

고분자를 활용한 유/무기 복합 열전소재의 특성 평가

Evaluation of Characteristics of Polymer-based Organic/Inorganic Hybrid Thermoelectric Materials

김인호 · 정용진 | In Ho Kim · Yong Jin Jeong

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation,
50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju 27469, Korea
E-mail: yjjeong@ut.ac.kr

1. 서론

21세기 인류에게 있어 가장 중요한 주제 중 하나는 지속 가능한 에너지원 문제이다. 여전히 석탄, 석유, 천연가스 등 화석 연료가 에너지의 주요 원천이며, 전통적인 에너지 자원의 과도한 소비는 많은 환경 문제를 일으키고 있다. 또한 산업 공정, 가정 난방, 자동차 배기를 포함하여 세계적으로 상당한 양의 열 에너지가 낭비되고 있어, 이러한 폐열을 줄이거나 재활용하여 에너지 효율성을 증가시켜야 탄소 배출을 저감하고 인위적인 기후변화의 영향을 억제할 수 있을 것이다. 한 가지 방법으로는, 폐열을 회수하여 유용한 형태로 변환하는 열전기장치의 구현을 통해 현재 에너지원의 효율성을 향상시킬 수 있다.¹ 열전소재를 이용하여 제작하는 열전 발전기(thermoelectric generator, TEG)는 이동 부품이 없으므로 유지 관리 비용을 줄일 수 있으며, 장수명을 가지고 배출물을 생산하지 않는다는 장점이 있어 폐열 회수에 대한 실용적인 옵션이다. 이렇듯, Seebeck 효과를 통해 전기 에너지와 열 에너지 사이 간 에너지 변환을 실현할 수 있는 열전 소재(thermoelectric materials)는 지난 몇 십년간, 무기물 기반의 반도체소재인 Bi_2Te_3 , PbTe , Cu_2Se 및 SnSe 등이 고성능 열전 특성으로 연구 개발되었으며 나노구조화 및 band engineering을 통해 상당한 열전 효율 향상이 이루어졌다.²⁻⁴ 다만, 무기물 기반 열전소재 공정의 복잡성과 높은 비용은 열전 소재의 광범위한 응용을 여전히 제한하고 있다. 최근에는 고분자 및 유기소재가 저밀도, 풍부한 자원, 쉬운 합성, 조절 가능한 분자 구조 및 우수한 유연성과 같은 뛰어난 특성으로 인해 에너지 분야의 응용 가능성에 관하여 많은 관심을 받고 있다.⁵ 특히 고분자 반도체는 일반적으로 $0.1\text{--}0.5\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 범위 내의 내재적으로 낮은 열전도도와 조절 가능한 전기전도도로 인해 열전소재 분야에 유망한 소재이다. 단, 기존 자동차, 우주항공 등의 폐열 회수의 경우에는 수백도 정도의 온도에서 주로 작동되어야 하는데, 유기소재의 경우 대부분 고온에 취약하기 때문에 전통적인 분야 보다는 차세대 전자제품에 응용할 수 있도록 연구개발되고 있다.

예를 들어, 웨어러블 전자 제품의 급격한 성장으로 인해 착용 가능한 기기를 지속적으로 구동하기 위해 주기적으로 충전하고 교체해야하는 배터리를 대체 혹은 보완할 수 있는 기술이 필요하다.^{6,7} 이 때, 인체와 환경 사이의 온도 차이에서 전기를 생성할 수 있는 유연한 TEG는 이 문제를 해결할 가능성이 높으며, 고분자 열전

Author



김인호

2017-2022 한국교통대학교
에너지소재공학전공 (학사)
2023-현재 한국교통대학교 신소재공학과 (석사)



정용진

2008-2012 포항공과대학교 화학공학과 (학사)
2012-2017 포항공과대학교 화학공학과 (박사)
2017-2018 한양대학교 산업과학연구소 (Post-Doc.)
2018-2019 University of Minnesota (Post-Doc.)
2019-현재 한국교통대학교 에너지소재공학전공
조교수, 부교수

소재의 용액공정 구현 가능성 및 유연 특성은 유연한 TEG를 구성하기 위한 최적의 소재 후보군이다. 본 고에서는 이러한 고분자를 활용하여 제작할 수 있는 열전소재 샘플에 대한 소개, 제작 방법, 분석 방법 등을 소개한다.

