



| 상온용 열전 소재의 개발 동향 및 응용

1. 서론

하국현 책임연구원
 (한국기계연구원 분말재료연구소)
김동호 선임연구원
 (한국기계연구원 토면기술연구소)
이길근 교수
 (부경대 신소재공학부)
유지훈 선임연구원
 (한국기계연구원 분말재료연구소)
김옥중 책임연구원
 (한국기계연구원 에너지기계연구소)

열전 에너지 변환은 열을 전력으로 직접 변환시키는 것과 역으로 직류의 통전에 의해 냉각 혹은 가열하는 고체상태(Solid State)의 에너지 변환 기술이다. 열전재료는 재료 양단의 온도차에 의하여 전압이 발생하는 Seebeck 효과와 재료 양단에 전류를 통하면 양단에서 흡열과 발열이 각각 발생하는 Peltier 효과를 이용하여 배·폐열 에너지를 이용한 발전 및 가열·냉각 장치로써 이용될 수 있다. 이와 같은 열전변환장치는 기존의 화력 발전이나 냉·난방기와 같이 기계적 구동 요소가 전혀 없으므로 소음과 진동이 없고 신뢰성이 높은 발전 및 냉각·가열에 이용 가능하다. 또한, 구조가 간단하고 소형 경량일 뿐만 아니라 출력 전류 밀도도 높은 장점이 있다.

열전변환기술을 이용한 발전[1-4]은 미국, 러시아 등에서 우주/군사용 등의 매우 특수한 전원으로서 실용화되었으나 국내에서는 큰 관심을 불러일으키지 못하였다. 그러나 최근 에너지 문제와 환경 문제가 심각하게 대두됨에 따라 열전발전이 재평가되고 있다. 특히 저온 영역에서의 열전 발전은 다양한 열원을 이용하여 미량의 폐열에서도 가동이 가능하며 이동성이 우수한 독립된 전원으로써 이용할 수 있는 것이 특징이다. 한편, 열전냉각[1,2]분야에서는 선진 외국의 경우에는 1950년대 경부터 냉장고, 냉방 장치 등의 가전제품에의 응용 연구가 진행되어 왔으나, 성능을 비약적으로 향상시키는 것이 곤란하여 일반에게는 넓게 보급되지 못하였다. 그러나 열전냉각에는 프레온 가스와 같은 환경오염의 문제가 없고, 무소음, 경량으로 운반이 용이한 장점이 있어, 소형의 쿨러 및 제습 장치에 이용되고 있다. 최근에는 광통신소자와 DNA 분석 및 조작 등과 같은 첨단 산업분야에서 국부적인 영역의 세밀한 온도 제어가 요구되는 장치에 사용하기 위하여, 열전소자를 이용한 냉각 장치에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다(그림1)[5-7].

이와 같이 열전변환기술은 현재까지 주로 상온 부근의 영역에서 주로 열전냉각용으로 많이 이용되고 있으며, 일부 발전 혹은 가열용 장치로써 이용되고 있다. 그러나 열전변환장치는 연료 전지 혹은 태양 전지 등의 변

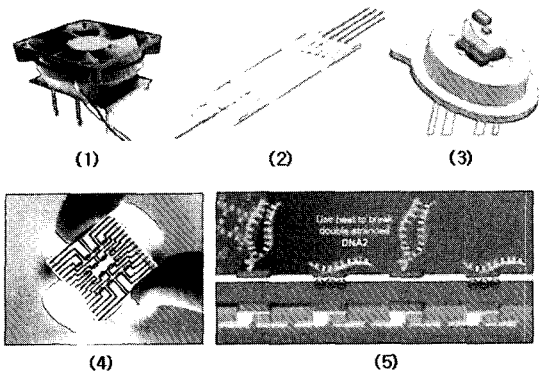


그림 1. 열전냉각소자의 응용 ; (1) 전자부품의 냉각, (2)&(3) 광통신부품의 냉각, (4) 초미세공정 (Lap-on-a-chip), (5) 초정밀 생명화학공정.

환 시스템에 비하여 효율이 낮아 많은 연구개발에도 불구하고 상온에서의 열전변환효율은 여전히 매우 낮은 상태이며, 에너지 변환 효율을 상징하는 열전 성능지수(ZT)값이 1정도에 머물러 있는 실정이다. 이와 같이 열전변환기술은 에너지, 환경 문제에 크게 기여할 수 있는 기술이지만 이것을 보다 발전/보급시키기 위해서는 보다 고성능의 재료 개발이 필수 불가결하다. 열전변환에 사용되는 재료는 열전도율이 낮고, 금속과 같이 전도율이 높은 반도체로서[1,2] 열전재료의 미세 구조 제어 기술의 발달과 더불어, 분말 야금 공정 기술을 이용한 재료의 성능 개선이 이루어지고 있다. 특히 최근 비약적으로 높은 성능 지수를 가질 것으로 기대되는 나노 구조 열전재료의 개발로 향후 열전변환기술에 비약적인 발전이 있을 것으로 기대된다.

