

## 튜닝fork 거리조절 센서를 이용한 근접장 마이크로파 현미경의 수중 측정을 위한 연구

### A Study for a Near-Field Microwave Microscope Using a Tuning Fork Distance Control System in Liquid Environment

김송희\*, 유형근\*, Arsen Babajanyan\*, 김종철\*, 이기진\*<sup>†</sup>

Songhui Kim\*, Hyungkeun Yoo\*, Arsen Babajanyan\*, Jongchul Kim\* and Kiejin Lee\*<sup>†</sup>

**초 록** 근접장 마이크로파 현미경을 이용하여 수중에서 시료의 표면이미지에 대한 비파괴적 측정에 관한 연구를 하였다. 이때 근접장 마이크로파 현미경은 3.5-5.5 GHz에서 작동되었다. 본 연구에서는 수중에서 시료의 표면특성을 손상 없이 측정하기 위해 강성힘을 이용한 튜닝fork(tuning fork) 거리조절 시스템으로 팁과 시료 사이의 거리를 10 nm로 유지하였다. 더불어, 공기 및 수중에서 튜닝fork의 진동진폭의 변화와 공진주파수의 변화를 측정하여 수중에서 튜닝fork의 반응특성을 저하시키는 원인에 대해 알아보았다. 물 속에 시료가 충분히 잠기고, 동시에 물의 영향을 최소화하기 위해 팁의 길이를 2 mm로 제작하여 튜닝fork의 한 쪽면에 붙였다. 또한 측정과정에서 나타나는 증발현상을 해소하기 위해 액츄에이터를 이용하여 보충용 수조를 제작하였으며, 보다 정확한 수중측정을 위해 보정프로그램을 응용하였다. 이를 통해, 시료의 공기 및 수중 측정의 가능성을 확인하기 위해 도체시료의 표면특성을 관측하고 비교하였다.

**주요어:** 튜닝fork, 거리조절시스템, 근접장 마이크로파 현미경, 비파괴, 수중측정

**Abstract** We have obtained a topographical image nondestructively for a Cu thin film in liquid using a near-field scanning microwave microscope (NSMM), its operating frequency was 3.5 to 5.5 GHz. We have kept a distance of 10 nm between tip and sample using a quartz tuning fork shear force feedback system. As an end of tip was attached to one prong of the quartz tuning fork has a length of 2 mm, the only tip of tuning fork was immersed in water tank. A loss cause by evaporation in water tank is regulated with actuator was connected to a supplementary tank. Moreover, using a revise program of LabView, we could increase the accuracy of a measurement in liquid.

**Keywords:** Tuning Fork, Shear Force Feedback System, Near-Field Scanning Microwave Microscope (NSMM), Nondestructive, Liquid

#### 1. 서 론

근접장 마이크로파 현미경(NSMM)의 특징은 앞서 개발된 주사현미경(scanning probe microscopy) 및 (scanning tunneling microscope)STM, (atomic

force microscope)AFM[1-9]에 비해 도체, 부도체 저온 및 진공상태 등의 측정환경에 대한 제한조건 없이 폭넓게 응용이 가능하다. 측정장비의 구성 역시 다른 주사현미경기술에 비해 작고, 매우 간단하다. 또한 300 MHz - 300 GHz 영역 내의 마이크로

파 및 밀리미터파를 이용하여 비접촉, 비파괴적인 측정방법으로 시료의 표면구조 연구 및 시료의 전자기적 특성에 대한 연구가 가능하다[10-12]. NSMM에서 팁과 시료 사이의 dipole-dipole 상호작용은 팁이 시료에 근접할수록 강해지지만[12], 시료표면의 특징을 고려하지 않고 팁을 시료에 최대한 접근시킬 경우, 팁이 시료표면과 충돌하여 못쓰게 되거나 시료가 상할 수 있다. 따라서 측정과정 동안 팁과 시료 사이에서 일정거리 유지는 불가피하다. 만약 접촉한다면, 시료의 표면구조에 대한 상세 특징과 시료 내부의 전자기적 특성에 대한 명확한 결과 또한 얻을 수 없다. 그러므로 팁과 시료 사이의 강한 상호작용을 이용하고 동시에 시료표면의 특징을 정확히 읽어내기 위해서는 팁과 시료 사이의 일정거리 유지는 매우 중요하며[10,13] 이는 표면의 전자기적 특성 연구에 있어 반드시 선행되어야 할 연구이다. 이를 위해 튜닝폭 거리조절센서를 이용한 비접촉 거리조절방법을 이용한다[14]. 튜닝폭을 이용한 거리조절센서는 튜닝폭의 한쪽 면에 부착한 팁의 끝단과 시료 사이에서 확인되는 강성힘을 이용하는데 팁과 시료 사이의 일정한 간격을 유지함으로써 시료표면에 대해 비접촉, 비파괴적 측정을 가능하게 한다. 거리조절센서로서 사용되는 튜닝폭은 제작 및 구동방법이 간단하고 동작에 대한 물리적 해석이 가능하므로 정밀도 및 신뢰성을 갖고 있다[15]. 더욱이 NSMM의 분해능은 팁 끝단의 곡률반경이 작아지면 향상될 수 있다[11,12]. 그러므로 팁 끝단에 유도되는 파워를 그대로 유지하면서 곡률반경을 줄일 수 있는 물질에 대한 연구가 선행된다면 나노 이하의 분해능도 기대할 수 있다. 지금까지 튜닝폭 거리조절센서를 이용한 비접촉, 비파괴적 NSMM 연구는 고체시료에 국한되어 시료의 표면구조와 전자기적 특성 연구에 주로 응용되었다. 반면, 생체시료에 대해서는 그 필요성이 강조되어 왔으나 수중에서 보여지는 튜닝폭의 작동한계로 인해 발생하는 많은 문제점을 해결해야 한다[16-19]. 그러나, 생물학적 특성을 갖는 시료의 물리적 특성 연구는 시료가 완충용액 내에서 보존될 때만 가능하다. 그러므로 점막 및 점성 물질로 구성된 시료를 NSMM으로 측정하기 위해서는 공기 중의 고체시료 연구에 적용했던 팁과 시료 사이의 성공적인 거리조절에 대한 응용연구가 완충용액 내에서도 적용되어야 한다. 본 연구에서는 NSMM 측정방법을 수중 측정에 응용하기 위하여 공기 및 수중

