

영구전류 모드 운전을 위한 ReBCO 팬케이크 권선

김영일*, 김우석**, 이세연*, 박상호*, 최경달*
 한국산업기술대*, 서울대**

ReBCO Pancake Coil in Persistent Current Mode

Y.I. Kim*, W.S. Kim**, S.Y. Lee*, S.H. Park*, K. Choi*
 Korea Polytechnic University*, Seoul National University**

Abstract - 초전도 DC 마그네트에 영구전류 (Persistent Current)를 흘리기 위해서는 초전도 접합(Superconducting Joint)이 필요하다. 저온 초전도 선재는 초전도 접합이 가능하며 고온 초전도체 중 BSCCO 선재로도 초전도 접합을 만들 수 있다. 그러나 최근 개발되어 향후의 초전도기에 적용될 2세대 초전도 선재인 ReBCO CC(Coated Conductor)로는 아직 초전도 접합을 만들 수 없다. 본 연구에서는 광폭 선재의 중심을 가르고 양 종단부가 그대로 붙여진 형태의 선재를 이용하여 영구전류를 흘릴 수 있는 고온 초전도 마그네트를 제작하였다. 영구전류 초기 충전을 위하여 1.2 m 길이의 ReBCO 도체 종단부에 스테인리스 히터를 부착하여 영구전류 스위치를 구성하였다. 발생된 자기장의 시간적 균일성을 측정하기 위하여 34 시간동안 홀센서를 사용하여 대기압 액체질소 77.3 K에서 자기장을 측정하였다.

1. 서 론

20세기 초, 초전도 현상이 발견된 이래, 현재까지 초전도체를 실제 응용기에 적용하고자 하는 노력이 끊임없이 이뤄졌고, 최근 고온 초전도체의 발견 이후 초전도 응용은 급격한 발전을 지속해 왔다. 기존의 전기 응용기기를 초전도체로 대체하려는 다양한 연구 개발이 있었으나, 현재까지 실용화 및 상용화에 이른 초전도 기기는 초전도 마그네트가 유일하다고 말할 수 있다. 초전도 마그네트는 일반 구리선을 사용한 마그네트로는 얻기 어려운 높은 고 자장을 발생시킬 수 있을 뿐 아니라, 마그네트의 양 단부를 접합하여 저항이 없는 폐루프를 만들어 영구전류를 발생시킴으로 시간적으로 안정적인 자장을 만들 수 있기 때문에, 시공간적으로 균일한 고 자장을 요구하는 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 혹은 MRI(Magnetic Resonance Imaging)와 같은 장비들에 주로 사용되어 왔다.

최근 더 높은 민감도를 얻기 위하여 1GHz 이상의 공명주파수를 가지는 NMR급 초전도 자석의 필요가 절실하나 자장 특성이 좋은 Nb_3Sn 선재를 사용하여도 재료의 특성에 의하여 더 큰 자기장을 얻기는 불가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 최근 초전도 마그네트의 연구 개발은 주로 새로운 재료인 고온 초전도체를 응용하여 높은 균일 자장을 발생시킬 수 있는 구조 설계가 주 연구 방향이다. 고온 초전도체는 극저온 상태에서 $NbTi$ 혹은 Nb_3Sn 과 같은 저온초전도체보다 좋은 자장 특성을 가질 수 있기 때문에 재료적인 한계를 벗어날 수 있는 유일한 방법이라 할 수 있으나, 고온 초전도체의 큰 인덱스 저항과 접합저항에 의하여 영구전류 모드를 이용한 안정적인 고 자장을 얻기가 어렵다고 알려져 있다.

