



나노 구조 열전 소재의 최근 연구 동향

글 _ 손재성
UNIST 신소재공학부

1. 서론

1950년대 이후 급격히 증가한 에너지 수요량에 따라서 화석 연료의 사용도 1950년대 대비 현재 10배 이상 증가하였다. 화석 연료의 사용은 필연적으로 CO₂ 가스 배출량의 급격한 증가를 초래했고, 이에 따라 지구온난화와 같은 환경 문제가 끊임없이 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 방편으로 세계 각국은 탄소배출권 거래제를 도입하는 등 탄소 배출 감축을 위해 노력하고 있지만, 장기적으로 화석연료를 대체할 신재생에너지 또는 청정에너지의 개발을 통한 에너지의 확보만이 인류의 생존을 위한 근본적인 대책이라 하겠다.

최근 각광받고 있는 다양한 친환경 에너지원 중 열전 소자는 열전 소재를 이용하여 열에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 장치로 다양한 열에너지를 이용한 발전이 가능한 장치이다. 과거에 열전소자는 그 효율과 경제성이 기존의 에너지원에 못 미쳐왔기 때문에 그 응용 범위가 우주선의 전력공급 장치, 무선통신기의 전원공급 장치, 군사용 동력공급 장치와 같은 특수 환경에서의 발전 장치 또는 소형 냉각장치에 머물렀다. 하지만, 최근 청정 에너지원에 대한 요구와 맞물려 차량 폐열, 산업 폐열, 태양열, 지열, 해양 온도차 등의 다양한 열원으로부터 전기를 얻을 수 있는 새로운 발전 시스템으로 큰 주목을 받고 있다.

이러한 열전 소자의 에너지 변환 효율은 열전 소재의 효율에 가장 크게 의존하며, 벌크 열전 소재의 낮은 에너

지 변환 효율은 열전 시스템의 응용 범위를 한정시키는 주요한 원인이었다. 하지만, 최근 나노구조체의 도입이 열전 소재의 에너지 변환 효율 혁신적으로 증가시킨다는 결과가 잇따름에 따라 나노 구조 열전 소재에 대한 연구는 열전 소재 분야의 기술적 과제를 해결할 수 있는 새로운 가능성을 제시하며 기술 혁신의 원동력으로 떠오르고 있다. 본 특집기고에서는 열전 소재 분야에 새로운 패러다임으로 자리 잡은 나노 구조 열전 소재의 최근 연구 동향에 대해 기술하고자 한다.

2. 본론

● 열전 효과

열전 효과는 1821년 독일의 물리학자인 Thomas Johann Seebeck에 의해 발견된 효과로 Seebeck은 비스무트(bismuth)와 구리(copper)를 연결한 원형 서킷에 열을 가했을 경우 서킷 내부에 위치한 나침반의 방향이 바뀌는 현상을 발견하였다 (Fig. 1). Seebeck은 이 현상이 온도차에 의해 유도되는 자기장 변화라고 굳게 믿고 있었지만, 이는 온도차에 의해 유도되는 전류와 이에 따른 유도 자기장에 의한 변화임이 후에 밝혀졌다. 약 10년 뒤인 1834년 프랑스의 물리학자인 Jean Charles Athanase Peltier는 두 개의 서로 다른 전도체를 연결하고 전류를 흘렸을 경우 열이 발생하는 현상을 발견하였고, 이는 Seebeck이 발견한 효과의 역현상이다 (Fig. 1). 이에 따라, 일반적으로 전기에너지가 열에너지로 변환되는 효과

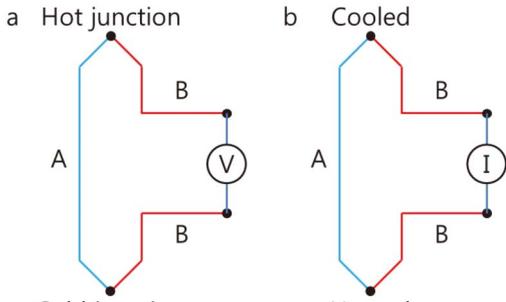


Fig. 1. 열전 효과모식도. a) 제백효과, b) 펠티어 효과.

를 펠티어 효과(Peltier effect), 열에너지가 전기에너지로 변환되는 효과를 제백 효과(Seebeck effect) 그리고 두 가지 효과를 총칭하는 열전 효과를 펠티어-제백 효과(Peltier-Seebeck effect)라고 부른다.

열전 효과를 이용한 에너지 변환 기술은 단위 열전 소자가 직렬로 연결된 열전 모듈에서 구현된다. 열전 소자는 n형 열전 반도체와 p형 열전 반도체가 직렬로 연결된 형태로 (Fig. 2), 세라믹 절연 기판-전극-열전 반도체-전극-세라믹 절연 기판의 비교적 간단한 형태의 구조를 가진다. 용도에 따라 단위 열전 소자는 다양한 형태의 열전 모듈로 제작되어 실제 제품으로 이용되고 있다.