에서 튜닝폭의 특성변화를 관찰하고 보정하였으며 수중 측정시 발생할 수 있는 문제점에 대한 해결책을 모색하였다. 나아가 액체표면에 대한 거리조절의 가능성을 알아보기 위해 유리 기판 위의 물방울이 갖는 표면이미지를 측정하고 생물학적 특성을 갖는 시료의 환경조건이 되는 수중에서 도체시료의 표면구조특성에 관하여 연구하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 섭동 이론

공진기 내부에 형성된 전자계는 내부 캐버티의 부피변화에 의해 섭동 된다. 또한 캐버티 내에 유전체 조각이나 금속물질이 삽입되어도 매질변화가 일어나 공진기 내부의 전자계와는 다른 전자계로 섭동 된다. 공진기 내부에 섭동이 발생하면 공진기의 공진 주파수,  $\omega$  및 Q 인자가 변한다. 공진기 내부의 전기장 및 자기장이 변하면 전계에너지 및 자계에너지의 변화를 초래하여  $\omega$  및 Q 인자는 변하게 된다. NSMM 측정장치는 매질에 의한 섭동을 이용하였다. 공진기에 마이크로파 신호가 입력되면 내부에는 전기장 및 자기장의 전자계가 형성된다. 전자계는 캐버티의 크기 및 유전체의 유전율에 의하여 결정되며 주파수 영역에 걸쳐 나타났다. 공진기는 유전체와 커플링 루프에 따라 특정 주파수 대역에서 반응 특성을 보이며  $\omega$  및 Q 인자를 갖는다. 이때 공진기 내부의 전자계는 팁을 통해 전달되어 시료와 반응한다. 시료의 전자기적 신호가 팁을 통해 공진기 내부의 전자계에 섭동을 유발하였다. 시료의 전자기적 신호는 공진기 내의 전자계에 유전율,  $\epsilon$  및 투자율,  $\mu$ 에 변화를 일으키고  $\omega$  및 Q 인자의 변화를 가져왔다. 캐버티 내부를 채우는 물질의  $\epsilon$  및  $\mu$ 는 시료의 전자기적 신호에 의해 각각  $\epsilon + \Delta\epsilon$  및  $\mu + \Delta\mu$ 로 변한다. 이때, 캐버티 내부에 형성되어 있던 원래의 전자계  $\vec{E}_1$  및  $\vec{H}_1$ 는 각각  $\vec{E}_2$  및  $\vec{H}_2$ 로 섭동 된다. 그 결과로 나타나는  $\omega$  및 Q 인자의 변화는 캐버티 내의 전계에너지 및 자계에너지의 변화와 상관관계가 있다. 공진기 내부의 매질 변화로 인한 섭동은 맥스웰 방정식에 의해 다음과 같이 유도될 수 있다[20].

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{\int_{V_0} (\Delta\epsilon \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* + \Delta\mu \vec{H}_2 \cdot \vec{H}_1^*) dv}{\int_{V_0} (\epsilon \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* + \mu \vec{H}_2 \cdot \vec{H}_1^*) dv} \quad (1)$$

여기서  $\bar{E}_1$  와  $\bar{H}_1$  는 섭동전의 공진기의 전기장 및 자기장이고  $\bar{E}_2$  와  $\bar{H}_2$  는 섭동후의 전기장 및 자기장이다. 식 (1)의  $\Delta\varepsilon$  및  $\Delta\mu$ 의 값이 아주 작다면  $\bar{E}_2$ ,  $\bar{H}_2$ ,  $\omega_2$ 는  $\bar{E}_1$ ,  $\bar{H}_1$ ,  $\omega_1$ 과 거의 같아서 섭동전의 값으로 근사화시킬 수 있다.

