

# 고효율 열전소자 기술

Thermoelectric Power Generation with High Efficiency

IT-에너지 융합부품소재 특집

장문규 (M.G. Jang)	U-단말연구팀 책임연구원
전명심 (M.S. Jun)	U-단말연구팀 선임연구원
노태문 (T.M. Roh)	U-단말연구팀 팀장
김종대 (J.D. Kim)	NT융합부품연구부 부장

## 목 차

- .....
- I. 서론
  - II. 열전효과
  - III. 연구 및 특허 동향
  - IV. 결론

최근 들어 나노기술의 발전에 힘입어 청정에너지를 구현할 수 있는 열전소자분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 열전소자는 태양에너지를 이용한 발전뿐만 아니라 체열, 폐열 및 지열 등을 이용한 발전 등 응용처가 매우 다양하며, 청정에너지를 생산할 수 있는 미래 지향적인 특성을 가진 분야라 할 수 있다. 그러나 아직까지 나노기술을 기반으로 한 고효율의 열전소자는 기초 연구수준에서 그 가능성만 일부 선행 연구를 통하여 입증된 상태이다. 따라서 저비용, 고효율의 열전소자를 성공적으로 개발하게 된다면, 기술의 원천성 확보 및 초기 시장 점유에 매우 유리한 입지를 점할 수 있으리라 예측된다. 본 논문에서는 최근 들어 나노기술의 접목으로 새로이 주목받고 있는 열전소자의 동작 원리에 대한 간략한 소개와 이 분야의 최근 연구 동향 및 특허 동향에 대하여 살펴보고자 한다.

## I. 서론

최근 들어 국제 유가가 배럴 당(1배럴=158.9 L) 150달러에 육박하는 고유가 시대가 도래하게 되었다. 또한, CO<sub>2</sub> 가스 배출량의 급격한 증가에 따른 지구 온난화 문제가 끊임없이 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위한 대체에너지 혹은 청정에너지 개발에 전세계가 집중 투자하고 있는 상황이다. 특히 이 분야의 대표적인 연구는 태양광을 이용한 태양전지 분야이며, 해마다 시장 성장률이 30% 이상으로 고속 성장을 하고 있으며, 2013년에는 약 80조 원의 시장을 형성할 것으로 예측하고 있다(출처: CLSA 2005). 현재 적용중인 태양전지는 실리콘 단결정을 이용한 소자가 약 90%를 차지하며, 효율은 약 12% 정도에 이르고 있다(태양광은 AM1 조건에서 100 mW/cm<sup>2</sup>의 power를 가지고 있으며, 효율 12%인 경우 태양전지에서 생산하는 전력은 12 mW/cm<sup>2</sup>이 됨). 태양광의 스펙트럼을 살펴보면 파장 800 nm 이하의 에너지 밀도가 58%이며, 800 nm 이상의 파장을 가지는 적외선(IR)의 에너지 밀도가 약 42% 정도 차지한다. 실리콘 단결정의 경우에는 42%에 해당하는 적외선의 흡수밴드가 없으므로 이의 활용을 위하여서는 이를 흡수할 수 있는 밴드갭을 가지는 반도체를 추가로 적층하여 사용하여야 한다[1].

최근의 열전소자 연구에 의하면 실리콘 나노선을 이용한 열전소자를 태양전지와 적층구조로 활용할 경우에는 실리콘 태양전지에서 활용되지 못한 IR 영역을 열전소자를 이용하여 활용함으로써 에너지 변환 효율을 높일 수 있을 것으로 예측된다[2],[3]. 열전소자는 태양에너지를 이용한 발전뿐만 아니라 체열을 이용한 발전, 폐열 및 지열 등을 이용한 발전 등 응용처가 매우 다양하며, green 에너지로서 미래 지향적인 특성을 가진 분야라 할 수 있다. 그러나 아직까지 실리콘을 이용한 열전소자는 기초 연구수준에서 그 가능성만 일부 선행 연구를 통하여 입증된 상태이다. 따라서, 저비용 및 고효율의 실리콘 열전소자를 성공적으로 개발하게 된다면, 기술의 원천성 확보 및 초기 시장 점유에 매우 유리한 입지를 점할

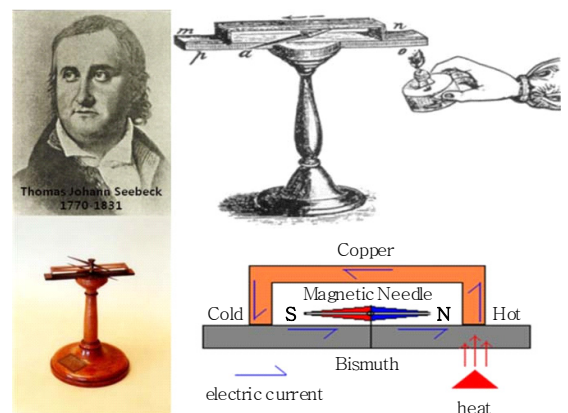
수 있으리라 예측된다. 이러한 이유로 나노기술과 접목된 고성능 열전재료의 개발에 관하여 미국, 일본을 중심으로 선진 연구자로부터 제시된 이론적인 가설에 대한 실험적인 검증이 현재 활발히 진행되고 있는 상태이다. 현실적으로는 첨단 전자 제품의 냉각칩에 우선적으로 적용하고자 하는 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, ZT값이 2인 열전소자가 개발될 경우 시장규모는 이 부분에만 연간 수십억 달러에 달할 것으로 예측되어진다(출처: 2004 DOE/EPRI High efficiency TE workshop).

