

열전발전 기술의 현황

이재광^{*,§} · 김진원^{*,§} · 이재영^{*,**,***,†}

*광주과학기술원 차세대에너지연구소 화학전지연구센터,
광주과학기술원 지구·환경공학부, *광주과학기술원 Ertl촉매연구센터
(2016년 7월 4일 접수, 2016년 7월 6일 심사, 2016년 7월 7일 채택)

Current Status of Thermoelectric Power Generation Technology

Jae Kwang Lee^{*,§}, Jin Won Kim^{*,§}, and Jaeyoung Lee^{*,**,***,†}

**Center for cHemical Energy Storage System, Research Institute for Solar and Sustainable Energies,
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju 61005, South Korea*

***School of Earth Sciences and Environmental Engineering, GIST, Gwangju 61005, South Korea*

****Ertl Center for Electrochemistry and Catalysis, GIST, Gwangju 61005, South Korea*

(Received July 4, 2016; Revised July 6, 2016; Accepted July 7, 2016)

초 록

인구 증가와 문명 발전에 따른 에너지 고소비형 사회로 진행됨에 따라 기존에 사용하던 에너지원의 고효율화 방안이 강구되고 있다. 이 중 열에너지 고효율화 방안으로 열전발전 기술이 주목을 받고 있다. 현재 열전발전 분야는 나노기술 등이 발전함에 따라 폐열회수 분야 등에서 충분한 경쟁력을 가질 수 있는 $ZT > 2$ 를 도달하였고, 더 높은 효율을 갖는 소재 개발 연구가 진행되고 있다. 본 총설에서는 현재 진행되고 있는 온도영역별 열전발전 소재 개발 및 모듈 기술에 대해 간략히 소개하고자 한다.

Abstract

Following the population growth and civilization, resulted in energy-mass consumption society, research efforts on enhancing efficiency of traditional energy sources has been investigated. Among many alternatives, thermoelectric power generation technologies are highlighted as one of solutions for high heat energy efficiencies. Currently, the research area of thermoelectric power generation has been achieved over two of ZT value, which seems to have enough competitiveness as following the development of nano-technologies, in particular, for waste heat recovery, and the development of thermoelectric materials is still ongoing to obtain higher energy efficiencies. In this review, the recent development of thermoelectric materials and module technologies categorized by different temperature regions was briefly introduced.

Keywords: thermoelectric generation, Seebeck effect, figure of merit, power factor, waste heat

1. 서 론

인구 증가와 문명 발전에 따른 에너지 고소비형 사회로 진행됨에 따라 기존에 사용하던 에너지원인 석유, 석탄과 같은 화석연료가 점점 고갈되고 있다. 이에 따라 화석연료를 대체 또는 보완하기 위한 방안이 강구되고 있으며, 제시되고 있는 방안은 새로운 에너지원의 개발과 기존 에너지원에 대한 효율적인 사용이다. 새로운 에너지원으로는 태양에너지, 풍력, 바이오매스, 지열, 조력, 파도에너지 등과 같은 신재생에너지가 개발되고 있다. 신재생에너지는 공해물질을 배출하지 않는 청정에너지일 뿐만 아니라 안전하다는 점 때문에 관심을 받고

있고, 수요가 빠르게 증가할 것으로 예측되고 있다. 그러나 아직까지 화석연료를 대체하기에는 기술적 한계가 존재하기 때문에 제한적으로 사용되고 있다.

에너지 사용 효율화 방안으로는 전기에너지 저장 기술과 열에너지 저장 및 변환 기술 등이 있다. 전기에너지 저장시스템은 태양광발전과 풍력발전 등에서 생산되는 불규칙적이고 간헐적인 전력을 충·방전을 통해 신재생에너지의 출력을 안정시켜주고, 비피크 시간대에 전력을 저장하여 에너지 이용 효율을 극대화하는 역할을 한다. 대표적인 장치로는 전기를 직접 충전하는 방식인 슈퍼커패시터(super capacitor)와 화학에너지로 저장하는 배터리(battery)가 있다. 슈퍼커패시터는 대용량 충전지 등으로 불리며, 현재 상용화된 슈퍼커패시터는 에너지밀도가 낮아 주로 배터리를 보완하는데 사용된다.

