

열전냉각소자 신기술 개발 현황

김동호, 이건환 | 한국기계연구원

1. 서론

온도 차이에 따른 전하의 이동으로 전계가 형성되거나 전류를 흘림으로써 재료접합부의 양단에서 발열 또는 냉각이 이루어지는 열전현상을 이용하면, 열에너지와 전기에너지를 직접적으로 상호 변환시킬 수 있는 열전소자(thermoelectric devices)를 제조할 수 있다. 이것에 사용되는 재료로는 열전도도가 낮고 전기전도도가 높은 반도체재료가 주로 사용되고 있다. 오늘날 전기 및 전자통신 산업에 널리 사용되는 반도체물질은 1950대에 발견될 당시에만 해도 전자부품을 제조하는 재료로 이용될 뿐만 아니라, 열전특성을 이용하여 기계적 구동요소가 없는 냉각장치나 발전장치를 제조하는데 사용될 것으로 생각되었다. 그러나 그 후 20, 30년 동안 열전재료 및 열전소자에 대한 연구는 이렇다할 진전을 보지 못하다가 1990년에 들어 미국의 정부지원 프로젝트가 추진되면서 본격적인 연구개발이 진행되고 있다.

지금까지 열전소자를 적용한 제품으로는 자동차 실내의 보조전원을 이용하는 열전냉각 피크닉상자, 소규모의 냉각장치인 화장품냉장고, 체온을 이용한 전기발전으로 구동되는 손목시계 등이 소개된 바 있다. 그리고 우주왕복기나 심해탐사기와 같은 극한환경에서의 전력공급을 위해 일부 적용되고 있으나, 아직까지는 일상생활이나 산업적으로 널리 적용되고 있지 못한 실정이다. 최근에는 광통신소자와 DNA분석 및 조작 등과 같은 첨단산업분야에서 국부적인 영역의 세밀한 온도제어가 요구되기 때문에, 열전소자를 이용한 냉각장치개발에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다(그림 1)^[1~3].

열전소자의 보다 광범위하고 실용적인 적용을 위해서는 열전 에너지변환효율을 획기적으로 높여야 한다. 이를 위해선 열전소자의 설계 및 제조기법에 대한 공학적 접근은 물론이고 열전재료에 대한 물성을 근본적으로 파악하고 개선하는 기초연구가 절실히 요구되고 있다. 한편, 2000년대에 접어들면서 과학계에서는 나노기술(nano-technology)을 이용한 다양한 시도가 이루어지고 있는데, 열전소자기술 분야에서도 이를 접목한 박막형 열전냉각소자 제조와 열전재료에 대한 연구개발이 한창 진행 중이다. 본 기고에서는 이에 대한 최근의 개발동향을 소개하고 연구 성과에 대해 논하고자 한다.