2. 본론

2.1 고분자 및 유/무기 복합 열전소재

열전소재로서 연구된 대표적인 고분자는 poly(3,4-ethylene-dioxythiophene) (PEDOT), polyaniline(PANI), polypyrrole (PPy), poly(3-hexylthiophene) (P3HT), 그리고 다양한 신규 구조의 donor-acceptor(D-A) 고분자 등이 있다. 이 중 PEDOT는 높은 전기전도도, 안정성, 유연성, 상업적 가용성 등의 이점으로 인해 열전소재 응용 분야에서 가장 유망한 후보 중 하나이다.^{8,9} 일반적으로 poly(styrenesulfonate) (PSS)와 혼합하여 균일하게 분산된 고분자 복합체 PEDOT:PSS를 형성하여 수용액에서 처리할 수 있으며 Roll-to-roll 기술, 스크린프린팅, 3D프린팅 등과 같은 신규 용액공정법과 접목하여 대규모 열전소재 필름 생산이 가능할 것으로 예상된다. PEDOT:PSS를 활용한 열전 소재의 성능을 최적화하는 효과적인 방법으로는 PEDOT의 도핑 레벨을 다른 후처리 방법을 통해 조절하고, PEDOT 기반 나노복합재료를 설계하는 전략이 있다. PEDOT:PSS의 경우 고분자 후보군 중에 매우 높은 전기전도도를 가지나, 고유의 낮은 Seebeck 계수(약 $12\text{--}18\text{ }\mu\text{V}\text{K}^{-1}$)는 power factor의 성능 향상을 방해하는 주요 병목 구간이 된다. 열전소재 성능은 보통 Seebeck 계수(S), 전기전도도(σ), 열전도도(κ), 절대 온도(T)로 계산되는 재료의 무차원 열전 성능지수(dimensionless thermoelectric figure of merit) ZT value를 통해 평가되는데, σ , S 및 κ 의 결합 관계로 인해, 하나의 매개변수를 개별적으로 조절하기 어렵고, 다른 매개변수에 영향을 미치게 되므로 하나의 유기 소재 후보군 보다는 여러 소재를 하이브리드화 한 유기/무기 복합 열전소재가 개발되었다.¹⁰ 이는 유기 재료와 무기 구성 요소 각각의 강점을 살릴 수 있는 방법으로 heterointerface 조절을 통한 energy filtering 효과를 얻을 수 있고 무기재료의 우수한 열전 성능과 유기재료의 공정 특성과 기계적 유연성을 활용할 수 있다.¹¹

다른 유기 물질에 비해 PEDOT:PSS 기반 복합체는 특별한 이점 가질 수 있는데, PEDOT:PSS의 수용액 처리 가능성으로 인해 다양한 제조 방법(용액 반응, layer-by-layer self-assembly, 물리적 혼합, 인쇄 등)이 가능하며, 복합체에서 높은 전기전도도를 유지할 수 있고, 합성 조건을 변화시켜 인터페이스 효과를 쉽게 제어할 수도 있다.¹¹ 따라서 PEDOT:PSS/무기나노결정 기반 복합체의 열전 응용에 관한 연구 개발이 많이 보고되었다.⁸ 무기나노결정은 결정성장, 미세

형태 및 특성에 따라 PEDOT:PSS와의 복합화 시 다른 성능을 가지며, 또한 샘플 제조 방법을 다양하게 할 수 있다. PEDOT:PSS/무기나노결정 기반 복합체의 경우에는 bulk 샘플과 박막 형태의 샘플 제작이 모두 가능하다. 핫 프레스링(hot-pressing) 공정은 흑연 또는 합금 주형에 배치된 분말 성형체를 가열하는 동안 압력을 가하여 bulk 샘플을 제작하는 방법으로, 고밀도의 고온 합금 및 세라믹을 제조하기 위해 분말 야금 초기에 개발 및 적용되었다. 최근에는 열전 나노복합체의 제조를 위해 핫 프레스링 공정을 활용하는 연구 결과가 보고되고 있는데, 고분자 매트릭스의 열가소성을 활용하여 핫 프레스링 공정을 통해 밀도가 높은 유기-무기 복합 재료를 대량생산할 수 있다.¹⁰ 예를 들어 PEDOT:PSS를 tellurium 전구체와 함께 용액에 넣고 용액 합성 한 후 얻은 PEDOT:PSS/Te 파우더를 핫 프레스링하여 bulk 열전샘플을 제작할 수 있다(그림 1).¹² SPS(spark plasma sintering)는 비교적 낮은 온도에서 빠른 압밀이 가능한 효율적인 소결 방법으로 열전복합재료 제조에 적합하다. 이러한 SPS 방법을 통해 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 PEDOT:PSS/ Cu_2SnSe_3 bulk 형태의 복합체 열전샘플을 제작한 결과가 보고되었다.¹³ 고분자 분말은 SPS 후 균질한 고분자 덩어리로 변형되며, 샘플은 냉간 압착을 사용하여 가공된 경우보다 훨씬 우수한 열전특성을 나타냈다. Bulk 제작뿐 아니라 PEDOT:PSS의 용액공정이 가능하다는 점은 유/무기 복합 열전소재를 용액화 하여 필름 형태의 샘플로 제작할 수 있다는 장점이 있다. 무기 열전소재는 고상합성법뿐 아니라 최근 나노구조화의 중요성으로 인해 용액합성법을 이용하거나 수열합성법 등과 같은 효과적인 합성방법으로도 나노구조 무기물 열전소재를 합성할 수 있다. 이 때, PEDOT:PSS 등 고분자와의 복합화를 통해 유기/무기 복합 열전소재 용액을 제작할 수 있고, 그 후 슬라이드 글라스나 진공여과지에 dropping 하고 건조하여 최종적으로 필름 형태의 유/무기 열전소재 샘플을 얻을 수 있다.

