

고화질소 냉각형 고온초전도마그네트 개발(I)

오상수, 하홍수, 하동우, 권영길, 류강식, 이해근, Y.Iwasa, 한일웅
한국전기연구소 초전도응용연구그룹, MIT FBML, 대성전선 기술연구소

Development of HTS magnet cooled by solid nitrogen (I)

S.S.Oh, H.S.Ha, D.W.ha, Y.K.Kwon, H.Lee, Y.Iwasa, J.W.Baek
KERI Applied Superconductivity Lab., MIT FBML, Daesung cable

ssoh@keri.re.kr

Abstract - We are developing portable type HTS magnet system cooled by solid nitrogen. This system have recooling and recharging capabilities. In this paper, we report preliminary test results obtained from the experimental solid nitrogen system and pancake magnet wound with Bi-2223/Ag tapes, respectively. The operation period was sensitively dependent on the vacuum rate in the cryostat, size of SUS tube for flowing N₂, and liquid nitrogen to cool the cryostat. The fabricated coil I_c was 75 A at 20 K in self field.

1. 서 론

최근에 높은 전류밀도를 갖는 수백 m 혹은 1 km 급 은시스 Bi-2223고온초전도선재가 PIT법으로 개발[1]되면서 이러한 도체를 이용한 고온초전도마그네트 개발 연구도 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 고온초전도마그네트의 상용화를 위해서는 고가의 고온초전도 도체 비용을 고려하여 저렴하고 효율적인 냉각방법의 선택이 중요한 문제가 된다. 저자들은 최근에 고온초전도체의 새로운 응용 분야를 개척할 수 있는 고화질소 냉각방식의 이동식 고온초전도마그네트 시스템을 개발하고 있다. 지금까지 고온초전도마그네트의 냉각 방법으로는 초고자장마그네트의 내부코일용으로 응용하는 경우 액체헬륨에 직접 침지하든가 GM냉동기를 부착하여 전도냉각방식으로 20 K에서 운전하는 방법이 주류를 이루었다. 한편 고온초전도마그네트를 영구전류모드로 운전할 수 있으면 외부전원과 분리 한 채로 사용할 수 있으나 현재의 냉각 방법으로는 마그네트 본체를 냉동기용 전원이나 액체헬륨 냉각장치와 완전히 분리시키는 것이 불가능하였다. 본 연구의 목적은 영구전류모드로 운전 가능한 고온초전도코일을 값싼 냉매인 질소를 고화시켜 냉각하는 방법을 적용함으로써 이동이 가능하고 고체질소

의 온도가 상승하였을 때 재 냉각, 재 충전이 가능한 새로운 고온초전도마그네트 시스템을 개발하고자 한다. 본 논문에서는 예비실험으로서 마그네트의 동작기간을 결정하는 고화질소 냉각체 시스템의 제작조건과 동작기간에 대한 관계를 조사한 실험 결과와 Bi-2223고온초전도테이프 로 만든 고온초전도코일의 제작과정 및 극저온에서의 전기적 특성을 조사한 결과를 보고하고자 한다.

2. 시스템의 구성

그림 1은 본 마그네트 시스템의 개념도이다. cryostat외층과 냉각체 사이에는 복사열 침입을 최소화하기 위해 진공구조에서 superinsulation 층을 둔다. 저온부는 기본적으로 코일과 고화질소로 구성된다. 냉각 코일은 질소를 고화시키기 위하여 액체 헬륨을 순환시키는 것으로 저온부의 안쪽에 설치된다(3절의 실험에서는 바깥쪽에 설치 됨). 저온부가 상온 일 때 냉각코일을 통하여 액체 헬륨을 순환시키면 질소의 고화나 액화가 이루어진다.

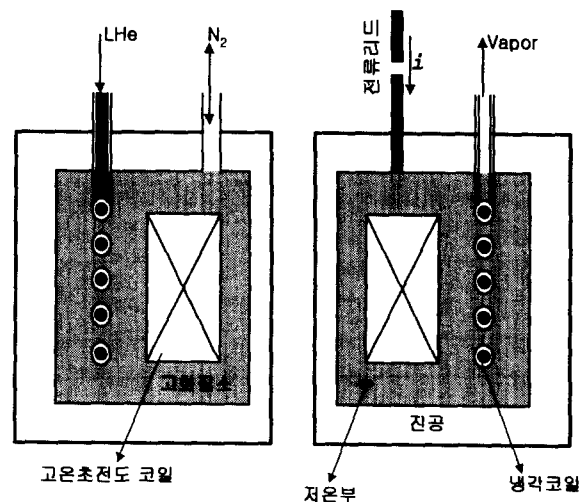


Fig.1. Schematic diagram of solid nitrogen cooled HTS magnet system

저온부 온도가 최대 동작온도(예를 들면 40 K)가 되었을 때, 마그네트가 영구전류 모드로 여자된 상태로 단순히 냉각코일을 통한 액체헬륨의 순환에 의해 시스템을 초기 동작 온도로 재 냉각시킬 수 있다.

