

초전도 선재의 잔류저항비 측정을 위한 장치 제작 및 특성 평가

김 상철, 오 상수, 하 동우, 하 흥수, 장 현만, 류 강식, 권 해웅\*  
 한국전기연구원 초전도응용연구사업팀, 부경대학교 재료공학과\*

Measurement Apparatus and Evaluation of the Residual Resistance Ratio ( RRR ) of Superconductors

S. C. Kim, S. S. Oh, D. W. Ha, H. S. Ha, H. M. Jang, K. S. Ryu, H. W. Kwon\*  
 KERI, Applied Supercond. Lab., Pukyong National Univ. Dep. of Materials Science and Eng.\*

**Abstract** - Residual resistance ratio ( RRR ) of Cu/Nb-Ti Superconductor wire was evaluated by fixed point method. Our measured value of RRR showed good consistency with the average value obtained from round robin test conducted by IEC/TC 90. Our test results showed that the coefficient of variation ( COV ) was kept within 2 %

COV ( Coefficient of Variation: 표준편차를 평균으로 나눈 값 ) 를 5 %로 하였다.

2. 본 론

2.1 측정장치 제작

1. 서 론

초전도 선재는 초전도 필라멘트와 높은 열적, 전기적 전도도를 가지는 기지금속 ( 안정화재 ) 으로 구성되는 복합체로서 외부 교란에 의해 상전도 영역이 넓게 발생했을 경우에는 초전도체의 저항이 기지금속보다 매우 커져서 초전도체에 흐르는 전류가 기지금속을 통하여 by-pass 하여 선재를 보호하게 된다. 초전도 선재의 극저온 안정성을 높이기 위해서는 기지 금속인 구리의 면적을 크게 해야하나 선재의 임계 전류를 향상시키기 위해서는 구리의 양을 줄이고 초전도체의 면적을 크게 해야 하고 극저온에서 구리의 비저항을 최소로 해야한다. [1] 초전도체의 극저온 안정성을 평가하는 가장 중요한 인자 중의 하나가 잔류저항비 ( RRR ) 이며 RRR 은 상온에서의 저항 (  $R_1$  ) 을 임계온도 바로 위의 저항 (  $R_2$  ) 으로 나눈 값이다. 높은 RRR 값을 가지는 초전도체나 초전도선재로 만들어진 마그네트는 켈치에 대한 안정성이 크며 켈치가 발생하더라도 빨리 초전도성을 회복할 수 있다. [2]

그림 1은 RRR 측정에 사용된 장치의 개략도를 나타내고 있다. 열전도도가 4.2 K에서 약 100 W / ( m · deg ) 이상인 금속의 고순도 ( 99.99% ) 무산소동 ( OFC Cu ) 봉재를 시편홀더로 사용하였고 그 위에 저온테이프를 접연시켰다. 전류 도입선은 구리선을 사용하였고 신호선은 저항이 큰 인청동으로 만들어진 극저온 신호선을 사용하였다. 신호선이나 전류도입선을 열침입을 막기 위하여 시편홀더 바로 위의 구리 block에 선들을 감았고 시편의 온도를 높이기 위하여 시편홀더에 구멍을 뚫고 망가닌 히터선을 감은 구리 봉재를 넣어 저온에폭시로 고정하였다. 시편의 온도를 정확하게 측정하기 위해 시편홀더의 중앙에 4 - 325 K까지 온도가 보정된 Model CX-1050-SD X08827 Cernox 온도센서를 저온 테이프에 고정하고 DRC-93CA Temperature Controller에 히터선을 연결하여 시편홀더의 온도를 높였다. 그리고 시편홀더를 스티로폼 통에 넣어 단열을 하여 시편의 온도가 급격히 변하는 것을 막았다.

금속계 초전도 재료의 측정방법과 평가를 표준화하기 위해서 IEC/TC90 이 대학교, 국립 연구소, 기업체 연구소등을 중심으로 조직되었는데 본 연구결과도 비교자료로서 사용되었다. IEC/TC90 에서 작성한 임계 온도 바로 위의 전기저항을 측정하는 방법은 히터법, 단열법, 냉동기법 등이 있다. 히터법은 cryostat 안에서 액체 헬륨액면 이상으로 시편을 올린 후에 시편홀더에 부착된 히터로 임계온도나 그 이상의 온도로 시편의 온도를 올리는 것이고, 단열법은 단열재로서 액체 헬륨온도 부근으로 온도를 안정하게 유지한 시편홀더와 cryostat 를 사용하고 히터에 의해 임계온도나 그 이상의 온도로 시편의 온도를 올리는 것이다. 그리고 냉동기법은 전기-기계적인 장치, 냉동기 등에 의해 온도가 안정하게 유지된 시편홀더와 cryostat 를 사용하여 히터나 냉동기를 조절하여 임계온도나 그 이상의 온도로 시편의 온도를 올리는 것이다. 본 실험에서는 히터법을 사용하여 임계온도 바로 위의 전기저항을 측정하였다.

