



## 열-전기 에너지 변환 기술과 응용

글 \_ 이순일, 서원선  
한국세라믹기술원

### 1. 서론

열전현상이란 열-전기 변환이 서로 가역적으로 일어나는 현상으로, 19세기 초 Seebeck, Peltier, Thomson에 의해 발견되었다. 초기 금속계 열전소재는 열전성능이 낮아 응용이 제한되었으며, 1930년대 후반 Ioffe 등에 의해 열전성능이 한 단계 향상된 화합물 반도체 열전소재가 연구되었다. 현재 반도체 화합물계, 산화물계, 유기물계 등 다양한 소재와 기술을 바탕으로 높은 열전성능지수 ( $ZT > 1$ )를 가지는 열전소재들이 개발되고 있다.

열전(Thermoelectric) 기술은 열에너지를 전기에너지로 변환하는 Seebeck 효과와 전기에너지를 열에너지로 변환하는 Peltier 효과를 활용하여 열과 전기를 자유롭게 변환할 수 있는 친환경 에너지 기술이다. Fig. 1은 열전소재에 의한 냉각(Peltier 효과)과 발전(Seebeck 효과)에 대한 모식도를 나타낸다. 이러한 열-전기 에너지 변환은 전자와 전자 홀이 전하(charge)를 이동시키느냐 아니면 열(heat)을 이동시키느냐에 따라 각각 열에너지를 전기에너지로

또는 전기에너지를 열에너지로 변환하게 된다.

열전 에너지 변환은 직렬로 연결된 n형 및 p형의 반도체 열전소재와 전극으로 구성된 모듈의 형태로 구현되며, 모듈의 양단에 인가된 온도 차이에 의해 기전력이 발생되는 현상(열전발전)과 인가된 전류에 의해 열의 흐름이 발생하는 현상(열전냉각)을 이용한 것이다. 이와 같이 단순한 구성을 하는 모듈의 효율이 시스템의 에너지 변환 효율로 직결되기 때문에 응용 범위가 다양하게 된다.

### 2. 열전재료

열전 에너지 변환의 효율을 높이기 위해서는 열전소재의 성능지수( $ZT$ , figure of merit) 값이 높은 물질을 개발하는 것이 중요하다. 열전소재의 성능지수는  $ZT = S^2 \sigma / k$ 의 수식으로 표현되며, 제벡계수( $S$ )와 전기전도도( $\sigma$ )가 클수록 유리하고, 열전도도( $k$ )는 낮을수록 성능지수를 향상시킬 수 있다. 열전재료의 우수한 열전특성을 가지기 위해서는 일정량의 전하 운반자가 필요한데, 일반적으로  $10^{19} \sim 10^{21} / \text{cm}^3$ 의 범위 내에서 높은 열전특성을 가진다. 비슷한 농도를 가지더라도 각 결정구조의 특성에 따라 각기 다른 농도와 온도영역에서 전기전도도, 열기전력(제벡계수), 열전도도의 최적 값이 결정되게 된다. Fig. 2는 광범위한 온도 영역에서 발견된 대표적인 열전재료들을 나타낸다. 따라서, 조성(composition, nonstoichiometry, dopant, filler, etc.)이나 구조(crystal structure, micro structure, nanostructure, defects, etc.)의 변화를 통해 성능지수

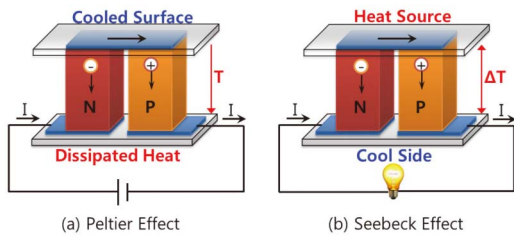


Fig. 1. 열전소재에 의한 Peltier 효과(냉각)와 Seebeck 효과(발전)의 기본 원리.

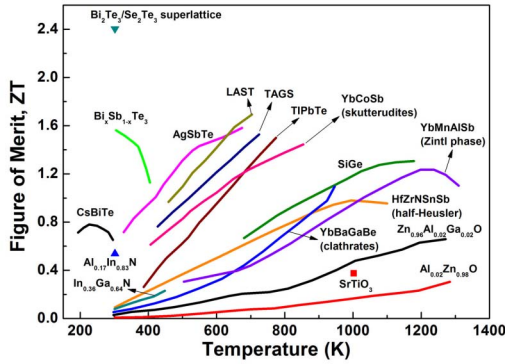


Fig. 2. 대표적 열전소재의 열전성능지수<sup>1)</sup>

의 향상과 성능지수 최고 값의 온도 영역을 제어할 수 있다.

