

## 공극 변화에 따른 팬케이크형 고온초전도 마그넷의 특성 변화

강명훈, 구명환, 이희준, 차귀수  
순천향대학교

### Properties of pancake winding type HTS magnet at various gap

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

**Abstract** - 고온초전도 마그넷은 저온초전도 마그넷과 달리 초전도선의 형태로 인한 이방성 때문에 마그넷의 형상에 따라 특성이 달라진다. 본 연구에서는 팬케이크 권선형 고온초전도 마그넷의 형상을 결정하는 요소 중에서 팬케이크 권선 사이의 공극 변화에 따른 특성을 계산하였다. 계산결과 최대의 중심자장을 발생하는 최적의 공극이 있음을 확인하였으며, 공극을 뒀으므로 자장의 균일성도 향상됨을 확인하였다.

구조는 그림 2에 나타내었고, 계산에 사용된 고온초전도 선은 1 $\mu$ V/cm의 기준을 적용했을 때에 임계전류가 126A 이며 기타 사양은 표 1과 같다. 고온초전도 마그넷은 팬케이크 권선 8개를 적층한 구조로 내경은 계산에 사용된 초전도 선의 최소 구부림 직경을 고려하여 50mm로 결정하였으며, 외경은 절연 테이프의 두께를 고려한 팬케이크 권선의 턴수에 의해 달라진다. 또한 마그넷의 높이 역시 팬케이크 권선 간의 공극 변화에 따라 달라진다.

### 1. 서 론

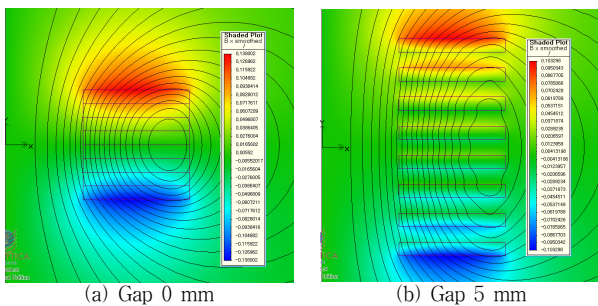
고온 초전도 선의 특성이 향상됨에 따라 고온초전도 선을 이용한 초전도 변압기, 환류기, 초전도에너지 저장장치(SMES) 및 각종 고자장 실험용 마그넷이 개발되고 있다. 뿐만 아니라 고자장 발생용 초전도 마그넷의 중심자장을 높여려는 연구가 진행되고 있다. 저온 초전도 선을 이용하여 팬케이크 권선형 마그넷을 제작할 경우에는 중심자장을 높이기 위해 마그넷의 중심부에 집중적으로 권선을 하게 된다. 그러나 이 경우 중심자장은 증가하지만 마그넷 중심부에만 권선이 집중되어 있기 때문에 마그넷 중심에서의 자장 균일도는 감소하게된다. 반면 고온 초전도 선을 이용하여 마그넷을 제작할 경우에는 저온 초전도 선과 달리 테이프 형태의 납작한 고온 초전도 선은 형태로 인한 이방성을 갖기 때문에 마그넷의 형상에 따라 초전도 선에 인가되는 자장의 크기와 방향이 달라지게 되어 그 특성이 달라진다[1].

본 연구에서는 팬케이크 권선형 고온 초전도 마그넷의 형상을 결정하는 요소 중에서 팬케이크 권선 사이의 공극 변화에 따른 특성을 연구하였다. 공극 변화에 따른 고온 초전도 마그넷의 임계전류 산정 방법은 E-J 특성관계를 이용하여 계산하였으며 최대의 중심자장을 발생하는 최적의 전류는 (1+1) 진화론적 기법을 이용하여 계산하였다.

