

## Design of High Temperature Superconducting Magnet with Magnetic Material

曹永植\* · 權永吉\*\* · 金永均\*\*\* · 李根浩<sup>§</sup> · 洪正杓<sup>§§</sup> · 柳康植<sup>§§§</sup>

(Young-Sik Jo · Young-Kil Kwon · Young-Kyoun Kim · Geun-Ho Lee · Jung-Pyo Hong · Kang-Sik Ryu)

**Abstract** - This paper presents racetrack High Temperature Superconducting (HTS) magnet with iron plates to achieve the maximum current-carrying capacity and the simple shape that can easily be wound and jointed. On the basis of the magnetic field analysis using Biot-Savart's law and 3 Dimensional Finite Element Analysis (3D FEA), this study is focused on the function of iron plates, which is to obtain smaller  $B_{\perp}$ , and stress and strain condition of Ag-sheathed Bi-2223 37-filament HTS tapes are considered. Moreover, the measured performance of the magnet with iron plates improved by 50% on the basis of initial magnet.

**Key Words** : HTS magnet, iron plates, 3D FEA

### 1. 서 론

최근 몇 년 동안 고온초전도 테이프(tape) 도체의 성능이 향상됨에 따라 이를 이용한 HTS 마그네트 응용이 더욱 가속화되고 있고, 특히 선진국에서는 초전도 변압기, 초전도 케이블, 초전도 한류기, 그리고 초전도 에너지 저장장치 등을 현장에 투입하여 실증실험이 진행 중이거나 상용화를 위한 연구가 진행되고 있다 [1-2]. 또한 국내에서도 초전도 변압기, 초전도 발전기 등의 상용화를 위한 연구가 진행 중에 있다 [3-4]. 고온초전도 테이프 도체를 이용한 응용에서는 액체질소 냉각이 가능하므로 비용이 절감되고 냉각 구조를 단순화시킬 수 있는 장점이 있지만, 널리 알려진 것과 같이 테이프 형태의 고온초전도 도체의 임계전류( $I_c$ )는 액체질소의 온도에서 그 테이프 도체의 넓은 면에 수평인 자장( $B_{\parallel}$ )에 비해 수직인 자장( $B_{\perp}$ )에 의해 매우 큰 폭으로 감소하는 특징을 가지고 있다 [5-6]. 따라서 고온초전도 마그네트의 설계에서 그 마그네트의 안정도와 성능향상을 위하여 HTS 테이프 도체에 채교하는 수직자장을 감소시킬 수 있는 방법을 고려하여야 한다.

일반적으로 초전도 마그네트는 전기저항이 영(zero)인 초전도체의 특성을 이용하여 구리를 사용하여서는 거의 불가능한 수~수십 Tesla 정도의 고자장으로 개발되었다. 따라서 대부분의 초전도 마그네트는 철심에 의한 손실을 피하기 위해서 비자성체인 보빈에 초전도체를 권선하는 공심형으로 설계·제작되었고, 자성체를 사용하여 초전도 마그네트의 자장특성을 개선하는 것에 대한 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 두 가지 단계를 통해 고온초전도 마그네트에 발생하는  $B_{\perp}$ 을 감소시킬 수 있는 방법을 연구하였으며, 이 과정에서 고온초전도 선재의 기계적 특성에 따른  $I_c$  특성을 고려하여 설계의 제한조건으로 고려하였다.

첫 번째 단계에서는, 초기 설계된 고온초전도 마그네트를 RSM (Response Surface Methodology)을 이용하여 최적화하였다 [7]. 이 단계에서 초기 설계된 고온초전도 마그네트와 최적화된 마그네트에서 발생하는 최대  $B_{\perp}$ 의 크기를 비교하였다. 또한, 고온초전도 테이프 도체를 권선하여 마그네트를 제작할 때에는 굽힘력과 인장력이 가해지게 되고, 이것은 사용된 고온초전도 테이프 도체의  $I_c$ 를 감소시키는 결정적인 요인이 되기 때문에 고온초전도 마그네트 설계의 초기 과정에서 실험을 통하여 고온초전도 선재의 용력과 변형률에 따른 조건을 결정하여 설계의 제한 조건으로 포함시켰다 [8].

