

열전발전 기술을 이용한 에너지 하베스팅

김성웅 | 성균관대학교
이규형 | 강원대학교



열전

열 에너지와 전기 에너지를 상호 변환할 수 있는 기술로 최근 각광 받는 에너지 소재

기술이며, 상용화를 위해서는 소재의 성능을 나타내는 ZT (무차원 성능지수)의 상승이 가장 중요하다. 이와 관련하여 최근 진행되고 있는 열전소재 고효율화 전략과 연구 동향에 대한 정보를 제공하고자 한다.

열기전력이 발생하여 폐회로 (close circuit) 내에서 전류가 흐르는 현상

1821년 독일의 물리학자 Seebeck에 의해 서로 다른 두 금속 선이 접합된 한쪽 끝을 가열하면, 전위차가 발생하여 전류가 흐르는 현상을 발견하였다. 이 현상은 접합부와 반대편

사이에서 생기는 온도차에 의해 전압 즉, 열기전력이 발생하여 폐회로 (close circuit) 내에서 전류가 흐르는 현상으로 제백 효과로 불리며 열전발전 (Thermoelectric generation)에 이용되는 기본 원리이다.

최근 열전발전분야는 새로운 대체 에너지원으로서 폐열을 이용한 발전설비에 응용하기 위해 전세계적으로 활발히 연구되

1. 열전 현상

1.1. 열전 현상의 개요

열전 현상은 고체상태의 소재 내부에서 열 (온도차)에 의해 carrier인 전자 (electron) 또는 정공(hole)이 이동함에 의한 열에너지와 전기에너지의 직접적이며 가역적인 변환 현상으로, 전기 인가에 의해 열에너지를 이동하여 소재 양단의 온도차를 유발하는 펠티어 효과 (Peltier effect)와 온도차가 전기로 변환되는 제백 효과 (Seebeck effect)로 대표된다 (그림 1).

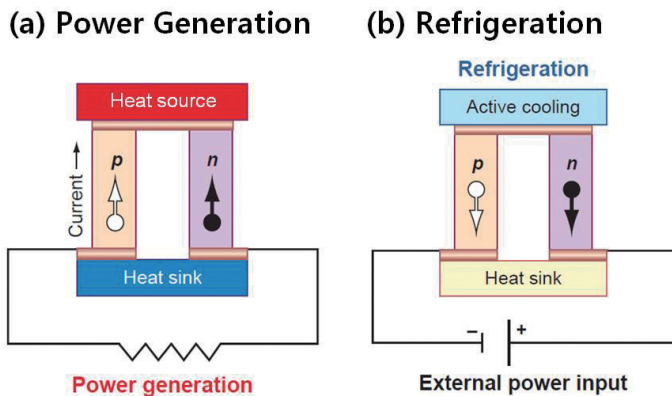


그림 1. 열전 현상 원리, (a) 열전발전 (제백 효과) 및 (b) 열전냉각 (펠티어 효과)