본 기고에서는 현재 가장 많은 부분에서 상용화 되고 있는 상온 영역에서 사용되는 열전변환기술의 최근의 연구개발 현황과 열전재료의 에너지 변환 효율 향상을 위한 열전재료 개발연구에 대하여 논한다.

2. 열전재료

2.1 열전재료의 특성

열전재료의 성능 지수는 일반적으로 온도 의존성

이 크므로 넓은 온도 범위에 걸쳐서 한 종류의 열전 재료만을 사용하는 것은 비효율적이기 때문에 사용 온도 영역에서 가장 적합한 열전재료를 선택하여야 한다.

열전재료의 성능은 Seebeck 계수, 전기비저항 및 열전도도를 각각 α, ρ, κ 로 하면 식(1)으로 표시되는 성능지수(Figure of Merit : Z)에 의해 평가된다[1,2]. 성능지수가 높을수록 높은 에너지 변환특성을 나타낸다.

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

3개의 물리 정수에 의해 표시되는 성능 지수는 그

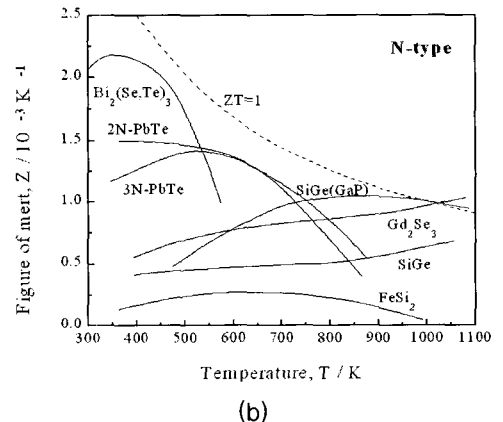
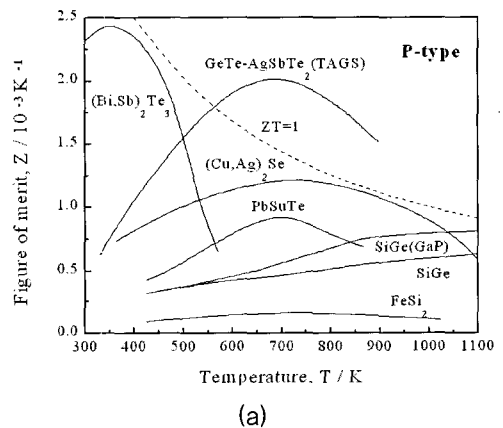


그림 2. 실용 열전재료의 성능지수의 온도 의존성.

림2에 나타낸 바와 같이 재료에 따라 고유의 온도의 존성을 가져 성능지수의 최대치(Z_{max})를 나타내는 온도는 재료에 따라 다르다[1,2].

열전변환의 기술을 다양한 분야에 사용 가능한 레벨까지 올리기 위해서는 효율 향상이 첫 번째 과제이다. 열전변환의 최대효율은 다음 식(1)으로 표시된다.

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{M-1}{M+T_c/T_h} \quad (2)$$

여기서 $\Delta T/T_h = \eta_c$ 는 카르노 효율이고, ΔT 는 온도차이다. 아래의 (2)변항은 재료의 물리적 성질에 의해 결정되는 효율로서 재료효율이라고 불리어진다. $M=(1+ZT)^{1/2}$ 이고 ZT 는 열전재료의 무차원 성능지수(Dimensionless Figure of Merit)라 불리어지는 재료 파라미터이다.

한편, 열전냉각의 최대 성적계수(ψ_{max})는

$$\psi_{max} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \frac{M + T_c/T_h}{M+1} \quad (3)$$

$$M = \{1 + Z(T_h + T_c)/2\}^{1/2} \quad (4)$$

로 표시된다. 또한, 흡열부가 완전 단열되어 열의 유입이 없으면, T_c 는 가장 낮은 상태로 되어 $\psi_{max}=0$ 로 두면 최대 냉각온도차(ΔT_{max})는 다음 식으로 나타낼 수 있다[3,8].

$$\Delta T_{max} = (T_h - T_c)_{max} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (5)$$

식(2), (3)에 나타낸 바와 같이 열전발전에서는 성능지수(Z)가 비교적 낮아도 고온부의 온도(T_h)를 높게 하여 효율을 높이는 것이 가능하지만, 실온 부근의 중저온에서 사용하는 열전재료는 실온 부근의 $\Delta T \leq 100$ K ($\Delta T = T_h - T_c$)의 범위에서 이용되기 때문에 성능 지수(Z)가 높은 것이 필수 조건이며, 현재에는 $3.0 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 이상의 것이 요구된다.