PEDOT:PSS 외에도 다양한 형태의 고분자 열전소재가 디자인되고 있다. 기존 P3HT 계열의 대표적인 고분자 반도체뿐 아니라 낮은 전기전도도를 극복하기 위한 D-A 타입의 다양한 고분자 반도체가 열전소재로 응용하기 위해 연구되고 있다.^{14,15} 이러한 고분자들의 경우 bulk 형태보다는 주로 박막 형태로 샘플을 제작할 수 있는데, 일반적으로 도펀트에 의한 분자 도핑을 진행하여 박막 소재의 전기전도도를 높이는 공정을 추가하여 진행한다. 분자 도핑의 경우 고분자반도체를 기판 위에 casting한 후 도펀트 용액에 dipping 하거나 도펀트 용액을 overcoating, 혹은 기상 공정을 통해 도펀트를 고분자 박막에 확산침투 시킴으로써 도핑과정을 진행할 수 있다. 다만 이러한 방법들은 이미 형성된 고분자 박막에 도핑을 시도하므로 박막의 두께에 따라 내부로의 확산침투가 충분하지 않아 충분하고 균일한 도핑이 어려울 수 있다는 단점을 가질

수 있다. 이를 개선하기 위해 고분자 용액 상에서 도펀트 용액과의 혼합화를 진행한 후 기판에 casting하는 방법이 고안되었다(그림 2).¹⁶ 이러한 방법으로 고분자 열전소재 샘플을 제작하기 위해서는 용액 간 miscibility와 용액 내 결정 aggregation 등 고분자 열전소재의 거동에 관한 in-depth study가 더 필요하다. 사실 고분자 기반 열전소재는 열전도율이 낮고 가벼우며 독성이 낮으며 유연하며 가공이 용이한 장점을 가지지만 ZT 값은 여전히 실용적인 응용이 어려울 정도로 작다. 따라서 도핑, 유기-무기 하이브리드화, 후처리 등의 많은 노력이 이루어지고 있고 응용처에 따른 bulk나 박막 형태를 최적화하는 전략을 통해 복합 소재의 ZT 값을 높이는 것을 최종 목표로 활발하게 연구개발되고 있다.

2.2 고분자 및 유/무기 복합 열전소재의 분석

에너지 변환 효율은 재료의 ZT value로 성능을 판단할 수 있고 ZT value와 변환 효율 간의 관계는 아래와 같다.⁶

$$\eta_{TE} = \eta_C \left[\frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + (T_{cold}/T_{hot})} \right] \quad (1)$$

여기서 η_C 는 Carnot efficiency로 $\eta_C = (T_{hot} - T_{cold})/T_{hot}$ 으로 계산할 수 있다.

ZT는 열전소재를 선택하고 최적화하는 데 중요하다. ZT는 $ZT = S^2\sigma T/\kappa$ 로 정의되며, 전력인자(power factor = $S^2\sigma$)는 특정 온도 차에서 재료의 발전 출력을 평가하는 데 사용된다.

