

운전전류를 고려한 고온초전도 모터용 계자코일의 설계

조영식, 서무교, 백승규, 김석환, 손명환, 권영길, 홍정표*
한국전기연구원, 창원대학교*

Design of Field Coil for High Temperature Superconducting motor considering Operating Current

Young-Sik JO, Moo-Gyo Seo, Sung-Kyu Baik, Seog-Whan Kim, Myung-Whan Sohn, Young-Kil Kwon, Jung-Pyo Hong*
Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon National University*

ysjo88@orgio.net

Abstract - The value of I_c (critical current) in HTS (High Temperature Superconducting) tape has a great influence on B_{\perp} (magnetic field amplitude applied perpendicular to the tape surface). Therefore, I_c of HTS magnet is determined by not only operating temperature but also the B_{\perp} . In shape design of field coil for the HTS motor, a method to reduce the B_{\perp} and to determine operating current should be considered in order to optimal design. On the basis of the magnetic field analysis, this paper deals with various field coil shape to obtain operating current of HTS motor by using analytical method. And also this paper discusses the operating current of 100hp class HTS motor by using I_c - B_{\perp} curve.

1. 서 론

초전도 모터 개발의 초기 단계에서는 LTS (Low Temperature Superconductor)를 사용하여 저온초전도 발전기에 대한 연구가 많았지만 최근에는 HTS를 이용한 고온초전도 모터의 연구가 진행되고 있다. 특히 미국에서는 33,000 hp급의 초전도 모터를 개발하여 군함의 추진시스템으로 채택할 계획으로 추진하고 있으며 현재 기초시험을 수행 중에 있다. 최근에 유럽의 다국적기업인 Siemens사에서 미국 ASC (American Superconductor Corporation)와 공동연구를 통해 533hp급의 초전도모터를 개발하였다. 현재 국내에서는 프론티어 사업의 일환으로 한국전기연구원에서 100hp급 고온초전도 모터를 개발 중에 있다.

고온초전도 테이프 도체는 쇠교하는 수직자장과 인장 응력이나 굽힘응력에 의한 임계전류의 영향이 크므로 고온초전도 마그네트의 설계에서는 이를 고려하여 설계하고 있다. 고온초전도 모

터의 계자코일로 사용되는 고온초전도 마그네트에서는 기계적 응력을 제한조건으로 다루고 있으며, 특히 전기자와 쇠교하는 자속밀도의 반경방향 성분의 크기는 모터의 회전력을 만드는 성분이므로 설계의 중요한 사항이 된다 [2].

초전도 계자코일의 권선은 더블 팬케이크 코일을 만들어서 결합하는 방식을 사용하고 있다. 일반적으로 더블 팬케이크 코일간의 결합은 상도체 접합을 하고 있으므로 접합에서의 손실이 초전도 접합에 비해 매우 크다. 따라서 고온초전도 계자코일의 운전전류는 더블 팬케이크 간의 접합 손실에 의해 감소하게 되므로 운전전류는 이를 고려한 마진을 두어야 한다.

본 논문에서는 100hp급 고온초전도 모터의 계자코일로 사용할 고온초전도 마그네트의 형상 변화에 따른 특성을 설계한 모델과 간단한 직사각형 단면을 가지는 모델에 대해서 검토해보았다. 동일한 운전온도와 응력조건을 가정하고 각 모델에 대한 B_{\perp} 과 B_r (radial component of flux density)을 비교하였다. 그리고 I_c - B_{\perp} 특성곡선을 기준으로 하여 계자코일의 운전전류를 계산하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 고온초전도 모터의 단면을 나타낸다. 4극으로 정격출력 100hp으로 설계되었다. 그림 2는 설계된 고온초전도 마그네트의 단면으로 총 1075턴으로 4개의 더블 팬케이크 코일로 구성되며, 턴당 정격전류는 45.45A이다. 계자코일의 형상은 반경 111~132 mm 사이에 적절히 배치하기 좋은 형태로 결정된 것이다. 계자코일의 내쪽은 HTS의 곡률반경을 고려하여 선정된 것이며, 외쪽은 계자코일을 고정할 수 있는 기계적 공간을 고려하여 결정된 것이다.