그리고 다음단계에서, 초기 설계된 마그네트와 최적화된 마그네트, 그리고 초기 설계된 마그네트에 자성체인 규소강판을 삽입한 마그네트의 자속밀도 분포를 3D FEA(Magnet V)와 실험을 통해 비교하였다. 이 단계에서의 목적은 HTS 마그네트에 삽입한 자성체가 얼마나 많이  $B_{\perp}$ 을 감소시키는 역할을 하는지 확인하고 이러한 설계방법의 타당성을 검증하여 HTS 마그네트를 설계하는 새로운 방법으로 규소강판을 포함하는 것을 제안하려는 것에 있다.

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 초전도응용그룹, 위촉연구원

\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 초전도응용그룹, 그룹장

\*\*\* 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 博士課程

§§ 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 助教授 · 工博

§§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 전략기술연구단, 단장

接受日字 : 2001年 4月 17日

最終完了 : 2001年 7月 3日

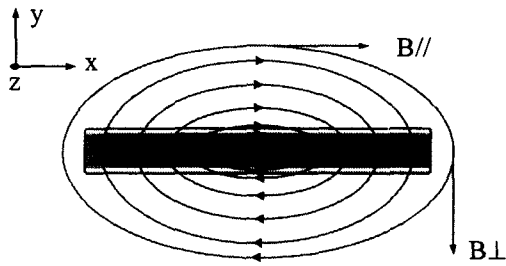


그림 1. HTS 테이프 도체의 단면에 전류가 흐를 때 만들어지는 자속

Fig. 1. The field lines round a strip carrying a current

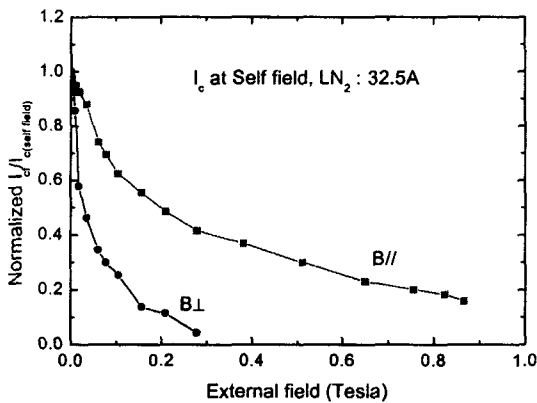


그림 2. Ic-B 특성곡선 (77K)

Fig. 2. Ic vs. B

## 2. 초기 설계된 HTS 마그네트

### 2.1 HTS 테이프 도체의 자장특성

그림 1은 고온초전도 테이프 도체에 전류가 흐를 때의 자속선을 단순히 도식화하였다. B $\perp$ 은 y축 방향, B//은 x축 방향이며, 전류는 z축 방향으로 흐르고 있다. B//은 윗면과 밑면에 집중되고, B $\perp$ 은 고온초전도 테이프 도체의 가장 자리에 집중되는데 특히 B $\perp$ 의 크기가 고온초전도 테이프 도체의 Ic에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

그림 2는 Ag-sheathed Bi-2223 37-filament 테이프 도체의 Ic-B 특성곡선으로 같은 계열의 다른 HTS도 비슷한 양상을 나타낸다. 여기서 Ic(self field)는 외부자장이 없는 조건에서의 HTS의 임계전류이고 Icf는 외부자장이 가해진 조건에서의 HTS의 임계전류를 나타내며 액체질소의 온도, 외부자장이 없는 조건에서의 HTS의 Ic는 32.5A 이다. Ic-B 특성은 냉매로 LN<sub>2</sub>를 사용한 77K 온도에서의 양상이지만 온도가 낮아지면 자장에 따라 Ic가 급격히 감소하는 영역이 줄고 자장에 대한 영향이 현저하게 적어지는 특성을 나타낸다. 현재 설계된 HTS 마그네트는 30K~40K의 온도에서 운전할 것으로 설계되었는데 Ic-B 특성은 선제제작 업체인 NST (Nordic Superconductor Technologies)에서 제공한 것을 이용하였다.

