

열전 복합체 필름을 이용한 유연한 자가 발전형 온도 센서

신다은¹, 권수아¹, 배서연¹, 박종민¹, 김철민^{1,2}, 박귀일^{1,2,3} 

¹ 경북대학교 금속재료공학과

² 경북대학교 미래 모빌리티용 시스템반도체 혁신인재 교육연구단

³ 경북대학교 자동차부품소재연구소

A Flexible Self-Powered Temperature Sensor Based on Thermoelectric Composite Films

Da-Eun Shin¹, Sua Kwon¹, Seo Yeon Bae¹, Jong Min Park¹, Cheol Min Kim^{1,2}, and Kwi-II Park^{1,2,3}

¹ Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

² Innovative Semiconductor Education and Research Center for Future Mobility, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

³ Research Institute of Automotive Parts and Materials, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received January 6, 2025; Revised January 24, 2025; Accepted January 24, 2025)

Abstract: The continuous and long-lasting monitoring of physiological signals induced from the human body is crucial for health monitoring, disease diagnosis, and treatment. In this study, we have reported the Seebeck effect-based flexible self-powered temperature sensor which can convert the electric signals from lateral temperature difference. For demonstrating temperature sensor arrays, the p-type thermoelectric (TE) composite films were fabricated by dispersing the $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ (BST) powders inside poly-vinylidene fluoride matrix and subsequently attached to the patterned electrode foils. The inorganic BST powders-embedded TE composite films with activated area of $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ harvest a maximum voltage of 1.7 mV, a maximum current of 5.6 μA , and an output power of 2.6 nW from the temperature gradient (ΔT) of 20 K. Finally, the fabricated self-powered temperature sensor array well detected the pattern images of external thermal source of $\Delta T = 20 \text{ K}$. This study manifests flexible temperature sensor array which paves the way for further advancements in this field.

Keywords: Thermoelectric, Seebeck, Flexible, Self-powered temperature sensor, Composite film, Bi_2Te_3

에너지 하베스팅 기술(energy harvesting technology)은 열, 진동과 같은 주변에 분포한 미활용 에너지를 수확하여 전기 에너지로 재활용하는 기술이다 [1]. 기존의 배터리는 크고 단단하여 변형이 어렵고, 일정시간 사용 후 충전이 필요하다는 한계가 존재한다 [2]. 하지만 에너지 하베스팅

은 주변의 소모성 에너지원을 전기 에너지로 변환하는 기술로서, 배터리 유무와 관계없이 전자기기에 요구되는 전력원을 안정적으로 제공하여 무선 전자기기의 자가발전이 가능하게 만든다 [3]. 다양한 에너지 하베스팅 기술 중에서 열 에너지를 이용하는 열전 에너지 하베스팅(thermoelectric energy harvesting)은 기기와 주변 환경 간의 온도차 (temperature difference, ΔT)를 통해 안정적으로 전력을 생산하는 차세대 기술이다 [4]. 열전 에너지 하베스터 (thermoelectric energy harvester)는 제벡(Seebeck) 효과를 갖는 열전 재료를 기반으로 제작되고, 소자의 형태와 관계없이 고온과 저온 표면 모두에서 전기 에너지를 수

✉ Kwi-II Park; kipark@knu.ac.kr

Da-Eun Shin, Sua Kwon, and Seo Yeon Bae equally contributed to this work.

Copyright ©2025 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.

확한다 [5]. 온도차가 작은 상황에서도 전기 에너지 생산이 가능하여 웨어러블(wearable) 기기나 열에너지가 발생하는 산업 현장 등 다양한 상황에 적용 가능하다 [6].

