

Non-invasive Measurements of the Thickness of YBCO Thin Films by Using Microwave Resonators: Roles of the Uncertainty in the Calibration Film Thickness

Myung Su Kim, Ho Sang Jung, Woo Il Yang, and Sang Young Lee*

*Department of Physics and Center for Wireless Transmission Technology,
Konkuk University, Seoul 143-701*

(Received 13 August 2012; revised 21 August 2012; accepted 22 August 2012)

마이크로파 공진기를 이용한 YBCO 박막 두께의 비파괴적 측정: 캘리브레이션 박막 두께의 불확도의 역할

김명수, 정호상, 양우일, 이상영*

Abstract

Microwave metrology for the thickness of metallic or superconductive films provides a new way to measure the film thickness in a non-invasive way by using microwave resonators, with the measurement accuracy affected by standard uncertainties in the resonator quality factor, temperature-dependent resonant frequency and the dimensions of the resonators. Here we study effects of the standard uncertainty in the thickness, t_{cal} , of a calibration $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) film on the measured thicknesses, t_{RF} , by using a ~ 40 GHz microwave resonator. For the study, we used five YBCO films having the thicknesses of 70 - 360 nm, for which relative standard uncertainties in t_{RF} due to that in t_{cal} are obtained. The standard uncertainty in t_{cal} was determined with the surface roughness of the film taken into account. It appeared that relative standard uncertainty in t_{cal} significantly affects the t_{RF} values, with the values of 1% (5%) in the former resulting in those of 1-2% (5-9%) for the latter at 10 K. Our results show that, for realizing relative standard uncertainties less than 5% in t_{RF} for all the YBCO films, the surface roughness of the calibration films should be small enough to realize a relative standard uncertainty of less than 2.7% in t_{cal} .

Keywords : Film thickness, uncertainty, microwave, dielectric resonator, surface resistance

I. Introduction

도체 또는 초전도체를 이용한 전자소자의 제작 시 도체 박막이나 초전도체 박막이 이용되

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

는데 이러한 박막들의 특성을 결정하는 주요 요인들의 하나로 박막의 두께를 들 수 있다 [1, 2]. 예를 들어서 이러한 박막들로 제작된 마이크로파 소자에서 관측되는 마이크로파 신호의 에너지 손실은 이들 박막이 지닌 유효 마이크로파 표면저항(R_{Sc})에 비례하게 되는데, 동일한 성분의 도체 또는 초전도체 박막이 지니는 R_{Sc} 는 도체 박막의 두께가 skin depth (δ_s)의 3 배보다 작거나 초전도체 박막의 두께가 전자파 침투깊이(λ)의 3 배보다 작을 경우 동일한 고유표면저항(R_s)을 지니고 있을 경우에도 두께의 감소에 따라 R_{Sc} 는 커지게 된다 [3]. 이는 박막의 표면으로 입사된 후 박막 내부로 침투된 전자기파가 박막과 기판의 경계에서 반사된 후 다시 박막 표면으로 진행하여 입사되는 전자기파와 간섭을 일으키게 되기 때문인데, 유한한 두께의 박막에서 관측되는 R_{Sc} 와 R_s 의 관계는 고온 초전도체의 전자쌍이 지니는 대칭성 연구와 [4] 10 GHz 및 액체 질소 온도에서의 구리의 1/50 이하의 값을 지니는 고온초전도체 박막의 마이크로파 소자로의 응용성 연구에 효과적으로 활용된 바 있다 [5-7].

이러한 도체 및 초전도체 박막의 두께를 측정하는 방법으로는 여러 방법이 알려져 있는데, 그 중 SEM이나 TEM과 같은 전자현미경을 사용하는 방법이나 stylus profilometer(여기서는 'α-step'으로 표기함) 방법은 직접 박막의 두께를 측정할 수 있는 방법임에도 불구하고 측정을 위한 식각 과정에서 시편의 상태가 훼손된다는 단점이 있다. 한편 박막의 두께는 X선 분광학이나 [8] 광음향학적인 방법 [9] 또는 sheet resistivity 측정법 등의 비파괴적 방법을 이용해서 측정할 수 있는데, 이러한 비파괴적 측정법들은 반도체 산업 분야에서 도체 박막의 두께를 측정하는데 널리 사용된 바 있으나 이 방법들이 초전도체 박막의 두께 측정에 사용된 사례는 거의 보고된 바 없다.

