

산화물 초전도선재의 상전도전파특성

金 錫範[○] 石山敦士 韓 慶熙*
 早稲田大学 理工学研究科 電気電子情報工学科
 * 明知大学校 工科大学 電気工学科

Normal-zone Propagation Properties in Oxide Superconductors

SeokBeom Kim Atsushi Ishiyama KyungHee Han*
 Dept. Electrical Electronics and Computer Engineering, Waseda University
 *Dept. Electrical Engineering, Myong Ji University

ABSTRACT

This paper describes on concerning electromagnetical and thermal behaviors during normal transition in Bi-2223/Ag superconducting multifilamentary tapes by conduction cooling. Some experiments were carried with operating temperature, 10-40K, and transport current as parameters in zero magnetic field. Sample tapes are transited normally with heater to initiate a quench. The voltage and temperature properties which accord to normal transition are measured by voltage taps and thermocouples attached to sample tapes, we also calculated longitudinal and transverse directions normal-zone propagation velocities from the voltage traces.

1. 서론

1986년에 산화물 초전도체가 발견된 이후, 현재는 임계온도가 100K를 넘는 산화물 초전도체와 이러한 도체를 사용한 코일제작이 가능하게 되었다. 한편, 1963년 W.E.Gifford에 의해 개발된 펄스관냉동기의 냉동능력은 축냉재동의 발달과 함께 급속히 향상되어 왔다. 이러한 배경하에서, 냉동기를 이용한 전도냉각방식의 산화물 초전도 코일은 산업기기용의 대표적인 예이다. 산화물 초전도선재의 상전도 전이시의 동특성은 고운전온도와 선재를 구성하는 재료의 상이에 의해서 금속계 초전도선재와 상당히 다를 것이라고 예상되나[1], 산화물 초전도선재의 상전도 전이시의 동특성에 대해서 실험적으로 검증한 예는 거의 없다.

단심산화물 초전도선재를 대상으로 상전도전이시의 선재의 열적특성과 상전도전파속도에 관하여 실험과 유한요소법에 의한

Table 1 Parameters of sample tape

oxide	(Bi,Pb) ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x
material of matrix	silver
ratio of silver	2.7557
number of filament	55
critical temperature	105K
thickness	0.25[mm]
width	3.50[mm]
cross-sectional area	0.875[mm ²]

수치해석 결과에 대한 연구를 진행하였다[2-4]. 따라서, 본 논문에서는, 현시점에서 선재실용화가 가장 기대되고 있는 Bi계 silver sheath 다심 초전도선재를 시료로, GM냉동기에 의한 전도냉각 운전시의 선재길이방향 및 선간방향의 상전도전파속도 및 상전도전이시의 열적특성을 연구하였다.

2. 실험

실험에 사용한 시료는 Bi계(2223상) silver sheath 다심 테이프 초전도선재로, 시료의 길이는 선재길이방향의 상전도전파특성 측정시에는 50cm, 선간방향 측정시에는 22cm인 시료를 사용하여 측정하였다. 자세한 시료의 재원을 표1에 나타내었다.

실험은 액체헬륨등의 냉매를 사용하지 않고 GM냉동기에 의한 전도냉각에 의해서 시료의 초기온도(10K ~ 40K)를 제어하였다.

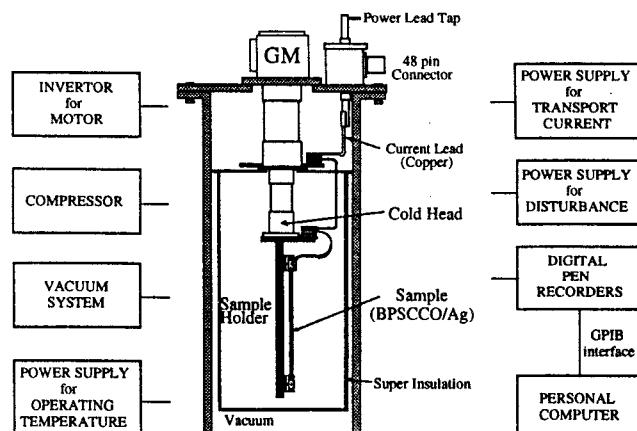


Fig. 1 Schematic view of experimental setup which consist of GM cryocooler, sample tape installed on the sample holder contacted with a cold head and peripheral device fro normal-zone propagation properties measurement

그림 1에 실험장치의 개략을 나타내었다. 시료는 GM냉동기의 2단 스테이지에 접속되어 있는 등으로 구성되어진 휠리 위의 동블리에 열적, 전기적으로 부착되어져 있다.

