



## 열전 소자 기술

박영삼\* 강상우\*\* 이승윤\*\*\*

인구 증가와 산업 발전으로 인해 인류는 에너지 부족과 환경 오염 문제들에 직면해 있다. 이를 해결하기 위해 근래 많은 과학자들은 기존의 화석연료를 대체할 신규 에너지를 찾기 위한 연구를 많이 진행하고 있다. 이러한 연구결과로서 방사능 열, 자동차 폐열(waste heat), 태양열 등의 복사열, 지열, 체열 등을 전기 에너지로 바꿀 수 있는 열전 현상(thermoelectric effect)을 이용한 전자소자(electronic device)인 열전 소자(thermoelectric device)가 개발되었다. 특히, 방사능 열을 이용한 열전 발전기는 미국 항공우주국(NASA)에 의해 개발되어 우주선에 장착되어 사용 중이며, 세계 유수 자동차 회사들은 미국 에너지부(DOE, department of energy)의 지원 아래 자동차 폐열을 이용한 열전 발전기(thermoelectric generator)를 개발하여 일부 차종에 장착하고 있다. 열전 현상은 그 이름에서 유추할 수 있는 바와 같이 열을 전기로(Seebeck 현상, 열전 발전의 원리), 또는 전기를 열로(Peltier 현상, 열전 냉각의 원리) 바꿀 수 있는 현상을 모두 포함한다. 본 고에서는 열전 현상의 역사와 원리를 소개하고 열전 소자 기술 동향을 다루고자 한다.

목차

I. 서론

II. 열전 현상과 ZT

III. 열전 발전기 개발 동향

IV. 결론

\* ETRI 전력제어소자연구팀/선임연구원

\*\* KRISS 진공기술센터/책임연구원

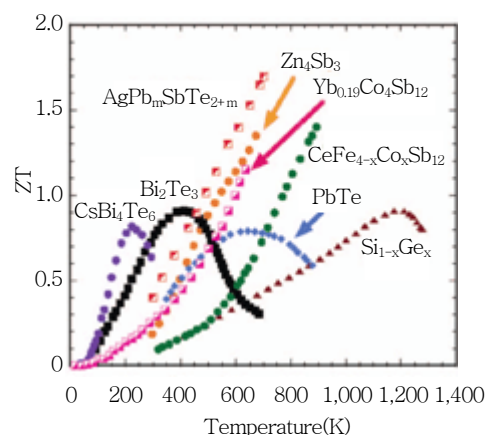
\*\*\* 한밭대학교 신소재공학과/조교수

### I. 서론

열전 현상은 1823년 T. Seebeck에 의해 발견되었다. 이는 1897년 J.J. Thompson의 전자 발견보다도 약 70년 앞선 발견이다. T. Seebeck은 비스무스(Bi)와 구리(Cu)를 연결하고 그 안에 나침반을 배치하였다. 비스무스의 한쪽을 뜨겁게 가열하면 온도 차이로 인해 전류가 유도되며, 이 유도전류로 인해 발생하는 자기장이 나침반에 영향을 끼쳐 나침반이 움직이는 것을 보임으로써 열전 효과를 처음으로 발견하였다. 그의 이름을 따서 이러한 현상을 Seebeck 현상이라고 명명하며 이는 열전 발전의 기초이론이 된다. 이로부터 약 15

년 뒤, H. Lenz 가 두 개의 금속 접합부위(junction)에 물방울을 놓고 전류를 흘렸을 경우에 전류의 방향에 따라서 물방울이 얼기도 하고, 녹기도 하는 것을 발견하였다. 이 현상은 H. Lenz 보다도 몇 년 앞서 J. Peltier 에 의해 발견되었으므로 Peltier 현상이라고 명명되었으며 열전 냉각의 기초이론이 되었다. 열전 현상을 에너지 변환기기에 실제 적용하고자 하는 연구는 T. Seebeck 의 발견 후 약 130 년이 흐른 후, 1950 년경 A. Loffe 에 이르러서야 시작되었다. A. Loffe 는 도핑(doping)된 반도체의 Seebeck 상수가 금속에 비해서 100 배 정도가 큰 것을 관찰하였다. Seebeck 상수는 thermo-power 라고도 불리며, 단위 온도 차당 발생하는 기전력을 의미하고 단위는  $\mu\text{V/K}$  을 사용한다. 즉, 도핑된 반도체를 사용하여서 에너지 변환기기를 제작한다면, 금속으로 만든 에너지 변환기기에 비해서 효율이 100 의 제곱인 10,000 배 정도 더 커질 수 있는 가능성을 보여준 것이다.

