

비접촉 근접장 마이크로파 현미경을 이용한 NaCl 용액의 농도 측정

Concentration of Sodium Chloride Solutions Sensing by Using a Near-Field Microwave Microprobe

김송희, 윤영운, Arsen Babajanyan, 김종철, 이기진[†]

Songhui Kim, Youngwoon Yoon, Arsen Babajanyan, Jongchul Kim and Kiejin Lee[†]

초 록 본 연구에서는 근접장 마이크로파 현미경을 이용하여 NaCl 용액의 농도검출센서로의 응용 가능성에 대해 알아보았다. 근접장 마이크로파 현미경은 높은 Q 인자를 갖는 유전체 공진기를 이용하여 고감도 특성을 갖는다. 측정과정에서 탐침이 액체 시료표면에 근접했을 때 발생할 수 있는 표면장력의 영향을 피하기 위해 튜닝폭 피드백시스템을 이용하여 탐침과 시료 사이의 거리를 $1\mu\text{m}$ 로 유지하였다. 측정은 4GHz에서 이루어졌으며 NaCl 용액의 농도 변화, 농도 및 온도 변화, 부피 변화에 따른 마이크로파 반사계수(S_{11})을 관측하여 농도를 측정하였다. 또한 선택적 반응 감도 특성을 알아보기 위하여 NaCl과 글루코스의 혼합용액에서 글루코스의 농도 및 NaCl 용액의 농도를 관측하였다.

주요어: 근접장 마이크로파 현미경, 유전체 공진기, 튜닝폭 피드백 시스템, 마이크로파 반사계수(S_{11})

Abstract We observed the NaCl concentration of solutions using a near-field microwave microprobe(NFMM). Instead of the usual technique, we take advantage of the noncontact evaluation capabilities of a NFMM. A NFMM with a high Q dielectric resonator allows observation of small variations of the permittivity due to changes in the NaCl concentration. The changes of NaCl concentration due to a change of permittivity of the NaCl solution were investigated by measuring the microwave reflection coefficient S_{11} of the resonator. The NaCl sensor consisted of a dielectric resonator coupled to a probe tip at an operating frequency of about $f=4\text{ GHz}$. The change of the NaCl concentration is directly related to the change of the reflection coefficient due to a near field electromagnetic interaction between the probe tip and the NaCl solution. In order to determine the probe selectivity, we measured a mixture solution of NaCl and glucose.

Keywords: Near-Field Microwave Microprobe (NFMM), Dielectric Resonator, Tuning Fork Feedback System, Signal to Noise (SNR), Reflection Coefficient (S_{11})

1. 서 론

최근, 식품가공, 생물, 화학 및 금속 산업 분야 등에서 높은 감도와 안정성을 갖는 NaCl 센서의 필요성이 확대되고 있다[1-3]. 예를 들어, 맵고 짠 음식을 선호하는 우리의 음식문화가 고혈압 등의 성인병을

유발하는 원인이 밝혀지면서 NaCl의 효율적 섭취를 위하여 가정 및 공장의 식품가공 과정에서 NaCl 검출 센서의 수요가 점차 증가하고 있다. 바이오 산업 분야에서 NaCl 검출 센서는 생물학적 시료의 체액과 동일한 시료액을 조제할 때에도 염분농도를 조절하기 위하여 사용된다. NaCl은 생물학적 시료

의 조제에 가장 많이 이용하는 이온물질이다. 특히, NaCl 용액은 다양한 화학 및 생물학적 체계를 갖는 시료의 많은 화학처리공정에서 주요한 역할을 하고 있다. 따라서 시료의 부분적인 전기적, 생물학적 특성의 연구를 위해서 NaCl 농도의 고감도 검출 기술은 매우 중요한 분야이다. 현재, 상용화된 제품들은 다음의 4가지 원리 중에 하나를 이용한다. 첫째, 소금의 주성분인 나트륨은 전기가 잘 통하기 때문에 염분농도가 높을수록 전기저항은 약해진다. 음식물 염도측정용 염도계가 이러한 원리를 이용한다. 그러나, 측정 허용 온도에 제한이 있으며 염도계에 음식물이 직접 닿게 되어 위생상 문제가 있다. 둘째, 용액 내의 염소의 양을 염화은으로 적정하여 염소의 양을 측정해 낸 뒤 다른 원소와의 비율로 환산하여 전체 염분을 측정한다. 셋째, 용액 내에 포함된 염분의 양에 따라 빛의 굴절 정도가 변하는 원리를 이용한다. 넷째, 염분에 따라 염분의 밀도가 달라지는 원리를 이용한다. 이러한 원리를 이용한 염도계는 가장 값이 싸고 손쉽게 쓸 수 있으나 정확도가 상대적으로 낮고 온도에 대한 보정이 필요하다. 상용화된 NaCl 검출 장치들은 정확성이 향상되었으나 시료의 패턴과 경향을 관찰하는데 한계가 있고 시료에 직접 접촉해야 하는 단점이 있다. 그러므로 비접촉 기술을 응용한 고감도 NaCl 농도 검출용 센서 개발의 중요성이 점차 부각되고 있다[4-6].