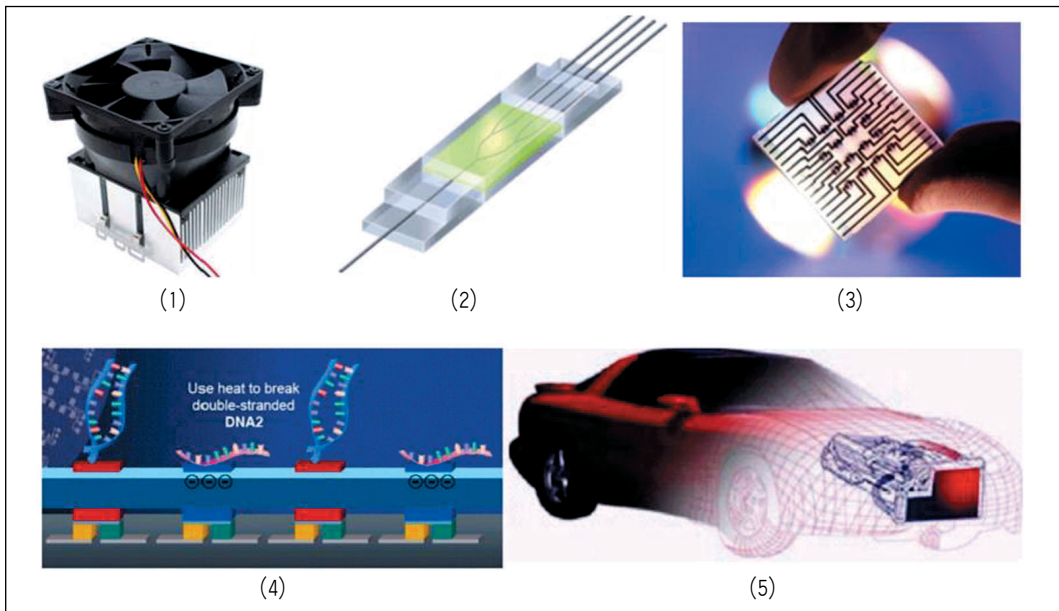


그림 1. 열전소자의 응용분야: (1) 전자부품의 냉각, (2) 광통신부품의 냉각, (3) 초미세공정(lap-on-a-chip), (4) 바이오기술(genomics & proteomics), (5) 폐열회수

2. 열전냉각의 원리

1821년 Seebeck은 금속재료의 양단에 온도차가 존재할 때, 높은 에너지 상태(고온부)에 있는 전자가 낮은 에너지 상태(저온부)로 이동하면서 전계(electric field)가 형성되는 것을 발견하였다. 이 현상을 Seebeck 효과라 하며, 양단간의 온도차가 적은 경우에 전압은 양단간의 온도차에 비례한다. 그 비례상수를 Seebeck 계수(S)라 하며 재료의 열전능을 나타내는 물성치로 이용된다. 이와 반대로, 서로 다른 도체를 접합하여 만든 회로에 직류를 흘리게 되면, 한쪽 접합부에서는 발열이 일어나고 다른 쪽에서는 냉각(흡열)이 일어난다. 그림 2에 나타낸 바와 같은 금속도체와 n형 반도체로 이루어진 폐회로를 생각해보자. 회로에 전압을 인가하여 전류를 흘리게 되면 그림과 같이 페르미 준위(Fermi level)는 반도체 내부에서 경사를 이루고 양쪽 금속 사이에는 전위차가 생긴다. 이 때 전자의 운동을 살펴보면, 왼쪽의 금속에 있는 전자가 에너지 준위가 높은 반도체 전도대(conduction band)로 이동하기 위해서는, 준위차를 뛰어넘을 만큼의 에너지를 필요로 한다. 이 때문에 전자는 주위로부터 열에너지를 흡수해서 이동하고, 접합부는 그러한 흡열 작용으로 온도가 떨어진다. 반대로, 반도체에서 오른쪽의 금속으로 이동하려면 낮은 에너지준위로 떨어지는 것이 되므로 에너지를 방출한다. 이러한 현상이 Peltier 효과라 불리며 열전냉각의 원리가 된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이, n형과 p형의 반도체 재료를 동시에 이용하여 소자를 구성하면 효율적으로 열전냉각과 열전발전을 이룰 수 있다. 한편, 온도 구배가 있는 도체에 전류를 흘려주게 되면 물질의 열전능이 온도에 따라 다르기 때문에 일어나는 자체의 흡열 또는 발열현상이 있다. 이는 Joule 발

열과 구별되며 Thomson 효과라 한다. 열전현상이란 위 세 가지 효과를 말하는 것으로, 보다 상세한 내용은 참고문헌 [4]에 서술되어 있다.

물질의 열전특성을 나타내는 성능지수(figure of merit)로는 ZT 값이 이용되며 다음과 같이 나타내어진다.