3. 재냉각 기간(RRTP)

본 마그네트 시스템에서 코일을 둘러싼 질소를 고화시켜 임의 온도 이하로 냉각하면 저온부의 비열을 이용하여 장시간 냉매 공급 없이도 마그네트를 운전할 수 있다. 열침입 등으로 저온부의 온도가 상승하면 재냉각이 필요한데 그 기간 (Recooling to Recooling Time Period, RRTP)은 마그네트의 동작온도범위와 저온부의 무게, 열침입양에 의존한다. 무게 M 의 저온부에서의 power balance는 (1)과 같고,

$$M C_{cb}(T) \frac{dT_{op}}{dt} = Q_{in}(T) \quad (1)$$

RRTP는 (2)식으로 구해진다.

$$RRTP \equiv \Delta t_{op} = M \frac{\Delta H_{op}}{Q_{in}} \quad (2)$$

냉각시스템의 제작 조건이 열침입 양과 RRTP에 미치는 효과를 조사하기 위하여 코일이 없는 소형 고화질소 시스템을 제작하여 실험을 행하였다. 시스템의 기본적인 구조는 그림1과 유사하나 시험 시스템에서는 냉각코일이 저온부의 바깥쪽에 위치한다. cryostat내에는 질소를 주입하는 길이 305 mm, 외경 25.4mm의 튜브형 질소용축 저온부와 이를 둘러싼 10turn의 헬륨순환용 냉각코일(구리 튜브)로 이루어진 내조를 삽입하였다. 내조의 진공 층에는 단열 효과를 높이기 위하여 Cu shield와 superinsulation층을 설치하였다. 표1은 시험 시스템의 제작조건을 정리한 것으로 P는 내조의 진공도, D는 질소 주입 SUS튜브의 직경을 의미한다. 튜브 저온부의 체적은 118.25 cm^3 이고 고체 질소의 밀도 0.807g/cm^3 을 이용하여 20 ~ 40 K 사이에서의 ΔH_{op} 는 31.485 J/g 로 계산되었다.

표1 소형 고화질소 시험시스템의 제작조건

Trial	Cu shield	LN ₂	P (Torr)	D(mm)
#1	Yes	No	6×10^{-5}	6.35
#2	Yes	No	5×10^{-4}	6.35
#3	Yes	No	1×10^{-5}	3.18
#4	Yes	Yes	6×10^{-5}	3.18
#5	No	No	6×10^{-5}	3.18

표2에는 5회 실험에서 측정된 Δt_{op} 를 이용하여 구한 침입열 Q_{in} 을 계산 한 결과를 나타냈다.

표 1,2에서 알 수 있듯이 RRTP는 우선 내조의 진공도에 크게 의존하는 것을 알 수 있고 내조와 cryostat내벽을 액체질소로 냉각하고 저온부로 유입되는 열전도에 의한 침입열을 줄이기

위하여 질소주입튜브의 직경을 줄이는 것이 RRTP를 길게 하는데 효과적인 것을 알 수 있다.

표 2. 소형 고화질소 시스템에서 동작기간과 침입열

Trial	$V_{LHe} (\ell)$	$V_{N2, gas} (\ell)$	$\Delta t_{op} (\text{min})$	$Q(W)$
#1	5	117	22.7	2.20
#2	5	119	23.6	2.12
#3	3	119	103.3	0.48
#4	5	120.5	140	0.36
#5	4	119	81.7	0.61

본 실험에서는 #4 조건의 RRTP[20 → 40 K]가 140 min으로 가장 길게 나타났는데 (2)식에 의하여 계산된 전체 침입열은 0.36 W 값으로 나타났다.

4. 팬케이크 코일 제작 및 전기적 특성

Bi-2223/Ag 고온초전도선재를 이용하여 6개의 더블 팬케이크를 제작하였다. 이 때 사용한 선재는 Kapton절연된 상태에서 폭이 3.2 mm, 두께가 0.23mm이고 필라멘트 수는 37심이다. 77 K, 자기자장하에서 300 m 길이 선재의 임계전류는 32 A이다.

