넷
초전도 선재	2G HTS	NbTi + Nb3Sn
내 경 [mm]	35	130
외 경 [mm]	74	335
높 이 [mm]	최대 239	400
권선 방식	더블팬케이크 권선	솔레노이드 권선
턴 수	260 (더블팬케이크 당)	10628 + 24442

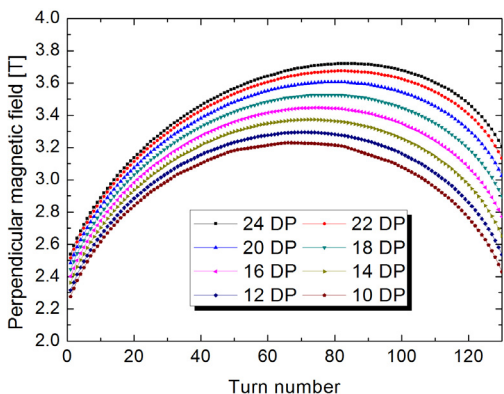
3. 해석 결과

유한요소해석을 통하여 초전도 마그넷의 임계전류와 중심자장을 계산하였다. 그림 3은 축대칭 모델의 단면을 자장의 분포와 함께 나타낸 것이다. (a)는 마그넷에 발생하는 전체 자장의 분포를 나타낸 것이고 (b)는 수직자장의 분포만을 나타낸 것이다. (a)에서의 자장은 마그넷의 중심 축 주변에 분포하는 반면 (b)에서의 수직자장은 마그넷의 위, 아래에 집중되는 것을 알 수 있다. 초전도 선에 인가되는 자장에 대해 이방성을 가지는 내측마그넷의 경우 수직자장이 집중되는 위, 아래 DP에서 마그넷의 임계전류를 제한하게 된다.



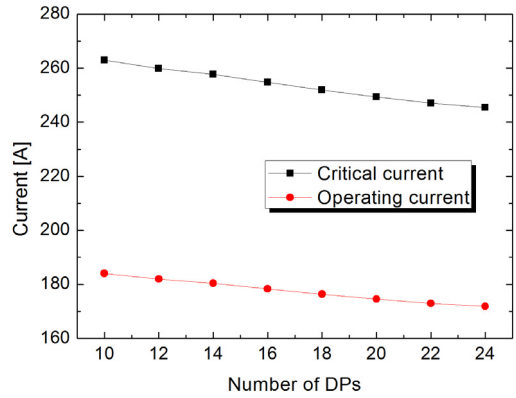
〈그림 3〉 마그넷에 발생하는 자장
(a) 전체 자장의 분포, (b) 수직자장의 분포

그림 4는 내측마그넷의 DP 개수 변화에 따른 최상위 DP에 인가되는 수직자장의 크기를 나타낸 것이다. 수직자장의 크기는 DP가 10개일 때 3.23T이고 24개일 때 3.72T로 증가한다. DP 개수가 변화에 따라 최대 수직자장이 발생하는 턴의 위치도 변화하게 된다. DP가 10개일 때의 최대 수직자장은 66번째 턴에 인가되고 24개일 때는 83번째 턴에서 발생한다. 이는 마그넷의 형상 변화에 따라 자장의 크기와 각도가 변하기 때문이다.



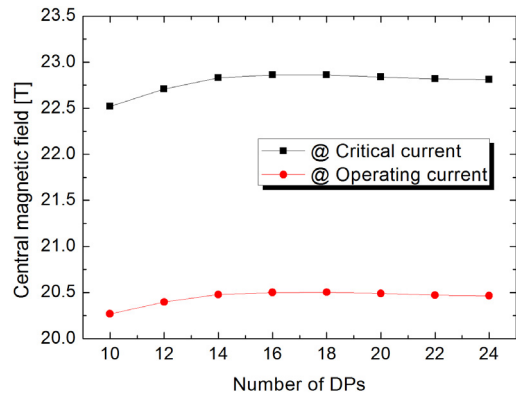
〈그림 4〉 내측 마그넷에 인가되는 수직자장

그림 5에 DP 개수의 변화에 따른 임계전류와 운전전류의 크기를 나타내었다. 임계전류는 수직자장의 크기에 의해 결정되는 것으로 수직자장이 가장 작은 10개 DP에서 최대가 되고, 24개 DP에서 최소가 된다. DP 개수가 10개일 때와 24개일 때의 임계전류의 크기는 각각 262.9A, 245.5A이다. 운전전류는 임계전류의 70%로 계산하였다.



〈그림 5〉 고온초전도 마그넷의 임계전류

임계전류와 운전전류 여자 시 DP 개수 변화에 따른 중심자장 크기를 그림 6에 나타내었다. 마그넷의 중심자장은 DP의 개수가 10에서부터 증가할 때 서로 상반되는 두 가지 영향을 동시에 받게 된다. 하나는 임계전류 감소에 의한 중심자장 감소 요인이고 다른 하나는 턴 수의 증가에 의한 중심자장 증가 요인이다. 본 연구에서는 18개의 DP일 때 중심자장이 최대가 되고, 운전전류를 여자 할 때 20.5T로 목표자장 20T (내측 5T + 외측 15T)를 만족하는 형상임을 알 수 있다.



〈그림 6〉 고온초전도 마그넷의 임계전류

4. 결 론

본 논문에서는 15T 외측마그넷 안에서 동작하는 5T급 HTS 마그넷의 설계 과정을 나타내었다. DP의 개수를 조절하며 마그넷에 발생하는 수직자장의 크기와 임계전류, 중심자장을 계산하였다. 계산 결과 DP의 개수가 감소함에 따라 임계전류는 증가하였고, 중심자장이 최대가 되는 DP 개수가 존재하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기초과학지원연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. (과제번호 : T31407)

[참 고 문 헌]

[1] Iwasa, Y, Bascuan, J, Seungyong Hahn, Tomita, M, Wijun Yao, "High-Temperature Superconducting Magnets for NMR and MRI: R&D Activities at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 20, pp. 718-721, 2010.
 [2] Satoshi Hanai, et al., "Design and Test Results of 18.1 T Cryocooled Superconducting Magnet with Bi2223 Insert," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 17, no. 2, pp.1422-1425, 2007
 [3] M. Kang, M. Ku, H. Lee, G. Cha, "Current estimation of an HTS BSCCO magnet having multiple power source based on the field dependent E-J relation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 19, pp. 1257-1261, 2009.