

에어로졸 증착한 세라믹/금속 복합막의 금속 함량에 따른 습도 감지 특성 연구

김익수¹, 구상모¹, 박철환², 신원호¹, 이동원^{1,3}, 오종민¹ 

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 광운대학교 화학공학과

³ 한국산업기술시험원 재료기술센터

Study of Humidity Sensing Properties Related to Metal Content of Aerosol Deposited Ceramic/Metal Composite Films

Ik-Soo Kim¹, Sang-Mo Koo¹, Chulhwan Park², Weon Ho Shin¹, Dong-Won Lee^{1,3}, and Jong-Min Oh¹

¹ Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

² Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

³ Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, Seoul 08389, Korea

(Received May 14, 2021; Revised June 7, 2021; Accepted June 7, 2021)

Abstract: Controlling ambient humid condition through high performance humidity sensors has become important for various fields, including industrial process, food storage, and the preservation of historic remains. Although aerosol deposited humidity sensors using ceramic BaTiO₃ (BT) material have been widely studied because of their longtime stability, there remain critical disadvantages, such as low sensitivity, low linearity, and slow response/recovery time in case of the sensors fabricated at room temperature. To achieve superior humidity sensing properties even at room temperature condition, BT-Cu composite films utilizing aerosol deposition (AD) process have been proposed based on the percolation theory. The BT-Cu composite films showed gradually improved sensing properties until the Cu concentration reached 15 wt% in the composite film. However, the excessive Cu (above 30 wt%) containing BT-Cu composite films showed a rapid decrease of the sensing properties. The results of observed surface morphology of the AD fabricated composite films, to figure out the metal filler effect, showed correlation between surface topography as well as size and the amount of open pores according to the metal filler content. Overall, it is very important not only dielectric constant of the humidity sensing films but also microstructures, because they affect either the variation range of capacitance by ambient humidity or adsorption/desorption of ambient humidity onto/from the humidity sensing films.

Keywords: Aerosol deposition, BaTiO₃-Cu composite film, Humidity sensor, Sensitivity, Response/Recovery time

✉ Jong-Min Oh; jmOH@kw.ac.kr

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.
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.

1. 서론

4차 산업혁명 시대에 이르러 사물인터넷, 인공지능, 자율주행 자동차 및 로봇 등의 핵심 기술 중 하나로 첨단 센서가 필수적으로 요구되고 있다 [1-3]. 첨단 센서는 소리, 열 감지, 모션, 이미지, 그리고 습도 등의 다양한 종류로 분

류되어 있으며, 의료용 진단, 인공 피부, 2D/3D 이미지 및 환경 제어 등 세분화된 분야에서 응용되고 있다 [4-8]. 특히나, 습도센서의 경우 산업 공정, 유물 복원, 기상 관측 및 비접촉 시스템 등의 폭넓은 범위에서 사용되고 있으며, 보다 더 정밀한 측정을 위한 습도 제어의 필요성이 날로 증대되고 있는 추세이다 [8-10].

외부 환경의 수분이 감습막에 침투하게 되면 전기저항, 정전용량 혹은 투과율 등이 변화하게 되는데, 이를 측정하는 방식에 따라 다양한 종류의 습도 센서가 존재한다 [9-11]. 그중에서 정전용량 방식의 습도 센서의 경우 넓은 습도 감지 범위, 빠른 응답 속도 및 낮은 히스테리시스를 나타내는 등 우수한 특성을 나타내기에 주로 사용되고 있다 [12]. 최근까지도 상기 습도 센서의 감지 특성을 개선하기 위하여 다양한 물질을 사용하여 감습막 제작에 대한 연구가 진행돼 오고 있다 [8,10]. 특히나 페로브스카이트 구조의 산화물인 BaTiO₃ (BT) 물질의 경우, 화학적 불활성, 다공성 구조 및 친수성을 띠는 특성 등으로 인하여 현재까지도 많은 연구가 진행되어 오고 있다 [9,10].

상온에서 최대 600 m/s의 고속으로 코팅층의 형성이 가능한 에어로졸 증착 공정을 통한 습도 센서의 제작이 최근 몇 년간 주목받고 있으며, BaTiO₃ 물질을 기반으로 향상된 습도 감지 특성들이 보고되고 있다 [10,13,14]. 앞선 연구들을 통해 높은 민감도(461.02 pF/RH%) 및 빠른 응답/회복 속도(3s/6s)가 확인되었지만, 향상된 특성을 위해선 추가적인 열처리 공정이 필수적이었으며 상온에서 제작 직후에는 매우 낮은 민감도(1.39 pF/RH%)가 보고되고 있다 [10].

