

도파관 공진기를 이용한 마이크로파 근접장 현미경의 특성에 관한 연구

A Study on Properties of a Near-Field Microwave Microscope Using a Waveguide Resonator

김 현*, 김송희*, 김주영*, 이기진*†

Hyun Kim*, Songhui Kim*, Jooyoung Kim* and Kiejin Lee*†

초 록 섭동이론인 형태 섭동과 물질 섭동을 적용하여 도파관 공진기를 사용한 마이크로파 근접장 현미경의 특성에 대해 연구하였다. 먼저, Ansoft사의 HFSS (high frequency structure simulator)를 사용하여 공진기 내부의 모드해석과 함께 공진기에서 선형 및 고리형 탐침에 대해 전력전달이 최대가 되고 탐침의 감도 향상을 기대할 수 있는 위치를 확인하였다. 더불어, 유전율이 서로 다른 유전체 시료 (teflon, glass, Al_2O_3 , $LaAlO_3$, $SrTiO_3$)에 대해 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정하였다. 측정결과로부터 유전율이 증가함에 따라 마이크로파 반사계수(S_{11})는 증가하고 공진주파수는 감소하였다. 이를 통해, 도파관 공진기를 이용한 마이크로파 근접장 현미경에서 선형 및 고리형 탐침의 위치에 따른 공진기의 감도 및 공진특성에 대해 알아보았다.

주요어: 도파관 공진기, 섭동, 형태섭동, 물질 섭동, 마이크로파 근접장 현미경, 마이크로파 반사계수, S_{11}

Abstract Near-field scanning microwave microscope (NSMM) has been used to characterize the electromagnetic properties of samples based on a cavity perturbation technique. We used a NSMM using a waveguide cavity to couple a metallic probe tip as a point like evanescent field emitter. We explained the quality of our NSMM system by applying the cavity perturbation theory. First, to make a shape perturbation, we inserted linear and loop probes in the waveguide resonator. To check up electric and magnetic field distribution inside the waveguide resonator by shape perturbation, we confirmed the field distribution by using a HFSS simulation. Second, to make material perturbation, we located a dielectric sample in front of the probe tip and measured reflection coefficient (S_{11}). We found that the resonance frequency(f_r) was changed linearly as the dielectric constant of resonator(ϵ_r) increased when $\Delta\epsilon$ and $\Delta\mu$ were small.

Keywords: Near-Field Scanning Microwave Microscope (NSMM), Waveguide, Cavity Perturbation

1. 서 론

공진기의 섭동기술(cavity perturbation technique)을 이용한 마이크로파 측정 기술은 고온 초전도체 박막의 표면저항, 유기 초전도체의 마이크로파 반

응, 반강자성체의 전도율, 고온초전도체 침투깊이의 온도 의존성 등의 연구에 응용되고 있다[1-4]. 마이크로파 근접장 현미경은 공진기의 섭동기술을 이용하여 시료의 전자기적인 성질을 파악하는데 사용되어 왔다. 최근 들어 근접장 현미경을 이용하여 시

료의 특성에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. 이러한 근접장 현미경 응용연구에는 원형 aperture를 이용하거나, 변조된 산란 탐침, 동조 가능한 동축선 공진기 외에도 마이크로 스트립 공진기가 연구되고 있다[5-8].

본 연구에서는 도파관 공진기에 금속 탐침을 결합한 마이크로파 근접장 현미경[9]의 특성에 대해 알아보았다. 섭동에 따른 전자계 분포를 시각적으로 구현하기 위해 Ansoft사의 HFSS를 사용하였다. 이를 통해 도파관 공진기[10] 내부의 모드를 분석하고 공진기 내부에서 power가 최대가 되는 탐침의 슬릿 위치를 확인하였다. 이를 토대로 도파관 공진기를 제작하고 전기장 및 자기장을 섭동 시키기 위한 슬롯을 만들어 탐침 또는 고리형 탐침을 삽입하였다. 그런 다음, 유전율이 서로 다른 시료에 대해 네트웍 어날라이저 (Agilent 8722ES)를 이용하여 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정하였다. 마이크로파 근접장 현미경의 반응특성을 통해 시료의 유전율 변화에 따른 도파관 공진기의 섭동 정도를 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 도파관 공진기의 구조

300 MHz-3 GHz의 Ultra-High Frequency(UHF)의 높은 주파수대역에서는 R, L, C와 같은 일반적인 분포정수회로를 이용하여 공진회로를 만드는 것이 어렵다. UHF와 같이 높은 주파수대역에서 공진회로를 만들기 위해서는 도체 벽으로 완전히 둘러싸인 캐버티를 고려해야 한다. 닫힌 캐버티는 전계 및 자계를 가둬두고, 복사손실과 저항손실을 제거

하여 많은 양의 전류흐름을 가능하게 한다. 이 경우, 캐버티는 순수한 공진주파수와 높은 Q 인자를 갖게 되는데 이러한 형태를 캐버티 공진기라고 한다.