그림 2에 선재길이방향 상전도전파특성을 측정하기 위한 측정선과 요란(擾亂)용 히터의 배치를 나타내었다. 또한, 선간방향의 전파특성을 측정하기 위한 배치도를 그림 3에 나타내었다. 선간방향의 경우, 초전도코일을 가상한 측정설계이지만 선재길이방향의 전파에 대한 영향을 없애고 선간방향 전파특성만을 측정하기 위하여 4개의 시료를 그림 3과 같이 배치하여 측정하였다. 강제적으로 상전도부를 만들기 위한 요란용 히터는 시료의 중심부분의 한쪽면에 고정시켰다. 이는 초전도코일내에서의 선재의 움직임이나 선재간 마찰등의 외부요란에 해당한다. 히터는 시료가 테이프 형상으로 스트레인지어지를 사용하였다. 또한, 측정값에 히터의 영향을 줄이기 위하여 투입하는 히터열량은 최소편이에너지(NQE)에 상당하는 값을 투입하였다. 실험은 요란용 히터에 의해 시료를 강제적으로 상전도전이 시켜서 상전도부가 전파, 파급해 갈때에 일어지는 각 전압테프간의 발생전압으로부터 상전도전파속도를 평가하고, 상전도전이시의 온도변화는 시료에 부착되어 있는 씨멀커플에 의해서 측정하였다.

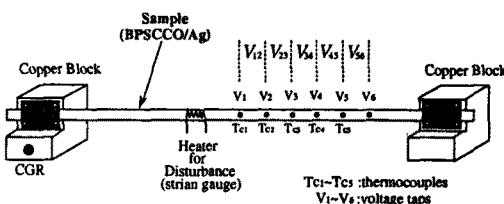


Fig. 2 Schematic view of the BPSCCO/Ag sample tape, sample holder and heater for disturbance used for longitudinal direction normal-zone propagation properties measurement

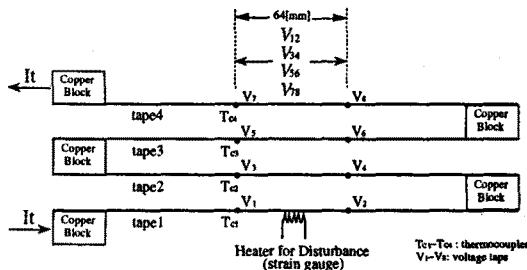


Fig. 3 Schematic view of the sample tapes, sample holders and heater for disturbance used for transverse direction normal-zone propagation properties measurement

3. 실험결과

3.1 선재길이방향의 상전도전파특성

실험결과의 한 예로써 운전온도가 20K, 55A통전시에 일어진 상전도전이시의 텁간 발생전압과 온도변화를 그림 4에 나타내었다. 히터에 의한 열요란이 투입된 후 선재의 온도는 완만하게 상승하고, 이러한 온도상승과 함께 텁간 전압도 완만하게 발생한다. 선재의 온도가 상승함에 따라서 온은 분류전류도 증가해, 즐열도 커져므로 온도상승과 발생전압의 변화도 점차적으로 급격하게 증가한다(그림 중 'current sharing region'). 선재온도가 임계온도인 105K를 넘었을 때 거의 모든 통전전류는 온에 분류해서 발생전압폭선은 변곡점(그림 중 'full normal')을 나타내고, 그 이후에는 온의 전기저항에 따라 거의 직선적으로 증가하게 된다. 각 텁간 발생전압폭선의 변곡점의 온도는 105K

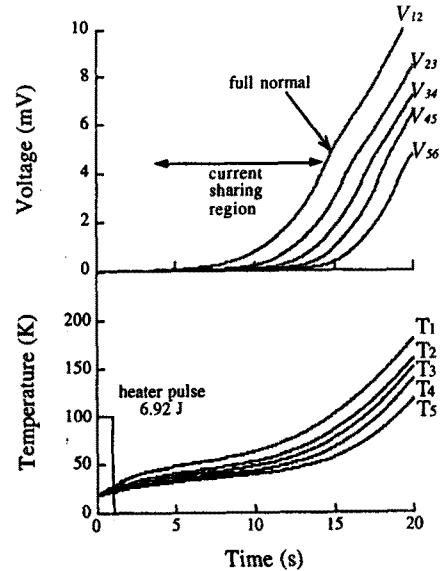


Fig. 4 The voltage and temperature traces with a transport current of 55A at operating temperature of 20K. The voltage traces V₁₂~V₅₆ are the voltage between the voltage taps, and temperature traces T₁~T₅ are the temperatures of tape measured by thermocouples T_{c1}~T_{c5} shown in Fig. 2