열전 효율(thermoelectric efficiency)을 가늠하는 지표로는 ZT(figure of merit) 값이 사용된다. 과학자들은 반도체 물질들에 대한 꾸준한 연구를 통해 각각 체열, 방사능 열 그리고 자동차 폐열을 열원으로 하는 열전 소자들이 시장에 나오게 되었다. 열전 재료의 연구는 1995 년경부터 눈부신 발전을 거듭하여 불과 수년 사이에 열전 성능이 기존의 것에 비해 2~3 배 가량 높은 재료들이 속속 개발되고 있어 열전 기술의 응용성 및 경제성을 높이고 있다[1]~[5]. (그림 1)[6]과 같이 열전 재료는 여러 종류의 재료가 연구되어 있으며 Bi-Te, Pb-Te, Si-Ge 및 Fe-Si 계 합금을 기본으로 하는 재료가 가장 널리 이용되고 있다. 이들 재료는 온도구간에 따라 성능에 차이가 있어 약  $200^{\circ}\text{C}$  이하에서는 Bi-Te,  $500^{\circ}\text{C}$  정도까지는 Pb-Te, 그 이상에서는 Si-Ge 계 특성이 가장 우수하다.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  의 ZT 값은 상온에서는 0.7,  $120^{\circ}\text{C}$ 에서 최대값인 0.9 를 갖는다. SiGe 의 ZT 값은 상온에서는 약 0.1,  $900^{\circ}\text{C}$ 에서 최대값 0.9 를 갖는다. 나머지  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$ ,  $\text{Yb}_{0.19}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ ,  $\text{CeFe}_{4-x}\text{Co}_x\text{Sb}_{12}$  등의 재료들은 문헌상에 보고된 재료들로 초격자(superlattice) 구조를 가지고 있기 때문에 실제 산업으로의 적용에는 어려움이 있다.



(그림 1) 온도에 따른 열전재료의 ZT 값[6]

## II. 열전 현상과 ZT

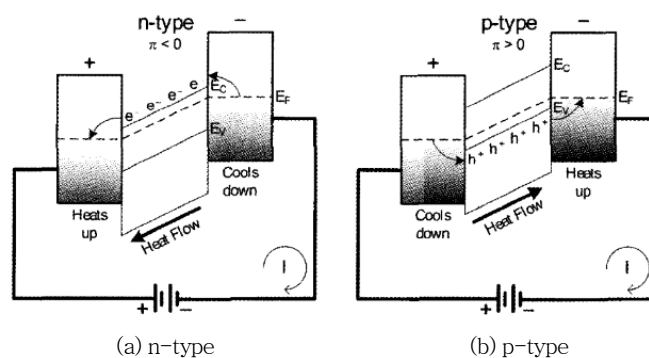
열전 현상 중의 하나인 Peltier 현상의 메커니즘은 다음과 같다. Seebeck 상수( $\alpha$ )와 Peltier 상수( $\Pi$ )는 식(1)과 같은 연관이 있음이 열역학적으로 증명되었다.

$$\Pi = \alpha T \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 절대온도(K)를 나타낸다. Peltier 현상은 단위 전류밀도당 발생하는 열유속(heat flux)이 비례함을 나타내고, 이 비례상수가 Peltier 상수이다.

Seebeck 상수와 Peltier 상수가 비례관계에 있으므로, 본 고에서는 Peltier 현상만 논의하기로 한다. 두 현상의 차이점은 Peltier 현상은 접합부위가 반드시 필요하지만, Seebeck 현상은 단일 도체에서도 발생된다. (그림 2)는 n형 반도체 양단에 금속이 접합되었을 경우의 에너지 밴드 도면(energy band diagram)이다. 전류가 흐르기 위해서는 전자가 금속→n형 반도체→금속의 방향으로 이동하여야 한다. 하지만, 금속에서 n형 반도체로 이동하기 위해서는  $(E_c - E_F)$  만큼의 에너지 장벽(energy barrier)을 넘어야 한다. 그러므로 에너지 장벽을 넘어설 수 있는 만큼 높은 에너지를 가진 전자들만이 전하 이동에 참여할 수 있다.

금속과 n형 반도체 접합부위에서는 높은 에너지를 가진 전자가 없어지게 되므로 접합부위의 온도가 낮아진다. 이것은 마치 더운 여름날 아스팔트 바닥에 물을 뿌리게 되면 물이 증발하면서 열을 가지고 나가므로 온도가 낮아지는 효과(evaporative cooling)와 같다. 이런 이유로, Peltier 냉각효과를 전자증발 냉각(electron evaporative cooling)이라고도 불린다. 같은 이치로, 다른 금속 n-형 반도체 접합부위에서는 높은 에너지를 가진 전자들



(그림 2) Peltier 효과와 energy band diagram

이 모이므로 온도가 높아진다. 즉, 전자가 한 접합부위에서는 열을 가지고 나가서 다른 접합부위에 열을 방출한다. Peltier 현상은 금속과 접합된 모든 반도체에서 나타나는 현상이다. 전자는 이동 시에 전하뿐만이 아니라 에너지를 가지고 이동하기 때문이다. 다만, 실리콘과 같은 반도체에서는 높은 열전도도와 줄열(Joule heat) 발생 때문에 Peltier 현상이 잘 나타나 보이지 않는 것이다.

