

은비가 다른 Bi-2223 고온초전도 팬케이크 코일의 히트펄스에 대한 안정성

Stability Against Heat Pulse for Bi-2223 HTS Pancake Coils with Different Ag/SC Ratio

장현만*, 오상수**, 하홍수**, 하동우**, 류강식**, 김상현***

H.M.Jang*, S.S.Oh**, H.S.Ha**, D.W.Ha**, K.S.Ryu**, S.H.Kim***

Abstract: The normal zone propagation (NZP) velocity and V-I characteristics of two Bi-2223 pancake coils with different Ag/SC ratio were investigated based on the experimental results and numerical analysis. Non-uniformity of I_c and broad resistive transition were observed in two coils. The measured NZP velocity of coil was found to be faster due to increase of Ag/SC ratio, and agree well with calculated data from two dimensional heat balance equation.

Key Words: Bi-2223, Ag/SC ratio, stability, normal-zone-propagation

1. 서 론

20 K 이하, 고자장 하에서 높은 임계전류밀도를 나타내는 Bi계 고온초전도테이프는 고자장 발생용 초전도 마그네트의 삽입코일로 응용할 수 있다[1]. 이러한 고온초전도 코일의 제작을 위해서는 선재 측면에서 임계전류밀도, n 값, 기계적 특성이 더욱 향상되어야 하며 저온초전도체와 물성치가 다른 고온초전도체에 대한 안정성 연구가 선행되어야 한다. 그리고 고온초전도 코일의 소형화를 위해서는 선재의 전체 단면적에 대한 임계전류밀도(J_c)가 높은 선재가 요구되어진다. 이를 위해서는 선재 단면에서 초전도체의 면적을 증가시켜야 하지만, 코일의 운전 중 사고에 대한 보호측면에서는 안정화재의 면적을 증가시켜야 한다. 이와 같은 맥락에서 안정화재와 초전도체의 면적 비(Ag/SC)에 대한 연구는 고온초전도 마그네트 설계에 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

고온초전도체는 저온초전도체에 비해 임계온도가 높고 비열이 크기 때문에 안정성 마진이 크다. 그러나, 상전도 영역 전파(normal zone propagation: NZP) 속도가 느리기 때문에 고온초전도 코일에 국부적인 발열로 인하여 퀘치가 일어날 때 상전도 영역이 빠르게 코일 전체로 분산되지 못하고 발열부분의 집중적인 온도상승을 초래해 코일 전체의 손상이 우려될 수 있다 [2].

그러나 Ag/SC 비를 크게 하면 Ag의면적 증가로 인하여 고온초전도테이프의 평균 열전도율을 높일 수 있고, 주울열의 원인이 되는 저항을 줄일수 있어 최소퀘치에너지(MQE)를 높일 수 있다[3][4].

본 연구에서는 Ag/SC 비가 서로 다른 두 종류의 은시스 Bi-2223 테이프를 이용하여 소형 코일을 제작하고 77 K 이하의 온도에서 코일의 V-I 특성, 히트펄스 이후 두 코일의 온도변화 및 상전도 영역 전파속도 등을 조사하였다.

2. Bi-2223 팬케이크 코일의 제작 및 측정

PIT법으로 Ag/SC의 비가 2.05, 3.8인 두 종류의 19심 은시스 Bi-2223 고온초전도테이프를 제조하였다. 제조된 테이프는 840°C에세 각각 두 번씩 열처리하고, 두께 50 μ m인 kapton 필름으로 테이프의 한쪽 면을 절연하여 내경 40 mm인 알루미늄 보빈에 팬케이크 형태로 감아서 코일을 제작하였다. 알루미늄 보빈의 표면은 Kapton 필름을 감아 초전도테이프와 전기적 절연상태를 만들었으며, 보빈의 상부 및 하부 플랜지와 테이프 사이에는 FRP spacer를 끼워 냉각 채널을 만들었다.