특히 웨어러블 센서(sensor)의 수요가 증가함에 따라, 무소음, 무공해, 간단한 발전원리와 같은 장점을 지닌 필름 형태의 유연한 열전 소재를 이용한 유연한 열전 에너지 하베스터(flexible thermoelectric energy harvester)가 주목받고 있다 [7]. 열전 센서(thermoelectric sensor)는 온도차가 인가된 열전 에너지 하베스팅 소자가 해당 열에너지를 전기 에너지로 변환하는 과정을 센서 어레이(sensor array)에 적용하여, 생성된 전기적 신호를 통해 열원을 감지하는 원리를 이용한다. 그중 유연한 열전 센서는 기계적 유연성과 신축성을 제공하여 소형 웨어러블 전자기기 및 생체의료용(biomedical) 전자기기에 적용 가능하다. 소형화, 경량화가 이루어진 열전 센서는 미세한 온도변화를 감지하여 신체 및 주변 환경과 관련한 건강지표 모니터링이 가능하다 [8]. 따라서 열전 하베스팅 기술은 헬스케어 산업의 새로운 방향성을 제시할 것으로 보인다. 더불어 열전 센서는 태양광 기반의 에너지 수집이 어려운 건물, 선박, 항공기, 차량 내부의 온도 센싱에 유리하여 화재 감지와 국토 안보 분야에 추가로 응용될 수 있다 [9]. 이처럼 열전 센서는 유연하고 신축성이 필요한 다양한 분야에 전력 공급, 센싱, 실시간 모니터링 솔루션을 제공한다.

열전 에너지 하베스터의 에너지 변환 효율은 열전성능지수(zT)로 나타낼 수 있으며, 이는 아래의 식과 같이 정의된다 [10].

$$zT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \quad (1)$$

해당 식에서 S 는 제백계수, σ 는 전기 전도도, T 는 절대 온도, κ 는 열 전도도를 나타낸다. 따라서, 소재가 높은 열전성능을 달성하기 위해서는 높은 제백계수, 높은 전기 전도도, 낮은 열 전도도가 필요하다. 또한 유기소재를 포함한 열전 복합체의 경우, 열전 성능 지수로 파워 팩터(power factor)를 이용하며 이는 제백계수의 제곱과 전기 전도도의 곱으로 계산된다 [11]. 에너지 변환 성능이 뛰어난 열전 소재를 개발하기 위해 Bi_2Te_3 계 화합물, ZnO 계 화합물, Half-Heusler 합금, Si-Ge계 화합물과 같은 열전 소재에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다 [12]. 유연한 열전 에너지 하베스터는 주로 실온에서 사용되기에 250~300 K의 온도 범위 내에서 높은 열전성능지수 값을 가지는 Bi_2Te_3 계 무기 열전 소재를 사용한다 [13].

하지만 일반적인 형태인 벌크형 Bi_2Te_3 계 열전소재의 경우 취성으로 인해 자유로운 변형이 한정적이고, 소자에 적

용 시 제작공정이 복잡하다. 따라서 신축성 있는 전력원으로 사용하기에는 부적합하여, 소재의 유연화가 요구된다 [14]. 이러한 소재 유연화 필요성에 따라 최근 연구자들은 polyvinylidene fluoride (PVDF), cellulose, 및 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate) (PE DOT:PSS)와 같은 폴리머 기상에 무기 열전분말을 분산시킨 열전 복합체를 이용하여 필름 형태의 유연한 열전 소재를 제작하였다 [15]. 다양한 폴리머 소재 중에서 PVDF는 저렴한 가격과 더불어 낮은 열 전도도를 가져 열전 복합체의 기상으로 널리 사용된다 [16].

본 연구에서는 유연한 자가 발전형 열전 센서(flexible self-powered temperature sensor)를 개발하여 열원을 인가하였을 때의 센싱 능력을 확인하였다. 열전 센서에 사용한 열전 필름은 무기 열전소재인 Bi_2Te_3 계 화합물 중 p형의 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ (BST) 분말과 PVDF로 구성된 유연한 열전 복합체 필름으로, 변형이 한정적인 벌크형 소재의 단점을 보완하였다 [10]. 유연한 열전 복합체 필름을 기반으로 신체와 같이 굴곡이 심한 표면에 적용하기 용이한 센서 어레이를 제작하였다. 이때 우수한 유연성과 높은 전기전도도를 가지는 Al foil 전극을 이용하여 간단하고 저비용으로 센서 어레이를 구현하였다. 기존의 열전 복합체 필름 기반의 에너지 하베스팅 소자의 경우 주로 평면 방향의 열 흐름을 감지하는 데 초점이 맞춰져 있다. 하지만 이를 센서로 구현할 경우 열원을 수직 방향으로 인가하기에 상하부 수직 방향으로 온도차가 발생해야 한다. 따라서 폼 타입의 양면테이프를 이용하여 독창적인 수직방향의 단차 구조를 고안하였다. 센서에 열원을 인가하는 열전필름 상부와 기판이 위치한 하부 간의 단차를 통해 수직 방향으로 가해지는 열을 효과적으로 탐지할 수 있도록 설계하였다. 이는 열전 에너지 하베스팅 기술과 웨어러블 센서의 융합을 통해 평면뿐만 아니라 유연한 구조에서도 효과적으로 적용될 수 있는 새로운 열전 센서로서의 발전 가능성을 제시한다. 열전 센서 어레이의 센싱(sensing) 성능을 평가하기 위해 PDMS (polydimethylsiloxane)로 제작한 열원 패턴을 도입하였으며, 20 K의 온도차를 인가하며 센싱하였다. 채널에 열원을 인가할 때 발생하는 신호를 실시간으로 감지하여 맵핑(mapping)을 통해 시각화 함으로써, 본 연구에서 개발한 유연한 자가 발전형 열전 센서의 실생활 적용 가능성을 확인하였다.