본 연구에서는 기존의 접촉식 NaCl 농도 검출기의 원리 및 방법과는 다르게 마이크로파 근접장을 이용하여 비접촉식 측정기를 개발하였다. 이전 연구에서, 우리는 근접장 마이크로파 현미경(NFMM) 관측 기술을 이용하여 글루코스 용액의 농도 변화에 따른 특성 변화를 관측하여 그 성능을 확인한 바 있다[7]. NFMM을 이용한 관측 기술은 비접촉, 비파괴적 평가 기술을 바탕으로 하며 측정과정에서 시료와 직접적인 접촉을 피할 수 있다. 또한 NFMM 관측 기술은 시료의 부분적인 전기적, 생물학적 특성 연구를 가능하게 한다[8-13]. 본 연구에서는 NaCl 용액에 대해 NFMM을 이용한 마이크로파 반사계수(S_{11})의 측정을 통하여 용액의 농도를 관측하였다. 또한 NFMM 관측 방법의 선별 특성을 알아보기 위하여, NaCl과 글루코스의 혼합용액에서 글루코스 및 NaCl의 농도 변화에 따른 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화특성을 관측하였다. 이를 통해, NFMM 관측 기술에 대해 NaCl 농도 검출센서로의 응용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 이론적 배경

NaCl의 농도측정 연구에서 NaCl 수용액에 대한 측정 시스템의 구조와 등가회로는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 이때 마이크로파를 이용한 근접장 현미경의 연산 매커니즘은 평면파의 해석모델(plane-wave solution model)로 설명이 가능하다. 마이크로파에 대한 물질의 반사계수(S_{11})는 다음과 같이 표현될 수 있다[15].

$$S_{11} = 20 \log \left[\frac{|Z_{in}^R - Z_0|}{\sqrt{[Z_{in}^R + Z_0]^2 + 4Z_0 Z_{in}^R [\tan(k_a t_a)]^2}} \right] \approx 20 \log \left[\frac{Z_{in}^R - Z_0}{Z_{in}^R + Z_0} \right] \quad (1)$$

여기서 S_{11} 은 탐과 반응한 후 공진기의 마이크로파 반사계수이고 Z_0 는 입력루프의 임피던스(50 Ω)이며, k_a 는 공기 중에서의 파수벡터(84 m^{-1} , at 4 GHz)이다. t_a 는 탐침과 시료 사이의 거리($1 \mu\text{m}$)이며 Z_{in}^R 는 NaCl 수용액-유리 시료대에 대한 복소 임피던스의 실수부이다. 이때 위의 식에서 Z_{in} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = Z_f \frac{Z_g + jZ_f \tan(k_f t_f)}{Z_f + jZ_g \tan(k_f t_f)} \quad (2)$$

여기서 Z_g 는 유리 시료대의 임피던스(169 Ω)를 의미하며 아래 식을 통해 얻어진다.

$$Z_g = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_g}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_g}} \quad (3)$$

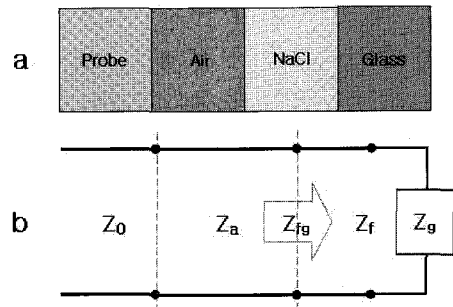


Fig. 1 (a) Probe-sample configuration and (b) equivalent model

위의 식에서 Z_f 는 NaCl 용액의 임피던스로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_f = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_f}} = \frac{Z_a}{\sqrt{\epsilon_f}} \quad (4)$$

여기서 ϵ_f 는 용액의 유전율이며, ϵ_g 는 유리 시료대의 유전율 (glass: $\epsilon_g=5$, at 4 GHz)이다. 또한 Z_a 는 공기 중에서의 임피던스(377 Ω)이고 t_f 는 용액 층의 두께(2 mm)이다. 이때, k_f 는 용액의 파수벡터가 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_f = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_f} = k_a \sqrt{\epsilon_f} \quad (5)$$

