

고온초전도 전동기용 계자코일의 임계전류 연구

조영식, 손명환, 백승규, 권운식, 이언용, 권영길  
한국전기연구원

Study on the Critical Current of Field Coil for  
High Temperature Superconducting Motor

Young-Sik Jo, Myung-Whan Sohn, Seung-Kyu Baik, Woon-Sik Kwon, Eon-Yong Lee, Young-Kil Kwon  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - It is well known that  $I_c$  (critical current) in HTS tape is more sensitive to  $B_{\perp}$  (magnetic field amplitude applied perpendicular to the tape surface) than to  $B_{//}$  (magnetic field amplitude applied parallel to the tape surface). Thus, the magnitude of  $B_{\perp}$  at HTS tape is important to the design of HTS motor, because it determines the operating current. In addition, the  $I_c$  of HTS field coil is determined by not only the  $B_{\perp}$  but also stress and strain condition at given operating temperature. Therefore, at the stage of field coil design, stress and strain conditions should be considered because when the HTS tape is handled, it is necessary to know the limiting values of loading, bending and twisting to avoid any damages. The  $I_c$  of field coil is calculated by 3D analysis and measured through experiments considering the  $B_{\perp}$  and the margin of contacts loss.

1. 서 론

세계적으로 개발되는 대부분의 초전도 전동기는 테이프 형태의 고온초전도체를 권선하여 계자코일을 제작하는 방식으로 개발되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 고온초전도 테이프 도체는 쇠교하는 수평자장 ( $B_{//}$ )에 비해 수직자장 ( $B_{\perp}$ )에 대한 임계전류의 감소가 매우 크다. 또한 권선과정에서 발생하는 인장 응력이나 굽힘 응력에 의한 임계전류의 영향이 크므로 이를 고려하여 설계되고 권선되어야 한다 [1].

일반적으로 고온초전도체의 임계전류 특성은 제조업체에서 인장 및 굽힘 응력에 따른 특성과 자장에 대한 특성, 그리고 길이에 따른 임계전류의 특성을 제공하고 있다. 초기에 개발된 고온초전도 테이프 도체는 기계적으로 매우 취약해서 권선작업에 어려움이 많았으며 임계전류의 주된 감소요인 중의 하나로 알려져 있다. 최근에는 AMSC (American Superconductor)사에서 개발한 고온초전도 테이프 도체는 Stainless Steel을 보강하여 기계적 취약성을 어느 정도 극복하여 적당한 굽힘이나 인장 응력에서는 임계전류의 감소가 거의 나타나지 않는다. 하지만 권선작업에서는 적절한 응력조건을 결정하고 조심스러운 접근이 필요하다. AMSC사의 고온초전도 테이프 도체는 길이 따른 임계전류가 매우 균일하며 어느 정도 기계적인 강도도 지니고 있지만 여전히 수직 자장에 대한 임계전류의 감소가 초기에 급격한 편이다. 따라서 고온초전도 마그네트의 임계전류는 발생자장에 주된 영향을 받으며 응용분야에 따른 도체의 선택에 있어서 매우 중요하게 작용한다. 또한 고온초전도 마그네트를 제작하기 위해서는 권선방법, 층간 결합방법에 대한 경험적이고 기술적인 요소가 필요하며, 이러한 요인에 의해서 고온초전도 마그네트의 임계전류에 상당한 영향

을 미치기도 한다. 하지만 어느 정도 숙련된다면 제작에 따른 큰 차이는 없을 것으로 보여진다.

고온초전도 전동기용 계자코일의 운전전류는 고온초전도 계자코일의 임계전류를 예측하여 선정되어야 한다. 고온초전도 계자코일의 임계전류는 회전자의 구조가 결정된 뒤에는 운전온도, 발생자장, 접합에 의한 손실, 제작조건에 의해서 결정된다. 제작조건은 고온초전도 테이프 도체의 기계적 특성을 반영한 권선을 말하며, 계자코일이 운전온도는 충분히 낮아진다고 가정하면 고온초전도 마그네트의 임계전류는 발생자장과 결합손실에 의해서 지배받게 된다.

