Ceramist
Vol. 29, No. 3, pp. 572~590, 2026.

http://doi.org/10.31613/ceramist.2026.00206

Recent Advances in P(VDF-TrFE)-Based Piezoelectric-Pyroelectric coupled Sensors for Robotic Tactile Perception

Hyojin Lim[1], Hanjun Ryu[1,2†]

[1]Department of Advanced Materials Engineering, Chung-Ang University, Anseong-si 17546, Gyeonggi-do, Republic of Korea
[2]Department of Intelligence Energy and Industry, Chung-Ang University, Seoul 06974, Republic of Korea

로봇 촉각 인식을 위한 P(VDF-TrFE) 기반 압전·초전 센서

임효진[1], 류한준[1,2†]

[1]중앙대학교 첨단소재공학과
[2]중앙대학교 지능형에너지산업융합학과

(Received July 16, 2026; Revised August 12, 2026; Accepted August 18, 2026)

Abstracts

Flexible tactile sensors capable of real-time detection of pressure, strain, temperature, and slip are important for enabling robots to achieve stable object grasping and manipulation through human skin-like tactile perception. Among various sensing technologies, self-powered sensors based on piezoelectric and pyroelectric effects directly convert mechanical and thermal stimuli into electrical signals without an external power source, providing an approach for developing miniaturized and autonomous robotic tactile systems. Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) (P(VDF-TrFE)), a ferroelectric polymer, exhibits high flexibility, mechanical durability, and biocompatibility and is suitable for tactile sensors subjected to repeated contact and deformation. This review summarizes recent advances in P(VDF-TrFE)-based self-powered tactile sensors, including material design, device structures, sensing mechanisms, and approaches to address current challenges. Applications in gesture recognition, tactile-visualizing electronic skin, and soft object discrimination are also discussed. Finally, the remaining challenges and future research directions are outlined, with an emphasis on the potential of P(VDF-TrFE) for next-generation robotic tactile systems.

Keywords: *P(VDF-TrFE), Piezoelectric-Pyroelectric Hybrid Nanogenerator, Self-Powered Sensor, Flexible Tactile Sensor, Robotic Tactile Perception*

†Corresponding Author: hanjunryu@cau.ac.kr

© 2026 The Korean Ceramic Society
This is an Open Access article distributed under the terms of Creative Attributions Non-Commercial License (https://creativecommons.org/li-censes/by-nc/4.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

인간과 기계 간의 자연스러운 상호작용을 위한 인간-기계 인터페이스 기술이 주목받으면서 로봇 손과 같은 말단 장치에 사람의 피부를 모사한 촉각 인식 기능을 부여하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-3] 로봇이 물체를 안정적으로 파지하고 조작하기 위해서는 압력, 변형, 온도, 미끄럼과 같은 물리적 자극을 실시간으로 감지하면서 반복적인 접촉과 굽힘에 견딜 수 있는 유연 촉각 센서가 필요하다.[4-6] 이러한 촉각 센서 구현을 위해 외부 압력에 따른 저항 변화를 감지 원리로 하는 압저항 방식의 센서도 폭넓게 연구되어 왔다. 특히 외부 전원 없이 기계적 및 열적 자극을 전기 신호로 직접 변환할 수 있는 압전·초전 현상 기반 자가발전형 센서는 로봇 촉각 시스템의 소형화와 자율 구동에 적합한 대안으로 주목받고 있다.[7-11]

압전 및 초전 특성을 나타내는 재료 중에서도 강유전 고분자인 Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) [P(VDF-TrFE)]는 로봇 손과 같이 굽힘과 접촉이 반복되는 환경에 적합한 소재로 연구되고 있다. 지르콘산 티탄산납(PZT)나 산화아연(ZnO)와 같은 무기 압전 재료는 각각 289 pC/N, 12.4 pC/N 수준의 상대적으로 높은 압전계수를 나타내지만 재료 자체의 취성으로 인해 반복적인 파지 동작에서 균열이나 파단이 발생하기 쉬워 로봇 촉각 센서로 적용하는 데 한계를 갖는다.[12,13] P(VDF-TrFE)는 18-34 pC/N 수준의 상대적으로 낮은 압전계수를 나타내지만 우수한 유연성과 생체적합성을 가지므로 로봇 손가락 관절과 같이 반복적인 변형이 가해지는 부위에도 안정적으로 부착될 수 있다.[12] 특히 P(VDF-TrFE) 분자 사슬이 전트랜스all-trans(TTT) 구조로 배열된 β상(β-phase) 결정은 외부 전기장 없이도 결정 내 쌍극자가 한 방향으로 정렬되어 자발분극을 나타내며 이 자발분극의 크기가 클수록 외력이나 온도 변화에 대한 전기적 응답이 커진다.[14] 따라서 β상 결정 함량을 극대화하는 것이 P(VDF-TrFE) 기반 로봇 촉각 센서의 성능을 결정하는 핵심 요소로 작용한다.

그러나 P(VDF-TrFE) 기반 로봇 촉각 센서가 실용적인 소자로 활용되기 위해서는 몇 가지 한계를 해결해야 한다. 높은 β상 결정 함량을 얻기 위해서는 고온에서 장시간의 열처리 공정이 필요하여 제조 효율이 저하되고 불소 고분자 특유의 낮은 표면 에너지로 인해 전극-고분자 계면에 공극이 형성되어 전하 수집이 손실되는 문제도 있다.[15,16] 또한 기존의 압전 및 초전 나노발전기는 단일 에너지원만을 활용하도록 설계되어 있으며 변형과 온도를 동시에 구분하여 인식하기 어려운 한계를 갖는다.[17,18]

이러한 한계를 해결하기 위해 다양한 접근법이 보고되고 있으며 본 리뷰 논문에서 P(VDF-TrFE) 결정성 및 계면 특성 제어를 통한 성능 향상 전략, 압전과 초전을 동시에 활용하는 하이브리드 나노발전기, 그리고 로봇 손의 제스처·물체 인식이나 촉각 시각화, 연성 물체 판별 등 실제 응용으로의 확장이라는 세 방향을 중심으로 살펴본다(Fig. 1). 이를 통해 P(VDF-TrFE) 기반 자가발전형 촉각 센서가 지능형 로봇 촉각 시스템에서의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

2. P(VDF-TrFE)의 압전 및 초전 특성

2.1 압전 메커니즘

압전 효과(Piezoelectric effect)는 비중심대칭 결정 구조를 갖는 재료에서 외부의 기계적 응력이 가해질 때 결정 내부의 전하 중심이 이동하면서 전기적 분극이 발생하는 현상이다.[20,21] 이때 발생하는 분극의 방향은 인가되는 응력의 방향에 의존하는데 압축 응력이 가해지는 경우와 인장 응력이 가해지는 경우는 결정 내부에서 양이온과 음이온의 상대적 변위 방향이 서로 반대이므로 전하 중심의 이동 방향 또한 반대가 되어 분극의 방향이 서로 반대로 나타난다.[22] 굽힘 변형이 가해지는 경우에도 시료의 상부에는 압축 응력이, 하부에는 인장 응력이 동시에 작용하므로 굽힘의 방향에 따라 상부와 하부에서 발생하는 분극의 방향이 서로 반대가 된다. 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 정압전 효과와 전기장을 인가하여 기계적 변형을 유도하는 역압전 효과로 구분된다. 정압전 효과는 외부의 압력이나 변형을 전기 신호로

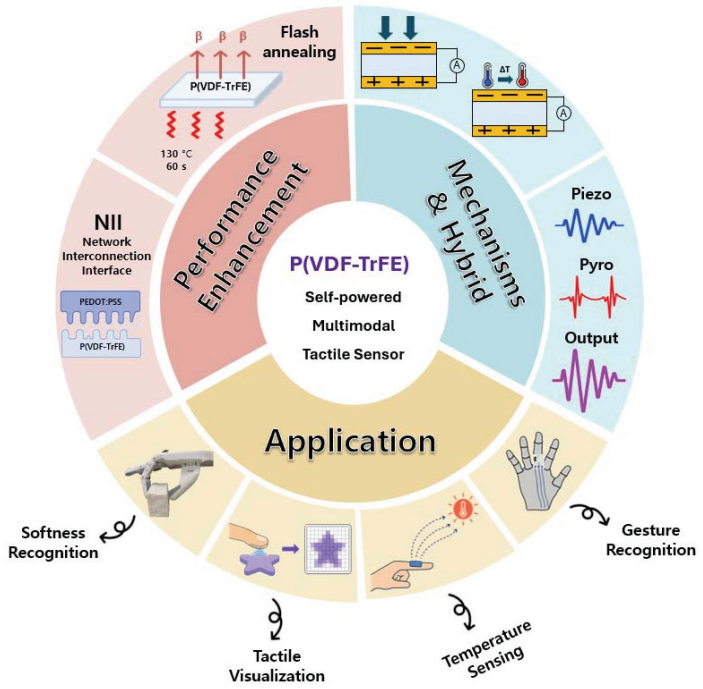


Fig. 1. Overview of mechanisms, performance enhancement strategies, and applications of P(VDF–TrFE)–based tactile sensors. Reproduced from Qiu et al. npj Flex. Electron. 2022;6, under the terms of the CC BY 4.0 license.[19]

변환하는 원리를 이용하여 압전 센서와 압전 나노발전기(Piezoelectric nanogenerator, PENG)에 활용되며 역압전 효과는 전기적 자극을 기계적 변형으로 변환하는 특성을 이용하여 액추에이터 등에 적용된다.[23] 특히 압전 효과는 재료 내부의 분극 변화에 의해 발생하므로 자발분극을 유지할 수 있는 강유전 재료에서 더욱 우수한 압전 특성을 나타낸다.[24,25]

P(VDF–TrFE)는 강유전 특성을 갖는 고분자로 높은 압전 특성을 얻기 위해서는 분극 처리 공정을 통해 분자 사슬의 전기 쌍극자를 한 방향으로 정렬해야 한다. 분극 처리 공정 이전에는 쌍극자가 무작위로 배열되어 순분극이 거의 나타나지 않는다. 강한 직류 전기장을 인가하는 분극 처리 공정을 통해 쌍극자가 전기장 방향으로 정렬되어 잔류분극이 형성되며 이렇게 분극이 완료되어 외부 응력이 가해지지 않은 평형 상태를 초기 상태(Original)라 한다(Fig. 2). 형성된 잔류분극은 외부의 기계적 변형에 따라 분극이 변화할 수 있도록 하며 이 과정에서 전극에 전하가 유도되어 압전 신호가 발생한다. 분극된 P(VDF–TrFE)에 압축 응력이 가해지면(Pressing) 결정 내 불소 원자와 탄소 주사슬 사이의 상대적 거리가 변화하면서 압전층 내부의 분극이 변화하고 상·하부 전극 사이에 압전 전위가 형성된다. 생성된 전위차를 평형 상태로 만들기 위해 강유전소재 상하부에 위치한 전극의 전자가 외부 회로를 통해 전극 간 이동하며 순간적인 전류와 전압이 발생한다. 최대 압력이 인가된 상태(Pressed)에서는 분극이 새로운 평형 상태에 도달하므로 전자의 이동이 멈춰 출력은 다시 0에 가까워진다. 이후 압력이 제거되면(Releasing) 압전 전위의 방향이 반전되어 전자가 반대 방향으로 이동하며 역방향 전류가 발생한다. 압력이 완전히 제거되어 초기 상태(Original)로 되돌아가면 전위차가 사라져 출력이 다시 0 V이 된다. 따라서 압력의 인가와 제거가 반복될 경우 양과 음의 피크를 갖는 교류 형태의 출력 신호가 생성되면 압력, 진동 및 동적 기계적 자극을 감지할 수 있다.[23]