코일의 V-I 특성 및 퀘치특성을 평가하기 위해 권선된 길이방향으로 4개, 반경방향으로 3개의 전압단자와 4개의 Chormal - CuFe 열전대를 사용하였으며, 실험전후의 코일 온도를 측정하기 위해 cernox 온도센서를 사용하였다. 히터는 극저온용 히터 선을 압연해서 면적이 3 mm \times 5 mm가 되게 하여 코일 최내층의 테이프 한쪽 면에 부착하였다. 히터의 저항은 상온에서 1.3 Ω 이었다. 표1에 제조된 테이프와 팬케이크 코일의 사양을 나타내며, 그림 1은 코일 및 센서위치에 대한 개략도를 나타내고 있다. 그림에서 권선 길이방향의 전압단자간 거리는 31.4 mm였으며, 반경방향의 전압단자간 거리는 약 400 mm였다.

제작된 코일은 전류 1 A당 3 Gauss의 중심자장을 발생시키며, 초전도테이프에 가해지는 최대자기자장은 12Gsuss이다

코일의 온도에 대한 V-I 특성 및 히트펄스에 의한 상전도 영역 전파속도를 측정하기 위해 온도 가변 insert dewar를 사용하였으며, 그림 2에 insert dewar의 개략도를 나타내고 있다. Insert dewar는 액체헬륨 용기에 삽입하여 사용한다. 4.2 K 액체 헬륨을 insert dewar의 니들 밸브와 연결되어 있는 LHe 도입부를 통해 내부로 흘러보내어 코일을 냉각한다. 이때 액체는 LHe 도입부를 통과하면서 가스 상태가 되고, 유입되는 헬륨 가스는 열 교환기를 통과하게 된다.

* 학생회원 : 경상대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정

** 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

*** 정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 교수

원고접수 : 1999년 5월 26일

심사완료 : 1999년 8월 26일

표 1. Bi-2223 고온초전도테이프 및 코일의 사양
 Table 1. Specifications of the Bi-2223 HTS tape and coils

Bi-2223/Ag tape	H-coil	L-coil
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 ²) @77 K, 0 T	10,500	8,400

Single pancake coil	
I. D.	40 mm
O. D.	46 mm
Insulator thickness	50 μ m
Number of turns	10
Tape length	1.3 m

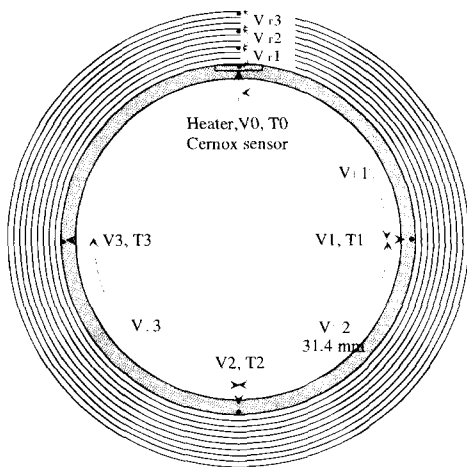


그림 1. 전압단자와 열전대 그리고 히터 등의 위치를 나타내기 위한 코일의 개략도

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

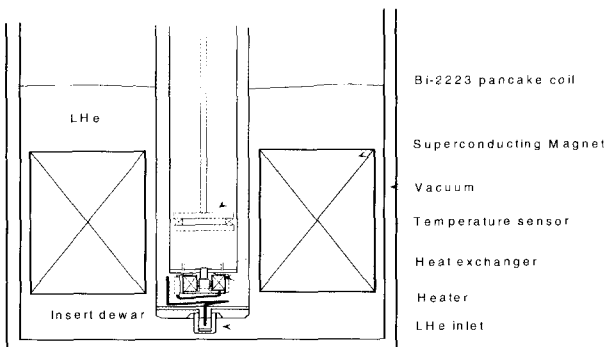


그림 2. 온도가변 insert dewar의 개략도

Fig. 2. Schematic drawing of temperature variable insert dewar

온도조절은 열 교환기에 부착된 온도센서(cernox)와 히터를 이용하였으며, 4.2 K~77 K 까지 여러 온도 조건에서 실험하였다. 측정 시 insert dewar 내부의 온도 편차는 설정온도 ± 0.3 K였다.