$$ZT = \frac{S^2 a T}{k} \quad (1)$$

여기서, S 는 Seebeck 계수이고, k 는 전기전도도, a 는 열전도도를 나타내며 T 는 절대온도이다. 효율이 높은 열전소자를 제조하기 위해서는 이 열전성능지수의 값이 큰 재료를 사용하여 한다. 이를 위해선 수식 (1)에서 볼 수 있듯이, 전기전도도(a)와 제이벡계수(S)는 높은 반면, 열전도도(k)는 낮은 재료를 개발하여야 한다. 그러나 이 세 가지의 물질상수 S , a , k 는 서로 독립적이지 않고, 어떤 열전재료의 S 값을 증가시키면 a 값은 감소하고, a 값을 증가시키면 k 값이 비례하여 증가하는 경향을 보인다(전기전도도와 열전도도와의 상관관계는 Wiedemann-Franz법칙으로 나타난다). 그렇기 때문에 재료의 열전성능지수를 높이기 위한 노력은 한계에 부딪히게 되었다. Abram F. Ioffe에 의해 반도체물질이 열전재료로 적용되기 시작한 이래 여러 가지 다양한 물질에 대한 열전성능지수 측정과 열전재료 개발이 이루어졌다. 현재까지 벌크(bulk)형태로 사용가능한 열전재료 중에 Bi_2Te_3 , Pb_2Te_3 , Si-Ge계 합금재료가 각각 450 K, 900 K, 1400 K 온도영역에서 비교적 좋은 열전능을 가진 재료로 알려져 있다. 그러나 가장 적용범위가 넓다고 할 수 있는 실온에서의 열전변환효율은 여전히 매우 낮은 상태인데, 많은 연구개발에도 불구하고 열전성능지수(ZT)값이 1정도에 머물러 있는 실정이다. 가정용 냉장고나 발전기 등에 대응하는 효율을 지니기 위해서는 이 성능지수가 3이상의 값을 가져야하는 것으로 알려져 있다.

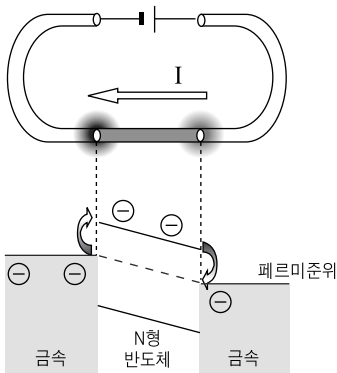


그림 2. Peltier 효과에 의한 열전냉각 및 발열

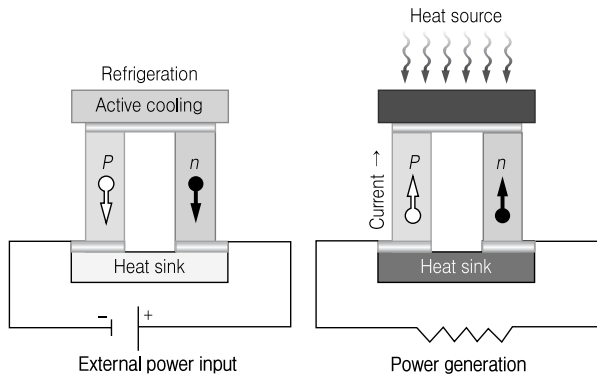


그림 3. 열전효과를 이용한 냉각 및 발전 원리 [3]

3. 박막형 열전냉각소자 개발현황

마이크로 프로세서를 비롯한 고집적회로의 처리속도가 비약적으로 향상되고 선풍과 같은 특성치

(feature scale)가 감소함에 따라 첨단전자부품의 발열량이 커지게 되고, 이를 효율적으로 제거하는 기술이 제품개발에 있어서 중요한 부분을 차지하게 되었다. 광통신장비에 있어서도 레이저광원, 스위칭 및 라우팅 소자, 탐지기 등 핵심부품의 특성을 제어하기 위해 냉각기능의 역할이 매우 중요하게 되었다. 그러나 기존의 벌크제조기법으로 만들어지는 열전냉각소자는 고집적회로에 적용하기가 쉽지 않을 뿐 아니라, 냉각효율이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 열전냉각소자의 박막화에 관한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

현재의 고도로 발달된 반도체소자 제조기술을 열전냉각소자 제조에 적용하면, 열전재료를 마이크로미터 수준의 박막으로 증착(deposition)하고 패터닝(patterning)할 수 있어 소자의 고집적화가 가능하며 100 W/cm² 이상의 우수한 냉각능력밀도(cooling power density)를 지닌 냉각소자를 제조할 수 있다. 특히, 최근에는 나노기술(nano-technology)을 이용하여 열전재료를 개발하고 소자를 제조함으로써 열전냉각성능을 획기적으로 향상시킨 연구결과가 발표되고 있다. 그림 4는 실온에서의 열전성능지수(ZT) 값을 나타낸 것으로, 1950년대에 Bi₂Te₃나 이에 Sb, Se 등을 첨가한 합금재료를 발견한 이래 이렇다할 성과를 얻지 못하다가 2000년대에 접어들면서 획기적 개선을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 나노미터 영역에서 나타나는 양자효과나 초격자구조를 이용하여 열전에너지 변환효율을 높인 것이다.

