

감아 뒤집은 YBCO 팬케이크용 영구전류 스위치의 특성시험

표윤수*, 김소영*, 김우석**, 이지광***, 박찬**, 최경달*
 한국산업기술대학교*, 서울대학교**, 우석대학교***

Experimental Result of a PCS as a part of a winding-and-flip YBCO pancake

Youn-Su Pyo*, So-Young Kim*, Woo-Seok Kim**, Ji-Kwang Lee***, Chan Park**, and Kyeongdal Choi*
 Korea Ploytechic University*, Seoul National University**, and Woosuk University***

Abstract - 본 논문에서는 2세대 고온초전도 선체인 YBCO CC(Coated Conductor)를 사용하여 접합 없이 권선되는 새로운 형태의 고온초전도 팬케이크형 코일에 영구전류를 인가하기 위한 영구전류 스위치의 형태를 제안했다. 제안된 테이프 형태의 광폭 YBCO CC의 양 끝부분을 제외한 중간부분을 2분할하여 감아 뒤집은 형태의 팬케이크 코일에는 접합부분이 없으므로 영구전류가 흐를 수 있으나, 전류의 인가를 위한 스위치를 별도로 제작하여 연결하기 곤란하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 감아 뒤집은 고온초전도 팬케이크 코일의 한쪽 단부를 영구전류 스위치로 사용할 수 있는 구조를 제안하였고, 추후 연구에 실제로 사용될 12 mm 폭의 YBCO CC를 사용하여 영구전류 스위치를 제작하고 특성시험을 수행하였다.

1. 서 론

20세기 초에 초전도현상이 발견된 이래 현재까지 초전도체의 선제화 기술은 매우 빠르게 발전하여 왔다. 초전도체는 특정한 조건을 만족하게 되면 임계전류밀도 이하에서는 저항성 손실이 발생하지 않기 때문에 그 응용분야는 무궁무진할 것으로 예측이 되었으나, 이러한 무손실 특성은 아쉽게도 직류 자기장에서 직류전류가 인가될 때에만 나타나게 되며, 교류전류 혹은 교류자장이 인가될 때에는 초전도체의 히스테리시스 특성에 의한 자하손실이 발생하게 되므로, 에너지 손실을 줄일 수 있는 많은 전력기계의 응용에는 실제로 해결해야 할 많은 문제점들이 존재하여 아직도 실용화 단계에 와 있지 못한 상태이다.

따라서, 현재 초전도체가 실용화를 넘어서 상용화 단계에 와 있는 분야는 직류로 운전되는 기기의 분야로 제한되어 있으며, 대표적으로 핵자기공명(NMR), 자기공명영상장치(MRI), 자기부상장치 그리고 자기융합시스템등과 같이 마그네트 형태의 초전도 코일을 사용하는 응용분야가 있다. 특히 핵자기공명이나 자기공명영상장치와 같이 고자장의 매우 높은 자장균일도를 요구하는 경우에는 마그네트의 양 쪽 터미널을 연결하여 폐회로를 만든 후 영구전류를 유지함으로써 시간적으로 매우 안정적으로 균일한 고자장을 얻는 것이 일반적이다. 현재까지 개발이 완료되어 있는 핵자기공명장치는 NbTi나 Nb₃Sn과 같은 저온초전도체로 만들어진 선재로 제작되어 있으며 액체헬륨으로 냉각하여 4.2 K 이하로 운전을 하고 있다. 그러나 최근 1 GHz 이상의 공진주파수를 가지는 핵자기공명장치의 필요성이 중요해짐에 따라서 이에 관련된 많은 연구가 진행 중이나, 저온초전도체의 재료적인 한계에 의하여 저온초전도체만으로는 실현이 어렵다 따라서, 현재 저온초전도체 보다 자기장 특성이 우수한 고온초전도체를 같이 사용하여 하이브리드 형태의 마그네트를 제작하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

고온초전도체를 하이브리드형 마그네트에 응용하기 위해서는 고온초전도 선재를 사용해야 하며, 현재 그 특성이 비약적으로 발전하고 있는 2세대 고온초전도 선체인 YBCO CC가 매우 유력한 후보로 떠오르고 있다. 1세대 고온초전도 선체인 BSCCO 선재에 비하여 제작공정이 간단하고 자기적 특성도 매우 우수하므로, 저온초전도선재로 제작된 마그네트의 내부에 인서트 형태의 고온초전도 마그네트를 삽입하여 고자장을 얻을 수 있는 가능성이 있으나, YBCO CC는 현재 영구전류모드 운전을 위한 초전도 접합기술이 개발되어 있지 않으므로, 이러한 기술의 마그네트 응용은 당장은 어려울 것으로 생각된다. 지금 YBCO CC를 위한 여러 가지 형태의 초전도 접합기술이 개발 중이지만, 핵자기공명과 같은 대전류가 인가되는 상황에서 무저항을 유지할 수 있는 접합기술은 아직까지 개발이 되어 있지 않은 상황이다[1,2].