열전재료의 성능지수 향상을 위해서는 전기전도도와 열기전력의 증가와 동시에 열전도도의 감소가 요구된다. 하지만, 위의 세 가지 특성들이 전하 운반자의 농도( $n_c$ )와 이동도에 밀접한 관계가 있어 동시에 제어하기는 어렵다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 일반적으로 전기전도도( $\sigma$ )와 제벡계수( $S$ )는 Pisarenko relation (attributed to Mr. N. L. Pisarenko in the seminal monograph on thermoelectricity by Abram Ioffe<sup>3)</sup>, 식(1))에 의해 서로 반비례 관계를 가져 전기전도도 증진 시 제벡계수의 저하로 전체적으로 ZT의 상승을 유도할 수 없게 되고, 전기전도도( $\sigma$ )와 열전도도( $k$ )는 Wiedemann-Franz law (식(2))<sup>4)</sup>에

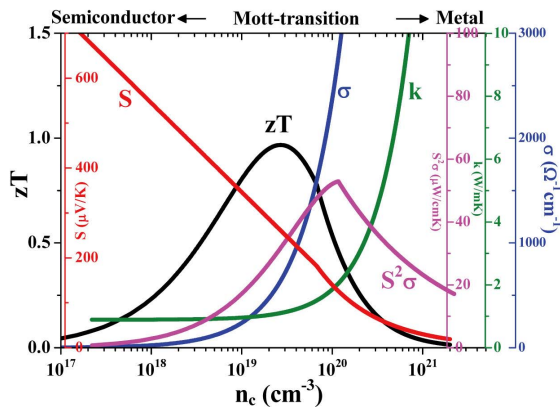


Fig. 3. 열전특성들의 상관관계를 나타내는 대표적인 모식도<sup>2)</sup>

의해 비례관계가 성립하여 전기 전도도 증진 시 열전도도도 함께 증진되어 ZT의 상승이 제한되기 때문에 동시에 세 가지 인자를 향상시키기는 쉽지 않다.

$$S = \frac{8\pi^2 k_B T}{3eh^2} m^* \left( \frac{\pi}{3n} \right)^{2/3} \quad (m^*: \text{effective mass}) \quad (1)$$

$$\frac{k}{\sigma} = LT \quad (L: \text{Lorenz number}) \quad (2)$$

하지만, Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 2000년대 들어 급속도로 발전하고 있는 나노기술은 ZT값을 구성하는 개별 인자간의 상관관계를 약화시킴으로서 열전성능의 비약적 혁신을 가져오고 있으며, 각국의 열전소재 R&D 전략 역시 나노구조화 열전소재에 집중되고 있다. 대표적인 예로, 전기전도도에는 크게 영향을 미치지 않으면서 열전도도를 낮출 수 있는 포논산란 자리(phonon scattering center)를 만들어 성능지수를 높이는 연구들이 진행되고 있다. 열전도도는 전자에 의한 열전도도(electronic thermal conductivity)와 격자에 의한 열전도도(lattice thermal conductivity)의 합으로 구성되는데, 이 중에서 전기전도도와 상관되는 전자 열전도도의 변화는 최소화하고 격자 열전도도만 낮추어 성능지수(ZT)를 향상시킬 수 있다. 이것은 전자에 비해 상대적으로 긴 평균자유행로(mean free path)를 가지는 포논(phonon)을 열전소재의 나노구조를 제어하여 산란시킴으로서 격자에 의한 열전도도를 낮추게 되어 가능하다. 이러한 개념은 1956년 Ioffe<sup>5)</sup>에 의해 시작되어 1995년 Slack<sup>6)</sup>이 Phonon-Glass Elect

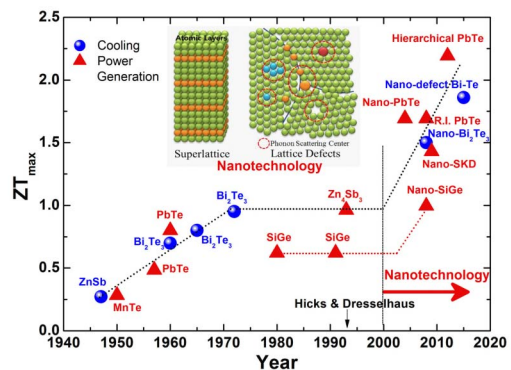
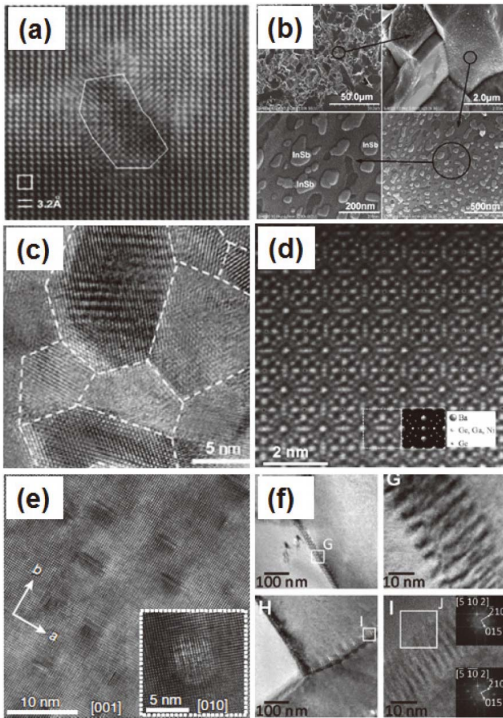


