

Comparative Study for the Unloaded Quality Factors of High- T_C Superconductor-Dielectric Resonators Measured by Using S-parameter Circle-fit Method and Lorentzian-fit Method

M. J. Kim, J. H. Lee, E. K. Park, W. I. Yang, H. S. Jung, Y. O. Choi
and S. Y. Lee*

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

S-parameter circle fit 방법과 Lorentzian fit 방법으로 측정된 고온초전도 유전체 공진기의 Unloaded Quality Factor 비교

김민정, 이재훈, 박은규, 양우일, 정호상, 최윤옥, 이상영*

Abstract

Accurate measurements of the microwave surface resistance (R_s) of high temperature superconductor (HTS) films are important with regard to applications of HTS materials for wireless communications. As the surface resistance values of HTS films are usually extracted from the measured unloaded quality factor (Q_0) of resonators made of HTS films, it is essential to measure the resonator Q_0 with accuracy. The TE_{011} mode Q_0 of sapphire resonators with the endplates made of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) film on $LaAlO_3$ is measured by using the S-parameter circle-fit method at a frequency of about 19.6 GHz and temperatures of 30 K to 90 K, which is compared with the measured values by using the Lorentzian-fit method. Good agreements are found between the two sets of Q_0 values measured by using the two different methods whether the resonator is used in a weak-coupling scheme or a strong-coupling scheme, showing reliability of both methods for measuring the resonator Q_0 accurately. The Q_0 of sapphire resonators with a gap between the top plate and the rest of the resonator is also discussed.

Key words : unloaded quality factor, resonator, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) film

I. 서론

*Corresponding author. Fax : +82 2 3436 5361

e-mail : sylee@konkuk.ac.kr

Superconductor)가 발견된 이후 최근에 이르기까지 정보통신의 발달과 맞물려 초전도체의 통신소자로의 응용성에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 이는 초전도체가 일반 도체에 비해 마이크로파 표면저항(R_S)이 매우 작기 때문인데 [2], 고온초전도 필터를 수신기의 전단부로 사용한 경우 기지국 당 coverage 면적, 신호의 특성, 그리고 간섭 신호에 대한 면역성 등에서 매우 우수한 성능을 지니는 것으로 보고된 바 있다 [1]. 고온초전도 고주파 소자의 중요성은 이런 소자들의 상용화 연구에 참여한 선진국 내의 산업체들에 의해서 이미 인정된 바 있는데, 이동 통신이나 PCS 기지국용의 고온초전도 필터가 내장된 수신기 전단부는 미국의 Superconductor Technologies Inc.(STI)에 의해 상용화된 바 있고 국내에서는 (주)RFTRON이 YBCO로 제작된 수신기 전단부의 상용화 연구를 진행 중이다.

고온초전도 고주파 소자가 상용화 단계에 들어섰음을 고려할 때 소자 제작에 사용되는 고온초전도체 박막에 대한 표면저항 특성평가 기술의 확립은 매우 중요한데 [3-10], 최근 국제 측정 표준으로 공표된 바 있는 유전체 공진기(dielectric resonator) 방법은 비파괴적이면서 높은 측정 감도를 가지는 것으로 알려져 있다 [11].

II. 실험 배경

유전체 공진기법에서 고온초전도박막의 표면저항은 주파수 변화에 따른 공진기의 주파수 응답도(frequency response)로부터 S-parameter를 측정된 공진기의 quality factor에 의해 결정된다. 측정된 S-parameter로부터 공진기의 quality(Q) factor를 결정하는 방법으로 3-dB 방법, Lorentzian-fit을 이용한 방법, S-parameter circle-fit 방법이 알려져 있다 [12]. 이 중 Lorentzian-fit 방법은 Fig. 1(a)와 같은 S_{21} 의 주파수 의존성으로부터 loaded Q -factor(Q_L)를 구하는 데 사용되는 방법으로 고온초전도박막의 유효표면저항

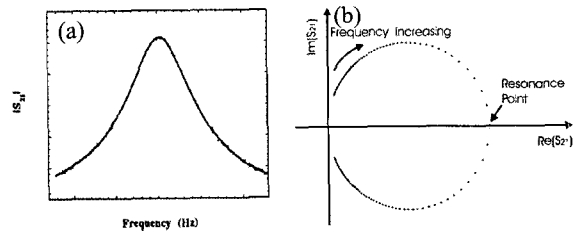


Fig. 1. (a) $|S_{21}|$ versus frequency. (b) $\text{Im}(S_{21})$ versus $\text{Re}(S_{21})$.