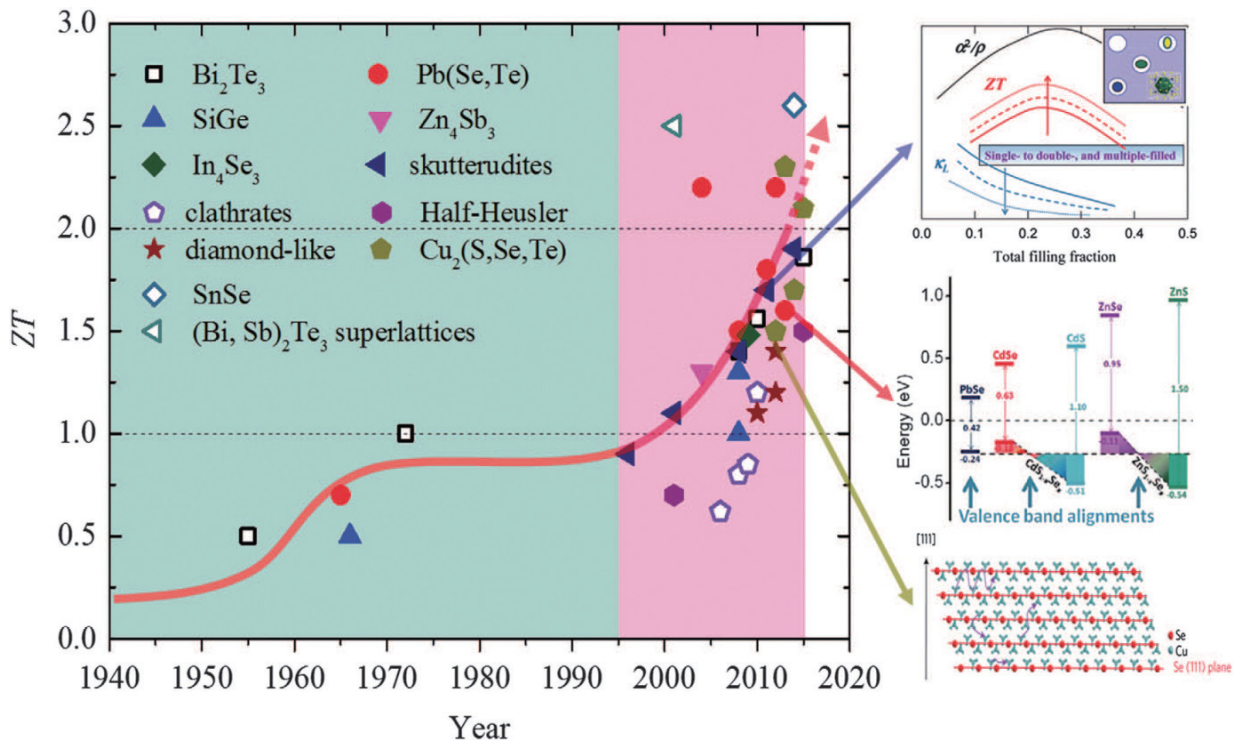


그림 2. 대표적인 열전소재의 연도별 무차원 성능지수 (ZT)

고 있는 분야이다. 열전발전 분야보다 먼저 상용화된 기술은 열전냉각 (Thermoelectric refrigeration) 기술로 1843년 프랑스의 물리학자 Peltier에 의해 발견된 펠티어 효과를 이용한 것으로 서로 다른 두 금속선의 양 끝을 접합시키고 전류를 흘려주면 한쪽 접합부에서는 발열, 다른 접합부에서는 흡열이 일어나며 전류의 방향에 따라서 흡열과 발열이 반대로 일어난다. 일반적으로 열전 에너지 변환 시스템은 그림 1과 같은 열전 소자를 기본 구성요소로 열전 모듈 (Thermoelectric module)을 이용한다. 열전소자는 n형 반도체 열전소재와 p형 반도체 열전소재를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결하여 만들고 여러 개의 소자를 사용 목적에 따라서 다양한 모듈로 제작하여 실제 제품으로 이용하고 있다.

열전냉각 및 발전 시스템 구현을 위한 단위 디바이스인 열전모듈은 절연기관-전극-열전소재(p형/n형)-전극-절연기

판의 대칭적이고 간단한 구조로 구성되어 열전소재의 성능이 열전냉각 및 발전 시스템의 효율을 직접적으로 결정하는 소재 의존성이 매우 큰 기술로서 응용 확대의 핵심은 고성능 열전소재의 개발이다. 열전소재의 성능인 열-전기 변환 효율은 무차원 성능지수 (dimensionless figure of merit) ZT로 정의된다. 적용 온도에 따라 ZT가 높은 소재가 각각 개발되고 있으며, Bi-Te계(n형 $Bi_2Te_{3-x}Se_x$, p

형 $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$, 상온 - 250°C), Pb-Te계(200°C - 500°C), Skutterudite계(300°C - 600°C), Si-Ge계(500°C - 1000°C) 등이 $ZT > 1.0$ 의 성능을 나타내는 대표적인 열전소재이다. 최근 나노구조화 소재 및 SnSe 등 신소재에서 $ZT > 2.0$ 의 고성능 소재가 문헌에 보고되었으나, 응용을 위해서는 가격, 양산 공정, 화학적 안정성, 성능 재현성 등에 대한 검증이 필요하다. 현재 양산 scale에서 구현 가능한 ZT는 모든 온도대역의 소재에서 약 1.0 수준으로 제한되어, 상용 열전소재는 250°C 이하의

열전냉각 및 발전 시스템 구현을 위한 단위 디바이스인 열전모듈은 절연기관-전극-열전소재(p형/n형)-전극-절연기판의 대칭적이고 간단한 구조로 구성

Thermoelectric HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning) Project (DOE)

Timeline	2009. 10 – 2013. 4, \$8.48M		
Project lead	Ford Motor Company		*CCS: Climate Control Seat
Partners	ZT Plus/OSU(materials) → BSST(module), Visteon(system), Amerigon(CCS)		
Objectives	33% reduction in A/C compressor power usage TE performance: COP _{cooling} > 1.3, COP _{heating} > 2.3		
Milestone	Materials	Phase I '09.10 – '10.11 p-type(ZT=1.4)	Phase II '10.12 – '11.10 n-type(ZT=1.0)
	Systems	Modeling & Design CAE, Occupant comfort	System architecture Device engineering
			TE HVAC subsystems System install