본 논문에서는 고온초전도 전동기용 계자코일의 운전전류를 결정하기 위해서 계자코일의 임계전류를 예측하는 방법에 대해 연구하였다. 결합에 의한 손실이 매우 적음을 실험을 통해 확인하였으며, 고온초전도 전동기의 3차원 자계 해석을 이용하여 계자코일의 임계전류를 예측하였다.

2. 본 론

전기자 기자력에 의해서 발생된 자장은 도전율이 좋은 회전자의 외통과 덤퍼에 의해서 회전자 내부로의 침투는 충분히 차단되므로, 고온초전도 전동기용 계자코일에 쇠교되는 자장은 계자의 기자력에 의해서 발생한 성분만 존재한다. 고온초전도 테이프 도체를 사용하여 숙련된 권선작업으로 계자코일을 제작하고 냉각시스템에 의한 안정적 운전온도가 유지되고 전자력과 회전력에 의한 외란에 대해서 적절히 대처해 둔다면, 고온초전도 계자코일의 임계전류는 발생된 자장에 의해서 지배받는다. 고온초전도 계자코일은 공심코어에 권선되며 주위매질이 모두 비자성체이므로 3차원적인 자장분포를 가지고 있다. 따라서 계자코일의 3차원 자계 해석을 통해 쇠교자장을 계산하여 고온초전도체의 자장에 대한 임계전류 특성에 대입하면 임계전류를 구할 수 있다.

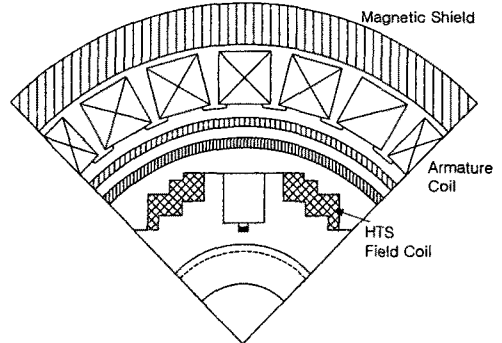


그림 1 고온초전도 전동기

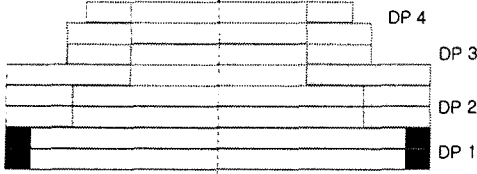


그림 2 고온초전도 계자코일의 단면

### 2.1 고온초전도 전동기

그림 1은 100 hp급 고온초전도 전동기의 단면도이다. 4극 1800 rpm이며, 회전자는 진공중인 외통과 한 개의 덮개를 포함한 냉각단열 부로 구성되며, 액체네온을 사용하여 운전온도 30 K으로 제작하고 있다.

그림 2는 고온초전도 계자코일의 단면으로 4개의 더블 팬케이크 코일로 총 500턴으로 구성되며, 운전온도 30 K에서 정격전류는 100 A로 설계되었다. 계자코일에 사용된 도체는 AMSC사에서 제조된 것으로 기존의 고온초전도 테이프 도체에 비해서 기계적 강도가 많이 개선되어 권선이 용이하였으며 굽힘이나 인장 응력에 의한 임계전류의 감소가 거의 없었다.

### 2.2 해석방법

HTS 테이프 도체에 쇄교하는 수직자장(B<sub>⊥</sub>)의 크기를 계산하기 위해서 수식 (1)을 사용한 해석적 방법으로 구하였다. 매질이 균일하고 HTS 마그네트 하나만 존재할 때, 수식 (1)을 사용하여 자기 벡터포텐셜 A를 구할 수 있고, 수식 (2)에 대입하여 계산하면 임의의 점에서 자속밀도를 구할 수 있다.