식 (2)로부터 Z_{in}^R 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Z_{in}^R = Z_a \sqrt{\epsilon_g} \frac{1 + \tan^2(\sqrt{\epsilon_f} k_a t_f)}{\epsilon_g + \epsilon_f \tan^2(\sqrt{\epsilon_f} k_a t_f)} \quad (6)$$

이때, ϵ_f 는 용액의 유전율이 되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_f = \epsilon_0 + \Delta\epsilon_f \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon_f = c_s \delta_s \quad (8)$$

여기서 ϵ_0 은 물의 유전율 ($\epsilon_0=75.3$, at 4 GHz, 25 °C) [16]이며, $\Delta\epsilon_f$ 는 유전율의 변화량이고 c_s 는 용액의 농도를 의미한다. 그리고 δ_s 는 용액의 농도가 1 unit($\delta_s = 0.0695$ (mg/ml)⁻¹) 만큼 상승했을 때 유전율의 증가량이 된다[17]. 식 (6)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 Z_{in}^R 은 다음과 같다.

$$Z_{in}^R = Z_a \sqrt{\epsilon_g} \frac{1 + \tan^2(k_a t_f \sqrt{\epsilon_0 + \Delta\epsilon_f})}{\epsilon_g + (\epsilon_0 + \Delta\epsilon_f) \tan^2(k_a t_f \sqrt{\epsilon_0 + \Delta\epsilon_f})} \quad (9)$$

NaCl 수용액은 전기 전도도를 갖고 있으며 이 경우 측정 시스템의 구조와 등가회로는 Fig. 2과 같이 나타낼 수 있으며 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = Z_{iso} \frac{Z_{cong} + jZ_{iso} \tan(k_{iso} t_{iso})}{Z_{iso} + jZ_{cong} \tan(k_{iso} t_{iso})} \quad (10)$$

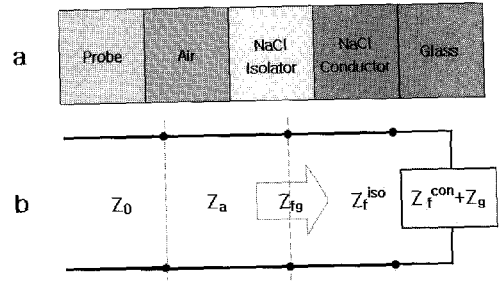


Fig. 2 (a) Probe-sample configuration and (b) equivalent model

여기서 Z_{iso} 는 순수 절연체인 NaCl의 임피던스이며 k_{iso} 는 NaCl 절연체의 파수벡터로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{iso} = k_a \sqrt{\epsilon_s} \quad (11)$$

위의 식에서 ϵ_s 는 NaCl 수용액의 유전율이며 t_{iso} 는 NaCl 용액 층의 두께(2 mm)이다. 또한 Z_{cong} 는 NaCl-전도체 유리 서브시스템(NaCl-conductor glass subsystem)의 임피던스이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{cong} = Z_{con} \frac{Z_g + jZ_{con} \tan(k_{con} t_{con})}{Z_{con} + jZ_g \tan(k_{con} t_{con})} \quad (12)$$

이때, Z_{con} 는 NaCl-전도체 매질의 임피던스이며 [18] 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{con} = (1 + j) \times \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma_{con}}}; \quad \sigma_{con} = \alpha \times c_s; \quad \alpha = \begin{cases} 0.169; & 0 \div 1 \% \\ 0.129; & 1 \div 10 \% \end{cases} \quad (13)$$

여기서 σ_{con} 는 NaCl 수용액의 전도도이고 k_{con} 는 NaCl-전도체 매질의 파수벡터가 되며 k_{con} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{con} = (1 + j) \times \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_{con}} = Z_{con} \sigma_{con} \quad (14)$$

위의 식에서 t_{con} 는 NaCl-전도체 매질의 두께가 되며 다음과 같다.

$$t_{con} = t_{iso} \times 10^{-2} c_s \\ = 2 \cdot 10^{-5} c_s (\text{concentration} - \text{wt} / \%) \quad (15)$$

이때, 위의 식 (13), (14), (15)를 이용하면 식 (12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Z_{con\ g} = \frac{Z_g - 2\pi f \mu_0 t_{con}}{1 + Z_g^2 \sigma_{con}^2 t_{con}^2} \times (1 - j \cdot Z_g \sigma_{con} t_{con}) \\ \approx Z_g \times (1 - j \cdot 0.004); \quad (16) \\ Z_{con\ g}^R \approx Z_g, \\ |Z_{con\ g}| \approx Z_g.$$