Fig. 4. 나노구조화에 따른 열전성능지수의 변화 (modified from Ref. [7])



**Fig. 5.** (a)  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$  (LAST)의 nanodot,  $ZT=2.2^{(8)}$ , (b)  $\text{In}_{0.2}\text{Ce}_{0.15}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$  Skutteridite의 나노 이차상,  $ZT=1.43^{(9)}$ , (c) melt-spun  $\text{BiSbTe}$ 에서의 coherently packed nanocrystals,  $ZT=1.56^{(10)}$ , (d)  $\text{Ba}_8\text{Ni}_4\text{Ga}_2\text{Ge}_{46-y-z}$  Clathrate의 cross-substitution of framework elements,  $ZT=1.2^{(11)}$ , (e) platelet-like precipitate ( $\text{SrTe}$ ) with a coherent interface with the matrix ( $\text{PbTe}$ ),  $ZT=2.2^{(12)}$ , (f)  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  (Te-MS)의 입계에 dislocation arrays,  $ZT=1.86^{(13)}$ .

ron-Crystal (PGEC)로 제안하였다. Fig. 5는 나노구조화를 통한 원자 단위의 포논산란 제어로 열전 성능지수를 향상시킨 예를 보여주고 있다. 최근 들어 다양한 소재군에서 나노입계, 나노블록, 나노기공, 나노 도메인, 나노식출, rattler 등 나노기술이 적용되어 혁신적인 열전 성능지수를 달성한 열전 소재들이 보고되고 있으나, 일부 소재에 대해서는 아직 실험실 차원에서 구현되고 있어 앞으로 재현성 및 양산성을 고려한 기술개발이 요구된다. 이와 같이 나노구조 제어에 기반한 열전도도 저감 기술은 열전 에너지변환 기술에 있어서 핵심적인 소재기술이 되고 있다.

열전도도 저감에 의한 효과와 더불어 열기전력(제벡계수) 상승효과에도 나노기술이 적용되고 있다. 저차원 나

노구조의 상태밀도 (DOS: Density of State) 특성을 가지는 열전소재 개발이나, resonant state<sup>14)</sup> 등을 이용한 상태밀도 특성 변화 등의 연구 결과들이 보고되고 있다. 열기전력 상승을 위한 또 다른 방법으로 최근 들어 carrier filtering<sup>15)</sup>을 이용한 열전소재 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이는 열전소재 내에서 분산된 나노입자를 활용하여 낮은 에너지를 가지는 전하를 산란시키는 효과로 열기전력의 상승을 유도할 수 있다.

현재 열전소재의 모듈화 및 상용화를 위해서 상온 및 중·저온 영역(300~500K)에서는  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 계가 사용되며, 중·고온 영역(900K 이하)에서는 Skutterudite계,  $\text{PbTe}$ 계, Half-Heusler계 및 silicide계, 고온영역(900K 이상)에서는 산화물계와  $\text{SiGe}$ 계 열전소재가 주로 연구되고 있다. 현재 많이 상용되고 있는 대부분의 열전소재는 Bi, Te 등의 희소원소 및 Pb 등의 독성원소를 포함하고 있어, 이를 대체할 수 있는 신조성 열전소재의 개발과 기존 고온 열전소재의 열적 안정성 향상을 위한 개발이 요구되고 있다.

### 3. 열전변환 R&D 동향

국내에서는 2009년도부터 한국세라믹기술원 주관으로 “차세대 열전반도체 고차 나노구조 소재기술 개발” 사업을 통해 상온 영역의  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 에서부터 고온영역의 산화물계 소재에 이르기까지 전 온도범위에 걸친 열전소재의 나노구조 제어기술을 통한 열전성능 향상을 연구하고 있다. 또한, 2011년부터 진행되고 있는 한국전기연구원 주관의 “격자모듈레이션을 통한 양자 제어형 열전소재 개발” 사업은 매트릭스 내에서 나노산란자의 격자모듈레이션 기술을 적용하여 열전소재의 성능향상을 목표로 연구되고 있다. 포논 제어를 위한 “포논 제어기반 고효율 열전 소재 및 소자 개발” 사업은 이화여자대학교 주관으로 2011년부터  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 계,  $\text{In}_4\text{Se}_3$ 계, 산화물계 나노구조화 벌크 열전소재 및 나노스케일 열전 물질추정 기술을 개발하고 있다. 중·고온용 열전발전 모듈 기술은 한국전기연구원과 한국세라믹기술원을 중심으로 개발되고 있으며, 개발된 모듈은 세계적 수준의 출력( $\sim 10\text{kW/m}^2$ )과 효