열전 소자는 위에서 설명한 Peltier 현상을 바탕으로 제작된다. (그림 3)은 열전 소자의 한 쌍(thermoelectric couple)을 나타낸다. 열전 소자 한 쌍의 개수나 혹은 사이즈를 조절함으로써 매크로 크기의 에너지 변환 소자나 그 반대로 마이크로 혹은 나노 사이즈의 에너지 변환 소자를 만들 수 있다. 이러한 스케일의 유연성이 열전 소자의 장점 중의 하나이다. 열전 소자 한 쌍은 (그림 3)과 같이 p 형과 n 형 반도체로 구성된다. pn 접합 반도체와는 달리, p 와 n 형 반도체 중간에 금속 층을 둔다. 그림은 열전 발전소자를 나타낸 것으로 열원(heat source)이 가해지면, p 형 반도체에서는 정공이, n 형 반도체에서는 전자가 그 열에너지를 가지고 열 방출원(heat sink)으로 이동한다. 이들이 이동하면서 외부의 부하에 일을 하면서 열에너지가 전기에너지로 변환되는 것이다. 열전 소자의 또 다른 장점은 그림의 열전 소자를 열전 냉장에도 사용할 수 있다는 것이다. 즉, 열원과 열흡수원(heat absorption)을 제거하고 전류를 흘려주면 열전 냉장이 구현된다.

열전 소자의 효율은  $ZT$  값과 깊은 관련이 있다. 양단의 온도차를 이용한 열전 발전의 최대효율,  $\eta_{\max}$  는 다음과 같이 표현된다.



p-type & n-type legs: thermally in parallel, electrically in series

(그림 3) 개념도

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \left(\frac{\sqrt{1+ZT_m}-1}{\sqrt{1+ZT_m}+\frac{T_C}{T_H}}\right) \quad (2)$$

여기서,  $T_C$  와  $T_H$  는 각각 차갑고 뜨거운 단의 온도를 나타내고,  $T_m$  은 양단온도의 산술평균이다. 식(2)의 왼쪽 괄호는 열역학적 한계를 나타내는 카르노 사이클 효율을 나타낸다. (그림 4)는 동일한  $T_C=300K$  의 조건에서  $ZT$  값과  $T_H$  의 값에 따른 열전 효율 ( $\eta_{\max}$ )의 변화를 나타낸 그림이다.

$ZT_m$  은 다음의 수식으로 표현된다 [7].

$$ZT_m = \left(\frac{\alpha^2 \sigma T_m}{k}\right) \quad (3)$$

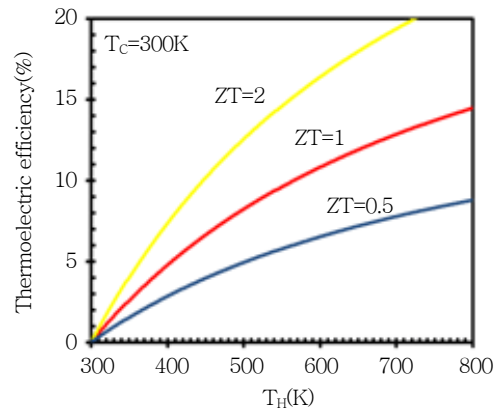
여기에서,  $\alpha$  는 Seebeck 상수,  $\sigma$  는 전기전도도(electrical conductivity) 그리고,  $k$  는 열전도도(thermal conductivity)를 나타낸다. 식(2)에서  $ZT_m$  값이 커질수록 오른쪽 괄호안의 값이 커지게 되어서  $\eta_{\max}$  은 증가한다. 열전 냉장의 최대 성능계수( $COP_{\max}$ , maximum coefficient of performance)는 다음과 같다.

$$COP_{\max} = \frac{1}{\left(\frac{T_H}{T_C}-1\right)} \left(\frac{\sqrt{1+ZT_m}-\frac{T_H}{T_C}}{\sqrt{1+ZT_m}+1}\right) \quad (4)$$