따라서 식 (10)의 Z_{in} 은 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = Z_{iso} \frac{Z_g + jZ_{iso} \tan(k_{iso} t_{iso})}{Z_{iso} + jZ_g \tan(k_{iso} t_{iso})} \quad (17)$$

이때, 용액의 유전율은 $\epsilon_f = \epsilon_f' - j\epsilon_f''$ 의 복소수 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다[17].

$$\epsilon_f = \epsilon_f' - j\epsilon_f'' \\ = (\epsilon_0' + c_f \delta_f') - j(\epsilon_0'' + c_f \delta_f'') \quad (18)$$

위의 식에서 ϵ_0' 는 물의 유전율에서 실수부 (75.3, at 4 GHz, 25 °C)에 해당되고 ϵ_0'' 는 허수부 (14.58, at 4 GHz, 25 °C) [16]를 나타낸다. 또한 $\delta_f' = 0.0695 (\text{mg/ml})^{-1}$ 와 $\delta_f'' = 0.0019 (\text{mg/ml})^{-1}$ 는 각각 실수부와 허수부에 대한 유전율 (permittivity incensement)이 되며 이때, c_f 는 용액의 농도가 된다.

3. 비접촉 NFMM 기술의 장치 구성 및 실험 방법

Fig. 3은 NFMM 시스템의 개략도이다. NaCl 센서는 높은 Q 인자를 갖는 유전체 공진기와 튜닝폭 거리조절 센서로 구성되었다. 이때 NFMM 시스템에서 핵심부분이 되는 유전체 공진기 내부의 중앙에는 유전율이 29인 Ba(ZrTa)O₃인 유전체가 위치한다. 네트워크 어날라이저(Agilent E5071B)로부터 마이크로파 소스가 공진기 내부로 공급되면 공진기 내부의 유전체를 중심으로 자기장과 전기장이 형성된다. 이때 공진기 내부의 커플링 루프를 이용하여 TE₀₁ 모드를 선택하고 4 GHz에서 공진주파수를 갖

도록 센서를 50 Ω으로 정합시켰다. 튜닝폭 거리조절 센서는 교류전압을 인가했을 때 32.768 kHz에서 고유주파수를 갖는 튜닝폭(CFS-308)에 직경이 50 μm인 강철선을 접착제로 부착하여 제작하였다[14]. 튜닝폭 거리조절센서를 공진기의 한쪽 면에 고정시킬 때, 금속선의 한쪽 끝을 유전체 공진기의 내부와 연결하여 공진기 내부에 형성된 전자계가 탐침을 따라 탐침 끝 단에 멎히도록 하였다. 튜닝폭 거리조절 센서는 락인앰프(EG&G 7265)로 교류전압을 인가하여 작동시켰고 시료와의 거리에 따른 반응결과를 락인앰프로 받아 분석하여 탐침과 시료 사이의 거리를 조절하였다. 측정과정 중에 탐침과 용액의 표면 사이에서 나타날 수 있는 표면 장력의 영향을 피하기 위하여 탐침과 시료 사이의 거리는 NaCl 용액 바로 위에서 약 1 μm로 고정시켰다. 모든 측정은 실내 온·습도 환경에서 이루어졌으며 측정용 시료를 담은 원통형 유리 시료대는 최소작동거리가 100 nm인 X-Y-Z 스테이지에 설치하였다. 더불어, 온도변화에 따른 마이크로파 반사계수(S₁₁)의 측정을 위하여 내부의 온도변화가 가능하도록 부스(booth)를 제작하였다.

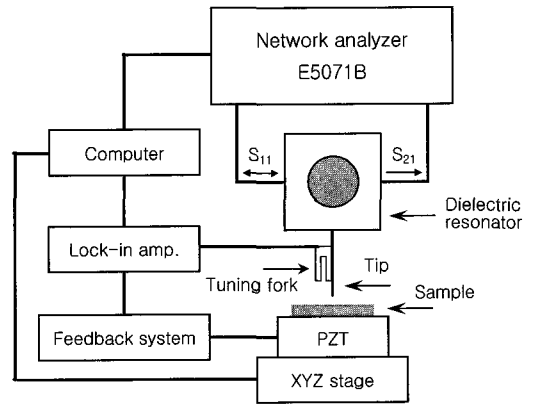


Fig. 3 Basic experimental setup of our NFMM

4. 결과 및 고찰

4.1. NaCl 용액의 농도 변화에 따른 반사계수(S₁₁) 결과 분석

Fig. 4는 증류수에 1 mg/ml씩 최대 10 mg/ml까지 NaCl 농도를 증가시킨 NaCl 용액의 농도 변화에 따른 마이크로파 반사계수(S₁₁)의 변화를 나타낸