Fig. 1과 같이 도체 벽에 의하여 양끝이 닫혀진 직각 도파관에 대해 캐버티 내부의 가로, 세로, 높이를 각각 a, b, d라고 하자. 이때, 직각 도파관에는 TE 및 TM모드가 존재하므로 직각 공진기 안에도 TE 및 TM모드가 존재한다. 또, $z=0$ 와 $z=d$ 에서 도체 벽의 존재는 다수의 반사와 함께 정재파를 발생시킨다.

2.2. 도파관 공진기의 공진모드

도파관은 양쪽이 무한대로 뻗어 있어서 파가 한 방향으로 진행하는 반면, 도파관 공진기는 $z=d$ 에서 반사되어 돌아오는 파가 발생한다. 이때, 음의 Z축 방향으로 되돌아오는 파를 $e^{-i\beta z}$ 라 하고, 양의 Z축 방향으로 진행하는 파를 $e^{i\beta z}$ 라고 한다. 두 개의 파가 중첩되면 도파관 공진기 내에는 $\sin\beta z$ 와 $\cos\beta z$ 형태의 정재파가 발생하게 된다. 이 경우, 도파관 공진기 내에 존재하는 TE_{101} 모드에 관한 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$E_y = -\frac{i\omega\mu a}{\pi} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{d}z\right) \quad (1)$$

$$H_x = -\frac{a}{d} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{\pi}{d}z\right) \quad (2)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{d}z\right) \quad (3)$$

2.3. 도파관 공진기의 여기

도파관 공진기는 동축케이블의 선형 및 고리형 탐침에 의한 급전 방법과 aperture 원형 캐버티 공진기에 의해 결합될 수 있다[12]. Fig. 2는 S_+ 와 S_- 에 위치한 두 횡단면 사이에 있는 전계 전류 \vec{J} 를 보여준다. 전류밀도 $\vec{J}(\vec{x}, t)$ 가 $e^{-i\omega t}$ 로 변한다고 가정하면, 전자계는 진동하는 전류 때문에 왼쪽과 오른쪽으로 전파하게 된다. 전계의 경우, S_+ 표면의 오른쪽으로 전자계가 $e^{ik_x z}$ 의 함수로 변하므로 다음과 같이 표현될 수 있다[12,13].

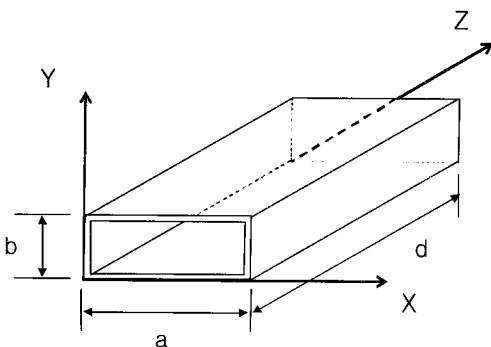


Fig. 1 Structure of waveguide a=1.58 cm, b=0.79 cm and d=9.0 cm

$$\vec{E} = \vec{E}^{(+)} = \sum_{\lambda'} A_{\lambda'}^{(+)} \vec{E}_{\lambda'}^{(+)} \quad (4)$$

자계의 경우, S-표면의 왼쪽으로 전자계가 $e^{-ik_{\lambda}z}$ 의 함수로 변하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{H} = \vec{H}^{(-)} = \sum_{\lambda'} A_{\lambda'}^{(+)} \vec{H}_{\lambda'}^{(-)} \quad (5)$$

전류밀도의 향으로서 계수 $A_{\lambda}^{(\pm)}$ 를 결정하기 위해 Poynting 정리를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}_{\lambda}^{(\pm)} - \vec{E}_{\lambda}^{(\pm)} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E}_{\lambda}^{(\pm)} \quad (6)$$

위의 식에 발산 정리를 적용하면 그 결과는 다음과 같다.

$$\int_S (\vec{E} \times \vec{H}_{\lambda}^{(\pm)} - \vec{E}_{\lambda}^{(\pm)} \times \vec{H}) \cdot \vec{n} da = \int_V \vec{J} \cdot \vec{E}_{\lambda}^{(\pm)} d^3x \quad (7)$$