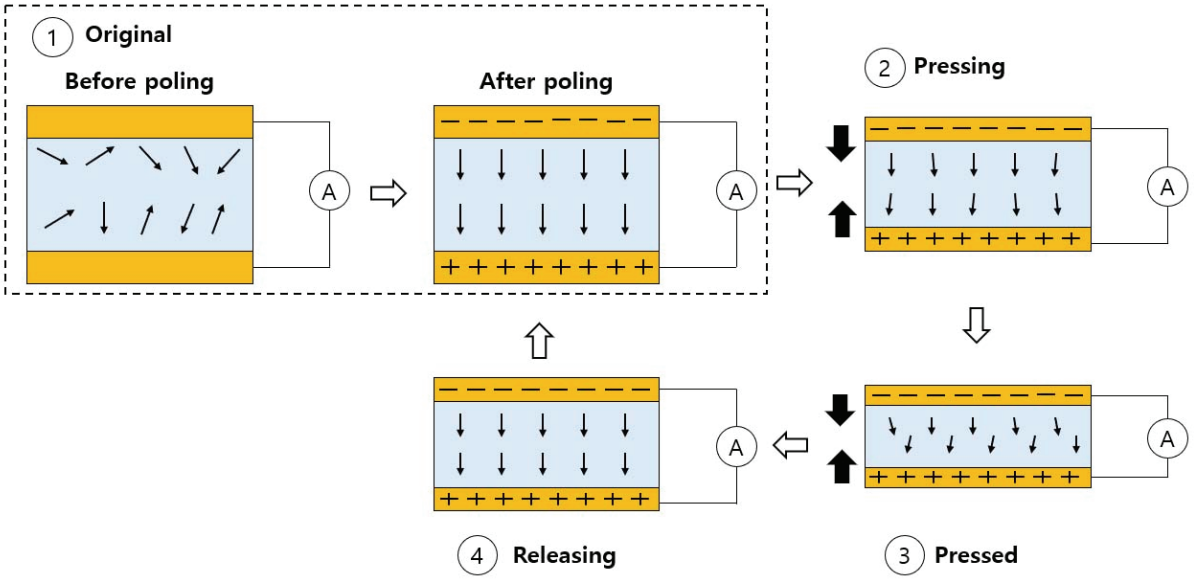


Fig. 2. Working principle of the piezoelectric effect in P(VDF-TrFE).

2.2 초전 메커니즘

초전효과(Pyroelectric effect)는 온도 변화에 의해 강유전 소재의 자발 분극이 변화하면서 전기적 신호가 발생하는 현상이다. P(VDF-TrFE)는 분극된 상태에서 일정한 자발 분극을 유지하며 온도가 변화하면 분자 사슬이 전기 쌍극자의 진동 상태가 변하면서 자발 분극의 크기도 함께 변화한다. 가열 상태($\Delta T>0$)에서는 열에너지가 증가하면서 쌍극자가 정렬 축으로부터 더 크게 진동하여 자발 분극이 감소한다. 전극에 유도된 전하량도 감소하며 전하 평형을 유지하기 위해 전자는 하부 전극에서 상부 전극으로 이동하여 초전 전류가 발생한다. 반대로 냉각 상태($\Delta T<0$)에서는 쌍극자의 진동이 감소하면서 분극 방향으로 안정적이게 정렬되고 자발 분극이 증가한다. 그 결과 전극에 유도되는 전하량이 증가하며 전자는 가열 시와 반대 방향으로 이동한다. 따라서 가열과 냉각 과정에서는 서로 반대 극성의 초전 신호가 나타난다(Fig. 3).[26]

초전 효과는 온도의 절대값이 아니라 시간에 따른 온도 변화율(dT/dt)에 의해 결정된다.[27,28] 따라서 온도가 일정하게 유지되면 자발 분극은 더 이상 변하지 않아 전자

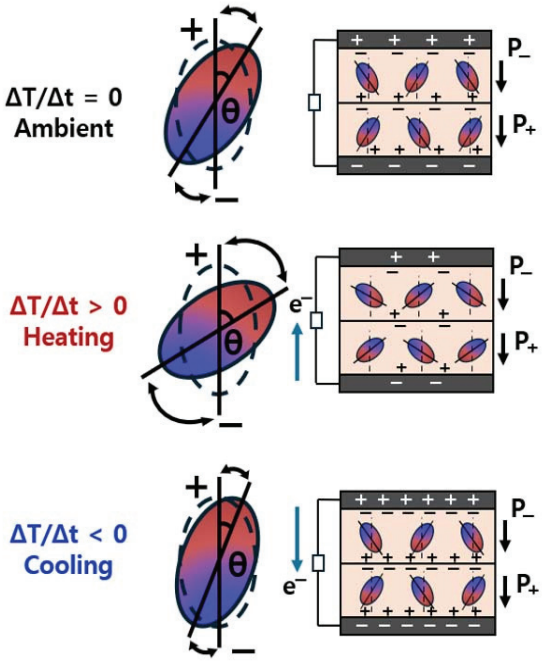


Fig. 3. Schematic of dipole reorientation and the resulting pyroelectric electron transfer between two oppositely poled P(VDF-TrFE) layers under thermal equilibrium, heating, and cooling conditions.

의 이동이 멈춰 초전 신호는 발생하지 않는다. 반면 가열 또는 냉각과 같이 온도가 변화하는 순간에만 자발분극이 지속적으로 변하여 일시적인 전류가 발생하며 온도 변화가 종료되면 전극 간의 전위차는 0 V으로 수렴한다.[29]

3. P(VDF–TrFE)의 성능 향상 전략

3.1 플래시 어닐링을 통한 결정성 제어

P(VDF–TrFE)는 우수한 유연성, 생체적합성 및 강유전 특성을 갖고 있어 웨어러블 전자소자와 유연 센서 분야에서 널리 활용되고 있는 대표적인 강유전 고분자이다.[30] P(VDF–TrFE)는 α, β, γ상의 결정상을 형성할 수 있으며 이 중 β상은 분자 사슬이 전트랜스(TTT) 구조로 배열되어 가장 높은 쌍극자 정렬과 자발 분극을 나타낸다. 이러한 구조는 우수한 강유전 특성을 가지며 특히 β상 결정은 높은 자발 분극과 우수한 압전 특성을 나타내며 β상 함량을 증가시키는 것이 센서 성능 향상의 핵심 요소이다. 그러나 기존 습식 공정으로 제작된 P(VDF–TrFE)는 β상 결정 함량을 높이기 위해 140℃에서 2시간의 열처리가 필요하며 이는 높은 에너지 소비와 장시간 공정으로 인해 제조 효율이 저하가 되는 한계를 가진다. 이를 대체하기 위해 순간적인 열처리를 위해 플래시 어닐링 공정을 통해 130℃에서 60초 동안 열처리를 수행하였다 (Fig. 4).[14]

플래시 어닐링 온도는 시차주사열량계(Differential scanning calorimetry, DSC) 분석에서 확인된 결정화 피크 온도(129.3℃)를 바탕으로 선정되었고, 퀴리 온도 이상의 열처리 과정에서 β상(TTT)이 α상(TGTG')으로 전이된 후 냉각 과정에서 고에너지 상태의 TGTG' 배열보다 안정한 TTT 배열로 재배열되면서 β상이 재형성된다. 이 과정에서 TrFE 단위는 고온에서 분자 사슬의 수축을 억제하고 TTT 구조로의 재배열을 촉진하여 β상 형성을 효과적으로 유도한다. DSC 분석에서는 강유전상과 상유전상 사이에 필요한 에너지인 퀴리 전이 엔탈피가 플래시 어닐링 (130℃, 60초) 처리에 의해 약 3 J/g에서 약 30 J/g로 증가하였고 이후 장시간 열처리에서도 추가적인 변화가 거의 나타나지 않아 β상 결정 형성이 60초 이내로

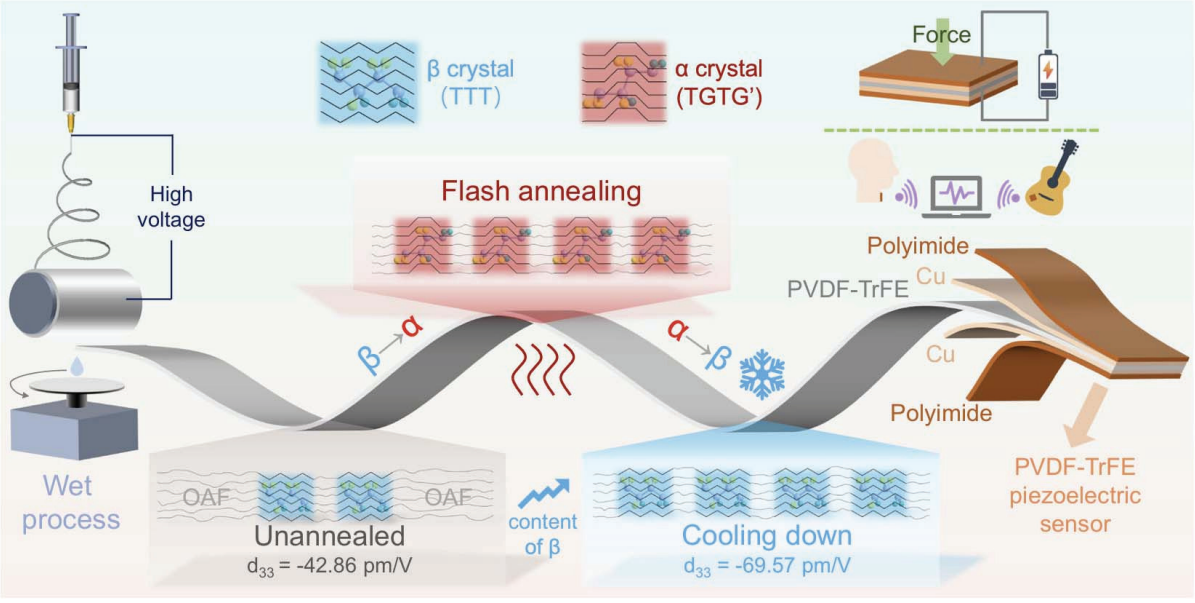


Fig. 4. Wet–process fabrication and flash annealing of P(VDF–TrFE), showing the β↔α phase transition and increased piezoelectric coefficient (d_{33}) after cooling. Adapted from Hu et al. Nat. Commun. 2025;16:11147, under the terms of the CC BY–NC–ND 4.0 license.[14]

완료됨을 확인하였다. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) 분석에서는 β상 특성 피크의 정규화된 특성 피크 면적이 약 1.3에서 약 3.8로 증가하여 β상 함량이 크게 향상되었다. In-situ X-ray diffraction (XRD) 분석에서는 β→α→β 상전이가 직접 확인되었으며 라만 분광법에서는 845 cm^{-1} 특성 피크의 세기 증가를 통해 TTT 분자 배열이 증가하였음을 확인하였다. Wide-angle XRD 분석에서는 결정 배향성을 나타내는 헤르만 배향인자(HOF)가 미열처리 시료의 −0.46에서 플래시 어닐링 후 −0.47로 거의 동일하게 유지된 반면 장시간 열처리에서는 −0.37로 감소하였다. 이러한 결과는 플래시 어닐링이 결정 배향을 유지하여 쌍극자의 정렬성을 보존하고 기계적 변형에 따른 분극 응답을 향상시킴으로써 압전 특성 향상에 효과적임을 보여준다.

열처리 조건에 따른 P(VDF-TrFE)의 압전 특성과 압력 센서 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 플래시 어닐링을 적용한 시료는 가장 높은 압전계수 (Piezoelectric coefficient, d_{33})를 (d_{33}=70.89 pm/V) 나타냈으며 미열처리 시료(d_{33}=44.91 pm/V)와 장시간 열처리 시료(d_{33}=53.85 pm/V)보다 우수한 압전 특성을 보였다. 이와 유사하게 열처리를 통해 결정-비정질 계면의 배향 비정질 분율(oriented amorphous fraction)을 제어하여 압전계수를 향상시킨 연구도 보고되었다.[30] 전기방사된 P(VDF-TrFE) 필름을 센서로 제작한 후 외부 힘에 따른 출력 전압을 측정하여 압전 출력 특성을 평가한 결과 플래시 어닐링 시료의 d_{33}=96.9 mV/N으로 장시간 열처리 시료(d_{33}=72.1 mV/N), 미열처리 시료(d_{33}=28.1 mV/N) 및 상용 PVDF 센서(d_{33}=18.2 mV/N)보다 높은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 단시간 열처리만으로도 P(VDF-TrFE)의 결정성과 압전 특성을 향상시켜 실제 센서 성능 향상에도 효과적임을 보여준다.

