

# 포도당 검출을 위한 라디오 주파수 마이크로파의 적용

## Application of Radio Frequency Microwave Technique for Glucose Detection

조태경\*, 김태우\*\*, 박병수\*\*\*, 조동욱\*\*\*\*, 한길성\*\*\*\*\*,  
상명대학교 정보통신공학과\*, 한양사이버대학교 정보통신학과\*\*, 상명대학교 컴퓨터시스템공학과\*\*\*,  
충북과학대학 정보통신학과\*\*\*\*, 서원대학교 정보통신공학과\*\*\*\*\*

Tae-Kyung Cho(tkcho@smu.ac.kr)\*, Tae-Woo Kim(twkim22@hanmail.net)\*\*,  
Byoung-Soo Park(bpark@smu.ac.kr)\*\*\*, Dong-Uk Cho(ducho@ctech.ac.kr)\*\*\*\*,  
Khil-Sung Han(kshan@seowon.ac.kr)\*\*\*\*\*

### 요약

라디오 주파수 마이크로파는 시료에서 포도당 농도를 측정하기 위해 사용될 수 있다. 본 논문에서는 포도당을 포함하는 증류수, 생리수, 인체 시럽, 인체 혈액 용액에 대해서 상대 유전율을 측정함으로써 포도당 농도 측정의 예비 실험 결과를 보고한다. 근육과 같은 인체 조직의 포도당 농도 측정에서 마이크로파 방법은 NIR 방법보다 투과 깊이가 약 100배 더 컸으며, 이것은 인체의 포도당을 비침습적인 검출에 더 유용한 장점이 된다. 실험에서 인체 혈액 용액에서 포도당 농도를 검출하기 위한 측정 감도는 5.8 GHz 부근에서 약 57 mg/dl를 보였다.

■ 중심어 : 포도당 농도 측정 | 라디오 주파수 마이크로파 | 상대 유전율 |

### Abstract

Radio frequency (RF) microwave can be used to predict glucose concentration in a sample. This paper presents preliminary results in determining the concentration by measuring relative permittivity in the solutions of distilled water, saline, human serum, and human blood containing glucose. It was shown that the microwave method has larger penetration depth of about 100 times of NIR, than NIR technique in measuring glucose concentration for the tissue like a human muscle. The larger penetration depth of the method has advantages because it is more useful to detect glucose in a human body non-invasively. In the experiments, sensitivity for detecting glucose concentration in blood solutions was almost 57 mg/dl at the frequency of approximately 5.8 GHz.

■ Keyword : Measuring glucose concentration | Radio frequency microwave | Relative *permittivity* |

## 1. 서론

당뇨병은 전 세계적으로 사망 또는 장애의 주요 원인

이며, 미국에서는 약 1600만여 명이 당뇨병으로 고통을 받고 있다. 당뇨병의 합병증은 심장병, 신장병, 시력 저

하, 신경 손상, 고혈압 등으로, 미국에서는 매년 약 900 억불 이상의 경제적 비용이 드는 것으로 추산되고 있다 [1]. 장기적인 임상 연구의 결과로 보면, 혈액 포도당을 적절히 조절하면 합병증의 발병을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다[2].

당뇨병 환자들에게는 혈액의 포도당 농도가 음식과 활동을 조절하기 위한 대단히 중요한 관심 사항이다. 따라서 이들 환자들은 몇 가지 포도당 측정기로 혈액속의 포도당의 농도를 감시할 수 있으면 대단히 편리하다. 평상시 환자가 인체 혈당조절을 할 수 있는 중요한 요소는 가정에서 당뇨병 환자 스스로가 혈액 포도당을 감시하는 것이다. 그러나 현재 포도당 모니터링 방법은 혈액 채취를 통한 침습적(invasive)이고 통증을 수반하기 때문에 일상적인 사용이 용이하지 않다. 포도당의 비침습적(noninvasive, NI) 모니터링은 침습적 모니터링에서 발생하는 통증이 없기 때문에 특히 더 관심을 가져왔다. 이러한 편리성 때문에 좀 더 자주 검사를 할 수 있게 하므로 포도당 농도를 좀 더 엄격히 제어할 수 있다. 그래서 당뇨병 환자의 혈액 포도당을 잘 조절하기 위한 가능성을 높이기 위해서는 혈액 포도당의 자기 모니터링을 위한 새로운 방법이 필요하다.

microdialysis와 같은 침습적 방법부터 스펙트로스코피(spectroscopy)을 이용한 비침습적(noninvasive) 방법까지 혈액 포도당을 측정하는 많은 방법들이 개발되어 왔다. 각 방법은 장단점을 갖고 있으며, 그 중 몇 가지 방법은 인증기관에서 승인을 받기도 했다. 그러나 혈액 포도당의 자기 모니터링을 위한 비침습적 방법들은 아직까지 인증을 받지 못하고 있다.

