

Fabrication and performance and stability tests of Bi-2223 pancake magnet

D.Y. Jeong^{a*}, M. H. Sohn^a, M. K. Cha^a, J. K. Lee^a, Y. S. Cho^a, H. S. Ha^a, H. M. Jang^a,
N. J. Lee^a, B. J. Kim^b, H. K. Kim^b and Y. C. Kim^b

^a Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

^b Pusan National University, Pusan, Korea

Received 22 July 2000

Abstract

77 K와 self-field에서 22 A의 I_c 를 갖는 길이 120 m, 19-심 Bi-2223 상 선재를 제조하여, 두 개의 double pancake 코일로 구성된 proto-type 고온초전도 자석을 설계, 제작하여 이 자석에서의 4.2 K와 77 K에서의 I-V 특성과 운전 특성을 평가한 결과, 이 자석은 77 K 등온조건에서는 9.5 A의 I_c 를, 77 K 헬륨가스 속에서는 8.3 A의 I_c 를 나타내었고, 4.2 K 등온조건에서는 93.7 A의 I_c 와 102 A의 I_q 를, 4.2 K 헬륨가스 속에서는 88.4 A의 I_c 와 92.0 A의 I_q 를 나타내어, 이 자석은 4.2 K와 77 K의 등온조건에서 각각 0.58 T와 0.06 T의 자장을 발생하였는데, 이는 해석적 방법으로 계산한 결과와 잘 일치하였다. 그리고 이 자석이 전도냉각되어 4.2 K에서 운전될 때의 안정성 특성평가로서, I_c 보다 약간 큰 전류인 89 A를 인가한 결과, 전류인가 후 82.6 초 후에 quench가 발생하였는데, 이 quench는 네 번째 pancake의 전류도입선부 연결부에서와 약간 늦지만 첫 번째 pancake의 전류도입선부 연결부에서 거의 동시에 개시되어 전체로 파급된 것으로 사료되었는데, I_c 가 낮은 첫 번째 pancake에서 더 높은 전압 강하가 나타났다. 또한 장착된 heater를 통하여 77 K에서 8.9 A의 전류로 운전되고 있는 코일에 146 joule의 열을 가했을 때 quench가 일어났는데, 이때 quench는 방위각 방향의 Bi-2223/Ag 선재를 따라서 보다 Kapton 절연층을 관통하는 선재의 반경방향으로 훨씬 빨리 전파하였다.

Keywords (8pt italic): high-Tc superconducting magnet, operational characteristic, stability, Bi-2223/Ag tapes

I. 서론

고온초전도체의 발견 이후 개발된 Bi-2223상 고온초전도 선재가 가장 일찍 적용된 시스템 중의 하나가 초전도 자석인데, 그 이유는 초전도 케이블을 제외한 모터나 발전기, MRI 등의 거의 모든 초전도 응용시스템이 이 자석을 근간으로 하는 응용시스템이기 때문에, 고온초전도 자석의 성능이 각종 시스템의 성능을 결정하는 등의 그 파급효과가 크기 때문이다.

지금까지의 연구결과에 의하면 Bi-2223상 고온초전도 선재를 이용한 고온초전도 자석은 77 K에서는 사용하지 못하지만 고효율냉동기를 사용하여 27 K 이하에서 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다 [1]. 그런데, 이 고온초전도 자석은 고온초전도체의 비열이 저온초전도체보다 매우 커 quench 발생을 위해서는 보다 큰 열이 필요하여 보다 안정하지만 [2], 고온초전도 자석은 비열도 크고 비교적 높은 온도에서 운전되기 때문에 quench 전파속도가 저온초전도 자석에서 보다 느리기 때문에 상전도 영역이 전체 코일에 빠르게 분산되지 못하기 때문에 국부적인 과열현상이 일어나 저온초전도 자석의

*Corresponding author. Fax: +82 550 280 1671
e-mail: dyjeong@keri.re.kr

경우보다 더욱 심각하게 코일을 손상시킬 수가 있어 보호장치가 필수적으로 요구된다고 알려져 있다 [3].