본 연구에서 플래시 어닐링을 통해 향상된 압전 특성은 실제 소자 성능 향상으로 이어졌다. 압력 센서에서는 압전 출력 감도가 72.1 mV/N 에서 96.9 mV/N 으로 증가하였으며 에너지 하베스팅 소자에서는 최대 출력 전력 밀도가 7.53 mW/m^2 를 나타냈다. 이러한 결과는 플래시 어닐링이 장시간 열처리보다 효율적으로 P(VDF-TrFE)의 압전 특성을 향상시키고 센서 및 에너지 하베스팅 소재적 성능 향상에도 효과적임을 보여준다.

3.2 Network Interconnection Interface (NII) 구조를 통한 전하 수집 효율 향상

기존 P(VDF-TrFE) 기반 센서는 불소 고분자 특유의 낮은 표면 에너지로 인해 금속 전극과의 접착력이 떨어지고 이로 인해 고분자와 전극 사이에 공극이 형성되어 생성된 전하가 충분히 수집되지 못하여 압전 및 초전 출력이 제한되는 한계를 가진다.[15] 이러한 계면 접촉성 문제를 해결하기 위해 Li 등은 P(VDF-TrFE)와 전도성 고분자 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) 전극 사이에 Dimethyl sulfoxide (DMSO) 용매를 이용하여 상호 확산을 유도하여 Network Interconnection Interface (NII) 구조를 형성하였다.[15] 기존의 평면형 전극 계면에서는 압력 및 온도 자극에 의해 발생한 전하가 P(VDF-TrFE) 표면에서 수집되는 반면 NII 구조는 PEDOT:PSS가 P(VDF-TrFE) 내부로 침투하여 3차원 네트워크 계면이 형성된다(Fig. 5(a)).

NII 구조의 형성은 단면 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 확인하였다. P(VDF-TrFE)와 PEDOT:PSS 사이에는 평균 두께 8 ㎛ 두께의 NII 층이 형성되었으며 PEDOT:PSS 전극층의 두께는 약 3.3 ㎛로 측정되었다 (Fig. 5(b)). 불소 원소 분포는 NII 영역까지 연속적으로 이어져 있어 P(VDF-TrFE) 내부로 침투하였음을 확인하였다. 비행시간 이차이온 질량분석법(TOF-SIMS)에서는 SO_3 신호가 P(VDF-TrFE) 내부까지 분포하여 PEDOT:PSS가 P(VDF-TrFE) 내부로 침투하였음을 확인하였다(Fig. 5(c)). XRD 분석은 PEDOT:PSS가 P(VDF-TrFE) 내부로 침투하여 NII를 형성하는 과정에서 결정구조가 변화하는지를 확인하기 위해 수행되었다. P(VDF-TrFE)와 P(VDF-TrFE)/PEDOT:PSS 복합막의 XRD 패턴을 비교한 결과 두 시료 모두 2θ = 20.5°에서 β상의 (110)/(200) 결정면에 해당하는 회절 피크가 동일하게 관찰되었다. 새로운 회절피크의 생성이나 기존

β상 피크의 소멸 및 위치 이동은 나타나지 않았으며 PEDOT:PSS가 P(VDF-TrFE) 내부에 침투하여 NII를 형성하더라도 P(VDF-TrFE)의 β상 결정구조와 결정성이 유지됨을 의미한다. 또한 정전용량(capacitance) 분석은 NII 형성에 따른 유전 특성 변화를 확인하기 위해 수행되었다. P(VDF-TrFE)/PEDOT:PSS 복합막의 정전용량은 금속 전극을 사용한 P(VDF-TrFE)보다 높은 값을 나타냈으며 PEDOT:PSS 층의 두께가 증가할수록 정전용량도 증가하였다. 정전용량의 증가는 상대 유전율(ε_r)의 증가를 의미하며 전하 저장 및 수집 효율이 향상되었음을 확인하였다.

압전 및 초전 특성은 NII 형성에 따라 크게 향상되었다. 압전계수(d_{33})는 Cu・Ag・Au 전극 및 무전극 조건에서 20 pC/N 부근에 머물렀으나 PEDOT:PSS 전극은 86 pC/N으로 약 4배 증가하였다(Fig. 5(d)). 초전계수는 27 μ C m^{-2}K^{-1}에서 95 μ C m^{-2}K^{-1}로 약 3.5배 증가하였다(Fig. 5(e)). DMSO 농도를 변화시키며 두께를 제어한 결과 20 vol% DMSO에서 가장 높은 $|d_{33}|$= 86 pC/N를 나타냈으며 DMSO 농도가 25 vol% 이상으로 증가하면 계면 내부에서 전하 중화가 발생하여 $|d_{33}|$가 감소하였다. Phase-field simulation에서도 NII 두께가 증가할수록 압전계수와 초전계수가 동시에 증가하는 경향을 보여 실험 결과와 일치하였다.

P(VDF-TrFE)/PEDOT:PSS 복합막을 센서로 활용할 경우 0.025-100 kPa 범위에서 2.2 V/kPa의 압력 감도와 0.05-10 K 범위에서 6.4 V/K의 온도 감도를 나타냈다(Fig. 5(f,g)). 향상된 감도는 NII 형성으로 전극과 P(VDF-TrFE) 사이의 계면 접촉면적이 증가하고 전하 수집 효율이 향상되어 동일한 기계적 및 열적 자극에서도 더 높은 출력 전압이 생성한 결과이다. 또한 PEDOT:PSS 전극은 10,000회 반복 굽힘 후에도 전기적 특성의 변화가 거의 나타나지 않아 반복적인 기계적 변형 환경에서도 안정적인 전도 경로를 유지하며 우수한 기계적 신뢰성을 나타냈다.

NII 기반 계면 엔지니어링은 전극과 P(VDF-TrFE) 사이의 접촉면적을 증가시키고 유전율 및 전하 수집 효율

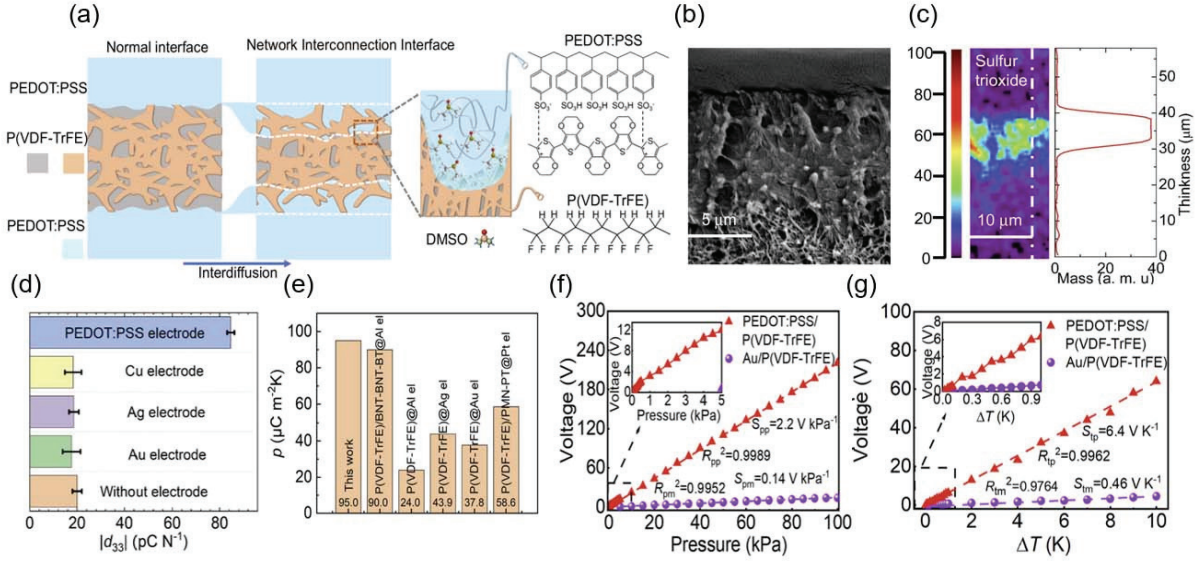


Fig. 5. (a) Schematic illustration of the Network Interconnection Interface (NII) formation. (b) Cross-sectional SEM image of the P(VDF-TrFE)/PEDOT:PSS interface. (c) Two-dimensional distribution of SO_3 in the interfacial components obtained by TOF SIMS. (d) Comparison of the piezoelectric coefficient ($|d_{33}|$) with different electrode materials. (e) Comparison of the pyroelectric coefficient of P(VDF-TrFE)-based devices. (f) Variation in the sensor output voltage with pressure. (g) Variation in the sensor output voltage with temperature. Reproduced from Li et al. Nat. Commun. 2023;14, under the terms of the CC BY 4.0 license.[15]

을 향상시켜 압전 및 초전 특성을 동시에 향상시키는 효과적인 성능 향상 전략임을 확인하였다.

4. 압전-초전 하이브리드 센서

4.1 고신축성 압전-초전 하이브리드 센서

압전 나노발전기(PENG)는 기계적 에너지를, 초전 나노 발전기(Pyroelectric nanogenerator, PyNG)는 온도 변화에 따른 열에너지를 각각 전기 에너지로 변환할 수 있다.[31,32] 그러나 기존 소자는 단일 에너지원을 기반으로 동작하기 때문에 실제 환경에서 동시에 발생하는 기계적 자극과 열 자극을 모두 활용하기 어렵고 출력도 각각의 발전 메커니즘에 의해 제한되는 한계가 있다.[33] 이를 대체하기 위해 높은 신축성과 유연성을 동시에 갖는 Highly stretchable piezoelectric-pyroelectric hybrid nanogenerator (HSNG) 구조를 제안하였다(Fig. 6(a)).[33] 이 구조는 필름의 이완 또는 압축과 가열을 동시에 적용하였을 때 압전 효과와 초전 효과에 의한 분극 변화가 같은 극성의 전위를 발생시키도록 설계하여 두 신호가 상쇄되지 않고 중첩됨으로써 출력이 향상되고 반복적인 변형 조건에서도 안정적인 출력 특성을 유지하도록 하였다.