대부분의 비침습적 방법들은 인체 혈액의 포도당 농도를 추정하기 위해서 근적외선(near-infrared, NIR) 스펙트럼 방법[3][4]이다. 이 방법은 작은 에너지의 NIR 빛을 인체에 조사하여, 조사된 빛이 인체 조직의 화학적 원소와 상호 작용 때문에 일부는 흡수되고 일부는 산란되고 일부는 검출기로 반사된다. 이 때 흡수 스펙트럼은 물, 지방, 단백질, 포도당 등의 많은 인체 조직 구성 요소의 스펙트럼 시그니처(signature)들을 갖고 있다. 비침습적 NIR 샘플 스펙트럼의 예가 그림 1과 같이 보여준다[4].

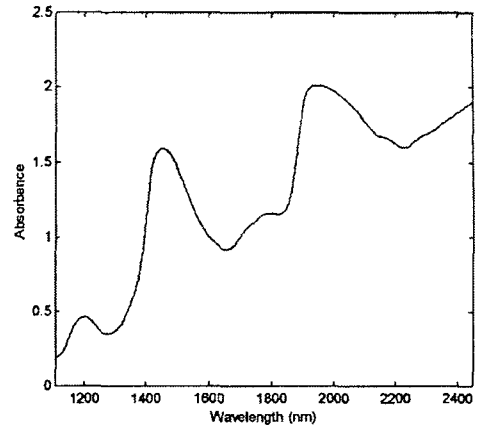


그림 1. 인체 팔에서 투과 반사 모드로 얻어진 흡수 스펙트럼의 예.

여기서, 혈액 포도당 농도의 추정은 피부 아래의 조직 부피에 대해서 혈액 포도당의 흡수 시그니처에 의해 발생하는 빛의 감소량을 검출함으로써 가능하다. 그림에서는 1600 nm와 2230 nm 파장 부근에서 포도당의 흡수율이 물보다 4~5배 작게 검출된다.

그 외의 방법 중의 하나가 라디오 주파수 마이크로파(radio frequency microwave) 방법[5]이다. 포도당 농도 측정을 위한 마이크로파 방법은 NIR 방법보다 투과 깊이가 더 큰 이점이 있으므로 좀 더 용이하게 측정할 수 있다. 기존의 문헌[5]에서는 용액에서 포도당 농도를 측정함에 있어서 라디오 주파수 마이크로파의 사용에 대해서 설명하고 있다. 본 논문은 증류수(distilled water), 셀라인(saline), 인체 씨럼(serum), 인체 혈액(blood) 용액에 대해서 라디오 주파수 마이크로파를 이용하여 상대 복소 유전율(relative complex permittivity)을 측정함으로써 포도당 농도를 측정하는 방법을 다룬다. 또 4가지 매질에 대해서 마이크로파 특성을 살펴보고, 포도당 검출 감도, 최적 마이크로파 주파수, 포도당 검출 가능성 등의 몇 가지 실험 결과를 토의한다.

## II. 마이크로파를 이용한 포도당 측정 방법

복소 유전율(complex permittivity) 또는 유전 상수(dielectric constant)[6]는 다음 식 (1)로 정의된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon - j\sigma/\omega = \epsilon' - j\epsilon'' \\ &= \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') = \epsilon_0\epsilon_r \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m는 자유 공간의 유전율,  $\sigma$ 는 도전율,  $\omega$ 는 각주파수,  $\epsilon_r$ 는 상대 복소 유전율을 나타낸다. 또,  $\epsilon', \epsilon''$ 는 각각 복소 유전율  $\epsilon_c$ 의 실수부와 허수부를 나타낸다.

상대 복소 유전율은 유전율 프로브를 이용해서 측정할 수 있다. 본 논문에서 사용하는 복소 유전율 측정 도구는 그림 2와 같이 Agilent 8753ES S-Parameter Network Analyzer(<http://www.agilent.com>)에 연결된 Agilent 85070D 유전율 프로브를 이용해서 측정한다.

