

## 폴리비닐알코올로 코팅된 마이크로스트립 결함 접지 구조 기반 마이크로파 센서를 이용한 습도 센서

# Humidity Sensor Using Microwave Sensor Based on Microstrip Defected Ground Structure Coated with Polyvinyl Alcohol

여준호<sup>1\*</sup> · 권영환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>대구대학교 ICT융합학부

<sup>2</sup>대구대학교 화학공학과

Junho Yeo<sup>1\*</sup> · Younghwan Kwon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of ICT Convergence, Daegu University, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Daegu University, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 폴리비닐알코올로 코팅된 마이크로스트립 결함 접지 구조 기반 마이크로파 센서를 이용한 습도 센서의 개발에 대하여 연구하였다. 인터디지털 커패시터 모양의 결함 접지 구조를 마이크로스트립 선로의 접지면에 추가하여 피시험물의 유전율 변화에 민감한 고감도 마이크로파 센서를 설계하였다. 습도에 따라 유전율이 변하는 고분자 물질인 폴리비닐알코올을 제안된 센서의 결함 접지 구조에 얇은 두께로 코팅하였고, 습도에 따른 마이크로파 센서의 전달계수의 공진 주파수와 크기의 변화를 측정하였다. 온습도 챔버를 사용하여 25도에서 상대습도를 40%에서 80%까지 10% 간격으로 증가시켰을 때 전달계수의 공진 주파수는 1.475 GHz에서 1.449 GHz로 감소하였고, 크기는 -32.90 dB에서 -25.67 dB로 증가하였다.

### [Abstract]

In this paper, we have studied a development of a humidity sensor using a microwave sensor based on a microstrip defected ground structure coated with polyvinyl alcohol. A high-sensitivity microwave sensor, which is sensitive to the changes in the permittivity of the material under test, is designed by adding an interdigital capacitor-shaped defected ground structure to the ground plane of a microstrip line. Polyvinyl alcohol, a polymer material whose permittivity varies depending on humidity, is coated with a thin thickness on the defected ground structure of the proposed microwave sensor, and the changes in the resonance frequency and magnitude of the transmission coefficient for the microwave sensor according to humidity are measured. When relative humidity increases from 40% to 80% in 10% increments at a temperature of 25 degrees using a temperature/humidity chamber, the resonant frequency of the transmission coefficient decreases from 1.475 GHz to 1.449 GHz, and the magnitude is increased from -32.90 dB to -25.67 dB.

**Key word** : Polyvinyl alcohol(PVA), Humidity sensor, Defected ground structure, Interdigital capacitor- shaped, Microstrip line.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.627>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 19 November 2020; Revised 26 November 2020

Accepted (Publication) 15 December 2020 (30 December 2020)

\*Corresponding Author: Junho Yeo

Tel: +82-53-850-6642

E-mail: jyeo@daegu.ac.kr

## I. 서론

사물에 통신 기능과 다양한 센서를 결합하여 인터넷에 연결하는 사물인터넷은 4차 산업혁명의 핵심 기술로서 스마트 홈, 스마트 공장, 스마트 시티 등에 널리 적용되고 있다. 사물인터넷을 구현하기 위해서는 주변으로부터 습도, 온도, 공기질, 조도 등의 환경 정보를 수집하기 위해 다양한 형태의 센서가 필요하며 고성능, 소형, 저가격 등이 요구된다[1].

습도는 일상생활에서 쾌적한 환경을 만들기 위해 중요한 물리량이며, 산업과 연구와 관련된 다양한 분야에서 중요한 영향을 미치기 때문에 관리가 필요하다. 습도 센서는 일상 생활에서 주거환경 모니터링을 위해 사용하는 습도계나 가습기뿐만 아니라 토양의 습도 측정, 공정 환경 모니터링, 전시품 보존 등에 다양하게 응용되고 있다[2]-[5].