최근 Lee 등은 마이크로파 측정법으로 초전도체 박막의 두께를 측정한 연구 결과를 보고한 바 있다 [10-12]. 그들은 두께가 70 - 360 nm 인 YBCO 박막의 두께를 8.5 GHz와 15.2 GHz에서 루타일 공진기를 이용하여 측정한 결과와 [10, 11] 40 GHz에서 사파이어 공진기를 이용하여 측정한 결과가 보고한 바 있다 [12]. 그들은

초전도체 박막의 R_{Sc} 가 R_s 와 박막 두께의 함수로 주어짐을 이용하여 초전도체 박막의 두께를 마이크로파 유전체 공진기를 이용하여 비파괴적으로 측정하였는데, 사파이어 공진기를 이용하여 초전도체 박막의 R_{Sc} 와 유전체의 loss tangent ($\tan \delta$), 그리고 초전도체 박막의 λ 까지 측정할 수 있게 될 경우 α-step을 이용하여 측정한 결과와 마이크로파를 이용하여 측정한 결과가 ~3% 이내에서 잘 일치함을 보고한 바 있다 [12]. 그렇지만 calibration용 초전도체 박막의 표면 거칠기(surface roughness)로 인한 박막 두께의 표준 불확도 (향후 '불확도'로 표현함)가 마이크로파로 측정된 초전도체 박막의 두께의 불확도에 어떠한 영향을 미치게 되는지에 대해서는 아직 보고된 바 없다.

본 논문에서 ~ 40 GHz의 마이크로파로 측정된 두께(t_{RF})의 불확도(u_{RF})에 calibration용으로 사용된 초전도체 박막의 두께(t_{cal})의 불확도(u_{cal})가 미치는 영향을 살펴 보았다. 앞서 ~ 40 GHz에서 측정되어 보고된 연구 결과를 토대로 하여, R_s 의 calibration을 위하여 측정된 초전도체 박막의 u_{cal} 변화가 u_{RF} 에 주는 영향을 기술하고 일정 값 이내의 u_{RF} 를 구현하기 위한 u_{cal} 의 조건에 대해 논의하였다.

II. Theoretical Background

유전체 공진기법에서 공진기의 unloaded Q (Q_U)와 공진주파수(f_0)는 공진기를 구성하는 초전도체 박막의 표면저항(R_s) 및 표면리액턴스(X_s), 그리고 유전체의 $\tan \delta$ 간의 관계는 다음과 같이 표현된다 [13].

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{R_{Se,T}(SC)}{G_T} + \frac{R_{Se,B}(SC)}{G_B} + \frac{R_s(OFHC)}{G_{SW}} + k \tan \delta, \quad (1)$$

식 (1)에서 Q_U 는 공진기의 여러 공진 모드들 중의 우리가 선택한 공진 모드에 대한 unloaded quality factor이고, $R_{Se,T}(SC)$ 와 $R_{Se,B}(SC)$ 는 각각 이 공진모드의 주파수에서 측정된 윗