본 연구에서는, 단일 세라믹 BT만을 사용했을 경우 발생하는 낮은 민감도의 한계를 극복하고, 추가적인 열처리 없이 상온에서 제작만으로 바로 적용이 가능한 습도 센서를 제작하고자 하였다. 민감도를 높이기 위한 방편으로 침투(percolation) 이론에 근거하여 유전특성을 향상시키기 위하여 Cu를 첨가제로 사용하였다 [15]. 서로 다른 Cu 함량에 따라 제작된 BT-Cu 복합막을 감습막으로 사용한 습도 센서의 습도 감지 특성을 측정하고 미세 구조 분석을 진행하였으며, 분석 내용을 토대로 Cu 함량이 습도 감지 특성 변화에 미치는 영향성을 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 습도 센서 제작 과정

세라믹 BT 모재에 서로 다른 비율로 Cu 분말을 첨가한

Table 1. Experimental conditions of the AD process.

Parameters	Conditions
Starting powders	BaTiO ₃ (450 nm) Cu (2.5 μm)
Cu content	0, 7.5, 15, 30, and 45 wt%
Substrate	IDE
Gas flow rate	10 L/min
Type of injected gas	N ₂
Working pressure	5.7~5.8 Torr
Size of nozzle orifice	10 × 0.4 mm ²
Deposition temperature	Room temperature
Vibration	500~700 rpm
Scanning number	5 scan
Total deposition time	15~20 min

BT-Cu 혼합분말을 출발 원료로 사용하여 AD 공정을 통해 코팅층을 증착하였다. 사용된 AD 장비는 주로 에어로졸 챔버, 증착 챔버 및 진공 펌프 등으로 구성된다 [10,13,15]. 먼저, 혼합한 BT-Cu 분말 100 g을 에어로졸 챔버에 위치시킨 후, 혼합분말을 에어로졸화시켜 주기 위해 질량 흐름 제어기를 통한 10 L/min의 N₂ 운송 가스를 에어로졸 챔버에 주입시켜 준다. 이때, 주입시켜 준 가스에 의한 혼합분말의 에어로졸화와 더불어 더욱 풍부한 에어로졸의 발생을 돕도록 에어로졸 챔버 하단부의 진동기를 동작시켜 준다. 발생한 에어로졸은 진공 펌프에 의해 발생한 증착 챔버와 에어로졸 챔버 간의 부분압력 차이에 의해 테플론(Teflon) 관을 따라 빠른 속도로 가속화되어 증착 챔버로 올라가게 된다. 최종적으로, 10 × 0.4 mm²의 면적을 갖는 노즐 입구를 통해 노즐로부터 5 mm의 거리를 두고 떨어져 고정되어 있는 inter-digital-electrodes (IDE) 기판에 분사된다. 분사되는 에어로졸 입자들은 각기 다른 기판 종류에 따라 5 mm × 8 mm, 10 mm × 10 mm 및 10 mm × 10 mm의 증착 범위를 시스템을 통해 미리 설정된 X-Y 축을 따라 이동하며 증착된다. 본 실험의 구체적인 증착 조건은 표 1에 정리하였으며, 최적의 실험 조건 하에서 증착된 BT-Cu 복합막의 특성평가를 위하여 앞서 연구된 논문을 참고하여 AD 실험 조건들을 동일하게 유지시켰다 [15].

2.2 습도 센서 측정

BT-Cu 혼합분말에서 각 분말의 평균 입도 분포를 확인하기 위하여 입도 분석기(PSA, PartAn SI, MICROTRAC,

USA)를 사용하였다. 혼합된 분말을 통해 제작된 습도 센서는 습도 챔버(TH-ME-025, Jeio-tech Co. Ltd., Korea)와 임피던스 분석기(HP-4192A, Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, USA)를 사용하여 민감도, 선형 특성 및 응답/회복 시간을 측정하였다. BT-Cu 코팅층의 표면 형상을 관찰하기 위하여 전계 방출 주사 전자 현미경(FE-SEM, MIRA3 XMU, TESCAN, USA)을 사용하였으며, (AFM, XE-100, Park system, Korea)을 사용하여 3차원적인 표면조도를 측정하였으며, XEI 소프트웨어 프로그램(XEI, Park system, Korea)을 사용하여 3차원적 표면적을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

BT-Cu 복합막을 제작하기 위해 사용된 출발 원료의 형상 및 평균 입자 사이즈에 대한 분석 결과가 그림 1에 나타나 있다. 그림 1(a)와 같이 무정형 450 nm 크기의 BT 입자들이 상당히 뭉쳐 있어 입도분석 결과로부터 평균 입도 (median particle size, D_{50})가 1.16 μm 로 나타남을 그림 1(b)를 통해 확인할 수 있다. 그림 1(c)와 (d)를 통해 Cu는 거의 구에 가까운 형태를 가지며, 평균 입도가 2.47 μm 로 뭉치지 않고 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 원활한 에어로졸 발생을 통한 복합막의 제작을 위해, 분말의 수분기를 제거하여 뭉친 분말을 풀어주고자 사전에 BT 입자들은 건조 오븐 안(100°C)에서 24시간 동안 건조를 진행하였다.