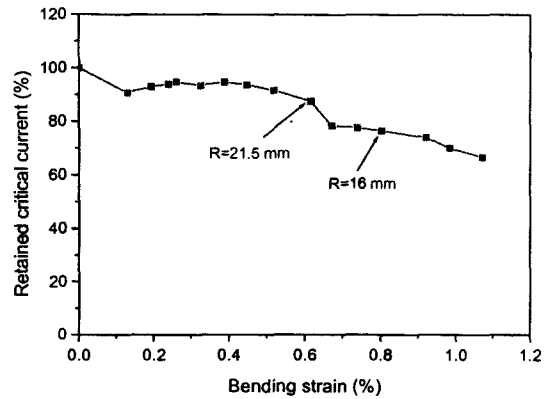


그림 3. 굽힘변형에 따른 Ic 변화

Fig. 3. The percentage drop in Ic vs. bending strain

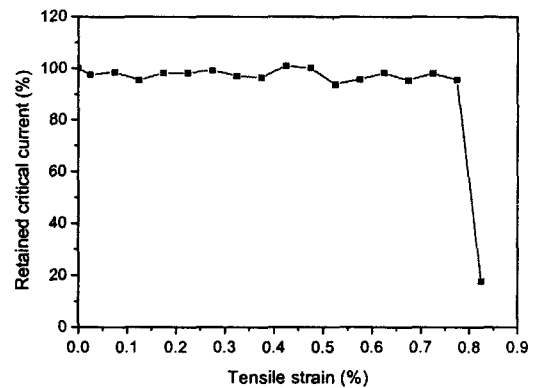


그림 4. 인장변형에 따른 Ic 변화

Fig. 4. The percentage drop in Ic vs. tensile strain

### 2.2 HTS 테이프 도체의 응력특성

사용할 HTS 테이프 도체의 단면적은 3×0.25 mm<sup>2</sup>이고 굽힘변형에 따른 Ic 특성은 실험을 통해 검토하였다. 실험을 위해서 먼저 하나의 HTS 테이프 도체를 선택하여 액체질소 속에서 임계전류를 측정한다. 대기 중에 꺼내어 원형 디스크의 측면에 붙이고 Ic를 측정한다. 조금씩 작은 원형 디스크를 이용하여 반복해서 실험하였으며 이 결과는 그림 3과 같다. 여기서 곡률반경 16 mm에서 약 20%의 Ic 감소가 발생하였다.

인장변형에 따른 Ic를 측정하기 위해 마이크로메타를 가진 장치를 고안하여 제작하였으며, 이 장치에 HTS 테이프 도체를 부착하여 액체질소에 담근 뒤에 실험한 결과는 그림 4와 같다. 권선에서의 인장응력은 HTS 테이프 도체가 극저온으로 냉각되면 수축하는 변형과 굽힘에 의한 Ic 감소가 예상되므로 응력변형의 약 10%이하인 10MPa이하로 결정하였다.

### 2.3 초기 설계

본 논문에서 다루는 HTS 마그네트는 실험용 3kW급 고온초전도 동기전동기의 계자로 초기 설계되었다. 설계에 앞서 HTS 테이프 도체의 응력과 변형률에 따른 Ic 특성을 실험을 통하여 HTS 마그네트의 최소 굽힘반경은 16 mm, 그리고 권선 시의 최대 인장력은 10MPa로 결정하였다. HTS 마그네트

의 초기 형상은 회전자에 삽입 될 것이므로 기존의 직사각형 태를 피하고 계단형태를 선택하였으며, 4개의 마그네트를 사용하는 4극기이므로 마그네트의 최대 폭은 각 마그네트가 회전 시 진동 없게 고정시키기 위한 구조물을 설치할 수 있는 공간을 제외하고 최대한 넓게 설계하였다.

