

## 별도전원으로 여자되는 YBCO 마그넷의 특성 계산

강명훈, 구명환, 이희준, 차귀수  
순천향대학교

### Characteristic Analysis of HTS YBCO Magnet with Pancake Windings Excited by Multiple Power Sources

Myunghun Kang, Myunghwan Ku, Heejoon Lee, Gueesoo Cha  
Soonchunhyang University

**Abstract** - 팬케이크 형태로 권선된 고온초전도 마그넷의 경우 모든 팬케이크 권선을 직렬로 연결하여 단일전원으로 여자할 경우 가장 큰 수직자장을 받는 팬케이크 권선에 의해 모든 팬케이크 권선의 임계전류가 제한된다. 본 논문에서는 별도전원으로 여자되는 YBCO 고온초전도 마그넷의 특성을 계산하여 단일전원으로 여자되는 경우와 비교하였다. 계산 결과 별도전원으로 여자되는 YBCO 고온초전도 마그넷의 모든 팬케이크 권선들은 각각의 임계전류까지 통전되었으며 중심자장의 세기가 단일전원으로 여자되는 마그넷보다 증가함을 확인하였다.

#### 1. 서 론

상전도 마그넷 보다 더 큰 중심자장을 발생시키기 위해서 고온초전도 선재를 사용한 마그넷을 사용하고 있다. 고온초전도 팬케이크 권선으로 만들어진 초전도 마그넷의 경우, 일반적으로 마그넷의 팬케이크 권선들은 모두 직렬로 연결되어 단일전원에 의해 여자되어왔다. 이 경우 마그넷 전체의 임계전류는 최대 수직자장이 걸리는 맨 위와 맨 아래 팬케이크 권선의 전류에 의해 제한된다. 팬케이크 권선의 최대 전류는 주로 수직자장에 의해 제한되고 이것은 팬케이크 권선마다 다르다. 마그넷의 팬케이크 권선들이 별도전원으로 여자하면 각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류까지 여자시키는 것이 가능하다[1]. 마그넷의 안쪽 팬케이크 권선의 임계전류는 바깥쪽 팬케이크 권선의 임계전류 보다 크기 때문에 별도전원으로 마그넷을 여자하면 권선에 흐르는 전류의 용량과 마그넷의 중심자장을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 YBCO 고온초전도 선재를 사용하여 8개의 팬케이크 권선을 적용한 형태의 마그넷 모델을 해석하였으며, 단일전원을 사용하였을 경우와 별도전원을 사용하였을 경우에 대해 수직자장 및 중심자장의 크기를 비교하였다.

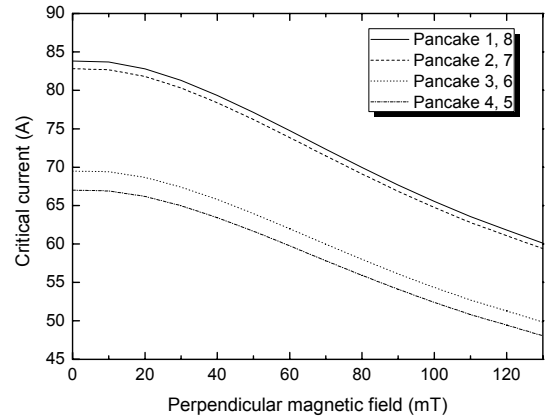
#### 2. 해석 모델

테이프 형태의 고온초전도 선재는 외부자장이 가해지면 임계전류가 감소한다[2]. 특히 외부자장이 수직으로 인가한 경우 임계전류가 큰 폭으로 감소한다. 따라서 수직으로 인가된 자장은 고온초전도 선재의 임계전류를 결정하는 중요한 요인이 된다. 수직외부자장에 따른 임계전류의 감소 정도는 선재의 성능에 따라 각각 다르다. 본 연구에서 사용된 선재는 AMSC사에서 제작된 344 Stainless YBCO 선재이며 선재의 사양은 표 1과 같다. 표 1에서 최소 임계전류로 표시된 것로부터 알 수 있듯이 YBCO 선재의 임계전류는 균일하지 않으며 수직외부자장이 선재에 가해질 때 임계전류의 감소 정도 또한 균일하지 않다.

