

슬롯결합 커패시터 공진기를 이용한 NaCl 수용액 농도 검출

윤기호

성결대학교 정보통신공학부 교수

NaCl Aqueous Solution Concentration Detection Using Slot-Coupled Capacitor Resonator

Gi-Ho Yun

Professor, Division of Information & Communication Engineering, Sungkyul University

요 약 본 연구는 준 마이크로파 대역에서 슬롯(slot) 결합 커패시터 공진기를 이용하여 NaCl 수용액의 농도변화를 감지할 수 있는 고감도 센서를 제안하였다. 센서에 적용되는 공진기는 마이크로스트립 선로의 접지 면을 활용하여 유도성 슬롯(inductive slot)과 연결된 평행판 커패시터로 구성된다. 농도변화에 따른 유전특성 측정데이터를 기반으로, 농도변화가 확연히 드러나는 UHF 대역에서 공진주파수가 정해졌으며, 평행판 커패시터 내에 NaCl 수용액이 삽입된다. 시뮬레이션을 토대로 제안된 공진기를 설계하여 제작하였다. 농도 변화를 0 mg/dl에서 400 mg/dl까지 100 mg/dl 단계로 실험하였고, 전송 산란 계수(S_{21})가 측정되었다. 실험결과 각 단계별 최소 1.8 dB(S_{21})의 변화를 얻음으로써 NaCl 수용액에서 농도검출 센서에 적용 가능함을 입증하였다.

주제어 : NaCl 용액, 슬롯공진기, 평행판 커패시터, 농도, UHF

Abstract In this paper, we proposed a high sensitivity sensor that can detect the concentration change of NaCl aqueous solutions by using a slot coupling capacitor resonator in sub-microwave band. The resonator applied to the sensor consists of a parallel plate capacitor connected to an inductive slot utilizing the ground plane of the microstrip line. Based on the measurement data of the dielectric characteristics according to the concentration change, the resonance frequency was determined in the UHF band where the concentration change is evident and the NaCl aqueous solution is inserted into the capacitor. Based on the simulation, the proposed resonator was designed and fabricated. The concentration level was varied from 0 to 400 mg/dl as 100 mg/dl step, and the transmission scattering coefficient (S_{21}) was successfully measured. Experimental results show that it is applicable to the concentration detection sensor in NaCl aqueous solution by obtaining minimum 1.8 dB(S_{21}) at each step.

Key Words : NaCl solution, Slot resonator, Parallel plate capacitor, Concentration, UHF

1. 서론

최근 IoT 산업이 발전하면서 헬스 케어 산업에 응용되는 각종 연구들[1,2]이 속속 발표되고 있으며 기초 부품으로 센서에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다

[3,4,5]. 이중 식품, 생화학, 금속 및 건축 산업 등의 넓은 분야에서 높은 감도와 편리성을 갖춘 염화나트륨(NaCl) 센서가 관심을 받고 있다. 예로, 인체의 염분은 고혈압 또는 혈관 질환에 큰 영향을 주므로 저 염식을 위해 음식물의 NaCl 농도에 관심이 집중된다. 또한 수중이나 금속 내

*Corresponding Author : Gi-Ho Yun(ghyun@sungkyul.ac.kr)

Received August 20, 2018

Accepted November 20, 2018

Revised November 1, 2018

Published November 28, 2018

에서 NaCl 농도를 측정하여 생태계 변화를 읽어내기도 하고, 금속 부식을 방지하기도 한다. 이들에 필요한 NaCl 센서의 측정 정확도 개선과 사용 편의성 연구들이 속속 발표되고 있다[6-8]. 근접장(near field)에서 마이크로파 기술을 이용하여 NaCl 수용액의 농도 측정방법들과 수준들을 구분하려고 하는 연구들이 시도되었다[9-11]. 이 분야 이유는 산업계에서 적용 가능한 회로 구조나 낮은 농도를 구분하는 민감도 개선이다. 이를 위해 전자파와 수용액 사이의 상호작용을 통해 농도 변화를 마이크로파의 특성변화로 연계시키는 새로운 회로가 요구된다. 기존 연구들[12-14]은 주로 구현이 용이한 평면 스트립선로를 이용하여 높은 Q 값을 갖는 각종 공진기들을 제안하여 농도 수준을 구분하였다. 그러나 이들은 공진기의 프링징 필드(fringing field)에 주로 의존하기 때문에 높은 유전율과 전도 특성을 갖는 수용액들과의 임피던스 부정합 발생되기도 하고, 수용액에 분포되는 전기장 에너지가 작아 센싱 감도가 작다. 따라서 500mg/dl 이하의 매우 낮은 농도 수준에서 센서 성능에 한계가 있다.