### 2. 해석 모델

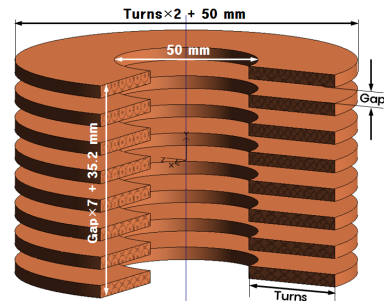
납작한 테이프 형태의 고온초전도 선은 원형의 저온초전도 선과 달리 형상에 따른 이방성을 갖기 때문에 고온초전도 선에 인가되는 자장의 크기와 방향에 따라 임계전류가 감소하는 특성이 다르다. 이러한 이유로 고온초전도 선으로 권선된 팬케이크 권선형 마그넷의 경우, 팬케이크 권선 내부에서 발생하는 자장은 마그넷의 형상에 따라 달라질 뿐만 아니라 모든 위치마다 다르고 또한 한 가닥의 고온초전도 선에서도 인가되는 자장은 다르다.

그림 1은 마그넷의 형상을 결정하는 요소 중 공극의 변화에 따른 팬케이크 권선 내부에 발생하는 수직자장의 크기와 자력선 분포를 나타낸다. 가장 큰 수직자장의 크기는 공극이 0mm인 경우에는 0.14T 이며, 공극이 5mm인 경우에는 0.10T 이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 공극을 띄워 줌으로써 수직자장의 크기가 줄어드는 것과 자장의 방향이 달라지는 것을 알 수 있다.



**<그림 1> 공극에 따른 마그넷의 자력선 분포**

본 연구에서 공극의 변화에 따른 마그넷의 특성을 계산한 마그넷의



**<그림 2> 마그넷의 구조**

**<표 1> BSCCO 고온초전도 선의 사양**

종 류	BSCCO
폭	4.4mm
두께	0.285mm
임계 전류	126A, 77K, 0T
최소 구부림 직경	38mm
절연 테이프 두께	0.06mm

### 3. 계산 방법

공극의 변화가 마그넷의 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해, 팬케이크 권선 8개가 적층된 마그넷을 팬케이크 권선 하나에 100, 150, 200, 250 턴 씩 권선한 4가지 경우에 대해 최대의 중심자장을 발생하는 마그넷의 임계전류 및 공극을 계산하였다. 본 연구에서는 마그넷의 중심자장이 최대가 되도록 하는 임계전류를 결정하기 위해서 수학적으로 규명이 잘 되어 있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도가 빠른 장점을 갖고 있는 최적화 기법의 일종인 (1+1) 진화론적 기법을 사용하였다. 최적화 과정에서 팬케이크 권선의 각 턴에 인가되는 자장은 각 턴을 M개의 요소로 나눈 후 M개의 요소에 인가되는 자장의 산술평균으로 결정하였으며, 각 턴에서의 임계전류는 각도에 따른 Ic-B 관계를 이용해서 계산하였다. 또한 팬케이크 권선 각 턴의 전계는 식 (1)의 E-J 관계를 이용하여 계산하였고 각 팬케이크 권선에서 발생하는 전압을 식 (2)로 계산하여 계산된 팬케이크 권선의 전압이 허용전압을 넘지 않도록 하여 마그넷의 임계전류를 산정하였다[2].

$$E_n(B) = E_c \left( \frac{I_p}{I_{c,n}(B)} \right)^{n(B)} \quad (1)$$

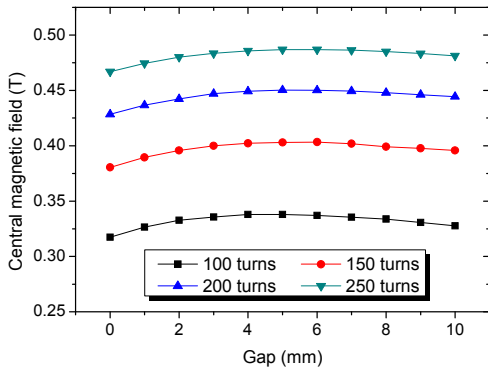
여기서  $I_p$ 는 p번째 팬케이크 권선의 전류,  $I_{c,n}$ 는 각 턴의 임계전류를 나타내며, 전계기준  $E_c$ 는 1 $\mu$ V/cm를 사용하였고  $n(B)$ 는 전력식에 의해 결정되는 값이다.

$$V_p = \sum_{i=1}^N E_n(B) l_n \quad (2)$$

위 식에서  $N$ 은 팬케이크 권선의 턴 수이며,  $l_n$ 은  $n$ 번째 턴의 길이이다.