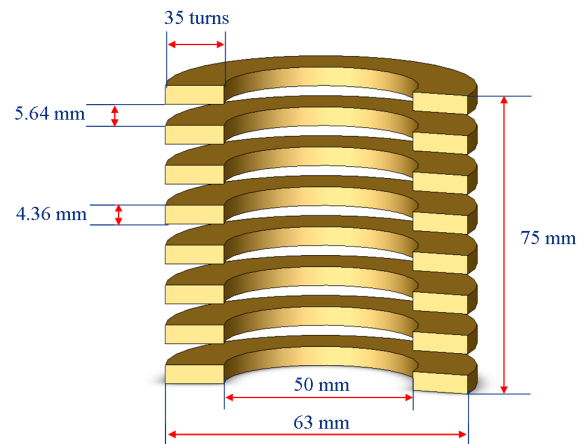
〈표 1〉 고온초전도 선재의 사양

물질	YBCO
최소 임계전류	60 A, 77K, 0T
선재 폭	4.36 mm
선재 두께	0.15 mm
최소 구부림 반경	30 mm

그림 1은 본 연구에서 사용된 선재의 수직외부자장에 따른 임계전류 감소 정도를 나타낸다. 그림 1에서 팬케이크 권선의 번호는 가장 위에 적용된 팬케이크 권선부터 차례대로 1번에서 8번까지로 결정하였으며, 가운데를 중심으로 같은 곳에 위치한 팬케이크 권선끼리 짝을 이룬다. 각 팬케이크 권선에 사용된 선재의 임계전류는 최외각부터 71.5, 70.9, 61.5, 59.6 A이다. 계산에 사용된 마그넷은 8개의 팬케이크 권선을 적용한 구조로 그림 2와 같다. 팬케이크 권선의 배치는 수직외부자장에 의해 임계전류가 감소할 것을 고려하여 수직외부자장의 영향을 가장 많이 받는 바깥쪽 팬케이크 권선부터 임계전류가 높은 선재를 사용하였다.



〈그림 1〉 YBCO 고온초전도 선재의 Ic-B 관계(수직)



〈그림 2〉 고온초전도 마그넷의 구조

#### 3. 계산 방법

테이프 형태의 고온초전도 선재의 특성상 각 팬케이크 권선에 흐를 수 있는 임계전류는 각 팬케이크 권선에 인가되는 수직자장의 최대치에 의해서 결정된다. 따라서 팬케이크 권선의 임계전류를 결정하는 데에 가장 중요한 것은 외부에서 인가되는 최대 자계의 세기를 결정하는 것으로, 최대 자계는 자신의 팬케이크 권선에 흐르는 전류에 영향을 받는 것은 물론이고 다른 팬케이크 권선에 흐르는 전류에 의해서도 영향을 받는다. 또한, 팬케이크 권선 내에서 자장의 세기는 선재의 위치마다 다를 뿐만 아니라 한 가닥의 YBCO 선재 안에서도 위치마다 다르다. 이 논문에서는 YBCO 선재 한 가닥을 10개 부분으로 나누어서 인가되는 자장의 평균값을 선재 한 가닥의 자장으로 정했고, 팬케이크 권선에서의 최대 자장은 위에서와 같은 방법으로 구한 YBCO 선재 35턴의 자장 중에서 가장 큰 값으로 정했다. 식 (1)은 최대 수직 자장을 구하는 방법을 표시한 것으로 식 (1)에서  $n$ 은 YBCO 선재를 나눈 수이다.

$$B_{\perp} = \sum_{i=1}^n |B_{\perp,i}| / n \quad (1)$$

YBCO 고온초전도 선재의 Ic-B 특성을 앞의 그림 1과 같이 미리 측정하여 식 (1)에서 구한 수직 자장에 해당하는 전류를 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류로 결정하였다. 각각의 팬케이크 권선의 임계전류는 서로 연관되어 있기 때문에, 고온초전도 마그넷의 중심자장 크기를 최대로 하는, 각각의 팬케이크 권선에서의 임계전류를 계산하기 위해서는 비결정론적 최적화 기법의 일종인 진화론적 방법을 사용하였다[3].