본 연구에서는 NaCl 수용액의 주파수에 따른 유전특성에 대한 측정결과가 UHF(ultra high frequency) 대역에서 큰 변화가 있는 점을 고려하여, 이 주파수 대역에서 NaCl 수용액의 농도변화에 따른 유전특성 변화를 읽어낼 수 있도록 DGS (defected ground structure) 기반의 평행판 커패시터 공진기를 제안하였다. 파장이 긴 UHF 대역에서 스트립선로 방식의 공진기는 물리적 크기가 매우 크므로, 기존 방식들[12-14]과는 다르게 평행 도체판 사이에 NaCl 수용액을 내포함으로써 농도 변화를 정밀하게 관찰 할 수 있으며 수용액과의 직접접촉에 따른 임피던스 부정합 문제를 제거할 수 있다. 마이크로스트립선로의 접지 면의 일부를 이용하여 구현된 커패시터는 유도성 (inductive) 슬롯(slot)과 결합되어 특정 주파수에서 공진한다. 커패시터 내의 농도 변화에 따른 유전특성 차이를 2 포트 마이크로스트립선로의 전송 산란계수를 통해 읽어낼 수 있다. 시뮬레이션을 기반으로 UHF 대역에서 설계된 공진기를 이용하여 회로의 시제품이 제작된다. 농도별 감지 능력을 평가하기 위해 0~400 mg/dL 범위에서 100 mg/dL 단계로 NaCl 수용액의 농도를 측정하여 센서로서 가능성을 평가한다.

2. NaCl 수용액의 주파수 특성

NaCl 수용액의 농도를 검출하는 고주파 공진기를 설계하기에 앞서 농도별 주파수 의존성을 먼저 확인하여 유전특성 변화가 가장 큰 주파수를 공진주파수로 선정한다. 이를 개방형 동축 유전율 프로브(85070D)와 네트워크 분석기(E8364A)를 사용하여 수용액의 농도별 전기적 특성을 측정하였다[14]. 0.5~15 GHz의 주파수 범위에서 0에서 400 mg/dL까지 100 mg/dL 단계로 측정하였다. 수용액의 유전상수($\epsilon' = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 는 공기 중의 유전율, ϵ_r 은 상대유전율)은 전체 주파수 범위에 걸쳐 농도별 미세한 차이만을 나타낸다. 한편, 유전체의 손실특성을 대표하는 손실탄젠트(loss tangent)는 다음 식(1)로 표현된다.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1)$$

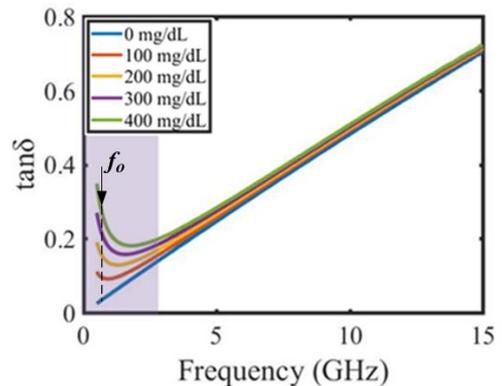


Fig. 1. Measured loss tangent of NaCl aqueous solutions.

Table 1. Dielectric properties of NaCl aqueous solutions measured around 700MHz.

Concentration level(mg/dl)	0	100	200	300	400
Loss tangent, $\tan\delta$	0.04	0.08	0.16	0.22	0.32
Relative dielectric constant(ϵ_r)	77.8~79				

여기에서 ϵ'' 은 유전체의 손실성분으로 전도도 (conductivity)와 주파수의 영향을 받는다. Fig. 1에서는 농도별 측정 주파수 대역에 걸쳐 손실탄젠트 값을 나타낸다. 2.5 GHz 이상의 주파수 대역에서 농도에 따른 손실탄젠트 변화가 크지 않다. 그러나 1GHz 이하의 UHF 대역에서는 농도별 손실탄젠트 값이 오히려 주파수가 증가함에 따라 감소하며 그 변화는 두드러지게 차이가 남을 확인 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 손실탄젠트 변

화가 뚜렷하게 드러나는 UHF 대역내의 700MHz 에서 동작하는 검출회로를 설계한다. 선정된 주파수(f_0)를 Fig. 1에 표시하였으며, Table 1에 손실탄젠트와 상대 유전율을 농도별로 정리하였다.