을 결정하는 데 필요한 unloaded Q -factor(Q_0)는 공진기의 반사계수(reflection coefficient)로부터 구한 결합계수(coupling coefficients)를 별도로 구한 후에 얻어지는데, 공진기에 대한 입력단과 출력단에서의 신호 결합이 비대칭적으로 되어서 입력 결합계수와 출력 결합계수가 상이한 값을 지닐 경우 측정된 Q_0 는 상당히 큰 측정오차를 지니게 된다.

한편 S-parameter circle-fit 방법은 이러한 Q_L 과 결합계수를 측정된 S-parameter에 대한 복소수평면에서의 circle-fit, 즉 Q -circle을 통해 구하는 것으로 신호결합이 비대칭적일 경우에도 Q_0 를 비교적 정확하게 구할 수 있다는 장점이 있다 [13].

여기서 Q -circle이란 명칭은 주파수의 함수인 공진기의 scattering parameter (S-parameter)가 Fig. 1(b)와 같이 복소좌표 평면에서 원의 형태를 지니고 있음에서 비롯된 것인데, Q -circle 상의 S-parameter 데이터는 공진 주파수 주위보다는 공진 주파수에서 멀어 질수록 밀집된 형태를 지닌다 [14].

Fig. 2(a)는 이상적인 Q -circle의 모습으로 실제 측정 시에는 신호전송선의 길이나 crosstalk 등의 요인이 복소좌표계 상의 Q -circle의 위치에 영향을 미친다. 예로서 공진기와 측정 장비 간의 신호 전송 선은 마이크로파 신호의 위상변화를 일으키게 되어 Fig. 2(b)와 같이 복소좌표계 상의 Q -circle의 회전을 일으키며 공진기 내부로 삽입된 coupling loop간의 crosstalk는 Fig. 2(c)와 같이 복소좌표계 상에서의 원의 이동으로 나타나게 된다. Q -circle 방법은 이러한

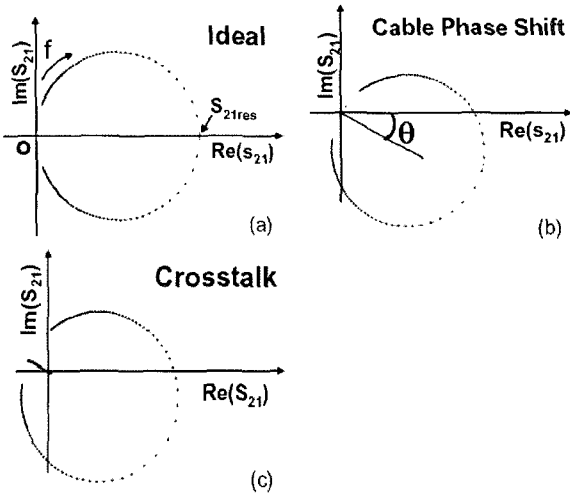


Fig. 2. Illustrative summary of influences of practical effects on S_{21} Q -circles.

여러 요인 들에 의한 S-parameter 측정 결과의 변화를 Q -circle의 이동을 통해 쉽게 보정될 수 있게 하는데, 이러한 보정을 통해 고온초전도체-유전체 접합형 공진기의 매우 큰 Q 를 정확히 측정하는 것이 가능하다.

본 논문에는 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) 고온초전도체 박막이 설치된 유전체 공진기의 Q -factor를 대표적인 측정법의 하나인 Lorentzian-fit 방법으로 측정 후 Q -circle fit의 방법으로 측정된 결과와 비교한 결과를 기술하였는데, 특히 최근 고온초전도체 박막의 전자파 침투깊이에 대한 측정법으로 보고된 바 있는 ‘gap이 있는 유전체 공진기’ [15]에 대한 연구 결과를 함께 기술하였다. 측정은 유전체와 윗면 박막 사이에 gap이 없는 경우(Fig. (3) 참조)와 gap이 있는 경우(Fig. (4) 참조), 또한 coupling이 강한 경우와 약한 경우를 조합한 네 가지의 경우에 대해 실시하였다. 그리고 공진기의 S-parameter를 circle-fit 방법으로 fitting하여 구한 Q_L 과 Q_0 의 값을 Lorentzian fit 방법으로 fitting하여 구한 Q_L 과 이렇게 구한 Q_L 과 삽입손실로 계산된 Q_0 의 값과 각각 비교하였다. 측정에 사용된 윗면과 아랫면의 YBCO 박막은 특성이 동일한 박막을 사용했는데, 먼저 YBCO 박막을 아랫면에 위치시킨 후 윗면에 특성을 모르는 YBCO 박막을

두고 고주파 특성을 측정 하여 동일한 특성을 지니는 YBCO 박막 한 쌍을 찾았다.

