

CoGe 박막 기반 galvanic cell의 특성 및 IoT 센서 네트워크에 대한 적용

전부일¹ · 한동수² · 윤기완^{3*}

Properties of CoGe thin film-based galvanic cells and their applications for IoT sensor networks

Buil Jeon¹ · Dongsoo Han² · Giwan Yoon^{3*}

¹Ph.D. Student, School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141 Korea

²Professor, School of Computing, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141 Korea

^{3*}Professor, School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141 Korea

요약

본 연구에서는 소자의 크기에 따른 코발트-저마늄 박막 기반의 galvanic cell의 특성을 조사하고, 이를 물 접촉 감지에 활용하기 위한 아두이노 기반 사물인터넷 센서 네트워크에의 적용을 제시한다. 본 연구에서 제안하는 코발트-저마늄 박막 기반 galvanic cell은 기존의 압전, 열전 에너지 하베스팅 소자와 다르게, 소자의 손상을 줄 수 있는 기계적인 변형이나 온도 구배를 필요로 하지 않는다는 점에서, 자가발전 센서 네트워크를 구축하는데 있어 더욱 적합한 에너지 하베스팅 소자로 적합하다. 본 연구는 스퍼터링 방식으로 증착된 코발트-저마늄 박막 기반의 galvanic cell을 센서로 활용함으로써 향후 자가발전 센서 네트워크의 실현 가능성에 대해 논의함으로써 향후 연구, 개발될 발전된 형태의 센서 네트워크 구축에 기여할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate the properties of CoGe thin film-based galvanic cells as a function of their dimension (cell length, width, etc.) and show their application as sensors to Arduino-based IoT sensor networks to detect water contact. Because these CoGe thin film-based galvanic cells do not require mechanical strains or temperature gradients unlike piezoelectric and thermoelectric energy harvesters, we think that these thin film-based galvanic cells are more suitable for self-powered sensor networks demanding sustainable and robust energy harvesters. In the past, a sputter-deposited CoGe thin film has not been intensively investigated for energy harvesting applications. Thus, in this study, we perform a feasibility study of galvanic cells composed of a sputter-deposited CoGe thin film to see if they can be applied as potential self-powered sensors. We believe that this paper will be of great help in developing even more enhanced sensor networks.

키워드 : 코발트-저마늄, 박막, 갈바닉 셀, 사물인터넷

Keywords : CoGe, Thin films, Galvanic cells, IoT sensor networks

Received 15 July 2022, Revised 25 July 2022, Accepted 28 July 2022

* **Corresponding Author** Giwan Yoon (E-mail: gwoon@kaist.ac.kr, Tel:+82-42-350-7411)

Professor, School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.9.1347>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

지난 수년간, 사물인터넷 (Internet of Things, IoT) 네트워크를 구성하는 자가발전 센서 (self-powered sensors) 로써 압전 에너지 하베스팅 소자 (piezoelectric energy harvesters) 및 열전 에너지 하베스팅 소자 (thermoelectric energy harvesters)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-4]. 하지만 기존에 연구되던 이러한 소자들은 효율적인 동작을 위해 큰 기계적 변형 (mechanical strains) 또는 온도 구배 (temperature gradients)를 필요로 한다는 점에서 오랜 시간 동안 안정적인 센서 동작을 요구하는 센서 네트워크에 적합하지 않은 측면이 있다.

이에 따라 최근에는 물질의 환원 전위차를 이용한 galvanic cell을 센서 네트워크의 센서로 사용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다 [5, 6]. 이는 galvanic cell의 경우 환원 전위가 다른 두 물질에서 발생하는 산화, 환원을 기반으로 동작하기 때문에 오랜 기간, 고신뢰성의 동작이 가능하기 때문이다.

기존의 galvanic cell은 일반적으로 환원 전위가 서로 다른 한 쌍의 금속 (metal) 전극으로 구성된다. 따라서, 두 물질의 환원 전위의 차이가 클수록 cell의 에너지 하베스팅 특성이 우수하다고 볼 수 있는데, 본 연구에서는 기존의 galvanic cell에서 사용되던 금속 전극이 아닌 CoGe 박막 (cobalt germanium thin film)을 전극으로 사용한 galvanic cell을 제안한다.

RF (radio frequency)/DC (direct current) co-sputtering 방법으로 제작된 CoGe thin film은 sputtering 조건에 따라 전기적 특성이 결정된다. 따라서, 기존의 금속 전극을 사용한 galvanic cell과 비교했을 때, 센서 네트워크에서 요구하는 특성을 비교적 쉽게 만족시킬 수 있다는 점에서 기존의 금속 전극보다 galvanic cell 제작에 있어 유리하다.

본 연구에서는 이러한 CoGe 박막 전극으로 구성된 galvanic cell을 유연 폴리이미드 (flexible polyimide, flexible PI) 기판에 제작함으로써 cell의 크기 (길이, 너비 등)에 따른 개방 회로 전압을 조사하였는데, 이로부터 cell의 길이, 너비 그리고 전극의 사이즈에 따라 다른 개방 회로 전압의 증감 변화를 측정, 확인하였다. 이와 더불어, CoGe 박막 기반의 galvanic cell을 물 접촉 센서 (water contact sensor)로 활용, 물 접촉 여부에 따라 메시지를 출력하는 아두이노 (Arduino Uno R3) 기반의 센서

네트워크의 동작을 확인하였다.