3. 공진기 구조 및 회로설계

3.1 공진기 구조

Fig. 2(a)에 제안된 공진기를 마이크로스트립 선로 상에 구현한 기본 구조를 보여준다. 평행 도체판에 NaCl 수용액을 삽입하여 만든 커패시터를 유도성(inductive) 슬롯과 연결하였으며 이를 마이크로스트립 선로(microstrip line 또는 M-strip line)의 접지면을 이용하여 DGS(defected ground structure) 구조로 구현하였다 [15]. 접지면의 유도성 슬롯은 마이크로스트립선로와 자기 결합(magnetic coupling)한다. 커패시터의 용량은 도체판 크기와 그 사이에 위치하는 수용액의 유전특성에 의해 결정된다. 제안된 공진기 구조는 관찰하고자 하는 수용액을 전기장이 균일하고 강하게 분포되어 있는 평행 도체판 내부에 삽입하기 때문에, 미세한 농도변화는 커패시턴스 변화를 발생시켜 DGS 공진 특성에 즉시 반영된다. 이 결과는 2포트 마이크로스트립 선로용량은 도체판 크기와 그 사이에 위치하는 수용액의 유전특성에 의해 결정된다. 제안된 공진기는 관찰하고자 하는 수용액을 전기장이 균일하고 강하게 분포된 평행 도체판 내부에 삽입하기 때문에, 미세한 농도변의 전송 산란계수(S_{21})로 표현된다. 이는 공진기들의 프링징(fringing) 필드에 의존하는 기존 연구들[12-14]에 대비된다. 또한 제안된 구조는 수용액과의 임피던스 부정합발생 환경에서 벗어날 수 있다.

Fig. 2(a)에서 유도성 슬롯은 길이(l_1)과 폭(g_1)을 갖는다. 슬롯과 수용액 모델의 중심위치는 같고 그 위에 50 Ω 마이크로스트립 선로가 놓여진다. 슬롯의 중심부에 나란히 하는 2개의 도체 판들이 수직으로 슬롯과 연결되어 평행판 커패시터 구조를 갖는다. 도체 판의 높이(h_1)과 폭(w_1)를 갖고, 그 두께는 슬롯의 폭(g_1)과 동일하다. 선로의 선폭은 50Ω에 준하며, PCB 보드의 유전율(ϵ_r)과 높이(h_0)는 설계 파라미터로 사용된다. Fig. 2(b)는 NaCl 수용액을 포함하는 평행판 도체들(conductive plates)과

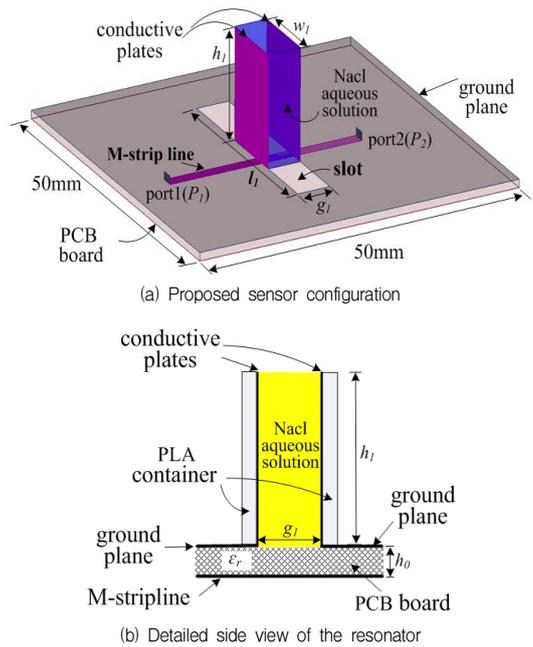


Fig. 2. Configuration of the proposed sensor and its detailed side view

슬롯 그리고 마이크로스트립선로 사이의 연결 구조를 볼 수 있는 상세한 측면도이다. 여기에서 PLA(polylactic acid) 컨테이너(container)는 두께 1mm를 갖으며, 수용액과 도체판을 포함하는 MUT(material under test) 박스(box)를 측면에서 PCB 보드위에 지지하고 있어 측정을 용이하게 한다. 이는 3D 프린터로 제작된다. 상기에 언급한 것처럼 수용액의 두께(g_1)는 슬롯의 간격과 동일하다. PCB 보드의 높이(h_0)는 마이크로스트립선로와 슬롯간의 자기에너지 결합량을 제어함으로써 DGS 공진기와의 결합계수(K)에 영향을 준다.