열전 에너지 변환은 크게 두 가지 분야에 응용이 가능하다. 첫째, 제백 효과를 이용하여 다양한 열원으로부터 열에너지를 얻어 전기에너지로 변환하는 발전분야로, 상술한 바와 같이 특수 환경의 발전이 아닌 자연계/수송계/산업계에서 발생하는 다양한 형태의 배/폐열을 이용한 친환경 발전 시스템으로 각광 받고 있다. 또한, 터빈과 같이 기계적으로 다양한 구동 부품으로 이루어진 복잡한

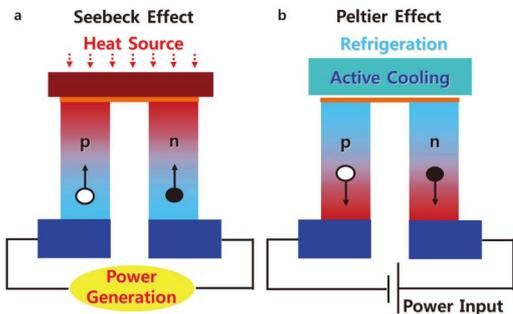


Fig. 2. 열전 소자 모식도: a) 발전 소자, b) 냉각 소자.

시스템이 아니고, 매우 간단한 구조의 시스템이기 때문에 반영구적이며, 크기에 제한을 받지 않기 때문에 소형 전원부터 대형 발전 시스템까지 다양하게 응용이 가능하다. 두 번째, 펠티어 효과를 이용하는 열전 냉각 기술로, 무압축기 무냉매 시스템이기 때문에 온실가스를 배출하지 않는 친환경 냉각 기술이며, 진동과 소음이 없는 장점이 있다. 뿐만 아니라 가스압축기가 필요 없기 때문에 초소형 마이크로 냉각장치부터 대형 냉장고에 이르는 분야까지 응용이 가능하다. 특히, 최근 집적회로의 집적도 향상에 따른 hotspot 열 발생 문제로 인한 소자의 성능 저하를 막기 위한 국부 냉각장치로 큰 주목을 받고 있다.

● 열전 소재

열전 소자는 세라믹 절연기판-전극-열전소재(p형/n형)-전극-세라믹 절연기판의 매우 간단한 구조로 구성되어 있으며, 이에 따라 열전 소자의 에너지 변환 효율은 열전 소재의 성능 지수에 의해 결정된다. 열전 소재의 성능지수는 ZT ($ZT=S^2\sigma T/\kappa$, S: 제백계수, σ : 전기전도도, T:절대 온도, κ : 열전도도)로 나타낸다. 따라서 열전 소재는 높은 성능 지수 달성을 위해 높은 제백계수와 전기전도도, 그리고 낮은 열전도도를 동시에 만족해야 한다.

높은 성능 지수의 열전 소재 제조에 가장 주된 과제는 바로 이 세 가지 값들의 커플링(coupling)이다. Fig. 3의

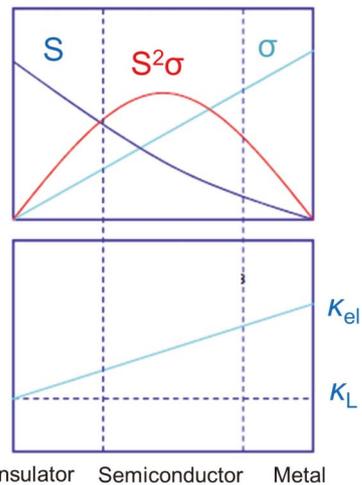


Fig. 3. 전하 농도에 따른 열전 물성 변화 (S: 제백계수, σ : 전기전도도, κ_{el} : 전자 열전도도, κ_L : 격자 열전도도).



표처럼, 열전도도는 전기전도도와 서로 비례하고 또한 제백계수는 전기전도도와 전하 농도를 기준으로 반비례하기 때문에 각 인자의 독립적인 조절이 매우 어렵다고 알려져 있다. 이에 따라 소재의 고유 물성이 위의 조건들을 만족하는 소재군 발견 및 최적화된 전하 농도의 탐색이 역사적인 열전 소재 분야의 주된 연구 테마였다. 지금까지 각 온도 구간별 다양한 소재 군이 벌크 상에서 발견되었는데 상온 근처 소재군인 Bi_2Te_3 계열 소재, 중온 영역 소재인 PbTe 계, Skutterudite 계, 고온 영역인 SiGe 계열 소재들이 대표적인 소재 군이라 할 수 있다 (Fig. 4).¹⁾ 하지만, 이러한 소재들은 독성 중금속 원소를 함유하고 있을 뿐만 아니라 고온 열전 소재의 경우 열적 안정성이 확보되어 있지 않기 때문에 신뢰성이 담보된 상용 소재로 이용되기 어려운 실정이다. 이러한 문제를 차치한다 하더라도 근본적으로 벌크 소재의 경우 도핑, 합금화와 같은 기술 기반의 전하 농도 제어, 구조 제어 등의 전략 외에 열전 성능 지수를 혁신적으로 상승시킬 전략을 찾는