II. 소자 제작 및 특성

2.1. CoGe 박막 증착

CoGe 박막은 RF/DC co-sputtering 방법을 통해 증착되었는데, 그 조건은 Table 1에 나타내었다. CoGe 박막은 $1 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기의 PI 기판 위에 증착되었는데, CoGe 박막 증착은 앞서 먼저 전자빔 증착 (electron beam evaporation) 기술로 증착된 In (indium)/Ag (silver)/In (indium) (In 박막 두께: 약 50 nm, Ag 박막 두께: 약 1400 nm) 전극 위에 증착되었다. In/Ag/In 전극의 넓이는 약 0.27 cm^2 로, 3D 프린터로 제작된 쉐도우 마스크 (shadow mask)를 이용하여 증착되었으며, 전극을 구성하는 In 박막과 Ag 박막 모두 상온 (room temperature)에서 증착되었고, 각 두께는 전자빔 증착 장비에 연결된 두께 모니터 (thickness monitor)를 통해 실시간으로 제어되었다.

Table. 1 Co-sputtering condition for CoGe thin film deposition.

	Co	Ge
Sputtering type	DC	RF
Target purity	-	4 N
Sputtering power	250 V \times 0.03 A	120 W
Sputtering gas	Ar gas, 20 sccm	
Sputtering pressure	1.5×10^{-3} torr	
Sputtering temperature	295 K, room temperature	
Pre-sputtering time	15 mins	15 mins
Sputtering time	30 mins	

2.2. CoGe 박막 특성 분석

주사 전자 현미경 (scanning electron microscopy, SEM)으로 촬영된 CoGe 박막의 단면 이미지는 그림 1(a)에 제시되었다. x선 회절 (x-ray diffraction, XRD) 분석에 따른 x선 회절 무늬 (XRD pattern)은 그림 1(b)에 제시되었는데, 박막의 주사 전자 현미경 이미지에 화살표로 표시된 박막의 두께로부터 증착된 CoGe 박막의 두께는 약 350 nm임을 확인할 수 있으며, x선 회절 무늬에서 뚜렷한 회절 피크 (diffraction peak)가 없다는 점에서 증착된 CoGe 박막은 비정질 (amorphous)로 증착되

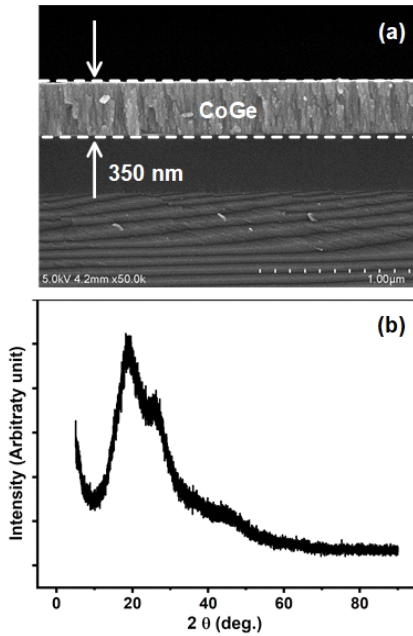


Fig. 1 (a) Cross-sectional SEM image and (b) XRD pattern of CoGe thin film.

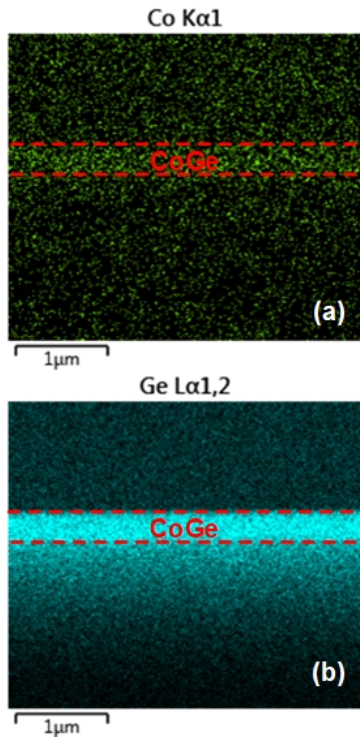


Fig. 2 EDS patterns of (a) Co and (b) Ge of CoGe thin film.

있음을 알 수 있다.

증착된 CoGe 박막을 분산 x선 분광법 (energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS)으로 분석한 결과는 그림 2에 제시되어 있다. 그림 2(a)와 2(b)에 제시되었듯이, 증착된 박막 부분에서 Co와 Ge가 검출되었다는 점에서 증착된 박막이 Co와 Ge이 혼합된, CoGe 박막이라는 것을 알 수 있다. 여기서, 증착된 박막을 구성하는 Co의 원자 비율 (atomic ratio)이 Ge에 비해 조금 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 Co의 DC sputtering 증착 전력이 Ge에 비해 낮기 때문인 것으로 보인다. 여기서 낮은 Co 원자 비율은 의도적으로 제어된 것으로, CoGe 박막 증착 과정에서 Co의 증착 전력을 조금만 높여도 박막을 구성하는 Co의 원자 비율이 지나치게 높아졌기 때문에 의도적으로 증착 과정에서 Co 증착 전력을 낮게 하였다.

