

# A Comparative Study on the Effective Surface Resistance of High- $T_C$ Superconductor Films as Measured by Using the S-parameter Circle-fit and the Lorentzian-fit Methods

Min Jeong Kim, Ho Sang Jung, J. H. Lee and Sang Young Lee\*  
 Department of Physics and Center for Emerging Wireless Transmission Technology,  
 Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

## S-parameter Circle-fit과 Lorentzian-fit 방법으로 측정된 고온초전도체 박막의 유효표면저항 비교

김민정, 정호상, 이재훈, 이상영\*

### Abstract

Measurements of surface resistance ( $R_s$ ) of high temperature superconductor (HTS) films with accuracy are essential for microwave applications of HTS materials. In using the dielectric resonator method, uncertainties in the unloaded quality factor of the resonator cause significant errors in the measured  $R_s$  of HTS films. We compare the  $R_s$  values of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  films calculated from the  $Q_0$  as determined from the Lorentzian fit with that from the  $Q_0$  as determined from the S-parameter circle-fit at temperatures between 15 K and 77 K. The two sets of values appeared to differ by 5%, 7%, 6%, and 11% at temperatures of 15, 60, 70, and 77 K, respectively, from each other, implying that careful error analysis needs to be performed in obtaining the  $R_s$  of HTS films by using the Lorentzian-fit method, with the ones determined from the S-parameter circle-fit used as the reference.

*Keywords* : Surface resistance, Lorentzian fit, S-parameter circle-fit, Dielectric resonator method,  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  film.

### I. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후 최근에 이르기까지 정보통신의 발달과 맞물려 초전도체의 통신소자로서의 응용성에 대한 많은 연구가 활발히

진행되고 있는데, 이는 초전도체가 일반 도체에 비해 매우 작은 마이크로파 표면저항( $R_s$ )을 지니기 때문이다 [1]. 고온초전도 고주파 소자가 상용화 단계에 들어섰음을 고려할 때 소자 제작에 사용되는 고온초전도체 박막에 대한 특성평가 기술의 확립은 매우 중요한데, 최근 국제 측정 표준으로 공표된 바 있는 유전체 공진기(dielectric resonator) 방법은 비파괴적이면서

\*Corresponding author. Fax : +82 2 3436 5361

e-mail : sylee@konkuk.ac.kr

Konkuk University

높은 측정 감도를 가지는 것으로 알려져 있다 [1 - 3].

유전체 공진기법에서 고온초전도박막의 표면 저항은 공진기의 unloaded quality factor ( $Q_0$ )에 의해 결정되는데, 최근 우리는 S-parameter circle-fit 방법을 이용할 경우 공진기의 loaded  $Q$  ( $Q_L$ )과 결합계수를 S-parameter에 대한 복소수 평면에서의 circle-fit을 통해 구하고 이러한 값들을 이용하여 공진기의  $Q_0$ 를 비교적 정확하게 구할 수 있음을 보고한 바 있다[4]. 참고로 실제 측정 시 신호전송선의 길이나 crosstalk 등의 요인이 복소좌표계 상의  $Q$  circle의 위치에 영향을 미친다 [5].

본 논문에는  $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ (YBCO) 고온초전도체 박막의 표면저항 측정을 위해 사용되는 유전체 공진기의 Q-factor 측정법에 따른 표면저항 측정 결과의 의존성을 기술하였는데, Q-factor를 Lorentzian-fit 방법으로 측정한 경우 구한 표면저항 결과를 S-parameter circle-fit 방법으로 구한 경우 계산된 표면저항 결과와 비교하였다.

## II. 초전도박막의 표면저항 계산에 대한 이론적 배경

공진기가 완전히 차폐되어 전자기파의 방사(radiation)에 의한 신호 손실이 없을 경우 공진기의  $Q_0$ 와  $Q_L$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ex}} \quad (1)$$

여기서  $Q_{ex}$ 는 공진기 내에 저장된 전자기장 에너지가 외부 회로로 새어 나감으로 인한 것인데, 이 결합 세기는 결합 계수(coupling coefficient)  $\beta$ 로 표기되며 two-port 공진기에서  $Q_0$ 는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Q_0 = Q_L(1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (2)$$