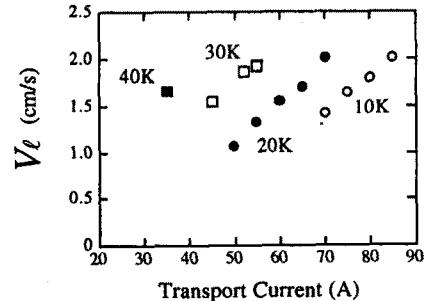


Fig. 5 The longitudinal direction normal-zone propagation velocity, V_t, of the sample tape as function of operating temperature (10K~40K).

와 거의 일치하는 결과를 얻었다. 위와 같은 결과는 작은 전류분류영역을 갖는 금속계 초전도선재의 상전도전이시의 등특성과는 전혀 상이하다[5].

초전도코일의 보호장치 설계에 있어서 중요한 정보로 쓰이는 상전도전파속도를 평가할 경우, 금속계 초전도선재보다 훨씬 큰 전류분류영역을 갖는 산화물 초전도선재의 경우는 계산방법에 따라서 속도의 평가가 달라질 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 씨멀커플에 의해서 측정된 선재온도가 임계온도 105K인 순간의 시작을 사용하여, 각 운전온도와 통전전류에 대한 상전도전파속도를 계산하였다. 그림 5로부터, 같은 크기의 통전전류에 대해서는 운전온도가 높은 경우가 상전도전파속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 이것은 고운전온도가 저운전온도보다 온도미전이 작기 때문이다. 시료의 선재길이방향의 상전도전파속도는 1.0 ~ 2.0cm/s로 이러한 전파속도는 금속계 초전도선재의 전파속도보다 2 ~ 3단위정도 늦고, 이론계산에 의한 예측값[1]과 거의 일치하는 결과를 얻었다.

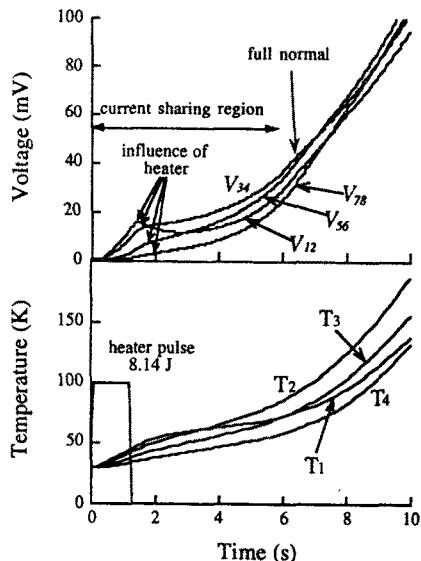


Fig. 6 The voltage and temperature traces with a transport current of 80A at operating temperature of 30K. The voltage traces $V_{12} \sim V_{78}$ are the voltage between the voltage taps, and temperature traces $T_1 \sim T_4$ are the temperatures of tapes measured by thermocouples $T_{c1} \sim T_{c4}$ shown in Fig. 3

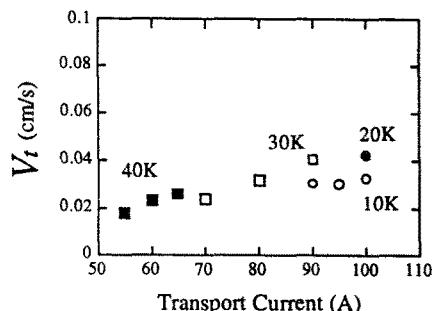


Fig. 7 The transverse direction normal-zone propagation velocity, V_t , of the sample tape as function of operating temperature (10K~40K).

3.2 선간방향의 상전도전파특성

본 실험에서는 실험장치의 공간적제약에 의해 시료의 길이를 충분하게 할 수가 없었다. 따라서, 통전전류에 의한 즐열과 전도냉각에 의한 냉각효과와의 평형관계에 의해, 임계전류이하의 통전전류에서는 편차하지 않았다. 실험은 임계온도이상의 전류를 통전하므로 통전과 동시에 분류전류가 발생, 즐열이 발생한다. 그러나, 발생한 즐열은 냉각효과와의 평형에 의하여 상전도부는 확산하지 않고 온도도 상승하지 않는 평형상태에서 열요란을 투입하여 측정하였다.