본 논문에서는 최근에 나노기술의 접목으로 주목 받고 있는 열전소자의 동작 원리에 대한 간략한 소개와 이 분야의 최근 연구 동향 및 특히 동향에 대하여 소개하도록 하겠다.

## II. 열전효과

열전효과는 1821년 Thomas Seebeck에 의하여 발견되었으며, 1950년대에 들어서 반도체 재료의 발견과 함께 산업에 널리 적용되고 있는 기술로 발전되어 왔다. (그림 1)은 1821년 Seebeck이 열전효과 실험을 위하여 사용된 실험 장치이다[4].

Seebeck은 (그림 1)에서와 같이 비스무스(bismuth)와 구리(copper)를 연결하고 그 안에 나침반을 배치하였다. 이 장치에서 비스무스의 한쪽을 뜨겁게 가열하면 온도차이로 인하여 반시계방향으로



(그림 1) Seebeck의 열전효과 실험 장치

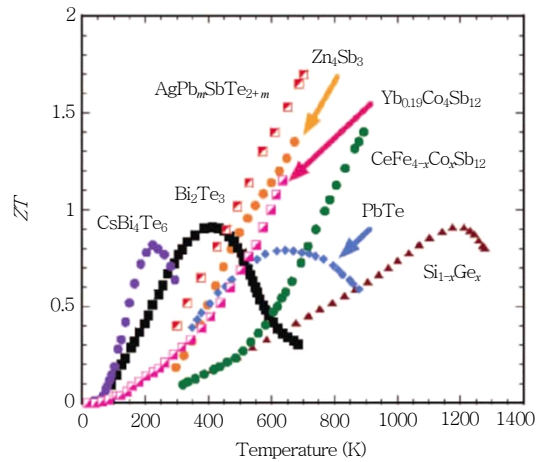
전류가 유도되며, 이 유도전류로 인하여 발생하는 자기장이 아래의 나침반에 영향을 미쳐 나침반의 방향이 변화하는 것으로 열전효과를 처음으로 규명하였다. 이후 1950년대에 들어서면서 반도체 재료의 발견과 더불어 산업에 널리 적용되고 있는 기술이며 가장 광범위하게 사용되는 물질은  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 를 이용한 열전소자이다. Seebeck 효과는 식 (1)과 같이 기술된다[1],[5].

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} [\mu\text{V}/\text{K}] \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 Seebeck coefficient라 불리는 값으로 단위 온도차에서 유도되는 전압을 의미한다. 일반적으로 금속에서는  $\sim$ 수  $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 아주 작은 값을 가지며, 반도체에서는  $\sim$ 수백  $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 값을 가진다. 이 Seebeck coefficient의 값이 클수록 당연히 열전효과에 의하여 발생하는 기전력이 커지므로 좋은 열전소자가 된다. 한편, 열전소자의 분야에서는 각 물질의 열전소자의 특성을 가늠하는 지표(figure of merit)로 ZT 값을 사용한다. 온도차이가 있는 경우, 저온부의 온도가  $T_L$ 이고 고온부의 온도가  $T_H$ 이며, 열전효과를 위하여 사용되는 물질의 열전도도가  $\kappa$ , 전기전도도가  $\sigma$ 라면, ZT는 (2)와 같이 표현된다[1],[5].

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2)$$

여기서 T는 고온부와 저온부의 평균 온도, 즉  $T = (T_H + T_L)/2$  이다. (2)에서 ZT는 Seebeck coefficient의 제곱에 비례하는 값이므로, 높은 열전효과를 위해서는 당연히 ZT의 값이 클수록 좋은 것임을 알 수 있다. 높은 ZT를 위해서는 전기적인 전도도가 높으면서 열전도도는 좋지 못한 물질이 이상적인 경우이다. 일반적으로 널리 사용되는 반도체 재료인 실리콘의 경우에는 전기적인 전도도가  $150 \text{ W}/\text{cm}^2\text{K}$ 에 달하며, 이로 인하여 상온에서의 ZT는 0.01에 불과하다. 한편, 널리 사용되는  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 인 경우에는 ZT가 상온에서 1에 근접한다. 가장 이상적인 열전소재로서는 높은 전기전도도와 낮은 열전도도를 가지는 물질, 즉 PEGC의 특성을 가지는 물질이라 할 수 있



(그림 2) 온도에 따른 ZT의 특성

다. (그림 2)는 현재까지 개발된 여러 재료의 온도에 따른 ZT의 특성을 나타내고 있다[5].

(그림 2)에서  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 는 최대의 ZT는 약 400K에서 0.9 부근의 값을 가짐을 알 수 있다. 한편 SiGe인 경우에는 1,200K 부근에서 0.9의 값을 가지는데, 이 때문에 SiGe을 이용한 열전소자는 방사성동위원소를 이용한 고온에서 동작하는 열전소자에 적합하며, 주로 태양계에서의 우주선 및 탐사로봇 등의 우주산업분야에 주로 적용된다.