3. 실험 결과

제작된 코일의 안정성 실험을 위한 동작전류를 결정하기 위해 4.2K에서 77 K까지 온도를 변화시키면서 코일전체의 임계전류를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 임계전류는 테이프 길이가 1.3 m인 코일 양단에서 기준전계 1 μ V/cm에 해당되는 전압이 발생할 때의 전류 값으로 결정하였다. 20 K에서 H-코일과 L-코일의 임계전류는 각각 27 A와 45 A였는데 77 K 때 임계전류보다 8배 이상 증가하였다. 본 측정 결과에서 얻어진 값을 기준으로 코일의 동작전류를 결정하여 전류를 인가하고 히트펄스를 가한 후 코일의 온도변화와 동작전류에 대한 상전도 영역 전파속도를 측정하고자 하였다.

20 K에서 코일의 V-I 특성과 길이방향에 대한 임계전류의 불균일성을 조사하기 위해 약 40 cm 간격으로 설치된 전압단자(V_{r1}, V_{r2}, V_{r3})를 이용하여 측정된 결과를 그림 4에 나타내고 있다. 그림 4를 보면 고온초전도체의 본질적 특성[5]에 의해 초전도상태에서 상전도 상태로 전이되는 과정에서 전류 증가에 대한 전압 증가가 매우 완만하게 진행되고 있다. 그리고, 길이방향의 부위별 퀀치전압은 40 μ V로서 두 코일 모두 길이방향에서 임계전류가 일정하지 않음을 알 수 있는데, 길이방향에서 임계전류가 불균일한 현상은 고온초전도테이프 제조 시 가공 과정에서 발생된 산화물 임계전류가 불균일하게 분포할 경우 코일의 동작전류를 높일 때 임계전류가 다소 낮은 부분에서 발열이 일어날 수 있다[2].

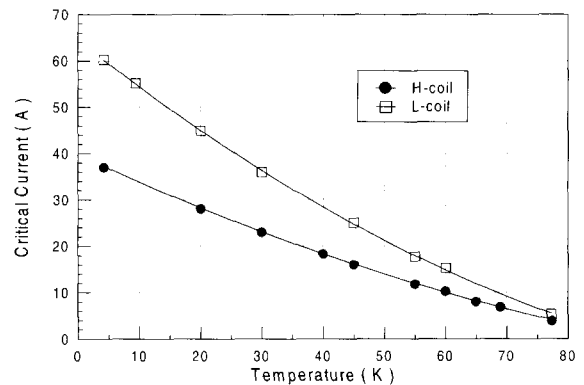


그림 3. 두 코일 임계전류의 온도 의존성
 Fig. 3. Temperature dependance of critical current of two coils

