

## 고온초전도 Homopolar 전동기용 계자코일의 설계 및 특성평가

**이재득\***, 이상호\*\*, 김호민\*\*\*, 이연용\*\*\*, 백승규\*\*\*, 권영길\*\*\*, 홍정표\*\*, 박민원\*, 유인근\*  
 창원대학교\*, 한양대학교\*\*, 한국전기연구원\*\*\*

### Design and Test of HTS Homopolar Motor Field coil

Jae Deuk Lee\*, Sang Ho Lee\*\*, Homin Kim\*\*\*, Eun Yong Lee\*\*\*, Seung Kyu Baik\*\*\*  
 Young Kil Kwon\*\*\*, Jung Pyo Hong\*\*, Minwon Park\*, Inkeun Yu\*  
 Changwon National University\*, HanYang University\*\*, KERI

**Abstract** - In general, in most case of high temperature superconducting (HTS) rotating machinery, HTS field coil is rotated. HTS homopolar motor field coil is not necessary to be rotated and the torque of motor is not strongly related with the field coil. Therefore, HTS homopolar motor has a superior mechanical stability comparing with other HTS rotating machines. These advantages can make the design of HTS field coil and cryostat much more simple. In this paper, HTS field coil was fabricated and tested. Before test, authors have estimated the critical current of HTS field coil at 77K by simulation using FEA (Finite Element Analysis) software and power law equation. The experiment details and results are presented in this paper, and discussed. The field windings are made with HTS Bi-2223 wire which operates at 77K.

#### 1. 서 론

전 세계적 인 고유가 행진 속에 에너지 변환효율이 높고 친환경적인 전력 기기의 필요성이 대두되고 있다. 현재 개발되고 있는 초전도모터, 초전도 케이블, 초전도 한류기, 초전도 변압기 그리고 초전도 에너지 저장 장치와 같은 초전도 전력기기들은 기존기기에 비해 높은 효율로 인해 주목받고 있으며, 몇몇 초전도 전력기기의 경우 개발 단계에서 실증 시험을 거쳐 현재는 실용화 단계에 접어들고 있다.

현재 초전도 전동기와 발전기는 미국의 경우 5MW급 고온초전도 전동기를 미해군 군함의 선박추진용으로 제작되어 납품한 상태이며, 현재는 36.5MW급의 대용량 전동기를 제작 중에 있다. 또한 독일의 Siemens 사에서도 초전도 발전기 제작의 완료가 보고되었으며, 국내에서는 차세대 초전도용기술개발 사업단의 DAPAS 사업에서 1MW급 고온초전도 전동기 개발하고 현재 장기실증시험단계에 있으며, 현재는 5MW급 고온초전도전동기를 개발 중에 있다.

현재 개발되고 있는 고온초전도 전동기는 동기기로써 초전도 계자코일이 회전하는 형태이다. 그러나 Homopolar 전동기의 경우 계자코일이 회전하지 않고 고정되어 있으므로 회전력에 의한 기계적 토크의 영향을 받지 않으므로 계자코일의 기구적 안정성이 증가하게 되는 장점이 있다. 또한 계자코일을 냉각시키기 위한 냉각 시스템이 용이하고 단순해지며, 또한 계자코일이 철심형이므로 기자력의 손실이 감소되어 초전도 선재량을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그러나 기존의 초전도전동기에 비해 전체적으로 전동기의 부피와 무게가 증가하는 것과 대용량화가 힘들다는 단점을 가지고 있다.

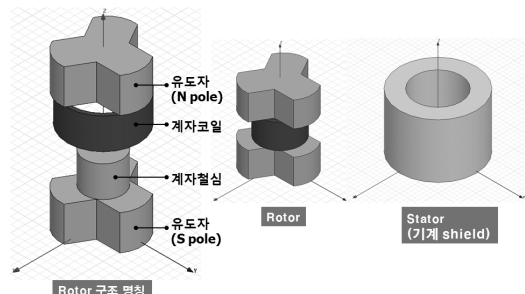
본 논문에서는 2KW급 소형 초전도 Homopolar 전동기의 설계 및 제작에서 중요한 부분인 초전도 계자코일을 권선하고 특성을 평가하고자 한다.

#### 2. 본 론

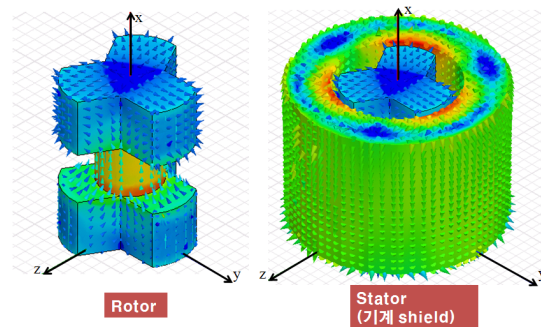
##### 2.1 초전도 Homopolar 전동기의 구조 및 원리

1891년 마이클 페러데이에 의해 개발된 Homopolar 전동기는 구조가 간단하고 넓은 속도 범위에서 크고 일정한 토크를 발생시키는 장점을 가지고 있다 [1].