**Table 1. 국내 기관별 연구현황**

기관명	연구 분야
대구경북과학기술원	강자장을 이용한 배향성 Bi-Te계 열전소재 및 모듈
계원연구소	Bi-Te계 열전분말제조, 냉각용 열전모듈
포항공과대학교	Silicide계 중-고온용 열전소재
한국과학기술연구원	후막형 열전소재, Bi-Te계 열전소재, 냉각용 열전모듈
한국기계연구원	MEMS기술을 이용한 초소형 열전소재
한국세라믹기술원	Bi-Te계/Skutterudite계(Zn-Sb계)/Half-Heusler계/산화물계 열전소재와 산화물계 및 Skutterudite계 중-고온용 열전모듈개발
한국전기연구원	Telluride계 중-저온용 열전발전 소재 및 시스템 개발
한국전자통신연구원	실리콘 나노선 열전소재, 실리콘 기반 이중절연형 열전소재 및 소자
한국표준과학연구원	나노열전소재 성능평가, 전기도관 계층 나노열전소재
한국화학연구원	초박막/박막형 열전소재
한국에너지기술연구원	열전발전 시스템
강원대학교	Bi-Te계/Half-Heusler계 열전재료
고려대학교	Pb-Te계 열전재료
경희대학교	In-Se계 중온용 열전재료 결정성장
부산대학교	Bi-Te계 상온용 열전분말 합성 및 성형
연세대학교	나노와이어 열전재료, Silicide계 열전재료
서울대학교	SrTiO <sub>3</sub> 계 산화물 열전반도체 및 박막 제조
성균관대학교	Telluride계/Skutterudite계 열전재료 개발
세종대학교	산화물계 열전재료
충북대학교	열전발전 회로 설계 및 차량용 열발전기 시스템
한국과학기술원	스핀트론 프리질 공정기술 이용 열전소재
한국교통대학교	Telluride계/Silicide계/Skutterudite계 열전재료
한국기술교육대학교	Silicide계/Bi-Te계 열전재료
한서대학교	Zn-Sb계 중온용 열전재료
홍익대학교	Bi-Te계 상온용 나노복합체 열전재료
뉴텔	열전발전 소자 개발
리빙필	냉각 및 발열용 차량용 열발전기 시스템
(주)씨애펜	열전모듈 및 냉각 시스템 개발
삼성전자	전자제품 폐열용 열전소재 선물질 및 공정
(주)피씨텍	열전소재 및 관련장비
에이스텍	냉각용 열전모듈 조립
계원	상온용 냉각모듈/시스템, 중-고온용 열전발전 시스템
LG 화학	Bi-Te계/Skutterudite계 열전재료
LG 이노텍	열전 모듈 개발
HTTT	열전소재 설계 및 응용 제품 개발
최성급속	열전냉각 및 발전용 재료 합성
대양	열전 소재 및 모듈 개발

율(~10%)에 근접해 있다. 상용화를 위한 모듈의 온도 및 기계적 안정성과 신뢰성 향상을 위한 기술 개발이 진행되고 있다. 최근 들어, 열전변환기술의 새로운 시장 창출 가능성이 높기 평가되면서 미래부 및 산업부 등 정부차원에서의 지원으로 다양한 형태로 열전변환기술 중·대형 과제 수행이 이루어지고 있다. Table 1은 현재 국내에서 열전관련 연구가 진행되는 기관별 연구현황을 나타낸다.

미국의 열전관련 R&D는 주로 자동차와 관련된 것이 특징으로, DOE-VTP program은 연비 5% 상승이 가능한 Amerigon사의 600W급 열전모듈을 GM, Ford, BMW 등 각 자동차 회사의 다양한 모델로 적용을 시도하고 있다. 또한, 전기자동차 공조시스템(HVAC, Heating, ventilation, air conditioning), 전기자동차 battery 과열 방지 시스템, 열전냉각방식 차량용 편의장치 개발 역시 DOE 후원으로 진행되고 있다. Army Research Laboratory에서는 작전지역에서 개인 병사에게 필요한 전력을 미 군용 유인 JP-8의 연소열을 활용하여 열전발전을 통해 구현하는 연구와 함께, 열전냉각을 통해 무인기의 적외선을 차폐하는 연구를 진행하고 있다.