그림 3에는 온도에 따른 CoGe 박막의 제백 계수 (Seebeck coefficient) 그리고 전기전도도 (electrical conductivity)의 변화가 제시되어 있다. 그림 3(a)의 제백 계수의 부호가 음 (minus)인 것으로부터 CoGe 박막은 n-type인 것을 확인할 수 있다 [2, 7], 그림 3(b)에서 전기 전도도가 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로부터

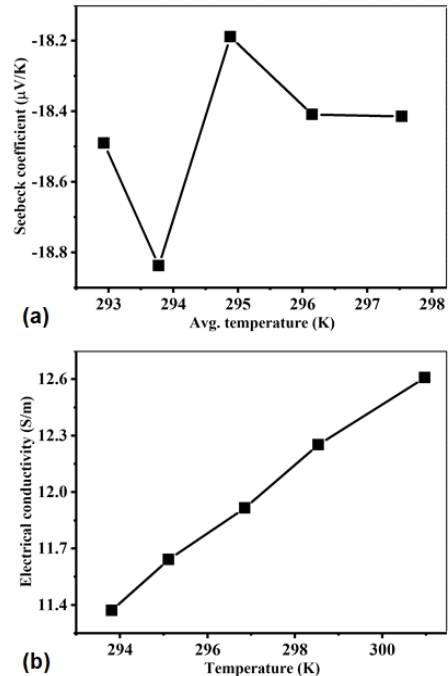


Fig. 3 (a) Seebeck coefficient and (b) electrical conductivity of CoGe thin film as a function of temperature.

비축된 반도체 (non-degenerate semiconductor) 물질임을 알 수 있는데 [2, 5], 이는 CoGe 박막의 낮은 Co의 원자 비율에 기인하는 것으로 보인다. 여기서 CoGe 박막의 전기 전도도는 다른 일반적인 n-type 박막에 비해 그리 높지 않다고 볼 수 있는데 [2], 이는 그림 1(b)의 x선 회절 무늬로부터 확인할 수 있듯이 CoGe 박막이 비정질이기 때문으로 추론된다. CoGe 박막의 제백 계수 및 전기 전도도 측정 방법은 참고 [7], [8], [9]에 제시된 방법을 참고하였다.

III. CoGe 박막 기반 galvanic cell 특성

3.1. 물의 높이에 따른 CoGe 박막 galvanic cell 특성

CoGe 박막의 크기와 CoGe 박막 기반의 galvanic cell을 구성하는 전극의 크기에 따른 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성을 조사하기 위하여 다양한 크기의 galvanic cell을 제작하였으며, 이 cell들이 물과 접촉했을 때 발생하는 개방 회로 전압 (open-circuit voltage)를 측정하였다. 이에 앞서, 기본적인 CoGe 박막 기반의 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성을 확인하고자, cell에 접촉하는 물의 높이 (h)에 따른 galvanic cell의 개방 회로 전압 변화를 조사하였는데, 이는 그림 4에 제시되어 있다.

1×2 cm² 크기의 galvanic cell은 그림 4(a)와 같이 3D 프린터 (밀면 넓이: 2×2.3 cm²)로 제작된 샘플 홀더에 고정하였으며, 홀더 내부에 주사기로 물 (수돗물)을 주입하여 물과 박막의 접촉을 발생시켜 실시간으로 접촉에 따라 발생하는 개방 회로 전압을 멀티미터로 측정하였다. 물의 높이를 조절하기 위해 홀더의 높이 및 물의 양을 조절하였으며, galvanic cell에서 발생한 개방 회로 전압은 약 30 분 동안 측정하였는데, 측정된 전압은 그림 4(b)에 제시되어 있다.

그림 4(b)에서는 물의 높이가 증가함에 따라 최대 개방 회로 전압의 크기가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. CoGe 박막 기반의 galvanic cell 적어도 30분은 안정적으로 출력 전력을 생성하였으며 물의 높이가 약 1.3 cm 정도 될 때, CoGe 박막 기반 galvanic cell은 최대 약 0.4 V의 전압을 생성하였다. 물의 높이에 따른 개방 회로 전압 크기의 증가 경향은 그림 4(c)를 통해 더욱 분명하게 확인할 수 있는데, 이러한 경향은 물에 접촉하는 CoGe

박막의 표면적이 증가하기 때문으로 추론된다.

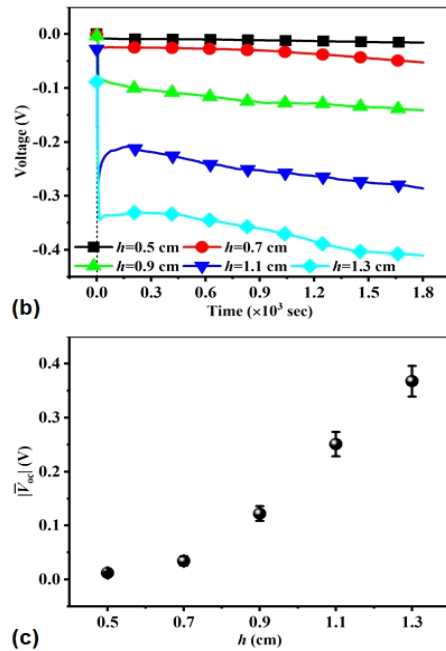
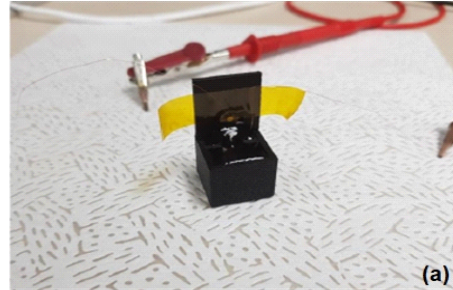


Fig. 4 (a) Photograph of CoGe thin film-based galvanic cell measurement. (b) Open-circuit voltage of CoGe thin film-based galvanic cell as a function of the water height (h) and (c) the increasing tendency of the rms value of open-circuit voltage according to the water height.