HSNG는 압전 및 초전 활성층으로 7 ㎛ 두께의 P(VDF-TrFE) 박막을 사용하였고 하부 전극은 Polydimethylsiloxane-carbon nanotube composite (PDMS-CNT) 복합체, 상부 전극은 그래핀으로 구성하였다. P(VDF-TrFE) 박막은 140°C에서 2시간 열처리를 통해 β상을 형성하였으며 PDMS-CNT는 우수한 신축성과 전기전도성을 동시에 가져 반복적인 인장 변형에서

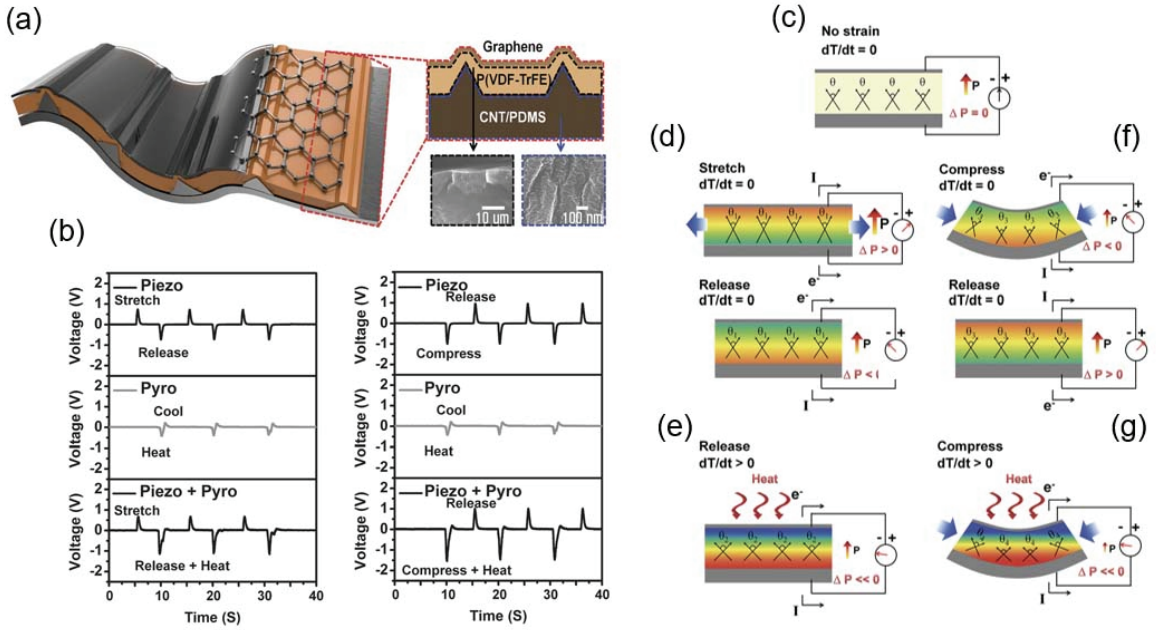


Fig. 6. (a) Schematic illustration of the highly stretchable piezoelectric-pyroelectric hybrid nanogenerator (HSNG). (b) Output voltages under piezoelectric, pyroelectric, and hybrid operating modes. (c) No electrical signal under zero strain and constant temperature conditions. (d) Electrical signal generated by the piezoelectric effect during stretching and releasing. (e) Electrical signal generated under simultaneous release and heating, arising from dipole reorientation toward the equilibrium position. (f) Electrical signal generated during compression and releasing. (g) Enhanced electrical signal generated under simultaneous compression and heating. Reproduced from Lee et al. Adv. Mater. 2014;26:765-769, with permission of John Wiley and Sons.[33]

도 안정적인 전극 역할을 수행하도록 설계하였다.

그래핀은 약 4840–5300 W/m·K에 달하는 매우 높은 열전도도를 가져 외부 열을 P(VDF–TrFE)층으로 빠르게 전달함으로써 초전 응답을 향상시켰다. PDMS–CNT를 마이크로 라인 패턴으로 제작하여 반복적인 인장 변형에서도 높은 신축성과 구조적 안정성을 유지하도록 설계하였다. 압전 효과와 초전 효과는 모두 분극의 변화를 통해 전기적 출력을 생성하며 하이브리드 구조에서 두 효과가 동시에 작용하여 전체 분극 변화를 증가시킨다(Fig. 6(c–g)).

$$\Delta P = dX + p\Delta T$$

여기서 d는 압전계수, X는 인가된 기계적 응력, p는 초전계수, ΔT는 온도 변화이다. 기계적 응력과 온도 변화에 의해 각각 압전 분극과 초전 분극이 발생하며, 두 분극 변화가 동일한 극성으로 형성될 경우 전체 분극 변화가 증가하여 출력이 향상된다. 신장–이완과 가열–냉각, 압축–이완과 가열–냉각 조건에서 압전 신호와 초전 신호가 동일한 극성으로 중첩되도록 설계하였으며, 이를 통해 단일 에너지원을 이용한 경우보다 높은 출력을 구현하였다.

소자의 출력 특성을 평가하기 위해 압전 효과와 초전 효과를 각각 측정한 후 두 자극을 동시에 인가하였다. 신장–이완 조건에서 압전 출력은 약 0.7 V, 가열–냉각 조건에서는 초전 출력이 약 0.4 V를 나타냈다. 이후 기계적 자극과 열 자극을 동시에 인가한 경우 출력 전압은 1.1 V까지 증가하여 단일 압전 출력 대비 57 % 향상되었다. 압축–이완 조건에서는 압전 출력이 약 1.0 V, 초전 출력이 약 0.4 V로 나타났고 두 자극을 동시에 적용한 경우 최대 1.4 V의 출력 전압이 측정되었다(Fig. 6(b)). 이러한 결과는 압전 효과와 초전 효과가 동일한 극성으로 결합되어 분극 변화가 증가하였기 때문에 하나의 P(VDF–TrFE) 소자에서 기계적 에너지와 열에너지를 동시에 수확하여 출력 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보여준다.

신축성 또한 중요한 성능 지표로 평가하였다. 소자를 0–30 % 인장 조건에서 평가한 결과 모든 인장 조건에서 약 0.4 V의 안정적인 출력 전압을 유지하였다. 검증하기 위해 전산유체역학(CFD, FLUENT 6.3) 시뮬레이션을 수행한 결과 원래 상태의 P(VDF–TrFE) 필름은 325.28 K까지 가열된 후 308.15 K로 냉각되는데 6.72 s가 소요되었으며 30 % 인장된 필름은 327.57 K까지 가열된 후 308.15 K로 냉각되는데 8.47 s가 소요되어 실험 결과와 유사한 거동을 나타냈다. 또한 광학현미경 분석 결과 평면 구조는 10 %, 20 % 및 30 % 인장 조건에서 다양한 균열과 주름이 관찰된 반면 마이크로 라인 패턴 구조는 30 % 인장 조건에서도 균열이 발생하지 않았으며 소수의 주름만을 나타내 높은 균일성과 우수한 견고성을 유지하였다. 이러한 결과는 마이크로 라인 패턴 설계가 반복적인 기계적 변형에서도 구조적 안정성과 신축성을 효과적으로 유지할 수 있음을 보여주었으며 압전 및 초전 하이브리드 소자의 기계적 신뢰성을 향상시키는 효과적인 설계 전략임을 입증하였다.

4.2 열팽창 계수 차이를 이용한 열유도 압전–초전 결합형 나노발전기

압전 센서는 외부 압력이나 변형에 의해 발생하는 기계적 자극을 전기적 신호로 변환하며 초전 센서는 온도 변화에 따른 자발분극의 변화를 이용하여 열 자극을 감지한다.[23,26] 그러나 초전 나노발전기 압전 또는 마찰전기 나노발전기에 비해 출력 성능이 상대적으로 낮아 에너지 하베스팅 소자로서 실용적으로 활용되는 데 한계가 있다.[33–36]

이러한 한계를 극복하기 위해 압전 효과와 초전 효과를 동시에 활용하는 Piezoelectric–Pyroelectric Hybrid 구조를 제안하였다(Fig. 7(a)).[37] 이 구조는 압전 및 초전 특성을 동시에 갖는 P(VDF–TrFE)와 높은 열팽창계수를 갖는 PDMS를 마이크로패턴 형태로 설계하여 열팽창 계수의 차이를 활용해 압전–초전 하이브리드 시스템을 구현하였다. P(VDF–TrFE)의 열팽창계수는 $122 \times 10^{-6}\ K^{-1}$, PDMS의 열팽창계수는 $310 \times 10^{-6}\ K^{-1}$로 약 2.5배 차이를 나타내고 있다. 온도가 상승하면 PDMS가 P(VDF–TrFE)보다 크게 팽창하여 P(VDF–TrFE)에

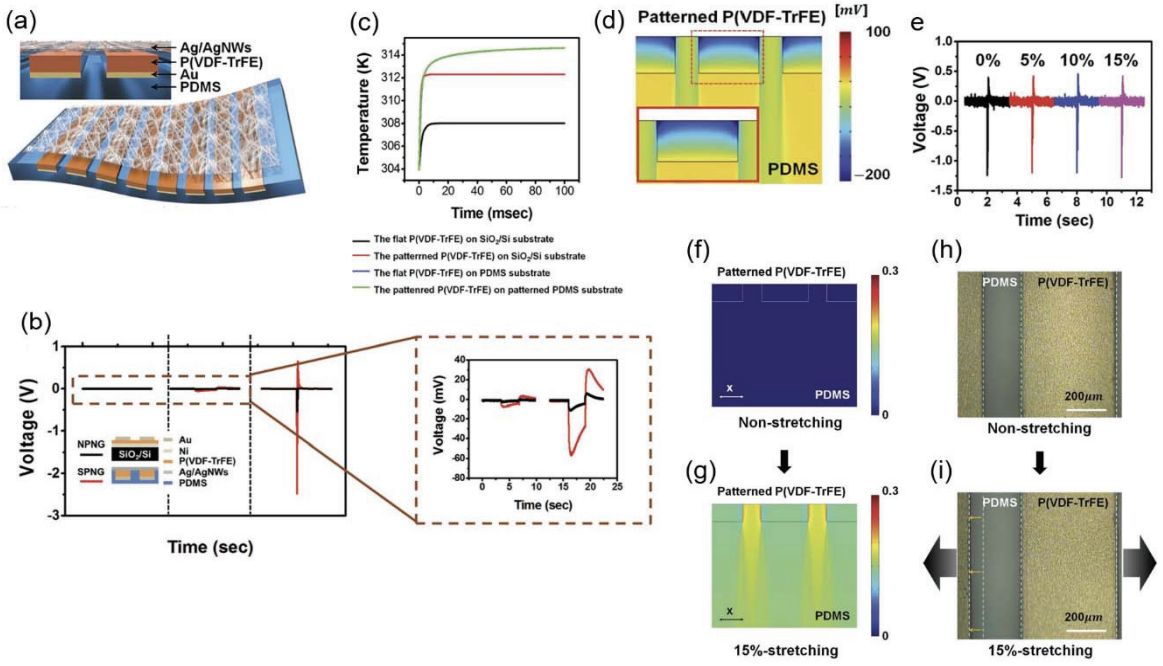


Fig. 7. (a) Schematic image of the Stretchable pyroelectric nanogenerator (SPNG). (b) Measured output voltages of the SPNG and normal pyroelectric nanogenerator (NPNG) under different heating and cooling rates. The inset shows structure of the SPNG and NPNG. (c) Temperature distributions of P(VDF–TrFE) on each device under the same heating condition as a function of time. (d) Piezoelectric potential distribution of the patterned P(VDF–TrFE) on a PDMS substrate. (e) Output voltage with a lateral stretch ratio of between 0% and 15%. (f) x–direction mechanical expansion strain distribution simulated by COMSOL multiphysics software in the initial state. (g) x–direction mechanical expansion strain distribution simulated by COMSOL multiphysics software at 15% stretched condition. (h) Optical microscopy (OM) image of the SPNG surface in the initial condition. (i) OM image of the SPNG surface after 15% stretching. Reproduced from Lee et al. Adv. Energy Mater. 2015;5:1500704, with permission of John Wiley and Sons.[37]

압축응력을 발생시키고 압전 분극을 유도한다. 동시에 온도 변화는 P(VDF–TrFE)의 자발분극을 변화시켜 초전 분극을 생성한다. 압전 분극과 초전 분극은 동일한 방향으로 형성되어 서로 보강되며 전체 자발분극 변화량(ΔP)을 증가시킨다. 증가한 자발분극 변화량은 전극에 유도되는 전하량을 증가시키고, 결과적으로 출력전압은 약 8 mV에서 2.48 V까지 나타나 압전–초전 결합이 없는 일반 초전 발전기의 약 2 mV에서 0.54 V 범위보다 4–5배 향상된 전기적 출력 특성을 나타낸다. 출력 향상 메커니즘은 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션을 이용하여 분석했다. 평면 P(VDF–TrFE)/SiO_2/Si, 패턴 P(VDF–TrFE)/SiO_2/Si, 평면 P(VDF–TrFE)/PDMS 및 패턴 P(VDF–TrFE)/PDMS의 네 가지 구조를 비교한 결과, PDMS의 열전도도는 0.15 W m^{-1} K^{-1}로 SiO_2의 1.5 W $m^{-1}K^{-1}$ 및 Si의 149 W m^{-1} K^{-1}보다 낮아 PDMS 기판 구조에서 열이 방출되지 못하고 P(VDF–TrFE)에 더 오래 유지되었으며 마이크로패턴 구조는 표면적 증가에 의해 평균 온도를 더 높게 유지하였다(Fig. 7(c)). 이에 따라 동일한 가열 조건에서 평면 P(VDF–TrFE)/SiO_2/Si 구조의 온도가 가장 낮았던 반면, 패턴 P(VDF–TrFE)/PDMS 구조에서 가장 높은 온도를 나타냈다. 또한 PDMS의 열팽창계수는 310 × 10^{-6} K^{-1}로 P(VDF–TrFE)의 열팽창계수 122 × 10^{-6} K^{-1}보다 약 2.5배 높아 가열 시 PDMS의 팽창에 의해 P(VDF–TrFE)에 압축응력이 집중되었고 패턴 P(VDF–TrFE)/PDMS 구조에서 가장 높은 압전 전위가 형성되었다(Fig. 7(d)). 생성된 압전 전위는 초전 전위와

중첩되어 전체 전위 분포를 증가시켰다. 열팽창계수 차이와 마이크로패턴 구조가 압전 및 초전 결합 효과를 극대화하는 주요 요인임을 확인하였다.