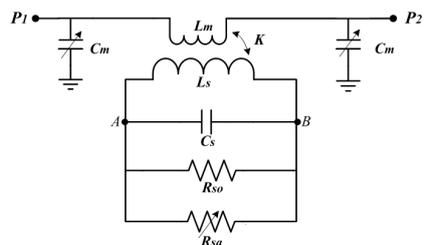


Fig. 3. Simplified 2-port equivalent circuit of the resonator

DGS공진기를 포함하는 마이크로스트립 선로의 2 단자(port) 등가회로를 Fig. 3에서 볼 수 있다. 등가회로는 일반적으로 선로 길이에 따른 직렬 인덕턴스와 선로와 접지면사이의 유전체 특성과 관련된 션트(shunt) 커패시턴스(C_m)으로 구성된다. 직렬 인덕턴스 성분은 용량이 매우 적어 본 연구에 큰 영향을 주지 않으므로 배제되었다. C_m 은 PCB 보드의 유전율(ϵ_r)과 높이(h_0)에 의존한다. L_m 은 마이크로스트립선로에서 슬롯과 결합되는 부분의 인덕턴스이다. 또한 결합계수(K)는 마이크로스트립선로와 유도성 슬롯사이의 자기장(magnetic) 결합 수준을 나타내며, 주로 보드 높이(h_0)의 영향을 받는다. 단자A와 단자B 사이 회로는 DGS 공진기를 등가적으로 표현한다. 유도성 슬롯의 인덕턴스(L_s)와 수용액을 포함하는 평행판 커패시터의 용량(C_s), 수용액에서의 손실성분을 나타내는 저항들(R_{so} , R_{sa})들의 병렬 회로로 구성된다. 슬롯의 유도성 용량(L_s)는 슬롯의 폭(g_1)과 길이(l_1)에 따라 정해진다. 커패시턴스(C_s)는 평행판 커패시터를 구성하는 도체판 사이의 간격(g_1)과 면적크기($h_1 \times w_1$), 그리고 NaCl 수용액의 유전특성과 농도에 의존한다. 수용액의 손실을 나타내는 손실탄젠트는 전도도(conductivity)와 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이를 저항(resistor)으로 표시하였다. R_{so} 는 0 mg/dl에서 손실을 나타내는 저항이고 이와 병렬로 연결된 저항 R_{sa} 는 농도 증가분에 따른 추가 저항 값을 나타내며 농도가 증가할수록 그 값이 감소된다.

Fig. 3의 등가회로는 병렬공진회로가 전송 선로 상에 직렬로 연결돼 있으므로 병렬 공진기의 임피던스가 클수록 2 포트 전송손실이 증가하여 전송계수(S_{21}) 값이 작아진다. 아래 식(2)으로 주어지는 공진주파수(ω_0)에서 공진회로의 임피던스가 최대가 되므로 일반적으로 대역저지여파기(band stop filter) 특성을 갖는다.

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

이때 공진주파수에서 임피던스 크기는 공진기의 손실저항 값들(R_{so} , R_{sa})이 지배하게 되고, 수용액의 농도가 증가함에 따라 저항(R_{sa}) 값이 감소하므로 전송계수크기가 커진다. 즉, 농도 변화를 전송계수에서 검출할 수 있다. 한편, 병렬공진회로의 임피던스는 결합계수(K)에 의해 2포트 선로에 영향을 주며, K 값이 클수록 병렬 공진

회로의 임피던스 변화를 전송계수변화로 크게 연결할 수 있다. 즉, 수용액의 농도 변화를 전송계수로 전달하기 위해서는 보드 높이(h_0)를 작게 한다. 션트커패시턴스(C_m)은 사용하는 PCB 보드들 따라 다르므로 이들이 전송계수에 주는 영향력을 평가하여 보드 종류(유전율, 높이)를 선정한다. 이후 서술되는 공진기 설계에서 논의된다.