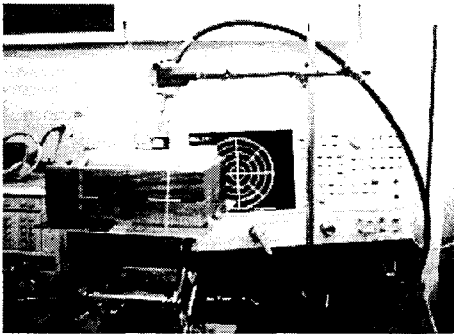


그림 2. 4가지 용액에서 포도당 농도 측정을 위한 실험 장치

유전율 프로브는 그림 3과 같이 원형의 구조로 되어 있다. 노트북 컴퓨터에서 실행되는 소프트웨어는 이들 측정 장치를 제어하고 측정 장치들로부터 받은 전자파 반사율과 같은 S-파라미터들로부터 유전율을 계산한다. 핸들이 달린 리프트 잭은 스탠드에 고정된 프로브에 용액이 담긴 유리 비커를 안정되게 이동할 수 있도록 하기 위해 사용된다.

측정을 위한 첫 번째 단계는 몇 가지 시료에 대한 측정 장치의 캘리브레이션(calibration)이다. 캘리브레이션은 시료에 대한 측정 유전율과 포도당 농도 간의 함수 관계를 나타내는 파라미터를 찾는 것을 의미한다. 캘리브레이션은 측정 전에 한 번만 수행한다. 캘리브레이션 후 포도당이 포함된 4가지 용액에 대해서 상대 복소 유전율을 측정한다.

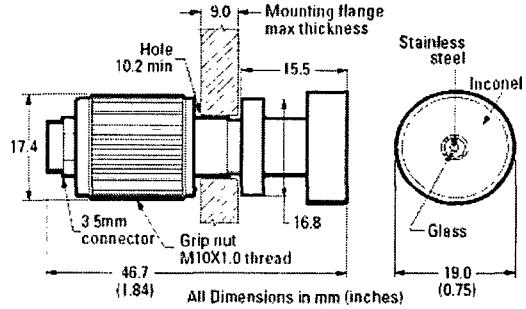


그림 3. Agilent 85070D 유전율 프로브의 구조.

30-ml 부피의 시료를 50-ml 부피의 유리 비커에 담는다. 측정 장치는 0.3~6 GHz 범위의 주파수에서 동작하며, 여기서 6 GHz는 본 연구에서 사용하는 S-파라미터 네트워크 분석기인 마이크로파 시스템의 최대 주파수 동작 범위이다. 유전율의 측정 정확도를 향상시키기 위해 이 주파수 범위를 0.3~0.1, 1.0~2.0, 2.0~3.0, 3.0~4.0, 4.0~5.0, 5.0~6.0 GHz로 6개의 주파수 대역으로 나누어 사용한다.

실험을 위해서 증류수, 셀라인, 인체 씨럽, 인체 혈액 용액 등 4가지 종류의 시료를 준비한다. 각 그룹은 0 mg/dl, 200 mg/dl, 1000 mg/dl의 서로 다른 포도당 농도를 갖는 3가지 용액으로 구성된다. 셀라인은 증류수에 900 mg/dl 농도의 NaCl이 포함되어 있는 용액이다. 여기서 이 NaCl 농도는 정상 혈액에 포함되어 있는 양이다.

0 mg/dl의 포도당 농도를 갖는 시료는 각 그룹에서 각 시료 200 mg/dl와 1000 mg/dl를 측정하기 직전에 표준치(reference value)로 측정된다. 측정된 각 시료의 상대 복소 유전율은 표준치로 빼서 사용하게 되는데, 이를 표준화(referencing)라 한다. 표준화는 측정치의 변화를 줄이기 위해 사용된다.

표준화된 유전율 데이터를 이용해서, 용액에서 포도당 농도를 측정하기 위한 최적 주파수를 분석한다. 이를 위해서 포도당 농도 검출의 감도(sensitivity in detecting glucose concentration)[8]  $P_c$ 는 식 (2)로 정의될 수 있다.