한편, (2)에서 열전도도로 표현된  $\kappa$ 를 좀더 자세히 살펴보면  $\kappa = \kappa_e + \kappa_l$ 로 표현된다. 즉, 열전도도는 금속이나 반도체의 경우에 많이 분포하는 자유전하(전자나 홀)에 의한 값과 격자에 의한 열전도도로 나누어 표현할 수 있다. 금속의 경우에는  $\kappa_e$ 가 열전도도를 결정하는 인자이며, 매우 높은 자유전하의 밀도로 인하여 금속의 열전도도는 일반적으로 매우 큰 값을 가진다. 이로 인하여 금속의 경우 Seebeck coefficient는 앞에서 언급한 바와 같이  $\sim$ 수  $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 반도체의 경우에는 자유전하밀도가 매우 낮음으로 인하여  $\kappa_l$ 에 의하여 주로 열전도도가 결정된다. 반도체의 경우에는 두 가지의 열전도도 모두가 영향을 미치는 경우에 일반적으로 해당된다. 금속의 경우에는 열전도도와 전기전도도는 “Wiedemann-Franz law”에 의하여 (3)과 같이 표현된다[1],[5].

$$\frac{\kappa_c}{\sigma T} = L \quad (3)$$

여기서 L은 “Lorentz number”라는 값이며,  $(157 \mu V/K)^2$ 의 값을 가진다. (3)에서 알 수 있듯이 금속의 경우에는 열전도도와 전기전도도의 사이에는 비례 관계에 있으므로, ZT의 값을 인위적으로 조절하기는 힘들다는 것을 알 수 있다. 한편 반도체의 경우에는 높은 ZT의 값을 위하여서는 전기전도도는 최대한으로 높이면서 열전도도는 격자의 열전도도가 자유전하에 의한 열전도도보다 매우 작게 설계하는 것이 바람직하다. 즉,  $\kappa_c \gg \kappa_l$ 의 조건을 만족하도록 하여야 한다. 이 경우에는 (2) 및 (3)의 관계로부터 최대의 ZT는 (4)와 같이 간략히 표현된다[1],[5].

$$ZT^{Max} = \frac{\alpha^2}{L} \quad (4)$$

(3)에서 우리는 ZT의 값에 따른 가능한 최대의 Seebeck coefficient( $\alpha$ ) 값을 유추할 수 있다. 즉, 만약  $ZT^{Max} = 1$ 이라면, 이론적으로 가능한 최대의  $\alpha$  값은  $\sqrt{L}$ 이 되며, 즉  $157 \mu V/K$ 의 값을 가질 수 있다. 그러면 최대의  $ZT^{Max}$  값에서 발전 가능한 최대의 전력밀도,  $P_d^{Max}$ 는 어떻게 표현될까? 이에 대하여 간략히 살펴보도록 하자. 전력밀도 혹은 열전효과에 의하여 발생하는 단위면적 당 전력은 유도되는 기전력 V와 이때 흐르는 전류밀도 J의 곱으로 표현되며, 이를 앞의 (1)~(4)를 이용하면 (5)와 같이 표현할 수 있다[6].

$$P_d^{Max} = \alpha^2 \cdot \sigma \cdot \frac{\Delta T^2}{d} \quad (5)$$

여기서 d는 고온부와 저온부 사이의 거리를 나타낸다. (4)에서  $\alpha^2 \cdot \sigma$ 는 “power factor”로 불리는 값으로 열전소재 모듈이 생산하는 전력밀도를 평가할 때 사용되는 중요한 성능지수이다.

이상에서는 열전소재에 대한 최근의 연구동향을 살펴보기 이전에 이에 대한 이해를 위하여 요약한 열전소재의 간략한 이론적인 내용을 요약하였다. 다음 장에서는 본 장에서 다룬 내용을 기초로 하여 현재의 연구현황에 대하여 살펴보도록 하겠다.

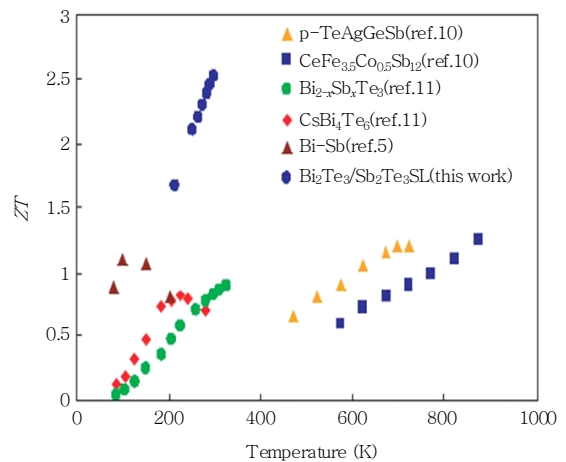
### Ⅲ. 연구 및 특허 동향

#### 1. 연구 동향

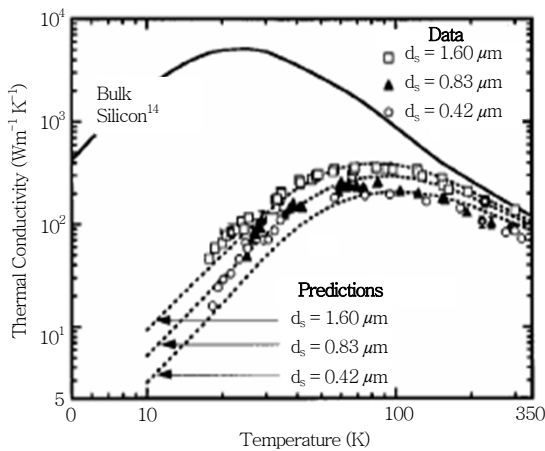
1993년 미국 MIT 대학의 Dresselhaus는 열전 소재를 양자점 및 초격자 구조의 저차원 나노구조로 제조함으로써 열전 성능의 향상을 이룰 수 있다는 것을 이론적으로 제시하였다[7],[8]. 이러한 이론은 최근의 나노과학 기술의 발전과 더불어 많은 관련 과학자의 주목을 받게 되었으며, 현재 열전 소재의 개발에 관한 많은 연구는 나노 기술과 관련된 내용이 주류를 이루고 있다.