시뮬레이션 결과는 출력 특성 측정을 통해 검증하였다. 온도 변화량이 0.64 K인 조건에서 하이브리드 구조의 출력전압은 약 8 mV, 평면형 구조는 약 2 mV를 나타내어 약 4배 높은 출력 특성을 보였다. 온도 변화량을 18.5 K까지 증가시킨 조건에서는 하이브리드 구조가 2.48 V, 평면형 구조가 0.54 V를 나타나 약 4.6배 향상된 출력 특성을 보였다(Fig. 7b). 작은 온도 변화에서부터 큰 온도 변화에 이르는 넓은 범위에서 하이브리드 구조가 평면형 구조 대비 일관되게 향상된 열 자극 감도를 나타냄을 의미한다.

기계적 안정성은 인장 조건에서 평가하였다. 0–15 %의 인장 변형에서도 출력 전압은 약 1.2 V를 유지하였으며 Ag/AgNW 전극의 저항 변화도 거의 나타나지 않았다(Fig. 7(e)). 변형률 해석에서는 인장 변형이 P(VDF–TrFE)가 아닌 PDMS에 집중되었으며(Fig. 7(f,g)) 광학현미경 분석에서는 PDMS 패턴의 폭은 200 ㎛에서 약 230 ㎛로 증가한 반면, P(VDF–TrFE)의 폭은 약 500 ㎛로 거의 유지되었다(Fig. 7(h,i)). 자체적으로 신축성을 갖지 않는 P(VDF–TrFE)가 높은 열팽창계수를 갖는 PDMS와 마이크로패턴 구조로 결합됨으로써 인장 변형이 PDMS에 선택적으로 집중되고 P(VDF–TrFE)는 변형으로부터 보호되어 전체 소자 수준의 신축성이 구현되었음을 의미한다. 이러한 결과는 반복적인 기계적 변형에서도 센서의 출력 특성을 안정적으로 유지할 수 있음을 확인하였고 유연 촉각센서에 적용하기 위한 기계적 신뢰성을 확보하였다.

4.3 P(VDF–TrFE) 나노와이어 배열 기반 유연 압전·초전 하이브리드 나노발전기

P(VDF–TrFE) 나노구조는 벌크 필름에 비해 높은 종횡비와 큰 비표면적을 가지므로 동일한 외력이 가해지더라도 나노와이어 내부에 상대적으로 더 큰 변형률이 유발되어 작은 기계적 변형에도 높은 민감도를 나타내며 에너지 하베스팅에 유리하게 작용한다.[38] 기존 P(VDF–TrFE) 나노 구조는 주로 전기방사 공정을 통해 제작되었으나 약 10 kV의 높은 구동 전압이 필요하고 생산성이 낮다는 한계가 있다.[39] 이를 개선하기 위해 Anodic aluminum oxide (AAO) 나노 템플릿을 이용한 나노임프린팅 공정을 통해 P(VDF–TrFE) 나노와이어 배열을 제작하고 이를 압전·초전 하이브리드 나노발전기에 적용하였다.[39]

소자는 하부 전극인 Au/폴리이미드, 압전·초전 활성층인 P(VDF–TrFE) 나노 와이어 어레이, 상부 전극은 PEDOT:PSS 전도성 고분자의 3층 구조로 구성되며 나노와이어 형성 후 50 MVm^{-1}의 전기장을 인가하여 나노와이어의 높이 방향을 따라 분자 쌍극자를 정렬하였다.

제작된 P(VDF–TrFE) 나노와이어의 결정 특성을 분석하기 위해 XRD, FT–IR 및 DSC 분석을 수행하였다. XRD 분석에서는 (110)/(200) 면에 해당하는 19.9°에서 회절 피크가 확인되었으며, FT–IR 스펙트럼에서 850, 1288, 1400 cm^{-1}의 특성 흡수 밴드가 확인되어 강유전성 β상의 형성이 입증되었다. DSC 분석을 통해 108°C에서 강유전–상유전 상전이, 152°C에서 용융 거동이 확인되었으며 결정화도($\Delta X_c = \Delta H_m / \Delta H_0$)는 약 58.3 %로 나타났다. AAO 나노채널 내부에서 형성된 나노공간 효과가 라멜라 결정의 배향성 성장을 유도하여 높은 β상 결정성과 우수한 결정화를 가능하게 하였다고 분석하였다.

압전 특성을 평가하기 위해 소자를 주기적으로 굽힘과 이완을 반복한 결과 최대 4.0 V의 출력 전압과 65 nA의 출력 전류가 측정되었다. 전극 극성을 반대로 연결했을 때 출력 신호의 극성이 반전되는 것을 확인하여 측정된 신호가 잡음이 아닌 실제 압전 효과에 의해 발생하였음을 확인하였다. 굽힘 속도를 3–46 mm/s로 증가시킬수록 출력 전류가 증가하였으며, 굽힘 변위를 0.4–10 mm로 증가시키자 내부 압전 전위가 커짐에 따라 출력 전류도 함께 증가하여 변위 10 mm 및 평균 속도 34 mm/s 조건에서 출력 전압 4.0 V, 출력 전류 65 nA의 최대값을 나타냈다. 이는 빠른 굽힘 동작 시 전하가 외부 회로로 흘러나가는 속도보다 축적 속도가 상대적으로 빨라지기 때문이다. 초전 특성은 적외선 레이저를 이용하여 298 K에서 306 K까지(ΔT = 8 K)의 주기적인 온도 변화를 인가하여 평가하였다. 온도가 상승할 때 최대 3.4 V의

양의 출력 전압이 발생하였으며 냉각 과정에서는 약 3.0 V의 음의 출력 전압이 측정되었다. 또한 적외선 조사 시 안정적인 초전 출력이 확인되었으며, 출력 전압은 90 ms 이내에 최대값에 도달하여 빠른 응답 특성을 나타냈다. 평균 초전 출력은 3.4 V와 52 nA였으며 온도차를 0.8-8 K로 변화시켰을 때 출력 전류는 4.9 nA에서 55 nA까지 선형적으로 증가하였다. 10-100 MΩ의 외부 부하저항 조건에서 순간 출력 전력을 측정한 결과 41.2 MΩ에서 최대 순간 전력밀도 151.6 nW cm^{-2}를 나타냈다.

마지막으로 압전 효과와 초전 효과를 동시에 이용한 하이브리드 출력 특성을 평가하였다. 굽힘만 인가한 경우에는 최대 3.0 V의 압전 출력이 발생하였으며, 적외선만 조사한 경우에는 최대 1.2 V의 초전 출력이 확인되었다. 두 자극을 동시에 인가한 결과 최대 5.0 V의 출력 전압이 얻어졌으며 단일 압전 또는 초전 출력보다 향상된 출력을 나타냈다. 이러한 출력 향상이 압전 효과와 초전 효과가 동시에 작용하여 전기적 출력이 중첩되었기 때문이며 굽힘 과정에서 발생한 열에 의한 추가적인 변형 또한 출력 증가에 영향을 미칠 수 있다고 분석하였다. 연구는 AAO 나노기공에 의한 배향 결정 구조와 압축성이 우수한 나노 구조를 활용하여 하나의 P(VDF-TrFE) 나노 와이어 소자로 기계적·열적 에너지를 동시에 수확할 수 있으며 출력 성능을 향상시키는 효과적인 구조임을 보여주었다.

5. P(VDF-TrFE) 기반 압전 및 초전 센서의 응용

5.1 P(VDF-TrFE) 기반 신축성 접촉 및 비접촉 온도 센서

전자피부(e-skin)는 사람의 피부와 유사하게 압력, 변형, 온도 등의 다양한 자극을 감지할 수 있어 웨어러블 전자기기와 로봇 촉각 시스템에 활용되고 있다.[40-42] 그러나 기존의 신축성 전자피부는 압력 센서 연구에 집중되어 있었으며 신축성을 유지하면서 접촉 및 비접촉 온도를 동시에 측정할 수 있는 온도 센서는 상대적으로 연구가 부족하였다. 또한 금속 전극은 높은 전기전도도를 갖지만 적외선 흡수율이 낮아 비접촉 온도 감지에 한계가 있었다.[43] 해결하기 위해 P(VDF-TrFE)의 초전 특성과 PEDOT:PSS의 적외선 흡수 특성을 결합한 신축성 온도 센서를 제안하였다.[43]

소자는 PDMS 기판(350 ㎛) 위에 P(VDF-TrFE)(3 ㎛)를 두 전극 사이에 샌드위치 구조로 배치한 형태로 하부 전극은 금(100 ㎚)으로 코팅된 알루미늄 서펜타인 배선(50 ㎛)을, 상부 전극은 P(VDF-TrFE)와 전기적 호환성이 우수한 전도성 고분자 PEDOT:PSS를 사용하였다(Fig. 8(a)). 서펜타인 형태의 알루미늄 배선은 자체적으로 70 % 이상의 신축성을, 불소계 계면활성체를 첨가한 PEDOT:PSS 제형은 최대 40 %의 신축성을 확보하였다. 두 전극을 강성의 원형 아일랜드 구조 위에 배치하고 그 사이를 신축 가능한 배선으로 연결하는 아일랜드 구조를 적용하여 실제 활성 영역인 P(VDF-TrFE)에는 변형이 가해지지 않도록 설계하였다.

제작된 소자는 분극 여부에 따라 서로 다른 두 가지 온도 감지 모드를 구분하여 제시했다. 분극 처리 이전의 P(VDF-TrFE)는 내부 쌍극자가 무작위로 분포되어 있어 압전 및 초전 특성이 발현되지 않지만 강유전 고분자 특유의 유전율 변화는 나타나므로 정전용량의 온도 의존성을 이용한 절대온도 측정이 가능하였다. 분극 처리를 수행하지 않은 소자는 60°C 이하에서 평균 7.45 pF/°C의 감도를 나타냈으며(Fig. 8(b)), 35 % 인장 변형률까지도 감도가 거의 변하지 않아 신축 조건에서도 안정적인 온도 센서로 기능할 수 있음을 보였다. 반면 700 V_{PP}, 0.5 Hz, 10주기의 사인파 전압으로 분극 처리 공정을 수행한 이후에는 분극이 정렬되어 초전 특성이 발현되었고 정전용량 감도는 1.6 pF/°C로 낮아지는 대신 7°C의 온도 변화에 대해 200 mV의 초전 출력 전압이 발생하였다. 또한 가열 과정에서는 양(+)의 출력이 냉각 과정에서는 음(-)의 출력이 발생하여 초전 효과의 특성을 명확하게 확인하였다(Fig. 8(c)).