EU의 열전 R&D 경우 2010년부터 진행된 FP7-NMP project는 나노입자 합성 및 나노 복합체 기술에 기반을 둔 열전기술에 대한 연구과제로 1)산업화를 위한 저비용

열전소재 공정기술 개발, 2)나노구조화 silicide계 등 기존 희소원소 대체 열전소재 개발, 3)자동차 및 산업폐열용 kW급 converter 개발, 4)후막형 열전소재 개발 등의 연구를 진행하고 있다. 독일에서는 2009년부터 DFG priority program인 “Nanothermoelectric” 사업을 통해 1)이론적 계산, 2)나노기반 소재합성 및 3)열전특성 평가 기술에 대한 종합적 연구개발을 수행중에 있다.

일본 산업기술종합연구소와 야마구치 대학, KELK, DENSO 사 등은 2009년부터 진행된 NEDO project인 “Development of Nano-structured Thermoelectric Materials using Clathrates”를 통해 저장도 열원에서 발생하는 200 ~ 300 °C의 폐열을 활용하여 160W 급의 열전변환장치를 개발하였다. 2008년도부터 나고야 대학 주관으로 진행 중인 JST-CREST project인 “Development of high-efficiency thermoelectric materials and systems”은 1) 유해원소 배제, 2)희소원소 배제, 3)저가, 4)넓은 사용온도가 구현된 신규 열전소재 및 모듈 개발에 대한 연구를 진행하고 있다. 최근 일본 경제산업성은 2014년부터 10년 동안 TherMAT (Thermal Management, Materials and Technology Research)이라는 국가 프로젝트를 통해 에너지 소비를 최소화하고 미이용 열에너지의 혁신적 활용 기술 개발을 진행하고 있으며, 8개의 세부 프로젝트에 열전변환기술 개발이 포함되어 있다.



**Fig. 6. Peltier 효과를 이용한 열전소재의 성능지수에 따른 열전 냉각 모듈 및 시스템의 응용분야.**



### 4. 열전 응용

#### 4.1. 열전냉각 응용

열전냉각은 Peltier 효과를 이용하여 전위차에 의해 전하가 열을 가지고 이동하여 열전재료 양단에 온도차를 발생시키는 기술로, 열전냉각 뿐만 아니라 열전 가열에도 활용이 가능하다. 응용 소재로는 현재 주로 Bi-Te계 열전소재가 냉각모듈로 상용화되고 있다. 열전모듈 및 시스템의 효율은 열전소재의 성능지수에 따라 결정되기 때문에 그에 따른 응용분야도 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 소재의 성능지수에 따라 다양하게 결정된다. 열전냉각은 컴프레서와 냉매를 필요로 하지 않는 고체 냉각방식으로 무소음, 무진동, 무냉매, 정밀 온도제어, 소형화 등의 장점을 가지고 있으나, 낮은 냉각효율로 인하여 냉장고, 에어컨 등의 범용 냉각에는 아직 적용되지 못하고 있다. 최근 들어, 정수기, 와인 셀러, 산업용 정밀냉각기 등 기존에 사용되던 틈새 냉각시장 이외에 자동차용 냉난방시트 및 냉각 컵홀더 등의 새로운 응용의 상용화가 시작되고 있으며, 미국 Amerigon사 등 열전 냉각분야에서만 1000억 원 이상의 매출을 올리는 회사들이 출현하고 있다. 또한, 전기자동차의 경우 기존 방식의 냉난방 장치 사용 시 주행거리가 현저히 줄어드는 단점이 있으므로, 이를 열전 공조방식을 적용하여 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 전기자동차 배터리의 과열을 방지하는 안전장치에 대한 연구도 함께 진행되고 있다. 이와 같이 열전 냉각기술은 다양한 분야에서 활발히 산업화가 진행되고 있으며, 향후 범용 냉각 구현을 위하여는 저항 손실이 적은 고효율 열전 냉각용 소재의 개발을 통한 냉각 성능의 향상이 필수적이다.

#### 4.2. 열전발전 응용

자연에 존재하는 모든 생물체와 무생물체의 움직임과 상태변화에는 열에너지가 소모되거나 방출되는 것이 자연의 법칙이다. 따라서, 우리 주위에는 실제로 상당히 많은 열에너지원이 존재하고 있다. 일반적으로 자연계는 닫힌계(closed system)가 아니므로 열역학 제2법칙에 따라 역학적 일은 같은 값의 열에너지로 바꿀 수 있지만



Fig. 7. Seebeck 효과를 이용한 열전발전 응용.