나노 구조체의 고효율 열전재료에 관한 실제 연구개발은 2001년 미국의 RTI(Research Triangle Institute, NC)의 Venkatasubramanian 그룹에서 p-type  $Bi_2Te_3/Sb_2Te_3$  superlattice를 이용하여 실온에서 열전 지수를 2.6까지 향상시킨 연구결과를 (그림 3)에서와 같이 발표한 이후로 많은 연구가 시작되었다[9].

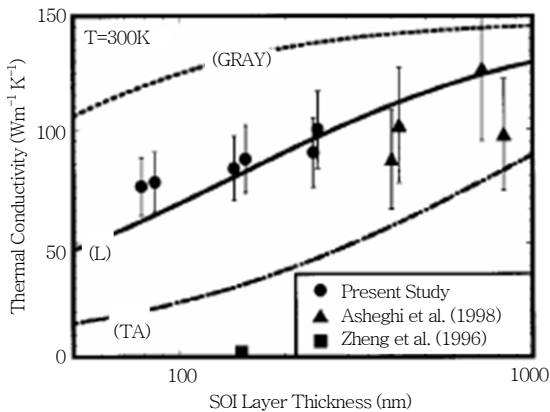
(그림 3)에서와 같이 bulk에서의 높은 ZT를 가지는  $Bi_2Te_3$  및  $Sb_2Te_3$ 을 초격자 구조로 형성하는 경우에는 현재까지 보고된 결과로서는 최고의 ZT값을 달성할 수 있다. 그러나, 초격자 구조는 실제 적용을 위하여서는 아직 생산적인 측면에서 해결하여야 하는 문제들이 많이 남아 있다.



(그림 3) 다양한 초격자 구조에 따른 ZT



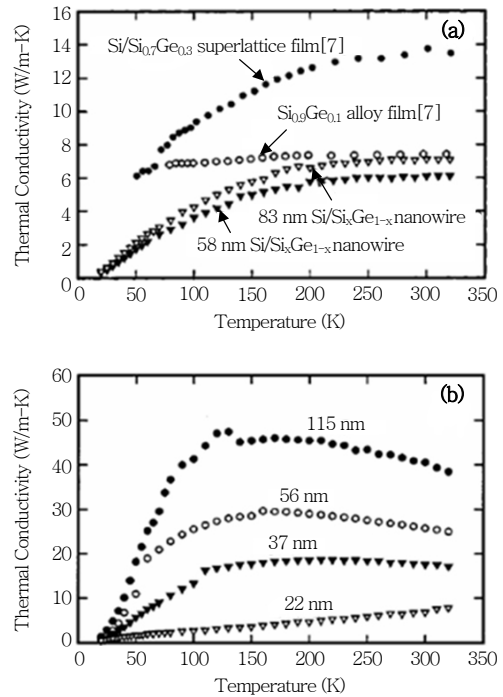
(그림 4) SOI 기판의 온도에 따른 열전도도 특성



(그림 5) 300K에서 SOI 두께에 따른 열전도도의 변화

다음으로는 실리콘을 기반으로 한 열전소자의 최근 연구 동향에 대하여 살펴보고자 하겠다.

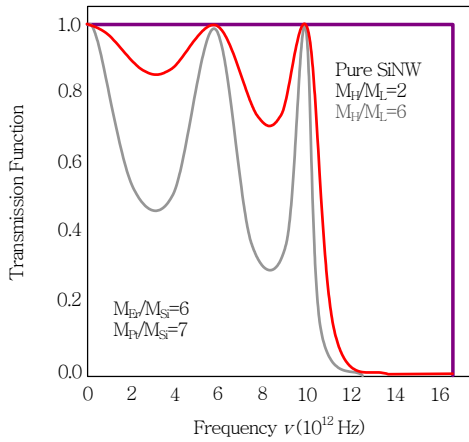
(그림 4)는 SOI 기판의 두께를 줄였을 경우 bulk 실리콘과 비교하여 열전도도의 감소가 가능하다는 결과를 보여준다[10]. 즉, 실리콘의 두께가 얇아질수록 경계면에서의 boundary scattering에 의하여 phonon의 전파가 점차적으로 어려워짐을 알 수 있다. (그림 4)에서 SOI의 경우 상온에서는 bulk의 경우와 열전도도의 차이가 크게 없지만 저온에서는 10배 이하의 값을 가짐을 알 수 있다. SOI의 두께를 100 nm 이하로 줄이는 경우에는 상온에서도 상당한 수준으로 열전도도를 감소시킬 수 있다. (그림 5)는 상온 300K에서 SOI의 두께에 따른 열전도도 특성을 나타낸다[11].



(그림 6) Si/SiGe 초격자 필름, 나노선에서의 온도에 따른 열전도도(a) 및 실리콘 나노선의 온도에 따른 열전도도(b)

(그림 5)에서 SOI의 두께가 100 nm 이하로 줄어들게 되면 열전도도는 50 W/m·K으로 근접하게 되며, bulk 실리콘의 약 1/3 수준으로 감소하게 된다. 열전도도의 주된 감소 원인은 transverse optical phonon의 생성이 어려워지기 때문이다.