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \approx \frac{\int_{V_0} (\Delta\varepsilon |\bar{E}_1|^2 + \Delta\mu |\bar{H}_1|^2) dv}{\int_{V_0} (\varepsilon |\bar{E}_1|^2 + \mu |\bar{H}_1|^2) dv} \quad (2)$$

공진기 내부의 전계에너지 및 자계에너지는 각각 다음과 같다.

$$W_e = \int_{V_0} \frac{\varepsilon}{2} |\bar{E}_1|^2 dv = \frac{\varepsilon}{2} |\bar{E}_1|^2 \quad (3)$$

$$W_m = \int_{V_0} \frac{\mu}{2} |\bar{H}_1|^2 dv = \frac{\mu}{2} |\bar{H}_1|^2 \quad (4)$$

이때, 공진기는 전계에너지 및 자계에너지의 손실이 없는 완벽한 도체라고 한다면  $W=W_e=W_m$ 이 되며,  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 이라 할 때 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta\omega &\approx \frac{\omega_1 \int_{V_0} \left( \Delta\varepsilon \frac{2}{\varepsilon} W + \Delta\mu \frac{2}{\mu} W \right) dv}{4W} \\ &\approx \frac{\omega_1}{2} \int_{V_0} \left( \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta\mu}{\mu} \right) dv \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 캐버티 내의  $\varepsilon$  및  $\mu$ 의 증가는 공진주파수,  $\Delta\omega$ 를 감소시킨다. 섭동과정에서 공진기 내의 에너지의 변화는  $\varepsilon$  및  $\mu$ 에 따라 변화한다.  $\Delta\omega$ 의 감소는 섭동된 캐버티에 저장된 전자기 에너지의 증가와 관련이 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다[21].

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 \int (\Delta\mu H_1^* \cdot H_2 + \Delta\varepsilon E_1^* \cdot E_2) dv - i \int (E_1^* \cdot J_2 + E_2 \cdot J_1^*) dv}{\int (\mu H_1^* \cdot H_2 + \varepsilon E_1^* \cdot E_2) dv} \quad (6)$$

여기서  $\bar{E}_1$  와  $\bar{H}_1$  는 섭동전의 공진기의 전기장 및 자기장이고  $\bar{E}_2$  와  $\bar{H}_2$  는 섭동후의 전기장 및 자기장이다. 식 (1)의  $\Delta\varepsilon$  및  $\Delta\mu$ 의 값이 아주 작다면  $\bar{E}_2$ ,  $\bar{H}_2$ ,  $\omega_2$ 는  $\bar{E}_1$ ,  $\bar{H}_1$ ,  $\omega_1$ 과 거의 같아서 섭동전의 값으로 근사화시킬 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 \int (\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\varepsilon |E_1|^2) dv - i \int (E_1^* \cdot J_2 + E_2 \cdot J_1^*) dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \varepsilon |E_1|^2] dv} \quad (7)$$

여기서 섭동전에 유도되는 자유전류( $J_1$ )는 '0'이 되고 섭동후 유도되는 자유전류( $J_2$ )는 magnetization ( $J_M$ ) 전류와 polarization( $J_P$ ) 전류로 나누어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_2 = J_M + J_P = \nabla \times M_2 + P_2 \quad (8)$$

이것을 식 (7)에 적용하면 다음과 같다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 \int [\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\varepsilon |E_1|^2] dv - i \int [E_1^* \cdot (\nabla \times M_2) + E_1^* \cdot P_2] dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \varepsilon |E_1|^2] dv} \quad (9)$$

식 (9)의  $E_1^* \cdot (\nabla \times M_2)$ 는  $\nabla \cdot (A \times B) = B \cdot \nabla \times A - A \cdot \nabla \times B$ 를 이용하면  $E_1^* \cdot (\nabla \times M_2) = M_2 \cdot (\nabla \times E_1^*) - \nabla \cdot (E_1^* \times M)$ 로 쓸 수 있고 여기에 맥스웰 방정식( $\nabla \times E_1^* = -i\omega B_1^*$ )을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 \int [\Delta\mu |H_1|^2 + \Delta\varepsilon |E_1|^2] dv + \int [\omega_2 M_2 \cdot B_1 + i P_2 \cdot E_1^*] dv}{\int [\mu |H_1|^2 + \varepsilon |E_1|^2] dv} \quad (10)$$

여기서  $M_2$ 는 시료의 magnetization이고  $P_2$ 는 시료의 polarization( $P_2 = \alpha E_1^*$ )이다. 이것은 팁 끝단의 쌍극자와 시료의 쌍극자 사이의 상호작용에 의해 유도된다.  $\alpha$ 는 편극률이고  $E_1^*$ 는 공진기로부터 팁 끝단에 유도되는 전기장이다. 동시에 팁 끝단에 유도된  $E_1^*$ 에 의해 시료에 쌍극자가 유도되고 이 시료의 쌍극자에 의해 다음과 같은 전기장이 팁 끝단에 다시 유도된다.

$$E_1'' = [3\hat{d}(\hat{d} \cdot P_2) - P_2] \frac{1}{d^3} \quad (11)$$

이러한 팁 끝단에서의 변화는 공진기 내의 커플링 루프를 통하여 공진기 내부의 전기장과 자기장에 섭동을 유발한다. 또한 공진기 내의 유전율과 투자율의 변화는 공진기의 공진주파수의 변화를 초래하였다. 이때, 주파수의 변화가 공진기의 Q 인자

의 변화이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \frac{1}{Q} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \quad (12)$$

## 2.2. 팁 끝단에 맺히는 전기장과 튜닝폭 거리조절 장치

NSMM에서는 공진기로부터 튜닝폭의 한쪽 prong에 부착한 팁 끝단에 유도되는 전기장을 이용한다. 예를 들어, 팁 끝단의 쌍극자와 시료의 쌍극자가 갖는 전하를 각각  $q_t$ ,  $q_s$ 라 하고 두 쌍극자 사이의 거리를  $R$ 이라고 할 때 쌍극자에 의한 전기장은 다음의 관계식으로 구해질 수 있다[12,22,23].

$$E_z = \frac{q_t q_s}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad (13)$$

여기서 팁 끝단에 발생하는 전기장은  $R^3$ 에 반비례한다. 거리조절센서로서 튜닝폭은 외력을 받는 단진동 모델에 적용하면 설명이 가능하다. 이 경우, 운동방정식을 이차 미분 방정식의 형태로 나타낼 수 있다[15, 24].