그림 5는 초기 마그네트의 단면과 사용된 HTS 테이프 도체 단면의 치수를 보여준다. 여기서 P1, P2, 그리고 P3는 각 더블 팬케이크 코일의 위치이며  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , 그리고  $x_4$  는 최적화에서 사용된 설계변수로 아래에 자세히 설명된다. 사용된 HTS 테이프 도체 단면의 치수는 넓은 면의 길이가 약 3mm, 좁은 면이 0.25 mm이고 마그네트 하나에 467턴이 권선 되었다. 이 레이스트랙 형태의 마그네트는 Ag-sheathed Bi-2223 37-filament를 사용하여 P1의 굽힘반경은 21.5mm이고 P2와 P3는 16mm이다. 그림 6은 레이스트랙 HTS 마그네트의 전체형상을 도식화 한 것으로 상대적으로 긴 직선부와 짧은 곡선부로 구성된다. HTS 마그네트의 보빈은 비자성체를 사용하므로, 주위에 투자율의 변화가 없이 마그네트 하나만 있는 경우의 자속밀도 분포는 해석적인 방법으로 계산 할 수 있다. 식 (1)은 자속밀도 계산에 사용한 Biot-Savart의 수식이다 [9].

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left( \frac{dl' \times R}{R^3} \right) \quad (1)$$

여기서  $dB$  는 미소 전류소에 의한 임의의 점에서의 자속밀도,  $\mu_0$  는 공기중의 투자율,  $Idl'$  는 미소 전류소,  $R$  은 미소 전류소에서 임의의 점으로 가는 벡터이다.

그림 7은 초기 마그네트의  $B_{\perp}$ 의 분포를 등자속밀도선도로 나타낸 것이다. HTS 마그네트는 P1 밀면과 P3의 윗면에 가장 큰 값을 발생시키는 것을 알 수 있다.

### 3. RSM을 이용한 HTS 마그네트 최적화

RSM은 통계적 근사방법으로서, 설계변수와 출력사이의 관측자료로부터 설계변수와 출력사이의 관계를 근사함수로 규명한다. 일반적으로 이 근사함수는 식 (2)와 같이 다항식형태로 가정하고 이 근사함수의 회귀계수는 최소자승법을 이용하여 구한다. 이러한 근사함수를 목적함수 또는 제약함수로 정의하여 최적화 알고리즘을 적용하면 최적해를 쉽게 찾을 수 있다.

본 연구에서는 실험계획법의 하나인 중심합성계획을 이용하여 25번의 조합을 구하고 각 조합에 따른  $B_{\perp}$ 에 대한 관측자료로부터 설계변수에 변화에 대한 최대  $B_{\perp}$  값에 대한 식 (2)와 같이 근사적으로 구하였다. 그리고 이 근사함수가 나타내는 최대  $B_{\perp}$  값이 최소인 해를 찾기 위해서 최적화 알고리즘을 적용하였다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

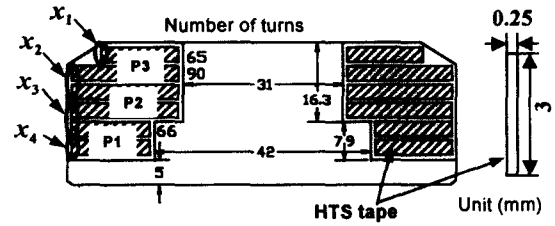


그림 5. 초기 설계된 마그네트와 HTS 도체의 치수 그리고 설계변수

Fig. 5. Cross section view of the initial magnet, dimension of HTS tape and design variables

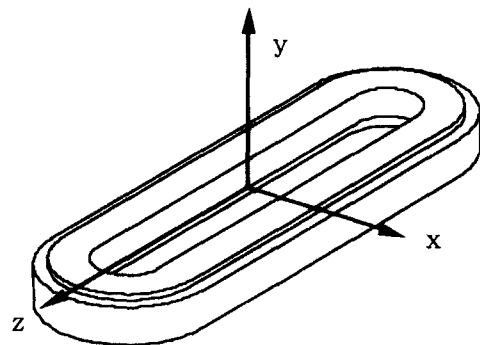


그림 6. 레이스트랙 HTS 마그네트의 전체 형상  
Fig. 6. Overall view of coil shape of the racetrack HTS magnet