대로 열에너지는 전부 역학적 에너지로 전환할 수 없다. 그러므로, 우리가 생활하고 생산하는 모든 부분에서 열에너지가 낭비되고 있는 것이다. 실제로 인간이 방출하는 인체열, 열에너지를 1차 에너지원으로 사용하는 장치나 설비, 2차적으로 발생하는 에너지가 열에너지로 생성되는 장치나 설비 등에서 광범위한 열에너지가 버려지고 있다. 이렇게 낭비되는 열에너지를 회수하여 고상변환을 통해 발전을 할 수 있는 유일한 기술이 열전발전(thermoelectric generation) 기술이다. 열전냉각은 Peltier 효과를 이용하여 전위차를 온도차로 바꾸는 방식인데 반해, 열전발전은 Seebeck 효과를 활용하여 온도차를 전위차로 바꾸어 전기를 생산하는 기술로, 산업 폐열, 수송 배열, 인체열, 태양열, 지열 등 다양한 형태로 분산되어 존재하는 광범위한 온도의 열원에 적용이 가능하다. 열전발전은 열전냉각과 달리 응용분야의 폐열의 온도에 따라 적절한 열전소재가 결정되어지며, 특히, 고온용 열전소재의 경우 고온 안정성이 문제가 되고 있어 보다 넓은 응용범위를 위해서는 열전소재 및 모듈의 고온 안정성 확보가 요구되고 있다.

##### 1) 수송폐열 활용

자동차, 선박, 항공기 등 수송폐열 열전발전은 각국의 연비 규제와 CO<sub>2</sub>배출 규제로 인하여 열전 에너지 하베스팅 분야 중 가장 산업화에 근접하고 있으며, 자동차에서 연료의 1/3 정도만이 기계적 에너지로 주행에 사용되고 있으며, 2/3 가량은 폐열로 버려지고 있다. 이러한 폐



열을 활용하여 전기를 생산하여 연비를 향상시키려는 연구가 전세계 주요 자동차 회사 및 부품회사를 중심으로 진행되고 있으며, BMW, GM, Ford사는 모두 현재 600W 급 자동차 폐열 열전발전 시스템 개발을 완료하였으며 실제 차량에서 주행특성을 검증하는 단계에 돌입한 것으로 알려져 있다.

독일 BMW사는 미국의 열전 모듈회사인 BSST사와 함께 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계 열전모듈을 BMW 5-series에 적용하여, 250°C 미만 폐열의 열전변환을 통해 5%의 연비상승이 가능함을 발표하였다. 미국 GM사는 보다 고온 영역에서 작동하는 Skutterudite계 열전소재를 개발하고 있으며, 이는 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계 열전소재에 비해 가격이 저렴하다는 장점이 있으나 모듈화 관련 기술에는 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 하지만, 최근 미국 JPL, 독일 Fraunhofer, 중국 SICCAS, 한국세라믹기술원에서 Skutterudite계 열전발전 모듈의 상용화 가능성이 발표되고 있어 보다 더 다양한 온도영역의 폐열을 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 상용화를 위해서는 자동차의 각종 전자 및 편의기기 운용에 필요한 수준인 1 kW급의 자동차 폐열 열전발전 시스템(현 수준 600W급)의 개발이 필수적이며, 관련 기술들이 미국 DOE(Department of Energy)의 후원으로 개발되고 있다. 또한, 미국 DOE의 열전반도체 개발 로드맵에는 자동차의 폐열을 이용해서 10~35%의 연비향상을 목표로 하고 있다. 한국에서는 최근 현대자동차가 연비향상을 위한 열전발전 시스템 개발에 박차를 가하고 있다.

### 2) 산업폐열 활용

Showa Denko 사에서는 Skutterudite계 열전모듈로 폐기물 소각로에서 발생하는 중·고온 영역의 폐열(750K 이하)을 활용하여 24 kW/m<sup>2</sup>의 출력과 6.2% 효율을 보고하였으며, Komatsu 사에서는 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계 열전모듈로 Gas 반응로의 중·저온 영역(500K 이하) 폐열을 열전변환하여 10 kW/m<sup>2</sup>의 출력 달성을 발표한 바 있다. Showa Cable Systems에서는 산화물계 열전모듈로 구리 cable 생산 시 발생하는 고온의 폐열(1000K 이상)을 활용한 열전발전 연구를 진행하고 있으며, 2012년에는 고온의 제철

소 폐열을 활용하여 열전발전을 구현하는 새로운 NEDO project가 신일본제철, KELK사, 홋카이도 대학의 참여로 시작되었다. 산화물계 열전소재는 고온 안정성, 사용 원소의 풍부성, 저렴한 가격 등의 장점에도 불구하고 상대적으로 저온영역 열전소재인 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계, Skutterudite계, PbTe계 소재에 비하여 열전변환 성능이 현저히 떨어진다는 단점이 있어 산업화를 위하여 소재개발이 시급한 상황이다.