(그림 6)은 실리콘 및 Si/SiGe의 나노선에서의 열전도도의 변화를 보여주고 있다[12]. 우선 (b)의 경우를 보면 실리콘 나노선의 직경이 점차로 줄어들어 따라서 실리콘 나노선의 열전도도가 점차로 감소하고 있음을 알 수 있다. 실리콘 나노선의 직경이 22 nm인 경우에는 열전도도가 약 10 W/m·K까지 감소된다. 이는 bulk 실리콘의 약 1/15 수준이다. 또한 (a)와 같이 Si/SiGe의 이종접합구조의 나노선의 경우에는 직경이 58 nm인 경우에도 불구하고 300 K에서 약 6 W/m·K로 감소된다. 이렇게 이종접합구조에서 열전도도가 감소되는 원인은 질량이 낮은 실리콘 나노선에서 상대적으로 질량이 큰 SiGe 나노선으로 phonon이 전파되기 어렵기 때문이다. 이



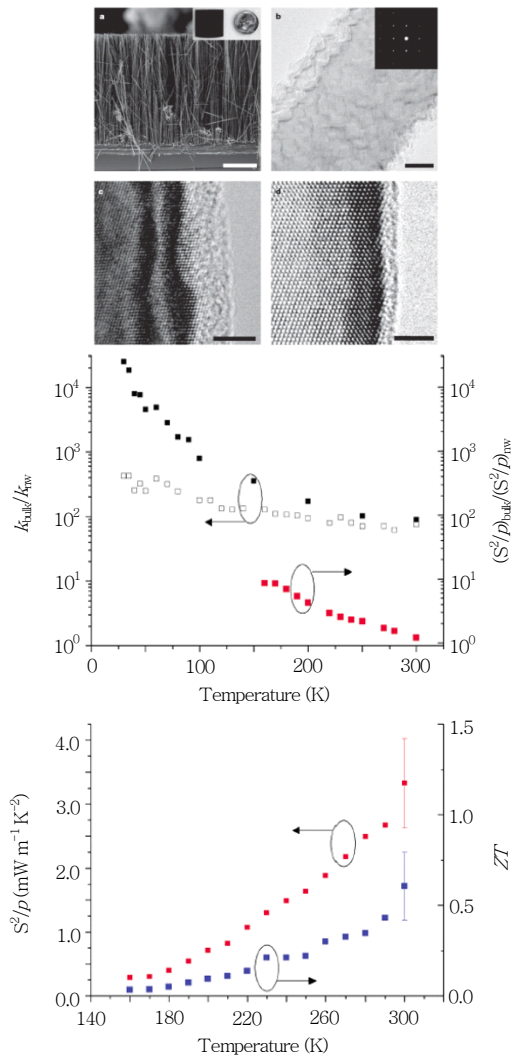
(그림 7) 나노선에서 질량비에 따른 Phonon의 투과율

중첩합의 경우 질량비에 따른 투과도의 변화는 (그림 7)에서 좀 더 상세히 알 수 있다. Phonon의 투과율 계산을 위한 tool은 “www.nanohub.org”에서 제공하는 atomistic green function을 기초로 한 tool을 사용하였다[13].

(그림 7)에서 순수 실리콘 나노선의 경우대비 질량비가 2인 경우에는 투과율이 약 50%이며, 질량비가 6인 경우에는 약 30% 정도의 투과율을 가짐을 알 수 있다. 따라서 Si/SiGe과 같은 이종접합의 나노선 구조가 열전도도의 감소를 위하여 매우 효과적인 구조임을 알 수 있다.

2008년 들어서는 CVD로 성장한 실리콘 나노선의 경우에는 열전도도를 1/100배 이하로 줄일 수 있음을 보고하였으며, 이에 따라서  $ZT > 1$  이상의 특성을 보이는 것으로 Nature지에 보고됨에 따라서 새로운 열전소자의 물질로서 미국에서는 Berkeley, Harvard, Caltech 등에서 매우 활발히 연구가 진행되고 있다.

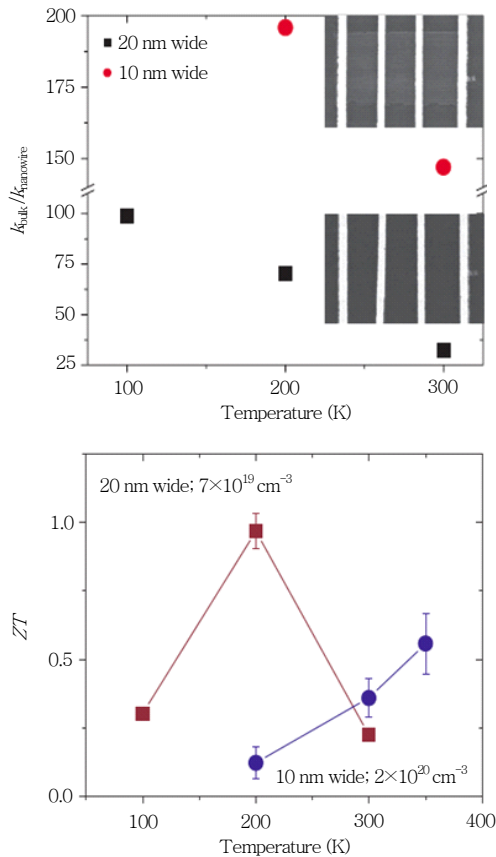
(그림 8)은 미국 Berkeley 대학의 Peidong Yang 교수 그룹에서 2008년 Nature지에 보고한 CVD로 성장한 단결정 실리콘 나노선에서의 열전특성이다 [2]. (그림 8)에서 CVD로 성장한 나노선의 열전도도는 bulk의 경우와 대비하여 약 1/100 정도의 수준으로 감소하였음을 알 수 있다. 또한 이 경우의  $ZT$ 는 0.5를 상회하며, power factor는  $3 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ 임을 알 수 있다.