면 초전도체 박막과 아랫면 초전도체 박막의 유효표면저항, R_S (OFHC)는 구리의 고유표면저항(R_{Se}), $\tan \delta$ 는 유전체의 loss tangent를 의미하며 G_T, G_B, G_{SW} 는 각각 공진기의 윗면과 아랫면, 그리고 옆면에 대응하는 geometrical factor, k 는 유전체에서의 filling factor를 의미한다. 참고로 식 (1)과 (2)의 Q_U 와 f_0 로부터 구해지는 초전도체 박막의 R_{Se} 와 X_{Se} 는 초전도체 박막의 두께(t)가 λ 보다 훨씬 크지 않을 경우 초전도체 박막의 고유 R_S 및 고유 X_S 보다 큰 값을 갖게 되며 t 가 충분히 커서 $t > 3 \lambda$ 의 조건이 만족될 경우 $R_{Se} \approx R_S$ 이다. R_{Se} 에 대한 정확한 표현은 $Z_{Se} = R_{Se} + iX_{Se} = G_h \times Z_S$ 에서 구해지는데, Z_{Se} 와 $Z_S (= R_S + iX_S)$ 는 각각 초전도체 박막의 유효표면임피던스와 고유표면임피던스를 의미하고, R_S 와 X_S 는 각각 고유표면저항과 고유표면리액턴스를 뜻하며 G_h 는 복소수 값을 지니는 correction factor이다. 따라서 R_{Se} 는 G_h, R_S 및 X_S 를 이용하여 다음과 같이 표현된다 [3].

$$R_{Se} = [\text{Re}(G_h)R_S - \text{Im}(G_h)X_S]. \quad (2)$$

식 (2)에서 $\text{Re}(G_h)$ 와 $\text{Im}(G_h)$ 는 각각 G_h 의 실수부와 허수부를 뜻하고, R_S 와 X_S 는 각각 박막의 두께와 상관없이 초전도체 박막의 고유 특성을 나타내는 고유표면저항과 고유표면리액턴스를 의미하는데 이들 물리량은 초전도체의 복소전도도인 $\sigma (= \sigma_1 - i\sigma_2)$ 와 다음의 관계를 지닌다 [3].

$$R_S = \text{Re} \left\{ \left(\frac{i\omega\mu_0}{\sigma} \right)^{1/2} \right\} \quad (3a)$$

$$X_S = \text{Im} \left\{ \left(\frac{i\omega\mu_0}{\sigma} \right)^{1/2} \right\} \quad (3b)$$

식 (3a) 및 (3b)에서 ω 는 각주파수를 의미하고 μ_0 는 진공의 투자율이다. 한편 G_h 는 박막의 두께인 t 의 함수로서 다음과 같이 표현된다 [2].

$$G_h = \left(\frac{\beta_h - \gamma_z \coth(\gamma_z t)}{\beta_h \coth(\gamma_z t) - \gamma_z} \right) \quad (4)$$

식 (3)에서 γ_z 는 초전도체 박막 내에서 전파되는 전자파의 전파상수로서 $\gamma_z = (i\omega\mu_0\sigma)^{1/2}$ 이고, β_h 는 초전도체 박막 성장 시 사용된 기판 내에서의 전파상수와 박막의 두께에 의해 결정되는 상수이다 [2].

초전도체 박막의 고유 특성을 나타내는 복소전도도, 즉 σ_1 과 σ_2 는 이 초전도체 박막이 사용된 마이크로파 공진기의 Q_U 와 공진 각주파수 (ω)의 변화로부터 구해질 수 있는데 [2, 3], 식 (2) - (4)를 통해 초전도체 박막의 σ_1 과 σ_2 가 고유의 값들을 지님에도 불구하고 R_{Se} 는 박막 두께인 t 의 함수가 됨을 알 수 있다. 이는 역으로 σ_1 과 σ_2 가 알려진 초전도체 박막의 R_{Se} 를 측정할 경우 이 박막의 두께가 구해질 수 있음을 의미한다.

마이크로파 공진기를 이용한 박막 두께의 측정 시 관측되는 박막 두께의 불확도는 박막의 R_{Se} 가 지니는 불확도 ($u_{R_{Se}}$)에 기인하는데, $u_{R_{Se}}$ 에 대한 표현은 다음과 같음이 알려져 있다 [12, 14].