것이 불가능하기 때문에 소재 고유의 열전 성능 지수 한계를 극복하는 것이 매우 어렵다. 실제로 1950년대에 Bi_2Te_3 소재가 발견된 이후 약 50여 년간 상온 열전 소재의 열전 성능 지수 ZT 값은 1에 머물러 있었다. 이는 카르노 기관(Carnot engine)의 효율의 약 10%에 불과하며, 가스압축기 기반의 냉각 장치의 ZT 값이 약 3.5 정도임을 고려할 때 1/3에 못 미치는 에너지 변환 효율로, 모듈로 제작 시 변환 효율이 저감되는 문제를 고려하였을 때 그 격차는 더욱 벌어진다. 이러한 소재의 낮은 에너지 변환 효율은 열전 기술이 폭넓게 응용되지 못한다는 인식의 가장 주요한 이유로 새로운 소재 개발 전략이 필요하였다.

● 나노 구조 열전 소재

최근 나노구조체의 도입으로 혁신적으로 상승된 ZT 값은 이러한 전기전도도, 제백계수, 열전도도 간의 커플링의 극복에 기인한 것으로 특히, 전기전도도와 열전도도의 독립적 조절에 의한 것이다. 1993년 미국 MIT (Massachusetts Institute of Technology)의 Mildred Dresselhaus 교수팀은 양자우물(quantum well) 구조에서의 열전 특성이 혁신적으로 증가한다는 이론 연구 결과를 발표하였고,²⁾ 현재까지 많은 그룹들이 나노구조체가 도입된 열전 소재를 제조하여 상승된 열전 성능 지수 상승을 보고하였다. 이는 전기전도도와 열전도도의 독립적 제어에 기반한 기술로, 나노구조체 도입에 의해 형성된 열전 물질 내 수많은 계면들은 열전도의 매개체인 포논(phonon)을

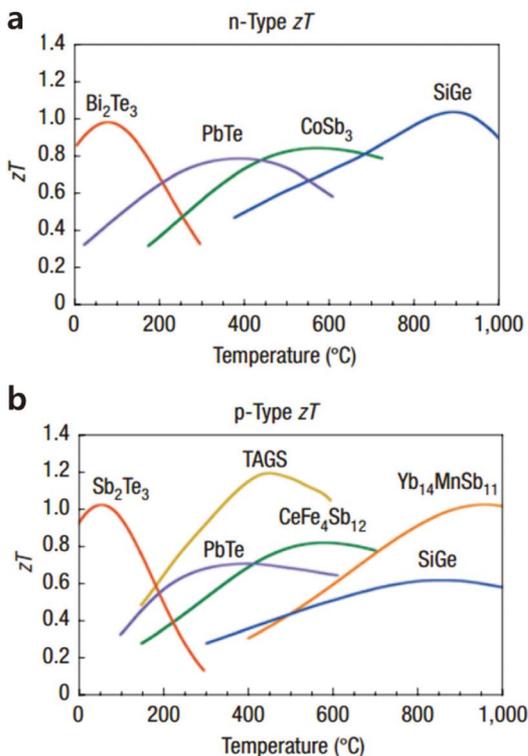


Fig. 4. 온도에 따른 벌크 a) n형, b) p형 열전 소재의 ZT 값.¹⁾

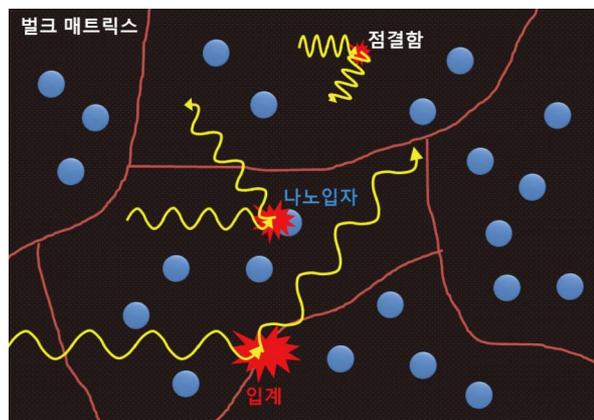


Fig. 5. 나노 구조 열전 소재의 포논 산란.



산란시켜 열전도도를 저감시킨다 (Fig. 5). 이는 전자나 홀과 같은 전하운반체(charge carrier)와 포논의 평균 자유 경로(mean free path)와 밀접한 관련이 있는데, 상온에서 일반적인 반도체 물질의 포논의 평균 자유 경로는 약 수 nm~ 수십 μm 정도로 10 nm 이하인 전자의 평균 자유 경로에 비해 월등히 크기 때문에, 나노구조체의 크기를 적절히 제어하게 되면 계면에서 포논만 선택적으로 산란시킬 수 있게 되고 이로부터 전기전도도의 감소 없이 열전도도를 감소시켜 열전 성능지수를 상승시킬 수 있다.