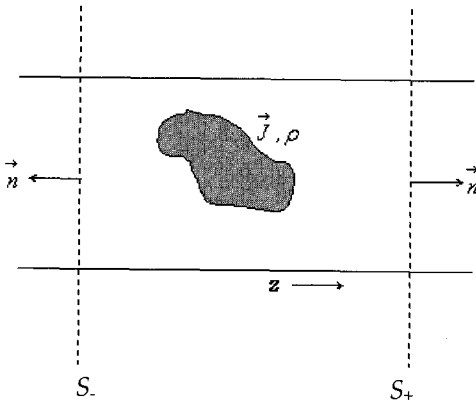


Fig. 2 The Schematization for \vec{J}, ρ in waveguide

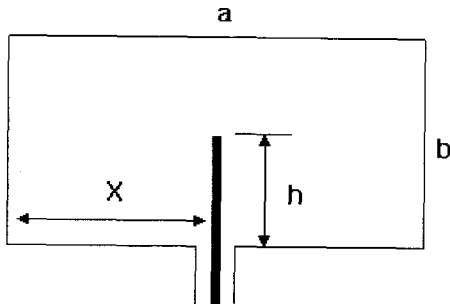


Fig. 3 A cross section of an infinite rectangular waveguide including probe tip

위의 식에서 \vec{n} 은 바깥쪽으로 수직인 방향이다. 부피 V는 도파관의 내부벽과 S와 S₊의 두 표면에 의해 둘러싸였다. 여기서, 부피 V는 aperture, 전계 또는 자계 전류원을 가지고 있지 않은 완전한 도체 벽이라고 가정하면 도파관 벽에 걸친 표면적분은 사라지고 S와 S₊의 두 표면에 걸친 적분만이 남는다. 이때, 표면 S에 대한 적분을 S와 S₊으로 나누고 음의 부호만을 고려하면 다음과 같이 S₊표면에 대한 적분만 남게 된다.

$$\begin{aligned} \int_{S_+} &= \sum_{\lambda'} A_{\lambda'}^{(+)} \int_{S_+} \hat{z} \cdot (\vec{E}_{\lambda'} \times \vec{H}_{\lambda}^{(+)} - \vec{E}_{\lambda}^{(+)} \times \vec{H}_{\lambda'}^{(+)}) da \\ &= -\frac{2}{Z_{\lambda}} A_{\lambda}^{(+)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \int_{S_-} &= -\sum_{\lambda'} A_{\lambda'}^{(-)} \int_{S_-} \hat{z} \cdot (\vec{E}_{\lambda'} \times \vec{H}_{\lambda}^{(-)} - \vec{E}_{\lambda}^{(-)} \times \vec{H}_{\lambda'}^{(-)}) da \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

반대로 식에서 양의 부호만을 고려하면, S-표면에 대한 적분만 남으며, 계수 $A_{\lambda}^{(\pm)}$ 는 다음과 같다.

$$A_{\lambda}^{(\pm)} = -\frac{Z_{\lambda}}{2} \int_V \vec{J} \cdot \vec{E}_{\lambda}^{(\mp)} d^3x \quad (10)$$

2.4. 금속 탐침 구조가 삽입된 도파관 공진기

Fig. 3은 무한히 긴 직각 도파관의 횡단면을 나타낸 것이다. z=0 인 위치에 도파관 안으로 거리가 h이고 수직인 동축선의 중심도체(core)가 삽입되어 있다. 중심도체 즉, 선형 탐침을 따라 흐르는 전류는 주파수(ω)를 가지고 시간에 따라 주기적으로 진동한다. 이때, 전류의 공간적 변화는 $I(y) = I_0 \sin[(\omega/c)(h-y)]$ 와 같이 근사 되고 선형 탐침의 두께는 무시한다. 탐침구조로 급전되는 전류에 의해 TE 및 TM모드가 도파관에 발생하는 경우, 전류밀도와 진폭은 다음과 같다[12,13].

$$\vec{J}(y) = I_0 \sin[(\omega/c)(h-y)] \delta(z) \delta(x-X) \hat{y} \quad (11)$$

$$A_{\lambda}^{(\pm)} = -\frac{Z_{\lambda}}{2} \int_V \vec{J} \cdot \vec{E}_{\lambda}^{(\mp)} d^3x \quad (12)$$

또, 단위 시간당 금속 탐침으로 전파되는 전력은 $|A_{\lambda}|^2$ 으로 주어진다.

이때, TE₁₀모드만이 전파되도록 주파수를 선택한다면 E_y만이 식의 적분에 관여하게 된다.

$$E_{y_{mn}} = \frac{2\pi n}{\gamma_{mn} b \sqrt{ab}} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right); TM \quad (13)$$

$$E_{y_{mn}} = \frac{2\pi m}{\gamma_{mn} a \sqrt{ab}} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right); TE \quad (14)$$

$$\gamma_{mn}^2 = \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \quad (15)$$

여기서 m, n는 TE 및 TM모드의 정재파 형태를 나타내기 위한 첨자이며 위의 식을 식 (12)에 대입하면 다음과 같다.

$$A_{mn}^{(+)} = A_{mn}^{(-)} = -K_{mn} \int_0^h \sin\left[\frac{\omega}{d}(h-y)\right] \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{m\pi X}{a}\right) dy \quad (16)$$

$$K_{mn} = \frac{1}{2} I_0 \frac{2\pi n}{\gamma_{mn} \sqrt{ab} b} Z_{mn}^{TM} (TM) \quad (17)$$

$$K_{mn} = \frac{1}{2} I_0 \frac{2\pi m}{\gamma_{mn} \sqrt{ab} a} Z_{mn}^{TE} (TE) \quad (18)$$

여기서, Z_{mn}는 임피던스가 되며 진폭은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$A_{mn}^{(+)} = A_{mn}^{(-)} = -K_{mn} \frac{\omega}{d} \left[\frac{\cos\left(\frac{\omega h}{d}\right) - \cos\left(\frac{n\pi h}{b}\right)}{\left(\frac{n\pi^2}{b^2} - \frac{\omega^2}{d^2}\right)} \right] \sin\left(\frac{m\pi X}{a}\right) \quad (19)$$