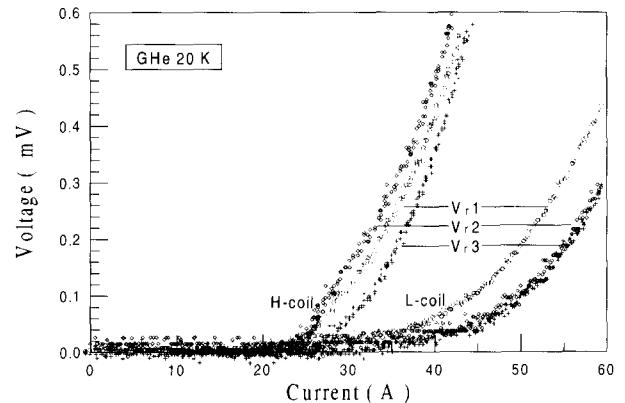


그림 4. 20 K에서 두 코일의 V-I 특성
 Fig. 4. V-I curves of two coils at 20 K

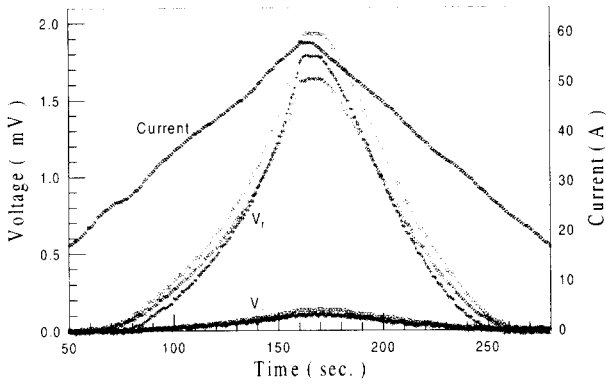


그림 5. 20 K에서 H-coil에 전류를 증가시킬 때와 감소시킬 때 시간에 대한 전압 특성
Fig. 5. Voltage vs time during charge and discharge of H-coil at 20 K

그림 5는 20 K에서 측정된 H-코일의 V-I 특성을 시간에 대해서 나타내고 있다. 전류는 0.35 A/sec. 속도로 58 A까지 증가 시켰으며, 수초간 유지시킨 후 증가시킬 때와 같은 속도로 줄였다. 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 [6] 저항으로 계산하면 약 $10 \mu\Omega/\text{cm}$ 가 된다. 58 A를 1 초 동안 유지할 경우 $33 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 의 주울열이 발생하는데, 주울열로 인한 온도상승이 그다지 크지 않기 때문에 전압은 계속적으로 증가하지 않는 것으로 보인다. 그림에서 반경방향의 부분별 전압 V_r 의 단자간 테이프 길이는 약 400 mm이며, 길이 방향의 부분별 전압 V_l 의 단자간 테이프 길이는 31.4 mm로서 V_r 의 전압이 훨씬 크게 나타난다.

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

그림 6과 그림 7을 보면 히트펄스에 의해서 코일에 열이 가해진 직후 발열지점의 온도는 약 143 K까지 증가했다가 다시 감소하며, V_{r1} 과 V_{l1} 의 전압도 온도 경향과 비슷하게 증가했다가 다시 줄어든다. V_{r2} , V_{r3} , V_{l2} , V_{l3} 은 약간의 시차를 두고 서서히 증가하지만 V_{r1} , V_{l1} 과 마찬가지로 더 이상 증가하지 않고 줄어든다. 그리고 반경방향에 위치한 V_{r3} 의 전압은 V_{l2} , V_{l3} 보다 뒤늦게 나타난다. 반경방향의 전압단자간 직선 거리는 약 1 mm로서 V_{r3} 는 히터에서 2 mm 떨어진 거리에 위치했지만, 반경방향의 테이프사이에는 열전도율이 낮은 kapton 필름으로 절연되어있기 때문에 히트펄스 이후 길이방향보다 열전도율이 낮아서 전압이 늦게 나타난다. 이것으로 상전도 영역 전파속도는 반경방향 보다 길이방향이 빠르다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 6과 마찬가지로 L-코일을 40 A(임계전류의 약 90%)로 동작시킬 때 히터로 테이프에 열을 가하여 반경 방향으로 나타나는 부위별 전압을 나타내고 있다. 히터에는 5 A, 100 ms의 펄스전류를 인가하였으며,

H-코일과 비교 할 때 V_{r1} 과 V_{r2} , V_{r3} 에서 전압이 나타나는 시차가 더 크게 측정되었다. 이것은 테이프 단면에서 열전도율이 높은 Ag의 면적이 H-코일에 비해 작기 때문에 도체의 평균열전도율이 낮아 상전도 영역의 전파속도가 느린 것으로 설명할 수 있다. 그리고 두 코일 모두 동작전류를 낮게 할 경우 전압이 발생하는 시차는 더 크게 나타났다.

그림 6과 그림 8에서 V_{r1} 의 전압 추세를 비교할 경우, 히트펄스 이후 L-코일의 전압증가가 H-코일 보다 훨씬 급격하게 증가하고 있는데, 이것 역시 L-코일의 Ag/SC 비가 낮기 때문에 즉, Ag의 단면적이 작기 때문에 테이프의 저항이 큰 L-코일의 전압이 더 빠르게 상승한다고 할 수 있다.