3.2. CoGe 박막의 길이에 따른 galvanic cell 특성

앞서 3.1절에서는 galvanic cell의 크기는 고정되어 있고, cell에 접촉하는 물의 높이를 증가시켰을 때 galvanic cell의 에너지 하베스팅 변화에 대해 알아보았다. 3.2절에서는 cell에 접촉하는 물의 높이가 일정할 때, CoGe 박막의 길이 (l)에 따른 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성 변화에 대해 논의한다.

따라서, 3.2절에서 다루는 CoGe 박막 기반 galvanic cell의 너비 (w)는 1 mm로 통일한 반면, 길이는 9, 11, 13 mm로 설계하였다. In/Ag/In 전극의 너비와 길이는 각각 1 mm, 3 mm가 되도록 하였는데, 이때 SUS 304로 구성된 섀도우 마스크 (shadow mask)를 이용하여 소자의 너비와 길이를 달리하여 제작하였다. 개방 회로 전압 측정 시, 소자에 접촉하는 물의 높이는 0.6 cm로 고정되었는데, 서로 다른 길이를 가진 CoGe 박막 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성은 그림 5와 같다.

그림 5(a)에서 물의 높이가 일정할 때, galvanic cell의 길이가 길수록 cell의 개방 회로 전압은 더 낮다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 그림 5(b)에서 더욱 분명해지는데, 이는 cell의 길이가 짧을수록 물과 접촉하는 면적이 길이가 긴 cell에 비해 넓기 때문인 것으로 보인다. 하지만, cell의 길이가 길어짐에 따라, 개방 회로 전압의 크기의 감소폭은 줄어들어 가는 것으로 보이는데, 이는 길이가 길어짐에 따라 물과 접촉하는 면적이 상대적으로 줄어들지만, 물과 접촉하지 않은 면적이 늘어남으로

써 소자의 저항이 상대적으로 커지게 되어 상대적으로 작은 물과의 접촉 면적에 의한 출력 손해를 상쇄시키기 때문으로 보인다.

3.3. CoGe 박막의 너비에 따른 galvanic cell 특성

CoGe 박막의 너비 (w)에 따른 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성은 그림 6에 제시되었다. 이 때, cell의 길이는 7 mm, 너비는 1, 2, 4, 8, 16 mm가 되도록 제작되었으며 전극의 크기는 3.2절에 제작된 CoGe 박막 galvanic cell의 전극과 동일하도록 증착되었다.

Galvanic cell과 접촉하는 물의 높이는 0.3 cm로 일정하게 제어되었을 때, CoGe 박막 기반의 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성은 그림 6(a)와 6(b)에서 확인할 수 있듯이 박막의 너비에 비례하여 향상되는 경향을 보이다가 어느 정도 이상의 너비에서는 포화되는 경향을 보이는데, 이는 3.1절, 3.2절의 결과와 마찬가지로, 박막의 너비가 증가함에 따라 물과의 접촉 면적이 증가하기 때문이라고 볼 수 있다. 하지만, 일정 크기 이상의 너비

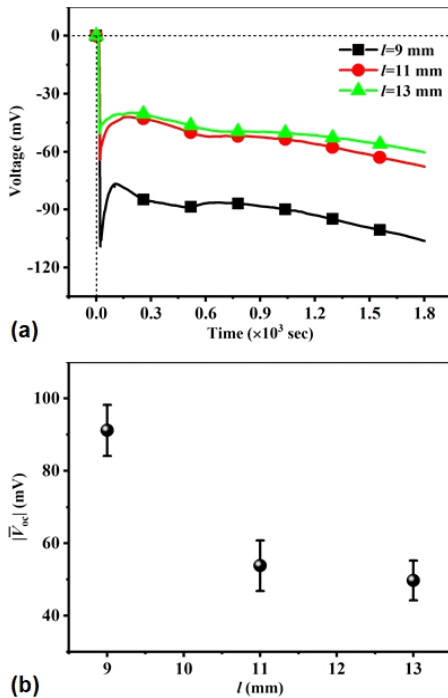


Fig. 5 (a) Open-circuit voltage of CoGe thin film-based galvanic cell as a function of the length (l) and (b) the decreasing tendency of the rms value of open-circuit voltage according to the length.

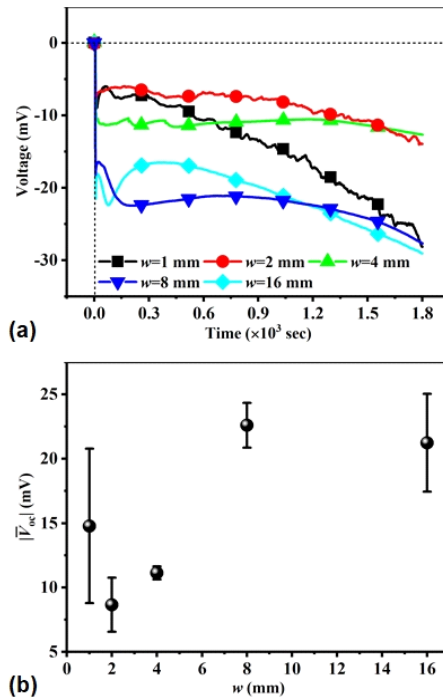


Fig. 6 (a) Open-circuit voltage of CoGe thin film-based galvanic cell as a function of the width (w) and (b) the increasing tendency of the rms value of open-circuit voltage according to the width.

