

은비가 다른 Bi-2223 팬케이크 코일의 켄치 특성

장현만\*, 오상수, 하홍수, 하동우, 장국렬, 류강식, 김상현\*  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, 경상대학교 전기공학과\*

Quench Properties of Bi-2223 Pancake Coils with Different Ag/SC Ratio

H.M.Jang\*, S.S.Oh, H.S.Ha, D.W.Ha, K.L.Jang, K.S.Ryu and S.H.Kim\*  
Korea Electrotechnology Research Institute ASL,  
Gyeongsang National Univ. Dept. Electrical Eng.\*

s\_jhm@gshp.gsnu.ac.kr, ssoh@keri.re.kr

**Abstract** - The normal zone propagation (NZIP) velocity and V-I characteristics of two Bi-2223 pancake coils with different Ag/SC ratio were investigated by experiment. Non-uniformity of  $I_c$  and broad restive transition was observed in two coils. The NZIP velocity of azimuth direction is faster than radius direction, and the NZIP velocity of coil with higher Ag/SC ratio is faster than another coil with lower Ag/SC ratio.

1. 서 론

20 K 이하, 고자장 하에서 높은 임계전류밀도를 나타내는 Bi-2223 고온초전도테이프는 고자장 발생용 hybrid 마그네트의 삽입코일로 응용할 수 있다[1]. 그러나, 실질적인 고온초전도마그네트 제작에 있어서, 가장 중요한 요소라 할 수 있는 도체의 평균전류밀도( $J_c$ )를 높이는 연구가 선행되어야 하는데, 이를 위해서는 도체 단면에서 안정화제와 초전도체의 면적 비(Ag/SC)를 낮추어야 한다.

고온초전도체는 저온초전도체에 비해 임계온도가 높고 비열이 크기 때문에 안정성 마진이 크다. 그러나, 고온초전도 코일에 국부적인 발열로 인하여 켄치가 일어나게 되면 상전도 영역 전파(normal zone propagation; NZIP) 속도가 느려서 켄치 영역이 빠르게 코일 전체로 분산되지 못하고 발열부분의 집중적인 온도상승을 초래해 코일 전체의 손상이 우려될 수 있다[2]. 이러한 측면에서 Ag/SC를 크게 하면 Ag의 면적 증가로 인하여 고온초전도테이프의 평균 열전도율과 열 용량을 높일 수 있게된다[3]. 그리고, 주열원의 원인이 되는 Ag의 면적을 크게 함으로써 테이프의 전체저항을 줄일 수 있어 최소켄치에너지(MQE)를 높일 수 있다[4].

본 연구에서는 Ag/SC가 서로 다른 두 종류의 Bi-2223/Ag 테이프를 제조하여 코일을 제작하고, 77 K 이하의 온도에서 코일의 임계전류 및 V-I 특성을 조사 하고자 하였으며, Ag/SC가

다를 때 상전도 영역 전파속도를 비교하고자 하였다.

2. Bi-2223 팬케이크 코일의 제작 및 실험

PIT법으로 Ag/SC가 2.05, 3.8인 두 종류의 19심 Bi-2223/Ag 고온초전도 테이프를 제조하였다. 제조된 테이프는 840℃에서 각각 두 번씩 열처리하고, 두께 50 μm인 Kapton 필름으로 테이프의 한쪽 면을 절연하여 내경 40 mm인 알루미늄 보빈에 팬케이크 형태로 감아서 코일을 제작하였다. 보빈의 상부 및 하부 플랜지와 테이프 사이에는 FRP spacer를 끼워 냉각 채널을 만들었다.

코일의 V-I 특성 및 켄치 특성을 평가하기 위해 권선 된 길이방향으로 4개, 반경방향으로 3개의 전압단자와 4개의 Chormal - CuFe 열전대를 사용하였으며, 실험전후의 코일 온도를 측정하기 위해 cernox 저항센서를 사용하였다. 히터는 극저온용 히터 선을 압연해서 가열면적이 3 mm × 5 mm가 되게 하여 코일 최 내층의 테이프 한쪽 면에 부착하였다. 히터의 저항은 상온에서 1.3 Ω이었다. 표1에 제조된 테이프와 팬케이크 코일의 사양을 나타내며, 그림 1은 코일 및 센서위치에 대한 개략도, 그림 2는 제작된 코일을 측정하기 위해 시편홀더에 부착한 사진을 나타내고 있다.