$$u_{R_{Se,T}} = \left\{ \left(\frac{1}{Q_U} \right)^2 \cdot \left(R_{Se,T} + \frac{G_E R_S (OFHC)}{G_{SW}} + G_E \cdot k \tan \delta \right)^2 u_{Q_U}^2 + \left(\frac{R_{Se,T}}{G_E} \right)^2 u_{G_E}^2 + (G_E \cdot \tan \delta)^2 \cdot u_k^2 + \left(\frac{G_E}{G_{SW}} \right)^2 \cdot u_{R_S (OFHC)}^2 + \left(\frac{G_E R_S (OFHC)}{G_{SW}^2} \right)^2 \cdot u_{G_{SW}}^2 + (G_E \cdot k)^2 \cdot u_{\tan \delta}^2 \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

식 (5)에서 G_E 는 $1/G_E = 1/G_T + 1/G_B$ 로 정의된다. 이러한 $u_{R_{Se}}$ 로 인해 식 (2)로부터 결정되는 t_{RF} 의 u_{RF} 가 결정되는데, 우리는 앞서 YBCO 박막에 대해 u_{cal} 을 고려하지 않고 ~ 40 GHz의 마이크로파 공진기로 측정된 t_{RF} 의 값은 α -step을 이용하여 측정된 값과 3% 이내에서 일치한다는 연구 결과를 보고한 바 있다 [12].

마이크로파를 이용하여 특정 조성의 초전도체 박막의 두께를 측정하고자 할 때, 이 초전도체 박막들의 고유한 σ_1 과 σ_2 로는 calibration용 초전도체 박막의 σ_1 과 σ_2 를 사용하게 된다. 그

런데 calibration용 초전도체 박막의 표면 거칠기로 인해 t_{cal} 이 $t_a < t_{\text{cal}} < t_b$ 로 관측된 경우에는, t_a 에 대응하는 σ_{1a} 및 σ_{2a} 와 t_b 에 대응하는 σ_{1b} 및 σ_{2b} 를 각각 구하는 것이 필요하게 된다. 이 경우 u_{cal} 이 고려된 R_{Se} vs. t curve 들을 식 (2)로부터 구할 수 있고, 이 curve들로부터 u_{cal} 에 기인하는 u_{RF} 가 결정된다.

III. Experimental

본 연구에는 앞서 Lee 등이 ~ 40 GHz의 마이크로파 신호를 이용하여 70, 120, 150, 240, 360 nm의 두께를 지닌 박막(향후 YBCO-70, YBCO-120, YBCO-150, YBCO-240 및 YBCO-360으로 표기함)들에 대해 측정된 결과가 사용되었다.

Fig. 1은 YBCO-70, YBCO-150, YBCO-360인 YBCO 박막에 대해 step profilometry를 이용하여 측정된 결과이다 [12]. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 박막 표면이 완전히 매끄러운 상태에 있지 않고 일정한 거칠기를 지니고 있기 때문에 측정된 박막의 두께는 일정한 불확도를 지니게 된다. 본 연구에서 70, 120, 150, 240, 360 nm의 두께를 지닌 박막 (향후 각각 ‘YBCO-70’, ‘YBCO-120’, ‘YBCO-150’, ‘YBCO-240’ 및 ‘YBCO-360’으로 표기함)들의 두께는 표면 거칠기를 고려하였을 때 각각 (71.4 ± 1.1) nm, (116.9 ± 0.6) nm, (153.6 ± 0.6) nm, (273.4 ± 0.9) nm, (351.2 ± 1.3) nm 이다.

앞서 Lee 등은 측정된 박막에 대해 측정된 두께 중 중간 값에 해당하는 값을 지닌 YBCO-150을 calibration 박막으로 선택하여 이 박막의 σ_1 과 σ_2 를 온도의 함수로 구한 후 각 측정 온도에서의 calibration data인 R_{Se} vs. t curve를 구하였는데 [12], 본 연구에서도 동일한 박막을 calibration 박막으로 선택하여 t_{cal} 의 불확도가 YBCO 박막의 t_{RF} 에 전파하는 불확도를 구하고 이 결과를 앞서 Lee 등이 발표한 결과와 비교해 보았다.

본 연구에 사용된 YBCO 박막은 dc magnetron sputtering 법으로 0.5 mm 두께의 (100)LaAlO₃ 기판 위에 성장된 것이다.