배터리는 화학적 반응을 이용하여 전기에너지를 얻는 직류전원을 말하며, 에너지저장장치(energy storage system, ESS)로 활용되고 있다. 에너지저장장치란 대용량의 과잉 생산된 전력을 배터리에 저장했

† Corresponding Author: Ertl Center for Electrochemistry and Catalysis, GIST, Gwangju 61005, South Korea

Tel: +82-62-715-2440 e-mail: jaeyoung@gist.ac.kr

§ These authors contributed equally.

Table 1. The Temperature of Usable Heat Source

Heat source	Utilization temperature (°C)	Characteristics of heat source
LNG cooling heat	-165 ~ RT	Using temperature difference between LNG cooling heat and room temperature
Ground heat	10 ~ 100	Using warm water heated by hot spring water or ground heats
Temperature difference of sea water	4 ~ 30	Using temperature difference between the bottom and top area of sea
Body heat	30 ~ 40	Utilizing power system for an artificial internal organs
Waste heat on the ships	50 ~ 500	Utilization of hot water or fluids
Solar heat	60 ~ 300	Utilization of solar heat as energy sources (temperature area is various as low/middle/high temperature)
Waste heat of automotives	300 ~ 600	Possible to reduce fuel consumption maximally to 10% by using engine heat or exhaust gas heat in automotives
Nuclear reactor waste heat/ heat from radioisotope	500 ~ 1,000	Utilization of artificial satellite power system by using small nuclear reactor as heat sources Uses for military power system and space probes

low
 middle
 high temperature

다가 필요 시 전력을 다시 사용할 수 있도록 하는 장치를 말하는데, 스마트 그리드(smart grid)와 연계하여 전력을 효율적으로 사용하는데 이용되고 있다. 그러나 현재까지는 초기 설치비용 부담과 상대적으로 낮은 사용기간으로 인해 활성화에 어려움을 겪고 있는 상황이다.

열에너지 저장 및 변환 기술에는 열에너지 저장(thermal energy storage, TES)과 열전발전 기술 등이 있다. 열에너지 저장 장치는 산업 폐열, 지열, 태양열에서 발생하는 열에너지를 그대로 열로 저장해 두었다가 최종 소비처의 용도에 따라 냉난방용 열원으로 공급하거나 전력 생산에 활용하는 시스템이다[1]. 열에너지 저장 시스템은 일반적으로 저장하는 열에너지의 형태에 따라 현열 축열(sensible heat), 잠열 축열(latent heat), 화학열 축열(thermochemical heat)로 구분된다. 현재까지는 현열 및 잠열 축열이 보편적으로 이용되어 왔으나, 최근 화학열 축열 방식이 기존 현열방식 또는 상변화 방식의 열저장과 열사용 시점 불일치에 따른 열손실을 극복하면서 고밀도의 열저장이 가능한 차세대 열저장 방식으로 관심을 받고 있다. 그러나 낮은 효율 및 사이클 안정성 등 극복해야 할 과제가 많이 남아 있다.

열전발전 기술은 열에너지를 유지비 없이 직접 전기에너지로 변환할 수 있는 유일한 방식이다. 전기를 만들 때는 고체상태에서 직접적으로 에너지변환이 이루어지며, 거의 반영구적으로 사용할 수 있고 CO₂ 배출 및 소음과 진동도 거의 없는 매우 친환경적인 미래형 발전 시스템이다[2]. 이러한 열전발전은 Table 1에 나타난 사용 온도별 열원처럼 우리 주변에서 쉽게 찾을 수 있는 무한한 자원인 태양열 및 폐열 등을 활용하기 때문에 실용화 가능성이 매우 큼에도 불구하고, 낮은 효율과 값비싼 소재 및 공정기법의 사용으로 인해 외면받아 왔다. 그러나 1990년대 후반 이후 열전소자에 나노기반 기술이 접목되면서 변환효율이 획기적인 개선이 이루어지면서 다시 주목을 받고 있다[3].