#### 4. 계산 결과

위의 계산 방법을 사용하여 계산한 결과를 YBCO 고온초전도 마그넷에 단일전원을 여자했을 경우와 별도전원을 여자했을 경우에 대해 비교하였다. 우선 계산된 각 팬케이크의 임계전류와 각 팬케이크에 인가되는 수직자장 및 마그넷 중심에서의 자장을 표 2에 나타내었다. 단일전원으로 여자된 YBCO 고온초전도 마그넷의 경우 중심자장의 크기가 231.7 mT인 반면 별도전원으로 여자된 마그넷의 경우에는 중심자장의 크기가 243.9 mT로 약 5.3%가 증가한 것을 알 수 있다.

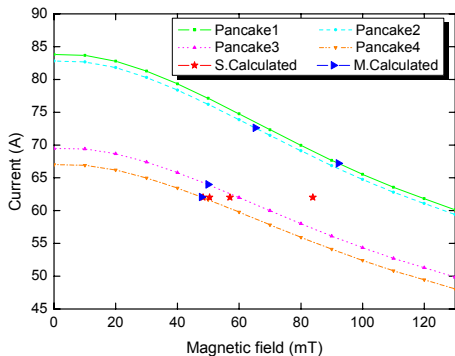
〈표 2〉 각 팬케이크 권선의 임계전류와 자계의 세기

구분		팬케이크 번호				중심 자장
		#1	#2	#3	#4	
단일 전원	임계전류 [A]	62.0	62.0	62.0	62.0	232
	수직자장 [mT]	83.9	57.0	50.4	48.3	[mT]
별도 전원	임계전류 [A]	67.2	72.6	64.0	62.1	244
	수직자장 [mT]	92.1	65.2	49.9	47.8	[mT]

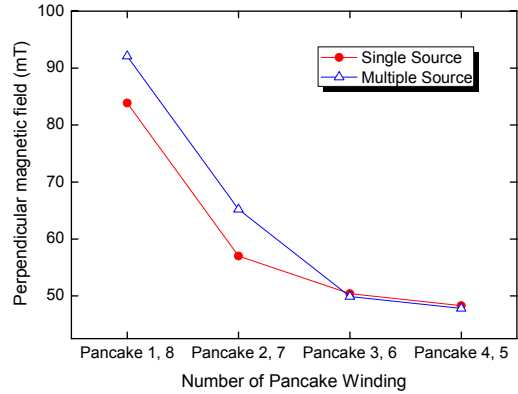
그림 3은 각 팬케이크 권선의 임계전류를 각 팬케이크 권선에 사용한 선재의 Ic-B 특성 곡선과 비교한 결과이다. 그림 3에서와 같이 단일전원을 여자했을 경우에는 가장 안쪽에 위치한 팬케이크 권선에 인가된 수직자장에 의해 전체 팬케이크 권선의 임계전류가 62.0 A로 결정된 반면, 별도전원을 여자했을 경우에는 각 팬케이크 권선에 인가된 수직자장에 의해 팬케이크의 임계전류가 67.2, 72.6, 64.0, 62.1 A로 각각 결정되어 마그넷의 중심자장의 크기가 증가한 것을 확인할 수 있다. 즉, 팬케이크 권선이 적층된 YBCO 고온초전도 마그넷을 단일전원으로 여자할 경우 팬케이크 권선의 임계 수직자장이 인가되는 권선에 의해 마그넷의 임계전류가 결정되어 나머지 팬케이크 권선에서는 전류를 더 흘릴 수 있음에도 불구하고 전류가 제한되어 팬케이크 권선의 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

여기서 단일전원으로 여자할 경우, 최대 수직외부자장이 인가되는 최외각 팬케이크 권선이 아닌 가장 안쪽의 팬케이크 권선에 의해 임계전류가 결정된 것은 최외각 팬케이크 권선에 가장 큰 수직외부자장이 인가될 것을 고려하여 임계전류가 가장 높은 선재로 권선된 팬케이크 권선을 최외각에 배치하였기 때문이다.