이때, 탐침의 삽입 위치는 도파관의 중앙이므로 X = $\frac{a}{2}$ 가 된다. 그러므로 $\sin\frac{m\pi X}{a} = \sin\frac{m\pi}{2}$ 의 상수항이 되고, 가변인수를 탐침의 삽입길이, h로 한정할 때, 전달되는 전력은 다음과 같다.

$$P = A^2 \propto \frac{m}{\gamma_{mn}} \sin\frac{m}{2} \pi \left(\cos\frac{n\pi}{b} h - \cos\frac{\omega}{c} h \right)^2 \quad (20)$$

2.5. HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용한 선형 및 고리형 탐침의 삽입위치에 따른 도파관 공진기 모의실험

도파관 공진기에서 선형 및 고리형 탐침의 삽입 위치에 따라 공진기 내부의 전자계가 바뀌어 공진기 내의 전력 전달 특성과 공진 주파수가 변하게 된다. 그러므로 공진특성을 최대한 이용할 수 있는 동시에 최대전력을 얻기 위한 선형 및 고리형 탐침의 위치 결정은 중요하다.

HFSS의 시뮬레이션을 통해 도파관 내부에서 선형 및 고리형 탐침의 형태에 따른 최대 전력전달 위치를 알아보았다. WR-62 도파관의 규격에 맞도록 a, b, d는 각각 1.58 cm, 0.79 cm, 9.0 cm로 설정하였다. 이때, 시뮬레이션에서 공진기의 벽과 탐침 구조는 완전도체(perfect conductor)로 설정하고 전자계 분포를 구하기 위해 eigen mode solution 방법을 사용하였다[14]. Fig. 4는 섭동이 안 된 도파관 공진기에서 TE₁₀₁모드에 대한 전계 및 자계 분포이다. 공진기의 내부에 E_y를 섭동시키기 위하여 X, Y의 위치는 각각 a/2, b로 고정시키고 Z축을 따라 d/2, d/3, d/4의 위치에 선형 탐침을 각각 삽입하였다.

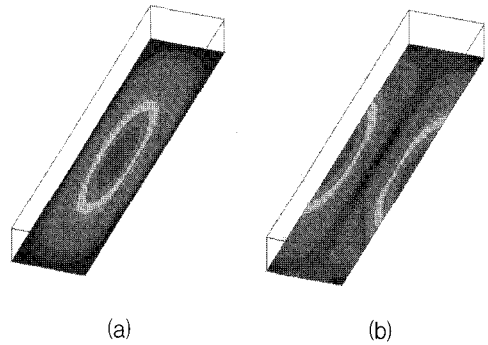


Fig. 4 TE₁₀₁ mode of the cavity unperturbed (a) distribution of E-field and (b) distribution of H-field

Fig. 5는 선형 탐침의 위치에 따라 섭동이 된 공진기의 E_y분포이다. Fig. 5(d)는 도파관의 라인 A를 따라 얻어진 E_y의 세기이며 선형 탐침의 위치가 d/2 지점일 때 E_y의 세기가 가장 컸다. 또한, 공진기의 내부에 H_z를 섭동시키기 위하여 X, Y 위치를 0, b/3에 고정시키고 Z축을 따라 d/2, d/3, d/4의 위치에 고리형 탐침을 각각 삽입하였다.

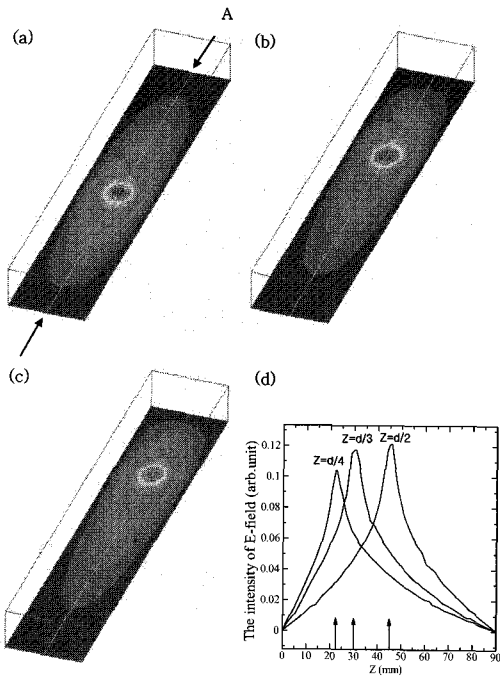


Fig. 5 HFSS simulation result of E-field in linear probe on (a) $z=d/2$, (b) $z=d/3$, (c) $z=d/4$ along by line A and (d) Intensity of E-field along by line A