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + F_D + kx = F e^{i\omega t} \quad (14)$$

여기서  $x(t)$ 는 튜닝폭의 팁 끝단의 위치이고  $m$ 은 튜닝폭의 한쪽 prong에 해당하는 유효질량이다. 그리고,  $F$ 는 교류전류를 걸어준 튜닝폭에 작용하는 외력이고  $k$ 는 튜닝폭의 갈라진 한쪽 부분의 유효탄성계수이며  $\omega$ 는 외력의 구동 진동수를 나타낸다. 이때  $F_D$ 는 일종의 저항력으로서 튜닝폭에 작용하는 모든 힘의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_D = m\beta\omega_0 \frac{\partial x}{\partial t} \quad (15)$$

위 식에서  $\beta$ 는 viscous 상수이고  $\omega_0$ 는 시스템의 공진주파수이다. 식 (14)의 해를 구하면 아래와 같다.

$$x(t) = A(\omega)e^{i\omega t} \quad (16)$$

이때, 진폭  $A(\omega)$ 는 다음과 같다.

$$A(\omega) = \frac{F/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \beta^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (17)$$

위 식에서 진폭이 최대가 되는 주파수  $\omega$ 와  $Q$  인자를 계산하면 아래와 같다[10,11].

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\beta^2 \omega_0^2}{2}} \quad (18)$$

$$Q = \frac{1}{\beta} \quad (19)$$

시료표면에 팁을 접근시키면 튜닝폭에 작용하는 외력이 증가하여 viscous 상수,  $\beta$ 는 증가하고  $Q$  인자는 감소하게 된다. 일반적으로  $Q$  인자는 시스템이 갖는 공진주파수와 대역폭의 비로 다음과 같이 표현한다.

$$Q = \frac{f}{\Delta f} \quad (20)$$

이것은 공진이 이루어졌을 때 시스템에 모이는 총 에너지와 이때 한 사이클당 소비되는 에너지의 비로 나타낼 수 있다. 튜닝폭을 감싸고 있는 외부 껍질을 벗겨내면 외부 환경에 노출되어 튜닝폭에 작용하는 외력  $F_D$ 가 증가하게 된다. 식(13)에 따라 늘어난 외력은  $\beta$ 의 증가로 볼 수 있으며, 이때 식 (16), (17)에 따라  $Q$  인자 및 공진주파수는 감소하게 된다. 외부껍질을 벗겨내고 튜닝폭의 한쪽 prong에 팁을 부착하면 viscous 상수  $\beta$ 와 함께 유효질량  $m$ 이 증가하게 되므로 튜닝폭이 받는 외력  $F_D$ 는 더욱 증가하게 된다. 이 경우 보다 큰 폭으로  $\beta$ 가 증가하여 에너지 손실은 커지고  $Q$  인자와 공진주파수는 더욱 감소한다.

## 3. 공기 및 수중 측정을 위한 NSMM의 장치 구성 및 실험 실험방법

Fig. 1은 공기 및 수중 측정을 위한 NSMM 장치의 개략도이다. 기본측정 장비인 네트워크 어날라이저(Agilent 8722ES)는 유전체 공진기에 마이크로파 신호를 보내주고 공진기로부터 반사되는 신호를 받아 분석한다. 반송신호에 대한 분석결과는 네트워크 어날라이저의 log-magnitude창을 통해 주파수 영역에서 반사계수( $S_{11}$ )의 형태로 출력된다. 이때, 주파수와 반사계수 크기의 변화는 시료와의 상호작용으로 인한 마이크로파 특성변화를 의미한다. Fig. 1에서 높은  $Q$  인자를 갖는 유전체 공진기[25-27]는 네