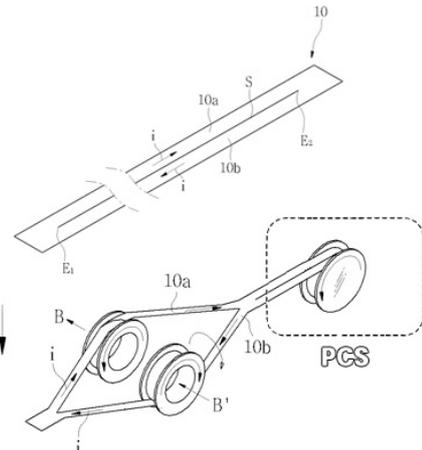
최근에 이러한 한계를 극복하기 위하여 새로운 기술인 광폭 YBCO CC를 사용하여 감아 뒤집은 형태의 팬케이크 권선기법이 본 연구진에 의하여 제안되었다[3]. 이러한 형태의 권선법을 사용하면 접합부 없이 폐회로를 가지는 코일을 제작할 수 있으므로, 이러한 형태의 코일을 적용하여 고자장 마그네트의 인서트 마그네트로서의 응용이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 새로운 형태의 팬케이크 코일에 전류를 인가하

기 위한 영구전류 스위치의 구조를 제안하고, 실제로 스위치부를 제작하여 그 특성을 시험하여 결과를 제시하였다. 본 영구전류 스위치는 구조의 특징에 의하여 자연적으로 자기장이 발생하지 않는 무유도형 스위치가 된다는 장점이 있으며, 스테인리스 스틸로 제작된 히터를 사용하여 열적으로 상변이를 유도하여 온도 및 저항 증가를 측정하였다.

2. 본 론

2.1 감아 뒤집은 팬케이크 권선의 개념

그림 1에 감아 뒤집은 팬케이크 권선법의 개념도를 나타내었다. 양쪽 단부를 일정 길이만큼 제외하고 나머지 중간 부분을 절반으로 분할한 후, 2개의 보빈에 각각 권선한다. 권선이 끝나면 두 개의 분할된 코일이 완성되며 두 권선의 전류 방향이 서로 반대이므로 이 상태에서는 마그네트로 사용할 수 없다. 따라서 한 쪽 코일을 뒤집어 붙임으로써 같은 극을 가지는 더블 팬케이크가 완성되게 된다. 이 권선법에서는 권선을 시작하기 전에 선재의 중간부분을 기계적으로 분할하여야 하므로 테이프형상의 박막형 YBCO CC에 가장 적합한 형태이다. 절반으로 분할을 하더라도 운전전류보다 큰 임계전류를 가질 수 있도록 넓은 폭의 선재를 사용하여야 하며, 기계적인 분할 시에 진동에 의한 초전도층의 손상을 최소화하도록 노력해야 한다. 본 연구에서는 다이아몬드 디스크에 의한 절단을 시도하였으며 분할된 각 선재의 임계전류 측정 결과 충분히 안정적으로 분할 할 수 있음이 기존 연구에서 이미 증명되었다.[3] 이렇게 감아 뒤집은 팬케이크 코일을 제작할 때에는 필연적으로 선재의 뒤틀림이 수반되나, 이러한 비틀림 변형을 따른 YBCO CC의 특성변화에 대한 연구가 행해진 바 있으며 폭이 1 mm 이고 길이가 50 cm인 선재를 6회전시켜 비틀림 변형을 주었을 경우에 있어서도 초전도 특성의 저하가 관찰되지 않았으므로[4], 본 연구에서도 사용 가능할 것으로 판단된다.