BT-Cu 복합막 내부의 Cu 함량이 점진적으로 증가하는

것을 정량적으로 분석해 보기 위해, 그림 2와 같이 AD를 통해 제작된 복합막의 표면 SEM 이미지로부터 EDS 분석을 진행하였다. 상기 EDS 분석 결과를 통해서 출발원료 내의 Cu 함량을 7.5, 15, 30, 그리고 45 wt%로 높여 줄수록 복합막 내에 분포된 Cu 함량이 각각 0.28, 5.93, 7.15, 그리고 9.79 wt%로 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 최초에 혼합했던 원료 분말 내의 Cu의 양보다 복합막으로 형성시킨 이후에 Cu 함량에서의 큰 차이가 발생한 원인은 Cu에 비해 상대적으로 BT의 비중이 가볍기 때문인 것으로 생각된다 [16,17]. 비록 원료 분말과 AD를 통해 제작한 복합막 내부의 Cu 함량이 다소 차이를 나타낼지라도, 선행된 연구를 통해서 밝혀졌듯이 지속적으로 Cu 함량이 증

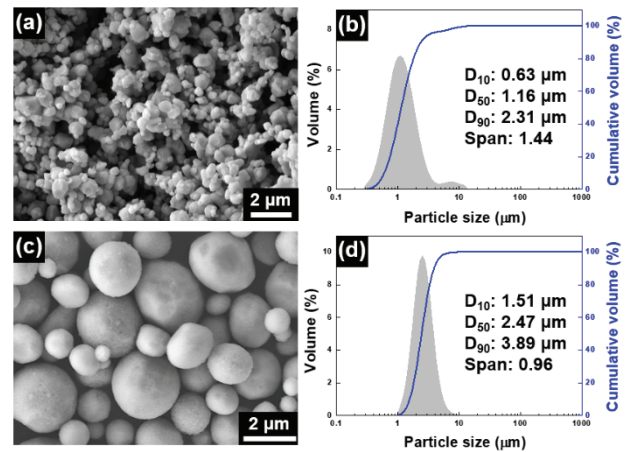


Fig. 1. Powder SEM images and PSA of (a) and (b) agglomerated amorphous BaTiO₃ with 450 nm diameter and (c) and (d) spherical Cu with 2.5 μm diameter.

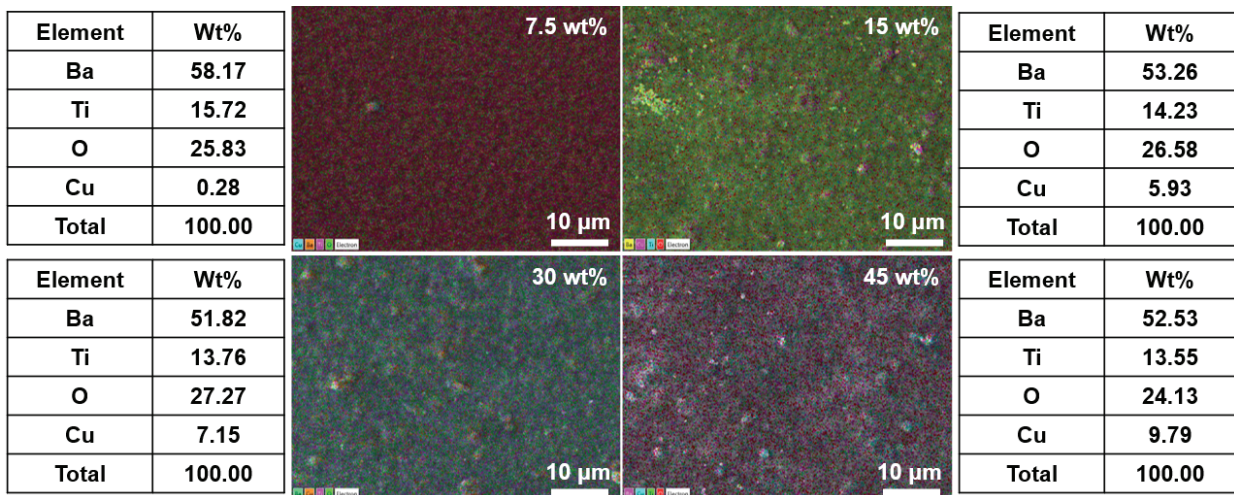


Fig. 2. Surface SEM images and EDS analysis of BT-Cu composite films according to Cu ratios of 7.5, 15, 30, and 45 wt%.