습도 센서는 측정 방식에 따라 크게 저항 방식과 정전용량 방식으로 구분할 수 있다. 습도에 따른 전기 저항 변화를 이용하여 측정하는 저항 방식은 간단한 구조와 간단한 제조 공정, 저렴한 가격 등의 장점이 있지만, 온도 보정이 필요하고 낮은 습도를 측정할 수 없는 단점이 있다. 습도에 따른 유전율 변화를 이용하는 정전용량 방식은 저항 방식에 비해 가격은 비싸고 센서부 관리가 필요하나, 낮은 습도의 감지가 가능하고 우수한 응답 특성과 선형성 등의 장점이 있다[6],[7]. 습도 표시를 위한 여러 가지 방법 중에서 특정한 온도의 대기 중에 포함되어있는 수증기량을 포화 수증기량으로 나눈 상대습도 (RH; relative humidity)가 가장 널리 사용되고 있다[8].

최근 마이크로파 대역 (0.3~300 GHz)에서 전자파와 물질과의 상호 작용을 기반으로 측정하는 마이크로파 센서와 고분자 물질을 이용한 정전용량 방식 습도 센서도 활발히 연구되고 있다[9],[10]. 특히, 흡수된 물의 양에 비례하여 유전율이 변하는 흡습성 고분자 물질을 이용한 정전용량 방식의 마이크로파 습도 센서도 많이 연구되고 있다. 여러 흡습성 고분자 물질 중에서 폴리이미드(polyimide)가 상용 정전용량 방식 습도 센서에 가장 널리 사용되고 있다[7],[11],[12]. 최근에는 마이크로파 주파수 대역에서 폴리이미드와 폴리비닐알코올(PVA; polyvinyl alcohol)의 습도 센싱 성능을 비교하였고, 폴리비닐알코올이 폴리이미드에 비해 우수한 성능을 가짐을 보였다[13],[14].

본 논문에서는 폴리비닐알코올로 코팅된 마이크로스트립 (microstrip) 결함 접지 구조(DGS; defected ground structure) 기반 마이크로파 센서를 이용한 습도 센서의 개발에 대하여 연구하였다. 먼저, 유전율 변화에 민감한 고감도 마이크로파 센서를 설계하기 위해 인터디지털 커패시터 모양의 결함 접지 구조(IDCS-DGS; interdital capacitor-shaped DGS)를 마이크로스트립 선로의 접지면에 추가하였다. IDCS-DGS 구조는 마이크로스트립 결함 접지 구조로 적용되었을 때 기존의 분할 링 공진기나 C-모양 구조에 비해 피시힘물(MUT; material under test)의 유전율 변화에 더 민감하게 변화한다[15]. 습도에 따라 유전율이 변하는 고분자 물질인 폴리비닐알코올을 결

함 접지 구조에 얇은 두께로 코팅하였고, 습도에 따른 마이크로파 센서의 전달계수( $S_{21}$ )의 공진 주파수와 크기의 변화를 측정하였다. 제안된 마이크로파 습도 센서는 폴리비닐알코올 코팅이 없는 상태에서 전달계수가 1.5 GHz에서 공진하도록 RF-35 기판(비유전율( $\epsilon_r$ ) = 3.5, 두께 = 0.76 mm, 손실 탄젠트 ( $\tan \delta$ ) = 0.0018) 상에 설계하였다. 시뮬레이션과 해석을 위해 CST사의 Microwave Studio를 사용하였다.

## II. 마이크로스트립 결함 접지 구조 기반 마이크로파 습도 센서 구조 및 설계

제안된 IDCS-DGS 기반 마이크로파 센서의 구조와 S-파라미터 특성이 그림 1에 나타나 있다. 마이크로스트립 전송선로의 접지면에 인터디지털 커패시터 모양의 결함 접지 구조를 추가하였으며, 공진 주파수에서 전달계수가 최소가 되는 대역 저지 필터의 특성을 나타낸다. 제안된 마이크로파 센서는 폴리비닐알코올 코팅이 없는 상태에서 그림 1(b)와 같이 전달계수가 1.5 GHz에서 공진하도록 설계하였다.