에서 개방 회로 전압의 크기가 포화되는 경향을 보이는 것은 물과의 접촉 면적이 증가하더라도, 전극의 너비와 길이는 일정하기 때문에, cell에서 발생할 수 있는 galvanic effect는 제한되기 때문인 것으로 보인다. 따라서, 3.1, 3.2, 그리고 3.3절의 결과로부터 효율적인 galvanic cell을 제작하기 위해서는 물과의 접촉 면적을 고려한 적절한 전극 크기 선정이 매우 중요하다는 사실을 알 수 있다.

3.4. 전극의 너비에 따른 galvanic cell 특성

한편, 그림 7에서는 In/Ag/In 전극의 너비 (w_e)에 따른 CoGe 박막 기반 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성이 제시되어 있는데, 이 때 cell의 크기는 너비 16 mm, 길이 7 mm 였고, 물의 높이는 0.6 cm로 일정하게 제어하였으며 전극의 길이 (l_e)는 7 mm로 일정하게 하였고 너비를 2, 4, 8 mm가 되도록 제작하였다. 그림 7(a)와 7(b)에서 확인할 수 있듯이, 전극의 너비가 증가할수록, galvanic cell의 개방 회로 전압은 감소하다가 포화되는 경향을 보인다. 이는 3.2, 3.3절의 결과로부터 추론할 수 있는데, 초

기에 전극의 너비, 즉 전극의 넓이가 증가함에 따라 개방 회로 전압이 감소하는 이유는 전극 넓이의 증가에 따라 소자의 저항이 감소하기 때문인 것으로 보이며, 이후에 전극의 넓이가 더욱 넓어짐에 따라 감소 폭이 줄어드는 이유는 소자 저항이 감소함과 동시에, galvanic effect의 발생 면적이 증가하기 때문으로 보인다.

3.5. 공기 플라즈마 표면 처리에 따른 galvanic cell 특성

3.1절에서 3.4절에서 다루어진 CoGe 박막 기반의 galvanic cell은 모두 제작된 후에 열처리와 같은 후처리 (post-treatment)를 거치지 않은 소자들이다. 이러한 galvanic cell의 표면을 공기 플라즈마 표면 처리 (air plasma surface treatment) 장비를 이용하여 표면 처리를 한 후에, 이들의 특성을 측정해보았는데, 그 결과는 그림 8과 같다. 공기 플라즈마 표면 처리는 고출력 (high power) 조건에서 약 1분에서 2분정도 진행되었다. galvanic cell의 크기 및 측정 조건은 그림 4의 측정 조건과 동일 한데, 그림 8(a)와 그림 8(b)로부터 공기 플라즈마-마 표면 처리된 CoGe 박막 galvanic cell의 개방 회로 전압이 동

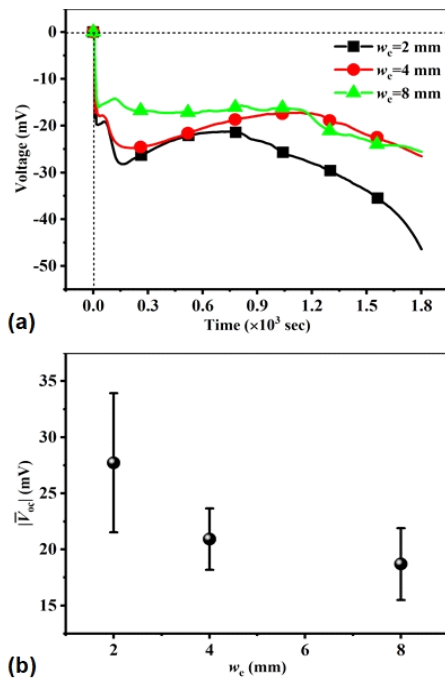


Fig. 7 (a) Open-circuit voltage of CoGe thin film-based galvanic cell as a function of the electrode width (w_e) and (b) the decreasing tendency of the rms value of open-circuit voltage according to the electrode width.

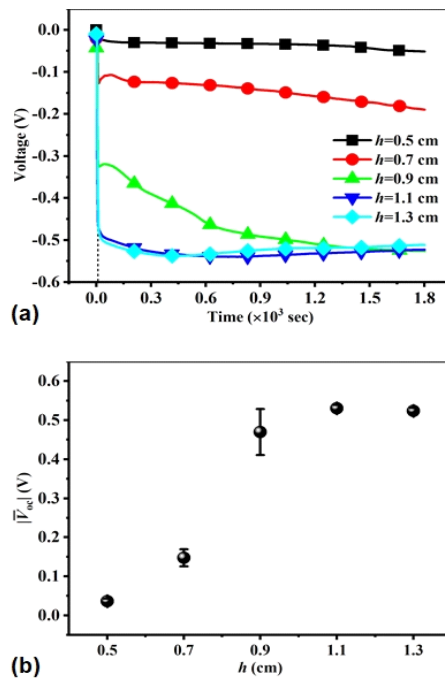


Fig. 8 (a) Open-circuit voltage of air plasma-treated CoGe thin film-based galvanic cell as a function of the water height (h) and (b) the increasing tendency of the rms value of open-circuit voltage according to the water height.

일한 측정 조건에서 더 크고 오랜 시간 안정적으로 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 플라즈마 처리에 의해 CoGe 박막의 표면 거칠기 (roughness)가 증가하여 물과의 접촉 면적이 처리 전보다 증가했기 때문으로 추론된다. 이와 더불어, CoGe 박막의 표면 상태가 플라즈마 처리 전보다 조금 더 친수성 (hydrophilic)을 가진다는 점 또한 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성 향상에 기여했다고 추론 된다.