가하고 있기 때문에 복합막의 유전율은 점차 증가하게 될 것임을 충분히 짐작해 볼 수 있다 [15]. 앞선 연구에서 세라믹-금속 복합막 내부의 금속의 함량을 증가시킬 경우 침투 효과(percolation effect)에 의해 복합막 내부의 전도 네트워크가 형성되게 되는데, 이때 맥스웰-와그너 분극 효과(Maxwell-Wagner polarization) 및 마이크로 커패시터 구조에 의한 세라믹/금속 복합막의 유전율 상승 현상이 일어나게 된다 [15,18-20]. 맥스웰-와그너 분극 효과는 첨가된 금속과 세라믹 매트릭스 사이 계면에 트랩된 전하에 의해 공간 전하 분극 혹은 계면 분극이 유도되는 현상으로써 유전율 상승에 기여하게 된다 [21]. 이와 달리, 마이크로 커패시터 구조의 경우 세라믹-금속 복합막 내부에 첨가된 구형의 금속 입자들에 의해 주로 형성되어 복합막의 유전특성 향상에 기여하게 된다. BT-Cu 복합막의 경우, 마이크로 커패시터 구조에 의해 증가된 유전율을 기반으로 하여, 상대습도 변화에 따른 커패시턴스 값의 변화폭을 크게 만들어 주기 때문에 습도 감지 필름의 민감도를 상승시켜 줄 것으로 예측하였다 [10].

그림 3은 AD 공정을 통해 IDE 기판 상에 감습막으로 제작된 BT-Cu 복합의 습도 감지 특성을 살펴보고자 상대습도의 변화에 따른 커패시턴스 값의 변화를 나타내고 있다. 측정된 그래프를 통해 상대습도가 20%에서 95%까지 변화할 때, 선행된 연구결과에서 나타난 복합막의 유전특성에 비례하여 Cu 함량이 15 wt%까지는 Cu가 증가할수록 측정된 커패시턴스 값이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 30 wt% 이상의 Cu가 혼합된 BT-Cu 복합막의 경우, 상대습도가 20%에서 95%까지 변화할 동안에 커패시턴스 값의 차이가 거의 없으며 단일 BT 물질로 제작된 센서보다도 커패시턴스 값의 변화가 없음을 확인할 수 있

다. 상기 결과로부터, 복합막 내의 Cu 함량 증가에 따라 상승될 것으로 예측되는 복합막의 유전율이 상대습도 변화에 따른 커패시턴스 변화 폭을 증가시키는 데 있어 절대적인 역할을 하지 않음을 확인할 수 있다.

제작된 습도 센서의 여러 감지 특성들을 세밀히 살펴보기 위해 측정된 BT-Cu 복합막의 민감도/선형성 및 응답/회복 시간을 그림 4에 나타냈다. Cu 함량이 0, 7.5, 15, 30, 그리고 45 wt%로 점차 증가함에 따라 민감도의 경우 0.90, 7.82, 10.61, 0.09, 및 0.05 pF/RH%의 값을 각각 나타내고 있는 것을 그림 4(a)에서 확인할 수 있다. 또한, 선형성은 0.85, 0.873, 0.945, 0.138, 그리고 0.15의 값을 각각 나타내며 15 wt%의 Cu 함유량까지는 민감도 특성과 마찬가지로 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 달리, 그

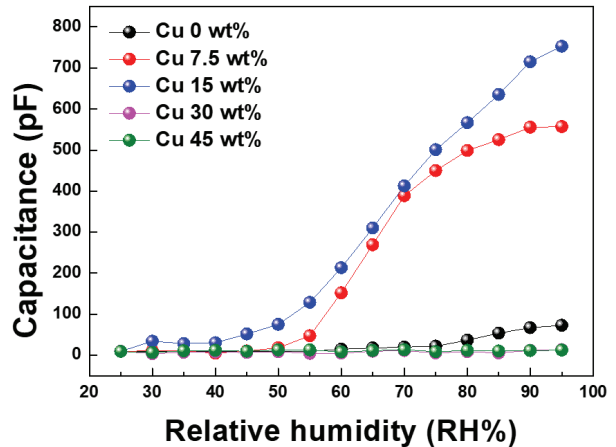


Fig. 3. Measured capacitance owing to variations of relative humidity of BT-Cu composite films fabricated with different Cu ratios of 0~45 wt%.