3.2 공진기 설계

Table 1의 NaCl 수용액 측정결과들을 이용하여 700MHz에서 공진기를 설계한다. 식 (2)로 부터 인덕턴스(L_s)와 커패시턴스(C_s)에 따른 DGS 공진기의 슬롯크기와 평행도체 판의 크기가 설계된다. 상용 PCB 보드를 이용하여 50Ω 선로 폭으로 마이크로스트립 선로를 구현한다. PCB 보드의 높이(h_0)를 가급적 작은 것을 사용하여 높은 결합계수(K)를 갖도록 한다. 또한, 보드의 상대유전율(ϵ_r)에 따라 농도변화가 전송계수에 영향을 주므로 시뮬레이션을 통해 확인한다. 유전율이 다르나 높이(h_0)가 유사한 3 종류의 상용 PCB를 선정하여 700MHz에서 농도별 전송계수를 시뮬레이션 한 결과를 Table 2에 정리하였다. 시뮬레이션 툴로 ANSYS사의 HFSS가 사용되었다. 이때 Table 1에서 제공된 손실탄젠트가 적용되었고, 상대유전율(ϵ_r)은 농도별 변화가 매우 작으므로 78.5로 고정시켰다. Table 2로 부터, PCB 보드의 상대유전율이 높을수록 큰 농도에서 변별력이 우수하며, 모든 보드들이 큰 농도들에서 전송계수가 차이가 줄어드는 특성을 갖는다. 특히, 유전율이 작은 Arlon사의 Cuclad 250 보드의 경우 300mg/dl와 400mg/dl 구간에서는 1 dB 이내이다. 여전히 이들 특성은 기존 연구들[12,13,14] 보다 좋은 성능을 나타내 본 연구의 타당성이 입증된다. 상대유전율($\epsilon_r=10$)을 갖는 Taconic CER-10의 경우, 매우 우수한 농도별 변별 특성을 나타낸다. 따라서 높이 0.63mm를 갖는 Taconic CER-10 상용보드를 이용하여 농도 검출회로를 설계한다. 먼저 0 mg/dl에서, 전송계수(S_{21})를 시뮬레이션하고 최적화하였다. Table 3에 설계된 공진기의 슬롯과 도체 판의 물리적 크기들을 보여준다. 또한 Fig. 4에 농도별로 0.4~1 GHz에 걸쳐 선로의 전송계수(S_{21})들을 볼 수 있다. 공진 주파수를 기준으로 200 mg/dl 보다 큰 농도에서도 최소 2.5dB 이상의 차이를 나타낸다. 한편, Table 3으로 주어진 크기를 갖는 공

진기를 이용하여 Fig. 5에서 평행 도체판 사이 수용액 내의 전기장 분포에 대한 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. $1.0E+003 \sim 2.5E+003$ 크기 범위로 도체판 전체에 걸쳐 강한 전기장이 수용액을 비교적 균일하게 관통하고 있다. 이러한 전계 분포는 수용액의 유전특성이 변화될 경우 커패시턴스 변화로 반영되고 DGS 공진기의 전송손실 특성변화로 바로 이어질 수 있는 좋은 환경을 제공한다.

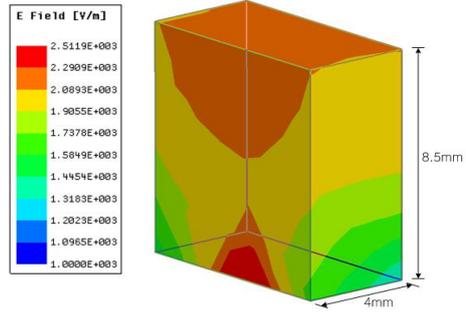


Fig. 5. Simulated result for electric field distribution in the NaCl aqueous solution.

Table 2. Transmission coefficient (S_{21}) over NaCl solution concentrations on PCB boards

NaCl solution concentrations	Transmission coefficients ($dB(S_{21})$)		
	PCB Specs Arlon cuclad 250, $\epsilon_r=2.5$ $h_0=0.79mm$	FR4 $\epsilon_r=4.4$ $h_0=0.79mm$	Taconic CER-10 $\epsilon_r=10$ $h_0=0.63mm$
0mg/dl	-21	-21	-21.5
100mg/dl	-7.5	-9.5	-16.8
200mg/dl	-4.7	-6.0	-12.2
300mg/dl	-3.5	-4.8	-10.5
400mg/dl	-3.1	-4.0	-8.0