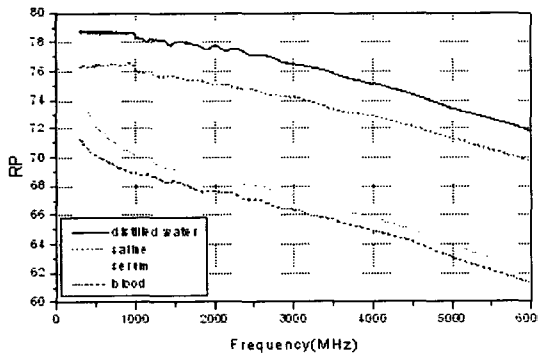
$$P_c = D_c(\sigma_1 + \sigma_2) / |\mu_1 - \mu_2| \quad (2)$$

여기서,  $D_c$ 는 두 시료 간의 실제 포도당 농도의 차이 값이고,  $\sigma_1, \sigma_2$ 와  $\mu_1, \mu_2$ 는 각각 시료 1과 시료 2에서 측정된 유전율의 표준편차와 평균치를 나타낸다.

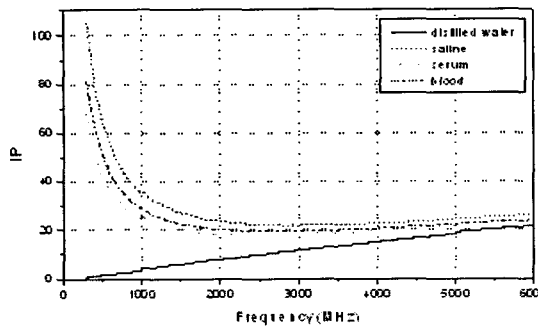
### III. 실험 결과 및 토의

측정 실험은 온도 조절 장치에 의해 일정한 온도로 유지시킬 수 있는 전자기 차폐실(electromagnetically shielded room)에서 수행되었다. 또한 시료는 매 측정마다 써미스터(thermistor)로 측정하여 실험실의 온도 30°C에 맞추어 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 상대 복소 유전율은 포도당이 포함된 각 용액 그룹에 대해서 일정한 무작위의 순서로 20회 반복 측정하였다.

본 연구에서 200 mg/dl의 포도당이 포함된 4가지 용액에 대해서 유전율의 전형적인 스펙트럼은 그림 4와 같다.



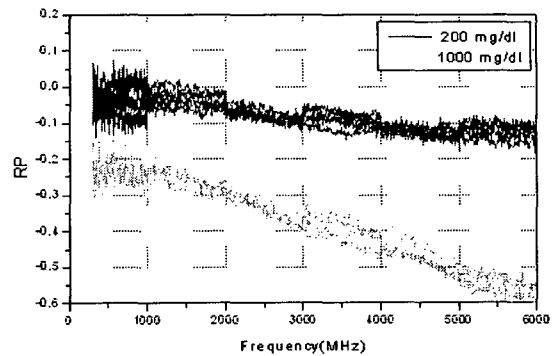
(a)



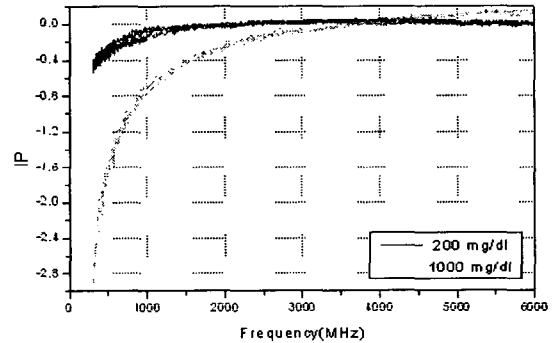
(b)

그림 4. 200 mg/dl의 포도당이 포함된 4가지 용액에 대해서 상대 유전율의 전형적인 스펙트럼: 상대 복소 유전율의 (a) 실수부(RP)와 (b) 허수부(IP).

중류수 용액은 유전율의 실수부(real part, RP)와 허수부(imaginary part, IP)에서 각각 높은 값과 낮은 값으로 나타났다. 셀라인 용액에 대한 표준화된 유전율 데이터의 전형적인 스펙트럼은 그림 5와 같다.