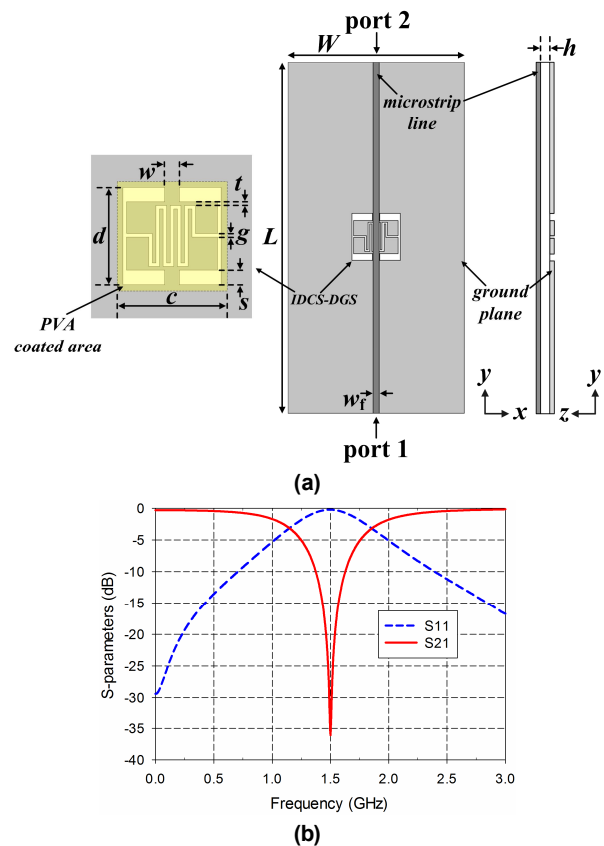


그림 1. 제안된 마이크로스트립 IDCS-DGS 기반 마이크로파 센서 구조와 S-파라미터 특성

Fig. 1. Geometry and S-parameter characteristics of proposed microwave sensor based on microstrip IDCS-DGS.

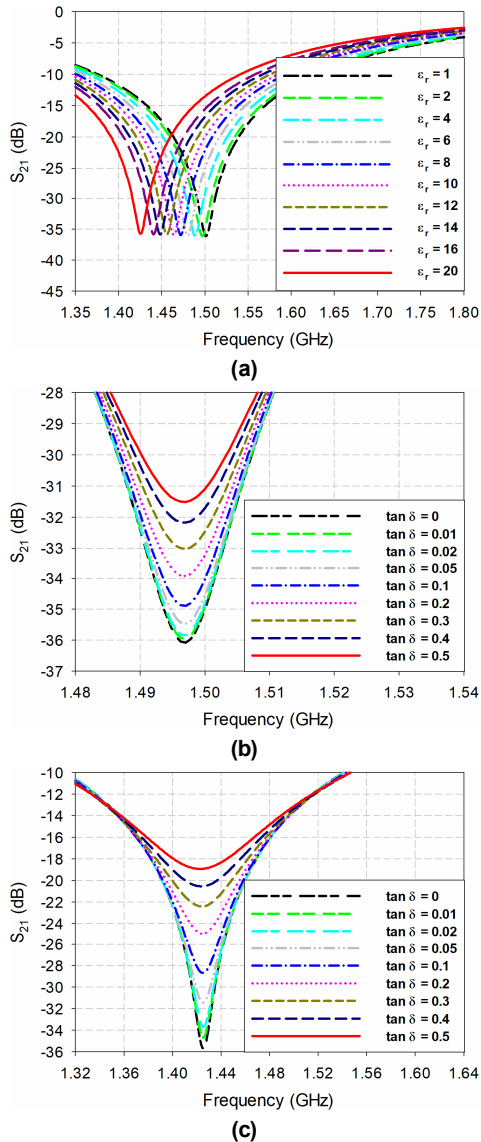


그림 2. 제안된 마이크로파 센서의  $S_{21}$  특성: (a) 피시힘물의 비유전율 변화( $\tan \delta = 0$ ), (b) 피시힘물의 손실탄젠트 변화( $\epsilon_r = 2$ ), (c) 피시힘물의 손실탄젠트 변화( $\epsilon_r = 20$ )  
 Fig. 2.  $S_{21}$  characteristics of proposed microwave sensor: (a) for varying relative permittivity of MUT( $\tan \delta = 0$ ), (b) for varying loss tangent of MUT( $\epsilon_r = 2$ ), (c) for varying loss tangent of MUT( $\epsilon_r = 20$ ).