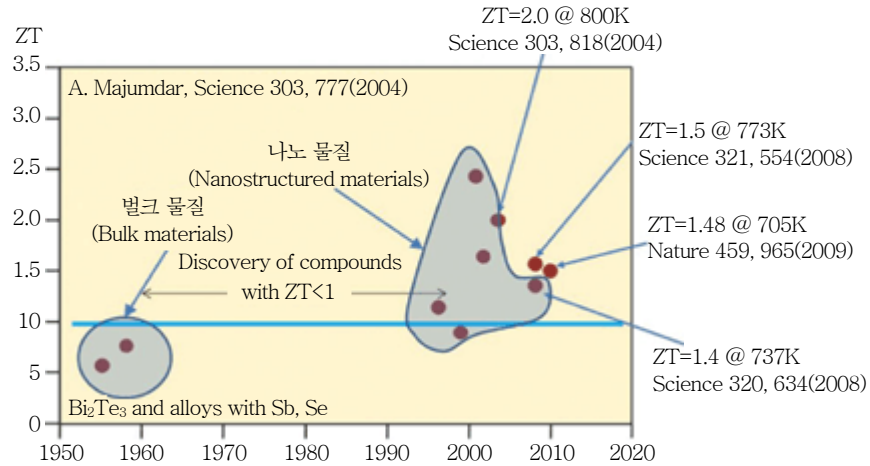
위의 식(4)과 마찬가지로,  $COP_{\max}$  도 양 단의 온도와 열전 성능지수의 함수이다. 이것도 역시,  $ZT_m$  값이 커질수록 증가함을 알 수 있다.

(그림 5)[1],[5],[6],[8],[9]는 연도별로 발표된 상온에서의  $ZT$  값을 나타낸 그림으로 반도체의 최초 응용 분야로서 열전 에너지가 많이 연구된 1950 년대와 1960 년대에 열전 성능지수가 1 정도를 나타내었으나, 그 이후 2000 년대까지 열전 성능지수의 증가가 없었다. 1950~1960 년대에 연구된  $Bi_2Te_3$  계열의 합금 반도체가 현재 상용화된 열전 반도체 소자의 대부분을 차지한다.

1993 년 M. S. Dresselhaus 교수는 나노재료를 사용하면 열전 성능지수를 높일 수 있는 가능성을 보여준 이론논문을 발표하였으며 [10],[11], 이로 인해 식어있었던 열전 반도체에 관한 관심을 다시금 불러 일으켰다.



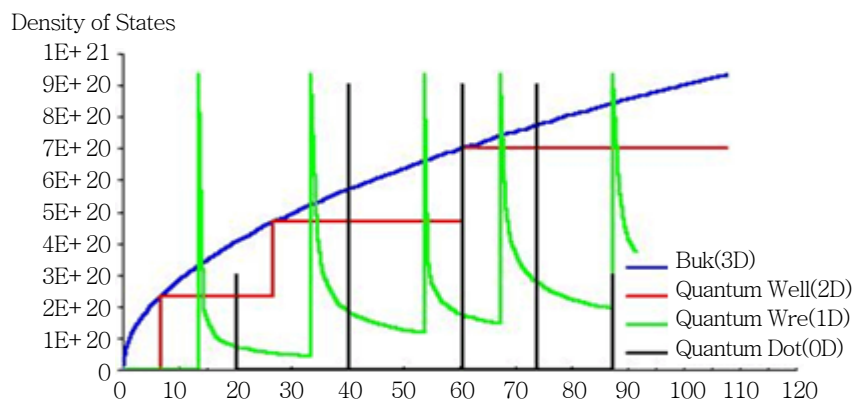
(그림 4) 열전효율



(그림 5) 연도별 상온에서의 ZT 값[1],[5],[6],[8],[9]

M. S. Dresselhaus 교수의 주장에 따르면, (그림 6)에서 density of state 와 에너지 간의 기울기는 Seebeck 상수 값에 비례하는데, 벌크재료(3D, 3-dimensional)에서 나노재료로 감에 따라 전자의 파동함수를 구속하게 되어서, 즉 양자 구속효과(quantum confinement effect)로 인해 에너지 준위가 불연속적이 된다. 따라서 특정 에너지 준위에서의 기울기 값이 증가하며, 이로 인해 Seebeck 상수 값 역시 증가함을 알 수 있다. 실제로, 2000 년 대 경의 갑작스러운 열전 성능지수 향상은 이 논문의 영향을 받은 것들이다.

하지만, 후속 논문들은 나노재료를 사용하여서 향상된 열전 성능지수를 보였으나 열전 성능지수의 분자인 Seebeck 상수를 증가시킨 것이 아니라 분모에 나타난 열전도도의 감소로 인한 열전 성능지수의 증가였다[12],[13]. 따라서 그녀의 주장은 아직도 실험적으로

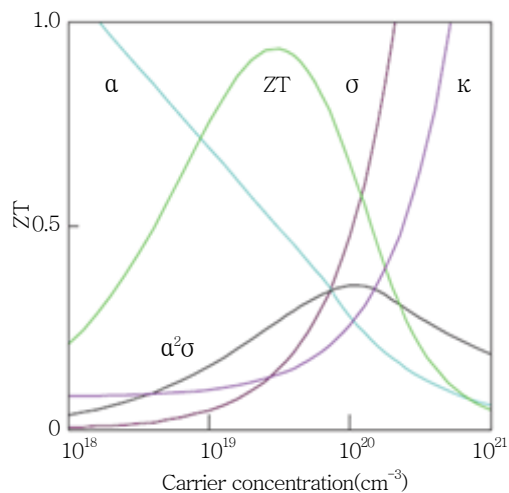


(그림 6) 나노재료에서의 density of state

입증되지 않았다.