그림 3. 미국 DOE 주관 전기자동차용 열전공조 시스템 과제

온도에서 우수한 열전특성으로 열전냉각 및 저온 발전 시스템에 적용되는 Bi-Te계가 유일하다. Bi-Te계 열전소재의 경우에도 문헌에는 p형 소재 ZT = 1.8, n형 소재 ZT = 1.1의 고성능 소재가 보고되고 있으나, 양산 소재는 상온에서 ZT ~0.95(p형 소재 ZT ~1.0, n형 소재 ZT ~0.9) 수준의 낮은 성능을 나타내어 시장 확대를 위해서는 성능 증대가 필요하다(그림 2).

소형 시스템 구현 시 효율 증가 및
고밀도 냉각, 정밀 온도 제어,
무진동/저소음 시스템 구현 등의 장점

1.2. 열전냉각

열전냉각 기술은 전기인가에 의해 고체상태의 소재를 통하여 직접 열을 이동하므로, 온실효과를 유발하는 냉매가스를 사용하지 않으며 가스압축기가 필요 없는 친환경 냉각기술이고, 별도의 기계적 구동부가 없어 compact한 시스템 구현이 가능한 기술이다. 그러나 소재의 성능 한계에 의해 가스압축기를 이용한 냉각 시스템 대비 효율이 1/3 이하 수준으로 현재 소재 기술로는 가정용 에어컨 또는 냉장고 등 범용 냉각시스템을 위한 대체기술로 적용이 불가능하다. 소형 시

스템 구현 시 효율 증가 및 고밀도 냉각, 정밀 온도 제어, 무진동/저소음 시스템 구현 등의 장점이 있어 열전냉각 기술은 차량용 냉난방 시트 (CCS, climate control seat), 와인셀러, 냉온수기 등 소형 시스템과 광통신용 냉각, chip cooling 등 고밀도 냉각 및 의료용 레이저 장비, 혈액분석 장비 등 정밀 온도 제어 시스템에 응용되고 있다. 2014년 열전모듈 기준 약 5,000억원의 시장이 형성되어 있으며 (이 중 열전소재 비중은 약 50%), 적용 제품 확대로 CAGR(compound annual growth rate, 연평균 성장률) ~10%의 높은 성장률을 나타내고 있다. 상용 열전냉각소재인 Bi-Te계 소재 ZT 증대 시 대체 가능한 기술 증가로 폭발적인 시장 확대가 예상된다. ZT = 1.5 구현 시 중형 냉각기로의 확대 적용 및 소형 공조기에 적용성을 확보할 수 있고, ZT = 2.0 구현 시에는 공조기 전체 제품에 적용이 가능한 효율을 구현할 수 있다. 예를 들어 현재 전기자동차 연비에 중요 문제 중 하나인 냉난방 시스템 가동에 의한 주행거

리 급감을 해결할 수 있는 고효율 일체화 냉난방시스템 구현이 가능하다(그림 3 참조, 미국 DOE 주관으로 Ford사에서 전 기자동차용 공조 시스템 개발 과제가 2009년부터 2013년까지 진행되었음. 소재 (ZT Plus, Ohio State University), 모듈 (BSST) 및 시스템 (Visteon, Amerigon) 개발 기관이 참여하였고, zonal concept을 적용하여 에어컨에 사용되는 전력의 1/3 저감 (냉각 COP > 1.3, 난방 COP > 2.3, COP: Coefficient of Performance)을 목표로 과제를 추진하여 시스템 구현 가능성을 검증함). 열전냉각모듈 예상 시장규모는 ZT = 1.5 구현 시 현재의 10배인 5조원, ZT = 2.0 구현 시 현재의 100배 수준인 50조원으로 폭발적인 시장 증가가 예상된다. 최종적으로 ZT > 2.5의 소재 개발 시 범용냉각 제품인 가정용 에어컨, 냉장고 적용으로 현재 가스압축방식의 냉각 시장 전체를 대체할 수 있다. 또한, ZT 증대 및 모듈 박형화로 모바일 전자기기 안정 작동온도 확보를 위한 능동 방열 시스템으로의 활용도 기대된다.