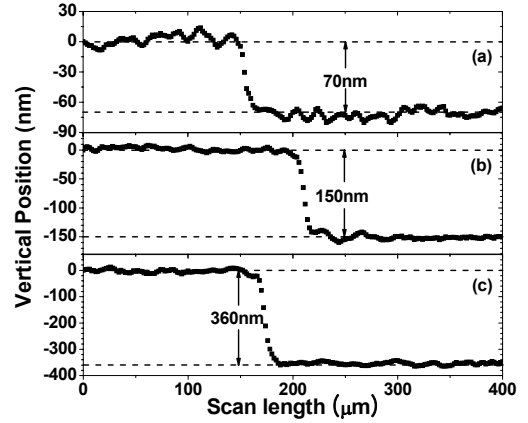


Fig. 1. Step profiles showing the film thicknesses for (a) YBCO-70, (b) YBCO-150, and (c) YBCO-360 [12].

IV. Results and discussion

Fig. 2에 10 K에서 t_{cal} 의 상대 표준불확도 (relative standard uncertainty, u'_{cal}) 변화에 따른 R_S 의 상대 표준불확도(u'_{R_S}) 변화를 나타내었다. Fig. 2에서 u'_{R_S} 는 u'_{cal} 와 선형적 관계를 가지고 있음을 알 수 있는데, u'_{cal} 이 각각 1%와 5% 일때의 u'_{R_S} 는 0.98%와 4.9%로 $u'_{\text{cal}} \sim u'_{R_S}$ 임을 확인할 수 있다. 박막의 두께를 구하고자 할 때 측정되어야 하는 R_{Se} 는 식 (1)로부터 구해지므로 식 (4)에 u_{cal} 을 넣을 경우 R_{Se} 의 불확도인 $u_{R_{\text{Se}}}$ 를 구할 수 있다. Fig. 2의 inset은 u'_{cal} 의

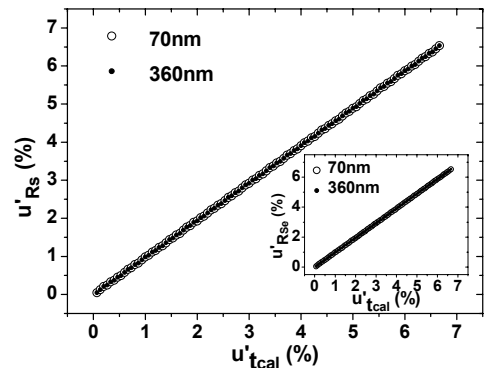


Fig. 2. u'_{R_S} vs $u'_{t_{\text{cal}}}$ data and (inset) $u'_{R_{\text{Se}}}$ vs $u'_{t_{\text{cal}}}$ data for YBCO-70 and YBCO-360 with YBCO-150 being used as the calibration film.

변화에 따른 R_{Se} 의 상대 불확도인 $u'_{R_{Se}}$ 의 변화를 보여주는데, u'_{cal} 이 각각 1%와 5% 일때의 $u'_{R_{Se}}$ 는 0.99%와 0.48%로 이 경우 역시 $u'_{cal} \sim u'_{R_{Se}}$ 의 선형적 관계가 성립함을 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 YBCO-150을 calibration용 박막으로 사용하고 $u'_{cal} = 1\%$ 로 가정한 경우 YBCO-150에 대해 10 K에서 구해진 R_{Se} vs. t 의 calibration data이다. Section II에 설명된 바와 같이 주어진 R_S 에 대해 박막의 두께가 작을수록 R_{Se} 는 지수함수적인 증가를 보이게 되며 두께