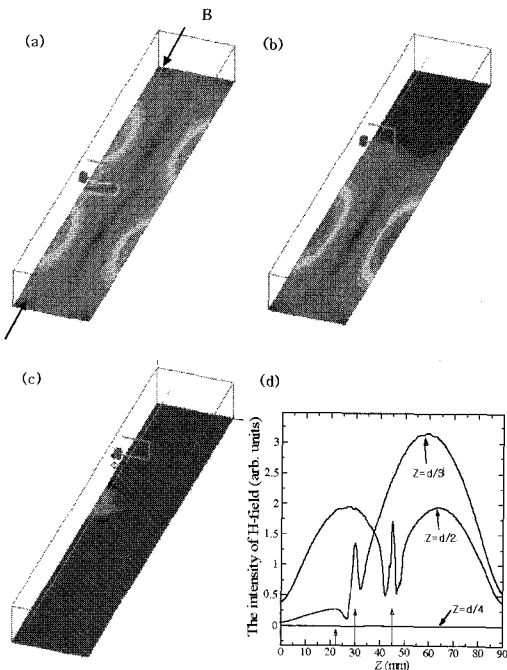


Fig. 6 HFSS simulation result of H-field in coupling loop on (a) $z=d/2$, (b) $z=d/3$, (c) $z=d/4$ along by line B and (d) Intensity of H-field along by line B

Fig. 6은 고리형 탐침의 위치에 따라 섭동이 된 공진기의 H_z 분포이다. Fig. 6(d)는 도파관의 라인 B를 따라 얻어진 H_z 의 세기이며 고리형 탐침이 $d/2$ 위치일 때 H_z 의 세기가 가장 컸다. 선형 및 고리형 탐침 구조를 이용하여 E_y 및 H_z 의 최대 전력전달 위치를 알아보았다. 이것은 도파관 공진기에서 선형 및 고리형 탐침의 위치에 따라 전력전달 특성이 결정되기 때문이다.

3. 장치 구성 및 실험 방법

Fig. 7은 도파관 공진기를 이용한 마이크로파 근접장 현미경 시스템의 개략도이다. 네트워크 어날라이저로부터 마이크로파 소스가 커플링 안테나 (coupling antenna)를 통해 도파관 공진기 내부로 공급되면 공진기 내부에는 전기장 및 자기장이 형성된다. 이때, 공진기 내부의 커플링 선형 및 고리형 탐침을 이용하여 모드를 선택하고 9.5 GHz에서 공진주파수를 갖도록 50 Ω 으로 정합시켰다.

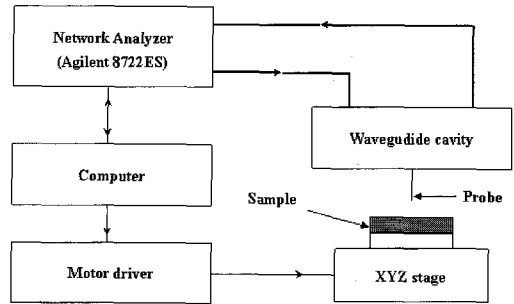


Fig. 7 Basic experimental setup of NSMM using a waveguide resonator

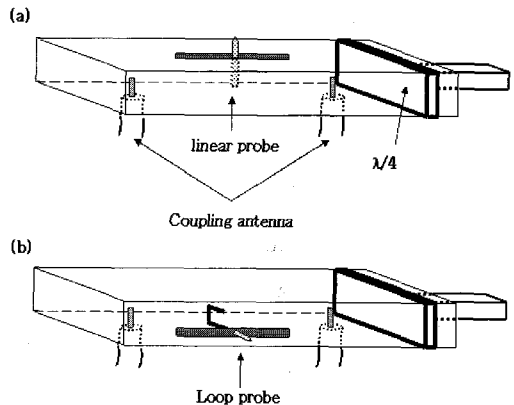


Fig. 8 A structure of tunable waveguide (WR-62) (a) insertion of linear probe to perturb an E_y -field and (b) insertion of loop probe to perturb an H_z -field

Fig. 8은 형태 섭동이 된 도파관 공진기의 구조를 나타낸다. 도파관 공진기는 표준 WR-62 도파관을 사용하였으며 길이는 9.0 cm가 된다. 이때, 내부에 공진이 형성되도록 도파관의 양끝을 막은 후, 여기 시키기 위해 커플링 선형 및 고리형 탐침을 삽입하였다. 그런 다음, 공진이 최대가 되도록 도파관의 한쪽 끝에 $\lambda/4$ 변환기를 연결하였다.