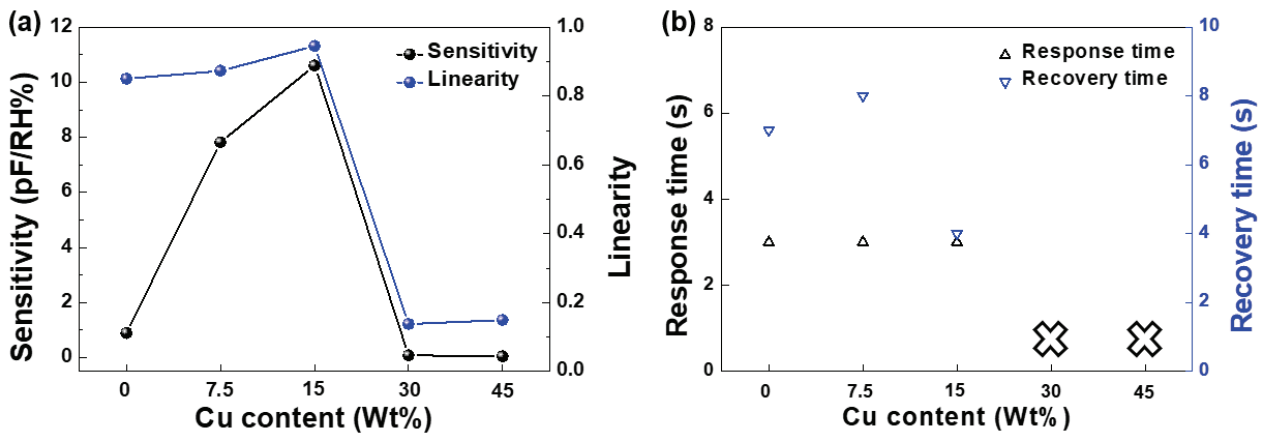


Fig. 4. Plotted humidity sensing properties of the BT-Cu composite films according to Cu content (0~45 wt%); (a) sensitivity/linearity and (b) response/recovery time.

림 4(b)를 통해 살펴본 응답/회복 시간의 경우 15 wt% 이하의 Cu가 함유된 복합막의 경우 응답 속도는 모두 3초로 복합막 내에 Cu 함량에 따라 큰 차이를 드러내지 않지만, 회복 속도의 경우 7초, 8초 및 4초로 Cu의 함량 변화에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 종합적으로 BT-Cu 습도센서를 살펴보면, 복합막 내부의 Cu 함량이 점차 늘어남으로써 침투 효과로부터 파생된 마이크로 커패시터 구조에 의해 복합막의 유전특성이 강화될 것이기 때문에 민감도가 높아지게 된다. 또한, 첨가된 Cu에 의해 형성된 마이크로 커패시터 구조에 전압이 인가되게 되면 강화되는 국소 전기장으로부터 외부 습도 변화에 따라 빠른 커패시턴스의 변화를 보이며 선형성이 좋아지고 회복 시간이 빨라지는 경향을 나타내고 있다. 선행된 연구 결과를 살펴보면 30 wt%의 Cu가 함유된 복합막의 경우 복합막의 유전특성이 더욱 증가함에도 오히려 습도 감지 특성이 악화되는 것은 수분의 흡착 및 탈착에 깊게 관여하는 감습막의 표면 미세구조가 습도 감지 특성에 지배적인 영향을 미쳤기 때문인 것으로 예측된다 [17]. 또한, 45 wt%의 Cu가 함유된 복합막은 선행된 연구 결과로부터 알 수 있듯이, 침투 문턱 지점(percolation threshold point)이기 때문에 과

도하게 첨가된 Cu가 복합막 내에 형성하는 무한 클러스트(infinite cluster)에 의해 전도 통로(conducting path)가 형성되어 전기전도도에 지배적으로 기여했을 것으로 생각된다. 응답/회복 시간의 경우, 복합막 내부에 30 wt% 이상의 Cu가 첨가된 경우에는 커패시턴스의 값이 변화하는 편차가 너무 작기 때문에 측정이 불가능하였다.

일반적인 AD로 제작한 세라믹 코팅층의 경우, 증착 도중 강한 운동에너지를 갖는 에어로졸화된 세라믹 입자들이 기판에 충돌하는 망치 효과(hammering effect)에 의해 기판 및 하부층을 두드린 후 스스로 깨지며 점차 치밀한 코팅층을 형성하게 된다. 하지만 세라믹-금속 복합막의 경우에는 복합막 내부의 금속 함량이 증가할수록 연성을 갖는 금속의 쿠션 효과(cushioning effect)에 의해 망치 효과가 감소하여 세라믹 입자의 분쇄 효과(pulverization effect) 및 에칭 효과(etching effect)가 억제된다고 알려져 왔다 [15]. 이를 기반으로, AD를 통해 제작된 BT-Cu 복합막의 표면 형상을 살펴보고, 표면 미세구조가 습도 감지 특성에 미치는 영향성을 알아보기 위해, Cu 함량에 따라 관찰된 복합막의 3차원적 표면구조 및 계산된 표면적이 그림 5에 나타나 있다. 먼저, AFM을 통해 측정된 표면 거