III. 유전체 공진기의 Q_0 와 고온 초전도 박막의 표면저항 간의 관계

일반적으로 공진기의 Q_0 와 Q_L 의 관계는 공진기가 완전히 차폐되어 전자기파의 방사(radiation)에 의한 신호 손실이 없을 경우 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서 Q_{ex} 는 공진기와 외부 회로 사이의 결합에 의해 공진기 내에 저장된 전자기장 에너지가 외부 회로로 새어 나감으로 인한 것인데, 이러한 공진기와 외부 회로 간의 결합 세기는 결합 계수(coupling coefficient) β 로 표기된다. 그러므로 two-port 공진기에서 입, 출력단 각각에서의 결합계수를 β_1, β_2 라 하면 Q_0 는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

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

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 수 있는데, 이 경우 $Q_0 = Q_L / (1 - 10^{-IL(dB)/20})$ 의 식이 이용된다. 여기서 $IL(dB) = -20 \log_{10} |S_{21}|$ 이다.

참고로 초전도체의 표면저항은 유전체 공진기의 Q_0 로부터 다음의 관계식을 이용하여 구해진다 [16].

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

식 (3)에서 W 는 공진기 안에 저장된 전자기

장 에너지이고, ω_0 는 공진주파수에 대응하는 각주파수(angular frequency)이며, R_{s1} , R_{s2} , R_{s3} 는 각각 공진기의 윗면과 아랫면에 있는 YBCO 박막과 옆면의 무산소동(Oxygen Free High Conductivity Copper)이 지닌 표면저항을, P_a , P_b , P_s 는 각각 이들 도체 면에서의 power 손실을 의미한다. 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 geometrical factor라 불리는 Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 와 filling factor k 는 유전체 rod를 포함하는 공진기 내부의 전자기장 분포로부터 결정되는 값들이다. 따라서 공진기의 윗면과 아랫면에 동일한 특성의 초전도체 박막이 사용된 경우, 옆면 도체인 무산소동의 표면저항 R_{s3} 와 유전체의 $\tan\delta$ 를 별도의 측정을 통해 알고 있게 되면 공진기의 Q_0 로부터 초전도체 박막의 표면저항 $R_{s1}(=R_{s2})$ 를 구할 수 있게 된다 [16].

IV. 실험과정

YBCO 초전도체가 설치된 사파이어 공진기의 저온 마이크로파 특성은 HP network analyzer (HP 8510C)로 8 - 90 K의 온도 영역에서 측정되었는데 이 network analyzer의 주파수 분해능은 1 Hz이고 측정온도는 ± 0.05 K의 정확도를 지닌다.

Fig. 3은 표면저항 측정에 이용된 사파이어 공진기의 개략도로써 사파이어 봉(rod)은 원통형 공동(cavity)의 중앙에 놓여있고 특성이 동일한 2 개의 YBCO 박막은 공진기의 윗면과 아랫면을 구성하게 되어있다. 실험에 사용된 YBCO 박막은 LaAlO_3 기판 위에 dc magnetron Sputtering 방법으로 증착된 것으로 두께는 약 400 nm 정도이다. 원통형 공동은 열전달이 우수한 무산소동으로 제작되었는데, 원통형 공동 내에 있는 사파이어 봉의 높이와 지름은 각각 5 mm 이고, 원통형 공동의 지름과 높이는 각각 15 mm와 5.1 mm이다. 여기서 원통형 공동과 유전체의 높이가 0.1 mm 차이가 나는 것은 무

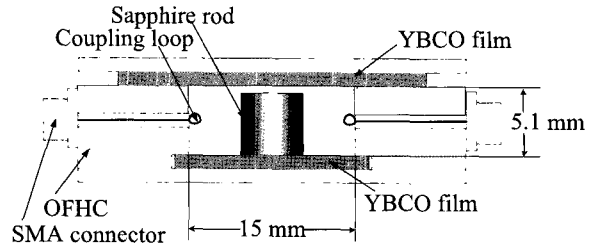


Fig. 3. A cross sectional view of our sapphire-loaded cavity resonator with YBCO endplates.