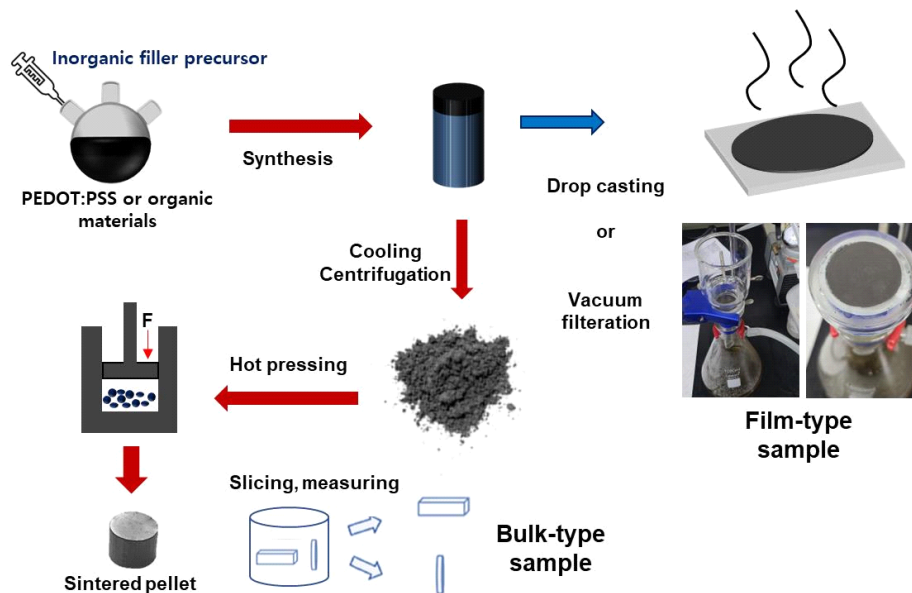


그림 1. PEDOT:PSS를 활용한 유/무기 열전소재 샘플 제작 방법. 빨간색 화살표는 bulk 소결체 제작 방법을 나타내고, 파란색 화살표는 필름 형태의 샘플을 얻는 방법을 나타낸다.

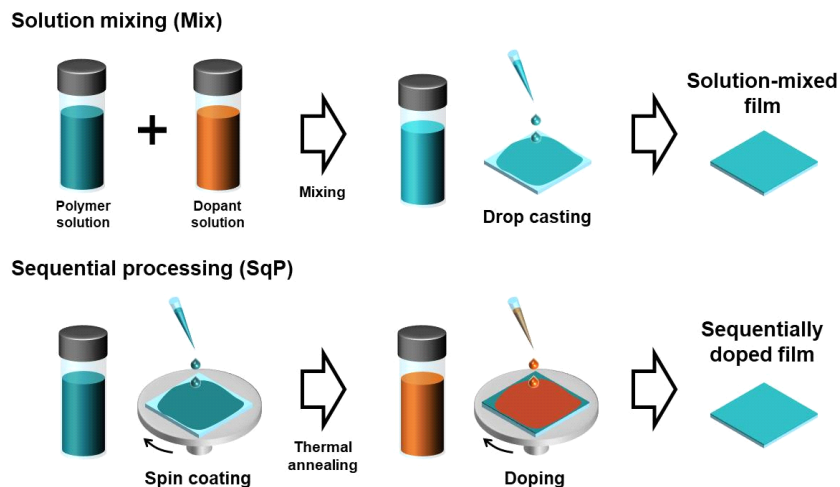


그림 2. D-A 고분자 샘플에 대한 두 가지 도핑 방법 모식도.¹⁶

ZT를 구성하는 세 가지 변수(σ , S 및 κ)는 상호간에 복잡한 관계를 가지고 있어 최대 ZT를 달성하기 위해 각각을 분리된 물성으로 고려할 수 없다. σ 와 S 는 일종의 trade-off 관계로, σ 는 전하를 운반하는 입자 수 밀도(n), 입자 이동성(μ) 및 electron charge(e)에 따라 결정된다. n 이 증가하면 σ 도 증가하지만, 이는 S 에 대해서는 아래 이론적 모델 방정식과 같이 반대의 영향을 미친다.⁵

$$S \sim \frac{8\pi^2 k_B^2}{3e h^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n} \right)^{2/3} \quad (2)$$

여기서 k_B 는 볼츠만 상수, h 는 플랑크 상수, m^* 은 캐리어의 유효 질량이다. 반면, 열전도도(κ)는 두 가지 기여(포논 열전도도, 전자 열전도도)의 합으로 정의되며, 전자 열전도도는 캐리어 농도가 높을수록 증가하고, 이는 열을 전달하기 위한 캐리어 수가 많아져 전체 열전도도를 증가시킨다. 이러한 복잡한 관계로 인해 ZT를 개선하기 위한 이상적인 해결책은 없으며 단지 trade-off 관계에서 power factor 값을 최적화 하도록 소재를 개발하거나 열전도도를 낮추기 위한 연구가 주로 진행되고 있다. 다만, 고분자 등 유기소재의 경우 열전도도가 태생적으로 금속기반 소재에 비해 낮으므로 유기소재는 앞서 언급한 분자 도핑과 같은 방법을 통해 전기전도 특성을 향상시키는 방향으로 연구가 집중된다.