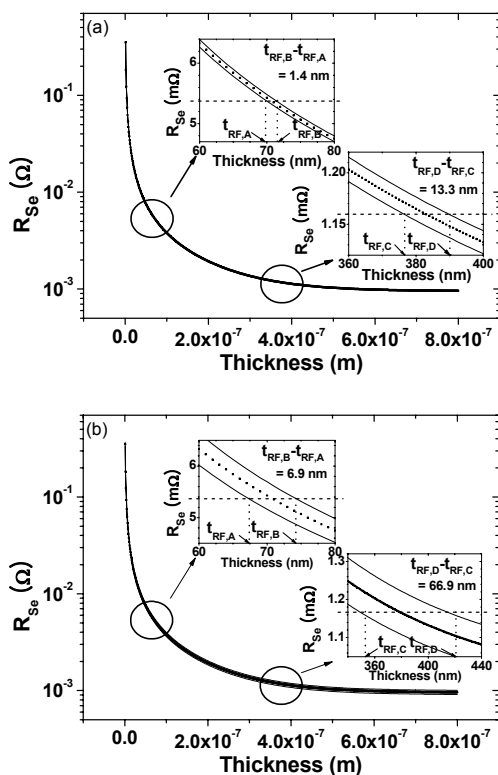


Fig. 3. (a) The R_{Se} vs. thickness curves for a temperature of 10 K at 39.91 GHz, as obtained from the calibrated R_S with an assumed uncertainty of 1%, and (b) 5% in the thickness of YBCO-150 taken into account. In the insets, the R_{Se} vs thickness curve is bounded by two other R_{Se} vs thickness curves due to the uncertainty in the thickness of YBCO-150. In the inset at the top left (bottom right) of Fig. 3, $t_{RF,A}$ ($t_{RF,C}$) and $t_{RF,B}$ ($t_{RF,D}$) are the thickness values corresponding to the lower limit and the upper limit of YBCO-70 (YBCO-360).

가 YBCO 박막의 λ 값의 3 배, 즉 600 nm 이상이 된 경우 R_{Se} 가 일정한 값에 수렴하게 됨을 알 수 있다. Fig. 3(a)의 inset 들은 $t \sim 70$ nm와 $t \sim 380$ nm 부근에서 확대된 R_{Se} vs. t curve 들로서, R_{Se} vs. t 곡선의 상, 하에 있는 곡선들은 $u'_{cal} = 1\%$ 로 했을 경우 허용되는 R_{Se} 값의 범위를 지정한다. 측정된 R_{Se} 에 의해 결정되는 박막의 두께는 inset에 있는 3 개의 곡선과 측정된 R_{Se} 값이 만나는 점에서의 t 값에 의해 결정되는데, 예로서 YBCO-70에 대해 10 K에서 측정된 R_{Se} 가 ~ 5.37 m Ω 이므로 Fig. 3(a)의 우측 상단에 있는 inset으로부터 이 R_{Se} 값에 대응하는 YBCO-70의 두께는 최대값($t_{RF,B}$)과 최소값($t_{RF,A}$)의 차이가 1.4 nm, 즉 $u_{RF} \sim 0.7$ nm임을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(a)의 좌측 하단에 보여진 inset은 YBCO-360의 R_{Se} 인 ~ 1.16 m Ω 으로부터 이 박막의 t_{RF} 가 ~ 383 nm 이고 t_{RF} 의 최대값과 최소값 간의 차이인 13.3 nm에서 $u_{RF} \sim 6.7$ nm 가 됨을 보여준다. Fig. 3(b)는 $u'_{cal} = 5\%$ 일 경우 YBCO-150에 대해 10 K에서 구해진 R_{Se} vs. t 의 calibration data이다. 이 그림에서 YBCO-70와 YBCO-360의 u_{RF} 이 각각 ~ 3.5 nm와 ~ 34 nm 임을 알 수 있는데, 이 결과는 $u'_{cal} = 1\%$ 일 때에 비해 $u'_{cal} = 5\%$ 일 경우 u_{RF} 이 약 5 배 정도 크게 됨을 보여준다.