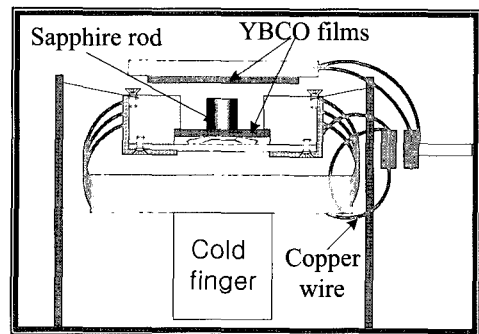


Fig. 4. Diagrams of a sapphire resonator with a gap between the top YBCO endplate and the rest of the resonator.

산소동의 냉각 시 열수축으로 인한 YBCO 박막의 손상과 전자파의 방사 손실을 방지하기 위한 것이다. 신호의 입출력은 SMA connector에 연결된 신호전달선을 통해 이루어지는데, TE 모드의 여기(excitation)을 위해 신호전달선의 끝은 원형 loop 형태로 되어 있다.

초전도체 박막의 전자파 침투깊이 측정은 Fig. 4와 같이 윗면의 YBCO 박막과 공진기의 나머지 부분 간에 약 10 μm 의 gap이 있는 상태에서 실시되는데 [15, 16], 이러한 gap의 크기는 윗면의 YBCO 박막에 연결된 step motor를 이용하여 조절되었다.

V. 결과 및 분석

1. Circle-fit과 Lorentzian fit 방법으로 측정된 Q_0 비교

Fig. 5은 gap이 없는 공진기에 대한 결합 계

수가 작을 경우 fit 방법으로 측정된 공진기의 Q_0 (여기서는 $Q_0(L)$ 이라 함)을 circle-fit 방법에 의한 Q_0 (여기서는 $Q_0(C)$ 라 함)와 비교한 것인데, 15, 60, 70 K에서의 $Q_0(L)$ 은 각각 1.55×10^6 , 6.16×10^5 , 4.27×10^5 으로 동일 조건에서의 $Q_0(C)$ 인 1.57×10^6 , 6.19×10^5 , 4.3×10^5 과 1-2% 이내의 차이를 보이는 것으로 관측되었다. 동일한 공진기에 대해 결합계수만 크게 한 경우 측정된 결과는 Fig. 6에 나타난 바와 같은데 15, 60, 70 K에서 측정된 $Q_0(L)$ 은 각각 1.52×10^6 , $6.65 \times$

10^5 , 4.11×10^5 으로 동일 온도에서의 $Q_0(C)$ 인 1.51×10^6 , 6.57×10^5 , 4.26×10^5 와 1-2% 이내의 작은 차이를 보임을 알 수 있다.

여기서 한 가지 주목할 것은 결합 계수가 작은 경우와 큰 경우 측정된 Q_0 의 값 들 간에 상당한 차이가 있다는 것이다. Fig. 5와 6에서 결합 계수의 차이로 인한 $Q_0(L)$ 의 차이는 15, 60, 70 K에서 각각 1.7%, 8%, 3.8%이고 $Q_0(C)$ 의 차이는 각각 4.5%, 6.1%, 0.9% 인 것으로 관측되었는데, 이는 Lorentzian-fit으로 측정된 결과와 circle-fit 방법으로 측정된 결과 간에 뚜렷한 차이가 없음을 보여준다.

고온초전도체 박막의 전자파 침투깊이를 측정할 경우 사용되는 공진기, 즉 gap이 있는 사파이어 공진기에 대해 동일한 실험이 행하여졌는데, Fig. 7은 gap이 있는 공진기에서 결합 계수가 작을 경우 공진기의 $Q_0(L)$ 을 $Q_0(C)$ 와 비교한 결과이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 15, 60, 70 K에서의 $Q_0(L)$ 은 각각 1.57×10^6 , 6.23×10^5 , 4.5×10^5 으로 동일 온도에서의 $Q_0(C)$ 인 1.59×10^6 , 6.19×10^5 , 4.46×10^5 과 1-2% 이내의 차이를 보이는 것으로 관측되었다. 동일한 공진기에 대해 결합계수만 크게 한 경우 측정된 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같은데 15, 60, 70 K에서 측정된 $Q_0(L)$ 은 각각 1.55×10^6 , 6.43×10^5 ,