IV. CoGe 박막 기반의 galvanic cell이 융합된 사물인터넷 센서 네트워크의 구축 및 동작

4.1. 사물인터넷 센서 네트워크 구축

CoGe 박막 기반의 galvanic cell을 물 접촉 감지 센서로 활용하여, 실시간 무선 통신을 통해 물 접촉 여부를 확인하는 사물인터넷 센서 네트워크는 아두이노 (Arduino Uno R3)와 무선 송수신 모듈 (nRF24L01, 2.4 GHz) 그리고 컴퓨터 (PC)로 구축되었다. 센서 네트워크 구축 방식은 참고[1]을 참고하였다.

그림 9는 송신 노드 (transmitter node)의 동작 알고리즘을 슈도 코드 (pseudo code)로 간단히 나타내고 있다. 송신 노드는 아두이노와 이에 연결된 송수신 모듈, 그리고 물 접촉 정도에 따라 송신 노드에 아날로그 입력 신호를 보낼 CoGe 박막 기반의 galvanic cell로 구성된다. 아두이노는 USB로 연결된 컴퓨터와 시리얼 통신 (serial communication)을 하도록 하였다.

송신 노드는 우선 컴퓨터에 연결되고 난 뒤, 송수신 모듈의 무선 송수신 가능 여부를 확인한다. 만약 송수신 모듈이 제대로 켜지지 않아, 무선 송수신이 불가능할 경우, 다시 송수신 모듈의 연결을 시도한다. 송수신 모듈의 연결이 확인되면, 아날로그 입력단에 연결된 galvanic cell로부터 측정되는 아날로그 신호 (즉, 개방 회로 전압)를 아두이노가 감지, 감지된 아날로그 신호의 크기를 reference 크기와 비교하여, 그 크기에 따라 적합한 메시지를 수신 노드 (receiver node)에 무선으로 송신하는 동작을 실시간으로 반복한다.

수신 노드의 동작 알고리즘 또한 송신 노드와 마찬가지로 그림 10에 슈도 코드와 함께 제시되어 있다. 수신 노드는 물 접촉 정도에 따라 송신 노드로부터 전달된 메

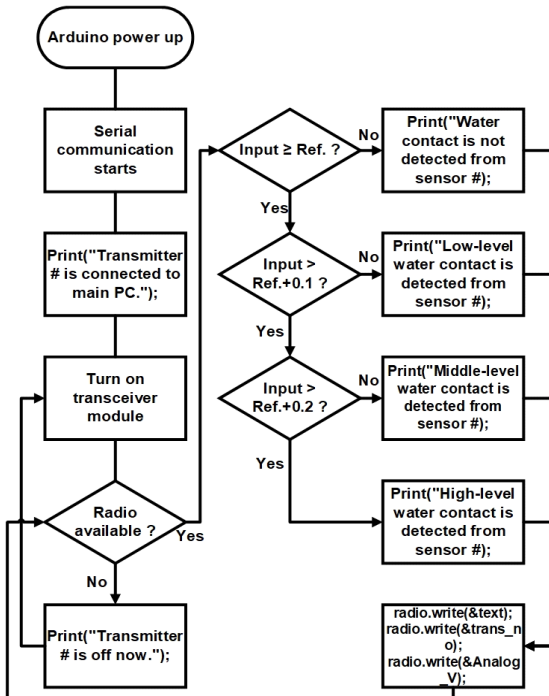


Fig. 9 Work flow with a pseudo code of a transmitter node combined with a CoGe thin film-based galvanic cell.

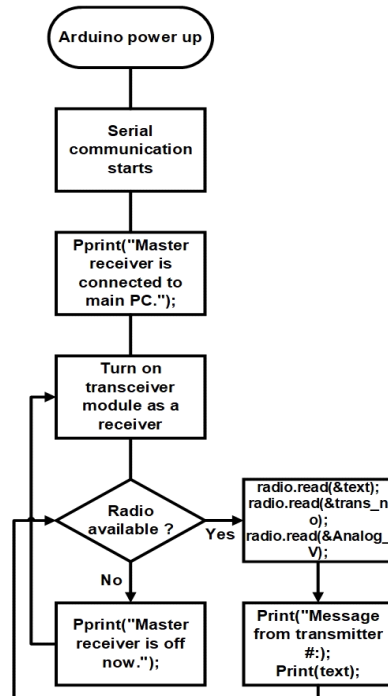


Fig. 10 Work flow with a pseudo code of a receiver node.

시지를 수신, 이를 실시간으로 컴퓨터와 시리얼 통신하는 동작을 반복한다.

