

# 고온초전도 더블 팬케이크 코일 제작 및 특성

손명환, 이언용, 백승규, 권영길, 윤문수, 권용덕\*  
한국전기연구원  
\* 에너텍(주)

## Fabrication and Properties of HTS Double Pancake Coils

M.H.Sohn, E.Y.Lee, S.K.Baik, Y.K.Kwon, M.S.Yun, Y.D. Kwon\*  
Korea Electrotechnology Research Institute  
\* Ener-tech Co.

mhsohn@keri.re.kr

**Abstract** - A winding machine to fabricate the double pancake coils was manufactured. A race-track type double pancake coil using high temperature superconductor (HTS) tape was prepared and I-V and I-H characteristic curves were obtained at the atmosphere of liquid nitrogen. The winding method to make the double pancake coil and its properties is discussed.

### 1. 서 론

초전도현상을 발견한 이후로 초전도기술을 전력분야에 응용하고자하는 노력들이 선진국을 비롯한 세계 곳곳에서 오늘날까지 계속되고 있으며, 고온초전도(HTS)의 발견은 액체헬륨을 이용하는 기존의 극저온 냉각방식에서 액체질소나 냉동기를 사용한 냉각방식을 채택하게 함으로써, 냉동기부분의 부피와 유지비용 등을 대폭적으로 절감하는 것을 가능하게 하였다. 초전도전력기에 사용하는 HTS 도체는 HTS 재료가 부서지기 쉬운 금속산화물 세라믹의 고유한 특성을 가지기 때문에 금속피복재를 가진 테이프 형태의 장선으로 제작된다. 이 HTS 도체의 형상 때문에 대부분의 초전도동기발전기나 초전도동기모터에 적용되는 계자코일은 레이스트랙형 팬케이크 코일형태이다[1-3]. 필요에 따라 HTS 도체의 절연을 동시에 하기 위해서는 기존의 솔레노이드 코일의 권선과는 다른 권선장치가 필요하다.

본 연구에서는 HTS 테이프 도체를 더블 팬케이크 코일을 만들기 위해 특별히 제작한 권선기를 사용하여 제작한 레이스트랙형 더블팬케이크 코일의 성능과 권선하는 기술적인 방법에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 권선기

본 실험에 사용한 권선기는 테이프 선재를 권

선하기에 적합하게 설계·제작 되었다. 그림 1에 제작한 권선기를 나타내었다. 이 권선기는 특히 HTS 도체처럼 굽힘에 대한 응력에 특성이 급격히 저하되는 도체에 적합하도록 장력을 감지하는 load cell이 달린 roller와 다른 위치의 roller들의 회전방향이 같은 특징이 있다. 또한 도체에 절연을 테이프형 절연지를 동시에 권선할 수도 있다. 권선을 위한 보빈은 그림 1의 우측 서버모터축에 장착되고 권선할 테이프가 감긴 카세트는 왼쪽 서버모터축에 설치된다. 보빈축 측은 설정된 속도로 회전을 하고 도체가 감겨있는 카세트 측은 load cell에서 감지한 장력값과 설정된 장력을 비교하여 일정하게 장력이 일정하도록 역방향으로 회전을 한다. 권선 작업시 경우에 따라 역회전도 가능하고 권선수를 감지하는 counter는 가감이 가능하다. 권선 작업은 자동과 수동 모두가 가능하지만 자동에서는 순방향 권선만 가능하다. 작업의 용이성을 위해 load cell 부착 측은 x, y, z 방향 이동이 가능하고 보빈측도 y 방향으로 이동이 가능하다. 그리고 이 모든 제어는 오른쪽의 제어판에서 이루어진다.

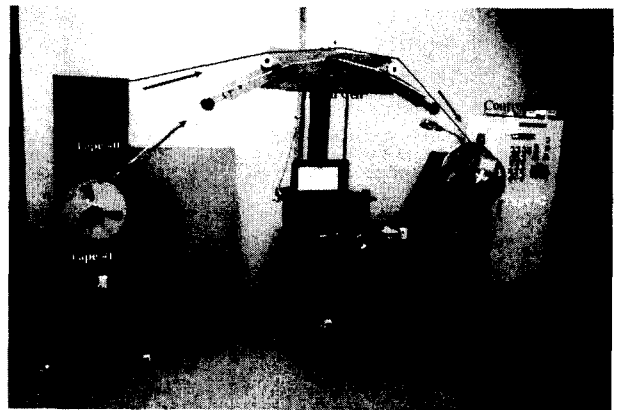


Fig. 1. A winding machine

#### 2.2 권선방법

더블 팬케이크 코일 권선 방법을 순서대로 정리하면 대략 다음과 같다.

① 제작하고자 하는 더블 팬케이크 코일의 사양으로부터 두 층의 턴수를 파악하고 사용할 도체의 치수를 고려하여 사용될 도체의 길이를 계산한다.