#### 4. 계산 결과

최적의 공극을 찾기 위해 팬케이크 권선 사이의 공극을 0mm에서부터 10mm까지 1mm 씩 변화를 주어 계산하였다. 우선 팬케이크 권선 간의 공극 변화에 따른 마그네틱의 최대 중심자장의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 공극이 없을 때 보다 공극의 길이가 어느 정도 있을 때 중심자장이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 수의 팬케이크 권선에서 팬케이크 권선의 턴 수의 증가 시 중심자장이 증가하는 것은 하나 증가하는 폭이 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.



<그림 3> 공극 변화에 따른 마그네틱의 중심자장

각 턴 수에 대한 최적화 수행 결과 발생한 최대 중심자장과 그 때의 마그네틱의 임계전류, 공극 및 마그네틱의 중심( $z=0$ )에서부터  $z=10$ mm 떨어진 부분에서의 자장의 불균일도를 표 2에 나타내었다. 발생된 최대 자장은 권선을 가장 많이 한 250 턴의 경우에 0.487T로 가장 컸으며, 불균일도는 공극이 6mm 인 경우에 2% 이내로 공극이 4mm인 경우보다 특성이 좋을 수 있다.

<표 2> 턴 수에 따른 고온초전도 마그네틱의 특성

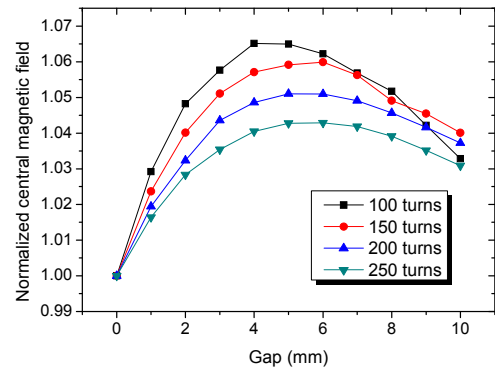
턴 수	100 turns	150 turns	200 turns	250 turns
최대 중심자장	0.338 T	0.403 T	0.450 T	0.487 T
공극	4 mm	6 mm	5 mm	6 mm
임계전류	35.8 A	34.5 A	30.3 A	29.4 A
불균일도	3.05 %	1.98 %	2.15 %	1.68 %

공극 변화에 따른 중심자장의 증가를 확실히 보기 위해 중심자장의 크기가 가장 작은 공극이 0mm인 경우에 대해 정규화 한 그래프가 그림 4이다. 팬케이크 권선 하나 당 100턴을 권선한 마그네틱의 경우 최적의 공극이 4mm인 반면 150턴을 권선한 마그네틱의 경우 최적의 공극은 6mm로 변한 것을 알 수 있다. 이로써 턴 수가 달라짐에 따라 마그네틱의 형상이 달라지게 되어 최대의 중심자장을 발생할 수 있는 공극의 길이 또한 달라짐을 확인하였다. 팬케이크 권선 간의 간격을 최적의 공극으로 두었을 때 공극이 없을 때보다 증가한 마그네틱 중심자장의 증가량은 각 팬케이크 권선 수가 100턴인 경우 약 6.5% 증가한 반면 턴 수가 증가할수록 증가율은 감소하여 250턴인 경우에는 약 4.3%만 증가하였다. 그림 3에서 확인한 바와 같이 턴 수를 증가함으로써 중심자장의 크기는 증가시킬 수 있으나 공극의 효과로 인한 중심자장의 증가율은 오히려 감소하는 것을 그림 4를 통해 알 수 있다.