Table 1. Specifications of the Bi-2223 tape and coils

Bi-2223/Ag tape	coil-1	coil-2
Tape thickness	4 mm	4 mm
Tape Width	0.22 mm	0.22 mm
Ag/SC Ratio	3.8	2.05
$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> ) @77 K, 0 T	10,500	8,400
Single pancake coil		
I. D.	40 mm	
O. D.	46 mm	
Insulator thickness	50 μm	
Number of turns	10	
Tape length	1.345 m	
Length of $V_r$	31.4 mm	
Length of $V_c$	~ 400 mm	

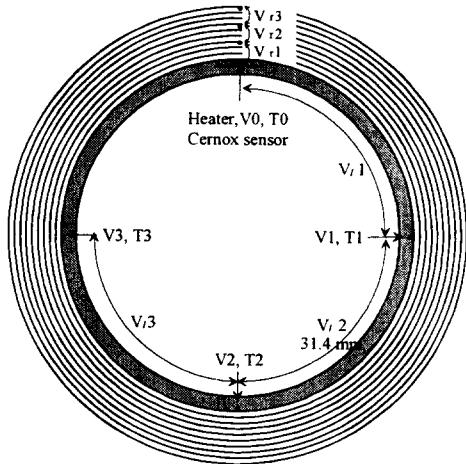


Fig.1. Schematic top view of coil indicating the locations of voltage taps and thermocouples and the heater

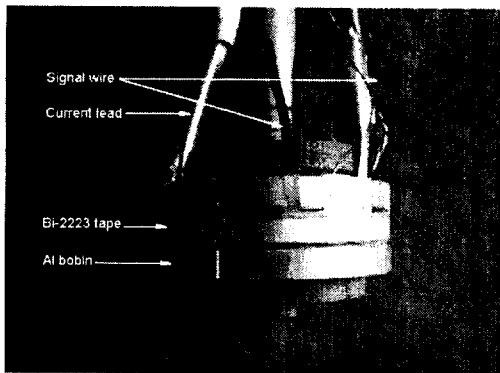


Fig. 2. Photograph of Coil2

제작된 코일은 전류 1 A당 2.914 Gauss의 중심자장을 발생시키며, 이때 최내층의 초전도 테이프에 가해지는 최대자기자장은 11.821 Gauss이다.

코일의 온도에 대한 V-I 특성 및 퀵치 특성 평가를 위해서 온도 가변 insert dewar를 사용하였다. Insert dewar는 액체헬륨 용기에 삽입하여 4.2 K 헬륨 가스를 니들 밸브와 열 교환기를 통해 듀어 내부로 흘러보내면서 4.2K~77K 까지 온도를 제어하였다. 측정 시 듀어 내부의 온도 편차는 목표온도  $\pm 0.05$  K였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 4.2 K에서 77 K까지 온도를 변화시키면서 코일전체의 임계전류를 측정 한 결과이다. 임계전류는 기준전계  $1 \mu V/cm$ 때의 전류로 결정하였다. 코일1의 임계전류는 77 K에서 4.2 A, 4.2 K에서 37 A였으며, 초전도체의 단면적이 큰 코일2는 4.2 K에서 60.3 A를 나타내었다. 두 코일의 임계전류 차이는 온도에 반비례하여, 온도가 낮아질수록 임계전류의 차는 크게 나타나고 있다.