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

여기서 A는 자기 벡터포텐셜, μ<sub>0</sub>는 공기 중에서의 투자율, z'은 미소 전류소의 중심 좌표값, z는 임의의 점에서 z축으로 투영시켰을 때의 z좌표값, r은 z에서 임의의 점까지의 거리, 2L은 미소 전류소의 길이이다.

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

### 2.3 해석 및 실험결과

그림 3은 HTS 계자코일의 직선부 중심단면에서의 수직자장의 분포를 나타낸 것이다. 곡선부보다는 직선부에서 HTS 계자코일에 쇄교하는 수직자장이 크고 직선부의 중심단면에서 가장 큰 수직자장이 HTS 테이프 도체에 쇄교된다. 그림 3의 해석결과는 4극을 조립한 후의 실험조건을 기준으로 주의의 매질이 균일하고 외부 자계의 영향이 없는 조건으로 계산한 것이다. 가장 위쪽에 권선된 더블 팬케이크 코일(DP4)에 쇄교하는 수직자장이 크고 포괄적으로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 HTS 계자코일의 임계전류는 DP4에 의해서 큰 영향을 받을 것으로 사료된다.

그림 4는 77 K에서 AMSC HTS 테이프 도체의 수직자장에 따른 임계전류 특성을 나타낸다.

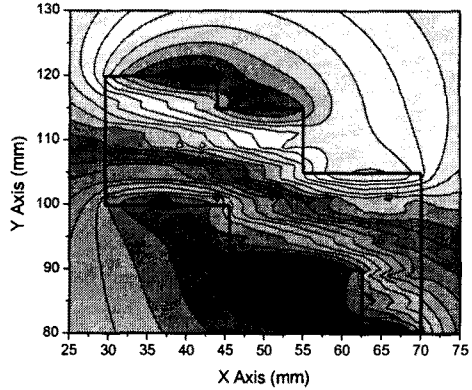


그림 3 HTS 계자코일 단면에서 수직자장 분포

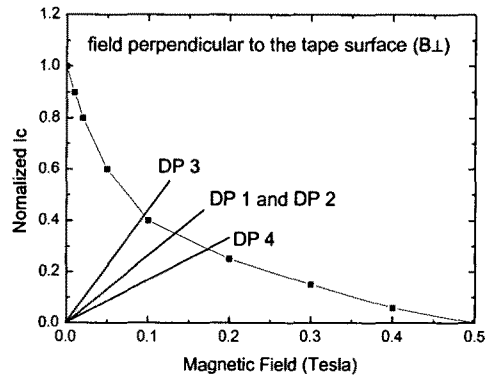


그림 4 수직자장에 대한 임계전류 특성

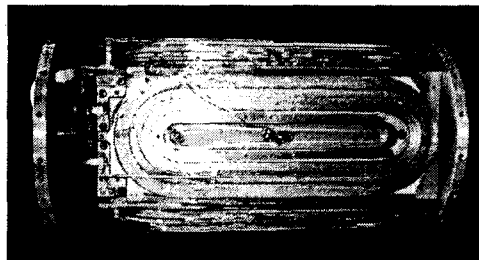


그림 5 조립된 계자코일

DP4에 쇄교되는 수직자장의 평균치는 0.17 T이다. 따라서 HTS 테이프 도체의 수직자장에 대한 특성을 기준으로 DP4의 임계전류를 산정하면, 주어진 자장하에서는 약 37 A이다. 같은 방법으로 각 더블 팬케이크 코일의 임계전류를 계산하면 DP1, DP2, DP3는 각각 44 A, 44 A, 50 A이다. 따라서 각 더블 팬케이크 코일의 임계전류를 평균하면 약 44 A이므로 한국의 임계전류는 44 A 정도일 것으로 예측된다. 그리고, HTS 테이프 도체의 임계전류는 운전온도 30 K에서는 77 K에서의 약 4배 이상으로 상승하게 된다 [2]. 그러므로 운전온도에서 계자코일의 임계전류는 극한의 접합손실 등을 고려하여 약 160 A 정도로 예상된다.