고온초전도 선재는 G-10 FRP로 제작한 코일폼에 더블 팬케이크형으로 권선하였다. 선재간 절연은 25 μm 두께의 Kapton 필름을 이용하여 선재와 동시에 권선하였으며 코일간의 층간 절연은 G-10 FRP 판재를 이용하였다. 층당 70 turn 씩 권선하였으며 권선된 선재의 고정을 위하여 에폭시로 함침하였다. 팬케이크 권선후 조립전 상태에서 각 서브코일의 임계전류를 측정한다. 15.6 ~ 16 A ($1\mu\text{N/cm}$, 77 K, Self field)로 확인되었다.

각각의 코일폼에 권선된 6개의 더블 팬케이크 코일을 적층한 후 코일간 Pb-Sn 솔더를 이용하여 접합하였다.

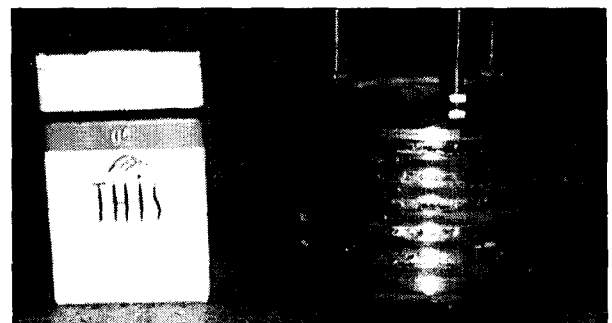


Fig.2. Photograph of assembled pancake coil.

그림 3은 20 K, 자기자장하에서 측정된 더블 팬케이크(DP)의 임계전류 특성을 나타낸 것이다. 전압 탭은 각층 더블팬케이크를 양단과 전체 조립된 코일의 양단에 설치하였다. 코일의

중심선 위치에 DP-3, DP-4가 있고 바깥 후렌지 쪽으로 DP-1, DP-6가 배치되어 있는 구조에서 전체 6개의 DP를 직렬로 연결한 채로 전류를 sweep하면서 V-I특성을 측정한 결과 DP-1(6)가 낮은 I_c 를 나타냈고 중심에 위치한 DP-3(4)가 더 높은 I_c 를 나타내고 있다. 이 결과는 도체에 걸리는 자기자장의 방향과 밀접한 관계가 있는 것으로 후렌지에 가까울수록 도체 표면에 수직인 방향의 자장이 커져서 임계전류의 열화가 일어나는 것으로 이해할 수 있다[2].

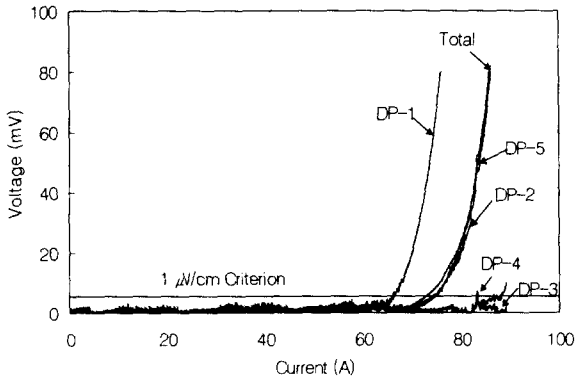


Fig.3. V-I characteristics of each double pancake at 20 K.

코일 전체의 임계전류는 약 75 A로 20 K에서 코일 설계상으로 중심자장 0.5 T를 발생시키기 위한 동작전류 50 A보다 50 % 높게 나타났다.

5. 결 론

고화질소로 냉각하는 고온초전도마그네트시스템 개발을 위한 중간단계 연구로서 소형 고화질소시스템을 제작하여 내조의 진공도와 저온부에 연결된 냉매 주입(배출)용 튜브의 사이즈, Cu shield, cryostat내벽을 냉각하는 액체 질소층의 유무가 시스템의 동작기간(RRTP)에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 Bi-2223선재로서 제작한 6층 팬케이크 코일의 전기적 특성을 조사한바 20 K온도, 자기자장하에서 75 A의 I_c 를 나타냈다. 더블팬케이크의 위치에 따라 I_c 가 크게 변하는 것을 확인하였는데 이것은 자기자장이 인가되는 방향과 밀접한 관계가 있는 것으로 확인되었다.

참고문헌

[1] L.Masur, E.Podtburg, D.Buczek, W.Carter, D.Daly, U.Kosasih, S-J.Loong, K.Manwiller, D.Parker, P.Miles, M.Tanner, J.Scudiere ; ICMC, July, 12-16, 1999.

[2] S.S. Oh, H.B. Jin, H.S. Ha, D. W. Ha, D.Y. Jeong and K.S.Ryu: EUCAS'99 Barcelona. September, 14-17 1999