결과이다. 시료의 부피는 50 μ l로 동일한 상태에서 측정하였다. NaCl 용액의 농도가 증가함에 따라 마이크로파 공진곡선에 대한 변화를 관측할 수 있었다. 농도에 따른 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 증류수에서 -22.4313 dB로 최소였고 NaCl의 농도가 10 mg/ml일 때 -22.3851 dB로 최대가 되었다. 이는 NaCl 용액의 농도에 따른 유전율의 변화가 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화에 영향을 끼치는 것임을 알 수 있다. NaCl 용액의 유전율에 대한 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화는 식 (1)을 이용하여 NaCl 용액 농도의 증가에 따라 NaCl 용액의 이온 유전율이 증가함을 알 수 있다. 또한 NaCl 용액의 이온 유전율은 공진주파수에서 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기로 나타내어질 수 있다. Fig. 4에 삽입된 위 그림은 증류수에 1 mg/ml씩 최대 10 mg/ml까지 NaCl 농도가 증가함에 따라 관측된 마이크로파 반사계수(S_{11})의 선형적 크기 변화를 보여준다. 이때, 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 -22.4313 dB에서 최소였고 -22.3851 dB에서 최대였다. Fig. 4에 삽입된 아래 그림은 농도가 더 큰 NaCl 용액에 대한 실험 결과이다. 증류수에

10 mg/ml씩 최대 100 mg/ml 까지 농도를 변화시켜 가면서 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정한 결과를 나타낸다. 이론치에서 예측한 결과로 NaCl 용액의 유전율이 증가하면서 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 증류수에서 -22.4320 dB로 최소가 되었고 100 mg/ml일 때 -22.028 dB로 최대가 되었다. 삽입된 위 그림과 아래 그림에서 NaCl의 농도 증가량이 1 mg/ml에서 10 mg/ml로 커짐에 따라 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 시료의 NaCl 농도는 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기에 의해 판단 되어진다. 이때, 삽입된 위 그림과 아래 그림에서 NaCl의 농도가 0 mg/ml일 때 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 각각 -22.4313 dB와 -22.4320 dB로 거의 같았다. 또한 NaCl의 농도가 10 mg/ml일 때 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 각각 -22.3851 dB와 -22.3760 dB로 거의 같은 값이 관측되었다. NaCl 용액의 농도 변화가 최대 10 mg/ml일 때, NaCl의 농도 함수는 $\Delta S_{11}/\Delta c = 5 \times 10^{-3}$ dB/(mg/ml) 임을 확인하였다. 측정된 S_{11} 의 실효값(rms) 오차는 대략 1.1×10^{-5} dB이고[9], 측정 시스템의 잡음지수인 SNR은 약 53 dB이다. 53 dB의 SNR의 기준에 근거한 농도에 있어서 측정 가능한 최소 변화는 약 0.005 mg/ml 이다. 공진기의 Q 인자를 증가시킴으로써 그래프의 기울기가 증가하고 시료에 대한 시스템의 민감도 역시 앞으로 향상시킬 수 있다.

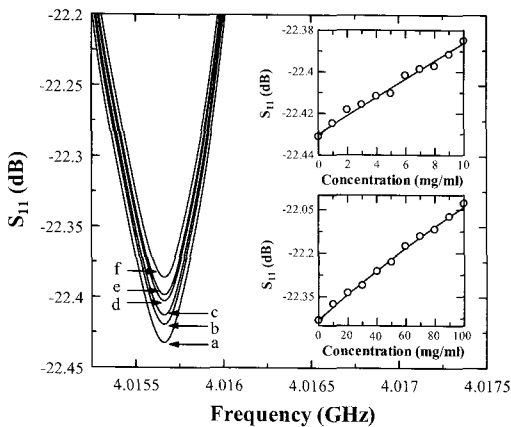


Fig. 4 Measured reflection reflectivity S_{11} plotted as a function of the NaCl concentrations from (a) DI water, (b) 2 mg/ml, (c) 4 mg/ml, (d) 6 mg/ml, (e) 8 mg/ml, and (f) 10 mg/ml. The upper inset shows the measured reflection reflectivity S_{11} plotted as a function of the NaCl concentrations at 4.015 GHz. The lower inset plotted the measured reflection reflectivity S_{11} of higher concentration from DI water to 100 mg/ml with the interval of 10 mg/ml at 4.015 GHz. A solid line shows a fit to Eq. (1) with $Z_0 = 50 \Omega$