Bulk 상태의 소결체 샘플의 경우 S 와 σ 를 동시에 측정하는 상용 기계가 많이 보급되어 있다.¹⁷ 상용 장비의 이점은 상수 조건 하에서 데이터 수집이 가능하도록 용이하다는 것이다. 표 1은 이러한 상용 장비 중 일부를 온도 범위와 기타 세부

표 1. 열전소재 샘플의 S , σ 측정을 위한 상용 장비 특성¹⁰

상용 장비	온도 범위	측정 환경
Linseis LZT-Meter	-150 °C ~ 500 °C or RT ~ 1500 °C	Inert, vacuum, oxidizing, reducing
MMR Technology	-200 °C ~ 450 °C	Air
ULVAC ZEM	-80 °C ~ 100 °C or RT ~ 1000 °C	Low pressure He

정보와 함께 보여준다. 각 장비마다 작동 원리는 대체로 비슷하지만 샘플 측정 시의 기하학 및 전기적 접촉과 관련하여 신뢰도는 장비마다 차이가 있어 연구자들은 현재까지도 측정 시스템, 기하학 및 관련 오류를 분석하고 연구 진행하고 있다.¹⁸ Seebeck 계수 S 는 전압차 ΔV 를 해당하는 온도차 ΔT 로 나누어 측정된다. 주로 일본의 ULVAC Technologies에서 제공하는 ZEM 시리즈는 매우 넓은 온도 범위에서 Seebeck 계수를 측정할 수 있고, 미국의 MMR Technologies에서 제공하는 SB-100 시스템은 sub-millimeter 규모의 작은 샘플에 적합하다. ZEM 시리즈에서 소개된 측정방법으로는 우선 직육면체 또는 원통형 샘플을 가열로의 상부와 하부 블록 사이에 수직으로 loading 한다(그림 3). 샘플은 특정 온도에서 가열 및 유지되는 동안, 하부 블록 내의 히터에 의해 가열되어 온도 구배를 준다. Seebeck 계수는 샘플 측면에 눌러 붙인 열전커플 외측의 상부 및 하부 온도 T_1 및 T_2 를 측정한 후, 열전기력 차이 dE 를 측정한다. 전기저항은 dc four-terminal method로 측정하는데, 시료 양단에 정전류 I 를 인가하여 열전대의 동일선간 전압강하 dV 를 측정하여 도선 사이의 열기전력을 빼서 구한다. 사실 Seebeck 계수는 열전

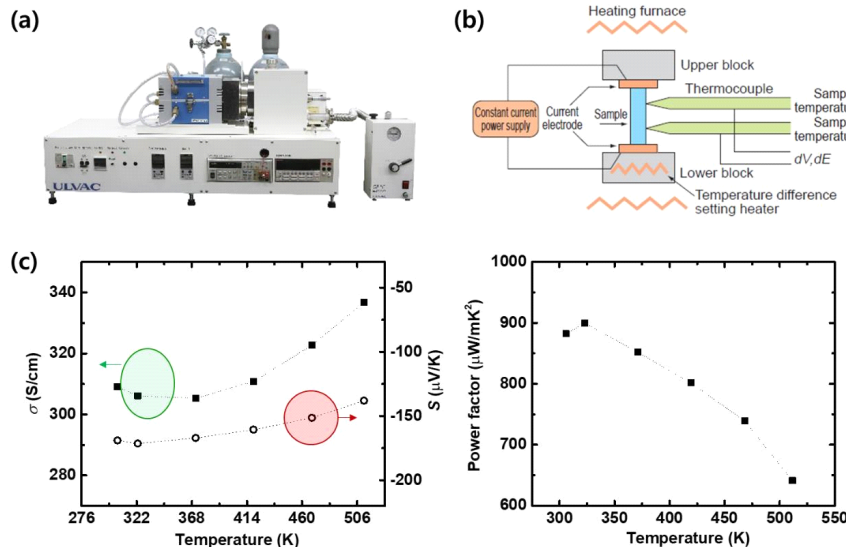


그림 3. (a) 상용 열전소재 측정장치 ZEM 시리즈, (b) ZEM 시리즈의 샘플 측정 방법 모식도, 상용 측정장치를 이용하여 측정한 온도에 따른 (c) σ , S , and (d) power factor 그래프(샘플: Sn-doped $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$).

효율의 기준으로 사용될 뿐 아니라 부호값을 통하여 반도체의 유형을 파악하는데 사용되기도 한다. 즉, Seebeck 계수가 음수이면 전자전달에 의한 효과로 소재가 n-type 반도체임을 나타내며 양수이면 정공전달에 의한 효과로 p-type 반도체임을 나타낸다.