본 총설에서는 열전발전 기술의 특성과 열전발전 소재 및 소자 동향을 살펴봄으로써 열전발전의 경쟁력에 대해 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 열전발전의 개요

열전발전은 고온과 저온 사이의 온도차 때문에 생기는 열에너지의 이동현상을 전기에너지로 변환하는 기술로써, 열전 소재의 양단에 온도차가 존재하면 소재 내부의 전자(electron) 또는 정공(hole)이 평균

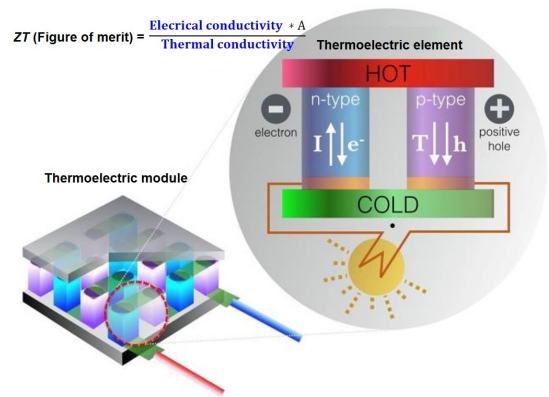


Figure 1. Schematic of a thermoelectric generator module.

적인 페르미(Fermi) 에너지 준위보다 높은 상태로 존재하게 됨에 따라 저온부로부터 확산하면서 발생한다. 이에 따라 저온부는 -로 하전되고 고온부는 +로 하전되어 재료의 양단 사이에 전위차(V_s)가 발생하며, 폐회로 내에 발생하는 열기전력에 의해 전류가 흐르는 현상이 일어난다. 이를 Seebeck효과(Seebeck effect)라 한다.

이러한 열전 원리는 1821년 독일의 물리학자 Thomas Johann Seebeck이 이종 금속을 접합시킨 폐회로 접합부에 온도차를 주면 자침의 회전 현상이 발생하는 것을 확인하였고, 각종 금속의 접합에 대해 그 효과를 정리하여 발표하면서 알려졌[2,4]. 1909년부터 1911년 사이에 독일 물리학자이자 수학자인 Edmund Altenkirch는 열전 현상의 변환 효율과 냉각효과에 대한 이론을 도출하였고, 1929년 러시아의 물리학자 Abram F. Ioffe는 주기율표의 II-IV족, IV-VI족 및 V-VI족 원소를 화합물 반도체 형태로 사용한다면 열전의 변환효율을 비약적으로 향상시킬 수 있다는 이론을 발표하였다. 이후 1950년대에 반도체 소재인 Bi₂Te₃가 발견되면서 열전 연구가 활발히 진행되다가 1960년대부터 2000년까지 무차원 성능지수(dimensionless figure of merit)가 1 이하인 암흑기에 접어들었다. 이후 2000년대부터 나노기술이 발전함에 따라 새로운 열전 구조 등이 개발되면서 현재에 이르고 있다.

앞서 설명한 Seebeck효과를 이용한 열전발전 소자는 Figure 1과 같이 n형과 p형 열전소재를 접합하여 제작하며, 사용 환경에 따라 열전 단위소자를 다양한 형태 및 크기로 배열한 모듈을 제작하여 사용하고

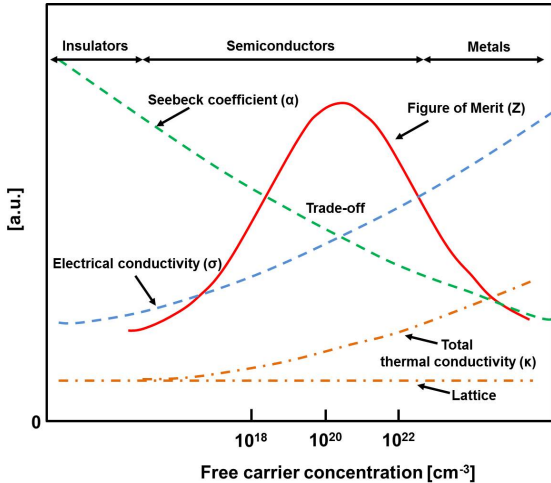


Figure 2. Dependence of Seebeck coefficient α , electrical conductivity σ and thermal conductivity κ on the concentration of free carriers [8,9].

있다. 이런 열전발전 소재의 열을 전기로 변환하는 성능은 열전성능지수(Z, figure of merit)를 이용하여 나타내며, 아래 식 (1)로 정의된다.