4.2. NaCl 용액의 농도 및 온도 변화에 따른 반사계수(S_{11}) 결과 분석

NaCl 용액의 유전율과 전도도는 온도에 민감하게 반응하므로 NaCl 용액의 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기 또한 온도에 따라 변화한다. 보통 농도가 10 mg/ml인 NaCl 용액의 전도도와 유전율은 온도에 따라서 각각 $\Delta \sigma = 2 \%$ /°C와 $\Delta \epsilon = 0.3 \%$ /°C의 비율로 변화한다[17]. Fig. 5는 농도가 각각 1 mg/ml, 10 mg/ml, 100 mg/ml인 NaCl 용액의 온도에 따른 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화를 나타내고 있다. NaCl 용액의 온도가 높아지면서 유전율이 감소하게 되고 따라서, 마이크로파 반사계수 S_{11} 의 크기도 감소하였다. 이때, 농도가 1 mg/ml, 10 mg/ml, 100 mg/ml인 NaCl 용액의 마이크로파 반사계수(S_{11})가 온도 변화에 따라 각각 0.05 %/°C, 0.06 %/°C, 0.09 %/°C의 비율로 변화하는 것을 알

수 있었다. NaCl 용액의 농도가 증가함에 따라 온도계수변화는 NaCl 용액의 유전율 감소로 인해 증가하였다. Fig. 5에 삽입된 그림은 NaCl 용액의 농도(1 mg/ml, 10 mg/ml, 100 mg/ml)에 대해 온도 변화에 따른 손실탄젠트($\tan\delta$) 값을 보여준다. NaCl 용액의 손실탄젠트($\tan\delta$)는 공진곡선의 대역폭을 측정하여 얻었다[15]. 이때, NaCl 용액의 손실탄젠트($\tan\delta$)는 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 이것은 NaCl 용액의 온도가 증가함에 따라 NaCl 이 갖는 유전율의 허수부(ϵ'')가 실수부보다 빠르게 감소하기 때문이다[18].

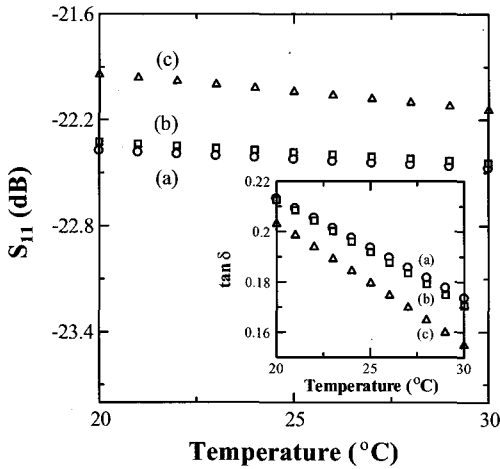


Fig. 5 Measured reflection coefficient S_{11} depending on temperature for different NaCl concentrations for (a) 1 mg/ml, (b) 10 mg/ml and (c) 100 mg/ml. The inset shows the measured loss tangent ($\tan\delta$) as a function on temperature for different NaCl concentrations (a) 1 mg/ml, (b) 10 mg/ml and (c) 100 mg/ml

4.3. NaCl 용액의 부피 증가에 따른 반사계수(S_{11}) 결과 분석

NaCl 용액의 마이크로파 반사계수(S_{11})는 부피의 변화에도 의존한다. Fig. 6에 나타나 있듯이 NaCl 용액의 부피가 증가함에 따라 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기도 증가하였다. 이때, 용액의 부피는 10 μ l에서 50 μ l까지 10 μ l씩 증가시켰고, 용액의 농도와 유리 시료대의 표면적은 각각 10 mg/ml와 25 mm²로 고정시켰다. 부피의 증가에 따른 마이크로파 반사계수(S_{11})의 변화는 부피가 증가함에 따

라 마이크로파 반사계수(S_{11})가 증가하다가 일정 부피를 넘게 되면서 변화가 둔감해졌다. 이러한 결과는 탐침과 시료 사이의 결합된 쌍극자 상호작용에서 기인한다. 이 경우, 쌍극자 상호작용은 탐침과 시료 사이의 거리 d 에 대하여 $1/d^3$ 에 의존한다 [11]. 쌍극자 상호작용을 일으키는 영역은 탐침과 시료 사이의 거리가 매우 짧은 근접장 영역에 한정된다. 따라서 용액의 부피가 증가하면 이러한 상호작용은 무시 되어지며 Fig. 6과 같이 부피가 증가해도 더 이상 마이크로파 반사계수(S_{11})는 변화하지 않는다.