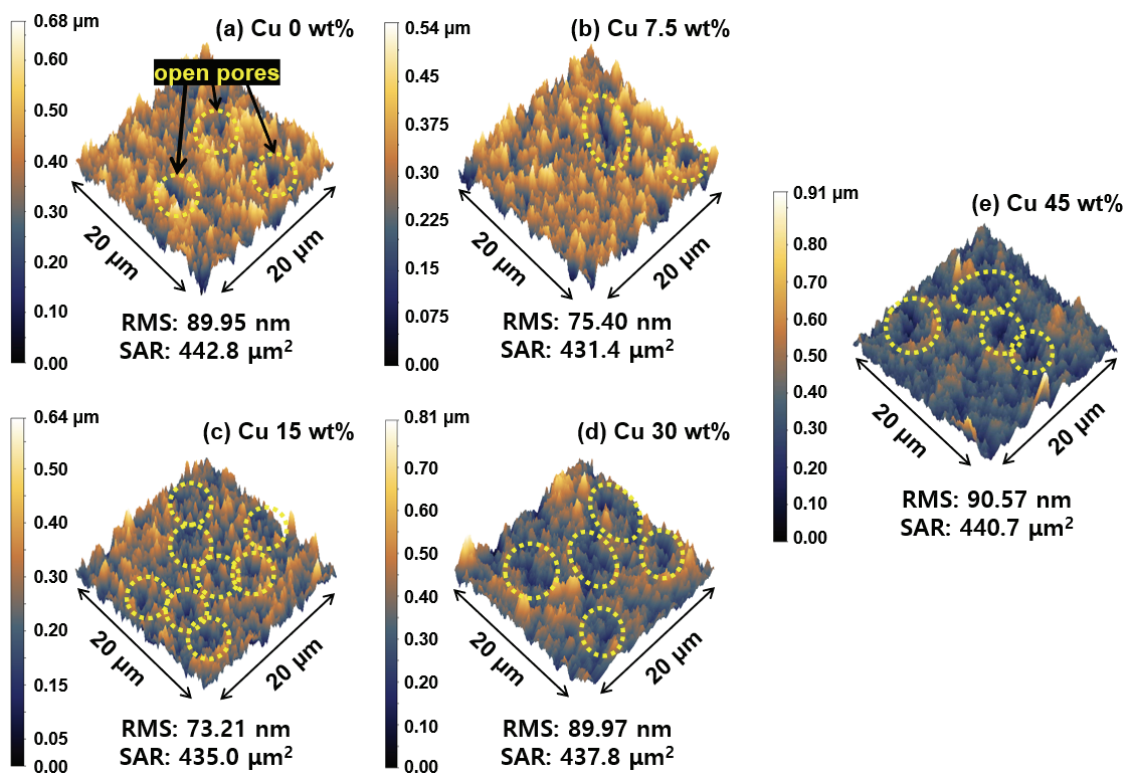


Fig. 5. AFM images and calculated surface area region (SAR) of BT-Cu composite films with different Cu contents (0~45 wt%) of (a) 0 wt%, (b) 7.5 wt%, (c) 15 wt%, (d) 30 wt%, and (e) 45 wt%.

칠기(root mean square, rms)의 경우, 복합막 내부의 Cu 함량이 15 wt%를 기점으로 구간 1 (15 wt% 이하까지)에서는 표면 거칠기가 감소하지만, 구간 2 (15 wt% 이상부터)에서는 표면 거칠기가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 구간 1에서는 상대적으로 BT-Cu 복합막 내부의 Cu 함량이 구간 2에 비해 적기 때문에, 쿠션 효과에 의한 BT 입자들의 분쇄 효과도 다소 줄어들기는 하지만 기판 및 하부층에 심한 충격을 주는 에칭 효과가 더욱 줄어들게 되어 복합막의 표면 거칠기가 점차 감소하는 것으로 추측된다 [22]. 또한, 그림 5(c)를 통해 구간 1과 구간 2의 기점인 Cu 함량이 15 wt%인 BT-Cu 복합막에서 쿠션 효과가 에칭 효과를 완전하게 억제하기 때문에 가장 표면 거칠기가 완만한 73.21 nm를 나타내고 있는 것으로 보인다. 반면에, 상대적으로 Cu 함량이 많은 구간 2의 경우에는 쿠션 효과가 더욱 강해져 분쇄 효과까지도 강력히 억제하기 때문에, 완전히 분쇄되지 못한 큰 크기의 BT 입자들로 인해 점차 거친 표면이 형성되고 있는 것으로 추측된다 [15].