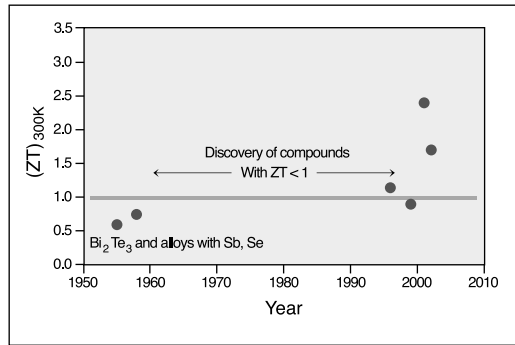


그림 4. 실온에서의 열전성능지수로 나타난 열전재료 연구 개발의 역사^[1]

3.1 양자구속효과(quantum confinement effect)

반도체에서 전하를 전달하는 역할은 전자와 전공이 맡게 되고, 열전달은 주로 격자의 진동 다시 말해 포논(phonon, 음향자: 결정격자와 같은 탄성체의 진동을 입자의 집합소로 간주했을 때의 입자)이 담당한다. 이러한 전자(또는 전공)와 포논은 에너지전달에 있어서는 “파장”과 “자유경로길이” 이 두 가지의 특성 길이를 가지고 있다. 그런데 반도체재료를 이 특성 파장에 상응하는 길이단위를 지닌 나노구조로 제조함으로써 전자에너지준위밀도(electronic density of states)를 제어할 수 있게 된다. 이 에너지준위밀도함수의 모양과 피크 위치를 페르미준위(Fermi level)에 매칭시키게 되면, Seebeck 계수의 값을 조절할 수 있게 된다. 그리고, 양자구속효과에 의해 전자운동도를 증가시켜 전기전도도를 높은 값으로 유지할 수 있어 벌크상 열전재료의 한계를 극복하는 비교적 큰 ZT 값을 얻어낼 수 있게 된다.^[1]

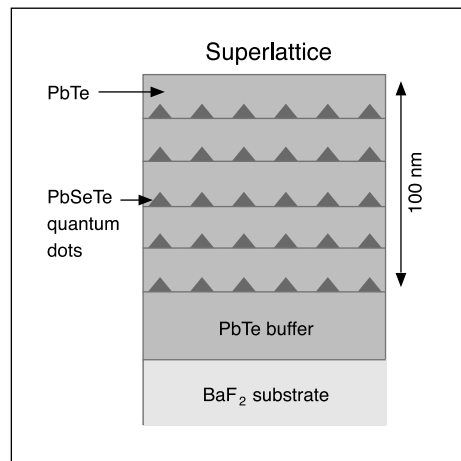


그림 5. 양자점을 지닌 나노구조체^[3]

1990년대 초반 미국 MIT의 Hicks와 Dresselhaus는 위와 같은 양자구속효과를 감안한 계산을 통하여, Bi_2Te_3 양자우물구조(quantum well structure)에서 열전성능지수가 3차원 벌크(bulk)상의 수치보다 10배 이상 커진다는 예측 결과를 내놓았다.^[5] 이러한 접근법을 이용하여 여러 가지 열전재료($\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$,^[6,7] $\text{Bi}/\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$,^[8] Si/SiGe ,^[9,10] GaAs/AlAs ,^[11,12] SiGeC/Si ^[13])에 대한 열전성능 평가 연구가 이루어졌으며, 양자점(quantum dot)의 양자구속효과를 적용한 열전재료에 대한 연구도 보고된 바 있다.^[14] (그림 5)

3.2 초격자구조(Superlattice)

한편, 열전성능지수(ZT)는 전자나 전공의 양자구속효과보다는 포논의 동특성과 전달특성에 더욱 의존하는 것으로 알려져 있다. 만약 열전재료의 특성 크기를 포논의 자유경로길이보다 짧고 전자의 자유경로길이보다 길게 하게 되면, 전기전도에는 영향을 주지 않으면서 포논의 경계부(boundary) 산란에 의한 열전도도의 감소를 이룰 수 있게 된다. 보통 열전재료로 사용하기 위해 개발된 벌크상 합금재료에서는, 짧은 파장을 가지고 있는 포논은 합금산란에 의해 열전달이 억제되지만 중간 파장과 장파장을 지닌 포논은 여전히 열전달에 관여하게 된다. 그러나 이러한 중간이상의 파장과 비슷한 크기의 특성길이를 가지고 있는 나노구조체로 이루어진 열전소자에서는 이러한 파장대를 지닌 포논도 함께 산란되기 때문에, 열전도도를 상당히 작게 조절할 수 있게 된다.