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\kappa} \quad (1)$$

여기서 α 는 Seebeck계수(Seebeck coefficient), σ 는 전기전도도, κ 는 열전도도를 나타내며, Seebeck계수(α) 제곱과 전기전도도(σ)의 곱을 power factor라 한다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 열전소재의 Z를 증가시키기 위해서는 Seebeck계수는 커야 하며, 재료의 양단의 온도차를 유지하기 위하여 열전도도는 작아야 되고, 전류에 의한 Joule열의 발생을 최소화하기 위하여 전기전도도는 커야 한다. 그러나 이러한 성능지수를 결정하는 3가지 요소는 서로 연관관계가 있어 독립적으로 제어하는 것은 난해하며, 캐리어의 농도와 이동도를 제어하여 최적의 성능지수를 구해야 한다[5-7]. 그러나 Figure 2에서와 같이 대부분의 열전소재는 전기전도도가 증가하면 열전도도도 증가하기 때문에 두 인자를 서로 독립적으로 제어하여 Z를 개선하는 것에 어려움을 겪어왔다. 1990년도 이전의 경우 열전도도와 전기전도도를 독립적으로 제어할 수 있는 기술의 부재로 열전성능의 향상은 극히 제한적이었으나, 최근 나노기술이 발달함에 따라 열전 변환성능이 크게 향상되고 있다.

Figure 2에서와 같이 Z가 큰 소재는 캐리어 농도가 높은 반도체이나 종류가 다양하고 재료마다 고유의 온도의존성을 가지며, Z의 최대값이 나타나는 온도도 각기 다르므로 이용 대상의 열원 온도에서 Z가 큰 재료를 선택해야 한다. 이렇듯 서로 다른 적용 온도영역에서 적절한 열전발전 소재의 선택하기 위해서는 특성을 비교·평가할 수 있는 지표가 필요하고, Z에 절대온도를 곱한 무차원 성능지수(dimensionless figure of merit)인 ZT를 도입하여 소재의 성능 척도로 사용하고 있다.

2.2. 열전발전용 소재

Figure 3에 온도 범위별로 현재까지 개발된 대표적인 열전발전 소재군을 분류하였다. 상온~300 °C의 저온영역에서는 Bi₂Te₃를 위시한 V족 telluride계 화합물이 활용되고 있으며, 신재생에너지 시스템 등과 연계하여 에너지 효율 향상을 도모하고 있다. 300~600 °C의 중온

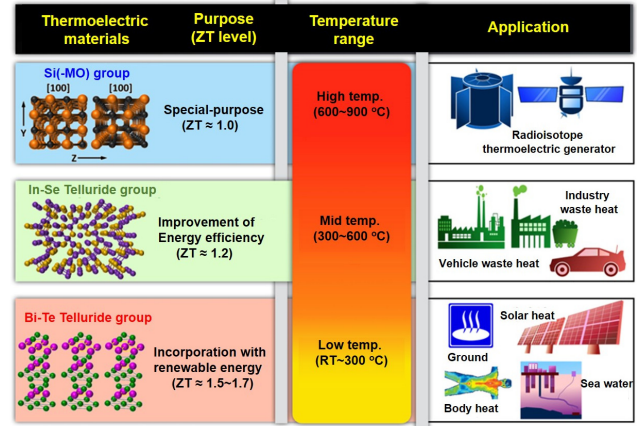


Figure 3. Classification of thermoelectric materials by the temperature range.

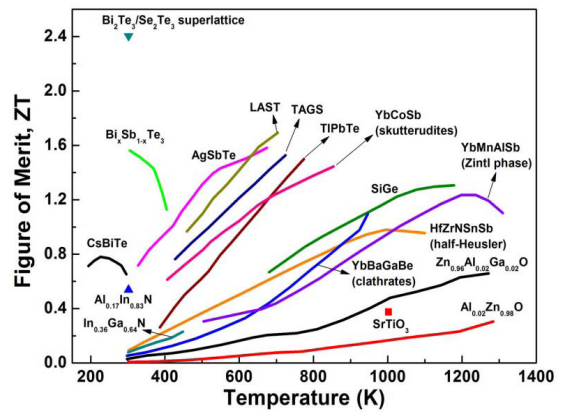


Figure 4. ZT values for various materials from room temperature to high temperature[11,14].

영역에서는 PbTe로 대표되는 IV족 telluride계 화합물이 개발되어 활용되고 있으며, 산업 폐열 및 자동차 폐열을 재이용할 수 있는 에너지 효율 개선용으로 이용되고 있다. 600 °C 이상의 고온영역에서는 silicide계가 우주 산업 등 특수목적용으로 활용되고 있다.

