

## A Comparative Study for the Microwave Surface Resistances of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Films Measured with a Microstrip Resonator and a Rutile-loaded Cavity Resonator

O. K. Kwon<sup>a</sup>, H. J. Kwon<sup>a</sup>, J. H. Lee<sup>a</sup>, Jung Hur<sup>b</sup>, Sang Young Lee\*<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Physics and Center for Advanced Materials and Devices

<sup>b</sup> Department of Electronic Engineering Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

Received 1 May 2001

### 마이크로스트립 공진기와 Rutile-loaded Cavity 공진기로 측정한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 박막의 마이크로파 표면저항 비교 연구

권오기<sup>a</sup>, 권형준<sup>a</sup>, 이재훈<sup>a</sup>, 허정<sup>b</sup>, 이상영\*<sup>a</sup>

#### Abstract

Temperature dependences of the unloaded  $Q(Q_0)$  and the resonant frequency ( $f_0$ ) of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) microstrip ring resonators and rutile-loaded cylindrical cavity resonators were measured at low temperatures. Dc magnetron-sputtered YBCO films grown on  $\text{CeO}_2$ -buffered r-cut sapphire (CbS) substrates were used for this purpose. The surface resistances ( $R_S$ ) of YBCO films measured by both a microstrip ring resonator and a  $\text{TE}_{018}$  mode rutile-loaded cylindrical cavity resonator are compared with each other. It turned out that the values of  $R_S$  measured by the microstrip resonator technique are comparable to those by the rutile-loaded resonator technique at temperatures lower than  $\sim 50$  K. However, above 50 K, the  $R_S$  measured by the microstrip resonator technique appeared higher according to the temperature. Our results show that the current crowding effects near the edge of a microstrip resonator become more significant at temperatures near the critical temperature.

**Keywords :** Microwave surface resistance, Microstrip resonator, rutile-loaded resonator,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  film.

#### I. 서론

고온초전도체의 마이크로파 소자에의 응용

---

\*Corresponding author Fax : +82 2 2201 2759  
e-mail : sylee@kkucc.konkuk.ac.kr

에는 고온초전도박막이 주로 이용되는데 이러한 고온초전도박막의 응용성은 고온초전도체가 임계온도( $T_c$ ) 이하에서 지니는 매우 낮은 마이크로파 표면저항 값에 주로 기인한다. 고온초전도마이크로파 특성 중 가장 중요한 요소의 하나라 할 수 있는 마이크로파 표면저항은 고온초전도박막으로 제작된 공진기의 unloaded  $Q$  ( $Q_0$ )의 측정을 통하여 정확히 구할 수 있는데, 마이크로스트립 공진기를 이용한 측정 방법 [1], [2]과 평행판 공진기를 이용한 측정방법 [3], 그리고 유전체와 초전도 박막이 결합된 원통형 cavity 공진기를 이용한 측정방법이 널리 알려져 있다 [4]-[6]. 그러나 이러한 측정법으로 구해진 마이크로파 표면저항 간의 크기를 비교한 연구 결과는 아직 보고된 바 없다.

본 논문에서는 dc magnetron sputtering법으로 제작된  $YBa_2Cu_3O_{7.8}$  박막의 마이크로파 표면저항을 마이크로스트립 공진기와 rutile-loaded cavity 공진기를 이용하여 20 K 이상의 온도에서 측정하고 두 측정법으로 구한 마이크로파 표면저항의 크기를 비교한 연구 결과를 기술하였다.

## II. 이론적 배경

마이크로파 공진기의  $Q$ 는

$$Q = 2\pi f_0 \cdot \frac{\text{공진기내의 에너지}}{\text{power손실}} \quad (1)$$

로 표현되는데 [7], 여기서  $f_0$ 는 공진 주파수이다. 실제 측정되는  $Q$ 는 loaded  $Q$  ( $Q_L$ )로서 공진기 고유의 특성이 반영된 unloaded  $Q$  ( $Q_0$ )에 비해 작은 값을 지니는데 이는  $Q_L$ 이 공진기 내의 power 손실 뿐 아니라 공진기에 연결된 회로에 의한 power 손실 까지도 반영하기 때문이다. 따라서 공진기 고유의 특성만이 반영된  $Q_0$ 는 외부로 새어 나가는 전자파에 의한 방사 손실을 무시할 경우

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $Q_c$ ,  $Q_d$ 는 공진기 내의 도체와 유전체에 의한 power 손실들에 의한  $Q$ 를 뜻한다.