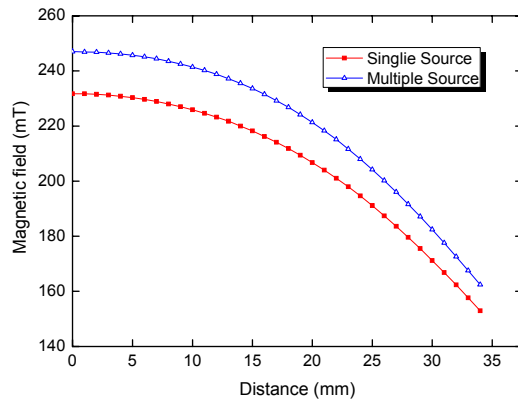
각 팬케이크 권선에 인가되는 최대 수직자장의 세기는 그림 4에 나타내었으며, 마그넷의 중심보다는 최외각에 위치한 팬케이크 권선에서 수직자장의 세기가 단일전원으로 여자되는 마그넷의 경우 약 1.7배, 별도전원으로 여자되는 마그넷의 경우 약 1.9배 정도 큰 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 별도전원으로 여자되는 마그넷의 경우에는 각 팬케이크 권선이 받는 수직자장에 대한 임계전류까지 통전할 수 있으므로 중심자장 세기를 증가시킬 수 있다.



〈그림 3〉 계산된 각 팬케이크 권선의 임계전류



〈그림 4〉 각 팬케이크 권선에서의 최대 수직자장



〈그림 5〉 축 방향을 따라 계산된 중심자장의 세기

YBCO 고온초전도 마그넷의 축 방향을 따라 중심자장의 세기를 계산한 결과는 그림 5와 같다. 마그넷의 중심부( $z=0$  mm)로부터  $z=34$  mm까지 위치를 변화시키면서 중심자장의 세기를 계산한 결과 단일전원으로 여자된 경우 약 33.8% 감소하였으며 별도전원으로 여자된 경우 약 34.3% 감소하였다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 단일전원 여자 방식보다 강한 자장을 발생할 수 있는 별도전원으로 여자되는 팬케이크 권선으로 구성된 YBCO 고온초전도 마그넷의 특성을 계산하였다. 계산 결과, 임계전류가 높은 팬케이크 권선을 최대 수직자장이 인가되는 마그넷의 최외각에 배치하여 효율적으로 배치가 되었음에도 불구하고 별도전원으로 여자되는 마그넷의 모든 팬케이크 권선들은 각각의 임계전류까지 통전되었기 때문에 단일전원으로 여자되는 마그넷 보다 중심자장의 세기가 약 5.3% 증가하였다. 본 연구를 통하여 팬케이크 형태로 권선된 YBCO 고온초전도 마그넷에서 각각의 팬케이크 권선을 별도전원으로 여자하면 중심자장을 증가시킬 수 있는 것을 확인하였다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참고 문헌]

- [1] M. Kang, K. Lee, G. Cha, and H. Lee, "Design method of a high field HTS magnet consisted of pancake windings having different current in each pancake winding," 1M07, MT-20, Philadelphia, USA, 2007.
- [2] J. Pitel et al., "Influence of the Winding Geometry on the Critical Currents and Magnetic Fields of Cylindrical Coils Made of Si(2223)Ag Anisotropic Tapes," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 10, no. 1, pp. 478-481, 2000.
- [3] M. Kasper, "Shape optimization by evolution strategy," IEEE Trans. on Magn., vol. 28, no. 2, pp. 1556-1559, 1992.