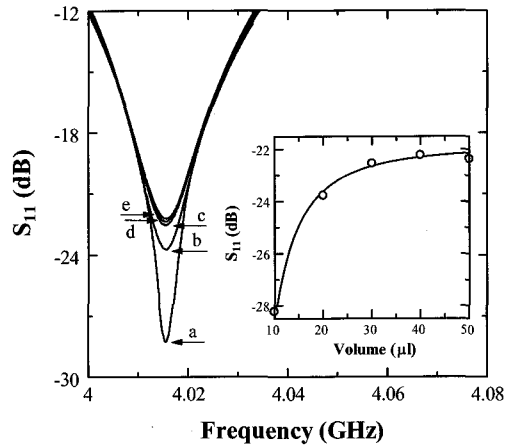


Fig. 6 Measured microwave reflection reflectivity S_{11} for different volume of NaCl solutions with concentration of 10 mg/ml for (a) 10 μ l, (b) 20 μ l, (c) 30 μ l, (d) 40 μ l and (e) 50 μ l. The inset shows the measured reflection coefficients S_{11} for different volume of NaCl solutions. A solid line shows a fit to Eq. (1) with $Z_0 = 50 \Omega$.

4.4. NaCl과 글루코스의 혼합용액에서 NaCl 용액의 글루코스 농도에 따른 반사계수(S_{11}) 결과 분석

NFMM 시스템이 NaCl과 다른 물질의 혼합용액에서 NaCl을 식별할 수 있는지 알아보기 위하여 NaCl과 글루코스의 혼합용액을 가지고 마이크로파 반사계수(S_{11})를 측정해 보았다. 이를 위해, 글루코스 농도를 각각 1 mg/ml, 10 mg/ml, 100 mg/ml로 일정하게 유지하고 NaCl의 농도를 변화시켰다. Fig. 7은 글루코스 농도를 각각 1 mg/ml, 10 mg/ml, 100 mg/ml로 유지하고 NaCl 농도를 증류수에서

1 mg/ml씩 최대 10 mg/ml까지 변화시킨 혼합용액의 반사계수 변화를 나타내고 있다. Fig. 7에서 NaCl의 농도가 일정한 경우, 글루코스의 농도가 증가할수록 혼합용액의 마이크로파 반사계수(S_{11})의 크기는 증가했다. 이때, 글루코스의 용질농도가 1 unit으로 증가할 때 측정된 유전율의 증가는 $\gamma'=0.0577 \text{ (mg/ml)}^{-1}$ 이고 $\gamma''=0.0015 \text{ (mg/ml)}^{-1}$ 였다. 또한 Fig. 7에 삽입된 그림은 일정한 농도의 NaCl 용액(1 mg/ml)에 글루코스 농도를 10 mg/ml씩 최대 100 mg/ml까지 변화시킨 경우에 대한 마이크로파 반사계수(S_{11})의 선형적인 크기 변화를 보여준다.

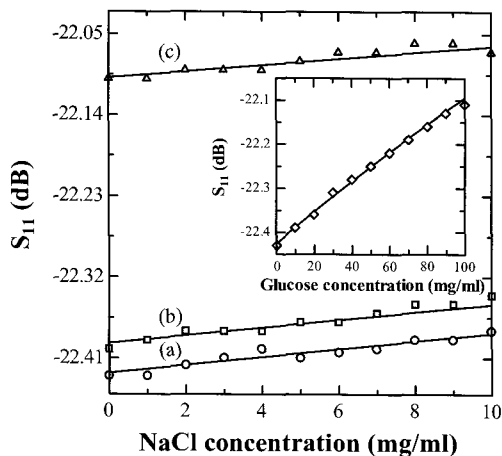


Fig. 7 Microwave reflection coefficient S_{11} of the mixture solution of NaCl and glucose plotted as a function of the NaCl solutions with the glucose concentration of (a) 1 mg/ml, (b) 10 mg/ml and (c) 100 mg/ml. The inset shows the measured reflection coefficients S_{11} as a function of different glucose concentration at the NaCl concentration of 1 mg/ml. A solid line shows a fit to Eq. (1) with $Z_0 = 50 \Omega$.