(a)



(b)

그림 5. 200 mg/dl와 1000 mg/dl의 포도당이 포함된 셀라인 용액에 대해서 측정된 상대 복소 유전율에 대해서, 0 mg/dl의 포도당이 포함된 용액으로 표준화한 유전율 데이터의 전형적인 스펙트럼: 상대 복소 유전율의 (a) 실수부(RP), (b) 허수부(IP)

그림 6은 4가지 용액에 대해서 측정된 복소 유전율의 실수부와 허수부의 표준화된 데이터들의 평균과 표준편차를 보여준다. 여기서, 4가지 용액에 200 mg/dl와 1000 mg/dl의 농도가 되도록 포도당 추가하였으며, 20회의 측정에서 매 측정 때마다 기준치로 0 mg/dl의 용액에 대해 측정하여 표준화하였다.

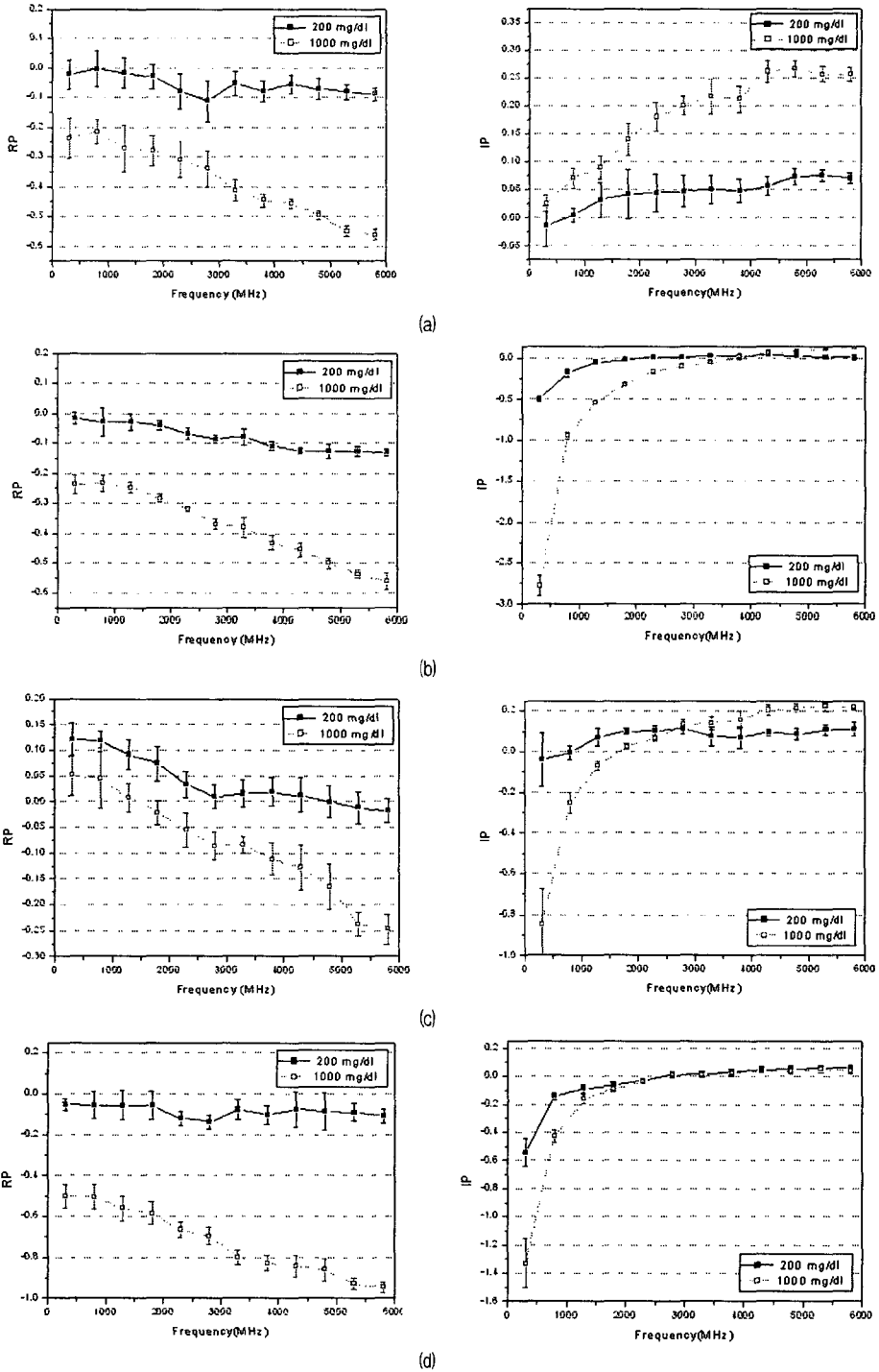


그림 6. 200 mg/dl와 1000 mg/dl의 포도당 농도인 (a) 증류수, (b) 셀라인, (c) 인체 씨름, (d) 인체 혈액 용액에 대해서, 측정된 상대 복소 유전율의 실수부(RP)와 허수부(IP)에 대한 스펙트럼의 표준화된 유전율 데이터의 평균과 표준편차.