Rankine steam cycle 기술은 배기 열에너지를 또 다른 작동유체와의 열 교환에 의해 생성된 스팀

1.3. 열전발전

차량/산업에서 에너지원의 60% 이상이 폐열로 손실되어 이를 활용하는 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다. 예를 들어, 현재 자동차에 적용되는 내연기관의 열효율은 최대 37% 수준으로 연료의 1/3만이 동력에너지로 변환되고 나머지는 모두 엔진의 냉각수와 배기 및 기타 손실로 버려지며, 이중 배기를 통하여 손실되는 에너지가 가솔린 및 디젤차량 모두 33%가 넘는 실정이다 (그림 4).

배기에너지 회수 기술로 열전발전을 포함하여 electric turbo compound 기술 및 Rankine steam cycle 기술 등에 대한 개발이 진행되고 있다. Electric turbo compound 기술은 배기 운동에너지를 터빈에 의해 회수하는 기술로서 동력재생 방식에 따라 transmission의 토크로 재생되는 mechanical system과 터빈 회전축에 연결된 generator에 의해 전기 에너지로 재생되는 electrical system으로 구분된다. 패키징이 쉽다는 장점이 있으나 세 가지 기술 중 연비향상 효과가 가장 낮고 엔진 brake power에 민감한 단점이 있다. Rankine steam cycle 기술은 배기 열에너지를 또 다른 작동유체와의 열 교환

에 의해 생성된 스팀으로 팽창기에서 기계적 에너지로 재생시키거나 팽창기 샤프트에 장착된 generator에 의해 다시 한 번 전기적 에너지로 재생시켜 사용하는 방식으로, 연비향상 효과 측면에서는 우수하나 부품 수가

많아 시스템 가격 및 차량 패키징 측면에서 불리한 단점이 있다. 열전발전은 배기 열에너지와 냉각수 순환으로 열전모듈의 양단에 온도차를 유발하여 전기를 생산할 수 있고 고체상태의 열전모듈로 열에너지를 전기에너지로 직접 변환하므로 차량 패키징성 및 연비향상 측면에서는 유리하나, 소재 성능에 의존하는 발전 효율과 단가 측면에서 개선이 필요하다. 재생된 전기에너지의 활용은 일반적으로 엔진 보기류를 전동식으로 전환하여 이의 동력원으로 사용하거나 alternator(엔진 발전기) 또는 엔진 크랭크샤프트의 motor/generator를 통하여 엔진 동력원으로 활용하게 된다. 열전발전 시스템은 열전 모듈과 배기가스 측 열 교환기로 이루어지는 (1) 열전발전 구

동 시스템과 냉각수 순환을 위한 전동식 워터펌프와 라디에이터로 이루어지는 (2) 냉각 시스템 및 (3) 전력변환 시스템을 포함한다.

차량/산업 등에서 다양한 온도의 폐열원이 존재하여 저온(<250℃) / 중온(<600℃) / 고온(>600℃)에 각각 적용 가능한 고성능 소재 개발