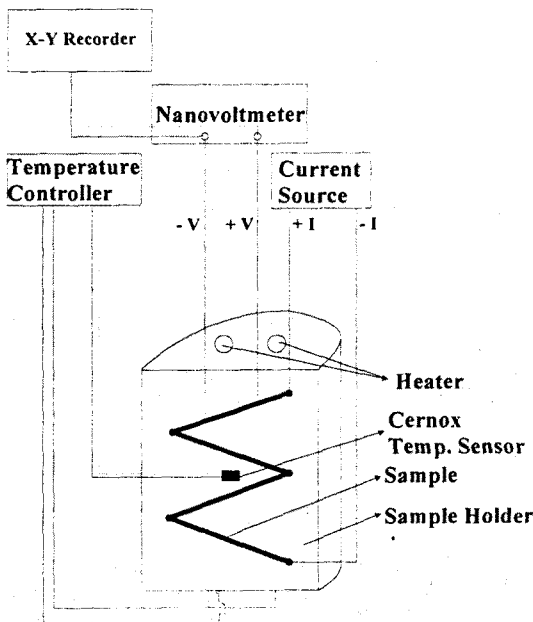


그림 1 RRR 측정장치의 개략도

극저온에서 전기저항을 결정하는 방법은 임계온도 바로 위의 전압이 급격히 증가하는 곳에서 그 온도와 온도는 증가하지만 전압은 일정하게 유지되는 곳에서 그 온도와 온도의 교차점의 전압을 읽는 Curve 법과 일정 온도에서 발생하는 전압을 읽는 Fixed point 법이 있다. 본 실험에서는 Fixed point 법을 사용하여 임계온도 바로 위의 전기저항을 측정하였고 목표로 한 최대

## 2.2 실험 방법

시편홀더의 종류에는 직선형과 곡선형이 있는데 본 실험에서는 직선의 시편을 장착할 수 있는 직선형의 시편홀더를 사용하였다. 시편은 IEC/TC90 에서 비교실험에 사용한 ISTEC 제공의 MRI 선재와 OST (Oxford Superconductor Technology) 사제의 MRI 선재를 입수하여 실험하였고 이미 발표되어 있는 데이터와 실험값을 비교하였다. 표 1은 실험에 사용된 Cu/Nb-Ti 복합 초전도 선재의 제원을 보여주고 있다.

시 편	ISTEC	OST
선재직경(mm $\phi$ )	0.8	1.0
필라멘트직경( $\mu\text{m}$ $\phi$ )	70	~50
필라멘트수	16	24
동비	6.5	6.8-7.2
평균 RRR ( 회사 발표치 )	178.5	102
COV(%) (추정값)	1.89	1.642

표 1. 선재의 제원

사단자법을 사용하여 Nanovoltmeter 로 전압을 측정하고 정확성을 위하여 X-Y Recorder 로 전압을 확인하였다. 시편에 외부 응력을 가하지 않고 시편홀더에 장착하였고 시험시편의 길이는 약 36 mm 이고 두 전압단자간의 거리는 약 20 mm 였다. 실온 ( 0 - 30  $^{\circ}\text{C}$  ) 에서 약 0.4 - 4.8 A /  $\text{mm}^2$  의 전류밀도를 가지는 전류  $I_1$  을 가하여 전압  $V_1$  을 읽었고 식  $R_1 = R_m / ( 1 + 0.00393 \cdot ( T_m - 20 ) )$  을 사용하여 293 K 에서의 저항 (  $R_1$  ) 을 계산하였다. [3] 임계온도 바로 위에서의 전기저항 (  $R_2$  ) 은 시편을 액체 헬륨온도에서 약 5분 이상 냉각시킨 후 헬륨 액면 이상으로 시편을 올리고 0.1 K - 0.6 K / min 의 범위에서 시편의 온도를 올리면서 시편의 온도와 전압을 측정하였다. 시편에 전류의 극성을 바꾸어 전압을 측정하고 식  $R_2 = ( |R_{2+}| + |R_{2-}| ) / 2$  을 사용하여 평균치의  $R_2$  를 계산하였다.  $R_2$  를 정한 온도변화에 따른 RRR 값을 사용하여 구한 ISTEC 선재와 OST 선재의 표준편차를 각각 3.176 과 1.796 이고 COV 는 각각 1.89 와 1.642 이었다.

## 2.3 결과 및 고찰

그림 2는 ISTEC 선재와 OST 선재의 임계온도이상의 극저온 영역에서 온도변화에 따른 발생전압의 변화를 나타내는 그래프이다. 온도가 낮아짐에 따라 발생전압이 점차 직선적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있었다.

그림 3은 온도변화에 따른 RRR 값의 변화를 보여주고 있는데 온도가 감소함에 따라 발생전압이 낮아져서 RRR 값이 비선형적으로 커지고 있는 것을 나타내고 있다. OST 선재는 정확한  $R_1$ 과  $R_2$ 를 측정할 온도가 제원에 명시되어 있지 않아서 회사에서의 발표치와 실험값이 조금 차이가 있는 것으로 사료된다.