<그림 1> 영구전류 스위치 및 감아 뒤집은 팬케이크의 개념도

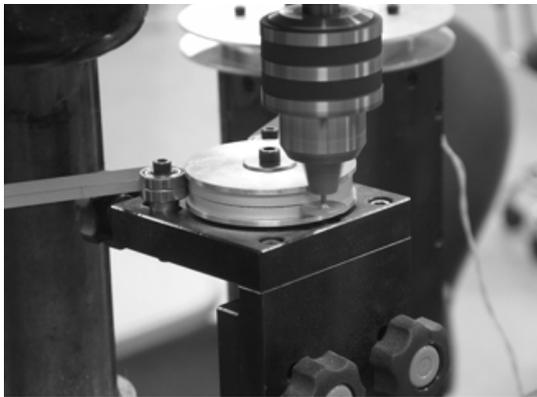
2.2 감아 뒤집은 팬케이크 권선을 위한 영구전류 스위치의 제작

본 연구에서는 감아 뒤집은 팬케이크 코일 제작 시 분할된 YBCO CC의 한쪽 단부를 약 1 m 정도 남겨두고 이를 별도의 보빈에 히터와 함께 감아서, 온도에 의한 초전도체의 상변이를 이용하여 동작하는 영구전류 스위치를 제작하였다. 아직 마그네트가 제작되지 않았으므로 스위치의 특성만을 파악하기 위하여 표 1에 제시된 사양을 가지는 YBCO CC와 스테인리스 스틸 테이프를 사용하여 영구전류 스위치부만을 제작하였다. 그림 2에 보인 시스템으로 1.2 m 길이의 YBCO CC를 각각 6 mm 폭을 가지도록 길이방향으로 2등분하였으며, 절단되지 않은 단부의

길이는 20cm 이었다. 절단직후에 절단된 초전도층 단면의 산화를 막기 위하여 우레탄으로 4회 도포하여 보호층을 만들었다. 이렇게 분할된 YBCO CC를 1.4 m 길이의 스테인리스 스틸 테이프와 함께 별도의 보빈에 권선하였다. 직경 46 mm인 보빈은 베이클라이트를 사용하여 제작되었으며, 분할된 YBCO CC를 7회, 히터로 사용한 스테인리스 스틸 테이프는 8회 권선한 후, 스위치 동작 시 초전도 선재의 온도유지를 위하여 Stycast-1266로 함침하였다. 제작된 영구전류 스위치의 모습을 그림 3에 나타내었다. 스위치 동작 시에 내부의 온도를 측정하기 위하여 영구전류 스위치의 첫 번째 턴과 마지막 턴에 E-type 열전대를 부착하였으며 YBCO CC의 저항변화를 4 단계법으로 측정하기 위하여 YBCO CC의 단부에 전류도입부와 전압탭을 부착하였다.

〈표 1〉 YBCO CC 및 스테인리스 스틸 테이프의 사양

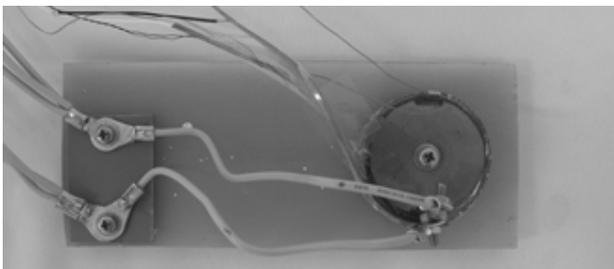
사양	YBCO CC	Stainless Steel
두께	55 μm	60 μm
너비	12 mm	12 mm
Resistivity	-	0.753 micro-ohm \cdot m
안정화층	Cu, Thickness 40 μm	-
입계전류	110 A @ 77K, 0 T	-