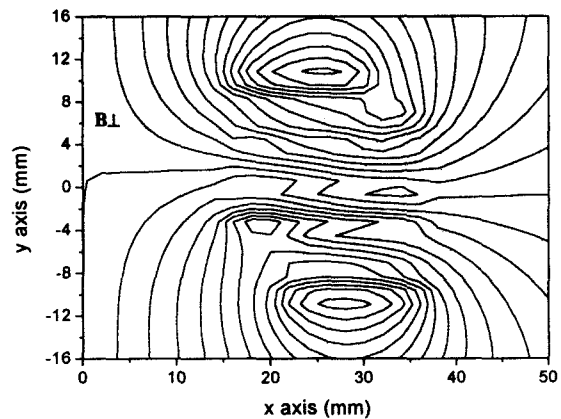


그림 7. 초기 설계된 마그네트에서의  $B_{\perp}$  분포  
Fig. 7.  $B_{\perp}$  distribution of the initial HTS magnet

여기서,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  는 설계변수로서 각 팬케이크 코일의 층간 코일 턴수에 따른 최외각 코일위치를 팬케이크 코일의 중심에서의 거리로 환산한 값을 나타낸다.  $\beta_0$ ,  $\beta_j$ ,  $\beta_{jj}$ , 및  $\beta_{ij}$  는 회귀계수로서 표 1과 같다.

표 1 예측모델에 대한 회귀계수

Table 1 Regression coefficients of the predictive model

계수	추정값	계수	추정값
$\beta_0$	$-1.6683 \times 10^1$	$\beta_{44}$	$-2.5771 \times 10^{-5}$
$\beta_1$	$1.3802 \times 10^{-2}$	$\beta_{12}$	$1.9281 \times 10^{-4}$
$\beta_2$	$2.3643 \times 10^{-3}$	$\beta_{13}$	$1.3059 \times 10^{-4}$
$\beta_3$	$2.3812 \times 10^{-34}$	$\beta_{14}$	$3.3312 \times 10^{-5}$
$\beta_4$	$1.5505 \times 10^{-3}$	$\beta_{23}$	$4.1469 \times 10^{-5}$
$\beta_{11}$	$-3.9818 \times 10^{-4}$	$\beta_{24}$	$7.5000 \times 10^{-6}$
$\beta_{22}$	$-9.5552 \times 10^{-4}$	$\beta_{34}$	$6.0312 \times 10^{-6}$
$\beta_{33}$	$-6.7333 \times 10^{-5}$		

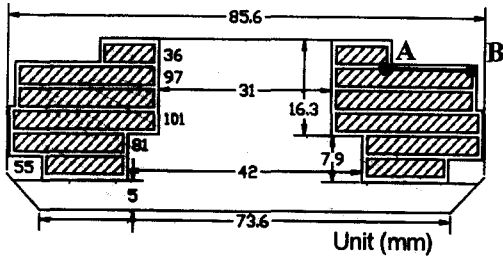


그림 8. 최적화된 HTS 마그네트의 단면  
Fig. 8. Cross section view of the optimized magnet

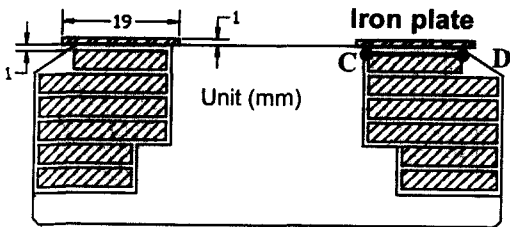


그림 9. 규소강판이 삽입된 초기 설계된 HTS 마그네트의 단면  
Fig. 9. Cross section view of the initial magnet with iron plate

본 논문에서 최대  $B_{\perp}$  값이 최소인 해를 찾기 위해서 식(2)를 목적함수로 정의하였다. 그리고, 팬케이크 코일의 총턴수는 그림 5에 나타낸 것처럼, 각 팬케이크 코일의 최외각 코일 위치와 최내각 코일 위치의 거리 차이를 코일 두께 0.25 (mm)로 나눔으로써 구할 수 있으며, 전체 코일 턴수가 467턴이 되도록 식(3)과 같이 등호제약함수를 정의하였다. 식(4)~식(7)은 설계변수의 상한 및 하한의 한계 값을 나타낸다. 여기서, 비선형 제약문제를 풀기위해서 최적화 방법 중의 하나인 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였다.