그림 4는 IEC/TC90 에서 발표한 ISTEC Cu/Nb-Ti 복합 초전도 선재의 RRR 값을 측정한 round robin test 의 결과이다. 여기서 평균 RRR 값은 178.5 이고 표준 편차는 4.5, COV 는 2.52 % 였고 만일 세 개의 차이가 많이 나는 데이터를 제외하면 평균 RRR 값은 178.2 이고 표준 편차는 3.2, COV 는 1.79 % 였다. 본 실험에서 측정한  $R_1$  값과 그리고  $R_2$  값이 다른 측정결과와 거의 비슷한 값을 보였고 약 12.4 K 에서의  $R_2$  값을 가지고 계산한 RRR 값이 178.6 으로 비교 실험에서의 평균 RRR 값인 178.5

과 거의 일치하였다.

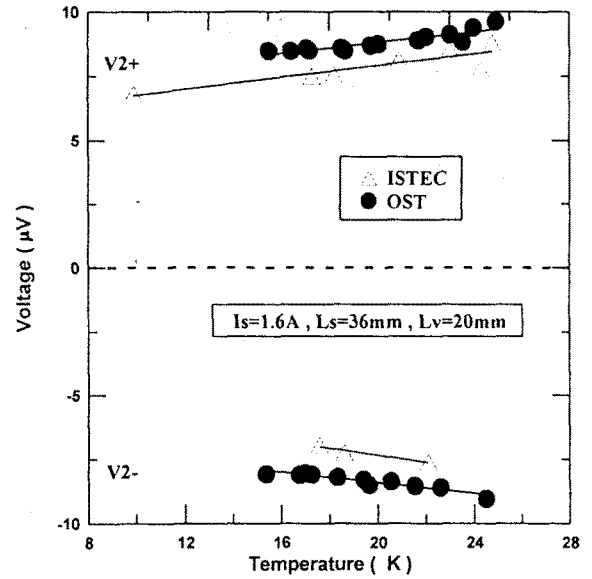


그림 2 온도변화에 따른 발생전압의 변화

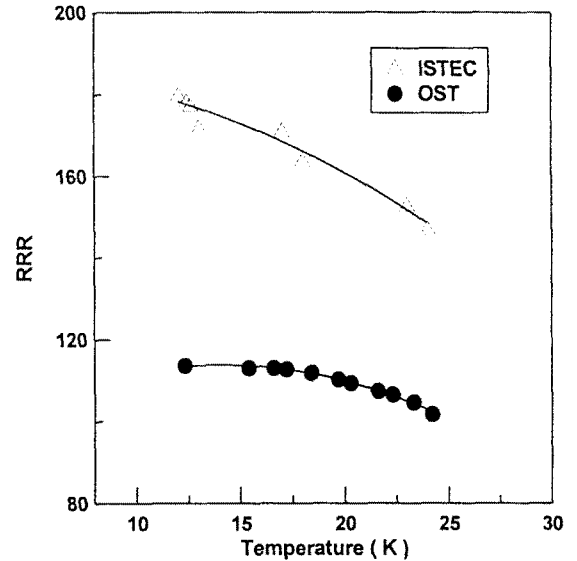


그림 3 온도 변화에 따른 RRR 값의 변화

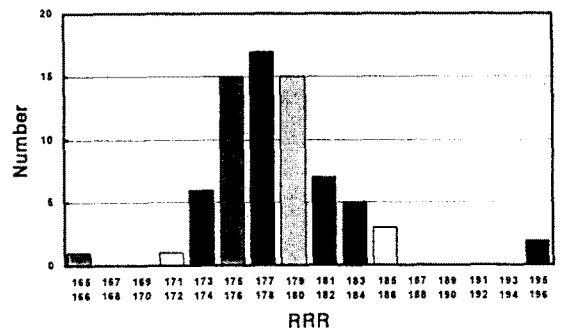


그림 4. ISTEK 선재를 사용한 RRR 비교 실험  
결과의 분포

3. 결 론

Cu/Nb-Ti 초전도선재의 잔류저항비를 측정할 수 있는 장치를 제작하였고 IEC/TC90 의 국제 Round Robin Test 에서 얻어진 평균 RRR 값과 본 실험에서의 RRR 값이 거의 일치하고 COV 도 5 %이내임을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Simon Foner, "Superconductor Materials Science Metallurgy, Fabrication, and Applications", p91-92, 1981
- [2] Satoru Murase et al., "Standardization of the Method for the Determination of the Residual Resistance Ratio (RRR) of Cu/Nb-Ti Composite Superconductors", ICEC16/ICMC Proceedings, p1795-1798, 1996
- [3] Residual Resistance Ratio of Nb-Ti Composite Superconductors-Test Method ( 3rd Working Draft )