최근에, 고온 초전도 권선에 영구전류를 인가할 수 있는 가능성을 가지는 새로운 방법인 감아 뒤집기 권선법이 본 연구진에 의하여 제안되었다[1]. 이 방법에 의하여

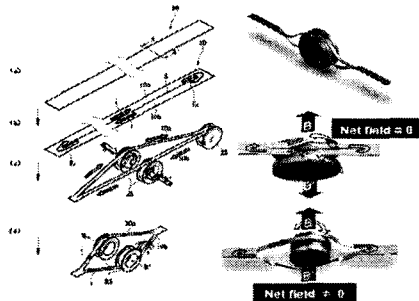
2세대 고온 초전도 선재로 팬케이크형 권선을 제작하면 고온 초전도 선재의 문제점인 접합 자체를 사용하지 않기 때문에 인덱스저항(Index Resistance)만 줄여준다면 MRI 혹은 NMR 마그네트에 사용할 수 있는 정도의 영구전류 모드를 만들 수 있는 가능성이 있다. 본 논문에서는 감아 뒤집기 방법으로 제작되는 팬케이크형 권선의 제작법을 설명하고, 2세대 고온 초전도 선재로 제작된 더블팬케이크의 영구전류 특성을 측정하여 고 자장 마그네트의 가능성을 보였다.

2. 본 론

2.1 감아 뒤집기 권선법의 개념

영구전류를 초전도 코일에 인가하기 위해서는 일반적으로 코일의 양단을 저항 없이 연결하는 초전도 접합부가 필요하고, 전류 인가를 위한 PCS(Persistent Current Switch)가 필요하다. 그러나 현재까지 고온 초전도 선재의 초전도 접합 기술이 존재하지 않기 때문에 접합저항에 의한 전류 감소로 인하여 영구전류의 유지가 불가능하였다. 그러나 만일 초전도선재 자체가 이미 폐회로를 이루고 있다면 접합 자체가 없는 코일을 제작할 가능성이 있을지 모른다는 생각이 감아 뒤집기 권선법의 기본 아이디어이다. 그림 1에서 본 권선법의 권선 과정을 나타내었으며 표 1에는 권선에 사용될 2세대 고온 초전도 선재의 사양을 나타내었다.

2세대 고온 초전도 선재는 본 권선법에 아주 적합한 선재형태를 가지고 있다. 기본적으로 넓은 테이프 형상을 취하고 있으며, 내부는 필라멘트 구조가 없으며 박막 형태의 초전도 층을 가지고 있으므로[2], 그림 1에서와 같이 중앙부를 재단하는 방법에 적당하다. 본 권선법을 위해서는 먼저 그림 1의 (a)와 같이 넓은 광폭 테이프 형태의 2세대 고온 초전도 선재의 중앙부를 그림 1 (b)와 같이 기계적으로 재단하는 과정이 선행되어야 한다. 재단할 때 선재의 양 단부는 재단하지 않고 남겨두어야 한다. 이렇게 재단된 선재로 그림 1 (c)와 같이 서로 분



<그림 1> 감아 뒤집기 권선법

<표 1> 2세대 고온 초전도 선재의 사양

	고온 초전도 선재	PCS용 히터 테이프
재료	YBCO CC	Stainless steel
두께	95 μm	60 μm
폭	12 mm	12 mm
저항률	-	0.753 $\mu\Omega \cdot \text{m}$
안정화층	Cu, 40 μm thick	-
임계전류	290 A @ 77.3 K, sf	-

<표 2> 팬케이크 코일의 설계사양

내경	120 mm
외경	90 mm
높이	27 mm
선재 소요 길이	2 x 50 m
권회수	2 x 55 turns
코일 인덕턴스	1.4 mH
중심자속밀도	46 mT @ 37 A
최대 수직자속밀도	79 mT @ 37 A

리되어 있는 2개의 보빈에 각각 권선을 하여 2개의 코일을 만든다. 이러한 상태에서는 접합부 없이 폐회로를 이루는 더블 팬케이크 형상의 코일이 만들어지지만, 두 개의 코일에는 서로 반대방향 전류가 흐르게 되므로 발생하는 자장은 서로 상쇄하는 방향이 된다. 따라서 권선 후에 그림 1 (d)와 같이 두 개의 코일 중 하나를 뒤집어서 (flip) 재조립을 할 필요가 있다. 그림 1의 후측에 최종적으로 완성된 코일의 형태를 나타내고 있다. 본 권선법에 의하여 코일을 제작할 때 코일을 뒤집는 과정에서 선재의 뒤틀림이 발생하게 되나, 최근의 실험에 의하면 50 cm 길이의 1 mm 폭의 YBCO선재를 6번 꼬아서 뒤틀린 선재에서도 임계전류의 감소가 관측되지 않았다고 보고되어 있다.[3] 본 권선에서도 기계적인 지지 구조 및 중심자장의 영향만 최소화 시킬 수 있다면 문제되지 않을 것이라 생각된다.