최근 금속계, 산화물계 등 기존의 재료에 비해 탁월한 성능을 지니고 있는 재료 개발 결과를 발표하고 있어 열전 기술의 미래에 밝은 전망을 던져주고 있다. 열전 발전이나 열전 냉각에 사용되는 전형적인 벌크 열전 재료로 최근 개발된 것에는  $\text{CoSb}_3$  화합물에 Ce, Pt 등을 첨가한 Skutterudite 계,  $\text{Sr}_4\text{Eu}_4\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$  을 일레로 하는 Clathrate 계 등이 있다. 한편, 일본에서 개발된 코발트, 칼슘의 복합 산화물계는 비록 고온에서 사용해야 한다는 단점에도 불구하고 금속계보다 현저하게 높은 열전 성능을 가지고 있어 열전 발전의 발전에 크게 기여할 것으로 예상되고 있다. 또한, 일본과 러시아 과학자들이 주목하고 있는 소재로  $\text{FeSi}_2$  계 재료가 있다.  $\text{FeSi}_2$  는 그 자체로는 비록 효율이 매우 낮은 재료이지만 가격이 워낙 저가이면서도 적절한 첨가제를 넣어 터널링(tunneling) 현상 등의 신기술을 활용하면 기존의 소재와 유사한 성능을 낼 수 있어 대규모 고열원이 존재하는 철강산업, 화력 발전소 등에서 활용이 기대되고 있다[14].

(그림 7)은 캐리어(carrier) 농도에 따른 ZT 값 변화를 나타낸 그림으로 캐리어 농도가 커질수록 전기전도도와 열전도도는 증가하지만 Seebeck 상수값은 감소한다. 따라서 특정 영역의 캐리어 농도( $10^{19} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$ )에서 ZT 값은 최고치를 갖게 된다. 한편, (그림 7)로부터 ZT 값을 향상시키는 것이 왜 어려운지 알 수 있다. ZT 값을 좌우하는 Seebeck 상수, 전기전도도 및 열전도도는 서로 간의 연관성이 매우 크다. 전자의 수가 늘어날수록 전기전도도는 증가하지만, Seebeck 상수는 감소한다. 이것에 대한 직관적인 이해는 다음과 같다. Seebeck 상수는 Peltier 상수와 식 (2)에 의해서 관련 있으므로 우리는 여기서 Peltier 상수에 관한 이해로 대신하기로 한다. (그림 2)의 도면을 다시 한번 생각해 보면, 전자가 이동하면서 한쪽은 냉각되고 다른 쪽은 온도가 증가된다. 그 이유는 에너지 장벽보다 높은 에너지를 갖는 전자만이 빠져 나가고 전자가 빠져 나간 쪽은 냉각이 되는 원리라고 하였다.