주파수가 증가함에 따라, 증류수, 셀라인, 인체 씨럽, 인체 혈액 용액에 대해서 200 mg/dl와 1000 mg/dl의 포도당 농도 간의 실수부와 허수부에 대한 평균치의 차이는 그림 6과 같이 각각 증가하고 감소한다. 그러나 증류수에 대해서는 허수부가 증가하며, 그 변화량은 각 주파수 범위에 따라 다르게 나타났다.

포도당 농도를 측정하기 위한 최적 주파수 범위는 표 1과 같이 서로 다른 포도당 농도를 갖는 두 시료간의 평균치의 차이 값이 큰 영역으로 선택할 수 있다. 표에서 5.8 GHz 주파수 부근에서 혈액 용액에 대해서 57 mg/dl의 포도당 농도 검출 감도를 얻을 수 있었다. 이것은 더 높은 주파수 범위에서 상대 유전율의 실수부가 포도당 농도를 측정하는데 더 적합하다는 것을 나타낸다.

이 주파수는 약 514~2100 nm의 파장[3] 범위를 사용하는 NIR 방법에서보다 훨씬 낮은 주파수 범위이다. 이 주파수 범위에서 표면 깊이(skin depth)[6]라 불리는 투과 깊이는 식 (3)과 같이 계산될 수 있다. 여기서, 표면 깊이는 파의 크기가 1/e의 크기로 감소했을 때의 표면으로부터의 거리를 나타낸다.

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} \quad [m] \quad (3)$$

여기서,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ 는 주파수[Hz],  $\mu$ 는 투자율 [H/m],  $\sigma$ 는 도전율[S/m]을 나타낸다. 본 연구에서는 측정 점을 인체의 많은 부분으로 구성된 물이 많이 포함된 근육으로 모델링 된다고 가정한다. 그래서 측정 대상인 인체의 근육에 대한 상대 유전율, 도전율, 투자율(permeability)을 각각 약 43, 5 [S/m],  $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m][7]로 가정한다. 파장과 주파수의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\lambda = 1/(f\sqrt{\mu\epsilon}) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터 RF 마이크로파와 NIR 방법에 대

한 투과 깊이는 각각 약 2.955 [mm], 0.024~0.049 [mm]로 계산될 수 있다. 투과 깊이가 더 큰 측정 방법은 파가 인체 속으로 더 멀리 도달할 수 있으므로 인체의 포도당을 비침습적 검출에 더 유용하다

인체 시스템에서 포도당 농도는 정상인에 대해서는 약 60 mg/dl~150 mg/dl 범위를 가지며, 당뇨병 환자에 대해서는 50 mg/dl~500 mg/dl 범위를 갖는다[5]. 예를 들면, 정상 성인에 대한 fasting plasma glucose (FPG)는 약 110 mg/dl이며, 비정상인 경우는 126 mg/dl를 넘어간다. 본 논문의 방법은 당뇨병 환자의 포도당 농도를 대략적으로 모니터링하는 데 사용될 수 있다. 이 목적을 위해서는 포도당 농도, 측정점과 그 온도, 다른 측정 조건을 포함하는 캘리브레이션을 각 개인마다 수행해야 한다. 본 연구의 실험에서 사용한 Agilent의 마이크로파 시스템은 RF 마이크로파 분야에서 범용이므로 포도당 검출 감도가 떨어진다. 고주파수 대역에서 유전율을 측정하기 위해 전용의 더 높은 정확도의 장치를 사용한다면, 용액에서 포도당 농도를 검출하기 위한 측정 감도가 더 좋아질 것이다.