본 연구에서는 향후 20~27 K에서 운전할 수 있는 전도냉각형 고온초전도 자석을 개발하기 위한 전단계 연구로서, 77 K와 self-field에서 22 A의 I_c 를 갖는 길이 120 m, 19-심 Bi-2223상 선재를 제조하여, 두 개의 double pancake 코일로 구성된 proto-type 고온초전도 자석을 설계, 제작하여 이 자석에서의 4.2 K와 77 K에서의 I-V 특성을 평가하고, 이 때의 발생 자장을 해석적으로 계산한 결과와 비교하고, 이 자석이 전도냉각되어 4.2 K에서 운전될 때의 안정성 특성과 77 K에서의 quench 전파 특성을 평가한 결과를 보고하고자 한다.

II. 길이 120 m 19-심 선재의 제조와 특성

본 실험에서의 자석 제작을 위하여 사용된 길이 110 m, Ag-피복 Bi-2223 19-심 선재는 다음과 같이 제조하였다. 먼저 bloating 현상을 억제하기 위하여 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_{1.7}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10.8}$ 조성의 Merck사에서 구입한 precursor 분말을 750°C에서 3시간동안 열처리한 미분쇄한 분말을 외경 16.8mm 내경 13.8mm의 Ag-tube에 분말충진기를 사용하여 2.34 g/cm³의 충전밀도(약 Bi-2223 상의 이론밀도 6.45 g/cm³의 36%)로 충전하였다. Ag-tube의 다른 쪽 끝을 밀봉한 후 15%의 가공율과 2.5m/min의 인발속도로 직경 3.08 mm까지 인발한 후 육각 dies를 사용하여 지름 2.72 mm의 육각 선재로 인발하였다. 이 육각 선재를 19개를 다시 외경 16.8mm, 내경 13.8mm의 Ag-tube에 충전한 다음, 외경 1.51 mm의 선재로 인발한 다음 0.8m/min의 속도로 15%의 가공율로 두께 0.295mm의 테이프를 압연한 후, 840°C에서 4시간동안 열처리한 후 다시 압연하여 840°C에서 100시간동안 열처리한 후 바로 820°C에서 40시간 열처리한 후 서냉하여 길이 120 m, 두께 0.251 mm, 폭 3.302 mm의 19-심 선재를 제조하였다.

이 장치 선재의 77 K 임계전류, I_c 의 자장 의존성은 경비 절약을 위하여 자석 제작을 위한 길이 110m의 선재를 제조된 선재의 가운데 부분으로부터 잘라내고 남은 가장자리 부분의 선

재를 여러 조각으로 자른 짧은 선재에서 직류 사단자법으로 77 K에서 측정된 I-V 특성곡선에 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하여 평가한 몇 개의 I_c 중 가장 낮은 값인 21.92 A를 나타낸 선재에서 0.75 T까지의 자장을 인가하면서 측정하였다. Fig. 1은 77 K에서 측정된 이 선재 I_c 의 자장 의존성을 보여주는데, 0.6 T 부근에서부터 0.7 A에 접근하는 것으로 나타났다.

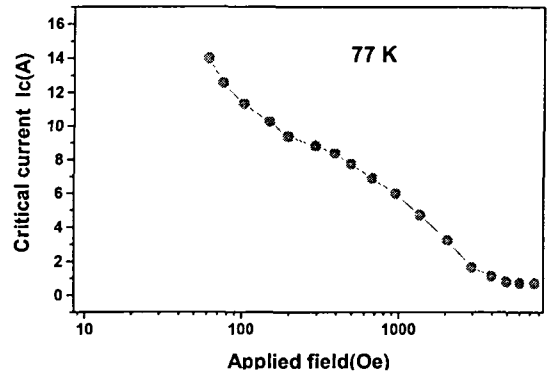


Fig. 1. 77 K와 0 T에서 21.92 A의 I_c 를 나타낸 단척 선재의 77 K I_c 의 자장 의존성.