열전 소재 중 가장 많은 연구와 개발이 진행된 소재는 저온영역에서 사용되는 V족 telluride계 화합물이다. 대표적인 열전발전 소재는 Bi₂Te₃로 상온 영역에서 높은 ZT 값을 나타내는 물질로, 대부분의 Bi₂Te₃계 소재의 ZT = 1 수준이다. 현재 ZT를 향상시키기 위한 수단으로 포논의 국소화(localization)를 유발하여 격자열전도도를 저감하는 방법과 페르미 준위(Fermi level) 부근에서 전자상태밀도(density of states, DOS)를 변형을 통해 Seebeck계수를 증가시켜 power factor를 증대시키는 방안이 제시되고 있다[10]. 이런 격자열전도도의 저감과 power factor를 증가시키는 기술로 열전발전 소재의 나노구조화 기술이 제시되고 있다.

Figure 4에서 보는 바와 같이 Bi₂Te₃/Se₂Te₃의 경우 기존의 벌크 구조가 아닌 양자우물 및 전자도트구조와 같은 인공초격자(superlattice) 구조제어를 통해 ZT = 2.4를 구현하였고, 또 다른 V족 telluride계 화합물인 Bi₂Te₃/Sb₂Te₃은 조성을 Bi₂Te₃-66.7 mol%Sb₂Te₃ 조절하여 격자열전도율(κ_{ph})이 최소로 되게 하였으며, Bi₂Te₃/Bi₂Se₃는 나노구조 및 조성을 Bi₂Te₃-20 mol%Bi₂Se₃로 하여 power factor가 최대치에 도달할 수 있도록 하였다. 최근에는 액상 소결법으로 Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃를 제

조하여 고밀도의 전위배열을 입체면에 형성시키는 방법으로 열전도도를 물리적 한계수준까지 낮춤으로써 상온에서 ZT = 2.0 이상인 결과도 발표되었다[11-13].

300~600 °C의 중온영역에서는 주로 IV족 telluride계 물질이 연구되고 있으며, 대표적으로는 Pb-Te계 소재가 있다. 600 °C 이하의 중온영역에서 응용되고 있는 Pb-Te계 소재는 1961년 미국 NASA Transit 4A 미션의 Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)에 열전소재로써 처음 사용되었으며, 2011년 화성탐사선 MSL용 RTG에도 적용되었다. Pb-Te계 열전소재는 도핑원소에 따라 p형과 n형 특성을 나타낸다. 1990년대까지는 n형 및 p형 Pb-Te계 소재 모두 ZT 값은 0.8 정도 수준이었으나, 2000년대에 들어서면서 다양한 구조 등이 개발되면서 ZT 값이 1.5 이상으로 향상되었다. ZT 값이 향상된 배경은 Bi₂Te₃계 소재와 마찬가지로 3가지로 정리할 수 있는데, (i) 나노구조체 도입, (ii) 도핑에 의한 전자구조 변형, (iii) 밴드수렴(band convergence) 효과의 활용이다. Pb-Te계 화합물에서 처음으로 나노구조체 도입을 통해 ZT를 향상시킨 소재는 LAST-m (Lead-Antimon-Silver-Tellurium)으로 불리기도 하는 AgPb_mSbTe_{m+2} 화합물이다. LAST-m은 1~10 nm의 크기 나노구조를 가지며, 물질의 조성이 불균일한 화합물이다. 이러한 불균일한 1~10 nm의 크기 나노구조에서 일어나는 Coulomb force 등의 변화가 power factor와 같은 전기적 특성에 영향을 미쳐 ZT가 상승하는 것으로 판단되고 있다. 그리고 열전전도도 700 K에서 약 0.45 W/m·K인데, 화합물 내 존재하는 나노구조에 따른 포논이 산란되기 때문으로 예측되고 있다[12,14-16].

전자구조의 변화시키는 방법으로는 PbTe에 TI을 도핑한 연구가 진행되었고, 500 °C에서 ZT = 1.5를 구현하였다. PbTe에 TI을 도핑하면 가전자대에 전자 상태 밀도 함수가 변화하고 그 결과 Seebeck계수 향상에 따른 열전특성 개선의 여지가 이론적으로도 제시되어 있다. 최근에는 도핑 원소로 TI을 대체할 수 있는 친환경 원소를 찾는 연구가 지속되고 있다.

밴드수렴(band convergence) 효과란 PbTe에서 유래하였는데, 온도가 상승함에 따라 PbTe의 가전자대(valence band)에 있는 L 밴드와 시그마(sigma) 밴드의 겹침 현상이 일어나면서 각 밴드에 있는 정공이 동시에 수송 특성이 발현하게 되는 것을 말한다. PbTe의 경우 500 K 부근에서 발생하는데, Se와 Na의 도핑을 통해 밴드갭(band gap)과 페르미 준위를 제어하는 방법에 대해 연구가 진행되고 있다.