식 (2)에서  $\beta_1, \beta_2$ 는 각각 입, 출력단에서의 결합계수이다. 한편 Lorentzian fit, 즉 주파수에 따른 공진기의  $S_{21}$ 의 변화로부터 구한  $Q_L$ 과 공진기의 삽입손실(insertion loss,  $IL$ )을 이용하여  $Q_0$ 를 구할 경우  $Q_0 = Q_L/(1-10^{-IL(\text{dB})/20})$ 의 식이 이용된다. 여기서  $IL(\text{dB}) = -20 \log_{10} |S_{21}|$  이다. 한편 S-parameter circle-fit 방법을 이용할 경우  $S_{21}$ 과  $S_{11}$ , 그리고  $S_{22}$ 의 변화로부터 fitting을 통해  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 를 구할 수 있는데, 자세한 내용은 참고문헌 [5]에 기술된 바와 같다. 여기서  $S_{ij}$ 는 S-matrix의 성분으로서  $S_{ij} = V_i^-/V_j^+$  (단  $k \neq j$ 일 경우  $V_k^+ = 0$  이어야 함)에 의해 결정된다 ( $V_i^-$ 는  $i$ -port에서 반사되는 신호의 전위이고  $V_j^+$ 는  $j$ -port로 들어가는 신호의 전위인데, “1”은 입력 port를 의미하고 “2”는 출력 port를 의미한다.). 한편 전체 공진기 방법에 의한 초전도체 박막의 표면저항 측정 시 초전도체의 표면저항은 공진기의  $Q_0$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q_0} &= \frac{R_{s1}P_t}{\omega_0 W} + \frac{R_{s2}P_b}{\omega_0 W} + \frac{R_{s3}P_s}{\omega_0 W} + k \tan \delta \\ &= \frac{R_{s1}}{\Gamma_1} + \frac{R_{s2}}{\Gamma_2} + \frac{R_{s3}}{\Gamma_3} + k \tan \delta \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\omega_0$ 는 공진주파수에 대응하는 각주파수(angular frequency)이며,  $W$ 는 공진기 안에 저장된 전자기장 에너지이고,  $R_{s1}, R_{s2}, R_{s3}$ 는 각각 공진기의 윗면과 아랫면에 있는 YBCO 박막과 옆면의 무산소동이 지닌 표면저항을,  $P_t, P_b, P_s$ 는 각각 이들 도체 면에서의 power 손실을 뜻한다. 또한  $k$ 는 유전체 내부에 저장된 전자기장 에너지와 공진기 전체에 저장된 에너지의 비로서 filling factor라 하며  $\tan \delta$ 는 유전체 rod의 loss tangent이다. 또한 식 (3)에서 filling factor  $k$ 와 geometrical factor라 불리는  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 는 유전체 rod를 포함하는 공진기 내부의 전자기장 분포로부터 계산을 통해 구해진다. 따라서 공진기의 윗면과 아랫면에 동일한 특성의 초전도체 박막이 사용된 경우, 옆면 도체인 무산소동의 표면저항  $R_{s3}$ 와 유전체의  $\tan \delta$ 를 별도

의 측정을 통해 알고 있게 되면 공진기의  $Q_0$ 로부터 초전도체 박막의 표면저항  $R_{S1}(= R_{S2})$ 를 구할 수 있다 [6].

### III. 실험과정

실험에는 YBCO 초전도체가 설치된 사파이어 공진기가 사용되었다. 그림 1은 표면저항 측정에 이용된 사파이어 공진기의 개략도로서, 사파이어 봉(rod)은 원통형 공동(cavity)의 중앙에 놓이고 특성이 동일한 2 개의 YBCO 박막은 공진기의 윗면과 아랫면으로 사용된다. 실험에 사용된 YBCO 박막은  $LaAlO_3$  기판 위에 dc magnetron sputtering 방법으로 증착된 것으로 두께는 약 400 nm 정도이다. 원통형 공동은 열전달이 우수한 무산소동(oxygen-free high-conductivity copper)로 제작되었는데, 원통형 공동 내에 있는 사파이어 봉의 높이와 지름은 각각 5 mm 이고, 원통형 공동의 지름과 높이는 각각 15 mm와 5.1 mm이다. 공진기의 마이크로파 특성 측정 시 HP network analyzer(HP 8510C)가 사용되었다.