최종 설계 변수는  $L = 100 \text{ mm}$ ,  $W = 50 \text{ mm}$ ,  $w_f = 1.68 \text{ mm}$ ,  $d = 13.63 \text{ mm}$ ,  $g = 0.5 \text{ mm}$ ,  $s = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 0.5 \text{ mm}$ ,  $w = 2 \text{ mm}$ 이다. 폴리비닐알코올 코팅 영역의 길이는  $c = 15.63 \text{ mm}$ 로 IDCS-DGS 공진기 보다 1 mm 길도록 하여 완전히 덮을 수 있도록 하였다. 폴리비닐알코올 코팅의 두께는 0.02 mm로 측정되었다.

제안된 마이크로파 센서의 성능을 확인하기 위해 코팅 영역의 피시힘물질의 비유전율 변화에 따른  $S_{21}$ 의 공진 주파수와 크기 변화가 그림 2(a)에 나타나 있다. 코팅의 두께는 0.02 mm로 두고, 손실 탄젠트가 0 일 때 비유전율을 1부터 20까지

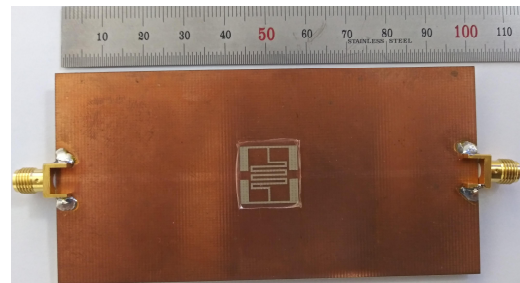
증가시켰다. 이때 공진 주파수는 1.5 GHz에서 1.424 GHz로 줄었고, 크기는 -36.08 dB에서 -35.70 dB로 조금 증가한다. 따라서, 코팅 물질의 비유전율의 변화에 대해서는 공진 주파수가 주로 변화함을 알 수 있다.

그림 2(b)는 코팅 영역의 피시힘물의 비유전율이 2일 때 손실 탄젠트가 0에서 0.5로 증가할 때  $S_{21}$ 의 공진 주파수와 크기의 변화를 나타내었다. 손실 탄젠트가 0일 때 공진 주파수는 1.496 GHz이고 크기는 -36.07 dB이다. 손실 탄젠트가 0.5로 증가하면 공진 주파수는 1.496 GHz로 변화가 없고 크기는 -31.51 dB로 증가한다.

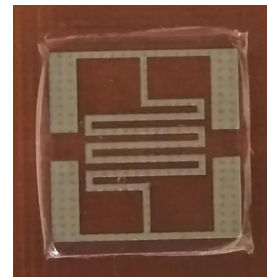
코팅 영역의 피시힘물의 비유전율이 20일 때 손실 탄젠트의 변화에 따른  $S_{21}$ 의 공진 주파수와 크기의 변화가 그림 2(c)에 나타나 있다. 손실 탄젠트가 0일 때 공진 주파수는 1.424 GHz이고 크기는 -35.70 dB이다. 손실 탄젠트가 0.5로 증가하면 공진 주파수는 1.422 GHz로 약간 감소하였으나 크기는 -18.92 dB로 많이 증가한다. 그림 2(b)와 2(c)로 부터 코팅 물질의 손실 탄젠트의 변화에 대해서는 주로 크기가 변화함을 알 수 있다.

### III. 제작 및 습도 실험 결과

습도 실험을 위해 제안된 마이크로스트립 IDCS-DGS 기반 마이크로파 센서를 RF-35 기판( $\epsilon_r = 3.5$ , 두께 = 0.76 mm, 손실 탄젠트 = 0.0018)을 이용하여 제작한 후 그림 3과 같이 폴리비닐알코올을 결합 접지 구조에 코팅하였다.



(a)



(b)

그림 3. 제작된 마이크로파 센서 사진: (a) 전체 구조, (b) 코팅 영역

Fig. 3. Photographs of fabricated microwave sensor: (a) whole structure, (b) coating area.