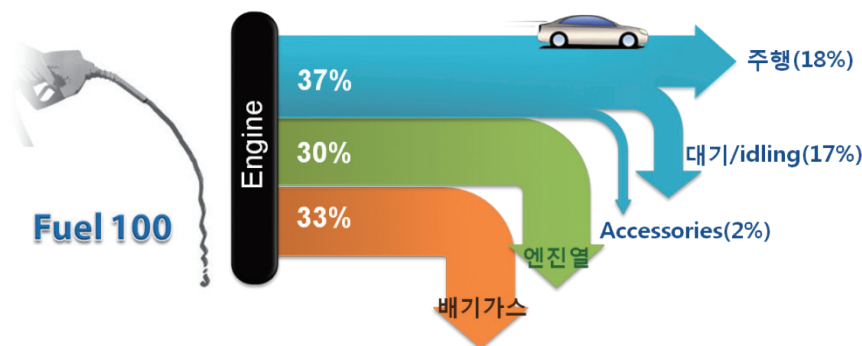


그림 4. 승용차 연료 소비 현황

이 필요하며, 현재 기술수준으로는 저온 Bi-Te계 소재, 중온 Skutterudite계, half-Heusler계 및 Mg-Si계 소재의 상용화 가능성이 가장 높다. 열전소재의 낮은 ZT, 모듈화 및 시스템화 기술의 부재로 현재는 군사용, 우주선용, 휴대용 전원 등 매우 제한적인 분야로 응용이 한정되고 있으나, 최근 상술한 페열 회수 발전에 의한 자동차 연비증대 기술로의 가능성이 검증되어 자동차 제조사를 중심으로 소재, 모듈 및 시스템에 이르는 전 방위적 개발이 추진되고 있어 향후 10년 이내에 상용화 여부가 결정될 것으로 예상된다. 차량용 열전발전 등 수송 분야 이외에도 ZT 증대 시 하이브리드 발전 시스템 (연료전지, 태양전지 등), 자연열을 이용한 무선 독립 전원 (wireless power, energy harvesting 등)으로 단계적 응용 확대가 가능하다. Bi-Te계 소재를 적용한 flexible 모듈 개발로 체열발전 시스템을 구현하려는 연구도 진행되고 있으며, 국내에도 2014년 관련 업체가 설립되어 상용화를 추진 중이다. ZT 증대 및 작동 곡률반경 한계 극복을 위한 모듈화 기술 개발 시 wearable 체열발전 시스템에 의한 모바일 기기 보조전력 수준의 발전이 가능하나, 스마트폰 기준 배터리 50% 용량 충전을 위해서는 현 수준 대비 5배의 출력밀도 증가가 필요한 구현 난이도가 매우 높은 기술이다. 현재 열전발전 시장규모는 군사용을 중심으로 저온 열전발전 분야에 시스템 기준 약 500억원의 작은 시장이 형성되어 있으나, 소재 성능 증대 없이도 무선독립전원 및 energy harvesting에 대한 수요 확대로 CAGR ~29.7%의 폭발적인 시장 성장을 나타내어 2020년 약 5,000억원의 시장이 예상된다. 저온과 중온을 포함하는 차량용 열전발전의 경우 아직 상용화 이전 단계이나, 현재 생산 중인 모든 차량에 적용될 경우 시스템 기준 52조원 수준의 매우 큰 시장규모가 예상된다 (2013년 전세계 자동차 생산 대수 8,700만대 기준으로 열전발전 시스템 용량과 비용은 600W급-60만원으로 산정).

2. 열전소재

열전소재의 성능은 열전냉각 및 열전발전 시스템의 효율을 결정하는 제1의 요소로서, 냉각 및 발전 효율은 소재성능과 직

접적으로 관련된 아래의 식으로 각각 정의된다. 식에서 TH와 TC는 각각 고온부와 저온부의 온도이고, M은 고온부와 저온부의 평균을 의미한다.

$$\text{냉각효율} = \frac{T_C \left[(1 + ZT_M)^{1/2} - \frac{T_H}{T_C} \right]}{(T_H - T_C) \left[(1 + ZT_M)^{1/2} + 1 \right]}$$

$$\text{발전효율} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + Z_M(T_H + T_C)/2} - 1}{\sqrt{1 + Z_M(T_H + T_C)/2} + (T_C/T_H)}$$

냉각 및 발전 효율 식에서 ZT는 앞장에서 기술한 바와 같이 소재의 열-전기 변환 효율을 나타내는 무차원 성능 지수로 아래의 식과 같이 정의된다.

$$ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa_{\text{total}}$$

이 식에서, σ , S, κ_{total} 은 각각 절대온도 T에서 전기전도도 (electrical conductivity),

제벡 계수(Seebeck coefficient), 열전도도 (total thermal conductivity, 소재의 열전도도는 포논에 의한 격자열전도도 (κ_{lattice} , lattice thermal conductivity)와 전자 및 홀에 의한 전자열전도도 (κ_{electron} , electronic thermal conductivity)의 합으로 표시할 수 있음)이며, σS^2 을 파워팩터 (power factor)라 한다. ZT 수식으로부터 열전소재의 성능 증대를 위해서는 파워팩터 증가 또는 열전도도 저감이 필요하다. 그러나 (1) 전하밀도(n_c , carrier concentration)에 따른 전기전도도와 제벡계수의 trade-off 관계, (2) 열전도도 저감에 의한 ZT 증대를 위해서는 포논 (phonon, 격자 진동에 의한 열 전달)만을 산란하여 격자열전도도만을 저감해야 하는 (carrier인 전자 또는 홀의 움직임을 제한하면 전자열전도도가 저감되어 κ_{total} 을 감소하는 것이 가능하나 이는 필연적으로 전기전도도의 감소도 수반하므로 ZT 증대 효과는 없음) 물리적 제한요소가 있어 실질적인 ZT 증대를 구현하는 것은 매우 어렵다 (그림 5). 따라서 ZT 증대를 위해서는 (1) DOS engineering (제벡계수는 DOS(전자상태밀도, density of states)와 직접적으로 연관되어 이를 제어하면 전기전도도에 대한 영향을 최소화 한 상태에서 제벡계수를 증대하는 것이 가능함) 또는 (2) carrier 산란을 최소화 한 상태 (전기전도도 유지)에서 포논산란(phonon scattering)을 활성화하여 격자열전도도만을 저감