#### IV. 결론

본 논문은 포도당이 포함된 증류수, 셀라인, 인체 씨럽, 인체 혈액 용액에 대해서 라디오 주파수 마이크로파 유전율 프로브를 사용하여 0.3~6 GHz 주파수 범위의 상대 복소 유전율을 측정하여 분석하였다. 실험에서 혈액 용액에서 포도당 농도 검출 감도는 약 5.8 GHz 주파수에서 약 57 mg/dl로 나타났다. 고주파수에서 유전율을 측정할 수 있는 전용의 더 높은 정확도를 갖는 장치를 사용하면, 용액에서 포도당 농도를 검출하기 위한 더 좋은 측정 감도를 얻을 수 있고, 실제 임상적으로 사용할 수 있는 비침습적 포도당 농도 측정기가 될 것이다.

표 1. 표본화된 주파수에서 인체 혈액에 대한 포도당 농도 검출의 감도(mg/dl).

주파수(GHz)	0.3	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.8	5.3	5.8
실수부(RP)	154	231	206	189	103	112	92	93	145	152	68	57
허수부(IP)	280	184	653	1547	5445	7511	2347	4714	3716	1602	5282	1320

참고 문헌

- [1] Diabetes statistics, National Institutes of Health Publication No.98-3926, Bethesda, MD: National Institutes of Health, 1997.
- [2] The Diabetes Control and Complications Trial Research Group. The effect of intensive treatment of diabetes on the development and progression of long-term complications in insulin-dependent diabetes mellitus, *N Engl J Med* 1993;329:977-86.
- [3] Omar S. Khalil, "Spectroscopic and clinical aspects of noninvasive glucose measurements", *Clinical Chemistry*, 45:2, pp. 165-177, 1999.
- [4] Stephen F. Malin, Timothy L. Ruchti, Thomas B. Blank, Suresh N. Thennadil, and Stephen L. Monfre, "Noninvasive prediction of glucose by near infrared diffuse reflectance spectroscopy," *Clinical Chemistry*, 45:9, pp. 1651-1658, 1999.
- [5] Milton E. Fuller, Davic W. Deamer, Mark N. Iverson, Ajit J. Koshy, "Radio frequency spectral analysis for in-vitro or in-vivo environments," United States Patent, Patent Number 5792668, Date of Patent Aug. 1998.
- [6] Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore, and Adrian K. Fung, *Microwave remote sensing, active and passive: Volume I. Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, Artech House, 1981.
- [7] Fernando Bardati, Valerie J. Brown, and Piero Tognolatti, "Spectral microwave radiometry for subcutaneous temperature imaging," *Non-invasive thermometry of the humna body*, CRC Press, pp. 219-247, 1996.
- [8] M. Iwatsuki, M. Kawamata, T. Higuchi, "Statistical sensitivity and minimum sensitivity structures with fewer coefficients in discrete time linear systems," *IEEE Trans. on Circuit*

and Systems, Vol.37, No.1, pp. 72-80, 1990.

저자 소개

조 태 경(Tea-Kyung Cho)

정회원



- 1984년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 2001년 9월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 2003년 9월~현재 : 상명대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야> : 초고속정보통신망, e-Learning

김 태 우(Tae-Woo Kim)

정회원



- 1990년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 1995년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 2003년 3월~현재 : 한양사이버대학교 정보통신학과 교수

<관심분야> : 영상처리, 인공신경망, 생체신호처리

박 병 수(Byoung-Soo Park)

정회원



- 1986년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학사)
- 1989년 8월 : 한양대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 텍사스 A&M(공학박사)
- 1995년 3월~현재 : 상명대학교 컴퓨터시스템공학과 교수

<관심분야> : 임베디드 시스템, 최적화 알고리즘

조 동 옥(Dong-Uk Cho)

정회원



- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학  
학과(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 전자공  
학과(공학석사)
- 1989년 2월 : 한양대학교 전자통  
신공학과(공학박사)
- 2000년 3월~현재 : 충북과학대  
학 정보통신공학과 교수

<관심분야> : 멀티미디어 시스템, 영상처리

한 길 성(Khil-Sung Han)

정회원



- 1972년 2월 : 공군사관학교(이학  
사)
- 1977년 2월 : 서울대학교 전자공  
학과(공학사)
- 1981년 7월 : 서울대학교 대학원  
전자공학과(공학석사)
- 1996년 7월 : 충북대학교 컴퓨터  
공학과(공학박사)
- 1977년 3월~1997년 2월 : 공군사관학교 전자공학  
과 교수
- 1997년 3월~현재 : 서원대학교 정보통신공학과  
교수

<관심 분야> : 통신공학, BIT, 영상공학