4. 공진기 제작 및 성능평가

설계한 회로를 바탕으로 시제품을 제작하였다. NaCl 수용액을 만들기 위해 증류수와 NaCl 분말을 실험에서 요구되는 단계별 농도로 혼합되었다. Fig. 6은 제작된 시제품 사진을 보여준다. MUT 박스는 PLA (polylactic acid) 필라멘트를 이용한 3D 프린터로 제작되었고 내부에 수용액이 담겨있다. 보드 크기는 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이며, 박스의 양 측면에 도체판 등이 놓여있어 평행판 커패시터 구조를 갖는다. 실온(23°C)에서 0에서 400 mg/dl까지 100 mg/dl 씩 증가시켜 5단계의 농도에 대해 0.4~1GHz 범위에서 전송계수($dB(S_{21})$)를 측정하여 일정한 결과를 얻었으며 Fig. 7에서 볼 수 있다.

Table 3. Dimensions of the designed resonator

Parameter	slot		conductive plate	
	width	length	h_1	w_1
Value, mm	4.0	24	8.5	8

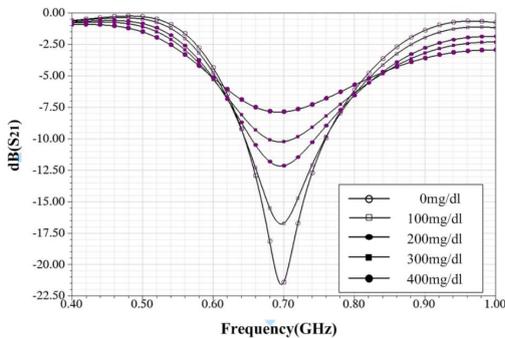


Fig. 4. Simulated results of Transmission coefficients (S_{21}) over NaCl solution concentrations

측정 장비는 R&S 사의 ZVL 벡터 회로망 분석기다. 손실탄젠트 값이 가장 작은 0 mg/dl의 농도일 때 675MHz 에서 공진특성을 확연히 드러내고 있다. 농도가 증가함에 따라 손실탄젠트가 커져 전송손실이 줄어든다. 특히 농도가 증가하면서 300~400 mg/dl 범위에서는 전송계수들의 차이가 1.8 dB 까지 감소하였다. 이렇게 농도증가 대비 전송손실 감소 특성은 Fig. 4의 시뮬레이션 결과와 비교되었을 때 매우 유사하다. 그러나 시뮬레이션 결과에 대비하여 각 농도별 공진주파수를 기준으로 삽입손실이 매우 커졌으며, 농도가 증가함에 따라 공진주파수가 약 25 MHz 정도 상향 이동하는 특성을 나타낸다. 이는 설계 기초자료로 활용한 Table 1의 손실탄젠트와 상대유전율 측정환경이 본 실험과 다르며, 제작 과정에서의 물리적인 크기 오차 등에 원인들이 있다. 특히, 시뮬레이션에서는 농도변화에 무관하게 상대유전율을 78.5으로 고정하였으나 실제 사용된 수용액들은 농도별로 일

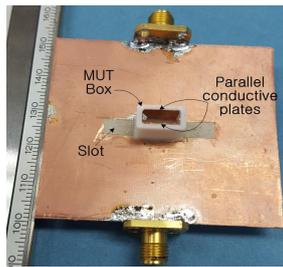
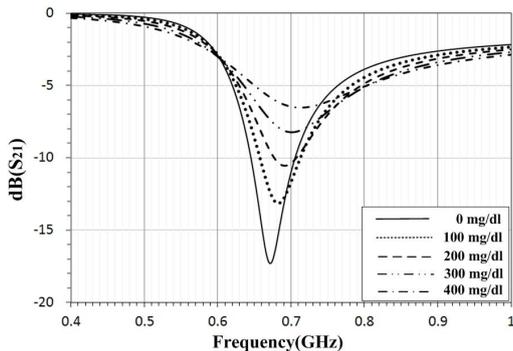


Fig. 6. Photo of the fabricated prototype

Fig. 7. Measured results of Transmission coefficient (S_{21}) for the prototype

부 차이가 있어 공진주파수 변화에 영향을 주었다. 그러나 농도에 따른 공진주파수 변화보다 전송계수 변화가 훨씬 두드러지므로 이를 농도검출 센서에 적용한다.