(그림 7) 캐리어 농도에 따른 ZT 변화



만약에 에너지 장벽이 존재하지 않아서 에너지가 높은 전자뿐만이 아니라 에너지가 낮은 전자까지도 전송에 참여하면 온도 차이가 발생하지 않을 것이다. 왜냐하면, 온도와 함은 에너지를 갖는 캐리어(energy carrier)들의 평균 에너지를 뜻한다. 그러므로 전송되어 나간 전자들의 구성비를 살펴볼 때 에너지가 높은 전자들과 에너지가 낮은 전자들의 비율이 각각 1:1 이라면 평균에너지는 변하지 않으므로 온도의 변화는 없다. 즉, 높은 Seebeck 상수를 가지기 위해서는 페르미 준위( $E_F$ )를 기준으로 페르미 준위보다 높은 에너지를 가진 전자들이 대다수 전송에 참여하든지 아니면 그 반대로 낮은 에너지를 가진 전자들이 대다수 움직여야 한다. 이러한 이유로 인해서 캐리어 농도가 증가할수록 페르미 준위와 컨덕션 밴드 에너지준위( $E_C$ ) 간의 차이, 즉 에너지 장벽이 낮아지게 되고 에너지의 높낮이에 상관없이 페르미 준위 근처의 전자들이 전송에 참여하므로 Seebeck 상수가 낮아진다. 하지만, 캐리어 농도가 증가할수록 전기전도도는 증가한다. 이러한 Seebeck 상수와 전기전도도의 전자수의 증가에 따른 상반되는 관계 때문에 Seebeck 상수와 전기전도도를 동시에 증가시키기는 매우 어렵다.  $S^2\sigma$  는 캐리어 농도가  $\sim 10^{20}/\text{cm}^3$  정도에서 최적화된 값을 가진다. 또한, 열전도도는 각각 포논(phonon)과 전자에 의한 부분으로 나뉘는데, 캐리어 농도의 증가에 따라서 전자에 의한 열전도도도 높아지므로 전반적인 열전도도의 증가를 가져온다. 하지만, 경우에 따라서는 캐리어 농도의 증가에 따라서 포논과 전자의 산란이 증가하므로 열전도도가 감소되는 경우도 있다. 위와 같은 이유들로 하여서 ZT 값의 세 가지 변수들, 즉 Seebeck 상수, 전기전도도 및 열전도도를 모두 증가시키기란 어려운 문제이다. 이러한 이유로 (그림 5)와 같이 1950~1960 년대 이후로 열전 성능지수의 향상이 어려웠다. 하지만, 나노 기술의 발달로 인해서 열전 성능지수의 세 가지 변수들을 따로 분리시켜서 증가시킬 수가 있었다. 이것이 2000 년대의 열전 성능지수의 향상을 가지고 온 주된 원인이다.

### III. 열전 발전기 개발 동향

열전 발전(thermoelectric generation) 분야는 기존 발전기에서 필연적으로 발생하는 소음과 기계적 접촉에 의한 부품 마멸이 없다. 또한 각종 산업 폐열과 태양열 등의 자연에너지를 이용하여 전기를 얻을 수 있기 때문에, 환경을 해치지 않으면서 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 에너지 변환 효율이 수 % 수준으로 기존



의 발전방식에 비해 현저히 낮고 열전 변환용 반도체 원료와 열전 모듈을 비롯한 소재 부품의 가격이 비싸다는 점 때문에 실용화에는 많은 제약을 가지고 있다. 그러나 최근 전력 수급이나 공해문제 등이 강하게 대두되고 열전 발전에 대한 관심이 높아짐에 따라 많은 연구가 행해지고 있다. 또한 기존의 한계를 극복하는 신소재들이 속속 개발되고 있어 효율이나 가격 측면에서 점차 경제성을 충족시킬 수 있는 방향으로 개선되고 있으며, 열전 발전뿐만 아니라 열전 반도체를 이용한 각종 센서의 개발 등 여러 분야에서의 응용 방안이 제시되고 있다.

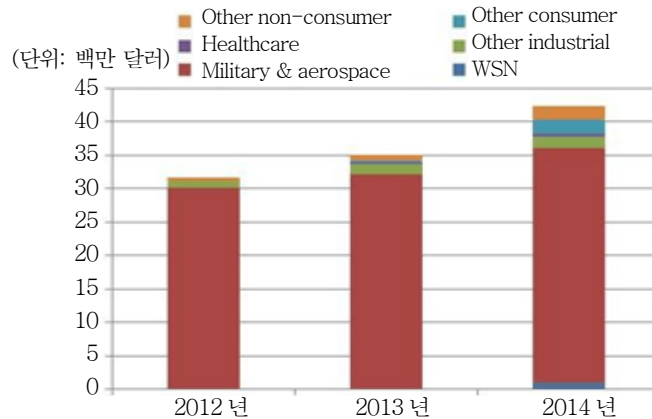
열전 발전 분야는 열전 반도체 양쪽 끝에 온도 차이가 있을 때 고온부에서 저온부로 캐리어가 이동함으로써 기전력이 발생하는 현상을 이용한 기술이다. 종래에는 주로 우주선의 전력공급장치나 무선통신기 전원공급장치, 핵 잠수함 동력공급장치와 같은 우주용/군사용과 같은 특수용도로만 개발되어 왔다.

우리 실생활에 있어서는 열전 발전을 이용한 제품은 거의 상용화되지 않고, 열전 냉각 현상을 이용한 자동차 시트쿨러(seat cooler)와 소형 온/냉장고 및 항온 장치 분야에서만 사용되어 온 실정이다. 따라서, 열전 시장은 대부분 열전 냉각을 이용한 제품들에 의해 좌우되었으며, 시장규모는 제한적이고 오랜 기간 정체되어 온 것이 사실이다.

하지만, 최근 미국 에너지부의 적극적인 후원에 힘입어 자동차 폐열을 이용한 자동차용 열전 발전기의 시제품이 개발되어 일부 차종에 장착되어 판매되기 시작하였다. 전세계에서 연간 수천만 대 이상의 자동차가 생산된다는 점을 감안한다면, 자동차용 열전 발전기 분야는 잠재력이 매우 큰 시장임을 알 수 있다. 따라서, 많은 열전 분야 연구자들은 이를 계기로 열전 발전 분야에 큰 관심을 갖게 된다.