### 1. 마이크로스트립 공진기의 경우

그림 1과 같은 마이크로스트립 공진기의  $Q_0$ 는 도체에 의한 감쇄 상수( $\alpha_c$ )와 유전체의 loss tangent를 이용하여 기술하면

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{\lambda_g}{\pi} \cdot (\alpha_c + k \cdot \tan \delta) \quad (3)$$

로 주어진다 [2]. 여기서  $\lambda_g$ 는 유도 파장이다. 윗식을 초전도 마이크로스트립 공진기에서의 초전도 마이크로스트립과 ground plane 각각의 표면 저항  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ 에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{1}{Q_0} = \lambda_g B \frac{[CR_{S2} + (C+D)R_{S1}]}{4\pi^2 Z_0} + \frac{\lambda_g}{\pi} k \tan \delta \quad (4)$$

여기서  $B, C, D$ 는 도체의 geometric factor,  $Z_0$ 는 특성 임피던스이다. 한편 위의 식 (4)에서 구한 초전도박막의  $R_{Si}$ 은 초전도 박막의 두께가 전자파 침투깊이에 비해 비슷하거나 작은 경우에는 이 박막을 통과하는 전자파에 의한 방사 효과가 고려된 유효표면저항이 된다 [3],[8]. 그리고 이 경우 Lee와 Itoh가 제안한 phenomenological loss equivalence method (PEM)를 이용하여 초전도박막의 고유표면저항을 구할 수 있다 [8]. PEM에서 초전도 마이크로스트립 박막의 두께( $t$ )와 선평( $w$ )은 유효 두께( $t_{eff}$ )와 유효 선평( $w_{eff}$ )으로 대체되고 박막의 유효 두께는  $t_{eff} = A \cdot G$ 로 표현된다. 또한 마이크로스트립의 단면적  $A = w \cdot t$ 로서 ground plane의 두께가 무한하다고 하면 기하학적 요소인  $G$ 는

$$G = \frac{2}{\mu_0} \cdot \left( \frac{dL}{dh} - \frac{dL}{dw} - \frac{dL}{dt} \right) = \frac{1}{\pi h} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \times \left[ 1 + \frac{h}{w'} + \frac{h}{\pi \cdot w'} \cdot \ln \left( \frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2(t+h)}{t+2h} \right] \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 측정 온도가  $T_C$  보다 매우 작은 영역에서의 유효 표면저항 ( $R_s^{eff}$ )과 고유 표면저항( $R_s$ )과의 관계식,

$$R_s^{eff} = R_s \cdot \coth\left(\frac{t_{eff}}{\lambda}\right) \quad (6)$$

을 이용하여 박막의 두께가 작을 경우 고온 초전도 박막의 유효 표면 저항으로부터 고유 표면 저항값을 계산 할 수 있다 [2]. 식 (6)에서  $\lambda$  는 주어진 온도에서의 전자파 침투깊이이다.

## 2. Rutile-loaded 공진기의 경우

그림 2와 같이 유전체 (여기서는 rutile임)가 삽입된 원통형 cavity 공진기에서 공진기의 위, 아래면으로 사용된 초전도 박막의 표면 저항  $R_{s1}$ 은 식 (2)로부터

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{R_{s1}}{\Gamma_1} + \frac{R_{s2}}{\Gamma_2} + k \cdot \tan \delta \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ 는 각각 위, 아래면에 설치된 초전도 박막의 표면 저항과 cavity 옆면 (여기서는 무산소동임)의 표면 저항이고  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ 는 초전도 박막 및 도체와 관련된 geometric factor이며,  $k$ 는 유전체의 filling factor이다.

## III. 실험 과정

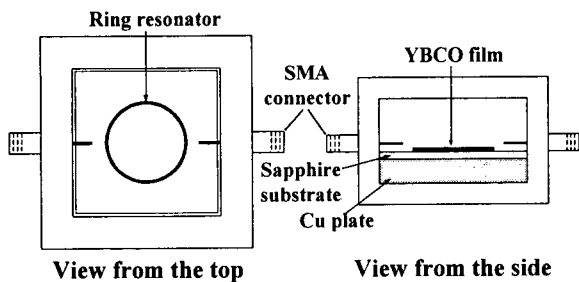


Fig. 1. A top view and a cross-sectional view of a microstrip ring resonator located inside a test fixture.