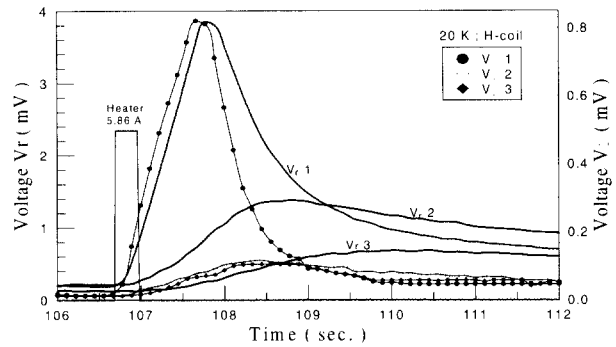


그림 6. 히트펄스 이후 H-코일의 부분별 전압(I_{op} :25 A)
Fig. 6. Section voltage of H-coil after heat pulse (I_{op} :25 A)

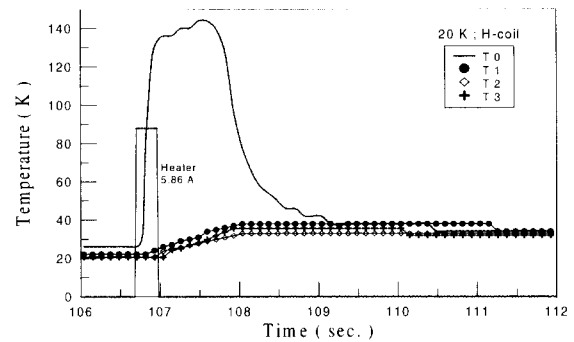


그림 7. 히트펄스 이후 H-코일의 온도 변화(I_{op} :25 A)
Fig. 7. Temperature traces of H-coil after heat pulse (I_{op} :25 A)

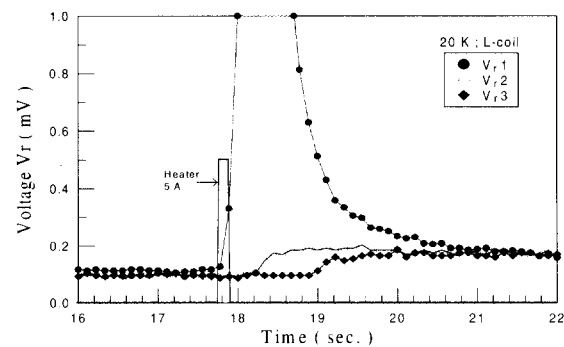


그림 8. 히트펄스 이후 L-코일의 부분별 전압 (I_{op} :40 A)
Fig. 8. Section voltage of L-coil after heat pulse (I_{op} :40 A)

4. 수치해석 및 고찰

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

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

여기서 T는 온도, r, θ 는 각각 반경 및 권선 방향의 좌표이며, k_r , k_θ 는 각 방향의 열전도율을 나타낸다. k_θ 는 안정화재의 열전도율에 의해 결정되며 반경방향의 열전도율 k_r 은 다음과 같다.

$$k_r = \frac{1}{d_{kpt}k_{kpt}^{-1} + d_{tp}k_s^{-1}} \quad (2)$$

여기서 d_{kpt} 와 d_{tp} 는 kapton과 테이프의 두께이며 k_{kpt} 와 k_s 는 kapton과 안정화재의 열전도율을 나타낸다. 그리고 식 (1)에서 γC , Q_d , Q_j 는 각각 코일의 평균 열용량, 교란열, 주울열을 나타내며, Q_d 는 $E_d/V_d t_d$ 로 표현되는데 E_d , V_d , t_d 는 각각 교란에너지, 교란이 가해지는 체적 그리고 교란 지속시간이며, V_d 는 교란에너지가 가해지는 영역을 원통좌표계로 계산하였다. Q_d 는 코일에서 교란이 가해지는 범위를 벗어나거나 교란지속시간 후에 0이 된다. 코일의 평균열용량 γC 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma C = \lambda_{tp} \left(\frac{\gamma C_{SC} + f \cdot \gamma C_{Ag}}{1 + f} \right) + (1 - \lambda_{tp}) \gamma C_{kpt} \quad (3)$$