고분자 열전소재의 경우, 펠렛 형태의 벌크 샘플 제작이 어려워 주로 박막 형태로 샘플을 제작하여 특성을 평가하고 있는데, 고분자 박막의 경우 보통 전도도가 낮고 측정 환경에 따라 박막의 구성이 변경되기 때문에 현재는 상용 장비의 활용 보다는 home-built equipment를 주로 활용하고 있다.¹⁹ 한 예로, 그림 4a와 같이 고분자 열전소재의 Seebeck 계수 측정 시스템으로 구성할 수 있는데, 두 개의 Peltier 유닛이 달린 샘플 홀더가 온도/습도 제어 오븐에 배치되어 있고 열전대는 샘플에 직접 접촉되도록 부착한 형태이다. 디지털 멀티미터를 사용하여 전극 쌍에 접촉하여 샘플의 ΔT 와 ΔV 를 동시에 측정하고 ΔV versus ΔT plot의 기울기 값을 통해 S 를 계산할 수 있다.²⁰

고분자 열전소재의 Seebeck 계수를 측정하는 또 다른 방법은, 고분자 박막 샘플 위에 웨도우 마스크를 통해 증발된 금속 전극을 제작하고 두 전극 사이에서 전압과 온도를 측정하는 것이다. 이렇게 컨택 전극을 증착하는 것은 고분자 열전소재 연구에 주로 사용되고 있는데, 대부분의 고분자 열전소재 샘플의 경우 간단한 부착으로는 열전대와 오믹 접촉을 형성하지 않기 때문이다. 고분자 박막의 에너지레벨을 고려하여 적절한 일함수를 가진 전극을 증착하여 금속 전극과 고분자 박막의 접촉저항을 최소화하여 고분자 박막의 열전 특성을 측정할 수 있다. 그러나 정확한 측정과 신뢰도를 높이기 위해서는 접촉 기하학을 고려하여 최적 측정 방법을 고안할 필요가 있다.²² 컨택 패드를 도입하는 한 가지 간단한 방법으로는 그림 4b와 같이 금속 전극의 증착 대신 silver paste를 부착하여 probe tip과의 컨택을 용이하게 한 후 Seebeck 계수를 측정할 수 있다.²¹ 전통적인 무기 기반 bulk 열전소재는 상용 분석 장치를 통해 전기전도도와 Seebeck 계수를 동시에 측정할 수 있는 반면, home-built equipment를 통해 Seebeck 계수를 측정하는 고분자 열전소재 박막의 경우

전기전도도를 따로 측정한다. 주로 고분자 박막과 측정 probe 간 접촉 저항의 영향을 배제하기 위해 four-probe 방법을 사용하여 전기전도도를 측정한다. Linear 및 van der Pauw 기하학은 얇은 전도성 고분자 필름에 적용된다.

Seebeck 계수와 전기전도도는 주로 charge carrier의 농도와 산란에 의존하고, 열전도도는 격자 진동에 의한 포논 열전도도(κ_L)가 주로 기여를 하지만, n 값이 큰 열전 반도체의 경우에는 charge carrier에 의한 열전도도(κ_E)의 기여도 무시할 수 없다.²³ 또한 운반자의 농도가 낮거나 고온의 intrinsic 영역에서는 thermal excitation에 의해 생성된 전자/정공 쌍이 모두 열전도에 참여하게 되므로, 이에 따른 양극성 전도(κ_{bi})가 열전도도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 열전 반도체의 열전도도는 일반적으로 $\kappa = \kappa_L + \kappa_E + \kappa_{bi}$ 로 나타낼 수 있다. 다만, 전하운반자가 한 종류인 외인성반도체에서는 κ_{bi} 를 고려할 필요가 없다. 열전도도는 $\kappa = DC_p d$ 관계로부터 계산될 수 있으며, 여기서 D , C_p 및 d 는 각각 열 확산율, 비열 및 부피 밀도이다. 열 전도도를 측정하는 표준 방법으로는 flash 분석법과 differential three-omega (3ω) methods 방법이 있는데,²⁴ 플래시 분석법은 수십 micrometer scale 이상의 농도가 높은 자유 구동 필름에서 적용되는 반면 differential 3ω 방법은 nanometer scale의 얇은 박막에서도 사용 가능하다.²⁵ 유기 열전소재는 막을 만들고 막의 in-plane 전기전도도, in-plane Seebeck 계수 및 through-plane 열전도도를 측정하여 특성화된다. 이는 용액 기반 공정에서 밀리미터 스케일의 밀도 높은 블록을 만드는 것이 어렵기 때문이다. 비열용량은 시차 주사 열량계를 통해 측정할 수 있으며 체적 밀도는 아르키메데스 방법으로 측정된다.