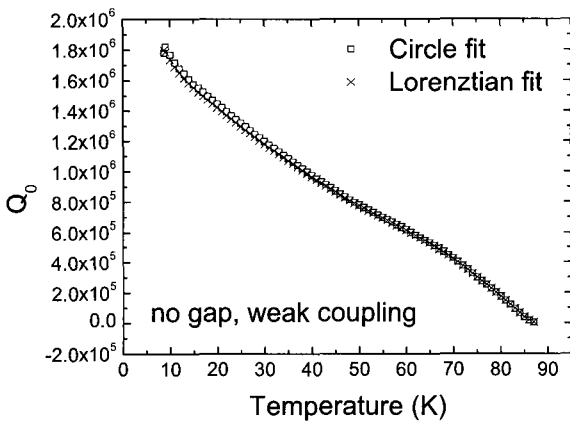


Fig. 5. The temperature dependences of the TE₀₁₁-mode Q_0 of the sapphire resonator with YBCO endplate with no gap at weak coupling condition.

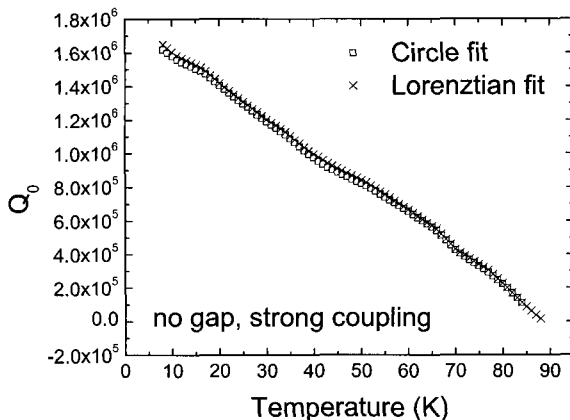


Fig. 6. The temperature dependences of the TE₀₁₁-mode Q_0 of the sapphire resonator with YBCO endplate with no gap at strong coupling condition.

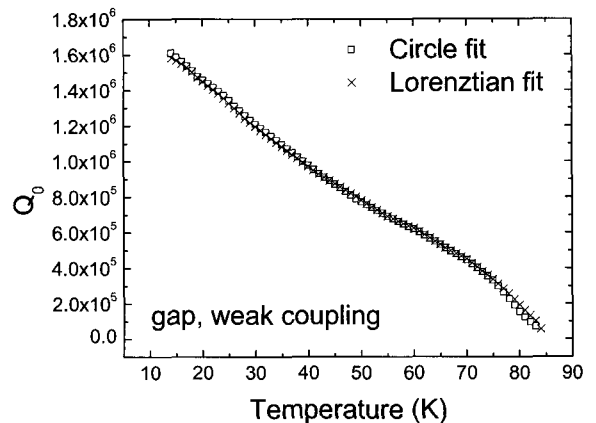


Fig. 7. The temperature dependences of the TE₀₁₁-mode Q_0 of the sapphire resonator with YBCO endplate with a gap at weak coupling condition.

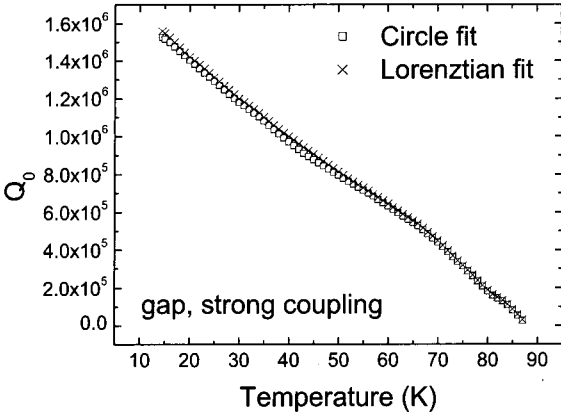


Fig. 8. The temperature dependences of the TE₀₁₁-mode Q_0 of the sapphire resonator with YBCO endplate with a gap at strong coupling condition.