여기서 λ_{tp} 는 전체 코일 중 초전도테이프가 차지하는 비율이고 f 는 Ag/SC비이며, γC_{SC} , γC_{Ag} , γC_{kpt} 는 각각 초전도체, Ag 그리고 kapton의 열 용량을 나타낸다. 테이프 단면의 온도가 균일하다고 가정 할 때 Q_j 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Q_j = \begin{cases} \rho(T) \frac{A_m}{A} J_a^2 & (T > T_c) \\ \rho(T) \frac{A}{A_m} \left(1 - \frac{J_{SC} A_{SC}}{J_a A}\right) J_a^2 & (T_{sh} < T \leq T_c) \\ 0 & (T \leq T_{sh}) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 A_m , A_{SC} 그리고 A 는 각각 안정화재의 단면적, 초전도체의 단면적, 그리고 테이프 전체의 단면적을 나타내며, J_{SC} 와 J_a 는 초전도체의 전류밀도와 테이프의 평균 전류밀도를 나타낸다. 그리고 T_{sh} 는 $T_c - (T_c - T_{op}) \frac{I_{op}}{I_c}$ 로 결정되며, ρ 는 Ag의 고유 저항을 말한다. 계산에 사용된 각각의 물리량은 문헌[1],[3],[7]에서 인용하였다.

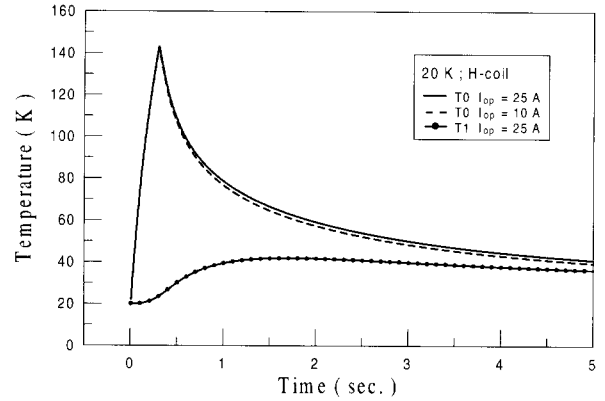


그림 9. 히트펄스 이후 H-coil의 온도 변화
Fig. 9. Temperature traces of H-coil after heat pulse

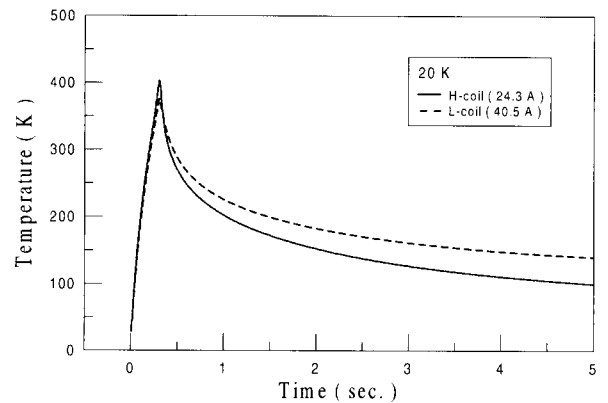


그림 10. 히트펄스 이후 두 코일의 발열 지점 온도
Fig. 10. Hot-spot temperature of two coils after heat pulse