열전전도 감소 외에 나노 구조 열전 소재의 또 다른 효과로 파워 팩터(thermoelectric power factor= $S^2\sigma$) 상승이 알려져 있다. 열전 물질의 파워 팩터 상승에 대해서 대체적으로 두 가지 이론이 크게 주목 받고 있다. 첫 번째는, 양자 나노 구조의 “양자제한효과(quantum confinement effect)”에 의한 파워 팩터 상승으로, 페르미 준위(Fermi level) 근처에서 양자 제한 효과에 의해 디랙 델타 함수(Dirac-Delta function)와 같은 상태 밀도(density of state)가 형성되면 제백 계수(Seebeck coefficient)가 극단적으로 상승한다는 이론이다. 수많은 논문들이 이 이론에 의한 열전 성능 지수의 이론적 상승을 예측했으며, 최적화된 양자 나노 구조의 경우 ZT값이 상온에서 약 10에 이른다고 보고되어 있다. 미국의 Caltech의 Jeffrey Snyder 교수팀은 텔루륨화납(PbTe) 벌크 물질에 탈륨(Tl)을 도핑하여, 인위적으로 페르미 준위 근처에 델타함수와 같은 상태 밀도를 만들어서 ZT(1.4)값의 상승을 보고하기도 하였다 (Fig. 6).³⁾ 하지만 보다 혁신적인 열전 성능 지수 상승을 위해서는 강한 양자 제한 효과를 나타내는 잘 디자인된 양자점, 양자 우물 구조를 같은 나노 구조체를 열전

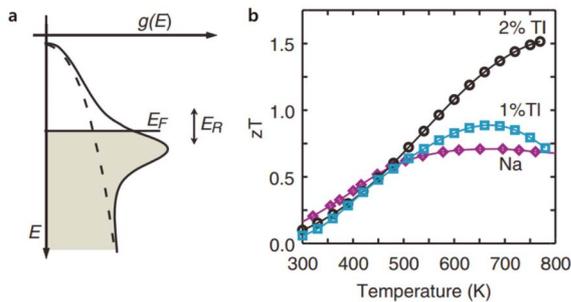


Fig. 6. Tl이 도핑된 PbTe의 a) 에너지 띠 구조와 b) ZT값.³⁾

물질로 응용하는 연구가 필요하다. 현재까지, 실험적으로 양자 나노 구조의 열전 성능 지수 상승에 대한 구현은 거의 보고 되어 있지 않으며, 이미 보고된 몇 편의 논문들도 양자점의 크기에 따른 제백 계수 상승을 관찰한 결과로 지극히 기초적인 연구에 머무르고 있다.

열전 파워 팩터를 상승시키는 두 번째 이론은 낮은 에너지를 갖는 전하를 선택적으로 차단하여 제백계수를 상승시키는 “에너지 필터링(energy filtering) 효과”에 기반하고 있다. 이 이론은 미국의 Perdue 대학의 Ali Shakouri 교수 그룹이 처음 제안한 이론으로 전체 제백 계수에 마이너스 효과를 내는 낮은 에너지의 전하를 필터링하는 에너지 장벽(energy barrier)을 인위적으로 나노구조체에 도입할 경우 제백 계수가 크게 상승된다는 이론이다 (Fig. 7).⁴⁾ 하지만, 이 연구그룹은 이 효과의 실험적인 구현을 위해서는 최적의 두께와 높이를 가지는 나노 단위의 에너지 장벽과 열전 반도체 물질이 100층 이상의 반복적인 구조가 요구된다고 발표하였다. 이는 전통적인 양자우물 제조법인 MBE(molecular beam epitaxy)나 CVD (chemical vapor deposition)으로는 구현이 힘든 구조이고, 또한 분말 소결로도 구현이 어렵다. 화학적으로 합성된 나노입자는 그 크기가 ~10 nm에 불과하기 때문에 에너지 띠 구조가 잘 디자인되어 있는 나노입자를 빌딩 블록으로 사용하여 열전 물질을 제조할 경우 이론적 요구를 달성하기에 적절한 소재라고 사료된다.