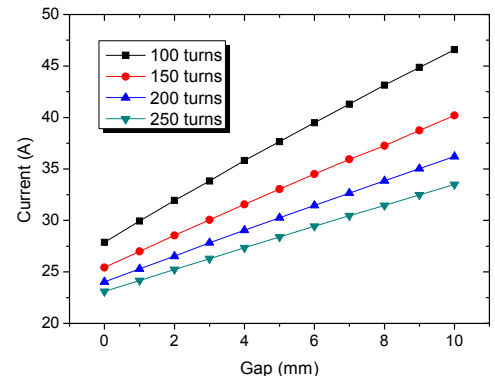
공극 변화에 따른 마그네틱의 임계전류는 그림 5에 나타내었다. 그림 1에서 확인한 바와 같이 공극 길이가 늘어남에 따라 외부자장의 크기가 줄어들게 되어  $I_c-B$  특성에 의해 임계전류가 증가하는 것을 알 수 있다. 각 팬케이크 권선의 턴 수가 증가함에 따라 임계전류가 감소하는 것은 마그네틱의 형상이 옆으로 길쭉한 직사각형 형태로 되어 임계전류 감소 특성에 큰 영향을 미치는 수직자장이 인가되는 면적이 증가하기 때문이다.

그림 6은 마그네틱의 중심( $z=0$ )에서부터  $z=10$ mm인 부분까지의 공극 변화에 따른 자장의 불균일도를 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 공극의 길이가 늘어남에 따라 마그네틱의 형상이 위로 길쭉한 직사각형 형태로 변하게 되어 공극이 없을 때 모든 경우에 대해 4% 이상 균일하지

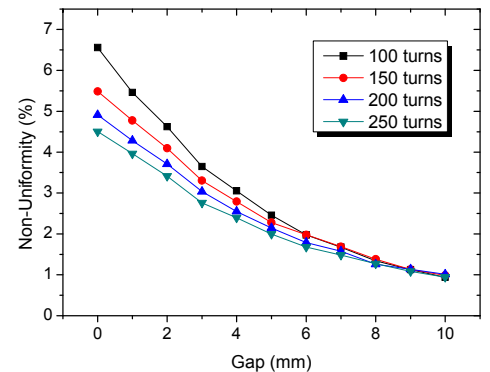
않지만 공극이 가장 클 경우에 불균일도가 1% 내외로 좋아짐을 알 수 있다.



<그림 4> 공극 변화에 따른 정규화된 마그네틱의 중심자장



<그림 5> 공극 변화에 따른 마그네틱의 임계전류



<그림 6> 공극 변화에 따른 마그네틱의 불균일도

#### 5. 결론

본 연구에서는 팬케이크 권선 간의 공극 변화에 따른 마그네틱의 특성을 계산하였다. 계산결과 고온초전도 선으로 권선된 팬케이크형 마그네틱의 경우 저온초전도 선으로 권선된 마그네틱과 달리 공극이 없는 경우보다 최대의 중심자장을 발생할 수 있는 최적의 공극이 있음을 알 수 있었다. 또한 최적의 공극을 뒀으로써 중심자장도 증가시킬 뿐만 아니라 마그네틱의 중심에서 자장의 균일성도 향상됨을 확인하였다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참고 문헌]

- [1] M. Daumling and R. Flukiger, "Factors determining the magnetic field generated by a solenoid made with a superconductor having critical current anisotropy," *Cryogenics*, Vol. 35, pp. 867-780, 1995.
- [2] 강명훈 외 3인 "전계를 이용한 팬케이크 권선으로 제작되는 마그네틱의 임계전류 산정" 대한전기학회 논문지, 제 58권, 제 3호, pp. 502-508, 2009.