그림 9는 Ag/SC 비가 높은 코일에 히트펄스를 가했을 때, 식 (1)의 2차원적 열 평형 방정식을 사용하여 시간 차분법으로 계산된 코일의 온도를 나타내고 있다. 이때 코일의 최외측면을 초기 동작 온도 (20 K)로 고정조건을 주고 히터를 기준으로 코일 절반을 해석모델로 하여 5 msec.간격으로 계산하였다. 코일의 동작전류를 25 A, 10 A 두 가지로 하였으며 히터에는 10 J의 에너지를 300 msec동안 인가하였다. 동작전류가 25 A일 때의 해석결과는 그림 6과 그림 7의 실험조건과 거의 같은 조건으로 계산한 것으로, 그림 7에서처럼 히트펄스 이후 발열지점의 온도는 약 140 K 까지 상승했다가 5초 후에는 40 K 부근까지 냉각되었다. T1지점의 온도도 그림 7의 경우와 비슷하게 발열지점의 온도 상승이후 다소의 시간간격을 두고 증가한다. 그러나 그림 9에 나타난 발열지점의 온도변화는 실험결과인 그림 7과는 다소의 차이를 나타내는데, 이것은 온도 계측을 목적으로 사용된 열전대가 노이즈에 민감하기 때문에 발생한 오차인 것으로 사료된다. 그림 9에서 발열지점의 온도 변화는 동작전류가 25 A와 10 A일 때 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 동작전류가 10 A일 때 T_{sh} 는 73.5 K이므로 히트펄스가 끝나고 약 1초 후에 T_{sh} 이하로 냉각되어서 발생하는 주울열이 없어지지만, 25 A로 동작시킬 경우의 T_{sh} 는 28 K이기 때문에 그 이상의 온도에

서는 주울열이 발생한다. 그러나 20 ~ 60 K의 온도 범위에서 Ag의 저항이 수십 $\mu\Omega$ 이하로서 25 A로 동작시키더라도 발생하는 주울열 또한 수 mJ 정도로 매우 작아서 10 A일 때와 발열지점 온도 차이도 거의 없다고 볼 수 있다.

그림 10에는 두 가지 팬케이크 코일을 20 K에서 임계전류의 90 % (H-코일:24.3 A, L-코일:40.5 A)로 운전 중에 40 J의 교란에너지를 가했을 때 발열지점의 온도를 수치적으로 해석하여 나타낸 결과이다. 두 가지 코일 모두 히트필스 이후 약 400 K까지 온도가 증가 하지만 다시 냉각되는 경향을 나타내는데, Ag/SC 비가 높은 코일의 온도가 다소 낮게 나타나고 있다. 일반적으로 MQE 이상의 에너지를 가해서 쿼치가 일어날 경우 히트필스에 의한 초기 온도상승 후 다소 냉각되다가 주울열로 인해 다시 온도가 상승하게 된다. 그러나 본 연구에서 계산된 결과를 살펴볼 때 두 코일 모두 히트필스 이후에 온도증가 없이 회복되는 경향을 나타내고 있다.

이것으로써 히트필스로 인한 온도상승과 동작전류로 인해 발생하는 주울열이 코일 전체를 쿼치 시킬 만큼 충분히 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 Ag/SC 비가 큰 H-coil의 냉각효과가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이로써 H-coil의 MQE도 L-coil에 비해 높을 것으로 예측된다.