공진기의 내부에 TE_{101} 모드의 E_y 를 섭동시키기 위하여 Fig. 8(a)와 같이 공진기의 윗면에 길이가 5 cm이고 폭이 0.5 mm인 슬롯을 만들어 선형 탐침을 삽입하였다. 또한 TE_{101} 모드의 H_z 를 섭동시키기 위하여 Fig. 8(b)와 같이 공진기의 옆면에 길이가 5 cm이고 폭이 0.5 mm인 슬롯을 만들어 고리형 탐침을 삽입하였다. 그런 다음, 네트워크 어날라이저(Agilent 8722ES)를 이용하여 도파관 공진기에 선형 및 고리형 탐침구조가 삽입된 각각의 위치에서 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정하였다. 그런 다음, 이것을 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

도파관 공진기의 감도[15]를 측정하기 위하여 선형 및 고리형 탐침의 $d/2$, $d/3$, $d/4$ 위치에서 탐침과 시료 사이의 거리변화에 따른 출력파워 변화를 측정하였다. 이를 위해, 도파관 공진기의 커플링 안테나1에는 마이크로파 발생장치(HP83620A)를 연결하고 커플링 안테나2에는 파워미터(HP4378)를 각각 연결하였다. 더불어 물질에 따른 도파관 공진기의 감도특성변화를 알아보기 위하여 서로 다른 유전율을 가지는 teflon, glass, Al_2O_3 , $LaAlO_3$, $SrTiO_3$ 대해 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 선형 및 고리형 탐침의 위치에 따른 공진주파수 변화와 감도

네트워크 어날라이저를 이용하여 실제 도파관 공진기에서 선형 및 고리형 탐침의 삽입위치에 따른 반사계수(S_{11})의 변화를 알아보았다. Fig. 9(a), (b)는 도파관 공진기에서 선형 및 고리형 탐침의 위치가 각각 $d/2$, $d/3$, $d/4$ 위치일 때 얻은 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화이다. 여기서, 선형 및 고리형 탐침이 각각 $d/2$ 위치일 때 마이크로파 반사계수(S_{11}) 값이 가장 작았다. 이것은 선형 탐침에 의한 E_y 의 섭동 결과와 고리형 탐침에 의한 H_z 의 섭동 결과로부터 TE_{101} mode에서 두 탐침이 $d/2$ 위치일

때 공진기로 전달되는 전력이 최대가 된다는 사실을 의미한다. 이러한 결과는 앞서 수행한 HFSS 시뮬레이션 결과와 일치한다.

Fig. 9에서 공진주파수의 변화는 선형 탐침이 $d/2$ 위치일 때 가장 작고 $d/4$ 위치에서 가장 컸다. 반면, 고리형 탐침은 $d/2$ 위치일 때 가장 크고, $d/4$ 위치에서 가장 작았다. 이러한 변화는 형태섭동에 의한 것으로 공진기 내부에 섭동이 발생하면 공진기의 공진 주파수, ω 및 Q 인자가 변한다. 공진주파수의 변화는 아래의 식을 이용하면 설명이 가능하다[12,13,17,18].

$$\Delta \frac{1}{Q} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \approx \frac{\Delta W_m - \Delta W_e}{W_m + W_e} \quad (21)$$

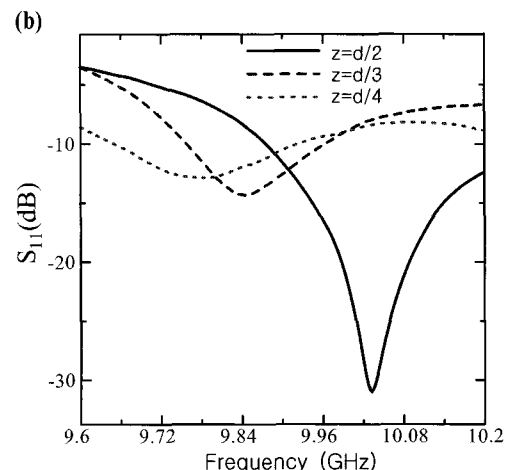
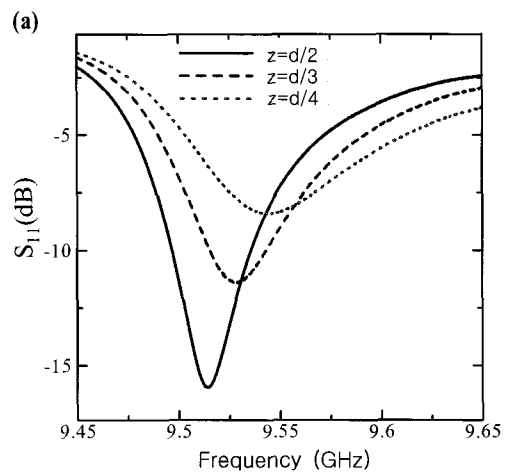


Fig. 9 Measured reflection coefficient S_{11} at insertion position of probe (a) linear probe and (b) coupling loop

위의 식에서 ω_1 와 ω_2 는 각각 형태 섭동이 되
 전, 후의 공진기의 공진주파수이며 W_m 와 W_e 는 각
 각 공진기 내부의 전계 및 자계 에너지가 된다. 식
 (21)에서 선형 탐침이 $d/2$ 위치일 때, 전계 에너지
 의 섭동이 가장 크므로 공진주파수의 변화는 가장
 작다. 반면, 고리형 탐침이 $d/2$ 위치일 때, 자계 에
 너지의 섭동이 가장 크므로 공진주파수의 변화가
 가장 크게 나타난다. 이때, 공진기로 최대전력이 전
 달되므로 선형 및 고리형 탐침을 통해 시료에 전달
 되는 전력도 증가하게 된다.