트워 어날라이저로부터 마이크로파 신호를 받아 공진기 내부에 전기장 및 자기장을 형성한다. 공진기의 내부 캐버티는 반경이 17.5 mm이고, 높이가 20 mm인 원기둥 형태를 갖는다. 캐버티는 신호의 반사율을 향상시키기 위해 은도금으로 처리되었다. 캐버티의 정 중앙에는 직경이 13.65 mm이고, 높이가 6.2 mm인 원기둥 모양의 유전체가 위치한다. 유전체의 유전율은 29이고 Ba(ZrTa)O<sub>3</sub>로 이루어졌다. 본 연구에서는 TE mode[20]를 선택하고 공진기 내부에 전기장의 효과를 극대화시켰다. 이때, 공진기는 3.5-5.5 GHz에서 작동되도록 설계하였다. 공진모드를 선택하기 위해 유전체를 정 중앙에 위치시키고 커플링 루프를 만들어 내부에 삽입하였다. 공진기 내부에 삽입한 커플링 루프는 지름이 1.2 mm이고 길이가 25.5 mm의 99 % Cu선으로 만들었다. 커플링 루프는 공진기 외부의 네트워크 어날라이저 케이블 포트와 연결되어 공진기 내부에 마이크로파를 공급한다. 또한 공진기 내부에 전기장 및 자기장의 형성에 영향을 주며, 공진기 내부의 전자계의 변화를 네트워크 어날라이저에 전달한다. 공진기 내부의 유전체는 외부로부터 나사가 연결되어 내부 캐버티에서 상하 위치조절이 가능하게 만들었다. 공진기의 튜닝은 각각 외부로부터 공진기와 유전체에 연결된 나사 2개로 이루어진다. 이를 이용하여 공진 주파수에서 최대 Q 값을 갖도록 50 Ω으로 정합시켰다. 팁은 공진기 내부의 효과를 시료에 전달해주고 이들의 상호작용으로 나타나는 변화를 공진기 내부로 전달한다. Fig. 1과 같이 튜닝폭(모델명: CFS-308, [28])을 공진기 외부에 부착하여 내부의 전자계 효과가 튜닝폭에 부착된 팁을 따라 외부로 흘러나오게 만들었다. NSMM에서 팁이 부착된 튜닝폭은 거리조절센서 역할을 한다. 이때, 팁은 직경이 50 μm인 강철선(SUS-304 wire)으로 만들었다. 그리고, 고 분해능의 효과를 얻을 수 있는 뾰족한 팁을 만들기 위해 다음과 같이 전기, 화학적 식각 처리를 했다. KOH와 물의 부피 비가 1:4인 용액에 강철선의 한쪽 끝을 담그고 약 5분간 5 V의 전압을 걸어줬다. 강철선에 붙은 불순물은 5% HCl 용액에 담갔다가 99.5% 알코올 용액과 증류수로 세척해서 제거했다. 이렇게 만들어진 팁을 32.768 kHz에서 고유주파수를 갖는 튜닝폭의 한 쪽 면에 접착제로 부착하여[15] Fig. 2(a)와 같이 제작하였다. 그리고 튜닝폭을 작동시키기 위해 락인앰프(EG&G 7265)의 signal channel menu-current input mode

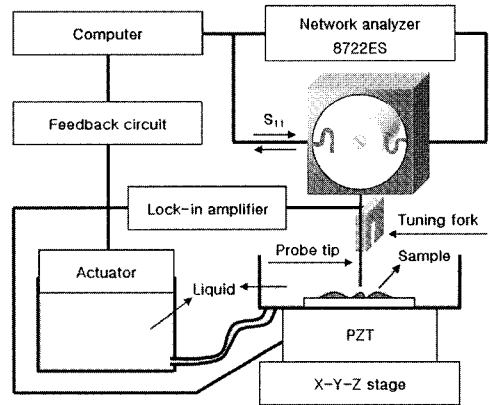


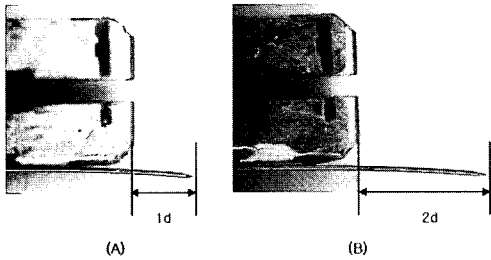
Fig. 1 Near-field scanning microwave microscope for measurement in water

를 이용하여 3 μA의 교류전류를 인가하였다. 팁과 시료 사이의 일정거리 조절은 튜닝폭의 특성 변화를 락인앰프로 측정하고 여기에 튜닝폭 거리조절센서를 응용하여 팁과 시료와의 거리를 1 mm로 고정시켰다. 더불어 측정과정에서 나타나는 물의 증발 현상을 막기 위해 보충용 수조를 제작하였다. 물방울의 표면 관측에서는 유리 기판에 물방울 200 μl를 떨어뜨린 후, 기본 단위를 300 μm로 정하고 물방울의 표면으로부터 팁까지 일정거리를 유지하며 표면을 관측하였다. 도체시료에 대한 공기 및 수중 측정에서는 공기 중에서 시료에 대해 마이크로파 반사계수(S<sub>11</sub>)를 얻어 물질에 따른 전자기적 특성변화를 확인하였다. 그런 다음, 기본 단위를 4 μm로 정하고 (100×100) μm<sup>2</sup> 영역에 대해 시료의 표면적 특징을 공기 및 수중에서 같은 조건으로 측정하였다. 수중측정의 경우, 보정 프로그램을 이용하여 같은 영역에 대해 다시 측정하고 그 결과를 이전 결과와 비교하였다.