그림 1(a)는 열전 센서 제작을 위한 용액 준비 과정을 나타내는 모식도이다. N, N-dimethylformamide (DMF)와 아세톤(acetone)을 3:7 질량비로 혼합한 용액에 BST 분말(VI semiconductor Materials Group Co. Ltd, China)과 PVDF를 첨가하고 상온에서 충분히 교반시켜 용

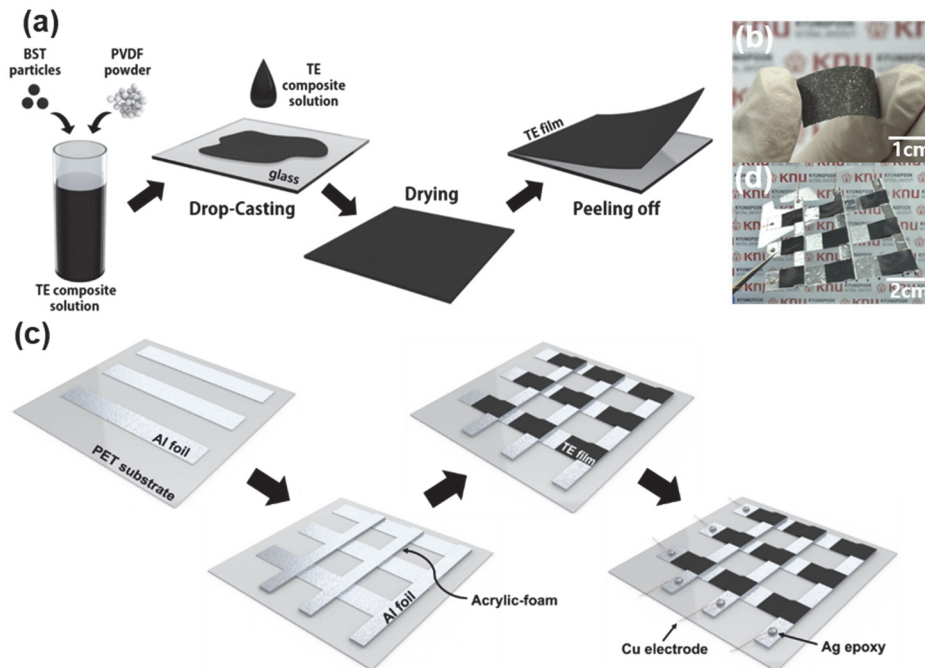


Fig. 1. (a) Schematic illustration showing fabrication process of TE composite films, (b) photograph of the fabricated TE film, (c) schematic diagrams of steps for fabricating the flexible self-powered temperature sensor arrays, and (d) a real photograph of the fabricated temperature sensing device.

액을 제조하였다. 필름 제작 시 70, 75, 80, 85 wt%의 BST 분말 함유량 중 가장 높은 제백 계수, 전기 전도도 및 파워 팩터 값을 가지는 80 wt% p형 BST 분말을 사용하였다 [10]. 세척된 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 크기의 유리 기판 위에 제작된 열전 복합체 용액을 드롭 캐스팅(drop-casting) 과정으로 도포하고 80°C 오븐에서 2시간 이상 건조한 후 유리 기판에서 열전 필름을 분리하여 사용하였다. 제작된 유연한 열전 필름의 실제 사진은 그림 1(b)에 나타내었다. 제작된 열전 필름의 두께와 단면 및 표면의 물질 분포를 확인하기 위해 SEM 분석(field emission scanning electron microscope, JSMIT700HR, JEOL)과 EDS 분석(energy dispersive spectroscopy, Ultim Max 100, OXFORD)을 진행하였다. 또한 열전 필름의 결정 구조를 확인하기 위해 X선 회절(X-ray diffraction, XRD; Empyrean, Malvern PANalytical, UK) 분석을 진행하였다.