Fig. 10은 선형 및 고리형 탐침이 각각 $d/2$,
 $d/3$, $d/4$ 위치일 때 금속 탐침과 시료 사이의 거
 리변화에 따른 출력전력의 변화이다. 여기서 선형
 및 고리형 탐침이 $d/2$ 위치일 때 감도가 가장 좋
 았다. 따라서, 도파관 공진기로 전달되는 전력이 커
 짐에 따라 금속 탐침과 시료 사이의 상호작용을 위
 한 탐침의 감도 향상을 기대할 수 있다.

4.2. 유전체 시료에 따른 반사계수(S_{11})

물질에 따른 감도를 알아보기 위하여 서로 다른
 유전율을 갖는 teflon, glass, Al_2O_3 , $LaAlO_3$, $SrTiO_3$
 시료에 대해 마이크로파 반사계수(S_{11}) 변화를 알아
 보았다. 선형 탐침을 이용하여 도파관의 $d/2$ 위치
 에서 최대전력이 전달되도록 11.715 GHz에서 50 Ω
 으로 정합시켰다. 시료와 탐침사이의 거리는 0.1 μ
 m정하고 네트워 어날라이저로 시료의 반사계수
 (S_{11})를 측정하였다. Fig. 11에서 유전율이 증가함에
 따라 마이크로파 반사계수(S_{11})는 증가하고, 공진주
 파수는 약간씩 감소하였다. 여기서, 삽입그림은
 $SrTiO_3$ 을 제외한 시료의 유전율에 따른 공진주파수
 의 변화이다.

시료의 유전율에 따라 도파관 공진기를 섭동시키
 는 양이 달라지므로 공진주파수와 Q인자는 물질에
 따라 변화하는 양이 달라진다. 또한 물질의 유전율
 에 따라 도파관 공진기를 섭동 시키는 양이 달라지
 므로 마이크로파 반사계수(S_{11})와 공진주파수의 변
 화하는 양도 다르게 된다. 반사계수(S_{11})는 시료의
 유전율에 따라 변화하는데, 여기에 전송선로 이론
 을 이용하고 비투자율이 1이라고 가정하면 다음과
 같은 관계식을 얻을 수 있다[16-18].

$$S_{11} = \frac{Z_S - Z_P}{Z_S + Z_P} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (22)$$

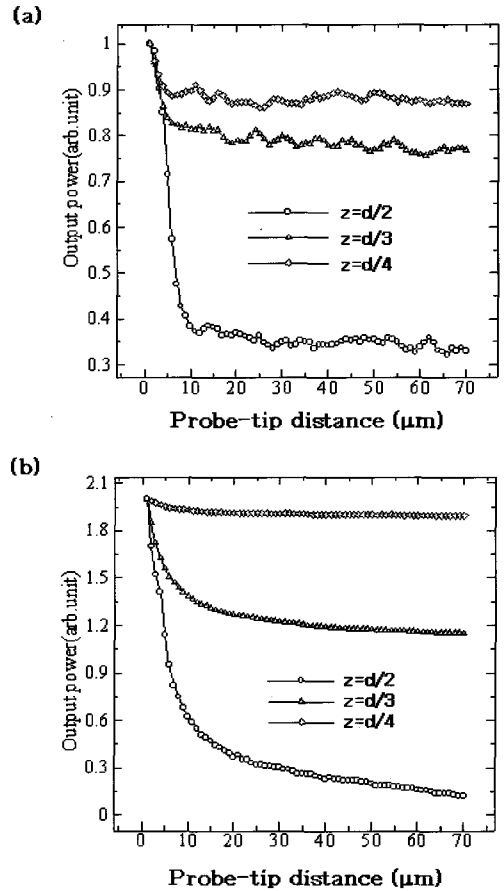


Fig. 10 Output power amplitude of the resonator as a function of tip-sample distance (a) E_y by linear probe and (b) H_z by coupling loop

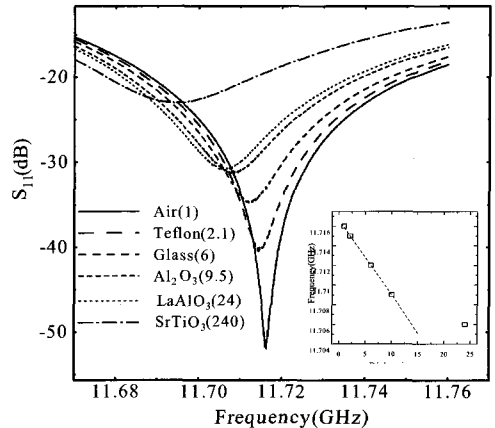


Fig. 11 Measured reflection coefficient S_{11} of different dielectric material samples: air, teflon, glass, Al_2O_3 , $LaAlO_3$ and $SrTiO_3$. The inset shows the frequency vs. dielectric constant of air, teflon, glass, Al_2O_3 and $LaAlO_3$

여기서 Z_s 는 시료의 표면 임피던스, Z_p 는 탐침의 임피던스로 50 옴이다. 그리고 ϵ_r 는 유전체 시료의 유전율이다.