2000년대 초반 미국의 MIT대학, Research Triangle Institute 연구팀이 각각 양자점(quantum dot), 양자우물(quantum well)구조의 초격자 박막에서 나노 구조 열전

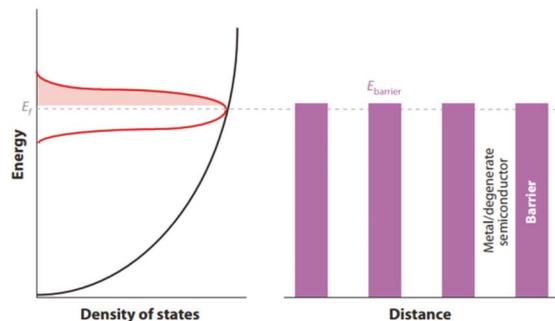


Fig. 7. 에너지 필터링 효과 모식도.⁴⁾



소재의 열전 성능 지수의 증대를 최초로 실험적으로 보고한 이래 높은 효율을 가지는 다양한 나노구조의 열전 소재들이 집중적으로 연구되었다.^{5,6)} 활발히 연구되었던 나노구조체로 나노와이어를 들 수 있는데, University of California at Berkeley의 Peidong Yang 교수팀과 Caltech.의 James R. Heath 교수팀에서 각각 발표한 실리콘 나노와이어의 경우 단일 나노와이어 상에서 벌크 소재의 수십 배에 달하는 0.6~1의 열전 성능 지수가 보고되었다.^{7,8)} 이후 Bi, Bi₂Te₃, PbTe 등 벌크 상에서 높은 성능 지수를 나타내었던 다양한 소재 군에 대한 나노와이어 합성 및 열전 특성 평가에 대한 연구가 진행되었으나, 단일 나노와이어 상에서 열전 물성 측정의 신뢰성 확보가 매우 어렵고 양산성 측면에서 한계가 있기 때문에 최근에는 열전 성능 지수 증대 효과, 재현성 측면에서 신뢰성이 확보된 나노구조 벌크 소재로 나노결정립 벌크 소재 및 나노입자 임베드(embed) 벌크 소재로 연구가 집중되고 있다.

나노입자 임베드 벌크 소재의 경우 미국의 Northwestern 대학의 Mercuri G. Kanatzidis 교수팀이 집중적으로 연구해온 분야로 고체 소재간의 용해도 차이를 이용하여 벌크 물질 내에 나노 크기의 이차상이 석출시켜 제조하는 스피노달분해(spinodal decomposition)법을 응용한 방법으로 나노석출상의 계면에서 포논을 산란시켜 열전도도를 저감하고 열전 성능 지수를 상승시킨다고 알려져 있다(Fig. 8).⁹⁾ 이 소재들은 재현성 및 신뢰성이 나노결정립 벌크 소재와 비교하여 떨어진다고 알려져 있으나, 열전 성능 지수 증대 효과는 더 크다. 현재 스피노달 분해

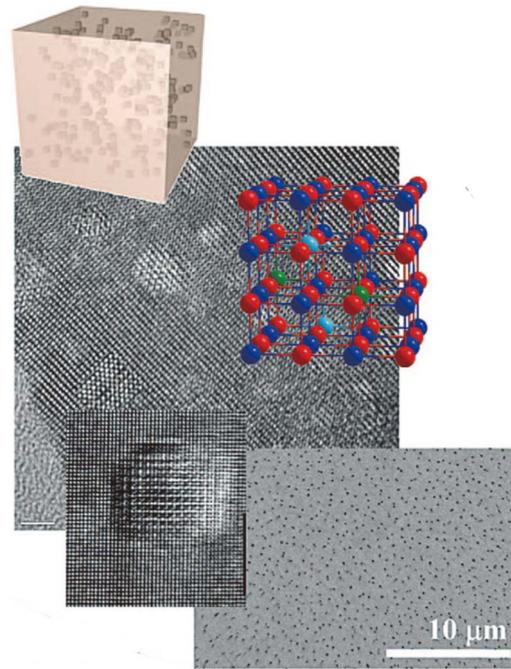


Fig. 8. 나노입자 임베드 벌크 열전 소재.⁹⁾

법으로 제조 가능한 열전 소재는 PbTe 소재군이며, 이 제법은 소재 간 용해도 차이를 이용하는 만큼 소재선택성에 제한이 있으며 특히, 상온 영역 대표적인 열전 소재인 Bi₂Te₃ 계열의 소재 군에는 적용이 어렵다고 알려져 있다. 대표적인 소재로 ZT값이 1.7인 n-타입 AgPb_{18-x}SbTe₂₀(LAST)와 1.6인 p-타입 Na_{0.95}Pb₂₀SbTe₂₂(SALT) 등이 보고되었다.⁹⁾