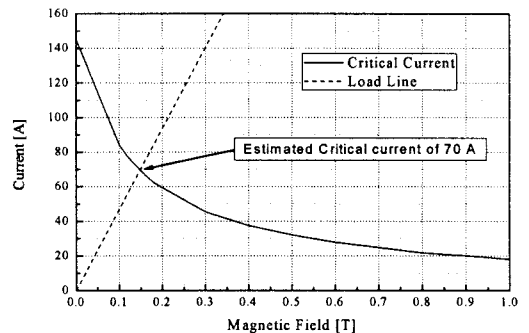
2.2 고온 초전도 팬케이크 권선 설계 및 제작

표 1에서 볼 수 있듯이 본 시험에서는 12 mm 폭의 넓이를 가지는 2세대 고온 초전도 선재 25 m 를 사용하여 권선을 제작하였다. 초전도 선재의 길이가 제한되어 있었기 때문에 가능한 많은 권회수를 가질 수 있도록 설계하였다. 표 2에 본 코일의 설계사양을 나타내었고 그림 2에 코일의 임계전류 특성과 로드라인을 계산하여 나타내었으며, 그림 2에 의하면 본 코일의 임계전류 값은 약 70 A 를 가질 것으로 예상되었다.

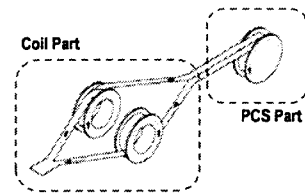
코일의 제작 후 영구전류 모드를 위하여 전류를 외부에서 인가하기 위해서는 PCS가 필요하다[4]. 본 시험에서는 코일의 한쪽 끝을 길게 남겨서 역시 3턴 정도의 권회수를 가지는 코일 형태로 PCS를 설계 및 제작하였다. PCS부에는 초전도 선재와 같은 폭을 가지는 스테인리스 스틸(Stainless Steel) 테이프를 같이 감아서 히터로 사용하여 온도를 사용하여 스위치를 트리거 하는 형태의 PCS를 제작하였다. 그림 3에 PCS 부분의 형태를 그림으로 나타내었으며, 그림 4에 히터 전류에 따른 PCS부의 온도 및 저항변화를 측정하여 나타내었다. 측정 결과에 의하면 4 A의 히터전류를 인가하였을 때 약 40 m Ω 정도의 저항이 측정되었으며 코일의 인덕턴스가 1.4 mH이므로 시정수는 약 0.035 sec 정도로 충분히 작아서 스위치로 사용 가능함을 알 수 있다.

외부에서 전류를 인가할 때 PCS를 오픈하기 위해서는 히터에 전류를 인가하여 가열하고 초전도선재의 온도를 임계온도 이상으로 상승 시켜 저항을 발생시켜서 외부 전류가 PCS부로 흐르지 않고 코일부로 흘러갈 수 있도록 구성한다. 이 때, PCS부의 초전도 선재의 온도를 유지하기 위 해서 스타이캐스트-1266(Stycast-1266)으로 사용하여 합침 하여 열 절연을 구성하였다.