신호의 입출력은 동축선을 통해 이루어지는데, TE 모드의 여기(excitation)을 위해 동축선의 끝은 원형 loop 형태로 되어 있다.

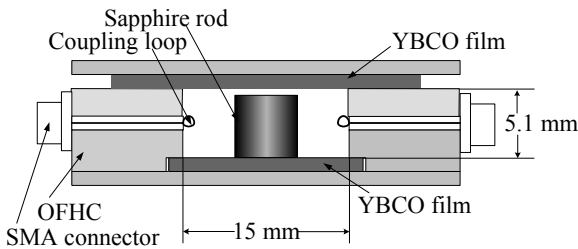


Fig. 1. Cross-sectional view of a sapphire resonator with YBCO endplates

공진기의  $Q_0$  측정은 그림 (1)에서 유전체와 윗면 박막 사이에 gap이 있는 경우(G)와 없는 경우(NG), coupling이 강한 경우(S), 약한 경우(W)를 조합한 네 가지의 상황 하에서 측정한 공진기의 S-parameters에 대한 circle-fit 방법(C)

과 Lorentzian fit(L) 방법으로 행해졌는데, 그림 2는 사용된 공진기의 공진주파수에 대한 온도 의존성 측정결과이다.

### IV. 실험 결과

#### 1. 결합계수 및 측정법에 따른 $Q_0$ 비교

그림 3은 공진기와 공진기의 입출력단에 서로 다른 크기의 coupling 크기(여기서는 weak

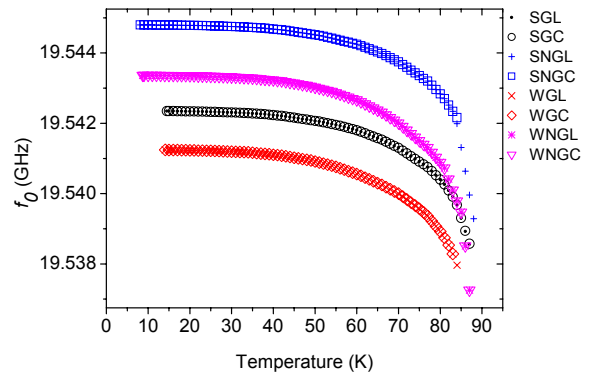


Fig. 2. Temperature dependence of the resonant frequency measured by using various methods. Here ‘xyL’ denotes the results from the Lorentzian fit with ‘xyC’ denoting the ones from the S-parameter circle fit.

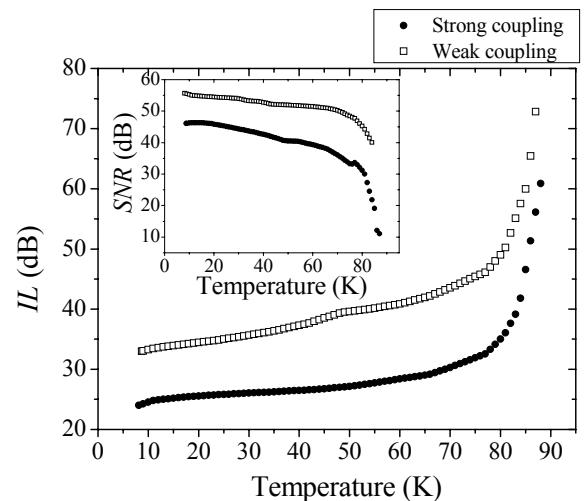


Fig. 3. Temperature dependence of the insertion loss. Inset: Temperature dependence of the signal-to-noise ratio (SNR).

coupling과 strong coupling)가 사용된 경우 측정된 삽입손실의 온도 의존성과 신호대잡음비 (SNR : Signal to Noise Ratio)의 온도의존성을 보여주는 그래프이고, 그림 4는 앞의 그림 3에서 나타난 삽입손실(IL(dB))을 이용하여  $Q_0 = Q_L / (1 - 10^{-IL(dB)/20})$ 로부터  $Q_0$ 를 구하는 방법인 transmission mode method에 의한 결과와  $Q_0 = Q_L / (1 + \beta_1 + \beta_2)$ 의 식으로부터  $Q_0$ 를 구하는 방법인 circle-fit의 방법에 의한 결과를 비교한 그래프이다 (참고로 transmission mode method를 이용할 경우 Lorentzian fit으로부터 공진기의  $Q_L$ 을 구하게 됨). Transmission mode 방법으로  $Q_0$ 를 구할 경우에는 coupling의 정도에 따라서 삽입손실을 보정해주어야 하는데[7] 삽입손실이 20 dB 정도인 경우 삽입손실의 보정을 -10 dB 정도 해주어야 한다.