열전 필름에 수직 방향으로 온도차를 인가하기 위해 폼 타입의 양면테이프 (PE Double-Coated Foam Tape, 3M, 1.16 mm) 3장을 겹쳐 단차를 구현하였다. 단차가 3 mm 이하인 경우 충분한 온도 구배를 생성하지 못하여 센서 성능이 제한되고 4 mm 이상의 높이 차이는 열전 센서 자체의 유연성(flexibility)을 손상시키며 기계적 성능을 저해한다는 점을 고려하여 단차를 3.48 mm로 선정하였다.

유연한 열전 센서를 제작하기 위해 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 크기의 Polyethylene terephthalate (PET, GoodFellow Cambridge Ltd., $50 \mu\text{m}$) 기판 위에 1 cm 간격으로 $1 \times 9 \text{ cm}^2$ 크기의 Al foil 전극 3개를 부착한다. 하부 Al 전극에 수직하도록 PE 폼 양면테이프를 2.5 cm 간격으로 붙여 단차를 만든다. 폼 타입 양면테이프 위에 $0.5 \times 6 \text{ cm}^2$ 크기의 Al foil을 각각 부착하고 $1 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기로 재단된 열전 필름을 은 전도성 에폭시 (Ag conductive epoxy, CW2400, Chemtronics Co.)를 이용하여 각각 하부전극과 상부전극에 부착한다. 열전 필름이 은 전도성 에폭시로 Al foil에 접촉하는 면적은 각각 $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ 이다. 열전 센서의 각 unit에서 생성되는 출력 전압을 확인하기 위해 각 전극의 끝에 은 전도성 에폭시를 이용하여 구리 도선을 연결하였으며 이 과정은 그림 1(c)에 모식도로 나타내었다. 그림 1(d)는 제작된 3×3 열전 센서의 실제 사진이다. 또한 3×3 열전 센서 개별 unit의 성능을 평가하기 위해 1개의 unit으로만 구성된 단일 어레이의 열전 센서를 제작하였다. $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 크기의 PET 기판 위에 $1 \times 3 \text{ cm}^2$ 크기의 Al foil 전극 1개를 부착하고 하부 Al 전극에 수직하도록 $0.5 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기의 폼 타입의 양면테이프와 Al foil을 순서대로 부착한다. $1 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기의 열전 필름을 은 전도성 에폭시를 이용하여 $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 접촉면적으로 각각

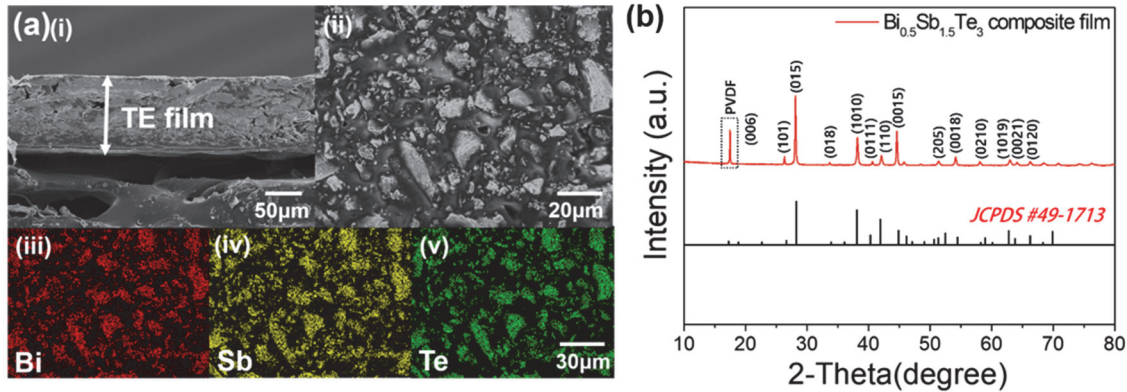


Fig. 2. (a) (i) Cross-sectional SEM image, (ii) surface of SEM image, and (iii-v) EDS mapping corresponding to the surface images of TE composite films and (b) XRD pattern of a p-type $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ powders-embedded TE composite film.