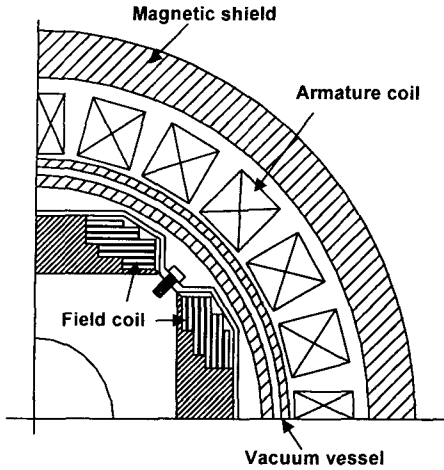


Fig. 1. Cross-section view of the HTS motor

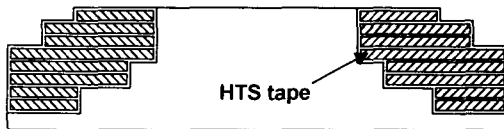


Fig. 2. Cross-section view of the HTS field coil

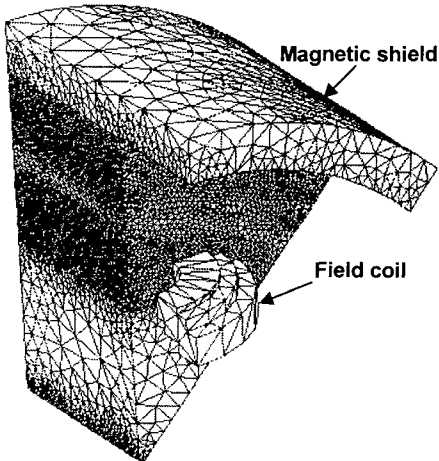


Fig. 3. Mesh generation of 3D analysis model

2.2 해석방법

제작과정에서는 하나의 마그네트에 대한 특성 실험을 기준으로 모터의 제작이 진행되므로 먼저 마그네트 하나에 대한 자장특성을 검토하였다. HTS 마그네트 하나에 대하여 HTS 테이프 도체에 쇄교하는 수직자장(B_{\perp})의 크기를 계산하기 위해서 수식 (1)을 사용한 해석적 방법으로 구하였다. 매질이 균일하고 HTS 마그네트 하나만 존재할 때, 수식 (1)을 사용하여 자기 벡터포텐셜 A 를 구할 수 있고, 수식 (2)에 대입하여 계산하면 임의의 점에서 자속밀도를 구할 수 있다.

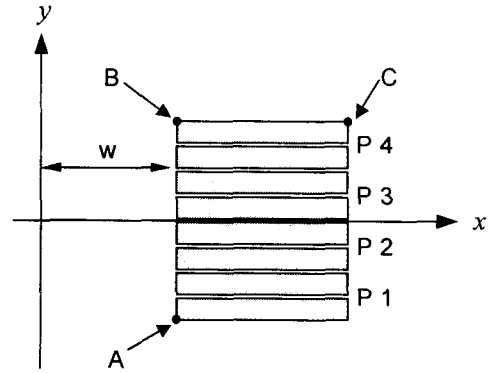


Fig. 4. Rectangle model

Table 1. Classifications of rectangle model
Unit (mm)

모델명	w1	w2	w3	w4	w5
곡률반경	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5

$$A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{dz'}{\sqrt{(z' - z)^2 + r^2}} a_z \quad (1)$$

여기서 A 는 자기 벡터포텐셜, μ_0 는 공기 중에서의 투자율, z' 은 미소 전류소의 중심 좌표값, z 는 임의의 점에서 z 축으로 투영시켰을 때의 z 좌표값, r 은 z 에서 임의의 점까지의 거리, $2L$ 은 미소 전류소의 길이이다.

$$B = \nabla \times A = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} a_r - \frac{\partial A_z}{\partial r} a_{\phi} \quad (2)$$

고온초전도 모터에서의 자속밀도의 분포는 2차원 자기영상법을 사용하였다. 고온초전도 모터의 자속밀도 분포는 축방향으로 저감하는 3차원적인 분포를 가지고 있어서 2차원 해석으로는 특성분석의 오차가 많다. 하지만 2차원 해석결과가 3차원 해석에서의 중심단면에서의 결과와 큰 차이를 보이지는 않고, 고온초전도 마그네트에 쇄교하는 최대 B_{\perp} 도 중심단면에서 발생하므로 약간의 오차를 수반하지만 짧은 시간에 계산이 가능하다. 따라서 설계의 초기단계에서 고온초전도체의 자장 특성을 고려하여 대략적인 운전전류를 계산할 수 있는 유용한 방법이 된다. 수식 (3)을 사용하여 영상전류의 위치를 결정하여서 고온초전도 모터의 자속밀도 분포를 계산하였다.

$$R_I = \frac{C}{A} \quad (3)$$

여기서 R_I 는 영상전류의 반경, C 는 자기설드의 내 반경, 그리고 A 는 실제전류의 반경이다.