최근에 보고된 또 다른 중온용 열전소재인 SnSe는 단결정의 경우 최대 773 K에서 ZT 값 2.6을 나타냈다. 이런 우수한 열전 특성은 SnSe에서 발현되는 매우 낮은 열전도도에서 기인한다. 격자열전도도는 격자의 진동의 의해 열이 전달되는 것인데, SnSe의 경우는 한쪽이 뜨거워져 격자가 진동을 하더라도 다른 한쪽이 진동을 하지 않은 채 차갑게 유지될 수 있다. 이렇게 다른 쪽으로 전달되지 않은 열은 전자를 이동시키는 데 활용되기 때문에, 높은 Seebeck계수를 나타낸다[16,17].

고온영역에서 사용되는 실리사이드(silicide)계 열전 소재 관련 연구는 기초연구 및 응용 등 모든 측면에서 일본이 주도하고 있다. 개발 초기에는 미국에 의해 FeSi₂ 소재에 대한 연구들이 수행되었으나 최근에는 친환경성을 장점화한 Mg₂Si계 소재에 대한 연구가 매우 활발하다. 천이금속-silicide계 소재는 일반적으로 원재료비가 저렴하고 고온내산화성 및 강도가 우수하며 열전 특성도 상대적으로 우수하여 고온영역의 열전발전 소재로 사용되어 왔다.

GeSi 화합물은 Si의 고유특성인 power factor를 유지하면서도 격자열전도도를 크게 감소시킬 수 있다. 상온에서 열전도도가 133 W/m·K인 Si를 Ge와의 합금인 Ge_{0.3}Si_{0.7}로 제작하면 10 W/m·K로 크게 감

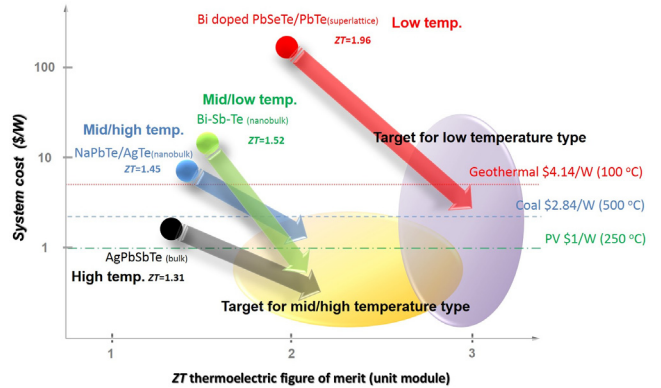


Figure 5. Operating costs of a thermoelectric generator for various materials[18].

소시킬 수 있다. 또한 1100 K에서는 열전도도가 10 W/m·K이며, ZT는 1에 가까운 결과를 얻을 수 있다. 최근에는 Ge와 Si 박막층을 교차로 적층하는 초격자를 제작하여 ZT 값을 향상시키려는 노력을 하고 있다.

2.3. 열전발전 모듈

열전발전 모듈은 p형 열전소재와 n형 열전소재를 Figure 1에서와 같이 접합하여 제작한다. 이때 열전소재 접합부와 각 단자 전극을 고온 및 저온으로 유지시키면 온도차에 의해 n형 열전소재에서는 고온부의 전자(-)가 저온부로 이동하고 고온부의 전위가 높아진다. 또 p형 재료에서는 정공(+)이 고온영역에서 저온영역으로 이동하여 저온부의 전위가 높아진다. 따라서 (p-n)소자를 외부부하(P_L)에 연결하면 Seebeck효과에 의해 기전력(open voltage)이 발생하여 전류가 흐르게 된다. 이때 발생하는 최대 전압과 전류는 각각

$$V = \frac{1}{2} \alpha_{pm} \Delta T \tag{2}$$

$$I = \frac{\alpha_{pm} \Delta T}{2R_L} \tag{3}$$

이므로, 최대 출력(P_{max})은 식 (4)가 된다.

$$P_{max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R_L} \tag{4}$$

열전발전 모듈은 복수개의 p-n쌍을 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결하여 구성하며, 열전발전 효율은 고온부와 저온부의 온도차에 의해 결정된다. 그리고 이중 소재 접합 시 전기저항과 열전달저항을 최소화할 수 있는 접합기술 확보가 매우 중요하다[4,12].