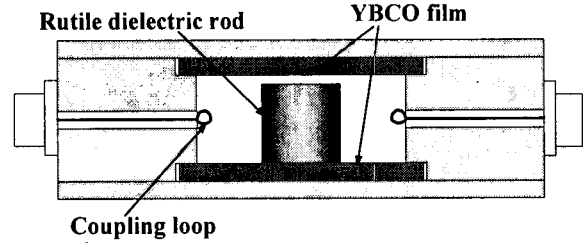


Fig. 2. A cross-sectional view of a rutile-loaded cavity resonator with YBCO endplates. For  $TE_{018}$  mode excitations, loop couplings are used.

그림 1은 초전도 마이크로스트립 링 공진기의 개략도이다. 이에 사용된 test-fixture는 알루미늄 재질로 제작되었으며 10 mm×10 mm 크기의 sample을 측정할 수 있게 되어있다. Ground plane으로는 무산소동을 사용하였으며 마이크로스트립 ring은  $CeO_2$ -buffered r-cut sapphire 기판 위에 성장된 YBCO 박막으로 만들었다. 초전도 마이크로스트립 ring의 크기는 평균 반지름이 1.745 mm, 선폭이 0.09 mm 이고 사용된 YBCO 박막의 두께는 3000 Å 이다. 고온 초전도 박막은 dc magnetron 스퍼터링법으로  $CeO_2$ -buffered 사파이어 기판 위에 성장시킨 것인데 성장된 YBCO 박막은 c축으로 잘 성장되었음을 X선 회절결과에서 확인하였다. 완충층으로 사용된  $CeO_2$ 의 두께는 400 Å 정도이다. 한편 유전체인 rutile이 삽입된 원통형 cavity 공진기는 그림 2에서와 같이 rutile rod와 초전도 박막을 접합한

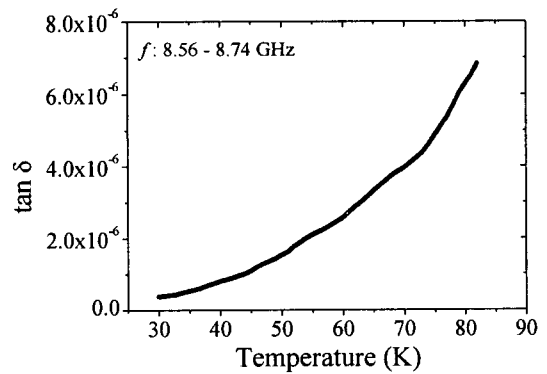


Fig. 3. Temperature dependence of the loss tangent of the rutile rod used for this experiment.

hybrid 공진기의 형태를 보이고 있다. Cavity의 재질은 저온에서 열 전도도가 높은 무산소동 (OFHC)을 사용하였고 이때에 사용된 cavity의 높이와 지름은 각각 2.74 mm, 9 mm이고 rutile rod의 높이와 지름은 각각 2.73 mm, 3.88 mm 이다. 여기서 cavity의 위, 아래면에 놓인 초전도 박막은 모두 마이크로스트립 ring 공진기에서 쓰인 동일한 YBCO 박막이다. 본 실험에서는 TE<sub>018</sub> 모드 Q를 측정하였는데 공진기와의 coupling은 삽입 손실이 20 dB 이상의 weak coupling되도록 하였다. 참고로 유전체로 사용된 rutile의 loss tangent (tanδ) [9]는 그림 3에 보여진 것 처럼 매우 작은 값을 가지는데, 30 K, 60 K, 77 K 에서의 크기는 각각  $3.75 \times 10^{-7}$ ,  $2.57 \times 10^{-6}$ ,  $5.35 \times 10^{-6}$ 이다. 본 연구에서 사용된 rutile loss tangent에 관한 측정과정은 별도로 발표될 예정이다.