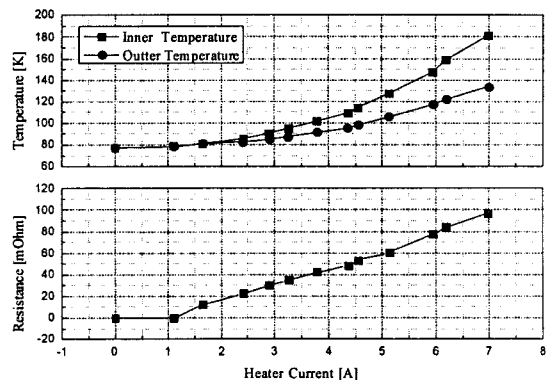
본 권선법으로 코일을 제작하기 전에는 광폭 초전도선재를 미리 재단해 놓을 필요가 있다. 본 시험에서는 회전 다이아몬드 커터를 사용하여 기계적으로 재단하였으며 그림 5에 12 mm 광폭 고온 초전도 선재의 중앙부분의 재단과정 및 분리된 2개의 보빈에 권선된 코일의 모습을 나타내었다. 권선 시 턴 간 절연을 위하여 25 μm 두께의 캡톤 필름(Kapton Film)을 한층 삽입 하였으며, PCS부분을 위하여 1 m 정도의 선재를 남긴 상태에서 권선을 중지하고, 하나의 코일을 뒤집어 붙여서 코일을 조립하였다. 그림 6에 완성된 코일의 모습을 나타내었다. 전류도입부를 위하여 PCS부와 코일부의 중간부분에 편조선을 사용하여 인접접합으로 전류도입부를 구성하였다. 외부전류가 코일에 인가 된 후에 PCS를 단아서 영구전류 모드를 만든 후에 코일 전류의 시간에 따른 감소를 측정하기 위하여 코일 중심부에 극저온용 홀 프로브(Hall Probe)를 설치하여 중심자장의 변화를 측정하였다.



<그림 2> 코일의 임계전류 특성 및 로드라인



<그림 3> PCS부의 형태



<그림 4> 히터전류에 따른 PCS의 온도 및 저항변화

2.3 시험결과 및 분석

제작된 PCS의 동작 여부를 확인하기 위하여 코일에 전류 인가시험을 수행하였다. 먼저 전류도입부와 PCS 히터 부를 2개의 독립된 직류전원에 연결한 후 77.3 K의 액체질소조에 전체 코일을 담가서 냉각시킨 후에 히터에 4 A의 전류를 인가하여 PCS부의 온도가 86 K 정도에 다다랐을 때 전류를 인가하기 시작하였다. 실제로 시험에 사용된 선재를 구성하는 초전도체인 YBCO의 임계온도는 92 K에 이르지만 실제 측정된 온도는 초전도 선재 자체의 온도가 아니고, 합침에 사용된 스타이캐스트-1266의 온도이므로 측정된 온도가 86 K일 때 초전도 선재의 온도는 92 K 이상이었을 것으로 생각된다. 전류를 작은 계단과 형태로 증가시킬 때, 코일의 중심 자기장이 전류에 비례하여 증가하는 것이 관측되었고, 이는 인가하는 전류가 PCS부로 우회하지 않고 코일로 인가되는 것을 나타낸다. 그림 7에 전류인가 시험 시 측정된 PCS의 온도와 전류 및 중심자기장을 나타내었다.

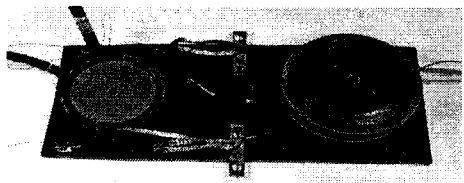
그림 2에서 보인 계산결과에 의하면 제작된 코일은 약 70 A 정도의 임계전류 값을 가질 것으로 예상되나, 임계전류 근방에서의 인덱스 저항 증가문제 등을 고려하여 40 A까지 전류를 증가시킨 후에 히터전류를 제거하고 온도가 충분히 내려간 후에 전류를 천천히 감소시켰다. 외부전류의 감소에도 불구하고 중심자기장이 유지되었으며 전류를 완전히 감소시킨 후 전류리드를 전원에서 제거한 후에도 중심자기장은 여전히 유지되는 것으로 코일이 영구전류 모드로 들어간 것을 확인하였다.

제작된 코일의 영구전류가 인가되었을 때 시간적인 안정성을 측정하기 위하여 그림 7에서와 같이 코일에 흐르는 영구전류를 34 시간동안 유지하면서 중심자기장의 감소를 측정하였다. 그림 8에 측정 결과를 나타내었으며, 시간에 따라서 천천히 중심자기장이 감소함을 알 수 있었다. 첫 수 시간 내에는 비교적 빠른 속도인 341 ppm/h로 감소하다가 약 30 시간이 지난 후에 비교적 안정적인 수준인 57 ppm/h를 유지하는 것을 관측하였다. 57 ppm/h의 안정성은 30 시간 이후에 안정적으로 유지되었으며, 만일 더 안정적인 주위 환경에서 시험을 하고, 더 낮은 운전온도를 유지할 수 있다면, 더 낮은 감소율을 얻을 수 있으리라 생각된다.