그림 1은 Homopolar 전동기의 형상 및 구조 명칭을 나타내고 있다. Homopolar 전동기는 계자코일에 전류를 흘렸을 때 발생하는 자속에 의해 N극과 S극으로 유도되는 유도자와 계자철심, 그리고 계자코일로 구성되는 회전자와 전기자코일과 기계실드로 구성되는 고정자로 이루어진다. 그림 2는 초전도 Homopolar 전동기의 회전자와 고정자의 자속분포를 3D FEM 해석 프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여 개념적으로 해석한 자속분포이다. 그림 2의 회전자의 자속분포에서 계자코일에 전류를



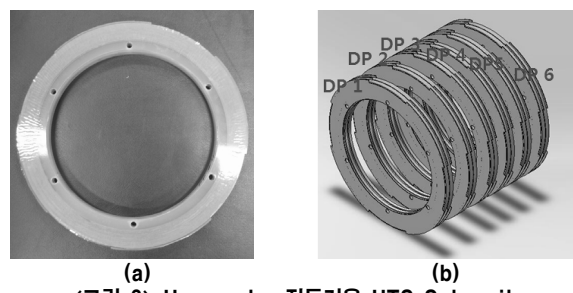
<그림 1> Homopolar 전동기의 형상 및 구조 명칭



<그림 2> 회전자와 고정자의 자속분포

여자 시키면 유도자의 N극에서 S극으로 자속이 유도되고 다시 고정자의 기계실드를 통해서 S극에서 N극으로 자속이 유도된다. 이때 플레밍의 왼손법칙에 의해 발생하는 힘으로 회전자에 토크발생하게 된다.

##### 2.2 Homopolar 전동기용 계자코일



<그림 3> Homopolar 전동기용 HTS Sub coil

초전도 Homopolar 전동기의 계자코일은 초전도 동기전동기의 레이스 트랙 형상의 계자코일과 달리 팬케이크 형태로 권선된다. 2kW급 소형 초전도 Homopolar 전동기 계자코일은 약 10A에서 20A사이 값으로 예상하고 계자코일을 설계하였다. 그림 3 (a)는 제작된 Homopolar 전동기용 HTS sub 코일이며, (b)와 같이 총 6개의 더블 팬케이크 코일을 권선하였으며, 6개의 더블팬케이크 코일이 적층되는 형태를 가진다. 수직 자장의 영향을 가장 크게 받는 DP1코일과 DP6코일은 표 1에서와 같이 임계전류 값이 가장 큰 초전도선재를 이용하여 권선하였다. 전체 코일의

〈표 1〉 Homopolar 계자코일의 코일별 사양

코일	선재두께(mm)	선재Ic@77K(A)	코일길이(cm)	턴수
DP#1	0.3	143	3600	80
DP#2	0.31	137	3650	80
DP#3	0.31	137	3570	78
DP#4	0.31	134	3420	76
DP#5	0.3	135	3600	80
DP#6	0.31	143	3570	78
Total			21410	472

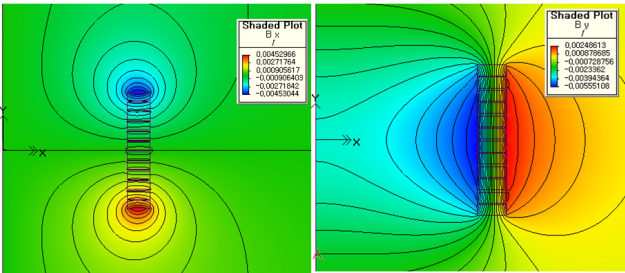
길이는 21410cm이고 전체코일의 턴수는 472턴이다. 그리고 코일의 내경은 130mm이다. 계자코일에 사용된 초전도 선재는 AMSC™사의 Bi-2223선재를 이용하였으며, 권선 방식은 저온에폭시를 이용한 Wet-winding 방식을 이용하였다. 턴 간 절연은 Kapton™ 테이프를 이용하였으며, 코일 보빈은 GFRP를 이용하여 제작하였다.

**2.3 Homopolar 전동기 계자코일의 임계전류 예측**

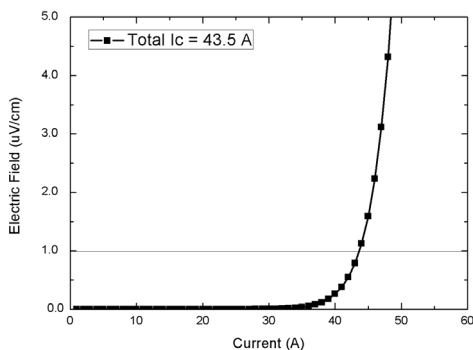
초전도선재의 전압전류 특성은 식(1)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$V = V_0 \left( \frac{I}{I_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \quad [\mu V/cm] \quad (1)$$

여기서 V는 코일 양단에 걸리는 전압이고, V<sub>0</sub>는 1uV/cm 이고 I는 코일에 흐르는 전류이며, I<sub>c</sub>(B,T)는 초전도선재의 자장과 온도에 따른 임계전류를 나타내고, n(B,T)는 자장과 온도에 따른 인덱스값이다. 초전도코일의 양단 전압은 각 코일의 한 턴에 걸리는 전압의 전체합과 같으며, 각 턴에 작용하는 수직자장과 코일의 온도를 이용하여 초전도코일의 임계전류를 예측할 수 있다. 초전도선재의 I<sub>c</sub>(B,T) 특성은 AMSC™사에서 제공하는 그래프를 이용하였으며[2], 그림 4와 같은 초전도계자코일의 자장분포는 Infolytica사의 MagNet을 이용하여 해석하였다.