나노 결정립 벌크 소재는 미국 MIT의 Gang Chen,

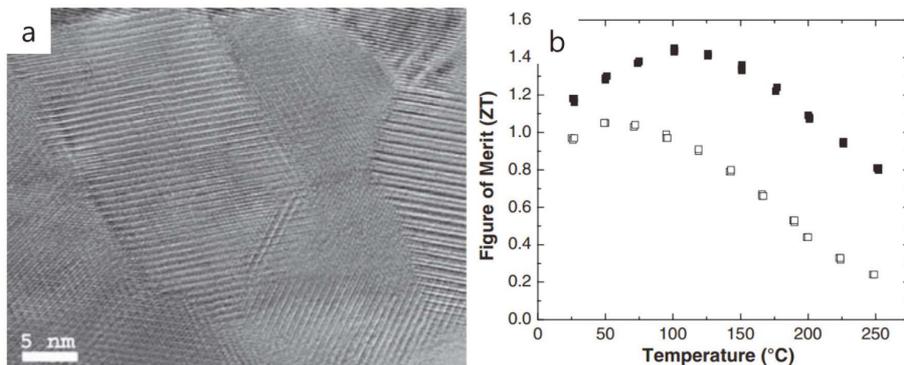


Fig. 9. BiSbTe 나노결정립 벌크 소재의 a) 투과전자현미경 사진과 b) ZT값.¹⁰⁾



University of Houston의 Zhifeng Ren 그룹이 대표적이며, 이외에도 다양한 그룹에서 연구를 진행하였다. 일반적으로 다양한 방법으로 제조된 나노입자 분말 소재를 열간가압(hot-pressing) 소결법을 통해 제조하는 소재로, 기존 소결법에 비해 짧은 소결시간으로 나노스케일의 결정립을 유지할 수 있는 장점이 있다(Fig. 9).¹⁰⁾ 소재 내부에 형성된 고밀도의 입계는 포논을 산란시켜 열전도도를 저감하여 열전 성능 지수를 상승시킨다. 나노분말 소재를 제조하는 대표적인 방법은 볼밀링(ball-milling) 기법으로 나노분말 소재를 대량으로 제조할 수 있는 장점이 있는 반면에 나노입자의 크기, 형태 등을 제어하는 것이 불가능하다. 대표적인 소재 군으로 상온 및 고온 열전 소재인 Bi₂Te₃, SiGe 계열 합금 등이 보고되어 있다.^{10,11)}

볼밀링 외에 melt-spinning 기법이 나노 분말 소재를 제조하는 방법으로 알려져 있다. 미국 Clemenson 대학의 Terry Tritt 교수팀은 melt-spinning 기법을 이용하여 비정질이 포함되어 있는 BiSbTe 나노 분말 소재를 제조하였고 통전활성소결법(spark plasma sintering)을 이용하여 열간가압 성형하여 높은 성능 지수를 나타내는 나노 구조 열전 소재를 보고하였다. 이 melt spinning 기법은 국내 성균관대학교 김성웅 교수 연구팀에서 더욱 개선하여 ZT~1.9에 이르는 놀라운 성능을 나타내는 BiSbTe 열전 소재를 2015년도에 보고하였다.¹²⁾

● 나노 구조 열전 소재 분야 최근 연구 동향

최근의 눈부신 발전에도 불구하고 나노 구조 열전 소재의 성능지수는 몇 년간 특정 수치에 한정되어 있었다. 이는 나노 구조 열전 소재의 저변이 크게 확대되었음에도, 최근의 연구가 단일종의 나노구조 도입등과 같은 획일적인 전략 기반의 연구가 대부분이었기 때문이다. 특히, 현재 열전 성능 지수가 상승된 나노 구조 열전 소재 중 대부분이 열전도도 저감 효과에 의존하고 있으며, 전기적 특성-열전 파워 팩터를 상승시키는 연구는 극히 제한적이다. 현재 다양한 이론적 연구 결과들이 제안되어 있으나 이를 구현하기 위해서는 매우 복잡한 나노스케일의 구조 제어를 요구한다. 열전도도 저감 효과 역시 격자 열전도도 기반 50% 수준에 머물고 있는데, 마찬가지로

단일 나노구조 위주의 연구가 대부분이었기 때문이다. 상술한 나노구조 열전 소재의 대표적인 두 가지 구조적 소재군인 나노결정립 소재와 나노입자 임베드 소재군은 볼밀-열간가압 소결 및 스피노달분해 법으로 제조되어 활발히 연구가 진행되고 있지만, 이 제조법들은 나노 단 위에서 구조체의 구조, 조성, 모양 등을 전혀 조절할 수 없다는 문제점을 안고 있다. 예를 들어 스피노달 분해법은 나노 입자 임베드드 구조의 제조가 가능한 방법이지만, 용해도 제어가 가능한 특정 조성의 금속 나노 입자만 벌크 구조 내부에 형성시키거나 나노 입자의 크기, 모양 등의 제어는 불가능하다. 또한 볼밀 나노파우더의 소결은 나노-그레인(nano-grain)을 도입하는 제조법으로 원재료인 볼밀-나노파우더의 크기와 모양 등이 불균일하기 때문에 최종 그레인을 제어하는 것이 불가능하다.