III. 자석과 특성평가장치 설계와 제작

Fig. 2와 같이 두 개의 double pancake coil로 구성된 자석과 이 자석의 운전 특성과 안정성 특성 평가를 위한 장치를 함께 설계하였다. 이 장치의 특징은 자석 내부의 열역학적인 시스템을 단열상태나 등온상태로 만들 수 있다는 것이다. Cu enclosure를 제거하면 자석이 냉매와 직접 접촉하여 자석의 냉각은 냉매와의 직접적인 접촉에 의하여 일어나게 되어 자석은 등온 상태에 있게 된다. 그리고 Cu enclosure를 장착하여 그 내부 공간을 진공상태로 만들면 열전달은 bobbin과 bobbin의 위 뚜껑, Cu enclosure를 통하여 느리게 일어나 자석은 준단열(quasi-adiabatic)상태로 있게 된다. 이 경우 보다 원활한 열전달을 위하여 자석의 윗면이 bobbin의 위 뚜껑과 긴밀하게 접촉되어 있다. 또한 enclosure 내부를 진공으로 만든 후 He 가스를 충전함으로써 자석 내부의 열전달 속도를 조절할 수 있다.

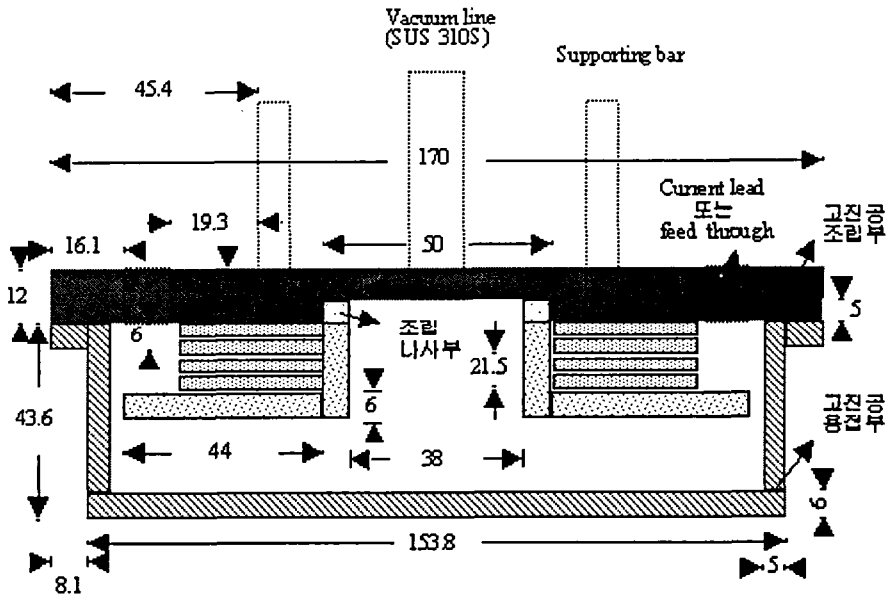


Fig 2. 고온초전도 자석과 이 자석의 특성평가장치 설계도면 .

자석 제작을 위하여 선재를 코일 형태로 감기 전에, 선재간의 전기적 절연을 위하여 선재의 한 면에 두께 80 μm 의 Kapton 절연 테이프를 접착한 후, 이 절연테이프가 접착된 선재를 이용하여 두 개의 double pancake으로 구성된 Table 1에서 보여주는 제원을 갖는 자석을 제작하였다.

Table 1. 제작된 자석의 제원.