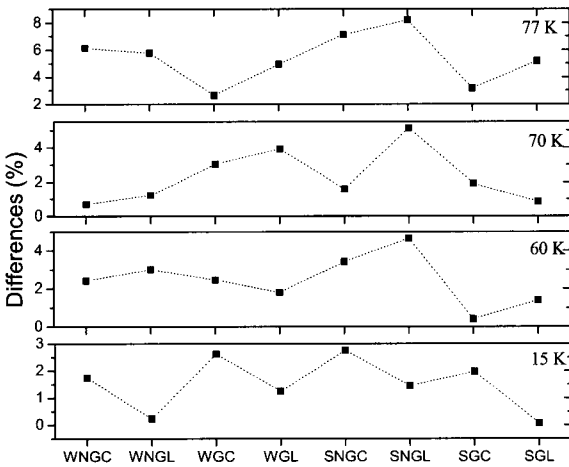


Fig. 9. The differences between the Q_0 (Lorentzian fit) and the Q_0 (Circle fit) at temperature 9 K, 15 K, 60 K and 70 K, respectively.

4.3×10^5 으로 동일 온도에서의 $Q_0(C)$ 인 1.52×10^6 , 6.32×10^5 , 4.41×10^5 과 역시 1 – 2 % 이내의 작은 차이를 보인다.

또한 이 경우 결합 계수의 차이로 인한 $Q_0(L)$ 값의 차이도 15, 60, 70 K에서 각각 1.2%, 3.2%, 4.7%로 $Q_0(C)$ 에 대한 각 온도에서의 차이인 4.7%, 2.1%, 0.9%와 큰 변화가 없는 것으로 관측되었다. 이 결과 역시 공진 신호가 대칭적인 모습을 지니고 있을 경우 결합 계수의 변화

에 상관없이 Lorentzian-fit으로 측정된 결과와 circle-fit 방법으로 측정된 결과가 비슷하게 나타남을 보여준다.

공진기 내에서의 gap의 유, 무 및 결합계수의 변화에 따른 $Q_0(L)$ 과 $Q_0(C)$ 의 차이는 Fig. 9에 나타난 바와 같다.

2. 삽입손실의 크기에 따른 Q_0 의 변화

Fig. 10(a)는 삽입손실이 매우 큰 경우 측정된 S_{11} 및 S_{22} 의 Q-circle data로서 S_{11} 및 S_{22} 의 측정값이 거의 확인될 수 없음을 보여주며 Fig. 10(b)의 S_{21} 측정결과 또한 잡음이 많이 포함되어

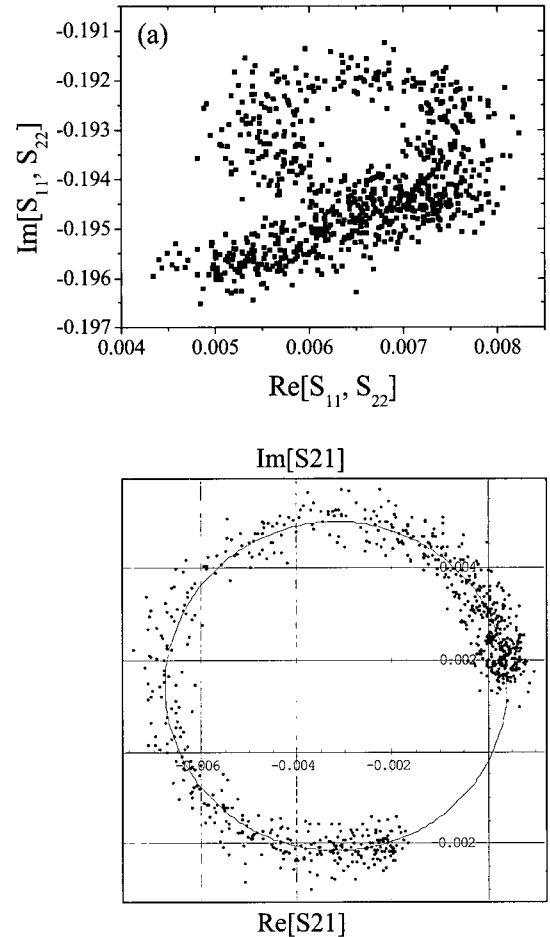


Fig. 10. (a) Measured S_{11} and S_{22} Q-circle (b) S_{21} Q-circle for $IL=45$ dB. (The solid lines show the fitted Q-circles.)