BT-Cu 복합막의 표면적은 Cu 함량이 7.5 wt%인 경우를 기준으로 Cu 함량이 45 wt%일 때까지 꾸준히 증가하고 있으며, Cu 함량이 0 wt%인 경우 가장 표면적이 넓게 나타나고 있다. 결과를 통해, 복합막의 Cu 함량이 증가함에 따라 강화된 쿠션 효과가 BT의 분쇄 효과를 점차 강하게 억제하기 때문에 형성되는 다수의 큰 크기의 BT 입자들로 인해 표면적이 증가되는 것으로 그림 5(b)~(e)를 통해 추측해 볼 수 있다. 반면에 Cu의 함량이 0 wt%인 복합막의 경우에는 쿠션 효과가 일어나지 않기 때문에, BT 입자들은 작은 입자 크기로 분쇄되지만, 너무 강력한 에칭 효과로 인해 기판 및 하부층에 심한 충격이 가해져 복합막이 심하게 손상되어 표면적이 넓어진 것으로 추측된다.

마지막으로, 수분의 흡착 및 탈착에 주요한 역할을 하는 감습막 표면의 열린 기공은 증착 도중 지속적인 망치 효과의 여파로 기공의 크기가 줄어들고 개수가 적어진다고 알려져 왔다 [13]. 이를 토대로 살펴보면, 복합막 내부의 Cu 함량이 15 wt%일 때까지는 쿠션 효과가 강한 망치 효과를 적절히 억제해 주기 때문에 열린 기공의 개수가 증가하고 크기 또한 줄어들고 있는 것을 그림 5(a)~(c)를 통해 확인할 수 있다. 하지만 Cu 함량이 15 wt%를 초과하는 순간부터 더욱 강력한 쿠션 효과로 인해 망치 효과가 거의 작용하지 못해 크고 작은 BT 입자들을 통해 감습막의 증착이 이루어지기 때문에, 열린 기공의 개수 증가보다는 큰 크기의 기공이 발생하며 표면 거칠기 또한 급격히 증가한 것으로 추측된다.

종합적으로 살펴본 결과, BT-Cu 복합막의 Cu 함량이 증가함에 따라 선행된 연구 결과로부터 예측이 가능한 상승하는 유전율이 습도 감지 특성 향상에 기여할 뿐만 아니라, 표면의 열린 기공 또한 감지 특성에 크게 관여한다는 것을 확인할 수 있다. 단순히 열린 기공의 개수가 많고 표면적이 넓은 감습막이 습도 감지에 유리하다고 할 수 없으며, 제작된 감습막의 유전특성, 열린 기공 및 표면적이 복합적으로 작용하여 습도 감지 특성에 영향을 미친다는 것을 유추해 볼 수 있다.

4. 결론

AD 공정을 통해 0~45 wt%의 다양한 Cu 함량을 갖는 BT-Cu 복합막을 제작하여 습도 센서로 응용하였다. 제작한 센서의 습도 감지 특성 측정을 위하여, 습도 챔버 안에서 외부 습도 환경을 조절함으로써 습도 변화에 따른 커패시턴스 변화량을 측정하여 민감도, 선형성 및 응답/회복 속도를 확인하였다. BT-Cu 복합막 내부의 Cu 함량이 15 wt%일 때, 가장 좋은 습도 감지 특성들을 나타냈으며, 과도한 Cu의 첨가는 감지 특성에 악영향을 미치는 것을 확인하였다. 선행된 연구 결과였던 유전특성 이외에도, 제작된 BT-Cu 복합막의 표면 미세구조가 습도 감지 특성에 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에, Cu 함량에 따라 제작된 감습막의 표면형상 또한 관찰되었다. 관찰된 표면 미세구조를 통하여, Cu의 함량이 점차 증가할수록 균일한 표면조도, 넓은 표면적 및 많은 열린 공극으로 인해 수분의 침투가 용이하여 15 wt%의 Cu가 함유된 복합막에서 최고의 민감도, 선형성 및 응답/회복 속도의 특성을 나타냈다. 반면에, 복합막 내부에 과도하게 Cu가 첨가될수록 불균일한 표면이 형성되며 열린 공극의 개수 또한 줄어들어 감습막으로 수분의 침투가 용이하지 못하기 때문에 민감도 및 선형성 특성이 급감하였다. 또한, 45 wt%의 Cu가 첨가된 BT-Cu 복합막의 경우, 선행된 연구 결과로부터 예측해 보았을 때, 침투 문턱 지점에 도달했기 때문에 복합막 내부에 형성된 전도성 이동경로를 통해 흐르는 전류로 인해 분극 활성화가 어렵기 때문에 민감도가 급감한 것으로 예측된다.