비접촉 온도 감지를 위해 830 nm LED를 이용하여 10초 간 적외선을 조사한 결과 분극 처리를 수행하지 않은 소자에서는 출력 변화가 거의 나타나지 않았지만 분극 처리된 소자에서는 LED 조사 직후 13 mV의 초전 출력이

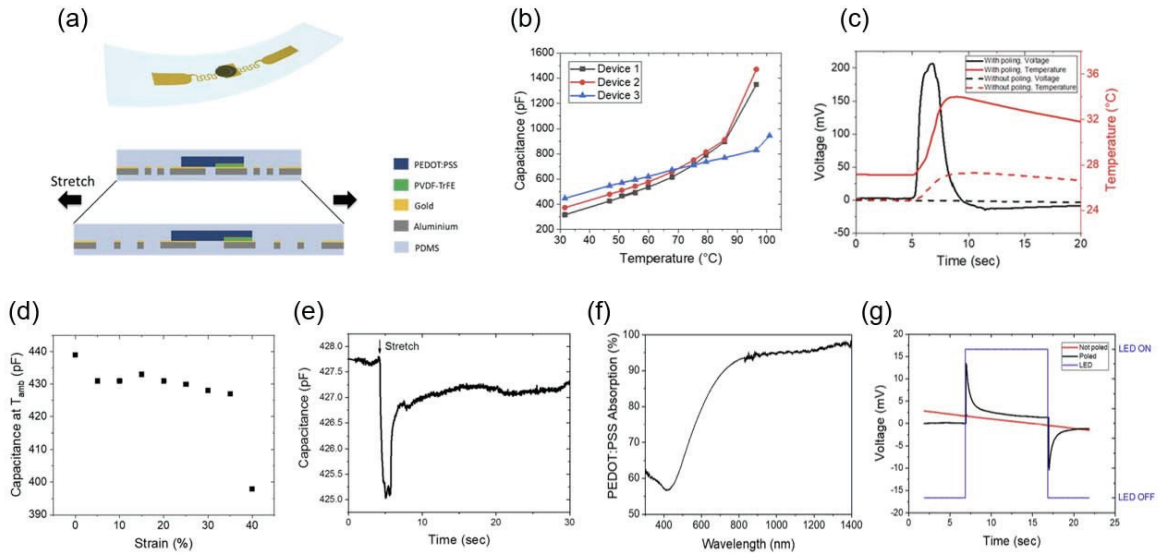


Fig. 8. (a) Schematic illustration of the device structure. (b) Contact temperature sensing characteristics of the non-poled sensor. (c) Pyroelectric response of the poled sensor under temperature variation. (d,e) Stretchability evaluation under tensile deformation. (f) Infrared absorption spectrum of the PEDOT:PSS top electrode. (g) Non-contact temperature sensing performance under 830 nm infrared illumination. Reproduced from Marchiori et al. Sensors 2020;20:623, under the terms of the CC BY 4.0 license.[43]

발생하였고 소등 시 −12 mV의 뚜렷한 피크가 나타났다(Fig. 8(g)). 이 값은 유사한 에너지 조건에서 보고된 기존 유연 소자 대비 약 10배 높은 응답으로 제시되었다. PEDOT:PSS는 약 400 nm에서 55 %의 흡수율을 나타냈으며, 근적외선 영역으로 갈수록 흡수율이 증가하여 800 nm에서는 약 90 %, 1300 nm에서는 약 97 %에 도달하였다(Fig. 8(f)). 높은 적외선 흡수 특성으로 인해 조사된 적외선을 효과적으로 열에너지로 변환하여 국부적인 온도 변화를 유도하고 생성된 온도 변화가 P(VDF−TrFE)의 초전 효과를 통해 전기적 신호로 변환되었다.

마지막으로 신축성 특성을 평가하기 위해 소자를 최대 35 %까지 인장한 상태에서 온도 응답을 측정하였다. 35 % 인장 조건에서도 정전용량 기반 온도 감지 특성은 초기 상태와 거의 동일하게 유지되었으며 0–35 % 인장 조건에서도 정전용량 변화는 약 3 %에 불과하였다(Fig. 8(d)). 반면 40 % 이상에서는 PEDOT:PSS 전극이 파단되면서 신호 측정이 어려워졌다. 또한 25 %에서 35 %로 인장하는 과정에서 약 3 pF의 일시적인 정전용량 감소가 발생하였으나 변형이 종료된 후에는 약 0.8 pF만 감소하여 온도 오차로 환산하면 0.1°C 이하로 나타났다(Fig. 8(e)). 이러한 결과는 제안한 구조가 기계적 변형에 의한 영향을 최소화하면서 접촉 및 비접촉 온도 감지를 안정적으로 구현할 수 있음을 보여주며, 신축성 전자피부를 위한 효과적인 온도 센서 구조임을 입증하였다.

5.2 P(VDF−TrFE) 기반 로봇 손의 제스처 및 물체 온도 인식 시스템

로봇 촉각 시스템은 물체를 안정적으로 파지하기 위해 기계적 변형뿐 아니라 물체의 온도 정보까지 동시에 인식할 수 있어야 한다.[17,44] 그러나 기존의 유연 센서는 압력 또는 변형과 같은 단일 자극을 감지하는 연구가 대부분이었으며 변형과 온도를 동시에 측정할 수 있는 멀티모달 센서는 상대적으로 연구가 부족하였다. 또한 저항 기반 센서는 변형과 온도 변화에 모두 반응하므로 두 자극이

동시에 인가될 경우 신호를 정확하게 구분하기 어려운 한계가 있었다.[17,44] 해결하기 위해 나노그래핀(Nanographene, NG)과 P(VDF-TrFE)를 결합한 다기능 센서를 개발하고 로봇 손이 물체를 파지하는 동안 변형과 온도를 동시에 감지할 수 있는 무선 센싱-피드백 제어 시스템을 구현하였다.[45]

제작한 센서는 PET 기판(0.125 mm) 위에 Ag 하부전극(100 nm), P(VDF-TrFE)(약 12 ㎛), Ag 상부 전극(100 nm) 및 NG(약 1 nm)를 적층한 구조로 제작하였다. P(VDF-TrFE)는 135°C에서 4 h 열처리한 후 3 kV에서 5 min 코로나 분극으로 α→β 상전이를 유도해 압전 및 초전 특성을 부여하였다. NG는 아일랜드 형태로 존재하는 준연속 박막으로서 아일랜드 사이의 전하가 터널링 효과를 통해 이동하는 구조로 형성되었다. 소자의 성능은 변형과 온도에 대해 각각 평가하였다. NG 센서는 strain에 대해 게이지 계수(Gauge factor, GF) 약 26.72와 R^2=0.981의 높은 선형성을 나타냈으며, 약 0.7 s의 빠른 응답 시간과 1000회 반복 변형 후에도 $\Delta R/R_0$의 변화가 거의 일정하게 유지되어 안정적인 저항 변화를 유지하였다. 온도에서는 약 −0.44 %/°C의 온도계수와 R^2=0.999의 강한 선형성을 나타냈으며, 약 7 s의 응답시간과 100회 반복 온도 사이클에서도 우수한 안정성을 확인하였다. P(VDF-TrFE) 센서는 변형에 대해 13.83 $V/\%^{-1}$의 감도와 R^2=0.994를 나타냈으며 약 0.43 s의 응답시간을 나타냈다. 굽힘 시 양(+)의 전압, 하중 제거 시 음(−)의 전압이 발생하여 우수한 가역성을 보였다. 또한 온도에 대해서는 0.49 $V°C^{-1}$의 감도와 R^2=0.991, 약 0.2 s의 응답시간을 나타냈다. 이러한 결과는 NG와 P(VDF-TrFE)가 서로 다른 센싱 메커니즘을 기반으로 변형과 온도 정보를 동시에 제공할 수 있음을 보여준다.

마지막으로 NG-P(VDF-TrFE) 센서를 로봇 손의 손가락과 관절에 부착하여 손가락이 완전히 굽혀졌는지($\Delta R/R_0 > 1.0$) 또는 펴져 있는지($\Delta R/R_0 < 3.0$)을 기준으로 "GOOD", "HI", "LOVE", "OK", "VICTORY" 등의 제스처를 성공적으로 인식하였다. 서로 다른 굽힘 각도에 대해 뚜렷이 구분되는 변형 신호 수준을 확인하였으며 뜨거운 물과 차가운 물이 담긴 컵을 로봇 손으로 파지하는 실험에서 두 조건에 대해 명확히 구분되는 전압 응답을 얻어 하나의 소자로 파지 동작 중 변형과 온도 변화를 함께 감지할 수 있음을 입증하였다. NG-P(VDF-TrFE) 센서가 차세대 지능형 로봇 촉각 시스템에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

5.3 P(VDF-TrFE)/TFT 기반 다기능 전자피부 및 촉각 시각화

전자피부(e-skin)는 사람의 피부와 유사하게 압력, 미끄럼, 온도 등 다양한 촉각 정보를 동시에 감지할 뿐 아니라 접촉한 물체의 위치와 형태까지 인식할 수 있어야 한다.[46] 그러나 기존의 전자피부는 압력, 온도 또는 변형과 같은 단일 자극 감지에 집중되어 있었으며 여러 자극을 동시에 감지하면서 물체의 형상과 질감을 시각적으로 복원할 수 있는 시스템은 제한적이었다.[46] 특히 압전 기반 센서는 동적 자극만, 정전용량 기반 센서는 정적 자극만 감지할 수 있어 사람 피부와 같은 복합 촉각 기능을 구현하는 데 한계가 있다.[47] 이 연구는 P(VDF-TrFE), 박막 트랜지스터(Thin-film transistor, TFT), poly(L-lactide) (PLLA)를 적층한 시각화 촉각 감지 전자피부(Visualized tactile sensing electronic skin, VTSES)을 개발하여 동적 압력, 정적 압력, 미끄럼 및 온도를 동시에 감지하고 접촉 물체의 형태를 고해상도로 시각화하였다.[48]

제작한 소자는 P(VDF-TrFE)/PI(20 ㎛), PLLA/PI(20 ㎛)를 수직으로 적층한 구조로 구성하였다. P(VDF-TrFE)는 70°C에서 건조 후 140°C에서 1시간 어닐링을 거쳐 결정성을 향상시킨 후 in-situ 분극 처리로 압전 및 초전 특성을 부여하였다. PLLA도 140°C에서 1시간 어닐링 후 Ag 전극을 증착하여 전단 방향의 압전 응답을 구현하였다. TFT는 저온 다결정 실리콘 공정을 이용하여 제작하였고 P(VDF-TrFE)를 유전체로 이용하는 능동형 정전용량 센서와 결합하였다. 이러한 적층 구조를 통해 P(VDF-TrFE)는 수직 방향(d_{33})의 동적 압력과 온도를 감지하고 PLLA는 전단 방향(d_{14})의 미끄럼을 감지하며 TFT는 정적 압력을 측정하는 역할을 한다.

VTSES의 센싱 성능을 동적 압력, 미끄럼, 온도 및 정적 압력에 대해 각각 평가하였다. P(VDF-TrFE)의 평균 압전 계수(d_{33}) 25.24 pC/N이 측정되었고 XRD와 DSC 분석을 통해 β상 결정이 우세하게 형성되어 우수한 압전 특성을 확인하였다. 압축-이완 동작에서는 서로 반대 방향의 두 전압 피크가 나타났으며 10 %에서 90 %까지 도달하는 응답 시간은 0.64 ms로 빠른 응답 특성을 보였다. 0.2 N-2.0 N의 압력 증가에 따라 출력 전압이 선형적으로 증가하여 압력의 크기를 정량적으로 구분할 수 있었다. 또한 PLLA 층은 70 mm/s의 미끄럼 속도에서 전극을 따라 발생하는 압전 신호를 이용하여 미끄럼의 방향과 속도를 정확하게 검출하였다. 온도는 P(VDF-TrFE)의 초전 효과를 이용하였으며 1 W, 808 nm 레이저로 10초 주기 가열 시 온도가 60.1°C까지 상승하면서 −1.72 mV의 초전 출력이 발생하고 냉각 시에는 +1.70 mV의 반대 극성 신호가 발생하였다. 이 소자는 약 130°C의 퀴리 온도까지 안정적인 초전 응답을 유지할 수 있음이 확인되었다.