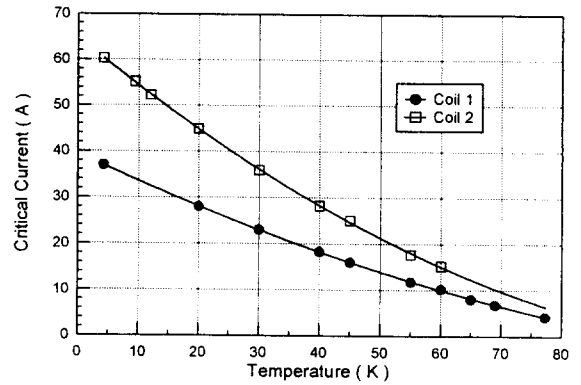


Fig.3. Temperature dependance of critical current of two coils

그림 4는 20 K에서 두 코일에 전류를 인가할 때 부분별 V-I 특성을 나타내고 있다. 두 코일 모두 전류에 의한 전압 증가가 매우 완만하게 진행되고 있으며, 테이프의 길이방향으로 임계전류가 일정하지 않음을 알 수 있다. 이 현상은 다른 온도에서도 같게 나타나는데, 초전도테이프 제조 시 가공 과정에서 발생된 산화물 초전도층의 불균일성이 원인이라 할 수 있다. 테이프 길이방향으로 임계전류가 일정하지 않을 경우 코일의 동작전류를 높일 때 다소 취약한 부분의 발열을 초래할 수도 있다.

그림 5는 20 K에서 코일1의 V-I 특성을 시간에 대해서 나타내고 있다. 전류는 0.35 A/sec. 속도로 58 A까지 증가시켰으며, 수초간 유지시킨 후 증가시킬 때와 같은 속도로 줄였다.

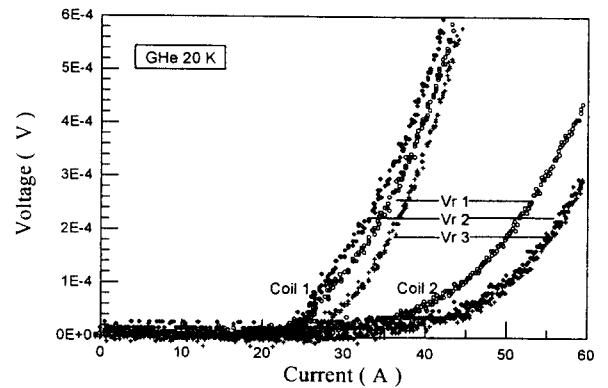


Fig. 4. V-I curves of two coils at 20 K

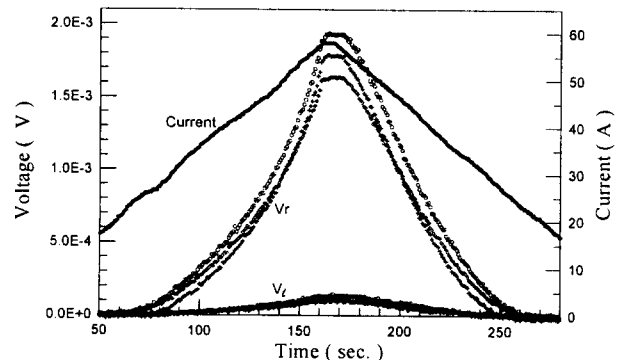


Fig. 5. Voltage vs time during charge and discharge of coil1 at 20 K

전류 증가 시 임계전류 이상에서 서서히 전압이 증가하다가 전류가 일정하게 유지되면 전압도 더 이상 증가하지 않는다. 인가전류가 코일의 임계전류 이상이 되면 전류가 상전도 부분인 Ag로 분류되기 시작하는데 Ag의 저항에 의해 전압이 발생하게 되고, 상전도 영역의 주울열로 인해 테이프의 온도가 상승하게 된다. 그러나 제조된 테이프 중 Ag 부분의 고유저항은 20 K에서  $0.073 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로서[5] 저항으로 계산하면 약  $10 \mu\Omega/\text{cm}$ 가 되는데, 58 A를 1 초 동안 유지할 경우 1 cm당 33 mJ의 주울열이 발생한다. 이때 20 K의 가스헬륨이 주울열로 인한 온도 상승을 제한하여 전압은 계속적으로 증가하지 않는다. 그림에서 반경방향의 부분별 전압  $V_r$ 의 단자간 거리는 약 400 mm이며, 길이방향의 부분별 전압  $V_l$ 의 단자간 거리는 31.4 mm로서  $V_r$ 의 전압이 훨씬 크게 나타난다.