이러한 한계를 극복하고자 최근에는 단일종의 나노구조를 도입하는 기법이 아닌 여러 종류의 나노구조를 한 소재 내에 동시에 도입하는 복합 나노 구조 열전 소재가 활발히 연구되고 있다. Northwestern 대학의 Mercuri G. Kanatzidis 교수 그룹은 spinodal decomposition 기법

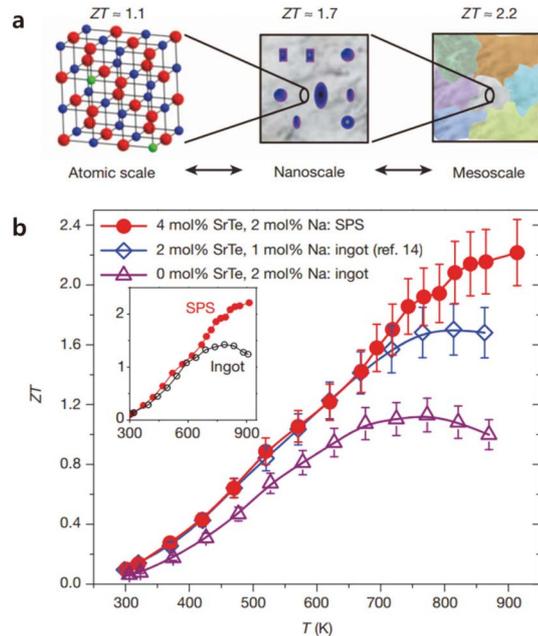


Fig. 10. PbTe-SrTe 복합 나노 구조 열전 소재 개념 a) 모식도와 b) ZT 값.¹³⁾



을 통해 PbTe-SrTe 나노입자 임베드 벌크 소재를 제조하고 이를 다시 분말화한 후 열간가압 성형을 통해 벌크 소재를 만드는 제조 공정을 통해 고밀도 마이크로 단위의 결정립과 임베드 나노입자가 동시에 존재하는 복합 소재를 제조하였다 (Fig. 10).¹³⁾ 이 소재의 열전 성능 지수는 2.2로 단일 공정 대비 약 30%의 성능 지수 개선 효과를 나타내었다. 이러한 두 가지 다른 단위의 구조체 도입을 통해 넓은 영역의 스펙트럼을 가지고 있는 포논을 단일종 나노구조체 도입 소재보다 효율적으로 제어하여 열전도도를 한계치까지 저감한 결과다.

새로운 연구 전략의 또 다른 예로 계면 제어형 나노결정립 벌크 소재를 들 수 있다. 기존의 나노결정립 소재의 경우 고밀도의 결정립을 도입하여 계면에서 포논 산란을 통해 열전도도를 저감하는 효과는 있지만, 단순히 결정립의 밀도 제어 외에는 조절 인자를 발굴하기 힘들다. 따라서 여러 가지 공정 요소를 도입하여 결정립 간의 계면의 조성, 결정 구조, 결합 등을 제어하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 대표적으로 국내의 성균관대 김성웅 교수 연구팀은 melt spinning 기법을 이용하여 BiSbTe 결정립 사이에 Te 상을 도입하고, 소결 중 용출시키는 기법을 개발하여 입계에 고밀도의 dislocation 결함을 도입하여 열전도도를 큰 폭으로 저감하는 기술을 개발하였다 (Fig. 11).¹²⁾ Dislocation 결함은 단순 결정립계보다 포논을 효율적으로 산란시키는 것으로 알려졌으며, 이 소재의 ZT값은 1.9에 달하여 Bi₂Te₃계 열전 소재 중 현재 가장

높은 값으로 기록되어 있다.

3. 결론

본 특집기고에서는 간략하게 나노 구조 열전 소재의 최근 동향에 대해서 살펴보았다. 상술한 바와 같이 나노 구조화 기법은 열전 소재에 도입되어 약 50여 년간 정체되어 있던 벌크 소재의 열전 성능 지수를 혁신적으로 상승시키는 새로운 패러다임으로 자리 잡았다. 하지만 여전히 열전 기술이 기존의 가스압축기 기반의 공조 시스템을 대체하거나 새로운 형태의 배/폐열 발전 시스템으로 이용되기 위해서는 소재의 열전 성능 지수 ZT값이 3 이상 되어야 하며, 현재의 나노 구조 열전 소재의 기술 수준으로 이에 못 미치는 것이 사실이다. 이는 현재의 나노 구조화 기술 수준이 벌크 열전 소재 내부에 나노 구조들을 단순히 도입하는 형태의 전략 위주로, 열전 에너지 변환의 두 가지 전달체인 전하와 포논의 이동을 독립적으로 제어하는 수준에 이르지 못하였기 때문이다. 따라서 수 나노미터 스케일에서 크기, 조성, 에너지 띠 구조 등을 정교하게 제어하는 극미세 나노 구조 제어 공정이 새롭게 개발되어야 할 것으로 사료된다. 실례로 화학적 기법을 이용하여 정교하게 크기, 조성 등이 제어된 균일 나노입자를 열전 소재에 도입하여 나노 구조를 제어하는 기술이 일부 개발된 상태로 그 가능성 측면에서 큰 잠재력이 있다 하겠다. 멀지 않은 미래에 새로운 나노 구조화 공정 기술 개발을 통해 ZT값을 3 이상 증대시키고, 열전 에너지 변환 기술이 신재생에너지 분야에 새로운 패러다임으로 자리 잡기를 바라마지 않는다.