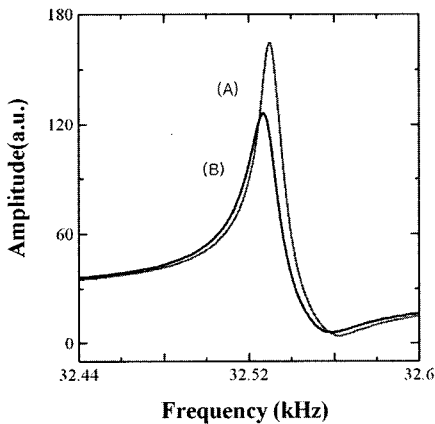
#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수중 측정에 적당한 튜닝폭 거리 조절센서를 제작하기 위해 튜닝폭이 받는 물의 저항을 최소화하면서 시료가 물 속에 충분히 잠길 수 있게 하기 위해 길이가 다른 팁을 제작하여 각각의 특성을 관찰하였다. 이때, 팁의 길이에 따른 튜닝폭의 특성변화를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 팁의 길이가 1 mm일 때, 공진주파수와 Q는 각각 32.5268 kHz, 1478.50이었고 팁의 길이가 2 mm일 때에 공진주파

수와 Q는 각각 32.53 kHz, 1478.64였다. 이러한 결과로부터 튜닝폭의 특성은 튜닝폭의 한쪽 면에 부착한 팁의 길이가 길어짐에 따라 질량  $m$ 이 증가함으로써 외력,  $F_D$ 가 증가하지만  $m$ 이 충분히 크지 않다면  $m$ 으로 인한 외력의 증가보다는 튜닝폭의 제작방법이 특성에 더 큰 영향을 준다는 것을 Fig. 2(b)의 결과로부터 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 길이가 2 mm인 팁을 사용하여 수중측정에 응용하였다. Fig. 3의 삽입 그림을 보면, 거리조절 센서를 작동시켜 시료의 표면에 접근시키면 튜닝폭의 진동진폭이 감소하게 된다. 이는 튜닝폭의 거리조절센서의 진동운동을 방해하는 방향으로 강성힘이 작용하였기 때문이다. 또한, 공기 중과는 달리 물 속에서 튜닝폭의 반응특성이 크게 감소하였다. 이는 튜닝폭의 한쪽 면에 붙인 팁을 물 속에 담그면 팁을 둘러싸고 있는 물 분자의 강한 응집력에 의해 물의 저항이 튜닝폭의 반응특성을 저하시키는



(a) Tuning fork with probe tip ( $d=1\text{ mm}$ )



(b) Resonance frequency of tuning fork with probe tip

Fig. 2 Properties of the tuning forks with probe tip of different lengths

요인으로 작용했기 때문이다. Fig. 3으로부터 물의 영향이 커질수록 거리조절센서의 반응특성이 점점 감소함을 알 수 있다. 튜닝폭 거리조절센서의 액체 표면에 대한 거리조절한계를 알아보기 위해 Fig. 4와 같이 유리 위에 물방울을 떨어뜨리고 빠른 시간 내에 그 표면을 스캐닝하였다. Fig. 5은 떨어뜨린 물방울의 표면구조이미지 결과이다. 스캐닝 영역은  $(3600 \times 2700)\ \mu\text{m}^2$ 이며, 얻어진 이미지로부터 물방

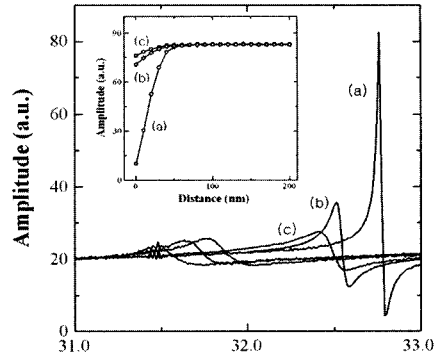


Fig. 3 Amplitude of tuning fork signal as function of the driving frequency with a probe tip (a) in air, (b) in water, and (c) at a prong in water