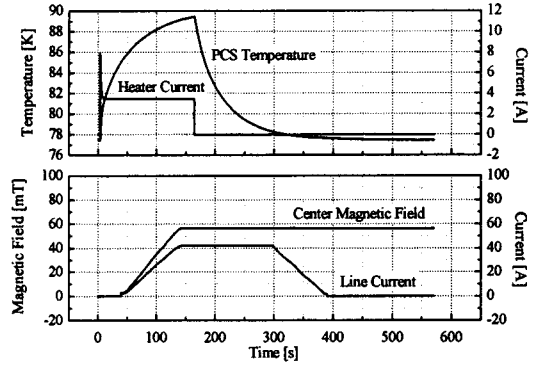
측정된 가장 낮은 감소율인 57 ppm/h에 의하면 NMR 마그네트의 활용은 어려워 보이지만, MRI의 활용에는 어느 정도 가능성을 보인다고 할 수 있다. 물론 MRI 마그네트로 사용되기 위해서는 0.5 ppm/h 정도의 안정성을 보여야 한다고 알려져 있으나, 제작된 코일의 매우 작은 인덕턴스와 높은 운전온도로 인한 큰 인덕스를 고려해 볼 때, MRI 급의 큰 인덕턴스를 가지는 코일로 20-30 K 정도의 운전온도를 유지할 수 있다고 가정할 때 0.5 ppm/h의 달성이 어렵지 않을 것으로 판단된다.



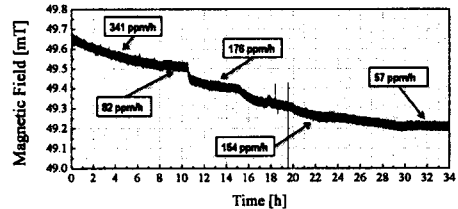
<그림 5> YBCO선재의 재단과정 및 권선 결과



<그림 6> 완성된 코일 및 PCS의 모습



<그림 7> 코일 전류인가 시험 결과



<그림 8> 영구전류 인가 후 중심자기장 감소 측정 결과

3. 결 론

고온 초전도 선재로 제작되는 펜케이크형 권선에 영구 전류를 인가하여 시간적으로 안정적인 고 자기장을 만들 수 있는 가능성을 갖는 새로운 권선법인 감아 뒤집기 권선법을 제안하였으며, 이 방법으로 제작된 더블펜케이크형 권선의 영구전류 특성을 측정하였다. 77.3 K에서 홀 프로브로 측정된 권선의 중심자기장은 NMR 스펙트로스코피(Spectroscopy)를 위한 마그네트로 사용되기에는 충분히 안정적이지 못함을 보였으나, MRI로의 적용에는 어느 정도 가능성을 보인다고 할 수 있다. 광폭 선재를 기계적으로 재단하는 방법을 보완하여 선재의 열화를 막고, 운전온도를 더 낮추어 인덱스 저항을 최소화하면 훨씬 더 안정적인 자장을 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 추후, NMR 프로브를 사용한 더 정밀한 측정과 안정적인 실험환경을 구축하고, 냉동기를 사용하여 20-30 K 정도로 운전온도를 낮추어 실험을 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. G. Lee et al., "Design and fabrication of permanent mode magnet by using coated conductor," *Physica C* 445-448, pp.1099-1102, 2006.
- [2] V. Selvamanickam, "Scale-up of coated conductor technology at SuperPower," Presented at DOE peer review, Washington, August, 2005.
- [3] H. G. Lee, G. W. Hong, J. J. Kim, M. Y. Song, *Physica C* 242 (1995) 81.
- [4] Y. S. Kim, Y. S. Yoon, S. E. Yang, D. K. Park, M. C. Ahn, and T. K. Ko, "Characteristics Analysis of a Small Scale Persistent Current Switch System by using Coated Conductor," *Journal of the Korea Ins. Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 1, pp.47-52, 2007.