TFT와 결합한 능동형 센서 어레이는 40 × 40 mm 영역에 800 × 800 pixels의 고해상도 센서 어레이를 구현하여 접촉한 물체의 위치와 형상을 시각적으로 복원하였다. 정적 압력에 의해 발생한 정전용량 변화를 TFT가 증폭하여 0-0.5 N 범위의 압력을 0-100 nA의 전류 변화로 검출하였고 고무 큐브, 사슴 형상 및 매미 날개의 형상과 질감을 높은 해상도로 재현하였다. 특히 고무 큐브는 실제 길이 11.98 mm를 11.59 mm로 복원하여 ±0.32 mm 이하의 오차를 나타냈다. 이 결과는 제안한 VTSES가 동적 압력, 정적 압력, 미끄럼 및 온도를 동시에 감지할 뿐 아니라 접촉 물체의 형상까지 정확하게 시각화 할 수 있어 차세대 지능형 전자피부와 인간-기계 인터페이스에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

5.4 P(VDF-TrFE) 기반 다중감각 전자피부를 이용한 비파괴 연성 물체 인식

로봇 촉각 시스템은 물체를 안정적으로 파지하기 위해 압력과 변형 정보를 동시에 이용하여 물체의 부드러움을 판단할 수 있어야 한다.[4,49] 그러나 기존의 단일 센서는 동적 압력 또는 정적 변형만 측정할 수 있어 연성 물체의 부드러움을 정확하게 인식하는데 한계가 있다.[19] 이와 유사하게 최근에는 접촉대전 특성 차이를 이용해 강성 판별과 재질 식별을 동시에 구현한 멀티모달 촉각센서도 보고되었다.[50] 해결하기 위해 PDMS 필름과 금 전극(150 nm), P(VDF-TrFE)(35 ㎛) 활성층을 순서대로 수직 적층하여 상하 대칭 구조로 제작한 P(VDF-TrFE) 압전 센서와 Ecoflex 기판 위에 EGaIn 액체금속 배선을 패터닝하고 그 위에 Ecoflex 봉지층을 형성하여 전체 두께 0.3 mm로 제작한 액체금속(Liquid metal, LM) 변형 센서를 결합한 생체모사형 멀티모달 전자피부를 개발하고 로봇 손을 이용한 비파괴 연성 물체 인식 시스템을 구현하였다.[19] 동적 자극에 반응하는 급속적응수용체(Meissner corpuscle)의 기능을 P(VDF-TrFE) 압전층이, 정적 자극에 반응하는 완속적응수용체(Merkel disc, Ruffini ending)의 기능을 LM 변형 센서가 각각 모사하도록 설계하였다(Fig. 9(a)).

P(VDF-TrFE)는 120°C에서 2 h 열처리한 후 60 MV m^{-1}의 전기장에서 30 min 동안 분극 처리 압전 특성을 부여하였고 양면에 150 nm 두께의 Au 전극을 증착한 뒤 PDMS로 캡슐화하여 유연한 압전 센서를 제작하였다. 액체금속 strain 센서는 Ecoflex 기판 위에 갈륨-인듐 공융합금(EGaIn)을 사행 형태로 패터닝하여 제작하였으며 큰 변형에서도 안정적인 저항 변화를 유지하도록 설계하였다.

소자의 성능은 압전 센서와 strain 센서를 각각 평가하였다. P(VDF-TrFE) 압전 센서는 1.25-5 kPa 범위에서 60 mV/kPa 감도를 나타냈으며(Fig. 9(b)) 최소 검출 압력 100 Pa, 최대 검출한계 12 kPa, 응답시간 12 ms의 성능을 나타냈다(Fig. 9(c)). 100회의 굽힘 사이클과 14일간의 반복 측정에서도 안정적인 출력 특성을 유지하여 우수한 기계적 내구성을 확인하였다. 액체금속 strain 센서는 0-100 % 변형률에서 GF_1 = 2.82, 100-300 %에서 GF_2 = 5.37, 300-500 %에서는 GF_3 = 8.38로 변형률 구간에 따라 게이지율이 단계적으로 증가하는 비선형 거동을 보였다.

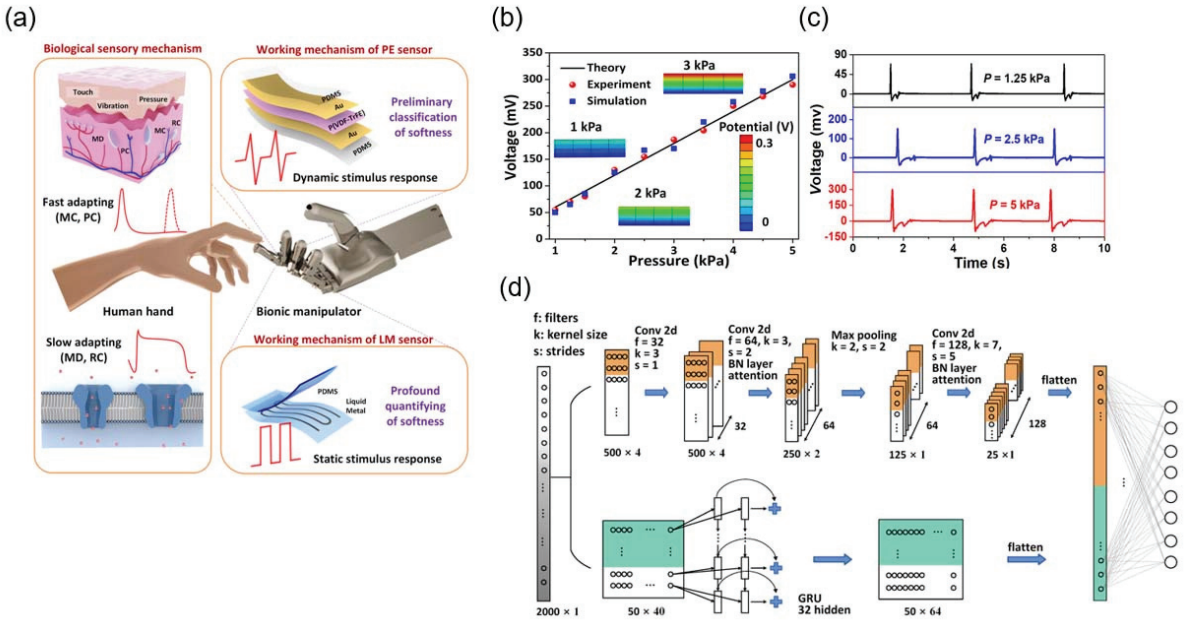


Fig. 9. (a) Biomimetic multimodal electronic skin based on human tactile receptors and its sensing mechanism. (b) Linear pressure response of the P(VDF-TrFE) piezoelectric sensor. (c) Dynamic voltage responses under different applied pressures. (d) GRU-CNN architecture for softness classification. Reproduced from Qiu et al. npj Flex. Electron. 2022;6:45, under the terms of the CC BY 4.0 license.[19]

두 센서를 결합한 멀티모달 시스템은 압전 신호를 이용하여 접촉 순간의 동적 정보를 먼저 획득하고 이후 strain 신호를 이용하여 물체의 변형량을 측정함으로써 부드러움을 정량적으로 평가하였다. 연성 식별은 두 단계로 구성해서 진행했다. 압전 신호의 순간 펄스 패턴을 이용해 8종의 표준 시료를 Convolutional neural network (CNN) 및 Gate recurrent unit-convolutional neural network (GRU-CNN) 기반 딥러닝으로 분류하였는데 단순 CNN은 94.27 %, 시공간적 특징을 함께 학습하는 GRU-CNN은 98.95 %의 분류 정확도를 나타냈다(Fig. 9(d)). 이렇게 사전 분류된 연성 등급(A-D)에 따라 로봇 손이 물체별로 적절한 접촉력을 결정한 뒤 두 번째 단계에서 LM 변형 센서로 측정한 시료의 변형량과 손가락 끝 PDMS 피부의 힘-변위 곡선을 접촉역학 이론에 대입하여 탄성계수를 정량적으로 산출하였다.

이러한 다중 감각 피드백의 효용은 파지 실험을 통해 입증되었다. 스펀지, Ecoflex, PDMS, 목재 등 30 kPa – 10 MPa 범위의 다양한 강성을 갖는 물체를 안정적으로 구분하였으며 두부와 토마토를 손상 없이 파지하는데 성공하였다. 또한 신선한 오렌지와 부패한 오렌지를 구분해 분류하는 지능형 선별 작업을 수행함으로써 개발된 P(VDF-TrFE) 기반 멀티모달 전자피부가 비파괴 연성 물체 인식과 차세대 지능형 로봇 촉각 시스템에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여주었다.

6. 결론

본 리뷰 논문에서는 로봇 촉각 시스템에 적용 가능한 자가발전형 촉각 센서 소재로서 P(VDF-TrFE)의 압전 및 초전 특성과 이를 활용한 성능 향상 전략, 하이브리드 나노발전기, 실제 응용에 대해 살펴보았다. P(VDF-TrFE)는 무기 압전 재료에 비해 우수한 유연성과 생체적합성을 가져 반복적인 접촉과 변형이 가해지는 로봇 촉각 센서에 적합한 소재로 결정성 및 계면 제어를 통해 압전 및 초전

특성을 수 배 향상시킬 수 있음이 여러 연구에서 확인되었다. 특히 압전과 초전을 동일한 극성으로 결합한 하이브리드 구조는 단일 에너지원 기반 소자보다 향상된 출력 특성을 나타냈다. 이를 기반으로 온도 센싱, 제스처 인식, 촉각 시각화, 연성 물체 판별 등 다양한 지능형 로봇 촉각 응용으로 확장되었다. 그러나 압전-초전 하이브리드 구조들은 가열-냉각 사이클의 반복, 재료 간 열팽창 계수 차이, 적외선 조사와 같이 외부 열원이나 간접적인 방식으로 온도 자극을 발생시키고 있어 소자 자체적으로 온도 자극을 능동적으로 제어하기 어렵다는 한계를 갖는다.[51]

이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 서펜타인 형태의 금속 마이크로히터 또는 AgNW/PEDOT:PSS 기반 투명 마이크로히터를 압전-초전 활성층 하부에 별도의 전극층 형태로 직접 집적하는 구조를 고려할 수 있다. 특히 AgNW/PEDOT:PSS 복합 전극은 낮은 면저항과 우수한 신축 안정성을 가져 반복적인 변형이 가해지는 로봇 촉각 센서 환경에서도 안정적인 줄히팅 기반 발열원으로 활용될 수 있다. 이러한 구조에서는 외부 열원 없이 마이크로히터에 인가되는 전류만으로 활성층에 국소적인 열 자극을 발생시킬 수 있으며 히터의 패턴 형상 및 배치를 조절함으로써 열 자극이 인가되는 위치와 범위를 소자 설계 단계에서 선택적으로 제어할 수 있다. 이와 같은 마이크로히터 통합형 압전-초전 하이브리드 센서는 외부 열원에 의존하지 않는 능동적 온도 자극 제어 기능을 통해 차세대 로봇 촉각 시스템 구현에 기여할 것으로 기대된다.

향후에는 이와 같은 P(VDF-TrFE)의 재료 및 구조 최적화와 함께 압전·초전 하이브리드 센서의 집적화 및 고성능화를 통해 압력, 변형, 온도, 미끄럼, 열 전달율 등 다양한 자극을 동시에 인식할 수 있는 고성능 로봇 촉각 시스템으로의 발전이 기대된다.[52] 인간과 유사한 촉각 인지 능력을 갖춘 차세대 지능형 로봇 구현뿐만 아니라 웨어러블 헬스케어, 인간-기계 인터페이스 및 소프트 로보틱스 분야의 발전에도 중요한 기반 기술이 될 것으로 기대된다.