(그림 8) CVD로 성장한 실리콘 나노선에서의 열전소자 특성 I

한편, Caltech의 James Heath 교수 그룹에서도 Peidong Yang 교수 그룹과 동시에 실리콘 나노선을 이용한 열전소자의 특성을 보고하였다[3].

Heath 교수 그룹에서도 실리콘 나노선의 열전도도는 나노선의 단면이 줄어들수록 급격히 감소하는 결과를 얻었으며, 특히 10 nm의 나노선의 경우에서는 bulk 실리콘 대비 최대 1/200까지 감소시킬 수 있음을 보고하였다.  $ZT$ 의 경우에는 200K에서 20 nm의 나노선의 경우 최대 1.0에 해당하는 결과를 얻었다. (그림 8) 및 (그림 9)의 결과를 보면, 기존의



(그림 9) CVD로 성장한 실리콘 나노선에서의 열전소자 특성 II

bulk 실리콘의 경우는 ZT가 0.01 이하의 낮은 값을 가짐으로 인하여 열전소자로서의 응용성이 없는 것으로 인식된 것에 반하여 나노선 형태의 열전소자로서는 충분히 실용성이 있는 소재임을 알 수 있다.

이상에서 열전소자의 최근 연구동향에 대하여 화합물 및 실리콘을 중심으로 살펴 보았다.

## 2. 특허 동향

열전소자의 산업화는 1950년대에 반도체기술의 발전과 더불어 급속히 이루어졌다. 특히, 2000년 들어와서 나노기술을 기반으로 한 열전소자는 현재까지 산업에 널리 사용되어온 기존의  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 의 특성을 훨씬 뛰어넘어 고효율의 발전소자로서의 가능성이 예측되고 있다. 이러한 이유로 최근에 대두되는

green energy와 발맞추어 미국은 ONR, DARPA 등에서 집중투자하고 있으며 Berkeley, Harvard, MIT 등에서 초격자, 나노와이어, 나노점 등의 구조를 이용한 고효율 열전소재 개발을 활발히 추진중에 있으며, 이에 따른 지적재산권 확보에 박차를 가하고 있다.

일본은 NEDO의 지원아래 대학, 연구소 및 산업체가 참여하는 “Development for Advanced Thermoelectric Conversion Systems” 대형과제를 2002년부터 수행하고 있으며, 미국, 유럽 및 한국을 비롯한 세계 주요 국가에서 지적재산권을 확보하고 있는 상태이다.

유럽에서는 energy harvesting의 일환으로 열전소자에 대한 연구를 지속적으로 수행하여 오고 있다. 특히 독일의 BMW사 및 Benz사에서는 자동차 배기구를 통하여 방출되는 열을 열전소자를 이용하여 다시 재활용하는 연구가 심도 깊게 연구되고 있다. 이는 자동차 배기부인 exhauster에 열전소자를 배치함으로써, 자동차 엔진 효율에는 아무런 간섭 없이 전기에너지를 충전함으로써 약 10% 이상의 연료 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 평가하고 있으며, 현재 시제품 장착을 통하여 효율 개선을 위하여 꾸준히 노력을 하고 있다. 또한, 독일의 인피니언사, 일본의 Casio사 등에서는 인체의 열을 이용한 열전소자를 활용하는 energy harvesting 연구를 꾸준히 수행하여 오고 있다. 이는 개인 휴대용 전자기기의 사용의 급증으로 인하여 부족한 전력을 체열을 이용하여 공급하고자 하는 노력이며, 실제로 Casio사에서는 이를 이용한 저전력 손목시계를 개발하여 판매하고 있다.

본 장에서는 미국, 일본, 유럽, 중국 및 한국을 중심으로 열전소자에 관한 특허 동향을 1973년부터 현재까지 간략히 살펴보고자 하겠다. 모든 특허 검색은 WIPS에서 수행하였으며, 검색으로 선택한 문헌은 <표 1>과 같다[14].

특허 검색을 위하여 사용한 검색식은 한국의 경우는 “열전 AND(발전 or 냉각) AND(변환 or 전환)”으로 하였으며, 외국의 경우는 “Thermoelectric

AND(cooling or generation)”을 사용하였다.

열전 소재 및 응용기술 관련 특허 3329건 중에서 일본이 전체의 52%인 1,580건으로 가장 많은 건수를 나타냈다. 다음으로는 미국, 유럽, 한국, 중국 순이며, 특히 유럽은 점유율 6%로 한국의 5%와 거의 유사한 출원건수를 보였다. 미국 및 유럽의 경우 50% 이상이 타국적의 출원인으로 파악되고 있으며 대부분이 일본에서 출원한 특허이다.

(그림 10)은 각 국가별 출원년도에 따른 출원 특허건수의 추이를 나타내고 있다. 그림에서 맨 앞에서부터 뒤로 중국, 유럽, 일본, 한국 및 미국 순으로

표기되어 있다. 특히 출원년도별로 살펴보면 미국의 경우 2000년 이후 급격히 증가하여 2002~2005년에는 연도별 80건 이상의 특허를 출원하였다. 2005년 이후에는 다소 감소한 것으로 보이나 이는 심사 종결건수가 아직 미치지 않은 것으로 파악되며, 정확히 반영된 것으로 보기는 어렵다.