5. 결론

본 연구에서는 비접촉 NFMM 기술에 대해 NaCl 용액의 농도검출센서로서의 응용 가능성에 대해 알아보았다. 이를 위해, 근접장 마이크로파 현미경(NFMM)을 이용하여 NaCl 용액의 농도변화, 농도 및 온도변화, 그리고 부피 변화에 따른 NaCl의 특성 변화를 확인하였다. 그 결과로서, 마이크로파 반

사계수(S_{11})의 변화는 NaCl 용액의 농도 변화에 매우 민감하며 농도가 낮은 영역에서는 농도의 변화에 비례하였다. 이때, 측정된 SNR은 약 53 dB이고, 최소 측정 가능한 신호는 약 0.005 dB/(mg/ml)였다. 이와 함께 탐침의 선택적 반응 감도 특성을 알아보기 위하여, NaCl과 글루코스의 혼합용액을 측정하였다. 이때, NaCl 검출센서는 글루코스에도 반응하므로 글루코스를 기준으로 정한다면 혼합용액에서도 NaCl의 농도변화에 따른 특성검출이 가능하다. 더불어, 탐침을 더욱 최적화하여 설계한다면 다른 주파수 영역의 생물학적 시료에 대한 전기적 특성 또한 비접촉, 비파괴 근접장 마이크로파 기술로 민감하게 측정할 수 있을 것이라 생각한다.

후 기

본 연구는 서강대학교(2006), 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] I. Lampreia, S. Magalhaes, S. Rodrigues and A. Mendonça, "Solubility of proline - leucine dipeptide in water and in aqueous sodium chloride solutions from $T = (288.15 \text{ to } 313.15) \text{ K}$," J. Chem. Thermodyn. Vol. 38, pp. 240-244, (2006)
- [2] L. Mayor, R. Moreira, F. Chenlo and A. M. Sereno, "Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions," J. Food Eng. Vol. 74, No. 2, pp. 253-262, (2006)
- [3] K. Rahmouni, M. Keddam, A. Srhiri and H. Takenouti, "Corrosion of copper in 3% NaCl solution polluted by sulphide ions," Corros. Sci. Vol. 47, pp. 3249-3266, (2005)
- [4] A. K. Lyashchenko and A. Yu. Zasetky, "Complex dielectric permittivity and relaxation parameters of concentrated aqueous electrolyte solutions in millimeter and centimeter wavelength ranges," J. Mol. Liq.

- Vol. 77, pp. 61-75, (1998)
- [5] K. J. Bois, A. D. Benally and R. Zoughi, "Near-field microwave non-invasive determination of NaCl in mortar," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* Vol. 148, No. 4, pp. 178-185, (2001)
- [6] J. Park, S. Hyun, A. Kim, T. Kim and K. Char, "Observation of biological samples using a scanning microwave microscope," *Ultramicroscopy*, Vol. 102, pp. 101-106, (2005)
- [7] A. Babajanyan, J. Kim, S. Kim, B. Friedman and K. Lee, "Glucose biosensing using a near-field microwave microprobe," *Key Engineering Materials* Vols. 321-323, pp. 1048-1051, (2006)
- [8] M. Abu Teir, M. Golosovsky, D. Davidov, A. Frenkel and H. Goldberg, "Near-field scanning microwave probe based on a dielectric resonator," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 72, No. 4, pp. 2073-2079, (2001)
- [9] B. Friedman, M. Gaspar, S. Kalachikov, K. Lee, R. Levicky, G.. Shen and H. Yoo, "Sensitive, label-free DNA diagnostics based on near-field microwave imaging," *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 127, No. 27, pp. 9666-9667, (2005)
- [10] S. Kim, H. You, K. Lee, B. Friedman, M. 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. 153506-153508, (2005)
- [11] 김주영, 김승희, 유현준, 양종일, 유형근, 유경선, 김승완, 이기진 "비파괴 측정을 위한 근접장 마이크로파 현미경 연구", *비파괴검사학회지* Vol. 24, No. 5, pp. 508-517, (2004)
- [12] M. Tabib-Azar, J. L. Katz and S. R. LeClair, "Evanescent microwaves: a novel super-resolution noncontact nondestructive imaging technique for biological applications," *IEEE Instrum. Measurement*, Vol. 48, No. 6, pp. 1111-1116, (1999)
- [13] D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, S. K. Dutta, B. J. Feenstra, F. C. Wellstood, and S. M. Analge, "Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 72, No. 7, pp. 861-863, (1998)
- [14] Khaled Karrai and Robert D. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 66, No. 14, pp. 1842-1844, (1995)
- [15] D. M. Pozar, *Microwave Engineering* (Anderson-Wesley, New York, 1990)
- [16] W. M. Arnold, "Positioning and levitation media for the separation of biological cells," *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 37, No. 5, pp. 1468-1475, (2001)
- [17] D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, New York, 2004)
- [18] J. H. Jiang and D.L. Wu, "Ice and water permittivities for millimeter and sub-millimeter remote sensing applications," *Atmos. Sci. Lett.* Vol. 5, pp. 146-156, (2004)