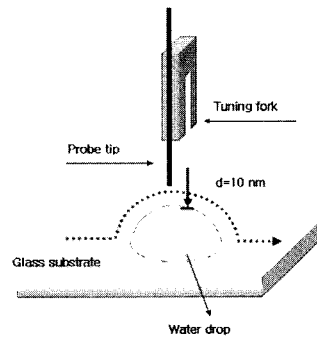


Fig. 4 Scanning process using the tuning fork distance control system

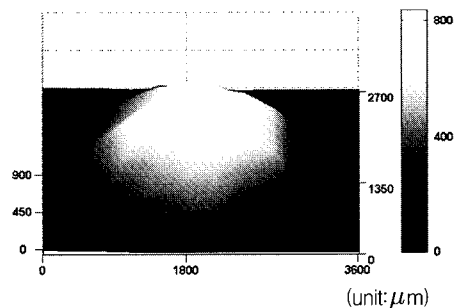


Fig. 5 A topographic image of a drop of water on glass substrate

울의 크기는 가로 약 2400  $\mu\text{m}$ , 세로 약 2700  $\mu\text{m}$ , 높이 785.19  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 이용된 거리조절센서가 액체 표면에 대해서도 일정거리를 두고 비접촉, 비파괴적 측정연구가 가능함을 보여준다. Fig. 6은 공기 중에서 도체 시료의 전자기적 특성결과를 나타낸다. Fig. 6에서 반사계수(a)와 (b)는 구리 및 BCB 저유전 물질에 대한 반사계수( $S_{11}$ ) 측정결과를 의미한다. 시료의 구성물질에 따른 전기전도도 및 유전율의 변화에 따라 서로 다른 마이크로파 반사계수( $S_{11}$ )값을 보였다. Fig. 7(a)는 공기 중에서 얻은 도체시료의 표면구조이미지 결과로서 스캐닝 영역은  $(80 \times 80) \mu\text{m}^2$ 이며 시료의 표면구조특징을 그대로 보여준다. Fig. 7(b)는 공기 중의 측정 조건을 그대로 수중 측정에 적용했을 때 얻어진 도체시료의 표면구조이미지이다. 이 경우, 물의 저항으로 인해 튜닝폭의 반응 특성이 크게 감소하고 탐과 시료 사이의 일정거리조절이 제대로 이루어지지 않아 시료의 표면적 특징을 정확하게 측정할 수 없었다. Fig. 7(c)는 수중에서 물의 저항으로 인한 손실을 보상하기 위한 보정 프로그램을 이용하여 얻은 표면구조이미지로 공기 중에서 얻은 결과에 상응하는 측정결과를 보여준다. Fig. 7(c)와는 달리 Fig. 7(b)의 경우, 측정과정에서 발생하는 증발현상이 측정조건을 바꿔버리는 원인으로 작용하여 수중 측정을 더욱 어렵게 만들었다. 따라서 Fig. 7(c)에서는 이러한 손실을 보상하기 위해 보충용 수조를 통해 물을 보충하였다. 또한, 물의 저항으로 인한 튜닝폭의 반응특성 손실을 보상하고 탐과 시료 사이의 일정거리조절이 이루어지도록 새로운 측정조건을 적용한 보정 프로그램을 이용하였다.

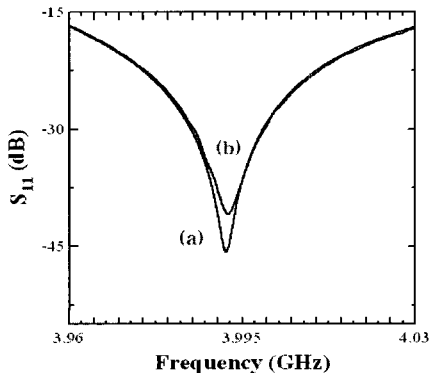


Fig. 6 Reflection coefficient  $S_{11}$  of (a) Cu and (b) BCB of a metal on silicon substrate

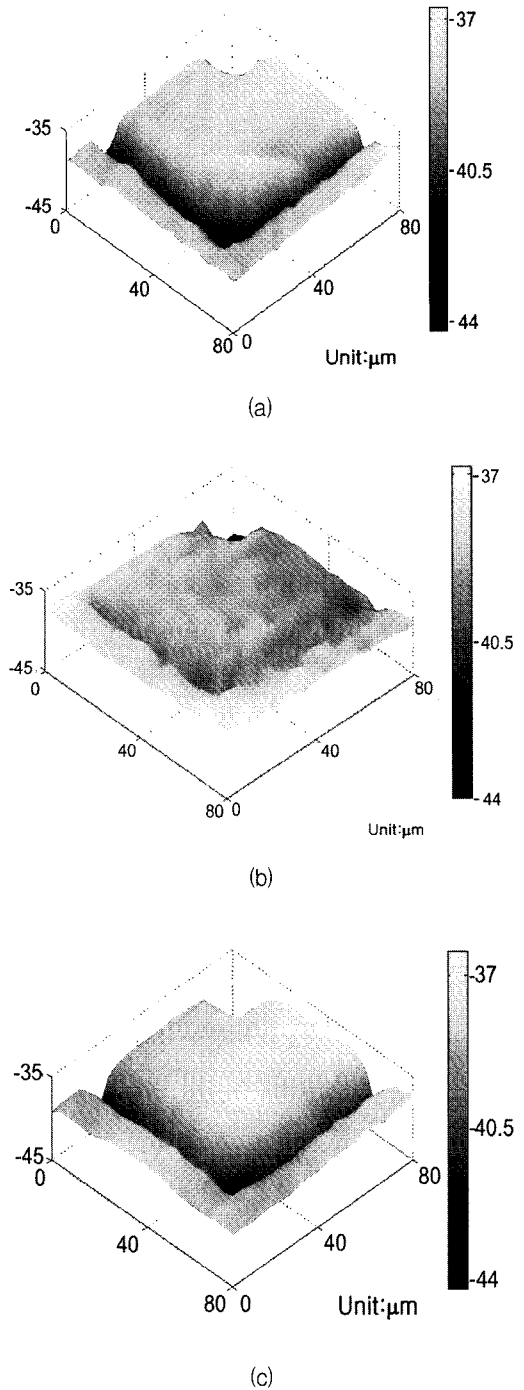


Fig. 7 Topographic surface images (a) in air, (b) in liquid, and (c) correcting the set point of the tip-sample distance in liquid of metal on silicon substrate