(그림 8)[15]로부터 열전 발전기 시장 규모는 미국 달러 기준, 2012 년 3,100 만 달러, 2014 년 4,200 만 달러로 증가하며, 2022 년에는 7 억 5,000 만 달러로 증가한다고 예측되고 있다. 현재, 가장 대표적인 시장 분야로는 군수/우주용 분야를 꼽고 있으며, 차량용 열전 발전기 시장이 가장 큰 잠재성을 가지고 있다고 발표하고 있다. 기타 응용 분야로는 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network: WSN) 및 컨슈머(consumer) 분야를 꼽고 있다.

먼저 군수/우주용 분야를 살펴보면, 이 분야는 가격보다는 성능을 추구하는 대표적인 분야이다. 미국 에너지부는 1956 년부터 인공위성용 전원으로 사용할 목적으로 SNAP



(그림 8) 열전발전기 시장 규모 (2012 년 8 월 발표) [15]

(Systems for Nuclear Auxiliary Power) 계획을 추진하여 방사성동위원소 또는 소형원자로를 열원으로 하는 열전 발전기를 개발하여 왔다. 1959 년 제작이 완료된 SNAP-3 은 세계에서 최초로 방사성동위원소를 열원으로 하는 열전 발전기로서 1961 년 개량형인 SNAP-3B7 이 미 해군의 항해용 위성인 Transit 4A 에 탑재되어 성공적으로 발사된 바 있다. 그 이후에 미국에서는 약 20 년간 방사성동위원소를 열원으로 하는 18 종류의 열전 발전기를 개발하여 각종 목적의 인공위성용 전원으로 사용하였다.

차량용 열전 발전기 분야에 있어서는 GM, 현대, Volkswagen, 볼보, 포드 및 BMW 등 세계 유수의 자동차 메이커들이 개발에 참여하고 있다. 자동차 연료가 연소될 때 총 에너지의 20%만 자동차 동력으로 전달되고 나머지 약 80%는 동력으로 전달하지 못한 채 손실된다. 손실되는 에너지 중에서 약 62%가 열로 손실되며, 손실되는 열을 활용하여 전기를 얻음으로써 연비 향상을 추구하고 있다.

무선 센서 네트워크 분야는 최근의 눈부신 반도체 소자 기술의 발달에 힘입어 각종 센서의 개발에 적용되고 있고, 그 시장의 잠재성도 매우 클 것으로 기대되고 있다. 열전 센서의 구조는 열을 감지하는 고온부와 그 주위에 이와 상대되는 열전 현상을 유발하는 저온부, 그리고 발생하는 열전 전압을 증폭하는 증폭회로 및 얻어진 데이터를 외부 출력으로 바꾸는 인터페이스(interface) 등으로 구성된다. 열전형 적외선 센서는 기존의 광전형 적외선 센서에 비해 민감도가 나쁘고, 응답속도도 느리지만 가격이 낮고, 냉각이 필요 없다. 감지온도 범위가  $-50 \sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 로 매우 넓다는 장점이 있어 산업 및 가정에서의 열 감시나 기계 이상 발생여부의 점검 및 제어, 전기장치의 과열감시 및 전기차단 등에 큰 시

장이 형성될 것으로 기대되고 있다. 그 외에도 화학반응에서의 온도측정, 유량의 측정 등에도 사용되는 열전 센서가 이미 개발되어 사용 중에 있다.

컨슈머 분야로는 요리센서(thermo-powered cooking sensor), 휴대전화(powering mobile phone), 시계(watche), 인공 심장박동기와 체온 감지기의 전원으로 쓰일 수 있다. 인공 심장박동기를 예로 들어 보면, 인공 심장박동기의 전원으로는 일반적으로 소형전지가 사용되어 왔으나 전지 수명이 짧기 때문에 자주 교환해야 하는 불편이 있다. 이러한 경우에 체온 등을 열원으로 하는 열전 발전기를 사용하면 장시간 연속 사용이 가능하다.

열전 발전에서 큰 전력을 얻기 위해서는 우선 열전 소자 양단 간의 온도 차가 커야 하고, Seebeck 상수 값이 커야 한다. 열전 소자 재료의 직경이 크고 길이가 짧으면 저항을 최소화할 수 있기 때문에 큰 전력을 얻을 수 있다. 소자재료에 불순물을 적절히 첨가함으로써 효율을 향상시킬 수도 있다. 열전 회로의 효율을 좌우하는 인자는 열전 재료 양단의 온도와 회로의 저항 및 Seebeck 상수 등이다. 열전 발전의 효율을 높이기 위해서는 고온부 온도를 높이고, ZT 값이 큰 재료를 사용하여야 한다. 열전 효율계수는 주어진 온도와 주위 연결부의 열전달 특성에 영향을 받으며, 접합부의 평활도, 압착력 등에 의해서 크게 변하므로 주어진 온도 범위에서 가장 우수한 특성을 나타내는 재료를 선택해야 높은 발전 효율을 얻을 수 있다[16].