② 도체가 감겨 있는 카세트 A를 그림 1의 왼쪽 아래의 회전축에 고정시키고, 이 카세트로부터 팬케이크 코일의 2층에 권선할 도체의 길이만큼 빈 카세트 B에 감는다.

③ 오른쪽의 권선 축에 권선들을 고정하고, 같은 축에 카세트 B를 고정한다.

④ 권선들에 절연층을 감은 다음 두 카세트의 가운데 도체를 권선들의 최내층에 고정을 시킨다.

⑤ 도체의 장력을 감지하는 load cell이 부착된 roller와 다른 roller들의 홈에 닿게 하고 권선기 제어판에서 장력을 설정한다.

⑥ 절연지 카세트를 왼쪽 위의 회전축에 고정시키고 roller를 지나 권선들에 감긴 도체에 연결한다. 권선기 제어판에서 원하는 턴수를 설정한다.

⑦ Wet-winding 법의 경우 준비한 에폭시 등의 바르면서 권선을 한다. 본 실험에 사용한 권선기의 경우 manual과 auto가 모두 가능하다. 권선들에 가지런하게 감기도록 작업자는 주의하도록 한다. 만약 조금 풀어야 할 경우 역방향으로 회전도 가능하다.

⑧ 1층의 권선이 완료되면 도체를 약간 길게 여유가 있도록 절단하고 테이프 등으로 계속 권선을 하여 끝단을 고정시킨다. 권선기 제어판에서 장력 값을 낮춘다.

⑨ 카세트 B와 권선들이 부착된 축을 권선기의 척으로부터 분리하여 수직으로 세운 다음 1층 권선 위에 절연지를 붙인다.

⑩ 카세트 B를 축에서 분리하고 권선들이 부착된 축을 권선기의 척에 반대방향으로 다시 고정시킨다.

⑪ 카세트 B를 그림 1의 왼쪽 아래의 회전축에 고정시키고 도체의 장력을 감지하는 load cell이 부착된 roller와 다른 roller들의 홈에 닿게 하고 권선기 제어판에서 장력을 설정한다.

⑫ 위의 ⑥-⑧의 절차를 반복하여 2층을 완성시키고 척으로부터 코일을 분리한 후 절연지들 크기에 맞게 절단한다.

⑬ 코일의 치수를 원하는 값이 되도록 직선부 사이의 간격을 치구를 사용하여 고정시킨다.

⑭ 사용한 에폭시의 경화 조건을 고려하여 전기로 혹은 상온에서 경화시킨다.

⑮ 고정된 치구를 제거하면 원하는 레이스트랙형 더블 팬케이크 코일이 완성 된다.

### 2.3 레이스트랙형 더블 팬케이크 코일

본 연구에서는 레이스트랙형 코일을 권선들에서 분리할 수 있는 방법으로 제작하였다. 그림 2에 레이스트랙형 더블 팬케이크 코일 제작용 권선들을 나타낸다. 권선들은 조립하기 위해 먼저 원판위에 에폭시에 함침된 GFRP 천을 붙인다.

코일 제작 후 권선들에서 분리하기 위해 보빈과 치수가 같은 권선들은 3개의 조각으로 나누어져 있는데, 이것들을 볼트를 사용하여 이음새가 맞도록 절연지가 부착된 원판위에 조립하였다.

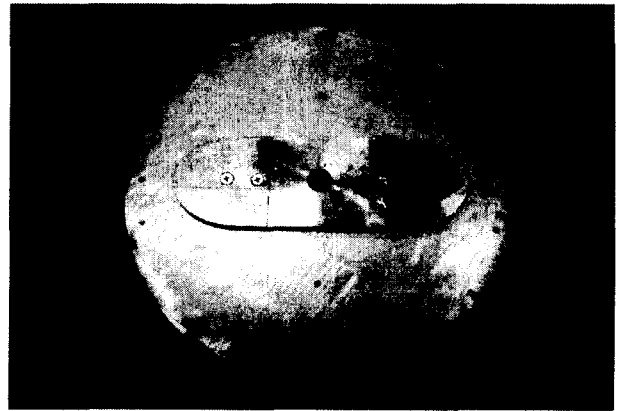


Fig. 2. A mandrel for the racetrack type double pancake coils

그림 3에 제작이 완료된 레이스트랙형 더블 팬케이크 고온초전도 코일을 나타낸다. America Superconductors (AMSC) 사의 고강도 HTS 테이프 도체를 사용하였다. 도체의 단면적은  $4.2\text{mm} \times 0.31\text{mm}$ 이고, 소요된 길이는 45m이고, 권선시에 도체에 걸린 장력은 400gf (6.7MPa)이었다. 코일 형상은 직선부와 곡선부 모두 매우 깨끗하여 본 연구에서 행한 제작방법이 타당한 것으로 생각된다.

이 코일의 경우 제작시에 턴과 턴 사이에는 절연지를 사용하지 않고 단순히 에폭시만을 바르면서 권선을 하였다. AMSC 도체 1m의 상온에서의 저항은  $33.83\text{m}\Omega$ 인데, 제작한 코일의 저항은  $5.23\text{m}\Omega$ 이었다. 따라서 장력이 많이 걸리는 곡선부에서는 절연이 되지 않은 것으로 확인되었다.