상전도전이한 결과의 한 예로 운전온도 30K, 통전전류 80A인 경우의 발생전압과 온도변화를 그림 6에 나타내었다. 전압텝 1,2사이의 발생전압 V_{12} 는 히터에 의한 요란이 가해지는동안은 증가하지만 요란 투입종료와 동시에 일단 저하 하는 경향을 나타내었다. 이는 히터에 의해 선재1 (tape1)에 투입된 열과 즐열에 의해 온도와 전압은 상승하지만, 요란 투입이 종료하면 통전전류에 의한 발열만 날개되므로 온도는 일단 저하 하게된다. 이러한 히터에 의한 열은 그 영향은 작아지나 절하고 있는 선재에 순서적으로 전파해 간다. 상술한것과 같은 히터의 영향은 상전

도전파속도를 관정함에 있어서 바탕직하지 못하다. 그러나 산화물 초전도선재의 경우는 큰 열용량으로 인해 편차시키기 위해 필요한 요란열량이 큰것과 시료선재가 테이프 형상이므로 선간방향으로도 열확산 하기 쉬운 점에 비하여 시료선재의 수가 한정되어 있었기 때문에 상술한 히터의 영향이실험결과에 포함되었다. 발생전압은 선재길이방향의 실험결과와 마찬가지로 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 3에 나타냈듯이, 측정된 온도는 히터에서 멀어진 곳의 온도이므로 선재의 중심부분의 온도는 측정온도보다 약간 높다고 예상된다.

선재길이방향의 상전도전파속도를 계산한 방법과 같은 방법으로 실험결과로부터 선간방향의 상전도전파속도의 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다. 시료선재의 선간방향의 상전도전파속도는 $0.02 \sim 0.06\text{cm/s}$ 로 시료선재에 비하여 선재간 접촉면이 훨씬 적은 금속계 초전도선재보다 1,2단위 높은 결과를 얻었다.

4. 결론

냉동기를 사용한 전도냉각방식운전시의 Bi계 silver sheath 다심 테이프 초전도선재의 상전도전이시의 선재길이방향과 선간방향의 상전도전파속도와 열적특성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 얻어진 결과를 간단하게 정리하면 다음과 같다.

- (1) 산화물 초전도선재의 전류분류영역은 금속계 초전도선재에 비하여 훨씬 크고, 이러한 분류영역에서의 상전도전이시의 온도상승과 전압발생은 대단히 완만한 경향을 나타내었다. 이러한 산화물 초전도선재의 상전도전파속도를 계산할 경우는 평가방법에 의하여 전파속도가 상이해진다.
- (2) 시료의 선재길이방향의 상전도전파속도는 $1.0 \sim 2.0\text{cm/s}$ 로 금속계 초전도선재보다 2,3단위 높고, 선간방향의 전파속도는 $0.02 \sim 0.06\text{cm/s}$ 로 선재길이방향의 전파속도보다는 2단위, 금속계 초전도선재보다는 1,2단위 높아진다.

참고문헌

- 1) Thomas P. Sheahen : "Introduction to High-Temperature Superconductivity", Plenum. Pub. Co. (1994)
- 2) S.B.Kim, A.Ishiyama et al : "Temperature Dependence of Quench Propagation Velocity in a Silver Sheathed Bi-based Superconducting Oxide Tape", Critical State Superconductors, Proc. of 1994 Topical Int. Cryogenics Materials Conference, pp295~298
- 3) 金鶴範, 石山敦士, 岡田秀ひこ, 野村俊自 : "ビスマス系銀シーステップ超電導導体の常電導導播特性", IEE Japan, Vol.116-A, No.2, pp149~156(1996)
- 4) S.b.Kim, A.Ishiyama et al : "Experiment and Numerical Analysis of Normal Zone Propagation Properties in Ag Sheathed Bi-2223 Superconducting Tapes", IEEE Trans. to be published (July, 1996)
- 5) A.Ishiyama and Y.Iwasa : "Quench Propagation Velocities in an epoxy impregnated Nb₃Sn Superconducting Winding Model", IEEE Trans. MAG-24, pp1194 (1988)