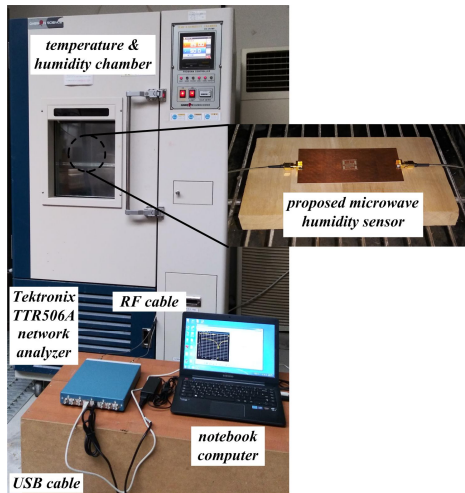


그림 4. 측정 사진  
Fig. 4. Photograph of experiment.

폴리비닐알코올은 폴리비닐 아세테이트에서 아세테이트기를 수산기로 치환하여 생성되는 고분자 물질로서, 필름 및 섬유 형태의 형성이 용이하고 접착 강도가 높고 친수성 성질을 가지고 있다[16]. 질량백분율(wt%) 5인 폴리비닐알코올을 탈이온수(deionized water)에 용해하여 그림 1에 보이는 IDCS-DGS 주변 영역에 55 mg을 떨어뜨려 브러쉬를 이용하여 코팅하였고 오븐에서 섭씨 60도의 온도에서 120분 건조하였다.

상대습도에 따른 마이크로파 센서 전달계수의 공진 주파수와 크기 변화를 측정하기 위해 대원 과학의 DS-150MP 온도습도 챔버를 사용하여 섭씨 25도의 온도에서 상대습도를 40%에서 80%까지 10% 간격으로 변화시켰다. 각 상대습도에서는 챔버 내의 습도를 안정화시키고 코팅 영역에 물기가 충분히 흡수되도록 하기 위해 1시간 동안 유지하였다. 전달계수 측정을 위해 그림 4와 같이 측정 환경을 구성하여 Tektronix TTR506A 벡터 네트워크 분석기를 사용하였다.

상대습도 변화에 따른 폴리비닐알코올이 코팅된 마이크로파 센서의 측정된 전달계수의 변화가 그림 5에 나타나 있다. 폴리비닐알코올이 코팅되지 않은 상태에서 제작된 마이크로파 센서는 전달계수의 공진 주파수가 1.518 GHz이고 크기는 -36.0 dB이다. 상대습도가 증가할수록 전달계수의 공진 주파수가 낮은 주파수로 이동하고 크기는 증가함을 알 수 있다.

그림 6에는 상대습도 변화에 따른 마이크로파 센서의 전달계수 공진 주파수와 크기를 나타내었다. 공진 주파수는 상대습도가 40%일 때 1.475 GHz, 50%일 때 1.472 GHz, 60%일 때 1.468 GHz, 70%일 때 1.463 GHz, 80%일 때 1.448 GHz로 측정되었다. 전달계수의 크기는 상대습도가 40%일 때 -32.90 dB, 50%일 때 -31.67 dB, 60%일 때 -31.01 dB, 70%일 때 -29.12 dB, 80%일 때 -25.67 dB로 측정되었다.

일반적으로 고분자 물질의 비유전율은 3~6 정도이며 물의 비유전율은 1.5 GHz에서 77.6이다[17],[18]. 따라서 흡습성 고분자 물질인 폴리비닐알코올이 습도가 증가하면서 물 분자를 흡수

함에 따라 증가적인 비유전율이 점점 증가하게 되고 이에 따라 공진 주파수도 낮은 주파수로 이동하는 것을 알 수 있다. 손실 탄젠트의 경우도 폴리비닐알코올의 손실 탄젠트는 작은 값을 가지나 물의 손실 탄젠트는 1.5 GHz에서 0.1로 크다. 습도가 증가함에 따라 손실 탄젠트도 물 분자를 흡수함에 따라 커지고 이에 따라 전달계수 공진 주파수의 크기도 커지는 것을 알 수 있다.

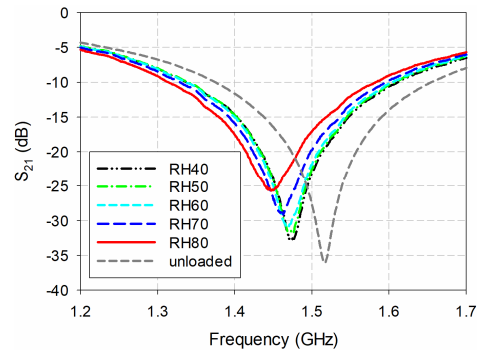


그림 5. 상대습도 변화에 따른 마이크로파 센서의 측정된 전달계수 특성

Fig. 5. Measured  $S_{21}$  characteristic of microwave sensor for varying relative humidity.