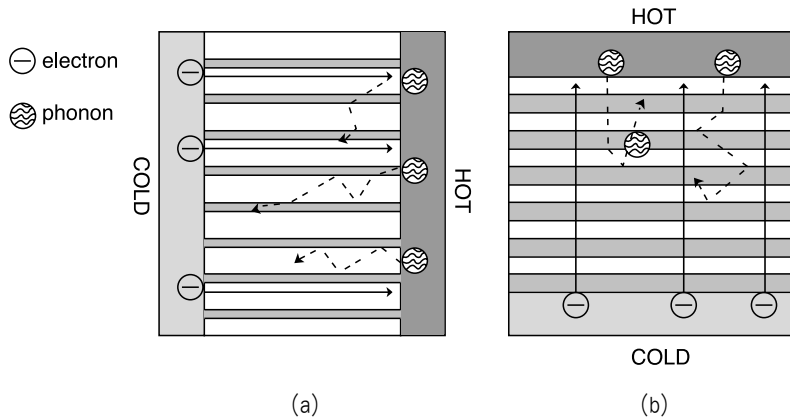


그림 6. 초격자 나노구조체를 이용한 열전냉각소자 (a)MIT (b)RTI

미국 RTI(Research Triangle Institute, North Carolina)의 Venkatasubramanian 그룹에서는 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 의 다층박막으로 이루어진 초격자 박막구조의 소자를 제조하여 실온에서의 ZT값을 2.4까지 향상시킨 연구 결과를 발표하였다.^[15] 그들이 제조한 열전냉각소자와 앞에 소개한 MIT의 Dresselhaus 그룹이 만든 열전냉각소자는 다층박막의 나노구조체를 이용하는 방식에서 차이점을 보인다. 그림 6(a)에서는 격자층에 나란한 방향으로 전류와 열전달이 이루어지는데, 전자가 초격자층 내에서 2차원운동을 하면서 전달되는 것과 달리 포논은 격자층 계면(interface)에 의하여 산란되는 것을 알 수 있다. 이러한 산란으로 인하여 열전달이 방해받게 되고 열전성능은 향상되는 것이다. 반면, 그림 6(b)에 표현된 열전냉각방식에서는 전류와 열전달이 초격자층에 수직방향으로 이루어지는 것을 알 수 있다. 이 경우 포논은 계면 산란으로

인하여 이동이 더욱 방해받을 것이라는 것은 쉽게 알 수 있으나, 열전성능을 높이려면 전자에 의한 전류전달은 방해받지 않아야 한다. 이런 문제점을 극복하기 위해 RTI연구진은 각 층의 성분과 높이를 적절히 조정하여 초격자층간의 에너지준위 차이를 전자가 자신의 열에너지만으로도 쉽게 극복할 수 있도록 작게 제조하였다. 이러한 구조(그림 7)에서는 전자의 이동도(mobility)가 층에 나란한 방향(in-plane)이나 교차되는 방향(cross-plane)에서 그다지 큰 차이를 보이지 않는다. 결과적으로 포논은 차단하고 전자는 통과시키는 구조체(phonon-blocking/electron-transmitting structure)를 제조하여 열전냉각효율을 획기적으로 향상시킨 것이다. RTI 연구진은 위와 같은 초격자 열전재료를 사용하여, 상온(298 K)에서 322 K의 절대냉각이 가능하고 약 700 W/cm²의 냉각력을 갖춘 열전냉각소자(그림 8)를 선보였다.^[15]