하부전극과 상부전극에 부착한다. 열전 성능 평가를 위해 각 전극의 끝에 구리선을 은 전도성 에폭시를 이용하여 부착하였다.

제작된 열전 센서의 센싱 능력을 평가하기 위해 핫 플레이트(hot plate, MSH- 20D, Daihan Scientific) 및 냉각 칠러(chiller, RW3-3025, lab Companion)를 이용하여 열전 센서에 수직방향으로 온도구배를 주었다. 평균 20 K의 온도차를 유지하기 위하여 디지털 패치형 온도계 (A1. T9214T, Daihan Scientific)를 이용하였으며 저항박스 (RS-200 W, IET Labs, Inc.)를 통해 소자에 1~1M Ω 범위의 외부 저항을 인가하였다. 외부 저항에 따라 발생하는 전압과 부하 전류는 소스 미터(2612 B, Keithley)로 수집하였다.

멀티채널 맵핑을 위해 디지털 멀티미터(Keithley Instruments INC. 3706A, SnM)와 Multi Channel Measurement System (Snm Co.) 프로그램으로 구성된 환경을 자체 조형하였다. 패턴을 가진 열원을 인가하기 위해 PDMS 용액을 경화제와 9:1로 혼합한 후 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 트레이에 0.7 cm 두께로 혼합용액을 붓고 80 °C 오븐에서 1시간 건조했다. 경화된 PDMS를 점, 선, n 패턴으로 재단한 후 핫 플레이트에 올려 PDMS를 가열하였다. 멀티채널 맵핑 측정 중 열전 센서의 PET 기판 아래에 차가운 금속판을 대고, 각 어레이 unit 위에 열원을 가진 PDMS 패턴을 올려 열을 인가했다. 디지털 패치형 온도계를 이용하여 열전 센서의 상하부에 직접 형성되는 온도차를 평균 20 K로 유지하며 측정을 진행하였으며 열화상 카메라(Fotric 340 A, FOTRIC)를 이용하여 소자에 인가된 온도차를 정확히 확인하였다.

그림 2(a)는 BST 분말과 PVDF 분말을 이용하여 제작한 열전 필름을 SEM과 EDS로 촬영한 이미지이다. 열전 필름

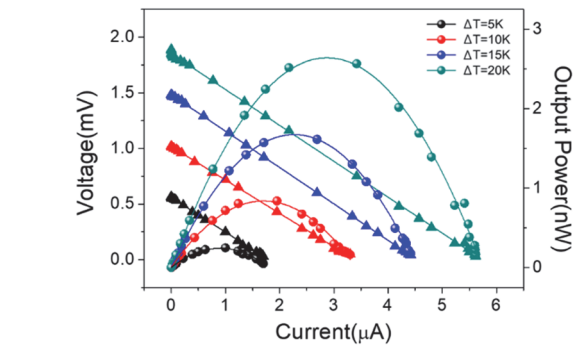


Fig. 3. Output performance (voltage-current-power curve) of fabricated TE composite film with activated area of $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$.

의 단면을 SEM으로 촬영한 그림 2(a)의 (i)와 (ii)를 통해 제작된 열전 필름의 두께가 약 120 μm로 균일하게 나타났으며 BST 분말의 크기가 약 10~25 μm의 크기를 가졌음을 확인할 수 있다. 그림 2(a)의 (iii-v)는 열전 필름의 EDS 맵핑 분석 결과이며, 제작된 p 형의 열전 필름에 Bi, Sb, Te의 원소가 고루 분산된 것을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 제작된 열전필름의 X선 회절 분석 결과를 나타낸 것이다. BST 분말의 패턴이 JCPDS card와 일치한 것으로 보아 제작된 열전필름에서 BST 분말이 결정상을 잘 나타낸 것을 알 수 있다. 또한 20° 근처의 범위에서 PVDF 피크가 나타난 것을 통해 열전 필름 내에 β상의 PVDF가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 단일 어레이 열전 센서의 온도차에 따른 열전 성능을 측정한 결과이다. 5~20 K의 온도차 범위에서 온도차가 증가할수록 높은 열전 성능이 측정되었다. 특히 단일 어레이의 열전 센서에 20 K의 온도차를 인가할 때 약 1.7 mV의 최대 전압, 약 5.6 μA의 최대 전류, 2.6 nW의 최대