그림 6은 20 K에서 코일1을 25 A (임계전류의 92%)로 운전 중 코일의 최대층 테이프에 접촉된 히터에 5.86 A, 300 ms의 펄스전류를 인가했을 때 권선 길이 방향 및 반경 방향의 부분별로 발생하는 전압을 시간에 대해서 나타내고 있다. 이때, 그림 1에 나타난 것처럼 권선 길이 방향으로 설치된 열전대로 측정된 온도를 그림 7에 나타내고 있다.

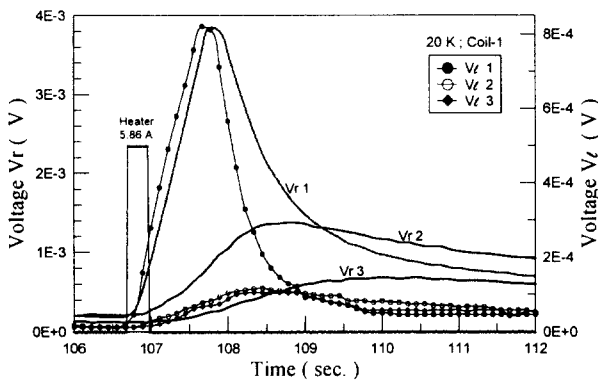


Fig. 6. Section voltage of coil 1 at 20 K ( Operating current of coil-is 27 A )

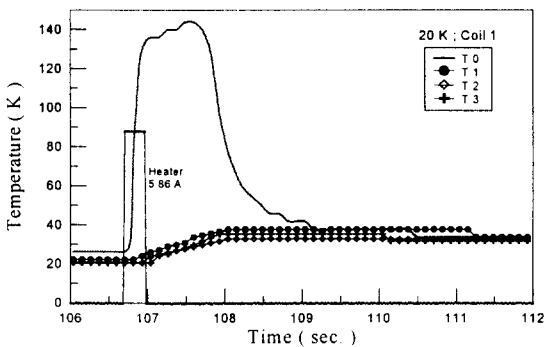


Fig. 7. Temperature traces of coil-1 after heat pulse ( Operating current of coil-is 25 A )

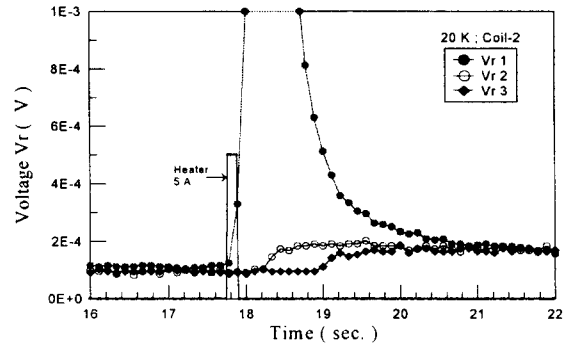


Fig. 8. Section voltage of coil-2 at 20 K ( Operating current of coil-is 40 A )

그림 6과 그림 7을 보면 히터에 의해서 열이 가해진 직후 발열부분의 온도는 약 143 K까지 증가했다가 다시 감소하며,  $V_r1$ 과  $V_l1$ 의 전압도 온도 경향과 비슷하게 증가했다가 다시 줄어든다. 그리고  $V_l2, 3$ ,  $V_r2, 3$ 은 약간의 시차를 두고 서서히 증가하지만  $V_r1$ ,  $V_l1$ 과 마찬가지로 더 이상 증가하지 않고 줄어든다.