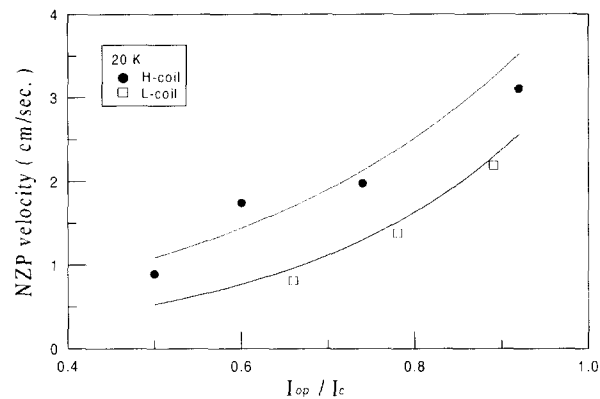


그림 11. 20 K에서 두 코일의 동작전류에 대한 상전도 영역 전파속도

Fig. 11. N/ZP velocity vs operating current of two coils at 20 K

히트필스를 가한 후 측정된 상전도 영역 전파속도와 수치적으로 계산된 결과를 비교하여 그림 11에 나타내고 있다. 상전도 영역 전파속도의 실험치는 전압단자간 거리를 임계전류의 기준이 되는 전압이 생길 때까지의 시간차이로 나누어 구하였으며, 이때 사용한 기준전계는 열기전력 및 외부 요인에 의한 잡음을 고려하여 10 $\mu V/cm$ 로 하였다. 그리고 코일의 2차원적 열 평형방정식 이용해 권선 길이방향의 온도분포를 0.2초마다 계산하여 T_{90} 에 해당되는 온도에 도달했을 때 거리를 시간으로 나누어 계산하였다. 본 실험에서 측정된 결과로는 Ag/SC 비가 3.8인 H-코일의 상전도 영역 전파속도는 임계전류의 90 % 이상으로 운전 시 3 cm/sec. 이상의 전파속도를 나타내었으며, Ag/SC 비가 낮은 L-코일의 상전도 영역 전파속도는 약 2 cm/sec.로 느리게 측정되었다. 측정된 결과는 수치적으로 해석한 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며, S.B. Kim 등[8]의 실험결과와 유사한 경

향을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 테이프의 Ag/SC 비가 2.05와 3.8인 두 종류의 은시스 Bi-2223 테이프로 코일을 제작하여 여러 온도에서 임계전류를 측정하고 20 K에서 V-I 특성 및 히트필스에 의한 상전도 영역 전파속도를 측정하였다.

제작된 고온초전도 코일의 사양으로 2차원적 열 평형방정식을 이용해 히트필스에 의한 발열지점의 온도 변화를 계산하였다. 그 결과 코일에 임계전류의 90 %에 해당되는 전류를 인가하고 40 J의 히트필스를 가하여도 쿼치가 일어나지 않고 회복되는 경향을 나타내었으며, 히트필스 이후 냉각효과를 미루어 Ag/SC 비가 높은 H-코일의 MQE가 L-코일 보다 높을 것으로 예측 할 수 있었다. 두 코일을 임계전류 이하로 동작시키고 히터로 열 적 교란을 가한 후 상전도 영역 전파속도를 측정하여 비교한 결과 Ag/SC 비가 약 2배 높은 H-코일이 L-코일 보다 1.5배정도 빠르게 나타났으며, 이론적으로 계산한 결과와 비교적 잘 일치하였다.

향후 고온초전도 마그네트 제작을 위해서는 본 연구 결과를 토대로 임계전류가 더 높은 코일을 제작하여 쿼치 특성과 안정성에 대해 정량적이며 보다 심도 깊은 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구소 기관고유사업인 "초전도 신가공 및 코일 응용기술 개발"로 수행한 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y.Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press 1994.
- [2] J.W.Luc, M.S.Lubell, D.Aized, J. Campell, R. Schwall, "Quenches in a high-temperature superconducting tape and pancake coil", 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] Y.Mawatari, H.Yamasaki, and S.Kosaka, "Critical Current Densities and Voltage-Current Characteristics in Ag-Sheathed Bi-2223 Tapes", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, pp1305-1308, 1995

- [6] 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
- [7] H.Fujishiro, M.Ikebe, K. Noto, T.Sasaoka and K. Nomura "Thermal and electrical properties of Ag-Au and Ag-Cu alloy tapes for metal stabilizers of oxide superconductors", Cryogenics, Vol.33, No.11, pp.1086-1090 1993.
- [8] S.B.Kim, Y.Ueno, A.Ishiyama, H.Okada, S.Normura and H. Maeda "Experiment and Numerical Analysis of Normal Zone Propagation Properties in Ag Sheathed Bi-2223 Superconducting Tapes", IEEE trans. on Magnetics, vol. 32, No. 4 1996



류강식(柳康植)

1956년 8월 20일 생, 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 전략기술연구단 단장



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일 생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 대판대학 전기공학과 졸업(공학박사), 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장, 현재 경상대 전기공학과 교수 및 공대 학장

저 자 소 개



장현만(張鉉萬)

1971년 5월 21일 생, 1994년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정, 1995년 6월 ~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 위촉연구원



오상수(吳詳秀)

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 일본 경도대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



하홍수(河洪秀)

1969년 5월 21일생, 1995년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대 대학원 금속공학과 박사과정, 1987년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원