그러나 이러한 성과를 실제 로봇 산업 현장에 적용하기 위해서는 아직 해결되지 않은 과제들이 있다. 지금까지 보고된 압전-초전 하이브리드 촉각 센서 연구들은 정적 또는 준정적인 가압-이완 조건에서 성능을 검증하는데 그쳤고 반복 내구성 평가도 제한된 범위에서만 이루어졌다. Reduced graphene oxide (rGO)/Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)를 도핑한 P(VDF-TrFE) 전기방사 나노섬유 압력 센서를 20 Hz, 25 kPa 조건에서 10,000 사이클 반복 가압-이완을 시험한 사례가 있으나,[53] 이는 실제 로봇 그리퍼가 물체를 파지 및 해제하는 과정에서 요구되는 수십만 회 규모의 반복 동작에는 크게 못 미치는 수준이다. 장시간 반복 변형에 따른 활성층의 미세 균열, 전극-활성층 계면 박리, 분극 특성 열화가 실제 사용 환경에서 센서 성능에 어떤 영향을 미치는지도 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 결국 이 기술이 실험실 단계를 넘어서려면 수십만 회 규모의 장기 구동 신뢰성 평가와 반복 사용이 성능에 어떤 영향을 주는지 파악하는 연구가 필요하다.

제작 방식에서도 지금까지 다룬 P(VDF-TrFE) 촉각 센서들은 대부분 소면적 실험실 시료 수준을 벗어나지 못했고 대면적 연속 공정을 통한 대량 생산 가능성은 검증된 바가 없다. P(VDF-TrFE) 압전층을 종이 기재에 내장한 뒤에 롤투롤 인쇄 공정만으로 500 m 길이의 웹을 연속 제작하고 90 % 이상의 수율을 달성한 연구가 보고된 바 있다.[54] 촉각 센서에 직접 적용된 사례는 아니지만 이런 대면적 연속 공정 기술이 향후 P(VDF-TrFE) 기반 촉각 센서 제작에도 적용될 수 있을 것으로 보인다.

실제 로봇 구동 환경에서 모터나 구동 회로에서 발생하는 전자기 노이즈도 고려해야 할 문제다. 노이즈가 압전-초전 신호의 정확한 측정을 방해할 수 있기 때문에 차폐 대책이 함께 고려되어야 한다. 최근 스크린 프린팅 기반 유연 압전 촉각 센서 어레이에 유연 EMI 차폐 구조를 직접 통합해 감도 저하를 25 % 수준으로 억제하면서도 10 kHz까지의 측정 노이즈를 효과적으로 걸러낸 연구가 보고되었다.[55] 이러한 접근은 P(VDF-TrFE) 기반 로봇 촉각 센서를 실제로 쓸 수 있게 만드는 노이즈 차폐 전략으로도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2026년도 중앙대학교 연구장학기금 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

1. Z. Zhao, W. Li, Y. Li, et al., Nat. Mach. Intell., **7**(6), 889-900 (2025). https://doi.org/10.1038/s42256-025-01053-3
2. J. Xi, H. Yang, X. Li, et al., Nanomaterials, **14**(5), 465 (2024). https://doi.org/10.3390/nano14050465
3. J. Xu, J. Pan, T. Cui, et al., Sensors, **23**(4), 1868 (2023). https://doi.org/10.3390/s23041868
4. D. Mostaghniyazdi and S. E. Nodehi, Electronics, **14**(21), 4290 (2025). https://doi.org/10.3390/electronics14214290
5. H. Oh, G.-C. Yi, M. Yip, et al., Sci. Adv., **6**(46), eabd7795 (2020). https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7795
6. J. Jin, S. Wang, Z. Zhang, et al., Soft Sci., **3**(1), 8 (2023). https://doi.org/10.20517/ss.2022.34
7. W.-L. Xin, H.-Q. Cai, X. Cui, et al., Adv. Sci., **13**(7), e19604 (2026). https://doi.org/10.1002/advs.202519604
8. C. Ge, L. He, Y. Sun, et al., Sens. Actuators, A, **406**, 117921 (2026). https://doi.org/10.1016/j.sna.2026.117921
9. S. Z. Liu, W. T. Guo, X. H. Zhao, et al., Soft Sci., **5**(2),14 (2025). https://doi.org/10.20517/ss.2024.65
10. B.l Khan, U. Amara, B. Khan, et al., Adv. Sci., **12**(41), e07853 (2025). https://doi.org/10.1002/advs.202507853
11. J. Tang, Y. Li, Y. Yu, et al., Sensors, **25**(3), 964 (2025). https://doi.org/10.3390/s25030964
12. F. X. Qi, L. Xu, Y. He, et al., Cryst. Res. Technol., **58**(10), 2300119 (2023). https://doi.org/10.1002/crat.202300119
13. L. C. Cheng, S. Brahma, J. L. Huang, et al., Mater. Sci. Semicond. Process., **146**, 106703 (2022). https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106703
14. Y. D. Hu, C. Y. Tang, S. J. Li, et al., Nat. Commun., **16**(1), 11147 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-67292-5
15. B. Li, C. Cai, Y. Liu, et al., Nat. Commun., **14**(1), 4000 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-39476-4
16. Z. Yu, F. Gao, X. He, et al., Sensors, **23**(4), 2136 (2023). https://doi.org/10.3390/s23042136
17. H. Zeng, W. Li, J. Wang, et al., Nat. Commun., **16**(1), 10771 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-65815-8
18. T. Zhang, Z. Wen, Y. Liu, et al., iScience, **23**(12), 101813 (2020). https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101813
19. Y. Qiu, S. Sun, X. Wang, et al., npj Flex. Electron., **6**(1), 45 (2022). https://doi.org/10.1038/s41528-022-00181-9
20. M. A. Mangi, H. Elahi, A. Ali, et al., Sens. Actuators Rep., **9**, 100302 (2025). https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100302
21. N. A. Kamel, Biophys. Rev., **14**(3), 717-733 (2022). https://doi.org/10.1007/s12551-022-00969-z
22. M. Zhu, Q. Liu, W.-Y. Wong, et al., Adv. Mater., **37**(48), 2419970 (2025). https://doi.org/10.1002/adma.202419970
23. H. Park, G. S. Gbadam, S. Niu, et al., Int. J. Extreme Manuf., **7**(1), 012006 (2025). https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad88be
24. N. Prajesh, V. Kushwaha, D. R. Naphade, et al., ACS Appl. Energy Mater., **8**(7), 4648-4655 (2025). https://doi.org/10.1021/acsaem.5c00269
25. N. Ahbab, S. Naz, T. B. Xu, et al., Micromachines, **16**(4), 386 (2025). https://doi.org/10.3390/mi16040386
26. Y. E. Shin, S. D. Sohn, H. Han, et al., Nano Energy, **72**, 104671 (2020). https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104671
27. G. Velarde, S. Pandya, J. Karthik, et al., APL Mater., **9**(1), 010702 (2021). https://doi.org/10.1063/5.0035735
28. H. M. A. Yaseen and S. Park, Nanomaterials, **14**(22), 1777 (2024). https://doi.org/10.3390/nano14221777
29. J. Tian, AIP Adv., **13**(5), 050701 (2023). https://doi.org/10.1063/5.0146279
30. L. Muthusamy, M. H. Prio, M. S. E. H. Raju, et al., J. Electron. Mater., **55**, 4996-5003 (2026). https://doi.org/10.1007/s11664-026-12791-4
31. Z. W. Yang, L. W. Zhang and Y. F. Huang, Chem. Commun., **61**(16), 3399-3402 (2025). https://doi.org/10.1039/d4cc06080f
32. Y. Liu, S. Wang, Z. Gao, et al., Materials, **19**(13), 2823 (2026). https://doi.org/10.3390/ma19132823
33. J. H. Lee, K. Y. Lee, M. K. Gupta, et al., Adv.

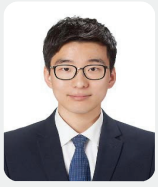
Mater., **26**(5), 765-769 (2014). https://doi.org/10.1002/adma.201303570
34. S. Z. Hussain, V. P. Singh, M. S. B. Sadeque, et al., Small, **21**(43), 2504626 (2025). https://doi.org/10.1002/smll.202504626
35. P. Manchi and H. J. Yoon, Trans. Electr. Electron. Mater., **27**(1), 90-99 (2026). https://doi.org/10.1007/s42341-025-00689-7
36. P. Manchi and H. J. Yoon, Sensors, **26**(4), 1166 (2026). https://doi.org/10.3390/s26041166
37. J.-H. Lee, H. Ryu, T.-Y. Kim, et al., Adv. Energy Mater., **5**(18), 1500704 (2015). https://doi.org/10.1002/aenm.201500704
38. W. Zhu, G. Rui, Y. Chen, et al., J. Appl. Phys., **137**(19), 194102 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0267697
39. X. Chen, J. Shao, X. Li, et al., IEEE Trans. Nanotechnol., **15**(2), 295-302 (2016). https://doi.org/10.1109/TNANO.2016.2522187
40. M. Cai, Z. Jiao, S. Nie, et al., Sci. Adv., **7**(52), eabl8313 (2021). https://doi.org/10.1126/sciadv.abl8313
41. J. Ji, H. Luo, J. Su, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., **122**(41), e2519693122 (2025). https://doi.org/10.1073/pnas.2519693122
42. H. Lim, J. Choi, C. Han, et al., npj Flex. Electron., **10**(1), 34 (2026). https://doi.org/10.1038/s41528-026-00538-4
43. B. Marchiori, S. Regal, Y. Arango, et al., Sensors, **20**(3), 623 (2020). https://doi.org/10.3390/s20030623
44. L. Xu, F. Zhao, X. Zhou, et al., Nanotechnol. Precis. Eng., **8**(1), 013001 (2025). https://doi.org/10.1063/10.0028828
45. L. Wu, S. Xiao, C. Li, et al., IEEE Robot. Autom. Lett., **10**(6), 6304-6311 (2025). https://doi.org/10.1109/LRA.2025.3566597
46. T. Xu, W. Wang, X. Bian, et al., Sci. Rep., **5**, 12997 (2015). https://doi.org/10.1038/srep12997
47. F. He, S. Chen, R. Zhou, et al., Nano-Micro Lett., **17**(1), 16 (2025). https://doi.org/10.1007/s40820-024-01532-z
48. X. Wang, X. Ling, Y. Hu, et al., Chem. Eng. J., **434**, 134735 (2022). https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134735
49. S. Lee, J. Jang and W. Park, Sens. Actuators Rep., **9**, 100289 (2025). https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100289
50. Y. Li, B. Pang, Z. Wang, et al., Nano Energy, **141**, 111127 (2025). https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111127
51. F. Gao, W. Li, X. Wang, et al., Nano Energy, **22**, 19-26 (2016). https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.02.011
52. S. Ding, F. Xu, J. Chen, et al., Prog. Mater. Sci., **162**, 101733 (2026). https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2026.101733
53. A. Ahmed, N. A. Khoso, M. F. Arain, et al., Polymers, **16**(13), 1781 (2024). https://doi.org/10.3390/polym16131781
54. G. C. Schmidt, P. M. Panicker, X. Qiu, et al., Adv. Mater., **33**(8), 2006437 (2021). https://doi.org/10.1002/adma.202006437
55. J. Faudou, M. Benwadih, A. Gabas, et al., Adv. Eng. Mater., **28**(4), e202502361 (2026). https://doi.org/10.1002/adem.202502361

임효진



- 2026년 중앙대학교 학사
- 2026년~현재 중앙대학교 석박사 통합과정생

류한준



- 2019년 성균관대학교 박사
- 2022년 Northwestern University 박사후 연구원
- 2022년 중앙대학교 조교수
- 2026년~현재 중앙대학교 부교수