있음을 보여준다. Fig. 10(b)에서 S_{21} Q-circle에 대해 fitting을 통하여 구한 Q_L 은 4.05×10^5 이지만 data의 scatter 정도가 심해서 신뢰할 수 없는 값이다. 이러한 경우 Fig. 11에서처럼 공진주파수에서 비교적 멀리 떨어진 off-resonance 영역을 잘라낸 후 새로 fitting 하는 과정을 거칠 수 있는데, 이렇게 구한 Q_L 의 크기는 4.35×10^5 로 Fig. 10(b)의 결과보다 30000 정도 큰 값에 해당된다. 참고로 이와 같이 공진기의 삽입손실이 매우 커서 결합상수가 거의 0일 경우 Q_L 은 Q_0 와 거의 같은 값을 지녀서 $Q_L \approx Q_0$ 의 관계가 성립하게 된다.

Fig. 12는 Fig. 11의 결과에 대한 타당성을 확인하기 위하여 동일한 공진기에 대해 삽입손실만 30dB로 한 후 S_{21} 에 대한 Q-circle fit을 행한 결과이다. 이 경우 fitting을 통해 구한 Q_L 은 3.85×10^5 이고 β_1 과 β_2 는 각각 0.073과 0.041로 관측되었는데, 식 (2)에 이들 값을 대입하여 구한 공진기의 Q_0 는 4.28×10^5 로 삽입손실을 45 dB로 한 후 측정된 Q_0 와 불과 1.6% 정도 작은 값에 해당된다. 이러한 결과는 또한 Q-circle fit을 수행할 경우 잡음이 심하지 않은 S-parameter 값을 사용하는 것이 필요하다는 것과 삽입손실이 큰 공진기의 경우 적절하게 off-resonance 영역이 제거된 상태에서 행한 Q-circle fit을 통해 신뢰할 수 있는 Q_0 를 구할 수 있음을 보여준다.

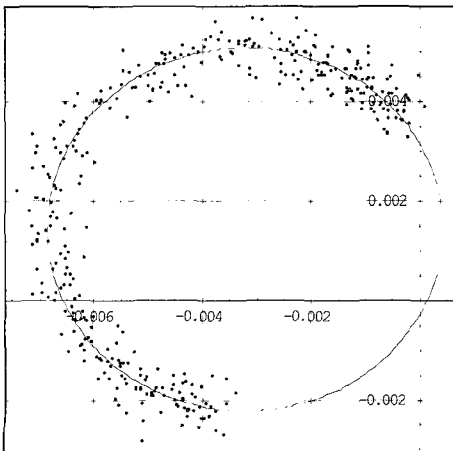
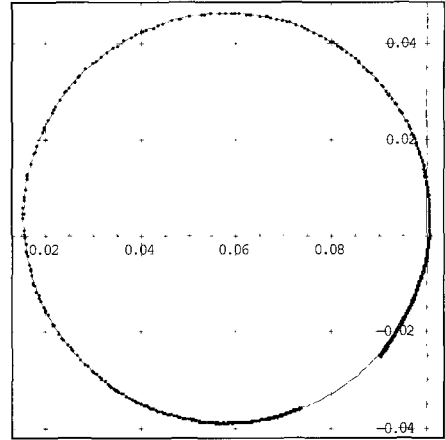
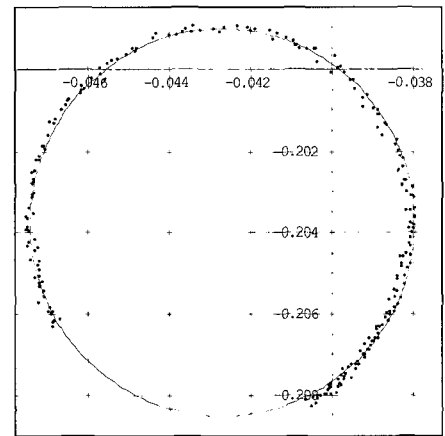


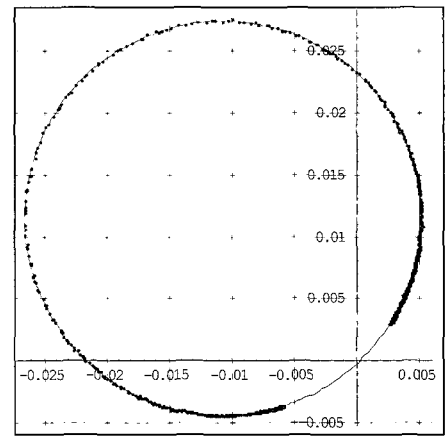
Fig. 11. Corrected S_{21} Q-circle after the removal of off-resonance. (The solid line shows the fitted Q-circle.)



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. (a) Measured S_{11} and S_{22} Q-circle (b) S_{21} Q-circle for $IL=30$ dB. (The solid lines show the fitted Q-circles.)