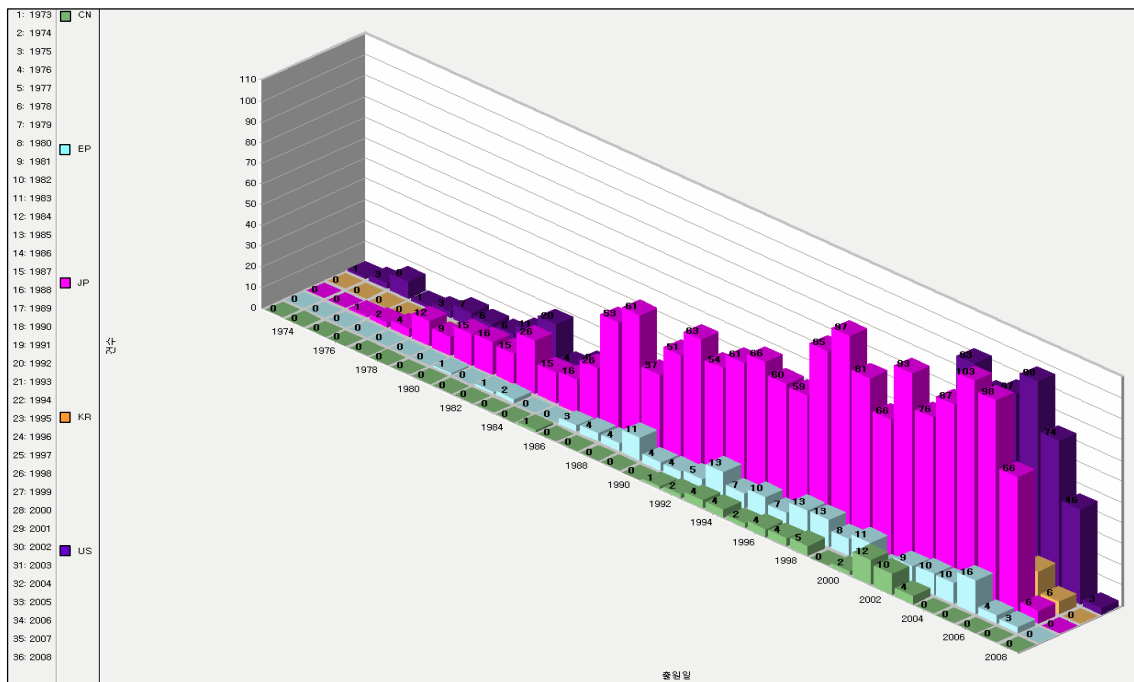
일본의 경우, 1980년대 말부터 특허 출원이 활발히 이루어졌고, 1997~2005년에는 연도별 80건 이상의 특허를 출원하고 있으며 미국보다 5년 빨리 이 분야에 특허를 출원하고 있음을 뜻한다. 이를 반영하듯이 열전소재 및 응용분야의 출원건수는 1,580건으로 52%의 가장 높은 점유율을 보이고 있다.

한국의 경우 2000년 들어서부터 급속한 특허 출원 증가가 있으며 1990년대 초반에는 거의 출원건수가 2건 수준으로 미미하였다.

미국 내에 출원된 특허는 IBM이 39건으로 단연 앞서고 있으며, 그 뒤를 일본 회사인 Matsushita사가 13건으로 뒤를 따르고 있다. 삼성도 7건으로 상당히 높은 출원율을 보이고 있다. 열전응용소자가 개발되고 실용화를 시작하는 1990년대 후반에는

〈표 1〉 특허 검색 국가 및 문헌 선택

국가	문헌 선택
한국	- 특허공개/공고/등록, 실용공개/공고/등록
미국	- Applications, Granted
일본	- PAJ(Patent Abstract of Japan)
유럽	- Applications - Granted
중국	- 특허, 실용 - 중국특허의 영문텍스트 검색



(그림 10) 국가별 출원년도에 따른 특허 추이



자동차 회사인 GM, Nissan 등의 특허 건수가 특히 많았다. 2000년대 이후에는 나노구조의 열전소재 개발 및 신물질의 개발과 관련하여 Caltech, MIT 등 대학기관 및 연구기관의 특허가 다수 있는 것도 주목할 사항이다. 이들 기관이 수행하는 연구는 앞서도 결과를 소개하였지만, 미국 내의 나노기술 관련 열전소재 및 소자기술을 주도하고 있다.

일본의 주요 출원인으로는 Matsushita사가 가장 높은 비중을 가지고 있고 그 뒤를 이어 Toshiba사, Aisin Seiki(일본의 자동차 부품회사)를 비롯한 도요타, 혼다 등 자동차 관련 회사의 특허가 높은 비중을 차지하고 있으며, Mitsubishi사, Seiko사 등의 전자회사도 높은 비중을 차지하고 있다. Matsushita사는 미국 내의 특허 출원 비율도 매우 높은 것이 특징이다. 특히 일본은 자동차회사 및 전자부품회사별로 출원건수가 고르게 분포하고 있으며, 집중적인 특허 출원시기도 이미 10여 년 전부터 시작되어 산업화를 위한 기술이 고르게 발전하고 있음을 시사하는 것으로 판단할 수 있다.

한국 특허 출원 동향을 보면 엘지전자 및 삼성전자의 기업체 특허가 다수를 이루고 있으며, 이를 뒤이어 에너지기술연구소를 비롯한 국공립 연구소 특허가 다수 있다. 현대자동차의 경우 자동차 엔진 폐열을 이용한 발전 및 차량용 카시트에 관한 특허가 일부 있다. 그 외에도 도시바 등의 일본인이 출원한

경우가 전체의 10% 정도를 차지하고 있는 것도 주목할 사항이라 하겠다.