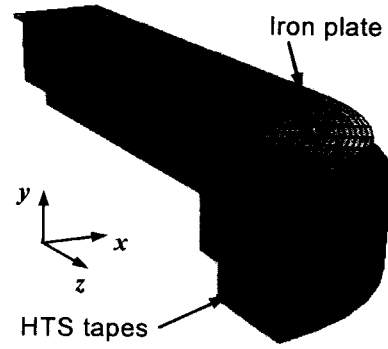


그림 10. 규소강판이 삽입된 HTS 마그네트의 3D FEA 모델  
Fig. 10. 3D FEA model of magnet with iron plate

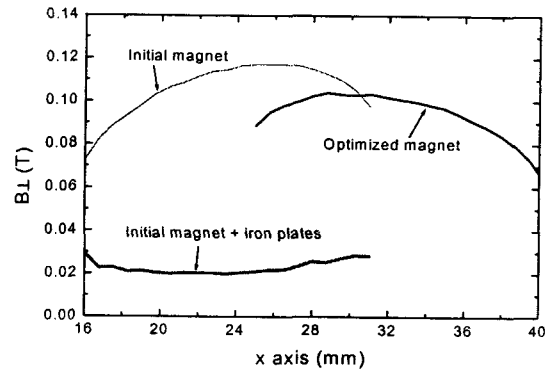


그림 11. 그림 8의 선분 A-B와 그림 9의 선분 C-D에서의  $B_{\perp}$ 에 대한 3D FEA 결과  
Fig. 11. 3D FEA results of line A-B in Fig. 8 and line C-D in Fig. 9

HTS 마그네트의 제작한계로부터 제약은 다음과 같이 정의된다.

$$H(x) = \frac{x_1 - 16.35 + 2(x_2 - 16.35)}{0.25} + \frac{x_3 - 16.35 + x_3 - 21.85 + x_4 - 21.85}{0.25} - 467 \quad (3)$$

$$= \frac{x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 - 109.1}{0.25} - 467$$

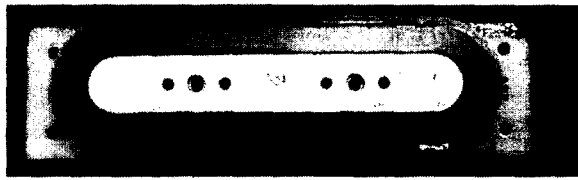
$$24.6 \leq x_1 \leq 32.6 \quad (4)$$

$$34.35 \leq x_2 \leq 42.35 \quad (5)$$

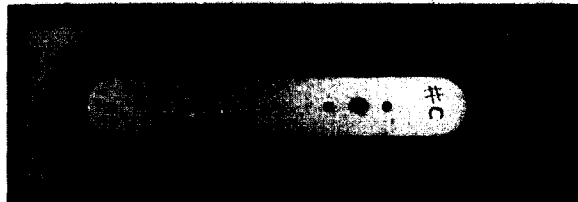
$$34.35 \leq x_3 \leq 42.35 \quad (6)$$

$$29.1 \leq x_4 \leq 37.1$$

(7)