VI. 요약

본 논문에서는 LaAlO_3 기판 위에 성장된 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 박막을 사파이어 공진기에 설치한 후 이 공진기의 TE_{011} 모드가 지닌 Q_0 값을 S -parameter circle-fit 방법과 Lorentzian-fit 방법으로 측정한 결과를 기술하였다. 19.6 GHz 및 30 - 90 K에서 각각의 측정법으로 구해진 Q_0 값은 공진기가 약한 결합 상태에 있는지 혹은 강한 결합 상태에 있는지 상관없이 서로 잘 일치하는 것으로 나타났는데 이는 이들 방법이 모두 Q_0 값에 대한 신뢰할 만한 측정법임을 말해주는 것이다. 공진기의 윗면과 나머지 부분 사이에 gap이 있는 사파이어 공진기의 경우에도 gap의 크기가 충분히 작은 경우 각각의 측정법으로 구해진 Q_0 값은 서로 잘 일치하는 것으로 관측되었다.

본 결과는 비교적 간단한 측정법인 Lorentzian-fit 방법이 고온초전도 공진기와 같은 고성능 공진기의 unloaded quality factor에 대한 신뢰할 만한 측정법임을 말해주었다. 또한 결합 상수 결합이나 신호전송선 효과, 또는 crosstalk로 인해 Lorentzian-fit 방법이 적용될 수 없을 경우 S -parameter circle-fit 방법으로 고성능 공진기의 Q_0 를 측정할 수 있음을 보여주었다.

감사의글

본 연구는 산업자원부와 과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음.

References

- [1] B. A. Willemsen, "HTS filter subsystems for wireless telecommunications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11(1), 60, (2001); S. Y. Lee and B. Oh, "Recent Progress in Microwave HTS Technologies in Korea and Japan", *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, 16(5), 823-831, (2003).
- [2] H. Piel, And G. Müller, "The microwave surface impedance of high T_C superconductors", *IEEE Trans. Magnet.* 27, 854, (1991).
- [3] D. E. Oates, A.C. Anderson, DM. Sheen, SM. Ali, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 39, 1522 (1991).
- [4] A. Porch, MJ. Lancaster, And R. Humphreys, "Coplanar resonator technique for the determination of the surface impedance of patterned thin films", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 43, 306, (1995).
- [5] R.C. Taber, "A parallel plate resonator technique for microwave loss measurements on superconductors", *Rev. Sci. Instrum.* 61, 2200, (1990).
- [6] Z.-Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, WL. Holstein, DW. Face, And DJ. Kountz, "High T_C superconductor-sapphire microwave resonator with extremely high Q -values up to 90 K", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 40, 2424, (1992); C. Wilker, Z-Y. Shen, V.X. Nguyen, M.S. Brenner: "A sapphire resonator for microwave characterization of superconducting thin films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3, 1457, (1993).
- [7] 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.*, 30, 3043, (1993).
- [8] N. Tellman, N. Klein, U. Dähne, A. Scholen, H. Schulz, And H. Chaloupka, "High- Q LaAlO_3 dielectric resonators shielded by YBCO-films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 4, 143, (1994).
- [9] Y. Kobayashi, And H. Yoshikawa, "Microwave measurements of surface impedance of high- T_c superconductors using two modes in a dielectric rod resonator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 46, 2524, (1998).
- [10] J. Mazierska, "Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high temperature superconducting films for microwave applications", *J. Supercond.* 10, 73, (1997).
- [11] See IEC 61788-7 Ed.2: Superconductivity - Part 7: Electronic characteristic measurements - Surface resistance of superconductors at microwave frequencies.
- [12] P. J. Peterson and M. S. Anlage, "Measurement of

resonant frequency and quality factor of microwave resonators: Comparison of methods”, *Journal of applied physics*, 84(6), 3392-3402, (1998).

- [13] 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(9), 2115-2127, (2002).
- [14] W. Alter, “ Q -circles – a means of analysis of resonant microwave systems”, *Proc. I. R. E.*, 35, Part I, 355-361, (1947), Part II.
- [15] S. Y. Lee, J. H. Lee, W. I. Yang, And JH. Claassen, “Microwave properties of sapphire resonators with a gap and their applicability for measurements of the intrinsic surface impedance of thin superconductor films”, *IEICE Trans. Electron.*, E89-C, No.2., 132, (2006).
- [16] 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, (2005).