일반적으로 고온초전도 코일의 상전도 영역 전과속도는 초전도 테이프의 층간 및 길이방향의 열전도에 의해서 결정되며, 안정화제의 열전도율이 매우 높기 때문에 테이프 단면의 온도 분포는 균일하다고 가정할 때 고온초전도 코일의 2차원적 열 평형 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk_r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (rk_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + Q_d + Q_j = \gamma C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $r$ ,  $\theta$ 는 각각 반경, 권선 방향의 좌표를 나타낸다.  $k_r$ ,  $k_\theta$ 은 각 방향의 열전도율을 나타내며,  $Q_d$ ,  $Q_j$ ,  $\gamma C$ 는 각각 교란에너지와 주울열 에너지 그리고 코일의 평균 열 용량을 나타낸다. 또한 테이프 단면의 온도가 균일하다고 할 때  $Q_j$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Q_j = \begin{cases} \rho(T) \frac{A_m}{A} Ja^2 & (T > T_c) \\ \rho(T) \frac{A}{A_m} (1 - \frac{J_{SC} A_{SC}}{J_a A}) (\frac{T - T_{sh}}{T_{sh} - T_{opt}}) Ja^2 & (T_{sh} < T \leq T_c) \\ 0 & (T \leq T_{sh}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $A_m$ ,  $A_{SC}$  그리고  $A$ 는 각각 안정화제의 단면적, 초전도체의 단면적, 그리고 테이프 전체의 단면적을 나타내며,  $J_{SC}$ 와  $J_a$ 는 초전도체의 전류밀도와 테이프의 평균 전류밀도를 나타낸다. 그리고  $T_{sh}$ 는  $T_c - (T_c - T_{opt}) \frac{I_{opt}}{I_c}$ 로 결정되며,  $\rho$ 는 Ag의 고유저항을 말한다. 그림 6과 앞선 식 (2)를 고려하여 코일1의 히터 펄스 이후 최대 온도를 나타내는 시간대에서 발열부분의 주울열을 계산하면 약 0.2 J 이하로써 주위의 온도에 의한 냉각으로 더 이상 쿨치가 진행되지 않고 다시 회복되는 경향을 나타내고 있다.

그림 8은 그림 6과 마찬가지로 코일2를 40 A (임계전류의 90%)로 동작시킬 때 히터로 테이프에 열을 가하여 반경 방향으로 나타나는 부

위별 전압을 나타내고 있다. 히터에는 5 A, 100 ms의 펄스전류를 인가하였으며, 코일1과 비교할 때  $V_{i1}$ 과  $V_{i2}$ ,  $V_{i3}$ 에서 전압이 나타나는 시차가 더 크게 측정되었다. 이것은 테이프 단면에서 열전도율이 높은 Ag의 면적이 코일1에 비해 작기 때문에 도체의 평균열전도율이 낮아 상전도 영역의 전파속도가 느린 것으로 설명할 수 있다. 그리고 코일1과 코일2 모두 동작전류를 낮게 할 경우 전압이 발생하는 시차는 더 크게 나타났다.

그림 6과 그림 8에서  $V_{i1}$ 의 전압 추세를 비교할 경우, 히터 펄스이후 코일2의 전압증가가 코일1보다 훨씬 급격하게 증가하고 있는데, 이것 역시 코일2의 Ag/SC가 낮기 때문에 즉, Ag의 단면적이 작기 때문에 테이프의 저항이 큰 코일2의 전압이 더 빠르게 상승한다.

앞서 실험한 결과를 토대로 20 K에서 길이방향의 상전도 영역 전파속도( $v_z$ )를 그림 9에 나타내었다. 전파속도계산은 전압을 이용하였는데, 전압단자 사이의 거리를 기준전압 이상의 전압이 생길 때까지의 시간차이로 나누어 계산하였다. 열기전력 및 외부적 요인에 의한 잡음을 고려하여 기준전계는  $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ 로 결정하였다. 본 실험에서 측정된 결과로는 Ag/SC가 3.8인 코일1을 임계전류의 92 %로 동작시킬 때  $v_z$ 는 약 3.2 cm/sec.로 나타났다. 이 수치는 Ag/SC가 같은 Ag-Au-Mg 합금 시스 Bi-2223 코일[6]을 4.2 K에서 동작시킬 때보다 약 4배정도 빠르게 나타났다. 그리고, 20 K에서 코일2를 임계전류의 90 %로 동작시킬 때  $v_z$ 는 2.19 cm/sec.로 나타났다.

그림 10은 코일2를 60 K에서 임계전류의 100 %로 운전할 때, 히터 펄스로 인해 길이 방향으로 발생한 전압을 측정한 결과를 나타낸다. 히터에 가한 에너지는 약 10 J로써 히터의 발열과 거의 동시에 코일 전체에서 퀘치가 진행되는 것을 볼 수 있다. 히터의 발열 중에는 식 (1)의  $Q_d$ 와  $Q_j$ 에 의한 코일의 온도상승으로 전 구간의 전압이 급격히 상승하게 되며, 히터 펄스 이후에는 발열부분에서 전도된 열과  $Q_j$ 만 남게 되어 발열부분으로부터 멀리 떨어진 영역에 있는  $V_{i2}$ 와  $V_{i3}$ 은 냉각에 의해 증가 추세가 다소 줄어든다. 그러나 계속적인  $Q_j$ 의 증가로 완전히 퀘치가 발생하였다.