3. 결 론

우리 주변에는 미처 재사용하지 못하고 버려지는 열에너지-산업폐열, 태양열, 자동차 폐열 등-가 많이 있고, 이런 열에너지는 특성상 원거리 수송에 한계가 있어 열원 내 또는 근거리에서 활용 가능한 방안이 필요하다. 그러나 아직도 국내의 (폐)열에너지 활용 움직임은 미비

한 실정이다.

열전발전 기술은 이 문제의 일부분을 해결할 수 있는 솔루션 중 하나이나, 대체에너지로서 열전발전을 이용하기에는 아직도 해결해야 할 문제가 있다. 열전발전 소재의 ZT 향상과 저온영역에 집중되어 있는 연구개발을 중·고온영역으로 확대할 필요가 있으며, 현재 개발된 열전발전 소재의 대부분인 매장량에 한계가 있는 희소원소 또는 중금속과 같은 독성원소를 대체할 수 있는 새로운 소재의 개발도 필요하다. 또한 현재 나노기술 및 박막 기반 소재 기술을 바탕으로 ZT 값 향상에만 집중되어 있는 연구를 nano-engineered bulk 기술 등을 통한 경제성 있는 모듈화 기술로의 전환도 필요하다.

열전발전 기술은 앞서 기술한 기술적인 부분과 Figure 5에 나타난 경제적인 목표 등 아직 해결해야 할 많은 장벽이 있지만, 우리나라가 보유하고 있는 최첨단 반도체 및 태양광 기술과 연계할 경우 열전 소재/모듈화/시스템 분야에서 선진국과의 격차를 빠른 시일 내에 줄여 열전발전 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

이 논문은 2016년도 광주과학기술원의 재원인 GRI (GIST연구원) 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. J. Choi, Development trends of thermal energy storage system, *DICER Report* (2013).
2. S. W. Kim, Nanostructure-based high-performance thermoelectric energy conversion technology, *Phys. High Technol.*, **22**, 10-14 (2013).
3. J. H. We, *Research on essential technologies for thermoelectric power generator using screen printing technique*, Master's Thesis, KAIST, Daejeon, Korea (2012).
4. I. H. Kim, Thermoelectric energy conversion technology, *KIC News*, **16**, 18-26 (2013).
5. D. W. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, 226, CRC Press, NY, USA (1995).
6. K. Uemura and I. Nishida, *Thermoelectric Semiconductor and Their Application*, 145, Nikkan-Kogyo Shinbun Press, Tokyo, Japan (1988).
7. C. Park, *The effect of powder oxidation on thermoelectric properties in sintered Bi₂Te₃-based thermoelectric materials*, Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea (2004).
8. Z. H. Dughaish, Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation, *Physica B*, **322**, 205-223 (2002).
9. E. Y. Jun, *Preparation of PbTe nanomaterials via wet-chemical synthesis for thermoelectric applications*, Master's Thesis, Andong National University, Andong, Korea (2010).
10. K. H. Lee, J. Y. Kim, and S. M. Choi, Recent progress in Bi-Te-based thermoelectric materials, *J. Korean Ceram. Soc.*, **52**, 1-8 (2015).
11. N. Lu and I. Ferguson, III-nitrides for energy production: photo-voltaic and thermoelectric applications, *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 074023 (2013).
12. KISTI, *Development trend of the thermoelectric power generation materials for energy conversion* (2010).
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**, 109-114 (2015).
14. S. Lee and W. S. Seo, Heat-electrical energy conversion technology and applications, *Ceramist*, **18**, 48-55 (2015).
15. MEST, *Recent research trend survey of nano-based materials and devices* (2013).
16. M. Oh, Thermoelectric element latest research and development trends and application technology and market, *Smart Coat.*, **14**, 4-21 (2015).
17. L. D. Zhao, G. Tan, S. Hao, J. He, Y. Pei, H. Chi, H. Wang, S. Gong, H. Xu, V. P. Dravid, C. Uher, G. J. Snyder, C. Wolverton, and M. G. Kanatzidis, Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole doped single-crystal SnSe, *Science*, **351** (6269), 141-144 (2016).
18. S. LeBlanc, S. K. Yee, M. L. Scullin, C. Dames, and K. E. Goodson, Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **32**, 313-327 (2014).