표 1은 다양한 방법으로 15, 60, 70, 77 K에서 측정된 공진기의  $Q_0$ 를 비교한 것인데, Lorentzian fit으로 구한  $Q_0$ (여기서는  $Q_0(L)$ 로 표기함)는 동일 조건에서 circle-fit 방법으로 구한  $Q_0$ (여기서는  $Q_0(C)$ 로 표기함)와 2 % 이내의 차이를 보이는 것으로 관측되었다. 표 1의 결과는 그림 5에  $Q_0$ 의 온도의존성 그래프로 나타난 바와 같다. 표 1에서 한 가지 주목할 것은 결합 계수가 작은 경우와 큰 경우 측정된  $Q_0$ 의 값 들

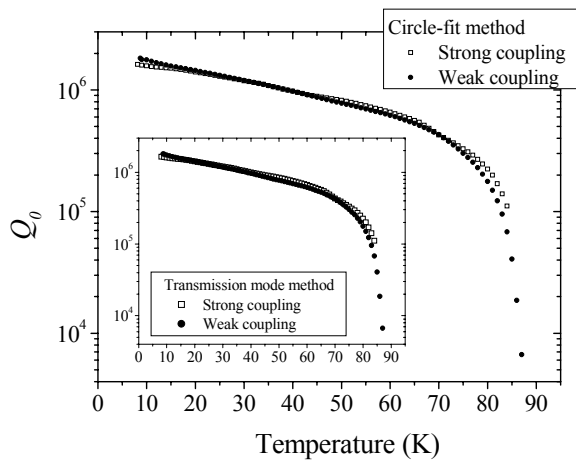


Fig. 4. Temperature dependences of the  $Q_0$  of the resonator with different coupling strengths as obtained from the circle-fit method and the transmission mode method (inset).

Table 1. Temperature dependence of  $Q_0$  ( $\times 10^6$ ) measured by using various methods. Here 'xyL' denotes the results from the Lorentzian fit with 'xyC' denoting the ones from the S-parameter circle fit.

온도 (K)	WN GC	WN GL	WGC	WGL	SN GC	SN GL	SGC	SGL
15	1.57	1.55	1.59	1.57	1.51	1.52	1.52	1.55
60	0.62	0.62	0.62	0.62	0.66	0.67	0.63	0.64
70	0.43	0.43	0.45	0.45	0.43	0.41	0.44	0.43
77	0.26	0.26	0.26	0.29	0.29	0.30	0.26	0.26

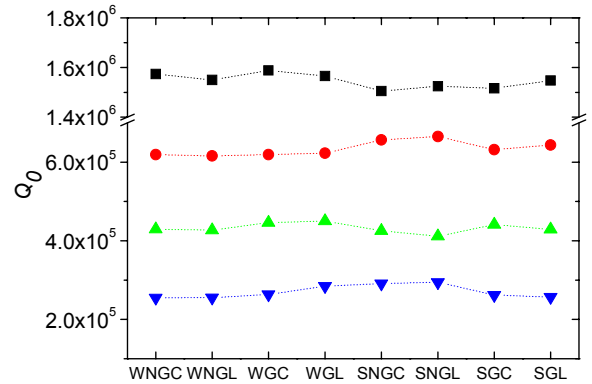


Fig. 5.  $Q_0$  values at 15 K (square), 60 K (circle), 70 K (triangle), and 77 K (inverse triangle) as measured by using various methods.