열전소재의 성능은 열전냉각 및 열전발전 시스템의 효율을 결정하는 제1의 요소

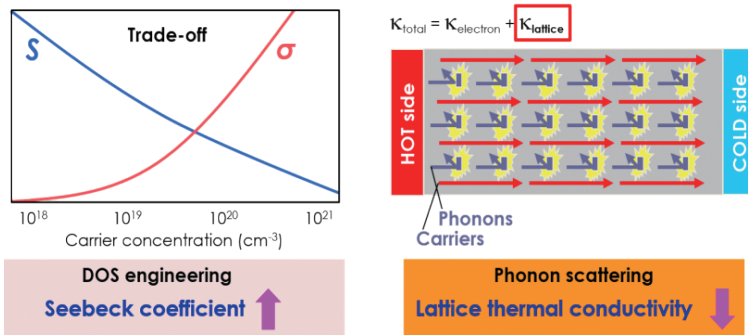


그림 5. 전하밀도에 따른 전기전도도-제벡계수 trade-off 개선 및 격자열전도도 저감에 의한 소재 개발 전략

하는 전략이 필요하다 (전자의 움직임을 제한하면 전자열전도도가 감소하여 열전도도 저감 효과가 있으나 동일한 기여로 전기전도도가 저하되므로 ZT 증대 효과는 없다).

현재까지 열전소재는 온도에 따라 Bi-Te계 (500 K 이하), Pb-Te계 및 skutterudite계 (800 K 이하), Si-Ge계 (800 K 이상) 소재 등이 개발되었으며, 양산 scale의 bulk형태 소재에서 안정적으로 구현되는 최대 ZT는 약 1.0 수준이다. 차량용

열전발전 기준으로 상용화에 필요한 발전효율 구현을 위해서는 현재 대비 50% 이상의 성능증대 (ZT > 1.5)가 요구된다. 대부분의 연구기관은 ZT 증대를 위해 전기전도도와 제벡계수 trade-off 극복 (이를 위해서는 density of states의 변형, Fermi level tuning 등을 위한 복잡한 소재 설계가 필요함)에 비해 상대적으로 접근이 용이한 PGEC 전략 (Phonon Glass Electron Crystal, 전자와 포논의 움직임이 독립적으로 제어 가능한 특성의 소재)을 추진하고 있으며, 기존 소재의 미세구조를 변형하여 PGEC를 구현하거나 소재 자체가 PGEC 특성을 포함하고 있는 신소재를 개발하는데 주력하고 있다. 신소재 개발에 대한 결과로 최근 단결정 형태의 bulk 소재에서 PGEC효과가 발견되어 ZT = 2.6 @923 K의 매우 높은 열전성능이 구현된 SnSe가 보고되었다. SnSe는 층상구조와 anharmonic bonding이 존재하여 열전도도가 매우 낮고 이러한 특성에 의해 높은 ZT를 나타내는 소재로, 향후 동일한 개념을 이용한 열전소재의 개발이 신소재 탐색에 대한 새로

SnSe는 층상구조와 anharmonic bonding이 존재하여 열전도도가 매우 낮고 이러한 특성에 의해 높은 ZT를 나타내는 소재

운 연구동향이 될 것으로 예상된다. 그러나 고온에서의 화학적 안정성이 담보되지 않은 소재는 조성변화에 따른 열전특성 저감이 두드러지게 된다. 따라서 고온용 열전발전 소재로는 높은 소재 성능과 함께 화학적 안정성과 기계적 강도의 우수성 또한 요구되고 있다. 신소재 개발과 더불어 PGEC 전략을 기반으로 기존 Bi-Te계, Pb-Te계, skutterudite계 및 Si-Ge계 등 소재에 대한 성능 증대 연구도 활발히 진행되고 있다. 수 - 수십 나노미터 수준에서 소재의 미세구조가 제어되어 포논의 움직임을 제한할 수 있는 나노구조화 소재 구현을 위해 high energy milling

(기계적 분쇄 또는 기계적 합금화에 의해 나노 크기 분체 또는 복합구조체를 제조), rapid solidification (용융상태의 소재를 급랭함에 의해 나노 크기의 grain을 형성하거나 나노 크기의 2차상을 석출), modified chemical reaction (화학 반응에 의해 나노 크기의 분체 또는 복합구조체를 제조), ultra fast sintering (bulk화를 위한 열처리 시간을 짧게 하여 나노 구조가 유지된 소결체 제조) 등 극한 조건에서 소재를 제조하는 공정기술이 조건 강화를 위해 변형된 형태로 개발되어 적용되고 있다. 이상과 같은 신소재 설계 및 제조, 나노구조화 소재 제조 공정 기술은 열전소재의 개발 뿐 아니라 차세대 디바이스 (초고효율, flexible device 등)에서 요구되는 단일 조성의 무기소재에서 예측되는 물리적 특성 (기계적, 전기적, 열적, 자기적, 광학적 특성 등) 한계 값 이상의 물성 구현을 위한 소재 기술로도 그 중요성이 부각되고 있다.