중국특허의 경우 전체적인 검색 출원건수가 55건으로 아직 본격적인 특허출원이 이루어진 상태로 보기는 어려운 것으로 판단된다. 주요 출원기관을 보면 Hebei Energy-Saving Investment사가 가장 많으며, 역시 일본의 Matsushita사가 미국 및 유럽에 이어 중국에도 다수의 특허를 출원하고 있다.

## IV. 결론

이상에서, 최근 들어 나노기술의 접목으로 새로이 주목 받고 있는 열전소자의 동작 원리에 대한 간략한 소개와 이 분야의 최근 연구 및 특허 동향에 대하여 살펴보았다. 앞서도 언급하였듯이 열전소자는 태양에너지를 이용한 발전뿐만 아니라 체열, 폐열 및 지열 등을 이용한 발전 등 응용처가 매우 다양하며 미래 지향적인 특성을 가진 분야이다. 그러나 아직까지 나노기술을 기반으로 한 고효율의 열전소자는 기초 연구수준에서 그 가능성만 일부 선행 연구를 통하여 입증된 상태이다. 특히 bulk 실리콘에서는 열전특성이 거의 미미한 것으로 여겨져 왔던 실리콘을 나노선 형태로 제조하게 되면 현재 상용화된 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>에 버금가는 열전특성을 보임에 따라서 이 분야의 급속한 발전이 예측된다. 특히, 실리콘 공정 기반이 잘 갖추어진 우리나라의 경우에는 열전소자분야에서 좋은 기회를 마련할 수 있을 것으로 예상된다. 실리콘을 기반으로 저비용의 제작방법에 따른 고효율의 열전소자를 성공적으로 개발하게 된다면, 열전소자분야에서의 기술의 원천성 확보 및 초기 시장 점유에 매우 유리한 입지를 점할 수 있으리라 전망된다.

## 약어 정리

CVD      Chemical Vapor Deposition  
 DARPA   Defense Advanced Research Projects Agency

### ● 용어해설 ●

**열전효과(Thermoelectric effect):** 톰슨 효과(Thomson effect), 펠티에 효과(Peltier effect), 제베크 효과(Seebeck effect) 따위의 열과 전기가 동시에 관계하는 현상을 통틀어 이르는 말

**톰슨 효과(Thomson effect):** 같은 종류이면서 부분적으로 온도가 다른 금속에 전류를 흐르게 할 때 온도가 바뀌는 부분에서 발열과 흡열이 일어나는 현상

**펠티에 효과(Peltier effect):** 다른 종류의 금속 두 개를 접합시켜 전류를 통할 때에 전류의 방향에 따라 그 접합부가 뜨거워지거나 또는 냉각하는 현상

**제베크 효과(Seebeck effect):** 두 개의 서로 다른 금속 접합부의 온도 차에 의하여 기전력이 발생하는 현상

DOE	Department of Energy
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
ONR	Office of Naval Research
PGEC	Phonon-Glass/Electron-Crystal
SOI	Silicon on Insulator

## 참 고 문 헌

- [1] Terry M. Tritt, Harald Bottner, and Lidong Chen, "Thermoelectrics: Direct Solar Thermal Energy Conversion," *MRS BULLETIN*, Vol.33, 2008, p.366.
- [2] Allon I. Gochbaum, Renkun Chen, Raul Diaz Delgado, Wenjie Liang, Erik C. Garnett, Mark Najarian, Arun Majumdar, and Peidong Yang, "Enhanced Thermoelectric Performance of Rough Silicon Nanowires," *Nature*, Vol.451, 2008, p.163.
- [3] Akram I. Boukai, Yuri Bunimovich, Jamil Tahir-Kheli, Jen-Kan Yu, William A. Goddard III, and James R. Heath, "Silicon Nanowires as Efficient Thermoelectric Materials," *Nature*, Vol.168, 2008, p.168.
- [4] G.S. Nolas, J. Sharp, and H.J. Goldsmid, Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments, Springer Series in Materials Science, Springer-Verlag Berlin, Germany, 2001, p.1.
- [5] Terry M. Tritt and M.A. Subramanian, "Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View," *MRS BULLETIN*, Vol.31, 2006, p.188.
- [6] G. Jeffery Snyder and Eric S. Toberer, "Complex Thermoelectric Materials," *Nature Materials*, Vol.7, 2008, p.105.
- [7] L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, "Effect of Quantum-well Structures on the Thermoelectric Figure of Merit," *Physical Review B*, Vol.47, 1993, p.12727.
- [8] L.D. Hicks and M.S. Dresselhaus, "Thermoelectric Figure of Merit of a One-dimensional Conductor," *Physical Review B*, Vol.47, 1993, p.16631.
- [9] Rama Venkatasubramanian, Edward Siivola, Thomas Colpitts, and Brooks O'Quinn, "Thin-film Thermoelectric Devices with High Room-temperature Figures of Merit," *Nature*, Vol.413, 2001, p.597.
- [10] M. Asheghi, Y.K. Leung, S.S. Wong, and K.E. Goodson, "Phonon-boundary Scattering in Thin Silicon Layers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, 1997, p.1798.
- [11] Y.S. Ju and K.E. Goodson, "Phonon Scattering in Silicon Films with Thickness of Order 100nm," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, 1999, p.3005.
- [12] Deyu Li, Yiyang Wu, Rong Fan, Peidong Yand, and Arun Majumdar, "Thermal Conductivity of Si/SiGe Superlattice Nanowires," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.83, 2003, p.3186.
- [13] <http://www.nanohub.org>.
- [14] <http://search.wips.co.kr>.