#### IV. 결 론

열전 발전기가 기존 발전기보다 유리한 경우는, 첫째, 시스템의 유지관리 및 장기동작 수명이 요구되는 경우, 둘째, 규모가 너무 작아서 열엔진 발전기를 이용하는 것이 비경제적일 때(200watt 이하 규모), 셋째, 열 에너지원의 가격이 낮고 기존 발전기에 적합하지 않을 때, 넷째, 150℃ 이하의 온도를 이용하여 전기를 얻고자 할 때 등과 같은 특별한 조건을 그 예로 들 수 있다. 현재 개발되어 있는 대부분의 열전 발전기는 우주나 해상 및 원격지용의 전원 공급 시스템으로서, 이 경우 열전 발전이 채택되는 이유는 유지관리 및 수명의 면에서 유리하기 때문이다.

열전 발전은 발전 효율이 10% 이하로 낮아서 타 발전 방식에 비해 현저히 경제성이 떨어진다는 문제점이 있다. 따라서, 발전 효율이 높은 재료 개발을 위해 미국을 비롯한 여러 나라에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 최근에 ZT 값이 높은 재료에 대한 보고가

계속되고 있기 때문에 가까운 장래에 열전 발전의 상용화가 이루어질 것으로 기대된다.

에너지 수입 의존도가 높은 우리나라의 경우, 활용하지 않고 버리는 폐열 에너지를 활용한 열전 발전 시스템의 연구 개발을 단계적으로 추진할 필요가 있다. 열전 발전을 이용하여 폐열을 회수하는 경우 연간 에너지 절약 규모는 산업부문에서만 500 억 원 이상이 예상되어 개발의 경제성은 충분하다. 열전 발전시스템의 제조 및 개발을 위해서는 변환소자, 셀, 전극재료, 열전 모듈 등의 재료 개발과 함께 발전기 시스템의 설계 및 제조기술의 확보가 필요하며, 전력계통에 연결시키기 위한 전력저장 및 전력계통 연계 기술과 소자 및 시스템의 평가기술 개발 등이 필요하다.

#### <참 고 문 헌>

- [1] J. P. Heremans, V. Jovovic, 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 density of states", *Science*, 321, 2008, 554.
- [2] J. -S. Rhyee, K. H. Lee, S. M. Lee, E. Cho, S. I. Kim, E. Lee, Y. S. Kwon, J. H. Shim and G. Kotliar, "Peierls distortion as a route to high thermoelectric performance in  $\text{In}_4\text{Se}_{1-\delta}$  crystals", *Nature*, 459, 2009, 965.
- [3] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts and B. O'Quinn, "Thin-film thermoelectric devices with high room temperature figures of merit", *Nature*, 413, 2001, 597.
- [4] T. C. Harman, P. J. Taylor, M. P. Walsh and B. E. LaForge, "Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices", *Science*, 297, 2002, 2229.
- [5] 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, 2004, 818.
- [6] T. M. Tritt and M.A. Subramanian, "Thermoelectric materials, phenomena and applications: A bird's eye view", *MRS Bulletin*, 31, 2006, 188.
- [7] T. M. Tritt, Harald Bottner and Lidong Chen, "Thermoelectrics: Direct solar thermal energy conversion", *MRS Bulletin*, 33, 2008, 366.
- [8] A. Majumdar, "Thermoelectricity in semiconductor nanostructures", *Science*, 303, 2004, 777.
- [9] 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", 320, 2008, 634.
- [10] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor", *Physical Review B*, 47, 1993, 16631.

- [11] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, “Effect of quantum-well structure on the thermoelectric figure of merit”, *Physical Review B*, 47, 1993. 12727.
- [12] 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”, 451, 2008, 163.
- [13] A. I. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J. K. Yu, W. A. Goddard and J. R. Heath, “Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials”, 451, 2008, 168.
- [14] 임정욱, 박영삼, 강상우, “반도체 박막 응용소자”, 과학기술연합대학원대학교(UST), 2012.
- [15] IDTechEX report, “Thermoelectric energy harvesting: devices, applications and opportunities 2012-2022”, <http://www.energyharvestingjournal.com>, 2012. 8.
- [16] D. M. Rowe, “Thermoelectrics handbook: Macro to Nano”, CRC Press, Taylor and Francis group, 2006.