3. 열전 응용

3.1. 열전냉각(TEC)

열전냉각은 냉각 또는 열 공급 장치로서 고상, 무진동, 저소음, 무방매(친환경) 등의 장점을 가지고 있으나, 효율이 낮

아 응용이 제한되고 있다. 열전모듈의 냉각능력인 Q_c 는 펠티어 효과, Joule 열 효과, Fourier 효과에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T$$

여기서, 첫째 항은 펠티어 효과에 의한 흡열량(열 pump)을 나타내고, 둘째 항은 전류의 흐름으로 인한 Joule 열(발열) 효과를 나타내며, 셋째 항은 작동 시 고온부 T_h 와 저온부 T_c 의 온도차에 의하여 열이 역방향으로 전도되는 것을 나타낸다. 일반적으로 열전모듈의 흡열량은 전류가 증가할수록 펠티어 효과에 의한 흡열량이 증가되나 사용 전류가 어느 이상 되면 Joule 열의 발열과 냉각부와 고온부의 온도차의 증가로 인하여 인한 열전도의 증가로 그 흡열량이 다시 감소되는 경향을 보인다. 열전모듈의 냉각능을 나타내기 위해 작동에 필요한 전력을 나타내면 다음과 같다.

$$P = \alpha I \Delta T + I^2 R = (\alpha \Delta T + IR)I = VI$$

여기서, 열전모듈에 걸리는 전압은 저항에 의한 전압 강하량과 Seebeck 효과에 의한 전압 강하량의 합으로 표시되며, 열전모듈에 일정전압을 걸어주어 전력을 공급 할 때 고온부와 냉각부의 온도차가 증가할수록 상대적으로 전류의 양이 감소하는 경향을 나타낸다. 그러므로, 열전모듈을 이용한 냉각용량과 모듈에 사용되는 전력으로 COP를 산출하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$COP = \frac{Q_c}{P} = \frac{\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R}$$

위 식에 나타낸 바와 같이 온도 조건이 변할 때 냉각능력과 COP는 전류에 의존하며, 각각 최고의 조건을 나타내는 전류 조건이 다르다. COP 측면에서는 전류가 증가함에 따라 증가하다가 일정 전류에서 최대치를 갖고 감소하는 특성을 보인다. 따라서 열전모듈의 전류를 적당한 전류에서 작동하는 것이 효율적이다. 또한 일정전류에 대하여 저온부와 고온부의 점점 온도차가 감소할수록 냉각능이 증가된다. 따라서, COP를 극대화 할 수 있는 model 정립이 필요하다. Martinez 등은 TCS (thermoelectric self-cooling) 응용에 대한 시뮬레이션을 진

행하였다 (Fourier's law 및 제벡, Joule, 펠티어, 톰슨 효과로 구성된 관계식 계산). 시뮬레이션을 통하여 최대 효율 구현이 가능한 n형/p형 열전소자 쌍수, 열전소자의 길이 및 적용 면적 등에 대한 계산이 가능하다.

소재 관점에서 열전냉각과 발열에 대한 최대 COP는 각각 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\psi_{\max} = \frac{T_{c_j}}{T_{h_i} - T_{c_i}} \frac{M - \frac{T_{h_j}}{T_{c_j}}}{M + 1}, \Phi_{\max} = \frac{T_{h_j}}{T_{h_i} - T_{c_i}} \frac{M - \frac{T_{c_j}}{T_{h_j}}}{M + 1}$$

여기서, T_{c_j} 는 접합부의 저온부 온도, T_{h_j} 는 접합부의 고온부의 온도를 나타내고, M 은 아래의 식으로 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + ZT_i}$$

여기서, T_j 는 T_{c_j} 와 T_{h_j} 의 평균온도, 즉 전자 냉각소자의 평균 구동온도이다. 결론적으로, 열전 시스템의 냉각 및 가열 효율은 위의 식에 나타낸 바와 같이 열전소재의 성능 ZT 에 크게 의존한다.