〈그림 4〉 초전도 계자코일의 수직, 수평 자장 분포

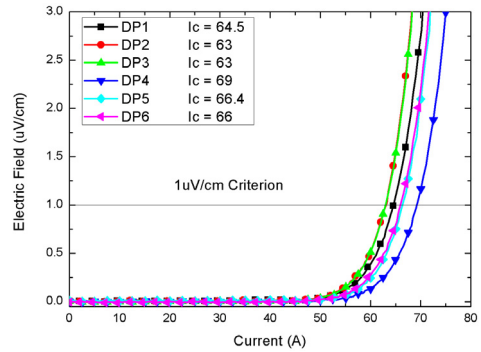


〈그림 5〉 임계전류 예측결과

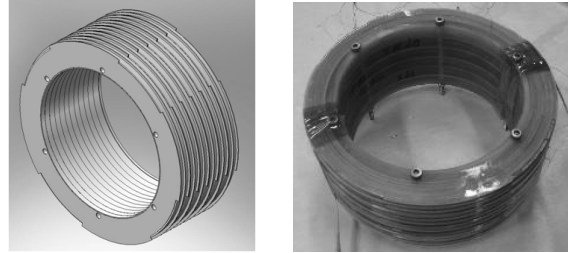
그림 5는 시뮬레이션을 통해 예측된 초전도 Homopolar 전동기용 계자코일의 전압전류 특성곡선이다. 전체코일의 임계전류 값은 약 43.5 A를 예측하였다.

**2.4 Homopolar 전동기 계자코일의 특성평가**

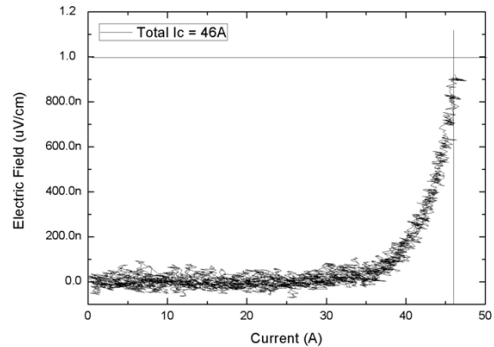
그림 6은 권선된 개별코일의 임계전류를 측정된 그래프이다. 각 개별코일의 임계전류 값은 63A에서 69A 사이로 측정 되었다. 그러나 선재의 임계전류 값이 가장 높은 선재를 이용하여 DP1과 DP6코일에 권선하였으나 실제 측정된 코일의 임계전류 값은 DP4가 가장 높게 나타났다. 이것은 초전도 선재를 배치할 때 기본적으로 제공되는 선재의 임계전류



〈그림 6〉 Homopolar 전동기용 계자코일의 sub 코일의 임계전류



〈그림 7〉 적층된 초전도 Homopolar 전동기용 계자코일



〈그림 8〉 측정된 Homopolar 전동기용 계자코일의 전압전류특성

값을 고려하여 배치하였으나 실제 선재의 임계전류는 높거나 낮은 값으로 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 개별 코일의 임계전류 측정 후에 6개의 개별 코일을 적층하여 그림 7와 같은 쉘케이크를 제작하였다. 액체 질소에서 전체 코일의 전압전류특성을 측정된 결과 그림 8과 같이 46A의 임계전류를 측정하였다. 예측한 43.5A와 약 2.5A의 오차가 있으나 이는 시뮬레이션 상에서 자장과 온도에 따른 인덱스값의 변화를 감안하지 않고 시뮬레이션을 한 결과이므로, 예측한 값과 거의 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 계자코일의 설계값인 10A에서 20A 사이에서는 전압의 변화가 없는 것을 확인하였다.

**3. 결 론**

본 논문에서는 2kW 급 소형 초전도 Homopolar 전동기 제작에 앞서 초전도 계자코일을 설계하고 제작하여 특성을 평가하였다. 예측한 임계전류와 실제 측정된 임계전류의 결과값이 거의 일치함을 확인하였으며, 계자코일의 운전전류 설계값인 10A에서 20A 범위에서 전압의 변화가 없는 것을 확인 하였다. 향후 본 코일을 이용하여 2kW급 초전도 Homopolar 전동기를 제작할 것이다.

**감사의 글**

“본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

**[참 고 문 헌]**

[1] Michael J. Superczynski, Donald J. Waltman "Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings", IEEE Transactions ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL,7 NO 2, JUNE 1997.  
 [2] <http://www.amsc.com/products/htswire/1gHCD.html>