IV. 실험결과 및 논의

그림 4는 마이크로스트립 링 공진기와 cavity 공진기의 공진주파수에 대한 온도의존성을 서로 비교 한 것이다. 이 그림에서 ring 공진기의 경우 온도 상승 시 초전도박막의 전자침투깊이가 커지게 되면서 박막의 인덕턴스값이 증가하여 공진 주파수가 작아지는 모습을 보이고 cavity 공진기의 경우 온도 상승 시 초전도 박막에 의한 인덕턴스 변화보다는 rutile

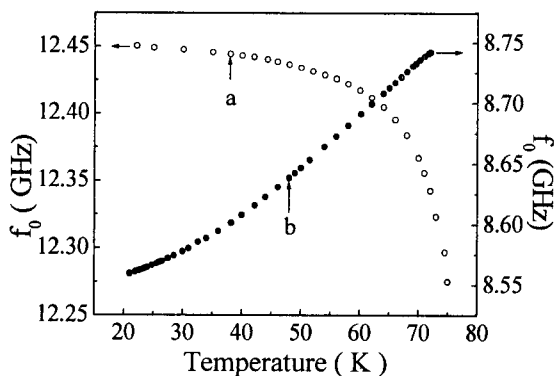


Fig. 4. Temperature dependence of the resonant frequency of the microstrip ring resonator (a) and the TE<sub>018</sub> mode resonator .

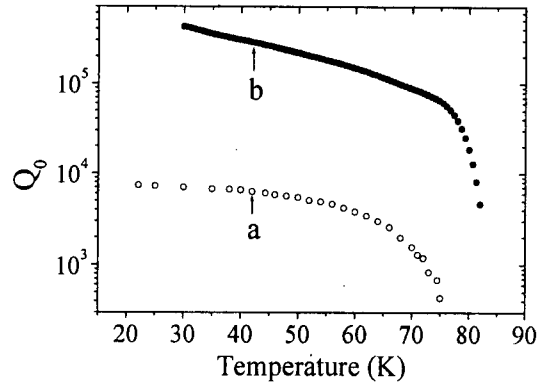


Fig. 5. Temperature dependence of (a) the microstrip ring resonator Q and (b) TE<sub>018</sub> mode resonator Q.

유전체의 유전율의 감소에 의한 영향이 커서 공진 주파수가 커지게 됨을 알 수 있다. 그림 5는 Q<sub>0</sub>의 온도 의존성을 비교한 것으로 온도가 35 K 일 때 Q<sub>0</sub>는 초전도 마이크로스트립 링 공진기의 경우 7000 정도이고 rutile이 삽입된 원통형 cavity 공진기는 400000 정도로 매우 큰 값을 지닌다.

원통형 cavity 공진기를 이용한 표면저항 측정 시 식 (7)에서의 geometric factor인  $\Gamma_1, \Gamma_2$ 는 각각 109 Ω, 26024 Ω, 유전체의 filling factor인 k는 0.9977가 사용되었는데, 이 방법으로 측정된 35 K와 공진주파수 8.59 GHz에서의 표면 저항은

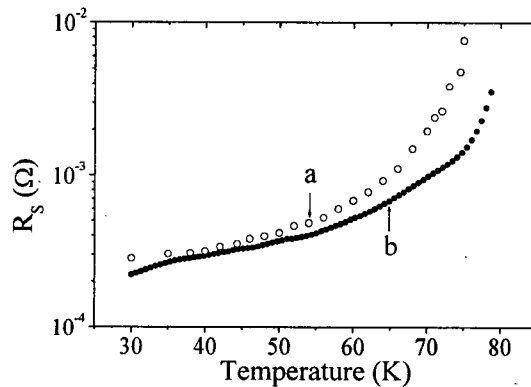


Fig. 6. The  $R_s$  vs T data for the  $R_s$  measured by (a) a microstrip resonator method and (b) a rutile-loaded resonator method. The  $R_s$  represent the values at 10 GHz calculated under the assumption of  $R_s \propto f^2$ .

0.267 mΩ이다. 한편 마이크로스트립 공진기법을 이용하여 YBCO 박막의 표면 저항을 식 (4) - (6)으로 부터 구할 수 있는데, 이 방법으로 구한 12.45 GHz, 35 K에서의 표면 저항은 0.468 mΩ이다. 그림 6은 서로 다른 공진기의  $Q_0$ 로부터 계산된 초전도 박막의 표면 저항 비교 결과로서 제시된 결과는 각 공진기의 공진주파수에서의 표면저항 값이 10 GHz에서의 값으로 환산된 것이다. 참고로 이 과정에서  $R_s \propto f^2$ 의 관계식이 사용되었다 [10]. 이 그림에서 온도가 30 K, 60 K, 75 K에서 마이크로스트립 ring 공진기로 측정된 YBCO 박막의 표면저항은 각각 0.282 mΩ, 0.683 mΩ, 7.62 mΩ 이고 rutile-loaded 공진기로 측정된 같은 YBCO 박막의 표면저항은 0.221 mΩ, 0.52 mΩ, 1.46 mΩ 이다.