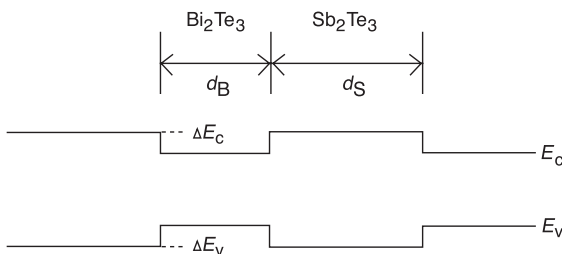


그림 7. 초격자구조의 band diagram: short period/shallow potential ^[15]

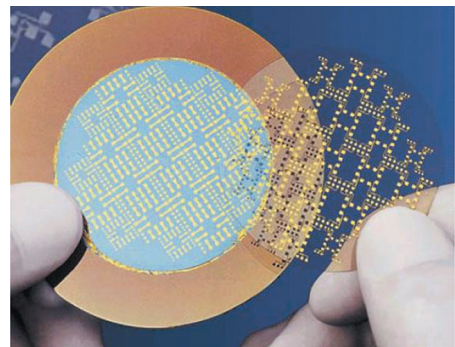


그림 8. 박막형 열전냉각소자

4. 고성능 열전재료 개발현황

열전효율을 높이기 위하여 박막공정을 이용한 접근법과 더불어 열전재료에 대한 연구개발도 계속 시도되고 있다. 가장 이상적인 열전재료는 유리와 비슷한 열적 특성을 가지고 완전 단결정물질과 비슷한 전기적 성질을 가진(“phonon-glass electron-crystal”) 물질이다. 다시 말해, 열전도는 잘 되지 않으나 높은 전기전도도를 지닌 물질이어야 한다.^[16] 실온 근처의 저온영역에서는 R3m 공간군에 속하는 능면체(rhombohedral) 층상구조를 지닌 Bi₂Te₃와, Bi₂Se₃나 Sb₂Te₃을 포함한 고용체(solid solution)가 주로 사용된다. 지금까지는 p형 (Bi₂Te₃)_{0.25}(Sb₂Te₃)_{0.75}(Sb₂Se₃)_{0.03} 합금이 300 K에서 가장 큰 무차원 열전성능지수값(ZT~1.14)을 지닌 것으로 알려져 있다.^[17] 최근에는 재료의 전자구조를 제어하는 기술(band-gap engineering 또는 carrier pocket engineering)이 도입되면서 특정온도범위에서 최적화된 열전성능을 보이는 재료가 개발되고 있다. CsBi₄Te₆은 낮은 온도(225 K)에서도 비교적 높은 성능지수(ZT~0.8)를 보이고 있으며,^[18] 열전발전에 적용될 수 있는 재료로 입방체 구조의 AgPb_nSbTe_{2+n}가 고온(800 K)에서 높은 성능지수(ZT~2.2)를 가진 것으로 보고된 바 있다.^[19]

고성능 열전재료로서 그림 9에 나타낸 skutterudite 합성체나 포접화합물(dathrate)에 대한 연구도 활발

히 진행되고 있다. Skutterudite는 8개의 MX_3 ($M=Co, Rh, Ir, Fe, Ru, X=P, As, Sb$)로 구성된 unit cell 구조 내에 희토류 원소(rare-earth atoms)가 들어앉은 형태의 합성체이다. 새장과 같은 (cage-like) 구조물 내에서 희토류 원소가 “덜거덕거리며” 움직이게 되고, 이로 인한 phonon의 산란과 열전달 억제 때문에 열전 에너지 변화효율이 향상되는 것이다. 그 예로, $LaFeCoSb_{12}$ 합성체는 700 K 이상에서 1보다 큰 성능지수를 가지며,^[20] $CeFe_{3.5}Co_{0.5}Sb_{12}$ 는 900 K 근방에서 약 1.35의 성능지수를 가진다는 연구결과가 발표되었다.^[21]

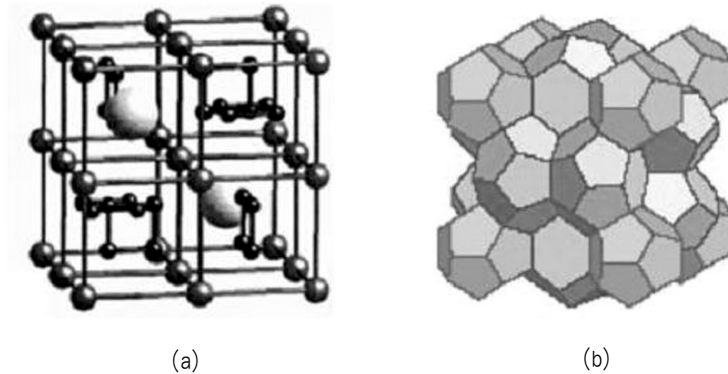


그림 9. 고성능 열전발전재료 (a) filled skutterudite [22] (b) clathrate [3]