ORCID

Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0001-6303-2876>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012451, 산업혁신인재성장지원사업)과 한국연구재단의 지원(과제번호: 2018R1D1A1B07045295, 2020R1F1A1073491, 2021R1F1A1057620)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

- [1] H. Khayyam, B. Javadi, M. Jalili, and R. N. Jazar, *Nonlinear Approaches in Engineering Applications*, p. 39-68 (2020). [DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18963-1_2]
- [2] Y. Ma, Z. Wang, H. Yang, and L. Yang, *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, **7**, 315 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003021>]
- [3] A. D. Boursianis, M. S. Papadopoulou, P. Diamantoulakis, A. Liopa-Tsakalidi, P. Barouchas, G. Salahas, G. Karagiannidis, S. Wan, and S. K. Goudos, *Internet Things*, **100187**, 2542 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>]
- [4] T. Joyashiki and C. Wada, *Sensors*, **20**, 942 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030942>]
- [5] J. Shin, B. Jeong, J. Kim, V. B. Nam, Y. Yoon, J. Jung, S. Hong, H. Lee, H. Eom, J. Yeo, J. Choi, D. Lee, and S. H. Ko, *Adv. Mater.*, **32**, 1905527 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201905527>]
- [6] W. Yang, J. Chen, X. Wen, Q. Jing, J. Yang, Y. Su, G. Zhu, W. Wu, and Z. L. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 7479 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1021/am500864t>]
- [7] K. Morimoto, A. Ardelean, M. L. Wu, A. C. Ulku, I. M. Antolovic, C. Bruschini, and E. Charbon, *Optica*, **7**, 346 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.386574>]
- [8] Z. Duan, Q. Zhao, S. Wang, Q. Huang, Z. Yuan, Y. Zhang, Y. Jiang, and H. Tai, *Sens. Actuators, B*, **317**, 128204 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128204>]
- [9] K. S. Chou, T. K. Lee, and F. J. Liu, *Sens. Actuators, B*, **56**, 106 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00187-2](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00187-2)]
- [10] J. G. Liang, C. Wang, Z. Yao, M. Q. Liu, H. K. Kim, J. M. Oh, and N. Y. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 851 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b14082>]
- [11] H. N. Abid, U. M. Nayef, and F.A.H. Mutlak, *Optik*, **178**, 379 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.167>]
- [12] D. Hernández-Rivera, G. Rodríguez-Roldán, R. Mora-Martínez, and E. Suaste-Gómez, *Sensors*, **17**, 1009 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s17051009>]
- [13] J. G. Liang, E. S. Kim, C. Wang, M. Y. Cho, J. M. Oh, and N. Y. Km, *Sens. Actuators, B*, **265**, 632 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.093>]
- [14] E. S. Kim, J. G. Liang, C. Wang, M. Y. Cho, J. M. Oh, and N. Y. Kim, *Sci. Rep.*, **9**, 680 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37416-7>]
- [15] I. S. Kim, P. J. Ko, M. Y. Cho, H. K. Kim, D. W. Lee, S. M. Koo, D. Lee, C. Park, and J. M. Oh, *Ceram. Int.*, **45**, 20634 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.046>]
- [16] I. S. Kim, M. Y. Cho, Y. Jeong, Y. C. Shin, D. W. Lee, C. Park, S. M. Koo, W. H. Shin, W. J. Yang, Y. Park, H. Sohn, and J. M. Oh, *J. Am. Ceram. Soc.*, **10**, 1716 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.17609>]
- [17] M. Y. Cho, S. Kim, I. S. Kim, E. S. Kim, Z. J. Wang, N. Y. Kim, S. W. Kim, and J. M. Oh, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1907449 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201907449>]
- [18] X. Ning, P. Y. Ping, and W. Zhuo, *J. Am. Ceram. Soc.*, **95**, 999 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04895.x>]
- [19] C. Pecharromán, F. Esteban-Betegón, J. F. Bartolomé, S. López-Esteban, and J. S. Moya, *Adv. Mater.*, **13**, 1541 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200110\)13:20<1541::AID-ADMA1541>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200110)13:20<1541::AID-ADMA1541>3.0.CO;2-X)]
- [20] F. He, S. Lau, H. L. Chan, and J. Fan, *Adv. Mater.*, **21**, 710 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200801758>]
- [21] Y. H. Kim, M. Osada, H. K. Kim, and S. M. Nam, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 09LC07 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.09LC07>]
- [22] M. Y. Cho, D. W. Lee, W. J. Kim, Y. N. Kim, S. M. Koo, D. Lee, K. S. Moon, and J. M. Oh, *Ceram. Int.*, **44**, 18736 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.103>]