신뢰할 수 있는 κ , α , S 가 얻어지면 $ZT = S^2 \sigma T / \kappa$ 관계식을 이용하여 온도에 대한 ZT 값을 그래프로 나타낼 수 있다. 많은 연구자들이 고온(> 800 °C)에서 최적의 ZT 값을 보고하고 있다. 하지만 이는 세라믹 산화물이나 일부 금속화합물 기반 열전반도체에서 얻을 수 있는 값이며 상업적 용도로 응용하기에는 열전소재의 구성(전극, 연결 등)이 긴 시간 사용에 견딜 수 없으므로 구현하기 어려운 부분이 있다. 따라서 열전소재 연구개발 분야에서는 상용 작동에 가까운

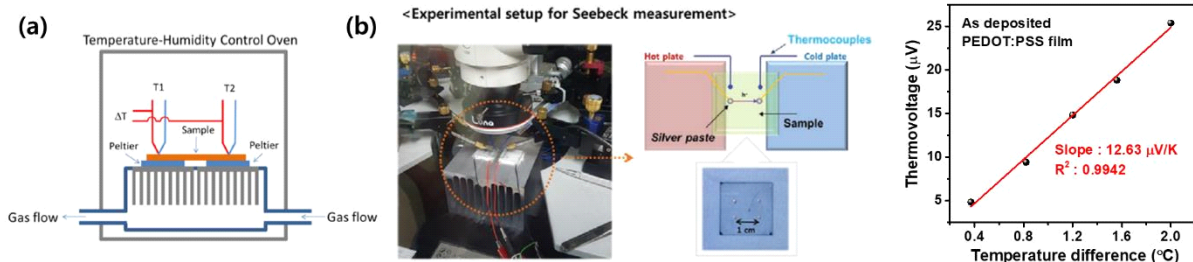


그림 4. (a) 온도, 습도 조절 가능한 home-built Seebeck 계수 측정 장치 모식도,²⁰ (b) 필름의 Seebeck 계수 측정 장치 모식도 및 샘플 측정 결과 그래프(thermoelectric voltage versus temperature difference).²¹

중간 온도(300~700 °C)에서 얻어지는 ZT 값을 주로 연구 개발 소재의 성능으로 고려한다. 환경에 안정적인 중간 온도에서 작동하는 경우 p-type 열전소재의 경우 $ZT = 1$ 이상, n-type 열전소재의 경우 $ZT = 0.5$ 정도가 충분할 수 있다고 알려져 있다. 물론 고분자 및 유기소재 기반의 열전소재의 경우에는 보다 저온에서 성능 지수를 평가한다. 박막 형태의 고분자 열전소재 샘플의 경우 박막 형성 중 선호되는 분자 방향성 때문에 전기전도도, Seebeck 계수 및 열전도도가 이방성일 수 있다. 따라서 고분자 및 유기 열전소재의 ZT 계산은 무기 열전소재보다 직관적이지 않을 수 있으며 크게 달라질 수 있다. 유기 열전소재의 열전 특성 평가의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 두 방향에서 각각의 매개변수를 측정하여 열전도성 고분자의 열 및 캐리어 전달 메커니즘을 이해하고 정확한 소재 성능 값을 파악하는 것이 필요하다.¹⁹