5. 요약 및 전망

열전현상을 이용한 에너지 변환기술은 군용, 극지, 우주항공분야에서의 열전발전과 같은 특수한 목적으로 사용되거나, 틈새시장(niche market)에 소개된 소형 열전냉각제품에 적용되는 수준에 머물고 있다. 그러나 21세기에 들어 대체에너지 개발과 에너지 이용효율의 극대화 측면에서 열전에너지변환소자에 대한 관심이 다시금 고조되고 있으며, 특히 최첨단 전자장비와 생명기술 연구 분야에서는 정확하고 세밀한 온도제어를 위하여 고성능의 열전냉각소자에 대한 개발요구가 절실하다. 이러한 요구에 부합하기 위해서는 뛰어난 열전성능을 지닌 재료 개발이 선행되어야 한다. skutterudite와 같은 새로운 형태의 열전재료 개발과 함께, 최근에는 나노기술을 이용하여 열전변환특성이 우수한 초격자구조를 형성하고 이를 이용하여 박막형태의 열전냉각소자를 제조하는 수준에 이르렀다.

고성능의 박막형 열전냉각소자를 제조하기 위해서는 나노미터 수준의 박막증착기술과 함께, 열 및 전기 접촉저항을 최소화하는 소자접합기술, 소자 설계 및 고집적화 기술 등이 요구된다. 초격자 나노층을 형성하기 위해서는 MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition)나 MBE(molecular beam epitaxy)와 같은 첨단 고가장비와 증착기술이 필요하며, 제조된 열전박막의 특성을 측정하는 시스템과 평가기법을 갖추어야 한다.

본 기고에 소개된 초격자 나노박막을 이용한 소자개발 이외에도 나노와이어 및 나노분말을 이용하거

나^[23-26] 열이온 방출(thermoionic emission)원리를 적용하여 더욱 향상된 냉각능력을 가진 미세냉각소자를 개발하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.^[27-30] 더불어 현재의 느리고도 값비싼 소자 제조공정을 극복하는 양산기술을 확립한다면, 머지않아 일상생활에서도 열전현상을 이용한 다양한 제품을 접할 수 있을 것이라 생각되며 그 시장은 수십억 달러를 넘는 엄청난 규모를 형성할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 국무총리실산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

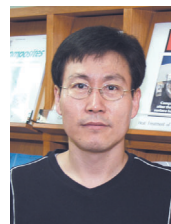
- [1] A. Majumdar, “Thermoelectricity in Semiconductor Nanostructures,” *Science* 303, 777, 2004
- [2] C. B. Vining, “Semiconductors are cool,” *Nature* 413, 577, 2001
- [3] B. C. Sales, “Smaller Is Cooler,” *Science* 295, 1248, 2002
- [4] 이길근 외, “열전반도체 재료 및 발전응용 기술 현황,” *기계와 재료*, 11권 1호, 31, 1999
- [5] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, “Effect of Quantum-Well Structures On the Thermoelectric Figure of Merit,” *Phys. Rev. B* 47, 12727, 1993
- [6] L. D. Hicks, et. al, “Experimental Study of the Effect of Quantum-Well Structures on the Thermoelectric Figure of Merit,” *Phys. Rev. B* 53, 10493, 1996
- [7] T. Koga, et. al, “Mechanism of the enhanced thermoelectric power in (111)- oriented n-type PbTe/Pb1-xEuxTe multiple quantum wells,” *Phys. Rev. B* 60, 14286, 1999
- [8] T. Koga, et. al, “Thermoelectric figure of merit of Bi/Pb1-xEuxTe superlattices,” *Phys. Rev. B* 62, 16703, 2000
- [9] T. Koga, et. al, “Experimental proof-of-principle investigation of enhanced Z(3D)T in (001) oriented Si/Ge superlattices,” *Appl Phys. Lett.* 77, 1490, 2000
- [10] T. Koga, et. al, “Carrier pocket engineering applied to “strained” Si/Ge superlattices to design useful thermoelectric materials,” *Appl. Phys. Lett.* 75, 2438, 1999
- [11] T. Koga, et. al, “Carrier pocket engineering to design superior thermoelectric materials using GaAs/AlAs superlattices,” *Appl. Phys. Lett.* 73, 2950, 1998
- [12] J. Zhang, et. al, “AlGaAs superlattice microcoolers,” *Appl. Phys. Lett.* 83, 374, 2003
- [13] X. Fan, et. al, “SiGeC/Si superlattice microcoolers,” *Appl. Phys. Lett.* 78, 1580, 2001
- [14] T. C. Harman, et al, “Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices,” *Science* 297, 2229, 2002
- [15] R. Venkatasubramanian, et al, “Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit,” *Nature* 413, 597, 2001