그림 5는 권선이 끝난 4개의 HTS 계자코일을 조립한 사진이다. 한국당 더블 팬케이크 코일이 4개이므로 3번의 더블 팬케이크간의 접합이 이루어 졌으며 전류도 입부와 극간의 접합을 포함한다.

그림 6은 더블 팬케이크간의 접합에서의 전류에 따른 전압 특성실험 결과를 나타낸다. 더블 팬케이크 코일 3번과 4번간의 접합특성은 쇄교하는 큰 수직자장에 의해서 발생하는 것으로 사료되며, 전체적으로 접합에서의 손실은 우려할 만큼 크지는 않다.

그림 7은 한국에서의 각 더블 팬케이크 코일의 전류에 대한 전압 특성 실험결과를 나타낸다. 전체 4극에서 각각의 DP1, DP2, DP3은 비슷한 곡선을 가지는데 반해서 DP4는 빠른 전압상승 특성을 가지며 한국의 임계전류는 약 41 A로 측정되었다.

계자코일의 임계전류는 자장에 의해서 지배적으로 영향을 받고 더블 팬케이크 코일간의 접합도 매우 잘되었기 때문에 계산된 결과와 실험결과가 매우 비슷한 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

계자코일의 임계전류는 사용된 고온초전도체의 기계적 특성이 좋고 숙려된 권선 작업에 의해서 제작되어 큰 감소가 없었다. 또한 더블 팬케이크 코일간의 접합 손실도 매우 적음을 확인 할 수 있었다. 자계해석을 통해서 DP4에서 쇄교하는 수직자장이 큼을 확인하였으며, 해석결과와 고온초전도체의 자장에 따른 임계전류 특성을 이용하여 예측한 계자코일의 임계전류는 44 A이고 측정된 값은 41 A로 매우 비슷한 결과를 도출하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P. Skov-Hansen, Z. Han, and J. I. Bech, "Stresses and Strains in Multi-Filament HTS Tapes", *IEEE Trans. Appl Superconduct.*, Vol. 9, No. 2, pp. 2617-2620, 1999.
- [2] J.-T. Eriksson, R. Mikkonen, J. Paasi and L. Soderlund, "A 1.5 kW HT superconducting synchronous machine", paper presented at Applied Superconductivity, Edinburg, July 3-6, 1995

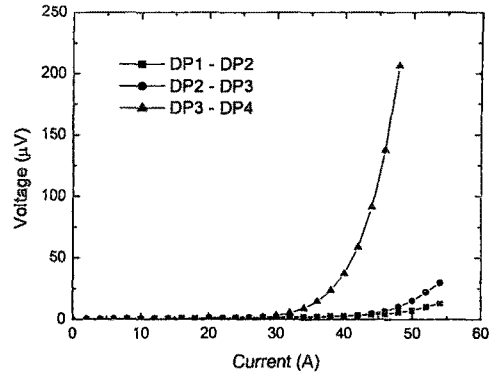


그림 6 접합에서 전류-전압 특성

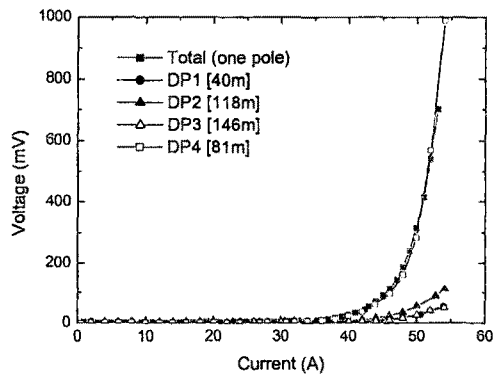


그림 7 한국에서의 전류-전압 특성

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