사용된 전체 선재의 길이	100 m
Double pancake의 수	2 개
코일 외경	114.2 mm
코일 내경	5.0 mm
코일 높이	17.4 mm
코일 각 층의 turn 수	97
FRP spacer 두께	0.4 mm

이때 코일 각 부위에는 I-V 특성과 운전 특성, 안정성 특성 평가를 위한 전압단자를 장착하였으며, heater를 통하여 강제로 quench를 발생시켰을 때 선재의 길이방향과 선재 사이의 접촉면을 따른 quench 전파를 측정하기 위하여 니크롬선을 길이 18 cm로 압연한 다음 이를 구

부러서 길이 4 cm의 요철모양으로 만든 것을 두 번째 pancake coil의 최외층에 장착하였다. 이 heater는 상온에서 6.7 Ω , 77 K와 4.2 K에서는 6.5 Ω 의 저항을 갖는다. 그리고 이 voltage 단자와 heater wire의 움직임 방지와 코일 층간의 전기적 절연을 위하여 코일 각 층 사이에 두께 0.4 mm의 FRP cloth spacer를 설치하였다. Fig. 3은 제작된 자석의 모습을, Fig. 4는 자석이 특성평가장치에 장착되어 flange에 설치된 모습을 보여준다.

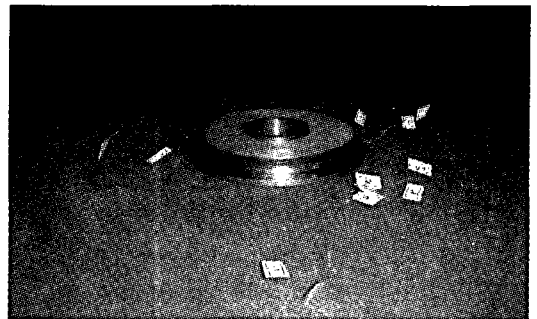


Fig. 3. 제작된 두 개의 double pancakes으로 구성된 고온초전도 코일의 모습.

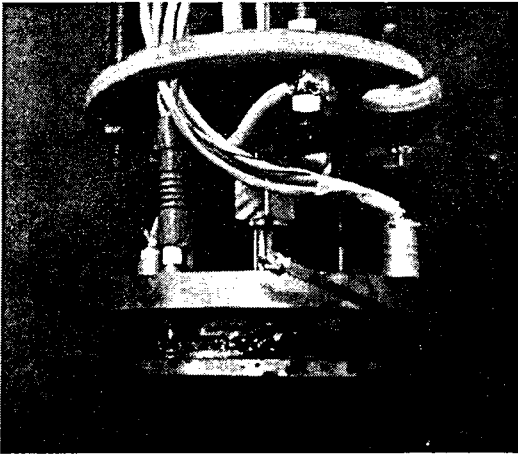


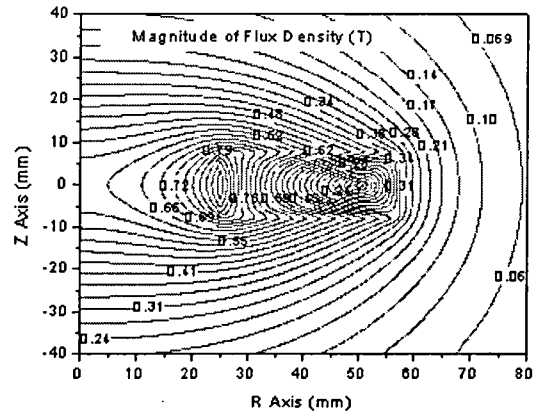
Fig. 4. 자석을 특성평가장치에 장착하여 flange에 설치한 모습.

IV. 자석의 발생자장 simulation 및 I-V 특성과 운전 특성, 안정성 특성

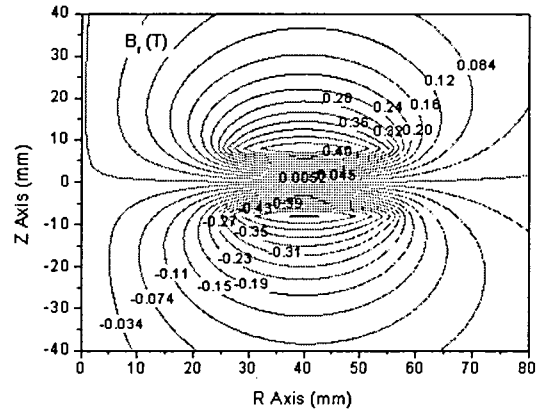
이 자석 내 자장의 수직방향 성분과 방위각 방향 성분 및 전체 자장 세기의 분포를 파악하기 위하여 Biot-Savart's law에 elliptic integral을 적용하는 일반적인 해석방법을 사용하여 계산하였는데, Fig. 5는 100 A의 운전전류를 사용할 경우, 자석 내 자장의 분포와 세기를 계산한 결과를 보여준다.