참고문헌

1. G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex Thermoelectric Materials," *Nat. Mater.*, **7** 105-14 (2008).
2. L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Effect of Quantum-Well Structures on the Thermoelectric Figure of Merit," *Phys. Rev. B*, **47** 12727 (1993).
3. J. P. Heremans, V. J. ovovic, E. S. Toberer, A. Saramat, K. Kurosaki, A. Charoenphakdee, S. Yamanaka, and G. J. Snyder, "Enhancement of Thermoelectric Efficiency in PbTe by Distortion of the Electronic

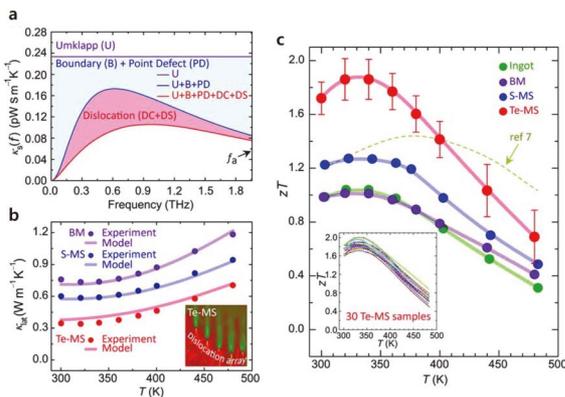


Fig. 11. 계면제어형 나노결정립 벌크 BiSbTe 열전소재의 a) 포논 산란 스펙트럼, b) 격자열전도도, c) ZT값.



- Density of States,” *Science*, **321** 554-57 (2008).
4. A. Shakouri, “Recent Developments in Semiconductor Thermoelectric Physics and Materials,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, **41** 399-431 (2011).
 5. T. C. Harman, P. J. Taylor, M. P. Walsh, and B. E. LaForge, “Quantum Dot Superlattice Thermoelectric Materials and Devices,” *Science*, **297** 2229-32 (2002).
 6. R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, and B. O’Quinn., “Thin-Film Thermoelectric Devices with High Room-Temperature Figures of Merit,” *Nature*, **413** 597-602 (2001).
 7. A. I. Hochbaum, R. Chen, R. D. Delgado, W. Liang, E. C. Garnett, M. Najarian, A. Majumdar, and P. Yang, “Enhanced Thermoelectric Performance of Rough Silicon Nanowires,” *Nature*, **451** 163-67 (2008).
 8. A. I. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J.-. Yu, W. A. Goddard III, and J. R. Heath, “Silicon Nanowires as Efficient Thermoelectric Materials,” *Nature*, **451** 168-71 (2008).
 9. J. R. Sootsman, D. Y. Chung, and M. G. Kanatzidis, “New and Old Concepts in Thermoelectric Materials,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **48** 8616-39 (2009).
 10. B. Poudel, Q. Hao, Y. Ma, Y. Lan., A. Minnich, B. Yu, X. Yan, D. Wang, A. Muto, D. Vashaee, X. Chen, J. Liu, M. S. Dresselhaus, G. Chen, and Z. Ren, “High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys,” *Science*, **320** 634-38 (2008).
 11. G. Joshi, H. Lee, Y. Lan, X. Wang, G. Zhu, D. Wang, R. W. Gould, D. C. Cuff, M. Y. Tang, M. S. Dresselhaus, G. Chen, and Z. Ren, “Enhanced Thermoelectric Figure-of-Merit in Nanostructured p-type Silicon Germanium Bulk Alloys,” *Nano Lett.*, **8** 4670-74 (2008).
 12. S. I. Kim, K. H. Lee, H. A. Mun, H. S. Kim, S. W. Hwang, J. W. Roh, D. J. Yang, W. H. Shin, X. S. Li, Y. H. Lee, G. J. Snyder, and S. W. Kim, “Dense Dislocation Arrays Embedded in Grain Boundaries for High-Performance Bulk Thermoelectrics,” *Science*, **348** 109-14 (2015).
 13. K. Biswas, J. He, I. D. Blum, C.-I. Wu, T. P. Hogan, D. N. Seidman, V. P. Dravid, and M. G. Kanatzidis, “High-Performance Bulk Thermoelectrics with All-Scale Hierarchical Architectures,” *Nature* **489** 414-18 (2012).

◎◎ 손재성



- 2014-현재 울산과학기술원 신소재공학부
- 2012-2014년 시카고대학교 박사후 연구원
- 2012-2011년 서울대학교 박사후 연구원