## 5. 결론

본 연구에서는 수중에서 비접촉 NSMM 기술에 대해 수중측정이 불가피한 생물학적 시료의 특성검침센서로서의 응용가능성에 대해 알아보았다. 이를 위해, 근접장 마이크로파 현미경(NSMM)에서 팁의 길이에 따른 튜닝폭 거리조절센서의 반응 특성변화와 팁에 대한 물의 영향에 따른 튜닝폭의 진동진폭의 크기변화도 함께 측정하였다. 그 결과로서 팁에 대한 물의 영향이 커질수록 팁은 물분자의 강한 응집력에 의한 저항을 더 크게 받았다. 또한 거리조절센서를 작동시켜 물 속의 시료표면에 접근시키면 튜닝폭의 운동을 방해하는 방향으로 작용하는 강성힘이 더해져 튜닝폭의 진동진폭은 눈에 띄게 감소하였다. 본 연구에서는 물의 영향이 팁에 직접 가해지지 않도록 팁의 길이를 충분히 길게 2 mm로 제작하고 증발현상으로 인한 손실을 보정하기 위해 액츄에이터가 부착된 보충용 수조를 제작하였다. 더불어, 물의 저항으로 인한 튜닝폭의 반응특성 손실을 보상하고 팁과 시료 사이의 일정거리조절이 이루어지도록 새로운 측정조건을 적용한 보정 프로그램을 이용하였다. 이를 통해, 수중에서 공기중의 측정결과에 상응하는 결과를 얻을 수 있었다 따라서, 수중 측정이 불가피한 생물학적 시료의 물리적 특성 측정연구에 NSMM 측정방법이 응용될 수 있을 것이라 생각 된다.

## 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] E. Meyer, H. J. Hug and R. Bennewitz, Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip, Berlin: Springer, (2004)
- [2] R. Wiesendanger, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications, Cambridge: Cambridge University Press, (1994)
- [3] R. Wiesendanger, Scanning Probe Microscopy : Analytical Methods, Berlin: Springer-Verlag, (1998)
- [4] D. A. Bonnell, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications, New York; Chichester: Wiley-VCH, (2001)
- [5] D. A. Bonnell, Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications, Philadelphia: VCH, (1993)
- [6] M. Yamashita, H. Shigekawa and R. Morita, Mono-Cycle Photonics and Optical Scanning Tunneling Microscopy, Berlin: Springer, (2004)
- [7] D. Sarid, Scanning Force Microscopy: with Applications to Electric, Magnetic, and Atomic Forces, Oxford University Press, (1994)
- [8] S. H. Cohen, M. T. Bray and M. L. Lightbody, Atomic Force Microscopy/ Scanning Tunneling Microscopy, New York: Plenum, (1994)
- [9] Sergei N. Magonov and Myung-Hwan Whangbo, Surface Analysis with STM and AFM ; Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis, VCH, (1996)
- [10] M. Kim, S. Kim, J. Kim, K. Lee, B. Friedman, J. Kim and J. Lee, "Tip-sample distance control for near-field scanning microwave microscopes," Rev. Sci. Instrum., Vol. 74, No. 8, pp. 3675, (2003)
- [11] M. Kim, J. Kim, H. Kim, S. Kim, J. Yang, H. Yoo, S. Kim and K. Lee, "Nondestructive high spatial resolution imaging with a 60 GHz near-field scanning millimeter-wave microscope," Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, No. 3, pp. 684, (2004)
- [12] 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, (2004)



- [13] D. N. Davydov, K. B. Shelimov, T. L. Haslett and M. Moskovits, "A near-field scanning optical microscope with a high Q-factor piezoelectric sensing element," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 75, pp. 1796, (1999)
- [14] A. G. T. Ruiter, J. A. Veerman, K. O. van der Werf and N. F. van Hulst "Dynamic behavior of tuning fork shear-force feedback," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 71, pp. 28, (1997)
- [15] K. Karrai and R. D. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 66, pp. 1842, (1995)
- [16] P. J. Moyer and S. B. Kammer, "High-resolution imaging using near-field scanning optical microscopy and shear force feedback in water," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 68, pp. 3380, (1996)
- [17] W. H. J. Rensen, N. F. van Hulst and S. B. Kämmer "Imaging soft samples in liquid with tuning fork based shear force microscopy," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 77, pp. 1557, (2000)
- [18] M. Koopman, B. I. de Bakker, M. F. Garcia-Parajo and N. F. van Hulst, "Shear force imaging of soft samples in liquid using a diving bell concept," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 83, No. 24, pp. 5083, (2003)
- [19] S. Kim, H. Yoo, K. Lee, B. Friedman, M. A. Gaspar and R. Levicky, "Distance control for a near-field scanning microwave microscope in liquid using a quartz tuning fork," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 86, pp. 153506, (2005)
- [20] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons INC., (1998)
- [21] R. J. Ormeno, D. C. Morgan, D. M. Broun, S. F. Lee and J. R. Waldram, *Rev. Sci. Instrum.* 68 2121, (1997)
- [22] M. Ohtsu, H. Hori *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology*, Springer (1998)
- [23] H. M. Altshuler, *Handbook of Microwave Measurements II*, Polytechnic Institute of Brooklyn, NY, (1963)
- [24] H. Goldstein, *Classical Mechanics*, Addison-Wesley, (1986)
- [25] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Noble publishing Co., Atlanta, (1998)
- [26] J. Kim, M. Kim, H. Kim, D. Song, B. Friedman and K. Lee, "Improving images form a near-field scanning microwave microscope using a hybrid probe," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 1026, (2003)
- [27] S. Kim, Y. Yoon, A. Babajanyan, J. Kim, and K. Lee, "Sodium chloride sensing by using a near-field microwave microprobe," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 1, pp. 23, (2007)
- [28] <http://www.citizen.co.jp/english/crystal/index.html>