측정 결과들은 낮은 농도의 수용액들을 사용하는 응용에서 이들을 구분할 수 있는 민감도를 갖는다고 평가된다. 상대유전율이 더욱 크고, 보드 높이(h_0)가 좀 더 작은 PCB를 사용할 경우 400 mg/dl 주변에서 보다 나은 검출 감도를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문에서는 준 마이크로파를 이용하여 NaCl 수용액에서 낮은 수준 농도들을 감지할 수 있는 검출회로를 마이크로스트립선로위에 구현하였다. 0~400 mg/dl 범위의 농도들을 구분할 수 있는 DGS 방식의 공진기 구조가 제안되었고 최적화되었다. 수용액을 평행판 커패시터의 유전체로 삽입하여 강한 전기장을 관통하게 함으로써 낮은 농도 변화를 검출할 수 있는 구조이다. 시뮬레이션을 기반으로 설계된 시작품이 제작되었고, 100 dg/ml 단위로 400 mg/dl 까지 농도를 증가시켜 전송계수(S_{21})를

UHF 대역에서 측정하였다. 단계별 최소 1.8 dB(S_{21}) 차이를 확보하여 NaCl 농도센서 가능성을 확인하였다.

본 연구결과에서 적용한 방법은 에탄올, 메탄올, 알코올 등 다른 종류의 수용액 농도나 염분 혹은 당분 농도들을 측정하고자하는 각 산업계에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] S. H. Lee & D. W. Lee. (2016). Actual Cases for Smart Fusion Industry based on Internet of Thing, *Journal of the KCS*, 7(2), 1-6.
- [2] S. H. Lee & D. W. Lee. (2015). On Issue and Outlook of wearable Computer based on Technology in Convergence, *Journal of the KCS*, 6(3), 73-78.
- [3] G. H. Yun. (2017). Non-Invasive Blood Glucose Sensor By Sub-Microwave Oscillator, *Journal of the KCS*, 8(9), 9-16.
- [4] <http://www.elec4.co.kr/article/articleView.asp?idx=7276>
- [5] <https://www.bioin.or.kr/InnoDS/data/upload/industry/1436168172020.pdf>
- [6] Y. S. Park. (2008), Comparison of dietary behaviors related to sodium intake by gender and age. *Korean Journal of Community Nutrition*, 13(1), 1-12.
- [7] G. Yang I. et al. (2010). Development of a Salt Taste Sensor for Improvement on Meal Habit. *J. of Bio-Systems Eng.* 35(5), 310-315.
- [8] J. J. Yoho. (1998). *Design and Calibration of a RF Capacitance Probe for Non-Destructive Evaluation of Civil Structures*. Virginia Polytechnic Institute and State University, MS thesis.
- [9] S. H. Kim, et al. (2007). Concentration of Sodium Chloride Solutions Sensing by Using a Near-Field Microwave Microprobe. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 27(1).
- [10] L. J. Li. (2010). Simultaneous Detection of Organic and Inorganic Substances In Mixed Aqueous Solution Using a Microwave Dielectric Sensor. *PIER C*, 14, 1630-1671.
- [11] G. Gennarelli, et al. (2013). A Microwave Resonant Sensor for Concentration Measurements of Liquid Solutions. *IEEE Sensors Journal*, 13(5), 1856-1864.
- [12] C. F. Liu, et al. (2018). Improved Hairpin Resonator for Micro-fluidic Sensing. *Sensors and Materials*, 30(5), 979-990.
- [13] A. Soffiatti, et al. (2018). Microwave Metamaterial-

Based Sensor for Dielectric Characterization of Liquids. *Sensors*, 18(5), 1513.

- [14] C. Jang, et al. (2018). Non-Invasive Discrimination between Glucose and Sodium Chloride Solution using Complementary Split Ring Resonator. *JKIEES*, 29(4), 247-255.
- [15] C. J. Wang & C. S. Lin. (2008). Compact DGS resonator with improvement of Q-factor. *Electronic Letters*, 44(15).

윤 기 호(Gi-Ho Yun)

[정회원]



- 1984년 2월 : 연세대학교 전자공학
학과(공학사)
- 1999년 2월 : 연세대학교 전자공
학과(공학박사)
- 1985년 1월 ~ 1997년 2월 : 삼성
종합기술원, 삼성전기 근무
- 1997년 3월 ~ 2009년 2월 : 호남대학교 전파공학과 부
교수
- 2009년 3월 ~ 현재 : 성결대학교 정보통신공학부 부교수
- 관심분야 : RF 능동/수동회로, 안테나, 바이오센서
- E-mail : ghyun@sungkyul.ac.kr