최근들어 환경 및 에너지 문제로 인하여 그린에너지와 에너지 효율이 강조되고 있어 기업들은 공장설립에 있어서 에너지 재활용을 통한 에너지 효율 증대에 노력하고 있다. 따라서, 에너지 손실의 주범인 산업폐열을 이용한 열전발전 기술의 개발이 수요기업을 중심으로 더 많은 관심을 갖기 시작하였다.

### 3) 자연열/인체열 활용

태양으로부터 전달되는 에너지 중에서 가시광선 부근의 파장은 현재 태양전지 기술을 통해 이용하고 있으나, 전체 에너지의 42%에 해당하는 적외선 영역의 파장은 대부분 버려지고 있으며, 이를 태양열 열전발전을 통해 활용하려는 시도가 진행되고 있다. 일본의 JAXA는 중국의 상해규산염연구소와 공동으로 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계 열전모듈에 Fresnel lens로 집열하여 작동하는 태양열 열전발전 시스템 개발을 진행하고 있으나, 현재까지 열저항 등의 기술적 문제로 인하여 0.65 W의 출력을 보고하고 있다. 한편, 최근 미국 MIT의 Solid State Solar Thermal Energy Conversion Center(S3TEC)에서는 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>계 열전소재를 적용하여 4.6%의 태양열 열전에너지 변환효율을 보고하



Fig. 8. KAIST에서 개발한 flexible 열전소자 (웨어러블 열전소자; 유네스코가 선정한 Netexplor Award winners 2015)





였으며, 향후 집광 및 열전 소재의 효율 상승을 통해 10% 이상의 태양에너지 변환효율이 달성 가능함을 제시하였다. 또한, MIT와 Boston college의 열전기술을 바탕으로 GMZ Energy사를 설립하여 태양열 열전발전을 통해 온수와 전기를 가정에 공급하는 시스템의 상용화를 준비하고 있다.

덴마크의 IMEC는 상온과 인체열 간의 온도차를 활용한 열전발전으로 100  $\mu$ W 급의 열전발전이 가능함을 보였으며, 센서, 소형 전자기기 등의 자가발전 전원으로 활용을 시도하고 있다. Fig. 8에서 보여 주듯이, 최근 한국 과학기술원(KAIST)에서도 인체열을 이용한 flexible 열전발전 시스템을 위한 요소기술을 개발하였다. 일본, 러시아, 미국, 유럽에서는 인체열, 태양열, 지열 등 자연에너지원을 활용한 발전뿐만 아니라, 태양전지, 연료전지, 원자력 등과 결합한 하이브리드형 발전을 다각적으로 시도하고 있다.

### 5. 결론

열전변환은 열-전기 에너지를 고상변환을 통해 자유롭게 변환할 수 있는 유일한 에너지 기술이다. 고체 내에서 열과 전기에너지의 변환이 일어나는 특성 상, 고효율 열전소재의 개발이 열전변환 효율을 좌우하게 된다. 고효율 열전소재 개발을 위해서는 열전소재의 결정구조의 제어와 더불어 나노구조 제어기술이 필수적이며, 나노구조에서 나타나는 특성을 벌크체에서 발현할 수 있는 나노구조화 벌크 열전소재 기술 개발이 관건일 것이다.

현재 우수한 특성을 나타내는 열전소재의 경우 대부분 희소원소 또는 독성원소를 사용하고 있으므로 이를 대체할 수 있는 반도체화합물이나 산화물계와 같은 자연친화형 무독성 열전소재의 개발이 필수적이다.

열전냉각에 있어서 현재 상용되고 있는 열전냉각 소재의 성능지수 향상뿐만 아니라, 재현성 및 양산성 향상을 위한 기술개발이 요구되어 진다.

사용온도에 따라 서로 다른 열전소재가 적용되는 열전발전의 특성 상 세계적으로 개발경쟁이 치열한 상온 및 중·고온용(650-900K) 열전소재 개발과 더불어 중·저

온(500K 이하) 및 고온용(1000K 이상) 열전소재의 개발이 병행되어야 할 것이다.

시장성과 열전소재의 개발 특성 상 열전냉각 모듈에 비해 열전발전 모듈의 개발이 많이 이루어지지 않았다. 하지만, 중·고온용 열전소재의 성능지수 향상으로 열전발전의 효율이 증가함으로써 산업폐열, 수송폐열, 자연열 등의 광범위한 온도 영역의 폐열을 활용한 발전이 가능하게 되어 열전발전 모듈 및 시스템 개발이 앞으로 열전 시장을 선도하게 될 것이다.

가까운 미래에 수송/산업폐열을 이용한 kW급 열전발전과 함께 IoT응용을 위한  $\mu$ W~mW급의 극미소 전원의 상용화가 전망된다. 따라서, 나노제어기술을 통한 열전소재 기술의 개발과 함께 신재생 에너지원으로서의 역할은 물론 앞으로 도래할 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대의 IT(Information Technology)와 BT(Bio Technology) 등에 사용될 전자기기나 바이오 센서와 같은 디바이스에 마이크로 전원으로의 확장 가능성이 기대되고 있다.