(a) 초기 HTS 마그네트  
(a) Initial HTS magnet



(b) 최적화된 HTS 마그네트  
(b) Optimized HTS magnet



(c) 규소강판 (SE18C)  
(c) Iron plate

그림 12. 권선된 마그네트와 규소강판

Fig. 12. Photographs of each wound magnet and the iron plates

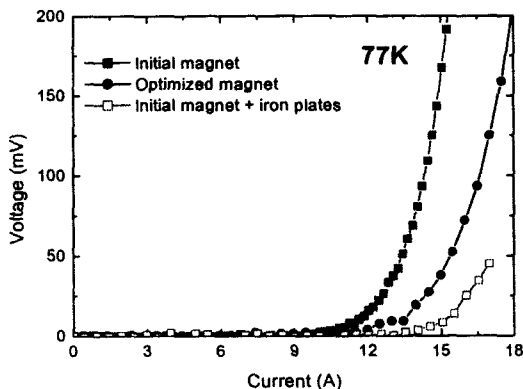


그림 13. 마그네트의 P3에서의 I-V 실험결과

Fig. 13. Test results of I-V at P3 of each magnet

그림 8은 최적화된 HTS 마그네트의 단면을 나타내며 선분 A-B는  $B_{\perp}$ 의 최대치가 발생하는 곳의 위치를 표시한다. 최적화된 마그네트는 초기 설계된 마그네트에 비해 다소 제작하기 복잡한 구조가 됨을 알 수 있다. 15A 여자 시에 3D FEA를 이용하여 HTS 마그네트 하나에 대해 전자장 해석을 수행한 결과로, 초기 마그네트의 최대  $B_{\perp}$ 은 0.117T, 최적화된 것은 0.104T로 최적화된 마그네트의 최대  $B_{\perp}$ 이 약 11% 감소하였다.

#### 4. 규소강판을 사용한 HTS 마그네트

그림 9는 초기 HTS 마그네트에 규소강판을 포함한 것을 나타낸다. 규소강판은 SE18C를 사용하였으며 크기와 위치는 3D FEA를 이용하여 선정하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 일반적으로 구리도체를 사용한 마그네트에서는 자장의 집중 효과를 얻기 위해서 자성체를 보빈으로 사용하거나, 또는 자기차폐나 자로를 만들기 위한 자기철이나 외함으로 사용된다. 본 연구에서는 마그네트 주변의 자로를 변경하여 HTS 테이프 도체에 발생하는  $B_{\perp}$ 을 감소시키기 위해서 규소강판을 채택하였는데, 그 규소강판의 크기, 위치, 그리고 종류는 마그네트의 형상이나 사용조건 등에 따라 달라지게 된다.

해석적인 방법으로 규소강판의 자기포화특성을 고려하여 HTS 마그네트의 자속밀도 분포를 구하는 것은 매우 힘들기 때문에 3D FEA를 이용하여 계산하였다. 그림 10은 3D FEA를 수행하기 위한 해석모델로 대칭조건을 고려하여 전체의 1/4로 선정하였으며 HTS 마그네트의 정자계 해석시 계변수는 자기스칼라 포텐셜을 사용하였다.

그림 11은 초기 설계된 마그네트, 최적화된 마그네트, 그리고 초기 설계된 마그네트에 규소강판을 포함시킨 마그네트에 15A를 인가했을 때, 각 마그네트에서 가장 큰  $B_{\perp}$ 이 발생하는 곳인 그림 8의 선분 A-B와 그림 9의 선분 C-D에서의 3D FEA 결과이다. 규소강판이 삽입된 HTS 마그네트에서  $B_{\perp}$ 이 집중되는 부분인 선분 C-D에서의 자속은 자기저항이 작은 규소강판으로 유도되면서 HTS 테이프 도체에 쇄교하는 자속이 현격히 감소한다. 마그네트에 발생하는 최대  $B_{\perp}$ 을 초기 마그네트와 규소강판을 삽입한 것을 비교하면 규소강판을 삽입한 것이 약 75% 이상 감소하였다.

#### 5. 실험 및 검토

초기 모델은 241 m, 최적화된 모델은 249 m의 HTS 테이프 도체를 사용하여 비 자성체인 SUS 보빈에 권선하여 제작하였다. HTS 테이프 도체와 보빈간의 전기적인 절연은 0.06 mm 두께의 캡톤 테이프를 사용하였다. HTS 도체는 비틀림으로 인해 크게  $I_c$ 가 감소하므로 P1에서 P3까지 끊지 않고 계속 권선 할 수 없다. 따라서 HTS 마그네트의 권선은 각 팬케이크 단위로 권선하여 팬케이크간에 상전도 접합을 하는 방법을 사용하였다. 각 더블 팬케이크 코일간의 접합에 사용된 길이는 최 외각 한턴의 길이이며 접합체는 선재 제작업체에서 제공한 것을 사용하였다. 각각의 HTS 마그네트는 기계

적으로 견고하게 하기 위해서 에폭시 함침을 하였으며, 최종 제작된 마그네트는 그림 12의 (a),(b)와 같고 자속의 경로를 바꾸기 위해 사용한 규소강판은 그림 12의 (c)와 같다.