자석의 I-V 특성은 77 K와 4.2K에서 Cu enclosure를 장착한 상태와 장착하지 않은 상태에서 평가하였는데, 이때의 전류상승속도는 77 K에서는 0.75 A/sec 였으며, 4.2 K에서는 4 A/sec 였다. 그리고 자석의 운전 특성과 안정성은 Cu enclosure를 장착하여 내부에 헬륨가스를 충전한 후 이를 액체질소조에 담구어 열적 평행에 이른 후 측정하였다.

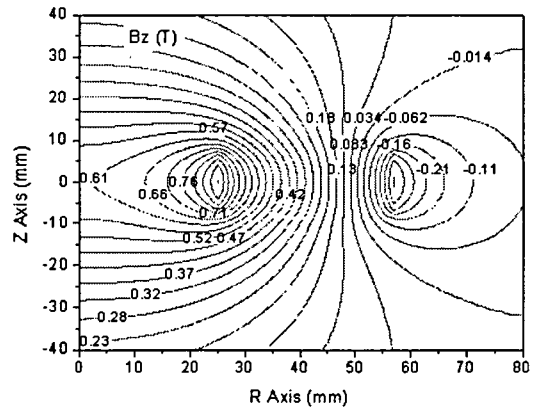
Fig. 6은 copper enclosure를 장착하지 않고 액체질소 속에 코일을 담구어 동온상태에서 측정한 두 개의 double pancake(DP) 코일과 전체 코일의 I-V 곡선을 보여준다. I_c 의 평가를 위하여 $1 \mu V/cm$ 의 기준을 적용할 때 double pancake 코일 1 (DP1)의 I_c 는 9.2 A, DP2의 I_c 는 9.5 A, 전체 코일의 I_c 는 9.5 A로 나타나 DP2가 DP1보다 높은 I_c 를 나타냈다. 이 자석 코일에 9.5 A의 전류가 통전하면 0.06 T의 자장이 발생하는



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Biot-Savart's law에 elliptic integral을 적용하여 계산한 100 A의 운전전류 인가시의 자석 내 자장 분포. (a) 전체 자장. (b) 높이 방향의 자장. (c) 반경 방향의 자장.

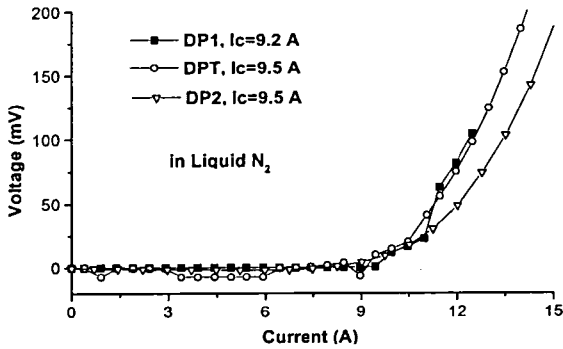


Fig. 6. Cu enclosure를 장착하지 않은 자석코일을 액체질소 속에 담근, 등온상태에서 측정한 이 코일의 I-V 곡선.

데, 이 자장에서의 I_c 는 Fig. 1에서의 0.06 T에서의 I_c 값보다 높은데, 이는 코일 제작에 사용된 길이 100 m의 장척선재가 더 높은 I_c 또는 더 약한 자장 의존성을 갖고 있다는 것을 의미할 뿐만 아니라 winding시의 선재에서의 I_c 저하도 무시할만하다는 것을 의미한다.