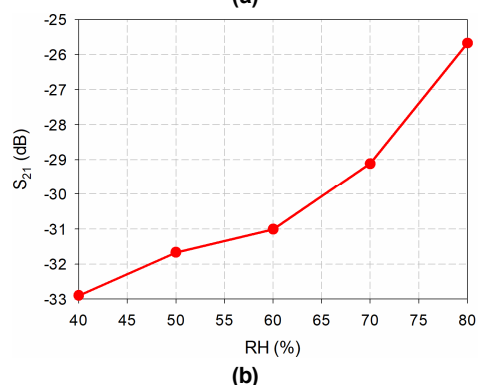
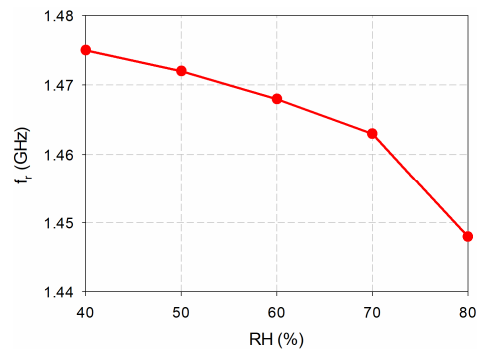


그림 6. 상대습도 변화에 따른 마이크로파 센서 전달계수의 공진 주파수와 크기 비교: (a) 공진 주파수, (b) 크기

Fig. 6. Resonant frequency and magnitude comparison for  $S_{21}$  of microwave sensor vs. relative humidity: (a) resonant frequency, (b) magnitude.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 마이크로스트립 결합 접지 구조 기반 마이크로파 센서와 폴리비닐알코올 코팅을 이용한 습도 센서의 개발에 대하여 연구하였다. 마이크로파 센서의 유전율 변화에 대한 감도를 향상시키기 위해 인터디지털 커패시터 모양의 결합 접지 구조를 마이크로스트립 선로의 접지면에 추가하였다. 습도에 따라 흡습량이 증가하고 이에 따라 유전율이 변하는 고분자 물질인 폴리비닐알코올을 결합 접지 구조 위에 얇은 두께로 코팅하였다. 습도에 따른 마이크로파 센서의 전달계수의 공진 주파수와 크기의 변화를 측정하기 위해 온습도 챔버를 사용하여 25도에서 상대습도를 40%에서 80%까지 10% 간격으로 증가시켰다. 전달계수의 공진 주파수는 상대습도 40%에서 1.475 GHz, 80%에서 1.449 GHz로 감소하였다. 전달계수의 크기는 상대습도 40%에서 -32.90 dB, 80%에서 -25.67 dB로 증가하였다.

향후 상대습도와 전달계수의 공진 주파수, 크기 사이의 관계식을 유도하여 습도 센서로 사용할 수 있는 방법에 대한 연구를 진행하고자 한다.

또한, 제안된 폴리비닐알코올이 코팅된 마이크로파 센서는 습도를 원격으로 측정하기 위한 chipless RFID 센서의 습도 정보 센싱 장치로도 적용하고자 한다.

#### Acknowledgments

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2018R1D1A1B07046040)

#### References

[1] Sensors play key role in pushing industry into fourth age [Internet]. Available: [http://crown.co.za/images/magazines/electricity-control/SpotOn/Sensors\\_play\\_key\\_role\\_in\\_pushing\\_industry\\_into\\_Fourth\\_Age.pdf](http://crown.co.za/images/magazines/electricity-control/SpotOn/Sensors_play_key_role_in_pushing_industry_into_Fourth_Age.pdf).

[2] N. Yamazoe and Y. Shimizu, "Humidity sensors: principles and applications," *Sensors and Actuators*, Vol. 10, No. 3-4, pp. 379-398, Nov. 1986.