본 실험 결과는 마이크로스트립 ring 공진기로 측정된 YBCO 박막의 표면저항이 50 K 이하의 온도에서는 rutile-loaded cavity 공진기로 측정된 표면저항과 거의 같은 값을 지니는데 비해 50 K 이상의 온도에서는 온도의 증가에 따라 마이크로스트립 공진기로 측정된 결과가 rutile-loaded 공진기로 측정된 결과에 비해 점점 크게 나타남을 보여준다. 이것은 마이크로스트립 구조의 경우 나타나는 microstrip edge에서의 current crowding 효과가 [1],[11] 온도의 증가에 따른 초전도박막의 초전도성 약화 시 크게 나타나게 됨, 즉 초전도성이 약화된 박막에서 current crowding에 의해 edge 부근부터 초전도성이 깨지게 되기 때문으로 설명할 수 있을 것이다. 본 결과는 마이크로스트립 측정법으로 초전도박막의 고유표면저항을 측정할 경우 임계 온도 부근에서는 이러한 current crowding 효과가 보다 잘 고려되어야 정확한 결과를 얻을 수 있게 됨을 말해준다.

요약하면, YBCO 박막으로 제작된 초전도 마이크로스트립 ring 공진기와 YBCO 박막이 위, 아래면에 설치된 TE<sub>018</sub> mode rutile-loaded cavity 공진기의 공진 주파수와  $Q$ 로부터 YBCO 박막의 표면저항을 구한 후 그 측정결과를 비교하였다. 두 가지 공진기에 같은 YBCO 박막을 이용하여 실험한 결과, 마이크로스트립 공진기로 측정된 YBCO 박막의 표면저항이 50 K 이하의

온도에서는 rutile-loaded cavity 공진기로 측정된 표면저항과 거의 같은 값을 지니고 50 K 이상의 온도에서는 온도의 증가에 따라 마이크로스트립 공진기로 측정된 결과가 rutile-loaded 공진기로 측정된 결과에 비해 점점 커지는 것으로 나타났다. 이러한 측정결과의 차이는 마이크로스트립 구조의 경우 나타나는 microstrip edge에서의 current crowding 효과가 온도의 증가에 따라 점점 커지게 되어 edge 부근부터 초전도성이 깨지게 되기 때문으로 설명된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 (96-0102-08-01-3) 지원과 과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

- [1] D. E. Oates et al., "Stipline resonator measurements of  $Z_s$  versus  $H_{rf}$  in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> thin films", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 39, 1522-1529 (1991).
- [2] Sang Young Lee et al., "Microwave properties of high-T<sub>c</sub> YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> resonators with different surface morphologies and finite thicknesses", Physica C, 273, 83-90 (1996).
- [3] N. Klein et al., "The effective microwave surface impedance of high -T<sub>c</sub> thin films", J. Appl. Phys., 67, 6940-6945 (1990).
- [4] J. Krupka et al., "Surface resistance measurements of HTS films by means of sapphire dielectric resonators", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 3, 3043-3048 (1993).
- [5] Sang Young Lee et al., "Use of a dielectric-loaded cylindrical cavity in measurements of the microwave surface resistances of high-T<sub>c</sub> superconducting thin films", IEEE Trans. on Applied superconductivity, 7, 2013-2017 (1997)
- [6] J. Mazierska, "Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high-T<sub>c</sub> superconducting film for microwave applications", J. Supercond., 10, 73-84 (1997).
- [7] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed., Addison-Wesley (1998).
- [8] H.-Y. Lee and T. Itoh, "Phenomenological Loss Equivalence Method for Planar Quasi-TEM Transmission Lines with a Thin Normal Conductor or Superconductor", IEEE IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 7, 1904-1909 (1989).

- [9] N. Klein et al, "Dielectric properties of rutile and its use in high temperature superconducting resonators", J. Appl. Phys. 78(11), 6683-6686 (1995).
- [10] M. J. Lancaster, *Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors*, 1st ed., Cambridge (1997).
- [11] S. M. El-Ghazaly, R. B. Hammond, and T. Itoh, "Analysis of superconducting microwave structures: application to microstrip lines", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 40, 499-508 (1992).