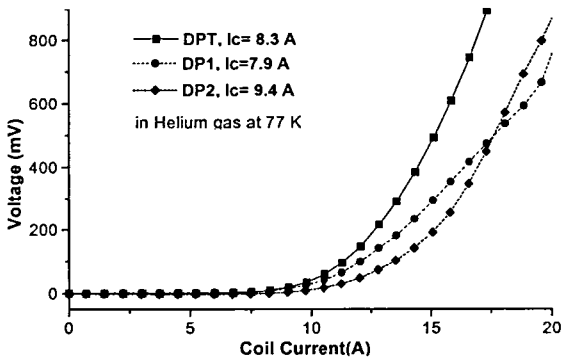


Fig. 7. 77 K의 헬륨가스 속에서 측정한 자석코일의 I-V 특성 곡선.

Fig. 7은 이 코일에 copper enclosure를 장착한 후 10-6 Torr 이하의 진공으로 만든 후 헬륨가스를 충전한 후 액체질소 속에 담근 상태에서 측정한 double pancake (DP) 코일에서의 I-V 곡선을 보여주는데, 첫번째 double pancake(DP1)에서의 I_c 가 7.9 A, DP2에서는 9.4 A, 전체 코일에서는 8.3 A로 나타나 코일이 액체질소와

직접 접촉해 있을 경우의 I_c 보다 낮게 나타났는데, 코일이 액체질소와 직접 접촉해 있을 경우 보다 높은 운전전류를 사용할 수 있음을 보여준다. 그리고 각 pancake coil(PC) 층에서의 I-V 곡선을 측정한 결과, DP1의 I_c 는 밑에서부터 첫 번째 PC의 I_c 에 의하여, DP2의 I_c 는 맨 위층 PC의 I_c 에 의하여 결정되었음을 보여주었는데, 이는 이 두 개의 PC에 연결된 전류도입선으로부터의 joule 열에 의한 효과이거나 이 두 PC가 전류도입선과 연결될 때의 기계적 손상에 의한 선재의 I_c 감소 효과로 사료된다.

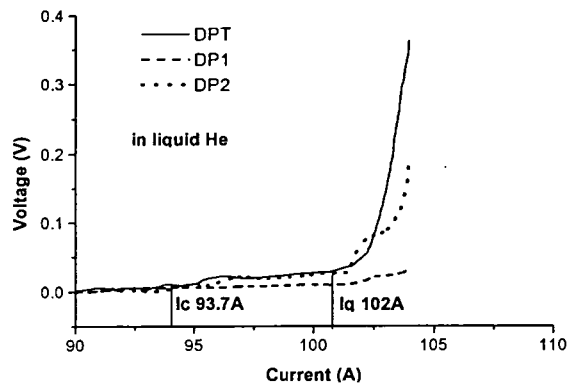


Fig. 8. 자석코일에 copper enclosure를 장착하지 않고 액체헬륨 속에 담근 등온상태에서 측정한 I-V 특성곡선.

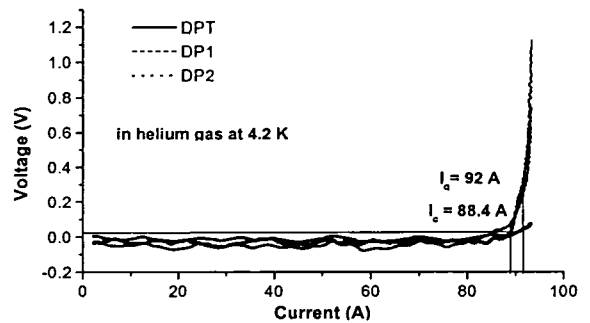


Fig. 9. 4.2 K의 헬륨가스 속에서 측정한 자석코일의 I-V 특성곡선.