Fig. 4(a)는 YBCO 박막에 대해 u'_{cal} 의 변화가 10 K에서 측정된 t_{RF} 와 u_{RF} 의 변화에 미치는 영향을 보여준다. 이 그림으로부터 동일한 u'_{cal} 의 값에 대해 두께가 큰 박막의 u_{RF} 가 더 큰 값을 갖게 됨을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 u'_{RF} 의 u'_{cal} 의 값에 대한 의존성 에서도 관측되는데, Fig. 4(b)에서 u'_{cal} 의 값에 따른 u'_{RF} 의 변화가 YBCO-70, YBCO-120 및 YBCO-150의 경우 $u'_{RF}/u'_{cal} \sim 1$ 이지만 YBCO-280의 경우 $u'_{RF}/u'_{cal} \sim 1.3$ 로 증가하고 YBCO-360의 경우 $u'_{RF}/u'_{cal} \sim 1.8$ 로 더 큰 값을 갖게 됨을 보여준다. 여기서 박막의 두께가 커질 수록 u'_{RF} 와 u'_{cal} 의 비가 커지는 것은 Fig. 3의 calibration curve에서 관측된 바와 같이 YBCO의 λ 보다 박막의 두께가 커질 경우 YBCO의 R_{Se} 의 두께에 대한 의존성이 작아지기 때문으로 잘 설명된다.

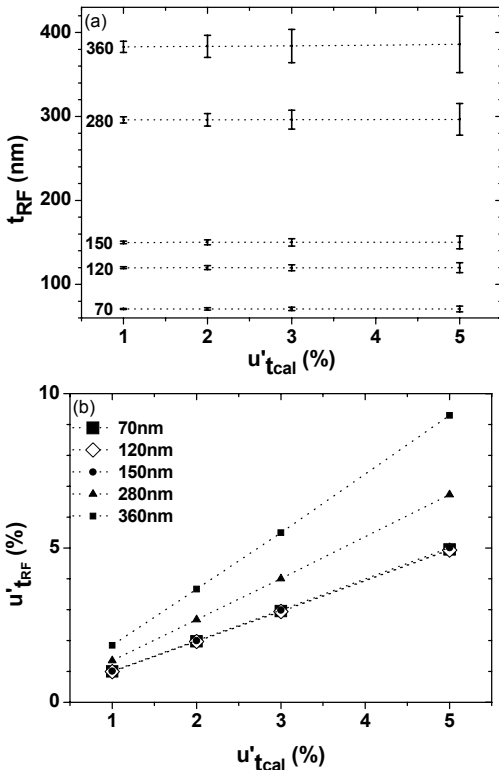


Fig. 4. (a) t_{RF} vs. u'_{tcal} and (b) u'_{tRF} vs. u'_{tcal} data for all the YBCO film samples with YBCO-150 being used as the calibration film.

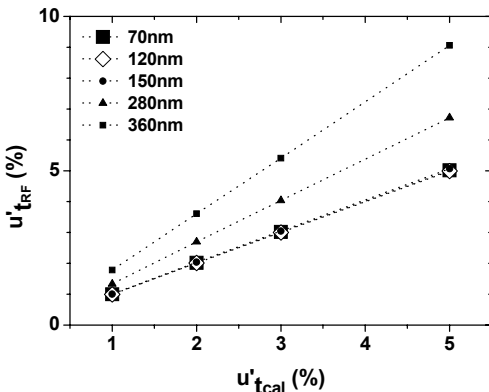


Fig. 5. u'_{tRF} vs. u'_{tcal} data for all the YBCO films under test with YBCO-70 being used as the calibration film.

Fig. 4(b)는 u'_{tcal} 이 u'_{tRF} 에 미치는 영향을 calibration용 박막의 두께가 ~ 150 nm일 경우에 대해 살펴본 것인데, Fig. 5는 calibration용 박막

으로 두께가 ~ 70 nm인 YBCO-70을 사용한 경우 u'_{tcal} 의 변화에 따른 u'_{tRF} 의 변화를 보여준다. Fig. 5에서, $u'_{tRF}/u'_{tcal} = \alpha$ 로 표현할 경우, YBCO-70, YBCO-120 및 YBCO-150의 경우 α 는 ~ 1 이지만 YBCO-280의 경우 $\alpha = 1.3$ 이고 YBCO-360의 경우 $\alpha = 1.8$ 가 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 YBCO-150을 calibration용 박막으로 사용했을 때와 동일한 것으로 이러한 결과는 YBCO 박막의 고유표면임피던스가 성장된 박막의 두께와 상관없이 거의 같기 때문으로 설명된다.