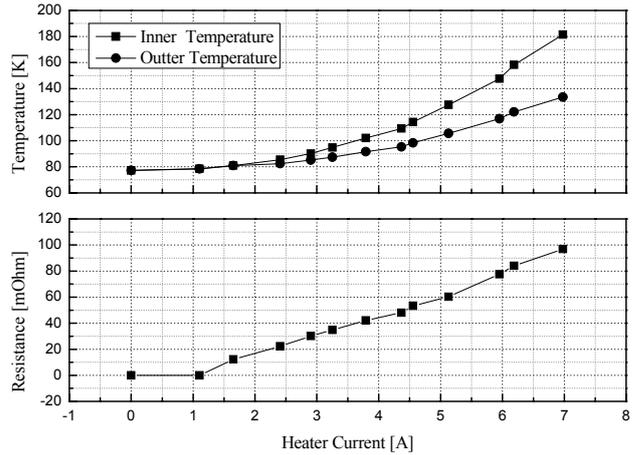
〈그림 2〉 YBCO CC의 분할 시스템

2.3 특성시험 결과 및 분석

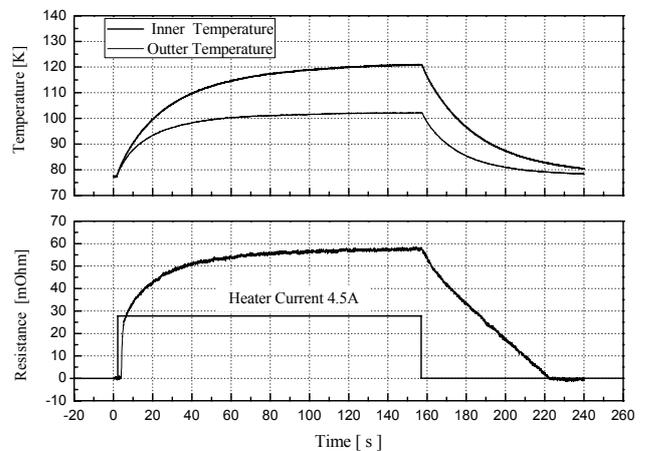
제작된 영구전류 스위치를 77.3 K의 액체질소조에 넣어 냉각시킨 후, YBCO CC에 10 mA의 전류를 인가하며 전압탭에서 발생하는 전압을 측정하는 방법으로 히터전류에 따른 저항변화를 측정하였다. 그림 4에 히터에 인가한 전류에 따라 측정된 영구전류 스위치 내부의 온도와 분할된 YBCO CC의 저항값의 변화를 나타내었다. 측정 결과 히터의 전류를 7 A정도 유지하였을 때 약 100 m Ω 의 스위치 저항을 얻을 수 있었다. 제작된 영구전류스위치는 약 50 m 길이의 광폭 YBCO 선재를 분할하여 제작될 마그네트의 스위치에 대한 시험이며, 마그네트의 인덕턴스는 20 mH 정도로 예상되므로 마그네트의 충전 속도가 1 A/sec 인 경우 스위치에 흐르게 될 전류는 200 mA이며 4 mW의 손실이 영구전류 스위치에서 발생하게 된다. 그림 5은 히터전류를 4.5 A 인가하고 유지하다가 히터전류를 차단하였을 때 영구전류 스위치의 저항 및 온도의 변화를 시간에 따라서 나타낸 결과이다.



〈그림 3〉 제작된 영구전류 스위치의 모습



〈그림 4〉 히터전류에 따른 온도 및 저항변화



〈그림 5〉 4.5 A의 히터전류 인가 시 온도 및 저항의 변화

3. 결 론

본 논문에서는 YBCO CC를 사용하는 영구전류모드 운전을 위한 새로운 형태의 권선법을 사용하여 제작될 코일을 충전하기 위한 영구전류 스위치의 형태를 제안하고, 사용될 광폭의 YBCO CC를 사용하여 직접 제작하고 저항변화특성을 측정하여 적용 가능성을 보였다. 본 논문에서 제안한 영구전류 스위치는 감아 뒤집은 형태의 새로운 권선법의 특성에 의해서 자체적으로 선재의 급격한 휨이나 접합 없이도 무유도성으로 제작이 가능하였으며, 특성시험 결과 50 m 급의 광폭 YBCO CC로 제작할 수 있는 크기의 코일에 영구전류를 유도하기 위한 스위치로 적용 가능함을 보였다. 추후 50 m 길이의 광폭 YBCO CC를 사용하여 감아뒤집은 코일을 제작할 예정이며 본 연구에서 제안된 형태의 스위치를 구성하여 영구전류 모드 운전시험을 할 계획이다.

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

[참 고 문 헌]

[1] T. Tosaka, et al., "Persistent Current Switch Characteristics", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, Jun 2005
 [2] 김영석, 외, "Coated Conductor를 이용한 소용량 영구전류 스위치 시스템의 특성 해석", *Journal of the Korea Ins. Appl. Supercond.*, 1229-3008, vol. 9, no. 1, pp.47-52, 2007
 [3] 이희균, 외, "영구전류모드 운전을 위한 coted conductor의 가공 및 자석 제조", *Prog. in Superconductivity*, vol. 7 no. 2, pp167-173, 2006
 [4] V. Selvamanickam, et al., "Scale-up of Coated Conductor Technology at SuperPower", presented at DOE peer review, Washington, Aug(2005).