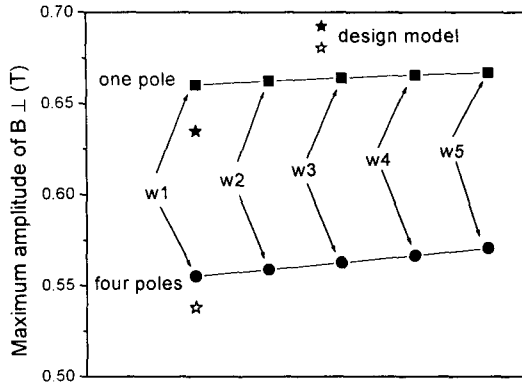


Fig. 5. Maximum amplitude of B_{\perp}

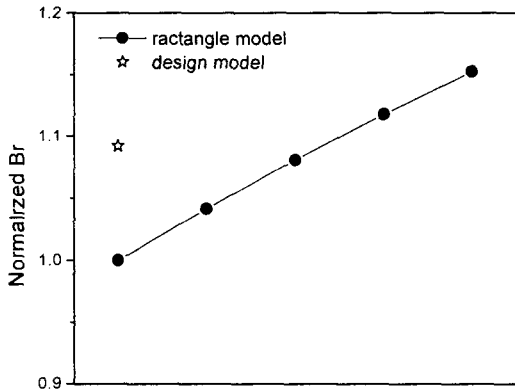


Fig. 6. Maximum amplitude of Br

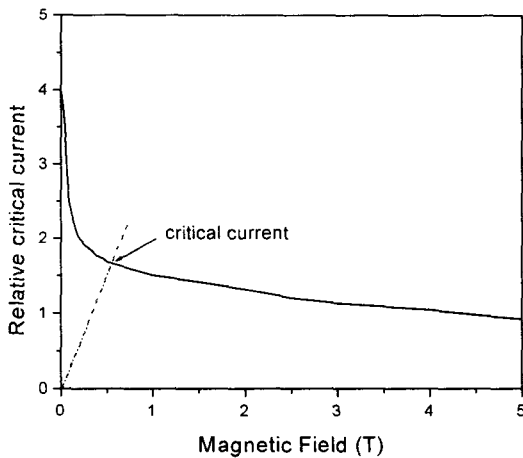


Fig. 7. Relative I_c vs. B_{\perp} at 25K

3차원 자장해석은 상용프로그램인 Magnet V를 사용하였으며 그림 3은 요소분할을 수행한 해석모델을 나타낸다.

2.3 B_{\perp} 분포특성

그림 4은 권선과 팬케이크간의 상도체 접합이 용이한 단순한 직사각형의 HTS 마그네트의 해석모델을 나타낸다. 고온초전도체에 쇄교하는 최대 B_{\perp} 는 B-C 직선에서 발생하며 최대 B_{\perp} 는

A-B 직선에서 발생한다. 엔드링에서 발생하는 B_{\perp} 는 중심단면에서 발생하는 값보다 적어서 무시하였다. 표 1은 해석모델에 따른 HTS 테이프 도체의 곡률반경을 보여준다.

그림 5는 설계된 모델과 곡률반경 변화에 따른 B_{\perp} 의 크기변화를 보여준다. 곡률반경이 적을수록 B_{\perp} 이 적으므로, 운전온도에서 곡률반경에 대한 고온초전도체의 임계전류의 감소가 적다면 곡률반경을 적게하는 것이 유리함을 알 수 있다. 설계된 모델과 직사각형 단면의 형상에서 B_{\perp} 의 차이는 크지 않았고, 마그네트 하나만 있는 경우보다 모터에 4극으로 주기적으로 배치되면 B_{\perp} 이 적어질 것으로 예상된다.

2.4 운전전류 선정

그림 6는 설계된 계자코일의 곡률반경과 같은 직사각형 단면을 가지는 해석모델의 최대 Br을 기준으로 각 해석모델의 결과를 표준화한 것이다. 계자의 폭이 커질수록 B_{\perp} 의 증가에 비해 Br이 크게 증가함을 알 수 있다. 하지만, 운전온도에서 HTS의 임계전류 값이 B_{\perp} 에 큰 영향을 받으므로 운전전류의 결정에 신중하여야 한다.

고온초전도 계자코일의 기초실험은 NST (Nordic Superconductor Technologies)에서 구입한 HTS를 사용하였다. 운전온도에서 운전전류 선정의 타당성은, 그림 7과 같이 NST에서 제공된 액체질소온도를 기준으로 25K에서의 임계전류와 자장에 대한 특성을 근거로 검토하였다. 3차원 자장해석을 통해 HTS 계자코일에 쇄교하는 최대 B_{\perp} 은 0.52T로 계산되었다. 운전온도 25K에서의 임계전류는 액체질소 온도에서 보다 약 1.6배정도 증가하므로 약 61A 정도이다. 따라서 30K에서의 임계전류가 조금 감소하고, 더블 팬케이크 코일간 3번의 상도체 집합을 고려하더라도 타당한 운전온도라고 할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 100hp급 고온초전도 모터용 계자코일의 자장분포 특성을 기준으로 운전전류를 계산하였다. 계자코일의 내폭은 적을수록 B_{\perp} 의 최대값이 감소하여 HTS의 임계전류의 증가에 예상되며 설계된 고온초전도 계자코일의 임계전류는 약 61A로 계산되었다.

[참 고 문 헌]

[1] Shipboard Superconductors, IEEE Spectrum, February, pp. 22-23, 2001
 [2] Y.S. Jo, et al., "advanced design approach to the high temperature superconducting magnet", Cryogenics, Vol., 41, pp. 27-33, 2001

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다