V. Summary

마이크로파 측정법으로 ~ 40 GHz의 공진주파수를 지닌 공진기를 이용하여 비파괴적으로 YBCO 초전도체 박막의 두께를 측정할 경우 calibration용 YBCO 박막의 두께의 불확도가 마이크로파로 측정된 두께의 불확도에 미치는 영향을 70 - 360 nm 두께를 지닌 5 개의 YBCO 박막에 대해 연구하였다. Calibration용 박막으로는 약 150 nm의 두께를 지닌 박막이 사용되었는데, 이 박막의 두께의 불확도는 박막 표면의 거칠기를 고려하여 결정하였다. 본 연구 결과, calibration용 박막의 불확도가 마이크로파로 측정된 박막의 두께에 상당한 영향을 준다는 것을 확인하였으며, ~ 40 GHz에서 연구에 사용된 모든 박막에 대해 측정 두께가 5% 이내의 상대 불확도를 지니기 위해서는 calibration용 박막의 두께의 상대 표준불확도가 2.7% 이내의 값을 가져야 함을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 마이크로파를 이용하여 박막의 두께를 측정할 경우 측정 두께의 상대 불확도의 목표치를 구현하기 위해서는 표면 거칠기로 인한 두께의 불확도가 일정 값 이하인 박막 만이 calibration용 박막으로 사용될 수 있음을 보여준다.

Acknowledgments

이 논문은 2010학년도 건국대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] N. Klein et al., *J. Appl. Phys.* 67, 6940 (1990).
- [2] J. H. Lee, W. I. Yang, M. J. Kim, J. C. Booth, K. Leong, S. Schima, D. Rudman and S. Y. Lee, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15, 3700 (2005).
- [3] See IEC 61788-15 Ed.1: Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies.
- [4] See, e.g., M. Hein, *High-temperature Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies*, STMP 155 (Springer-Verlag, Berlin, 1999), Chap. 2, and the related references therein.
- [5] B. A. Willemsen, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11, 60 (2001).
- [6] S. Ohshima, *Physica C* 412-414, 1506 (2004).
- [7] S. Y. Lee and B. Oh B, “Recent progress in microwave HTS technology in Korea and Japan”, *J. Supercond.* 16 823-831 (2003).
- [8] R. Jenkins, *X-Ray Fluorescence Spectrometry* (John Wiley & Sons, New York, 1983), p. 51.
- [9] M. J. Banet, M. Fuchs, J. A. Rogers, J. H. Reinold, Jr., J. M. Knecht, M. Rothschild, R. Logan, A. A. Maznev, and K. A. Nelson, *Appl. Phys. Lett.* 73, 169 (1998).
- [10] S. Y. Lee, J. H. Lee, and H. S. Jung, *J. Korean Phys. Soc.* 54(4), 1619 (2009).
- [11] H. S. Jung, W. I. Yang, J. H. Lee, J. M. Sohn, K. N. Choo, B. G. Kim, and S. Y. Lee, *Chin. Phys. Lett.* 27(8), 087405 (2010).
- [12] J. H. Lee, M. S. Kim, H. K. Han, H. S. Jung, W. I. Yang, S. Y. Lee, B. Park, and S.-G. Lee, *J. Korean Phys. Soc.* 60(7), 1072 (2012).
- [13] J. H. Lee, H. K. Han, and S. Y. Lee, “Effects of a Temperature-dependent Dielectric Constant on the Geometrical Factors of Dielectric Resonators and on the Measurement Accuracy for the Surface Resistance of Superconductor Films”, *J. Korean Phys. Soc.* 47, 494-500 (2005).
- [14] J. Mazierska, “Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high temperature superconducting films for microwave applications”, *J. Supercond.* 10, 73 (1997).