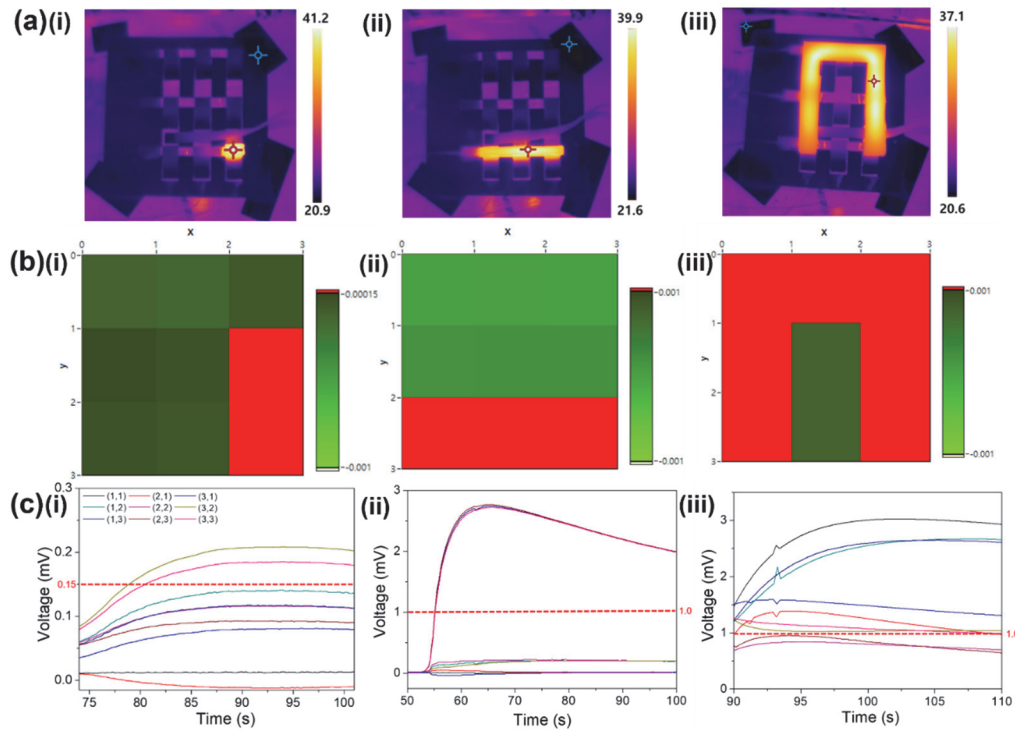


Fig. 4. (a) The infrared thermal images of the flexible temperature sensor arrays activated by a PDMS heater. (b) The contour map images visualized by the imaging program based on the measured voltage signals. (c) The measured voltage pulses of each array point when subjected to the heat sources: (i) dot, (ii) line, and (iii) n pattern.

출력 전력을 나타내는 것을 알 수 있다. 열전 성능 측정 결과를 통해 단차를 가진 열전 센서가 수직으로 인가되는 열원을 이용하여 충분한 발전 성능을 보인다는 것을 확인하였다.

그림 4(a)는 3×3 어레이 위에 PDMS로 열원을 인가한 상태를 열화상 카메라로 촬영한 이미지이다. 점, 선, n 패턴을 가진 PDMS를 이용하여 열전 센서에 약 20 K의 온도차를 인가하였고, 그에 따른 멀티채널 맵핑의 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. 그림에서 빨간색으로 나타난 부분은 각 패턴의 센싱 기준 이상의 출력 전압을 가지는 위치이다. (3,3) 위치에 점 모양의 열원을 인가한 경우 [그림 4(a-c)의 (i)]의 센싱 기준은 0.15 mV로 설정하였고 (3,3) 위치의 최대 전압은 0.21 mV로 나타났다. 열원 인가 시 약 20 초 이상 맵핑이 지속되었으며, 정확한 위치에서 약간 벗어나 (3,2) 위치에도 맵핑이 되었다. 이는 unit 간의 열전도로 인한 간섭의 결과로 분석하였다. line 패턴의 열원 인가 시 [그림 4(a-c)의 (ii)] 센싱 기준은 1.0 mV로 조절하여 맵핑하였으며 열원 인가 위치의 최대 전압은 평균 2.75 mV로 나타났다. 50 초 이상의 충분한 시간동안 line 패턴이 유지되어 센싱되었다. 또한 n 패턴의 열원 인가 시 [그림 4(a-

c)의 (iii)] 센싱 기준을 1.0 mV로 조절하여 측정하였으며 정확한 n 패턴은 약 15 초간 지속되었다.