5. 결 론

본 연구에서는 도파관 공진기를 이용한 마이크로파 근접장 현미경에 대해 선형 및 고리형 탐침의 도파관 위치에 따른 특성에 대해 연구하였다. 도파관 공진기의 제작에 앞서 Ansoft사의 HFSS를 사용하여 모드 해석과 함께 공진기에서 선형 및 고리형 탐침의 위치에 따른 전력의 변화에 대해 시뮬레이션 하였다. 이것을 바탕으로 도파관 공진기를 이용하여 공진 주파수가 9.5 GHz인 마이크로파 근접장 현미경을 제작하였다. 이때 HFSS를 통하여 얻은 시뮬레이션 결과는 제작된 도파관 공진기의 실험결과와 일치하였다. 또한 선형 및 고리형 탐침이 d/2 위치일 때 도파관 공진기 내의 전력이 최대가 되고 감도 역시 향상되었음을 확인하였다. 더불어, 유전율이 서로 다른 유전체 시료의 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정 한 결과, 유전율이 증가함에 따라 마이크로파 반사계수(S_{11})는 증가하고 공진주파수는 감소하였다. 이를 통해, 도파관 공진기를 이용한 마이크로파 근접장 현미경의 선형 및 고리형 탐침의 위치에 따른 공진기의 감도 및 공진 특성에 대해 알아보았다.

후 기

본 연구는 서강대학교(2007), 한국과학재단(F01-2004-000-1082-0;R01-2006-000-11227-0), 학술진흥재단(KRF-2005-042-C00058; KRF-2002-005-CS003), 그리고 서울시 연구사업개발프로그램(10816) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] R. S. Aga, S. Yan, Y. Xie, S. Han and J. Z. Wu, "Microwave surface resistance of $HgBa_2CaCu_2O_{6+\delta}$ thin films," Appl. Phys. Lett. Vol. 76, No. 12, pp. 1606-1608, (2000)
 [2] M. M. Mola, J. T. King, C. P. McRaven and S. Hill, "Josephson plasma resonance in k -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$," Phys. Rev. B., Vol.

62, No. 9, pp. 5965-5970, (2000)
 [3] H. Kitano, R. Matsuo, K. Miwa, A. Maeda, T. Takenobu, Y. Iwasa and T. Mitani, "Evidence for insulating behavior in the electric conduction of $(NH_3)K_3C_{60}$ systems," Phys. Rev. Lett., Vol. 88, No. 9, pp. 096401-096404, (2002)
 [4] J. D. Kokales, P. Fouriner, L. V. Mercaldo, V. V. Talanov, R. L. Greene and S. M. Anlage, "Microwave electrodynamics of electron-doped cuprate superconductors," Phys. Rev. Lett., Vol. 85, No. 17, pp. 3696-3699, (2000)
 [5] E. A. Ash and G. Nicholls, "Super-resolution aperture scanning microscope," Nature, Vol. 237, pp. 510-512, (1972)
 [6] T. P. Budka, S. D. Waclawik and G. M. Rebeiz, "A coaxial 0.5-18 GHz near electric field measurement system for planar microwave circuits using integrated probes," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. 44, No. 12(1), pp. 2174-2184, (1996)
 [7] S. Hong, J. Kim, W. Park and K. Lee, "Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator," Appl. Phys. Lett., Vol. 80, No. 3, pp. 524-526, (2002)
 [8] M. Tabib-Azar, D. Akinwande, G. Ponchak and S. R. Clair, "Novel physical sensors using evanescent microwave probes," Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 8, pp. 3381-3386, (1999)
 [9] W. Park, J. Kim and K. Lee, "Millimeter-wave scanning near-field microscope using a resonant waveguide probe," Appl. Phys. Lett., Vol. 79, No. 16, pp. 2642-2644, (2001)
 [10] Grant R. Fowles, Introduction to Modern Optics, Dover, NY, (1975)
 [11] David. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Prentice Hall, NY, (1989)
 [12] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, NY, (1990)
 [13] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons, NY, (1998)

- [14] J. S. Hyde, R. R. Mett and J. R. Anderson, "Cavities with axially uniform fields for use in electron paramagnetic resonance. III. re-entrant geometries," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 73, No. 11, pp. 4003-4009, (2002)
- [15] M. Ohtsu, "Near-field nano/atom optics and technology," Springer-Verlag, Tokyo, (1998)
- [16] A. F. Lann, M. Abu-teir, M. Golosovsky and D. Davidov, "A cryogenic microwave scanning near-field probe: application to study of high-Tc superconductors," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, No. 11, pp. 4348-4355 (1999)
- [17] J. Kim, S. Kim, H. Yoo, J. Yang, H. Yoo, K. Yu, S. Kim and K. Lee, "The study of near-field scanning microwave microscope for the nondestructive detection system," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 508-517, (2004)
- [18] S. Kim, H. Yoo, A. Babajanyan, J. Kim and K. Lee, "A study for a near-field microwave microscope using a tuning fork distance control system in liquid environment," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 339-347, (2007)