송신 노드에 연결된 CoGe 박막 기반의 galvanic cell의 크기는 $1 \times 2 \text{ cm}^2$ 이며 전극의 넓이는 0.27 cm^2 로, 그림 4의 결과에서 사용된 galvanic cell과 동일한 것이 사용되었다. 물의 높이는 1.1 cm가 되도록 하였으며, 이 때 사용된 물의 부피는 약 1.2 ml였다. Galvanic cell의 두 전극은 아두이노의 아날로그 입력 신호 단자와 접지 단자(ground)에 직접 연결하였으며, 송신 노드와 수신 노드를 구성하는 각 아두이노는 9 V 건전지로부터 전원을 공급받았다. 송신 노드에 전원이 들어오고, 시리얼 통신할 컴퓨터와 연결에 성공했을 때의 메시지는 그림 11과 같다. 시리얼 모니터의 메시지를 실시간으로 확보하기 어려웠기 때문에 시리얼 메시지를 MS word 파일로 별도로 저장하여, 그 메시지를 캡처하여 그림 11에 나타내었다. 아직 CoGe 박막 기반의 galvanic cell에 물은 접촉하지 않은 상태이다. 따라서, 송신 노드에서 감지하는 아날로그 신호는 0 V임을 확인할 수 있으며, 물과의 접촉이 감지되지 않았다는 메시지 또한 확인할 수 있다(그림 11(a)). 이에 따라, 송신 노드에서 수신 노드로 물 접촉이 감지되지 않았다는 메시지를 송신, 이로 인해 수신 노드의 시리얼 메시지에도 물 접촉이 감지되지 않았다는 메시지를 확인할 수 있으며(그림 11(b)), 하단에서 메시지를 보낸

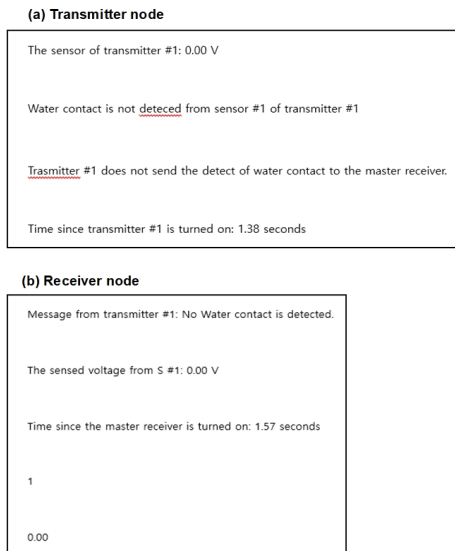


Fig. 11 Serial communication messages from (a) transmitter node and (b) receiver node before contact between water and CoGe thin film-based galvanic cell occurs.

송신 노드의 번호, 1번과 감지된 아날로그 신호, 즉 galvanic cell의 개방 회로 전압이 0인 것을 확인할 수 있다. Galvanic cell과 물의 접촉은 송, 수신 노드가 켜지고 난 뒤 약 12 초 후에 처음 시작되었다. 물과의 접촉이 발생함에 따라 송, 수신 노드의 시리얼 메시지는 그림 12와 같다. CoGe 박막 기반의 galvanic cell이 물과 접촉하여 발생한 전압의 크기는 약 0.05 V인 것으로 보인다. 이는 reference (Ref.)로 정한 0.1 V에 비해 작으므로, 위 송신 노드의 동작 알고리즘을 고려해 볼 때, low-level water contact라고 볼 수 있다. 송신 노드의 시리얼 메시지에서 low-level water contact가 감지되었다는 메시지를 확인할 수 있는데(그림 12(a)), 송신 노드는 low-level water contact가 발생했다는 사실을 수신 노드에 전달하고자, 동일한 내용의 메시지를 수신 노드로 송신한다. 그림 12(b)에서 송신노드로부터 수신된 메시지를 시리얼 모니터에 출력한 수신 노드의 메시지를 확인할 수 있으며, 그 내용은 송신 노드의 시리얼 메시지와 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 11과 마찬가지로 물 접촉 여부에 대한 메시지를 보낸 송신 노드의 번호와 감지된 신호의 크기 약 0.05~0.06 V를 확인할 수 있다.

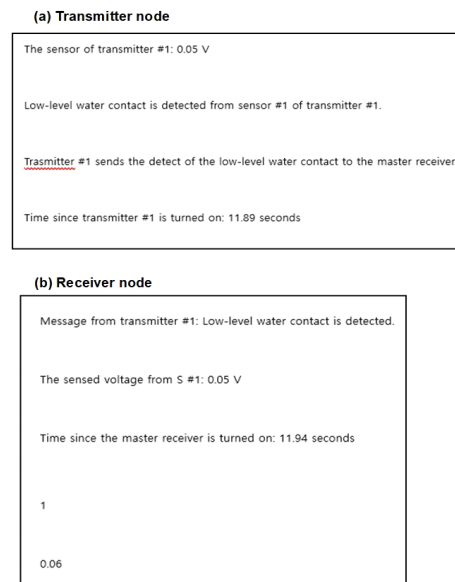


Fig. 12 Serial communication messages from (a) transmitter node and (b) receiver node directly after contact between water and CoGe thin film-based galvanic cell occurs at about 12 seconds.

CoGe 박막 기반의 galvanic cell과 물의 접촉은 약 20 분 정도 유지되었는데, 이에 따른 센서 네트워크의 동작

은 그림 13과 같다. 그림 13(a)와 13(b)에서, 물과의 접촉이 시작된지 20분후에도 여전히 CoGe 박막 기반 galvanic cell은 약 0.06~0.07 V의 출력 전압을 생성하고 있음을 확인할 수 있으며, 이에 따라 송, 수신 노드 간의 무선 통신도 계속되고 있음을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구의 결과로부터 제안된 CoGe 박막 기반의 galvanic cell은 사물인터넷 센서 네트워크를 비롯한 여러 센서 네트워크를 구축하는 자가발전 센서로 사용될 수 있는 가능성을 확인하였으며, 기존의 여러 에너지 하베스팅 소자에 비해 간단하면서도 안정적으로 동작할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