본 연구에서는 PVDF에 P형 BST 분말을 혼합하여 제작한 유연한 열전 복합체 필름을 이용하여 자가 발전형 열전 센서를 제작하였다. 특히 센서의 상하부 간에 단차를 가지게 하여 수직 방향의 온도구배를 감지하는 구조를 고안하였다. 단일 어레이 열전 센서는 20 K의 온도차에서 최대 출력 전력 2.6 nW을 보였다. 열전 센서의 센싱 능력을 멀티채널 맵핑을 통해 확인하였으며 제작된 열전 센서는 점, 선, n 패턴의 열원을 효과적으로 센싱하였다. 더 나아가, 열전도로 인한 간섭을 최소화할 수 있는 최적의 unit 간 간격을 찾아내는 것이 차후 센서의 성능 최적화에 가장 중요한 과제이며 이를 통해 본 연구에서 고안된 유연한 자가발전형 열전 센서의 활용 영역을 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Kwi-II Park

<https://orcid.org/0000-0002-9140-6641>

감사의 글

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.RS-2022-NR069105, No. RS-2024-00403822)을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, *Proc. IEEE*, **96**, 1457 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927494>
- [2] Y. W. Chong, W. Ismail, K. Ko, and C. Y. Lee, *IEEE Sens. J.*, **19**, 9047 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2925638>
- [3] K. I. Park, J. H. Son, G. T. Hwang, C. K. Jeong, J. Ryu, M. Koo, I. Choi, S. H. Lee, M. Byun, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **26**, 2514 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl102959k>
- [4] S. Kim, Y. Na, C. Nam, C. K. Jeong, K. T. Kim, and K. I. Park, *Nano Energy*, **103**, 107824 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107824>
- [5] Z. Wang, V. Leonov, P. Fiorini, and C. Van Hoof, *Sens. Actuators A Phys.*, **156**, 95 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.02.028>
- [6] S. H. Jung, Y. J. Woo, K. T. Kim, and S. Jo, *J. Powder Mater.*, **30**, 123 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2023.30.2.123>
- [7] Y. Na, S. Kim, S. P. R. Mallem, S. Yi, K. T. Kim, and K. I. Park, *J. Alloys Compd.*, **924**, 166575 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166575>
- [8] M. Massetti, F. Jiao, A. J. Ferguson, D. Zhao, K. Wijeratne, A. Würger, J. L. Blackburn, X. Crispin, and S. Fabiano, *Chem. Rev.*, **121**, 12465 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00218>
- [9] Y. Shi, Y. Wang, Y. Deng, H. Gao, Z. Lin, W. Zhu, and H. Ye, *Energy Convers. Manag.*, **80**, 110 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.010>
- [10] D. E. Shin, N. R. Alluri, and K. I. Park, *ACS Appl. Energy Mater.*, **7**, 8288 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c01772>
- [11] D. Qu, X. Li, H. Wang, and G. Chen, *Adv. Sci.*, **6**, 1900584 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201900584>
- [12] J. R. Sootsman, D. Y. Chung, and M. G. Kanatzidis, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **48**, 8616 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1002/anie.200900598>
- [13] X. Zhang and L. D. Zhao, *J. Materiomics*, **1**, 92 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2015.01.001>
- [14] H. Tang, H. Bai, X. Yang, Y. Cao, K. Tang, Z. Zhang, S. Chen, D. Yang, X. Su, Y. Yan, and X. Tang, *J. Alloys Compd.*, **896**, 163090 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163090>
- [15] B. Zhang, J. Sun, H. E. Katz, F. Fang, and R. L. Opila, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2**, 3170 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1021/am100654p>
- [16] C. Dun, C. A. Hewitt, H. Huang, J. Xu, D. S. Montgomery, W. Nie, Q. Jiang, and D. L. Carroll, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 7054 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00514>