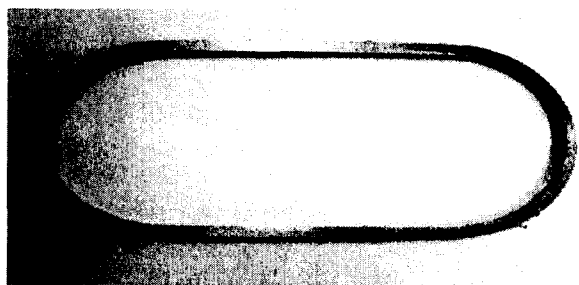


Fig. 3. A racetrack type double pancake coil using HTS tape

### 2.4 레이스트랙형 더블 팬케이크 코일의 특성

그림 4에 레이스트랙형 더블 팬케이크 고온초전도 코일에 전류를 인가하면서 중심에서 발생하는 수직 자장세기를 측정 한 결과를 나타낸다. 50A까지는 자장세기가 선형적으로 증가하다가 50A 이상에서는 곡선을 나타낸다. 50A 이상에서는 인가된 전류가 대부분 초전도 도체를 따

라 흐르지만 단락된 경로로도 인가전류의 일부가 분류되어 흐르는 것으로 추정된다. 이와 같이 턴과 턴 사이에 완벽한 절연이 되어있지 않은 코일에서는 전류(I) - 전압(V) 곡선으로부터는 정확한 임계전류를 측정한다는 것은 불가능하다. 그림 5에 이 샘플코일의 I-V 곡선들을 나타낸다. 전압당자간 거리가 4450cm 이므로  $I_c$ 의 전압기준은 4.45mV이다. 이 기준을 적용하면 코일의  $I_c$ 는 대략 75A 정도가 된다. 그러나 그림 4에서 보듯이 75A에서는 원하는 자장을 발생 시킬 수가 없다. 그러므로 절연이 완벽하지 못한 HTS 코일의  $I_c$ 는 전류 - 자장세기 곡선으로부터 구하는 것이 타당하고 이 경우  $I_c$ 는 약 50A이다.

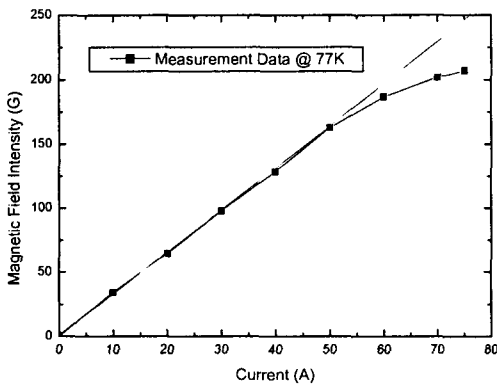


Fig. 4. I-H curve of a racetrack type double pancake coil

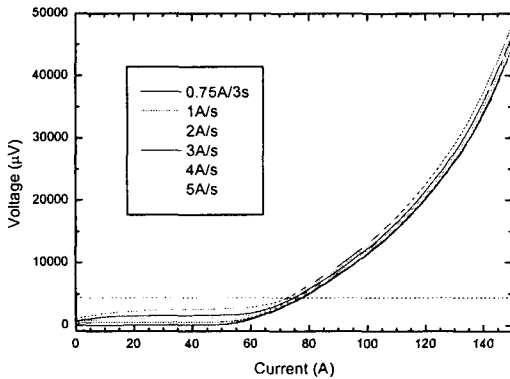


Fig. 5. I-V curves of a racetrack type double pancake coil

#### 4. 결 론

본 연구에서 개발한 권선기를 사용하여 레이스트랙형 더블팬케이크 코일을 제작하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 더블팬케이크 코일을 제작하는데 본 권선기가 적합함을 알았다.
2. 코일 제작시 wet-winding 법으로 에폭시만을 사용한 절연은 완벽하지 않음을 확인하였다.
3. 완벽하게 절연되지 않은 HTS 코일의  $I_c$  값은 전류 - 자장세기 곡선으로부터 구하는 것이 타당하다.

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

#### [참 고 문 헌]

- [1] J.P. Voccio, B.B. Gamble, C.B. Prum, H.J. Picard, "125 HP HTS Motor Field Winding Development", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, 519-522, 1997
- [2] G. Papst, B.B. Gamble, A.J. Rodenbush and R. Schottler, "Development of synchronous motors and generators with HTS field windings", Supercon. Sci. Technol. Vol. 10, 924-926, 1997
- [3] W. Nick, G. Nerowski, H.-W. Neumuller, M. Frank, P. van Hasselt, J. Frauenhofer, F. Steinmeyer, "380kW Synchronous Machine with HTS Rotor Windings-Development at Siemens and First Test Results", paper presented at EUCAS 2001, Copenhagen, August 26-30, 2001