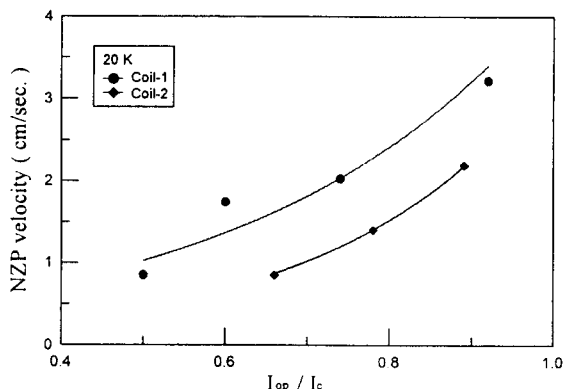


Fig. 9. NZP velocity vs operating current of coil-1 and coil-2 at 20 K

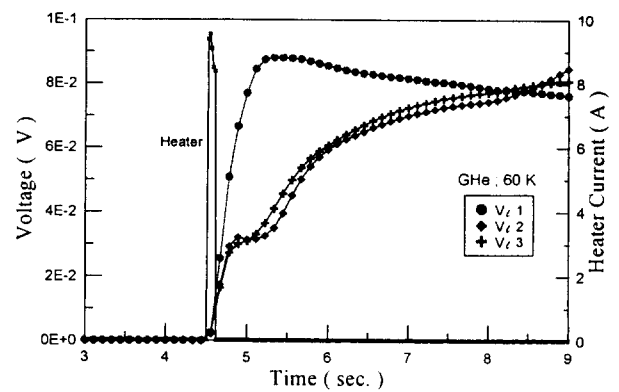


Fig. 10. Voltage trace of coil-2 at 60 K (Operating current is same as  $I_c$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 테이프의 Ag비가 2.05와 3.8인 두 종류의 Bi-2223/Ag 테이프로 코일을 제작하여 여러 가지 온도에서 V-I 특성 및 열적 교란에 의한 상전도 영역전파속도를 측정하였다.

4.2 K에서 코일1과 코일2의 임계전류는 각각 37 A와 64 A였으며, 히터의 가열로 인한 상전도 영역 전파속도는 Ag의 면적이 큰 코일1에서 높게 나타났다. 코일의 동작전류가 낮아 열적 교란이후 발열부의 주열은 대부분 0.2 J 이하로써 퀘치가 더 이상 진행되지 않았다.

코일2를 60 K에서 임계전류의 100 %로 운전하였을 때 히터에 의한 가열과 거의 동시에 코일 전 구간에서 퀘치가 발생하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Y. Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press 1994.
- [2] J. Lue, M. Lubell, D. Aized, J. Campell, R. Schwall, Cryogenics Vol.36, pp.379-389 1996
- [3] H.E. Fischer, S.K. Watson and D.G. Cahill, "Specific heat thermal conductivity and electrical resistivity of high temperature superconductors", Report, Lab. of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, USA, 1989.
- [4] Q.L. Wang, S.S. Oh and K.S. Ryu "Influence of Ag/SC Ratio on the Stability in Ag-sheathed HTSC tape", Proceeding of 15th conference on MT, 1997.
- [5] S.S. Oh, D.W. Ha, K.S. Ryu, H.M. Jang and S.H. Kim "Microstructure and Critical Current Density of Ag Alloy Sheathed Bi2223 Superconducting Tapes" JKPS, Vol.31, No.1, pp.64-67, 1997.
- [6] S.S. Oh, Q.L. Wang, H.S. Ha, H.M. Jang, D.W. Ha and K.S. Ryu, "Quench Characteristics of Bi-2223 coil at Liquid helium Temperature", IEEE trans. on ASC, in press 1999.