간에 상당한 차이가 있다는 것인데, 결합 계수의 차이로 인한  $Q_0(L)$ 의 차이는 60 K에서 8%이며  $Q_0(C)$ 의 경우 60 K에서 6% 인데 이는 Lorentzian-fit으로 측정된 결과와 circle-fit 방법으로 측정된 결과 간에 뚜렷한 차이가 없지만 결합 계수의 차이가 측정된  $Q_0$ 에 큰 차이를 줄 수 있음을 보여준다. 그림 5는 10, 60, 70, 77 K에서 다양한 경우에 관측된 coupling이 다른 경우 circle fit 방법과 transmission mode 방법을 이용하여 구한  $Q_0$ 의 온도 의존성을 나타내는데, 각각의 온도에서의 상대 표준편차는 각각 4.9 %, 3.4 %, 0.4 % 그리고 7%로 70 K에서는 삽입손실과  $Q_0$ 를 구하는 방법에 상관없이 동일한 값을 지니는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 보다 정확한  $Q_0$ 를 구하기 위해서 coupling이 약해서 삽입손실이 너무 커서도 안

되며 (신호 대 잡음비가 작아짐), coupling이 강해서 삽입손실이 너무 작아서도 안되며, 적합한 측정 coupling은 삽입손실을 약 30 dB 정도로 하는 것임을 알 수 있다.

## 2. Circle-fit과 Lorentzian fit의 방법으로 측정된 $R_s^{\text{eff}}$ 비교

그림 6은 다양한 경우에 circle-fit과 Lorentzian-fit 방법에 의해 19.6 GHz 및 15, 60, 70, 77 K에서 측정된  $R_s^{\text{eff}}$ 를 비교한 결과로  $R_s^{\text{eff}}$ 의 구체적 수치는 표 2에 기술되어 있다. Circle-fit 방법과 Lorentzian-fit 방법으로 측정된  $R_s^{\text{eff}}$ 의 평균값은 각각의 경우에 대해 15 K에서 0.223 m $\Omega$ , 60 K에서 0.69 m $\Omega$ , 70 K에서 1.06 m $\Omega$ , 77 K에서 1.79 m $\Omega$  정도이다. 그림 7에 나타나 있듯이 15, 60, 70, 77 K에서  $R_s^{\text{eff}}$ 는 각각 이 평균값에 대해서

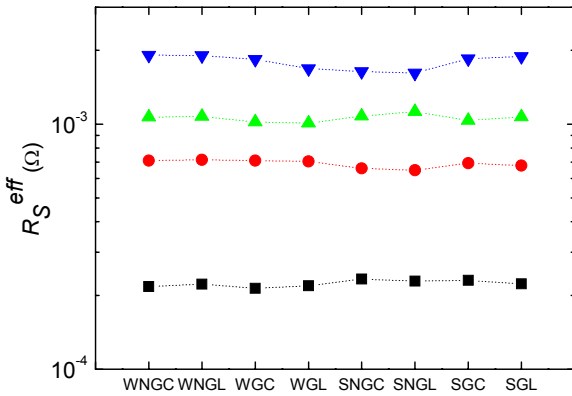


Fig. 6. The  $R_s^{\text{eff}}$  of YBCO films at 15 K (square), 60 K (circle), 70 K (triangle), and 77 K (inverse triangle) as measured by using various method

Table 2. The  $R_s^{\text{eff}}$  of YBCO films at 15 K (square), 60 K (circle), 70 K (triangle), and 77 K (inverse triangle) as measured by using various method (unit: m $\Omega$ )

온도 (K)	WNGC	WNGL	WGC	WGL	SNGC	SNGL	SGC	SGL
15	0.217	0.223	0.214	0.219	0.233	0.228	0.230	0.223
60	0.710	0.715	0.711	0.705	0.660	0.649	0.693	0.677
70	1.068	1.075	1.020	1.009	1.080	1.124	1.035	1.070
77	1.911	1.904	1.840	1.685	1.641	1.619	1.850	1.892

5%, 7%, 6%, 11% 이내의 분포를 보이는 것으로 관측되었다.

## IV. 요약

YBCO 박막의  $R_s$ 가 사용된 공진기의  $Q_0$ 를 구하는 방법에 따라 어떻게 변하는지 살펴보았다.