화석연료의 고갈에 따른 대체 에너지 문제와 온실가스 배출로 인한 지구 환경문제로 인해 미국의 에너지 정책을 비롯해 세계 선진국들의 “녹색에너지 정책”의 일환으로 신재생 에너지 및 에너지 효율에 대한 문제가 이슈화되고 있다. 열전 발전 시스템은 독립 발전으로서의 사용뿐만 아니라, 버려지는 열에너지를 재활용하는 측면에서 타 발전시스템의 보조 시스템으로써 에너지 효율을 높일 수 있다는 점에서 그 파급효과는 상당할 것으로 보인다. 또한, 열전 에너지변환 기술은 열전소재의 임계성능이 향상됨에 따라 전 산업에의 적용 가능성이 높아지고 기존 시장에 더하여 잠재시장의 형성과 함께 급격한 시장 성장이 예측되고 있다.

### 참고문헌

1. N. Lu and I. Ferguson, “III-nitrides for Energy Production: Photovoltaic and Thermoelectric Applications,” *Semicond. Sci. Technol.*, **28** 074023 (2013).
2. S. Lee, J. A. Bock, S. Trolier-McKinstry, and C. A. Randall, “Ferroelectric-thermoelectricity and Mott Transition of Ferroelectric Oxides with High Electronic Conductivity,” *J. Euro. Ceram. Soc.*, **32** 3971-88 (2012).
3. A. F. Ioffe, *Physics of Semiconductors*, Academic Press,



- New York, 1960 (translated from Russian, Fizika Poluprovodnikov, Russian Academy of Sciences, Moscow, 1957).
4. R. Franz and G. Wiedemann, "Ueber die Wärme-Leitungsfähigkeit der Metalle," *Annalen der Physik (in German)*, **165** [8] 497-531 (1853).
  5. A. F. Ioffe, "On Thermal Conduction in Semiconductors," *Del Nuovo CIMENTO*, 3, supplement 4, 702-15 (1956).
  6. G. A. Slack, in *CRC Handbook of Thermoelectrics*, edited by D. M. Rowe (CRC, Boca Raton, 1995) pp. 407-440
  7. J. P. Heremans, M. S. Dresselhaus, L. E. Bell, and D. T. Morelli, "When Thermoelectrics Reached the Nanoscale," *Nature Nanotech.*, **8** 471-73 (2013).
  8. K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J. S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. K. Polychroniadis, and M. G. Kanatzidis, "Cubic  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$ : Bulk Thermoelectric Materials with High Figure of Merit," *Science*, **303** 818-21 (2004).
  9. H. Li, X. Tang, Q. Zhang, and C. Uher, "High Performance  $\text{In}_x\text{Ce}_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$  Thermoelectric Materials with in situ Forming Nanostructured InSb Phase," *Appl. Phys. Lett.*, **94** 102114 (2009).
  10. W. Xie, X. Tang, Y. Yan, Q. Zhang, and T. M. Tritt, "Unique Nanostructures and Enhanced Thermoelectric Performance of Melt-Spun BiSbTe Alloys," *Appl. Phys. Lett.*, **94** 102111 (2009).
  11. X. Shi, J. Yang, S. Bai, J. Yang, H. Wang, M. Chi, J. R. Salvador, W. Zhang, L. Chen, and W. Wong-Ng, "On the Design of High-Efficiency Thermoelectric Clathrates through a Systematic Cross-Substitution of Framework Elements," *Adv. Funct. Mater.*, **20** 755-63 (2010).
  12. 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).
  13. 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** [6230] 109-13 (2015).
  14. J. P. Heremans, B. Wiedlocha, and A. M. Chamoire, "Resonant Levels in Bulk Thermoelectric Semiconductors," *Energy Environ. Sci.*, **5** 5510-30 (2012).
  15. M. S. Dresselhaus, G. Chen, M. Y. Tang, R. G. Yang, H. Lee, D. Z. Wang, Z. F. Ren, J. P. Fleurial, and P. Gogna, "New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials," *Adv. Mater.*, **19** [8] 1043-53 (2007).

## ●● 이순일



- 2006년 미국 Pennsylvania State University 재료공학과 박사
- 2006-2013년 미국 Materials Research Institute (Penn State University) Post-doc/연구원
- 2013-현재 한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 선임연구원
- 2015-현재 창원대학교 신소재공학부 겸임교수

## ●● 서원선



- 1992년 일본 University of Tokyo 공업화학과 박사
- 1992-1999년 일본 Nagoya University 조교수
- 1999-2000년 일본 Nagoya University 부교수
- 2000-현재 한국세라믹기술원 에너지환경소재본부장/수석연구원