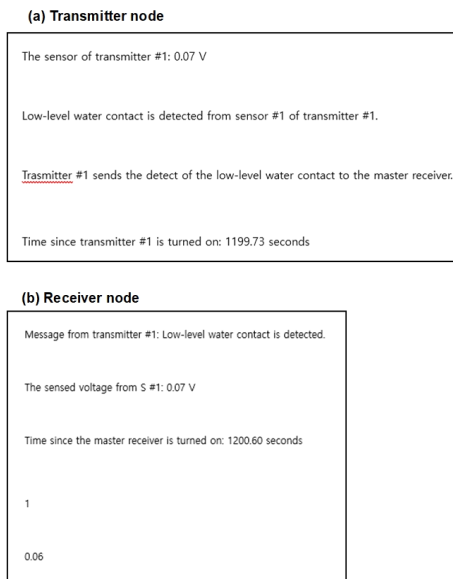


Fig. 13 Serial communication messages from (a) transmitter node and (b) receiver node directly after contact between water and CoGe thin film-based galvanic cell occurs after 20 mins.

V. 결론

본 연구에서는 지금까지 잘 다루어지지 않은 CoGe 박막 기반의 galvanic cell의 에너지 하베스팅 특성과 cell의 길이, 너비 그리고 전극의 너비에 따른 에너지 하베스팅 특성 변화에 대해 알아보았다. 이와 더불어, 제안하는 CoGe 박막 기반의 galvanic cell을 사물인터넷 센서 네트워크로 활용될 수 있는 아두이노 기반의 센서

네트워크를 구성하는 자가발전 물 접촉 센서로 활용함으로써, 실제 물 접촉에 따라 자가발전 센서로 충분히 활용될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 CoGe 박막 기반의 galvanic cell은 기존의 자가발전 센서로 활용될 수 있는 다른 에너지 하베스팅 소자에 비해 동작 방식이 간단하고 오랜 시간 안정적으로 운용될 수 있다는 점에서 큰 장점을 가지므로, 향후 출력 전력의 크기만 더욱 향상된다면 이상적인 자가발전 센서 네트워크를 구축하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Challengeable Future Defense Technology Research and Development Program (912906601) of Agency for Defense Development in 2020.

REFERENCES

- [1] C. Yoon, B. Jeon, and G. Yoon, "Nanostructured energy harvesting devices and their applications for IoT sensor networks," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 25, pp. 719-730, May. 2021.
- [2] B. Jeon, C. Yoon, and G. Yoon, "Experimental Study on Zinc Oxide Thin Film-Based Thermoelectric Energy Harvester Under Plane-Vertical Temperature Gradients," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 24, pp. 27298-27307, Dec. 2021.
- [3] Y. Hu, Y. Zhang, C. Xu, L. Lin, R. L. Snyder, Z. L. Wang, "Self-Powered System with Wireless Data Transmission," *Nano letters*, vol. 11, no. 6, pp. 2572-2577, May. 2011.
- [4] R. v. Schaijk, R. Elfrink, T. M. Kamel, and M. Goedbloed, "Piezoelectric AlN energy harvesters for wireless autonomous transducer solutions," in *Proceeding of the SENSORS on IEEE*, Lecce, Italy, pp. 45-48, 2008.
- [5] D. Petrov and U. Hilleringmann, "Water-based primary cell for powering of wireless sensors," in *Proceeding of the SENSORS on IEEE*, Rotterdam, Netherlands, pp. 1-4, 2020.
- [6] P. Nadeau, D. E. Damak, D. Glettig, Y. L. Kong, S. Mo, C. Cleveland, L. Booth, N. Roxhed, R. Langer, A. P.

- Chandrakasan, and G. Traverso, "Prolonged energy harvesting for ingestible devices," *Nature biomedical engineering*, vol. 1, pp. 1-8, 2017.
- [7] B. Jeon, C. Yoon, and G. Yoon, "Realization of p-type ZnAgO: N thin films on flexible polyimide substrates through co-sputtering for wearable thermoelectric applications," *AIP Advances*, vol. 10, no. 7, pp. 075201, Jul. 2020.
- [8] J. Ha, B. Jeon, C. Yoon, and G. Yoon, "An experimental study of a-Si/ZnO-stacked hetero-structures for potential thermoelectric energy harvesting applications," *Applied Physics Letters*, vol. 113, no. 17, pp. 173901, Oct. 2018.
- [9] J. H. Lee, J. Ha, T. Piyapatarakul, C. Yoon, B. Jeon, and G. Yoon, "Characteristics of hetero-structured thermoelectric devices with a Si/Mg₂Si stacked thin film layers," *Electronics Letters*, vol. 54, pp. 1399-1401, Nov. 2018.



전부일(Buil Jeon)

성균관대학교 전기및전자공학부 학사
한국과학기술원 전자및전자공학부 석박통합과정(현재)
※관심분야 : 나노 압전 소자 공정, 열전 소자 공정



한동수(Dongsoo Han)

서울대학교 학사
서울대학교 석사
교토대학교 박사
한국과학기술원 전산학부 교수(현재)
※관심분야 : 위치인식, 센서퓨전, 헬스케어



윤기완(Giwan Yoon)

서울대학교 학사
한국과학기술원 석사
텍사스주립대(오스틴) 박사
한국과학기술원 전기및전자공학부 교수(현재)
※관심분야 : 나노 소자, 집적 소자, 에너지 하베스팅, 헬스케어를 위한 플렉시블 센서 소자, 사물인터넷, 센서 네트워크 응용