3.2. 열전발전(TEG)


열전모듈을 이용한 온도차 발전인 열전발전의 효율은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 열전발전 효율도 열전냉각과 마찬가지로 열전소재의 ZT 에 크게 의존한다.

$$\eta_{\max} = \frac{T_{h_j} - T_{c_j}}{T_{h_j}} \frac{M - 1}{M + \frac{T_{c_j}}{T_{h_i}}}$$

현재 주요 열에너지 이용 분야는 (1) 열을 이용한 산업 공정, (2) 열 병합 발전 시스템, (3) 수송 폐열 및 (4) 도시 고품 폐기물의 4가지로 분류할 수 있다. 한편, 폐열의 발생은 (1) 소규모, 분산형, (2) 넓은 온도 범위, (3) 불규칙적인 방출, (4) 다양한 열 carrier (화학 가스, 고체, 액체 등), (5) 제어의 어려움 및 (6) 낮은 밀도의 특성을 나타낸다. 열전발전은 폐열을 직접 전기로 변환할 수 있으며, 기계적 구동부가 없고, 작동 신뢰성이 우수하고, 적용 열원의 범위가 매우 넓으며, scaling effect가 없어 mW에서 수백 kW 용량의 시스템 구현이 가능한 장점으로

폐열을 활용한 에너지 기술로의 적용에 최적의 발전 시스템으로 인식된다. 산업용 폐열의 발생 온도는 상온 - 1000℃로 매우 넓은 범위를 나타내며 일본의 경우 연간 2.72×10^{14} kcal 수준의 열량이 발생한다. 수송용의 경우 가솔린 엔진으로부터 약 923 K, 디젤 엔진으로부터 약 723 K의 폐열이 발생한다. 일본의 경우 가솔린 엔진 차량과 디젤 엔진 트럭에서 발생하는 폐열은 연간 3.9×10^{14} kcal 수준으로 산업 폐열 보다 더 많은 것으로 추산된다. 열전발전 응용을 기존 군사, 우주 항공에서 수송, 산업 등으로 확장을 위해 소재, 모듈, 시스템에 대한 종합적인 연구개발이 진행되고 있으며, 발전효율 증대를 위해 수많은 요소들에 대한 개발 및 최적화를 진행하고 있다.

4. 결 론

1950년대 이후 다양한 방식으로 연구되어 왔던 열전 에너지 변환 기술은 1990년대부터 나노기술의 도약으로 열전소재의 에너지 변환 효율인 ZT값이 2.0을 넘어서는 등 새로운 장이 열리고 있다. 최근 관련 연구 동향도 소재개발에 집중된 기초연구의 단계에서 열전모듈 및 시스템 개발까지 확대된 응용 연구 단계로 확장되고 있다. 향후 생산성 및 성능 재현성을 확보한 고효율 열전소재가 개발되면 폐열을 회수하는 발전 시스템 뿐 아니라 태양열, 지열, 체열 등 자연열을 이용한 분산전원과 무선 독립전원 및 태양전지, 연료전지 등과 hybrid 발전시스템 구축도 가능하므로 기술적, 시장적 파급 효과가 매우 클 것으로 예상된다. 열전 에너지 변환 시스템의 발전은 소재 및 모듈에 대한 연구로도 큰 효과를 얻을 수 있고, 해외 선진 개발 기관과의 기술격차가 크지 않은 분야로 관련 기술개발에 보다 적극적인 지원이 지속될 수 있기를 기대한다. 

참 고 문 헌

- [1] CRC Handbook of Thermoelectrics, edited by D. M. Rowe (CRC Press, Boca Raton, 1995).
- [2] G. S. Nolas, J. Sharp, and H. J. Goldsmid, Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments, Springer (2001).
- [3] A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, London, Inforsearch Ltd., (1957).
- [4] Thermoelectric Handbook: Macro to Nano, edited by D. M. Rowe (CRC Press, Boca Raton, 2006).
- [5] G.A. Slack, New materials and performance limits for thermoelectric cooling, in CRC Handbook of Thermoelectrics, edited by D.M. Rowe (CRC Press, Boca Raton, 1995), pp. 407 - 440.
- [6] J. Yang *et al.* On the tuning of electrical and thermal transport in thermoelectrics: an integrated theory - experiment perspective. npj Compu. Mats. 2, 15015 (2016).
- [7] L. Zhao *et al.* Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals. Nature 508, 373 (2014).
- [8] S. I. Kim *et al.* Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics. Science, 348(6230), 109-114 (2015).