Fig. 8은 이 코일에 copper enclosure를 장착하지 않고 액체헬륨 속에 담근 등온상태에서 측

정한 I-V 특성곡선을 보여주는데, 이 때의 I_c 는 93.7 A, quench를 일으킨 전류, I_q 는 102 A 였다. Fig. 9는 copper enclosure를 장착한 후 10-6 Torr 이하의 진공으로 만든 후 헬륨가스를 충전한 후 액체헬륨 속에 담근 상태에서 측정한 I-V 곡선을 보여주는데, 이 상태에서의 I_c 는 88.4 A, I_q 는 92 A로 평가되었다.

Fig. 10은 이 자석의 4.2 K에서 평가한 load line을 보여주는데, 본 연구에서 제작한 자석은 액체헬륨 속에 잠겨서는 0.58 T의 자장을, 4.2 K의 헬륨가스 속에서는 0.55 T를 발생시킬 수 있음을 나타내는데, 이는 simulation 결과와 아주 잘 일치하는 값이다.

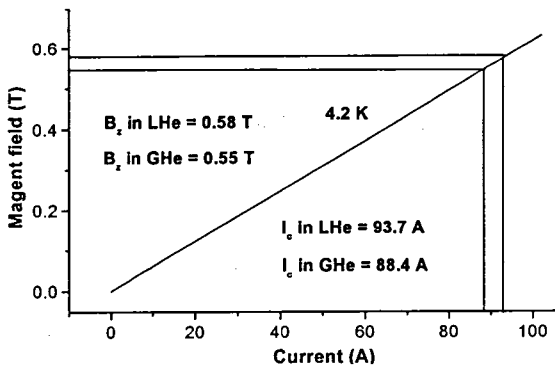


Fig. 10. 본 연구에서 제작한 자석은 액체헬륨 속에 잠겨서는 0.58 T의 자장을, 4.2 K의 헬륨가스 속에서는 0.55 T를 발생시킬 수 있음을 보여주는 load line.

4.2 K에서의 이 자석의 운전특성을 평가하기 위하여 이 4.2 K의 헬륨가스 속에 있는 이 자석에 I_c 보다 약간 큰 89 A의 전류를 인가한 후 시간에 따른 전압단자에서의 전압 변화를 관찰하던 중, 89 A를 인가하고 82초가 경과한 후 quench가 일어나 코일의 저항이 증가하면서 전압으로부터의 전류가 현격히 줄어 전원의 스위치를 OFF 하였는데, 이때의 각 DP 코일에서의 전압 변화를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11로부터 quench는 DP2에서 먼저 시작하였는데, quench가 일어남에 따라 각 코일에서의 전압은 초기에는 normal zone의 생성·전파에 따라 전압이 급격하게 증가하다가 온도가 증가함에 따라 normal zone의 비열이 커져 이에 대응하여

Joule heating 열이 어느 정도 축적될 때는 전압이 steady한 상태로 머물다가 어느 정도 Joule 열이 축적된 후에는 이것이 파국적으로 전파되어 저항이 파국적으로 상승함에 따라 전압이 파국적으로 상승하다가 (이에 따라 전압으로부터의 전류도 파국적으로 저하됨) 전류가 감소함에 따라 전압이 감소한 것을 알 수 있었다.

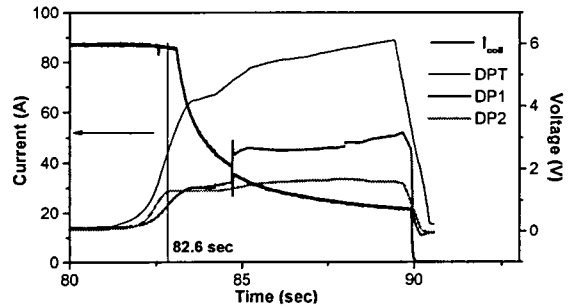


Fig. 11. I_c 보다 큰 전류통전시의 quench 발생에 따른 각 double panckes에서의 시간에 따른 전압 변화.