3. 결론

고분자 및 유/무기 복합 열전소재의 연구개발이 활발히 진행됨에 따라 고분자 활용 방법 별 열전소재 샘플의 제작 방법과 열전특성 분석에 관하여 살펴보았다. 고분자소재만 활용하는 경우 주로 박막 형태의 샘플을 제작하고 이에 기반한 prototype TEG 제품을 개발하고 있다. 반면, 고분자 및 무기물을 복합화하여 제작하는 열전소재는 필름형태와 bulk 형태 모두 제작이 가능하고, 따라서 사용처에 따라 형태를 조절할 수 있다. 고분자 열전소재의 Seebeck 계수 측정 방법에는 bulk 형태는 상용 장비로, 박막 형태는 home-built equipment를 활용하고 있다. 상용 장비의 경우 데이터 수집이 용이하나, 측정 시스템, 기하학 및 관련 오류를 분석하는 것이 중요하며, home-built equipment의 경우 박막 샘플 특성에 맞게 조정하여야 하며 아직 분석 시스템이 정립되지 않은 상황으로 자칫 overestimated되지 않도록 신뢰성을 확보하는 것에 특히 중점을 두어야 할 것이다. 결론적으로 고분자 열전 소재의 성능 향상을 위한 연구는 소재 열전특성 매개변수의 trade-off 관계를 잘 이해하고 최적화하는 것뿐만 아니라, 신뢰도 높은 특성 분석 방법론을 수립하는 것을 고려해야 한다. 이러한 사항을 함께 고려함으로써, 고분자 열전 소재의 성능을 향상시키고 더 효율적인 열전 변환 기술을 개발할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. W. Liu, J. Hu, S. Zhang, M. Deng, C.-G. Han, and Y. Liu, *Mater. Today Phys.*, **1**, 50 (2017).
2. L. Yang, Z. G. Chen, M. S. Dargusch, and J. Zou, *Adv. Energy Mater.*, **8**, 1701797 (2017).
3. R. Chen, J. Lee, W. Lee, and D. Li, *Chem. Rev.*, **119**, 9260 (2019).
4. Y. Shi, C. Sturm and H. Kleinke, *J. Solid State Chem.*, **270**, 273 (2019).
5. H. Wang and C. Yu, *Joule*, **3**, 53 (2019).
6. Y. Du, J. Xu, B. Paul, and P. Eklund, *Appl. Mater. Today*, **12**, 366 (2018).
7. T. S. Lee, S. Nam, J. G. Oh, E. H. Suh, J. Jung, H. Oh, Y. J. Jeong, and J. Jang, *Chem. Eng. J.*, **455**, 140925 (2023).
8. H. Song, Q. Meng, Y. Lu, and K. Cai, *Adv. Electron. Mater.*, **5**, 1800822 (2019).
9. Z. Fan and J. Ouyang, *Adv. Electron. Mater.*, **5**, 1800769 (2019).
10. Q. Jiang, J. Yang, P. Hing, and H. Ye, *Mater. Adv.*, **1**, 1038 (2020).
11. W. S. Kim, G. Anoop, I.-S. Jeong, H. J. Lee, H. B. Kim, S. H. Kim, G. W. Goo, H. Lee, H. J. Lee, C. Kim, J.-H. Lee, B. S. Mun, J.-W. Park, E. Lee, and J. Y. Jo, *Nano Energy*, **67**, 104207 (2020).
12. J. Y. Kim and Y. J. Jeong, *Mater. Lett.*, **344**, 134383 (2023).
13. Z. H. Ge, Y. Chang, F. Li, J. Luo, and P. Fan, *Chem. Commun. (Camb)*, **54**, 2429 (2018).
14. E. H. Suh, Y. J. Jeong, J. G. Oh, K. Lee, J. Jung, Y. S. Kang, and J. Jang, *Nano Energy*, **58**, 585 (2019).
15. T. S. Lee, S. B. Lee, D.-Y. Choi, E. H. Suh, T. K. An, Y. J. Jeong, J. Jang, and Y.-H. Kim, *Macromol. Res.*, **29**, 887 (2022).
16. E. H. Suh, M. K. Jeong, K. Lee, W. Jeong, Y. J. Jeong, I. H. Jung, and J. Jang, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2207886 (2022).
17. R. Boston, W. L. Schmidt, G. D. Lewin, A. C. Iyasara, Z. Lu, H. Zhang, D. C. Sinclair, and I. M. Reaney, *Chem. Mater.*, **29**, 265 (2016).
18. H. Wang, W. D. Porter, H. Böttner, J. König, L. Chen, S. Bai, T. M. Tritt, A. Mayolet, J. Senawiratne, C. Smith, F. Harris, P. Gilbert, J. W. Sharp, J. Lo, H. Kleinke, and L. Kiss, *J. Electron. Mater.*, **42**, 654 (2013).
19. Q. Wei, M. Mukaida, K. Kirihara, Y. Naitoh, and T. Ishida, *Materials (Basel)*, **8**, 732 (2015).
20. Q. Wei, M. Mukaida, K. Kirihara, Y. Naitoh, and T. Ishida, *Appl. Phys. Express*, **7**, 031601 (2014).
21. D. J. Yun, J. Jung, Y. M. Sung, H. Ra, J. M. Kim, J. Chung, S. Y. Kim, Y. S. Kim, S. Heo, K. H. Kim, Y. J. Jeong, and J. Jang, *Adv. Electron. Mater.*, **6**, 2000620 (2020).
22. A. T. Burkov, A. Heinrich, P. P. Konstantinov, T. Nakama, and K. Yagasaki, *Meas. Sci. Technol.*, **12**, 264 (2001).
23. I.-H. Kim, *KTC News*, **16**, 18 (2013).
24. D. G. Cahill and R. O. Pohl, *Phys. Rev. B*, **35**, 4067 (1987).
25. S.-M. Lee and D. G. Cahill, *J. Appl. Phys.*, **81**, 2590 (1997).