공진기의  $Q_0$ 는 측정주파수 19.6 GHz에서 S-parameter circle-fit 또는 Lorentzian fit을 통하여 결정하였는데,  $Q_0$ 의 측정법에 따라 YBCO 박막의  $R_s$ 가 15, 60, 70, 및 77 K에서 각각 5%, 7%, 6%, 및 11% 정도 다른 값을 지님을 확인하였다. S-parameter circle-fit 방법의 경우 공진기와 공진기의 입, 출력단의 coupling 세기가 일치하지 않더라도 각각의 coupling 세기를 측정하여 공진기의  $Q_0$ 를 정확하게 측정할 수 있는 반면 Lorentzian fit의 사용 시 입, 출력단의 coupling 세기의 불일치가 공진기의  $Q_0$ 에 측정 오차를 주게 됨을 고려하면, Lorentzian fit을 이용한 HTS 박막의  $R_s$  측정 시 측정된  $R_s$ 의 오차가 S-parameter circle-fit 방법으로 측정된  $R_s$ 와의 비교를 통하여 결정되어야 함을 보여준다.

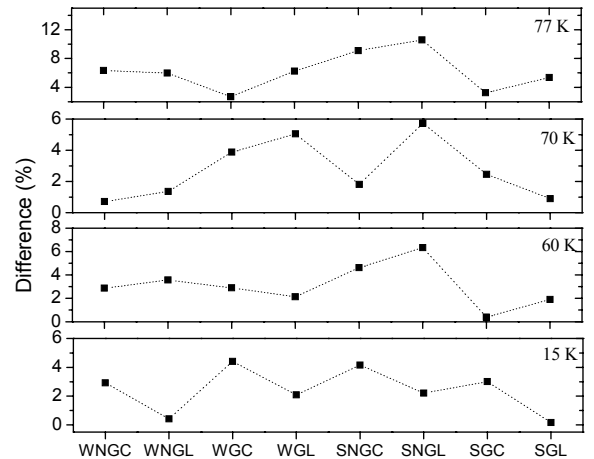


Fig. 7. The difference between the  $R_s^{\text{eff}}$  of YBCO films as measured under various conditions and the corresponding average of the  $R_s^{\text{eff}}$  values as measured by using the circle-fit method and the Lorentzian-fit method at 15 K, 60 K, 70 K, and 77 K.

## 감사의 글

본 연구는 과학재단의 연구과제 (2008-01911)를 통한 연구비 지원을 통해 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] Z.-Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, W. L. Holstein, D. W. Face, and D. J. Kountz, "High TC superconductor-sapphire microwave resonator with extremely high Q-values up to 90 K", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 40, 2424-2431 (1992).
- [2] J. Krupka, M. Klinger, M. Kuhn, A. Baranyak, M. Stiller, J. Hinken, and J. Modelski, "Surface resistance measurements of HTS films by means of sapphire dielectric resonators", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3, 3043-3048 (1993).
- [3] S. Y. Lee and B. Oh, "Recent Progress in Microwave HTS Technologies in Korea and Japan", *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, 16, 823-831 (2003).
- [4] 김민정, 이재훈, 박은규, 양우일, 정호상, 최윤옥, 이상영, "Comparative study for the unloaded quality factors of high-TC superconductor-dielectric resonators measured by using s-parameter circle-fit method and Lorentzian-fit method", *Progress in Superconductivity*, 8, 143-151 (2007).
- [5] Kenneth Leong, Janina Mazierska, "Precise Measurements of the Q Factor of Dielectric Resonators in the Transmission Mode-Accounting for Noise, Crosstalk, Delay of Uncalibrated Lines, Coupling Loss, and Coupling Reactance", *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 50, 2115-2127 (2002).
- [6] J. H. Lee, W. I. Yang, M. J. Kim, J. C. Booth, K. Leong, S. Schima, D., Rudman, S. Y. Lee, "Accurate measurements of the intrinsic surface impedance of thin  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  Films using a modified two-tone resonator method", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15, 3700-3705 (2005).
- [7] J. H. Lee, J. Lim, Junghun Lee and Sang Young Lee, "An Automated Measurements System for the Microwave Surface Resistance of Large High- $T_c$  Superconductor Films", *Singapore Journal of Physics*, 18, 117-123 (2002).