- [16] G. A. Slack, New materials and performance limits for thermoelectric cooling, in CRC Handbook of Thermoelectrics, ed D. M. Rowe, pp.407-440 (CRC Press, Boca Raton, FL, 1995)
- [17] M. H. Ettenberg, et. al, in Proc. 15th Int. Conf. on Thermoelectrics (ed. Caillat, T.) pp.52-56 (IEEE, Piscataway, NJ, 1996)
- [18] D.-Y. Chung, et. al, "CsBi₄Te₆: A High-Performance Thermoelectric Material for Low-Temperature Applications," Science 287, 1024, 2000
- [19] K. F. Hsu, et. al, "Cubic AgPbmSbTe_{2+m}: Bulk Thermoelectric Materials with High Figure of Merit," Science 303, 818, 2004
- [20] B. C. Sales, et. al, "Filled skutterudite antimonides: a new class of thermoelectric materials," Science 272, 1325, 1996
- [21] J. P. Fleurial, et. al, in Proc. 15th Int. Conf. on Thermoelectrics (ed. Caillat, T.) pp.91-95 (IEEE, Piscataway, NJ, 1996).
- [22] Y. Kawaharada, et. al, "Thermoelectric properties of CoSb₃," J. Alloys and Compounds 315, 193, 2001
- [23] M. Martin-Gonzalez, et. al, "Electrodeposition of Bi_{1-x}Sb_x films and 200-nm wire arrays from a nonaqueous solvent," J. CHEM. MATER. 15, 1676, 2003
- [24] X. B. Zhao, et. al, "Effect of solvent on the microstructures of nanostructured Bi₂Te₃ prepared by solvothermal synthesis," J. Alloys and Compounds 368, 349, 2004
- [25] M. S. Sander, et. al, "Fabrication of high-density, high aspect ratio, large-area bismuth telluride nanowire arrays by electrodeposition into porous anodic alumina templates," Adv. Mater. 14, 665, 2002
- [26] Y. M. Lin, et. al, "Semimetal-semiconductor transition in Bi_{1-x}Sb_x alloy nanowires and their thermoelectric properties," Appl. Phys. Lett. 81, 2403, 2002
- [27] G. D. Mahan, "Thermoionic refrigeration," J. Appl. Phys. 76, 4362, 1994
- [28] A. Shakouri and J. E. Bowers, "Heterostructure integrated thermoionic coolers," Appl. Phys. Lett. 71, 1234, 1997
- [29] G. D. Mahan and L. M. Woods, "Multilayer thermoionic refrigeration," Phys. Rev. Lett. 80, 4016, 1998
- [30] D. Vashaev and A. Shakouri, "Improved thermoelectric power factor in metal-based superlattices," Phys. Rev. Lett. 92, 106103, 2004



김 동 호

- 한국기계연구원 표면연구부 선임연구원
- 관심분야: 기능성 박막코팅 및 공정개발, 플라즈마 공정의 분자모델링
- E-mail: dhkim2@kmail.kimm.re.kr



이 건 환

- 한국기계연구원 표면연구부 책임연구원
- 관심분야: 디스플레이용 광기능성 박막코팅, 진공 증착 장비개발 및 공정개발
- E-mail: ghlee@kmail.kimm.re.kr