[3] B. M. Kulwicki, "Humidity sensors," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 74, No. 4, pp. 697-708, Apr. 1991.

[4] E. Traversa, "Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 23, No. 2-3, pp. 135-156, Feb. 1995.

[5] C. Y. Lee and G. B. Lee, "Humidity sensors: a review," *Sensor Letters*, Vol. 3, pp. 1-15, 2005.

[6] S. Ali, A. Hassan, G. Hassan, L. Bae, and C. Lee, "All-printed humidity sensor based on graphene/methyl-red composite with high sensitivity," *Carbon*, Vol. 105, pp. 23-32, Aug. 2016.

[7] S. W. Hong, Y. M. Kim, and Y. C. Yoon, "Development of capacitive type humidity sensor using polyimide as sensing layer," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 366-372, Aug. 2019.

[8] H. Farahani, R. Wagiran, and M. N. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review," *Sensors*, Vol. 14, pp. 7881-7939, 2014.

[9] K. Saeed, M. F. Shafique, M. B. Byrne, and I. C. Hunter, Planar microwave sensors for complex permittivity characterization of materials and their applications, in *Applied Measurement Systems*, London, United Kingdom: IntechOpen, ch. 15, pp. 319-350, 2012.

[10] Z. Chen and C. Lu, "Humidity sensors: a review of materials and mechanisms," *Sensor Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 274-295, 2005.

[11] P. J. Schubert and J. H. Nevin, "A polyimide-based capacitive humidity sensor," *IEEE Transactions on Electronic Devices*, Vol. 32, No. 7, pp. 1220-1223, Jul. 1985.

[12] J. Boudaden, M. Steinmaßl, H. E. Endres, A. Drost, I. Eisele, C. Kutter, and P. Müller-Buschbaum, "Polyimide-based capacitive humidity sensor," *Sensors*, Vol. 18, pp. 1516, 2018.

[13] E. M. Amin, N. C. Karmakar, and B. W. Jensen, "Polyvinyl-alcohol (PVA)-based RF humidity sensor in microwave frequency," *Progress in Electromagnetic Research B*, Vol. 54, pp. 149-166, 2013.

[14] E. M. Amin, N. C. Karmakar, and B. W. Jensen, "Fully printable chipless RFID multi-parameter sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 248, pp. 223-232, Sep. 2016.

[15] J. Yeo and J.-I. Lee, "High-sensitivity microwave sensor based on an interdigital-capacitor-shaped defected ground structure for permittivity characterization," *Sensors*, Vol. 19, pp. 498, 2019.

[16] S. G. No, G. H. Choe, J. U. Gwag, and W. S. Lyu, "Preparation and application of poly(vinyl alcohol) having various molecular parameters," *Polymer science and technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 4-11, Feb. 2004.

[17] D. Lu, M. Maasch, A. Penirschke, Y. Zheng, C. Damm, and

R. Jakoby, "Broadband permittivity characterization of polyvinyl-alcohol film for humidity sensing applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 64, No. 10, pp. 3255–3263, Oct. 2016.

[18] S. G. O'Keefe and S. P. Kingsley, "Tunability of liquid dielectric resonator antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, pp. 533–536, 2007.



**여 준 호 (Junho Yeo)**

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사),

2003년 8월 : 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 (공학박사),

2003년 9월 ~ 2004년 6월 : 미국 Pennsylvania State University 박사 후 과정

2004년 8월 ~ 2007년 2월 : 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임연구원

2007년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 ICT융합학부 교수

※관심분야 : RFID 및 광대역 안테나, 고감도 마이크로파 센서, Chipless RFID

1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

1994년 3월 ~ 1999년 6월 : 국방과학연구소 연구원



**권 영 환 (Younghwan Kwon)**

1989년 2월 : 경북대학교 고분자공학과 (공학사)

1991년 2월 : 경북대학교 고분자공학과 (공학석사)

1991년 3월 ~ 1996년 7월 : 국방과학연구소 연구원

2001년 5월 : 미국 University of Massachusetts Lowell 화학/플라스틱공학과 (공학박사)

2001년 6월 ~ 2002년 8월 : MIT Postdoc.

2002년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 화학공학과 교수

※관심분야 : 고분자합성, 기능성 고분자, 정보전자재료