본 연구에서는 상술한 과전류에 의한 quench 외에도 heater를 장착하여 I_c 보다 적은 운전전류에서 정상적으로 운전되고 있는 코일에 열을 가하여 강제적으로 quench를 발생시켜, 이 quench 발생에 따른 DP층간과 선재 층간의 전압과 온도변화를 관찰하였는데, 본 실험에서는 본 실험을 위하여 장착한 LakeShore TC-36"E thermo-couple이 너무 많은 junction을 가져 정상적인 작동을 하지 않아 코일 각 부위에서의 온도 변화를 감지할 수 없었고, 사용한 운전전류 전원과 heater 전원이 노후하여 많은 noise를 가져 실험결과의 신뢰성이 낮고 해석에 많은 어려움이 있었다. 그러므로 반복적인 결과를 낳은 data로서 heater에 15 A의 전류를 100 ms 가함으로써, 77 K에서 8.7 A의 전류로 운전되고 있는 코일에 146 joule의 열을 가했을 때 코일 각 부위 전압의 시간에 따른 변화를 Fig. 12에 보여준다. 이 그림에서 V12는 아래로부터 첫번째 PC양단의 전압을, V23는 두 번째 PC에서 heater가 설치된 최외각 세 선재 층을 제외한 두 번째 PC 양단의 전압을, V34는 heater가 설치된 바로 밑 선재 층의 heater 바로 밑부분

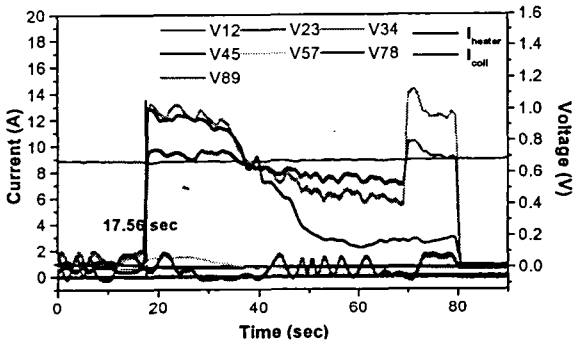


Fig. 12. 77 K에서 8.7 A의 전류로 운전되고 있는 코일에 146 joule의 열을 가했을 때 코일 각 부위 전압의 시간에 따른 변화.

부터 안쪽으로 한 바퀴 turn한 선재 사이 (즉 반경방향의 전압을), V45는 heater가 설치된 바로 밑 선재 층의 heater 바로 밑부분부터 바깥 쪽으로 반 바퀴 turn한 지점 사이의 전압을, V57은 heater가 설치된 최외층에서 heater로부터 반 바퀴 turn한 지점 사이의 전압을, V78은 heater와 세 번째 층 끝 사이의 전압을, V89는 네 번째 층 양단의 전압을 나타낸다. 이 그림 으로부터 파악할 수 있는 것은 (1) 본 실험장치에서의 냉각기구에서 8.7 A와 8.9 A를 운전하

고 있는 상태에서 169 joule의 열량을 가함으로써 국소적인 quench는 발생시킬 수 있었으나 코일전체를 quench 상태로 이끌지 못하였다는 사실과, (2) V34와 V45, V78에서만 큰 전압 상승을 관찰하고 V57에서는 경미한 전압상승만 관찰하여, 국소적인 quench 발생시 quench는 Bi-2223상 선재를 따라 전파되는 것보다 방사 방향으로 훨씬 빨리 전파된다는 사실인데, 후자는 다른 그룹에서의 결과와 일치한다 [3].

감사의 말씀

본 저자들은 본 연구를 위하여 연구비를 지원한 과학기술부에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Y. Iwasa, "Case studies in superconducting magnets," Plenum Press, New York (1994).
- [2] J. W. Lue, M. S. Lubell, D. Aized, J. Compell, R. Schwall, "Quenches in a high temperature superconducting tape and pancake coil," Cryogenics, 36, 379-389 (1996).
- [3] Hunwook Lim and Yukikazu Iwasa, "Two-dimensional normal zone propagation in BSCCO-2223 pancake coils," Cryogenics, 37, 789-799 (1997).