제작된 마그네트의 I-V 실험에서 전류는 0.5A/sec 비율로 여자하였으며 그 결과는 그림 13과 같다. 각 마그네트 P3에서의 HTS 테이프 도체의 길이는 초기 마그네트는 70 m, 그리고 최적화된 마그네트는 68 m이다. 초기 마그네트, 최적화된 마그네트, 그리고 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것의 임계전류는 액체질소에서 각각 10A, 12A, 그리고 15A이다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 초기 마그네트와 최적화된 마그네트, 그리고 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것을 3D FEA와 실험을 통해 비교하였다. 최대  $B_{\perp}$ 가 발생하는 P3에서의 임계전류는 초기 마그네트에 규소강판을 사용한 것이 초기 마그네트에 비해 5A 증가함을 확인하였다. 지금까지 HTS 마그네트는 공심코어의 형태가 일반적이지만 본 논문에서는 다음과 같은 이유로 HTS 마그네트의 설계 과정에서 규소강판을 사용하여 자장에 대한 특성을 검토하였다.

(1) 규소강판이 코일주변의 자속경로를 바꾸어 HTS 테이프 도체에 쇄교하는  $B_{\perp}$ 을 감소시킨다.

(2) 마그네트의 형상이 단순해지므로 HTS 테이프 도체의 권선이나 접합이 용이해진다.

상기와 같은 장점에 반대로, 시변자장이 존재할 경우 규소강판에는 이에 따른 손실이 발생하게 되지만, 본 논문에서 다루는 3kW 고온초전도 전동기의 계자로 사용하는 HTS 마그네트에서는 정격전류에 도달하기 전의 과도 상태를 제외하고는 이러한 시변자장의 발생이 거의 없으므로 이는 고려할 필요가 없다.

### 참 고 문 헌

[1] B.B. Gamble, G.L. Snitchler and R.E. Schwall, "Prospects for HTS Applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp. 2714-2719, 1996.

[2] J.F. Picard, M. Zouiti, C. Levillain, M. Wilson, D. Ryan K. Marken, P.F. Herrmann, Y. Parasie, J. Bock, M. Baecker, J.A.A.J. Perenboom and J. Paasi, "Technologies for High Field HTS Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 535-540, 1999

[3] 이회준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도 변압기", 대한전기학회논문지, 제50B권, 제2호, pp. 65-72, 2001

[4] 조영식, 홍정표, 이주, 손명환, 권영길, 류강식, "공심형 초전도 동기발전기의 설계변수에 대한 연구", 대한전기학회논문지, 제50B권, 제3호, pp. 101-106, 2001

[5] A.B. Sneary, C.M. Friend, P. Richens, H. Jones and E.P. Hampshire, "Development of High Temperature Superconducting coils Using Bi-2223/Ag Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 936-939, 1999

[6] C. Reimann, O. Waldmann, P. Muller, M. Leghissa, B. Roas, "Current Carrying Capability of Multifilamentary (BiPb)2Sr2 Ca2Cu3Ox Tapes Determined from Transport and Magnetization Measurements", Applied Physics Letters, Vol. 71, No. 22, 3287- 3289, 1997

[7] R.H. Mayers, Response Surface methodology, John Wiley & Sons, 1995

[8] P. Skov-Hansen, Z. Han, J.I. Bech, "Stresses and Strains in Multi-Filament HTS Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 2617-2620, 1999

[9] David K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Addison Wesley, 1993

저 자 소 개



조 영 식 (曹 永 植)

1970년 8월 20일 생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 위촉연구원. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-280-1697

E-mail : ysj088@orgio.net



이 근 호 (李 根 浩)

1969년 4월 11일 생. 1992년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 전기공학 대학원 졸업(석사). 1994년~현재 LG-OTIS 선임연구원. 현재 창원대 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : geunho.lee@otis.co.kr



권 영 길 (權 永 吉)

1959년 7월 28일 생. 1982년 부산대 기계공학과 졸업. 1984년 대학원(석사). 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일 생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수



김 영 균 (金 永 均)

1971년 7월 14일 생. 1998년 창원대 전기공학과 졸업. 2000년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : ensigma@hitel.net



류 강 식 (柳 康 植)

1956년 8월 20일 생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구원 전략기술연구단 단장