2.2 열전재료의 연구 개발 동향

그림3에 1950년대부터 현재까지의 중요한 열전재료의 ZT (무차원성능지수)의 변화를 나타내었다. 역

사적으로는 1950년까지는 금속 혹은 Bi, Sb 등의 순 금속의 열전효과에 대하여 연구되었다. 1950년대에 열전반도체인 Bi_2Te_3 , PbTe , ZnSb , SiGe , $\beta\text{-FeSi}_2$ 등의 금속간화합물이 개발되었다.

Bi_2Te_3 계 화합물은 실온으로부터 약 450 K까지의 비교적 낮은 온도영역에서 사용되는 최고의 열전재료이다. 그 성능은 실온(300 K)에서 $ZT=0.85$ 이다. 주로 Peltier소자(열전냉각)의 주요재료로 사용되고 있다. PbTe 와 ZnSb 는 600-800 K의 중온도영역에서 각각 $ZT=0.8$ 과 0.6의 성능을 가져 열전발전용으로 사용되고 있다. 그림 중의 TAGS는 AgSbTe_2 와 GeTe 의 조성비 1:1의 화합물로서 유일하게 이 화합물만이 700 K에서 $ZT=1.6$ 의 성능을 가지고 있다. SiGe 와 $\beta\text{-FeSi}_2$ 는 약 1200 K의 고온도에서의 열전발전재료로써 이용되고 있다. 원료자원의 매장량이 풍부할 뿐 아니라 저가이며 환경문제에 덜 민감한 것이 SiGe 와 $\beta\text{-FeSi}_2$ 화합물의 최대 장점이다. 열전재료로서의 성능은 SiGe 계에서 $ZT=0.6$ (1000 K), $\beta\text{-FeSi}_2$ 에서 $ZT=0.2$ 이다.

이와 같이 1950년 이후 약 반세기에 걸쳐 $ZT=1$ 을 넘는 재료는 발견되지 않았으나 1990년대에 들어와 상황이 일변하였다. 혁신적인 아이디어에 기초한 신재료연구가 활발하게 진행되어 $ZT>2$ 의 성능을 가진 재료가 다수 발견되었다.

예를 들면 MSb_3 ($M=\text{Co}, \text{Rh}, \text{Ir}$)계 화합물 및 Skutterudite 화합물에서 $ZT>1.0$ 이상의 열전소자를 개발하였고, 그 외에도 Nolas 등에 의해 발표된 Clathrate 화합물 $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$ 은 복잡한 결정구조를 가지고 있고, 결정 내의 원자의 Phonon 산란에 의해 격자 열전도율이 작아져 열전성능은 $ZT=0.6$ (900 K)이나, 원소 치환 혹은 Carrier 농도 최적화로 $ZT=1.5$ 실현될 가능성이 있다.

1997년 Uher 등은 (Zr, Hf, Ti) NiSn계의 Half Heusler 합금이 유망한 후보 열전재료인 것을 발표하였다. 이 계의 화합물은 다수의 Carrier가 금속적 성질을 가지고 소수의 Carrier가 반도체적 성질을 가지고 있다. 성능은 아직 $ZT=0.2$ (300 K)로 낮으므로 Carrier 농도의 최적화가 필요하다. 현재 일본의 오사카대와 동경대 등에서 연구되고 있으며 이 합금계의 경우 700 K에서 ZT 가 1을 넘는다는 결과 보고가

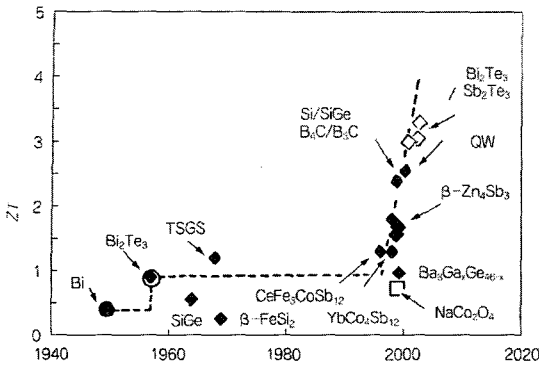


그림 3. 중요한 열전재료의 무차원성능지수의 변화.

있다[9].

저차원의 결정구조를 가지는 새로운 열전재료가 미국 MIT의 Hicks 등에 의해 제안되었다. 이론계산의 결과이지만 초격자구조를 가진 재료는 열전성능이 비약적으로 증가한다. 이 아이디어를 확장한 양자 우물, 양자선, 양자 Dot 등도 제안되고 있다. 최근에는 Bi₂Te₃(10 Å)/Sb₂Te₃(30 Å)의 초격자 박막소자에서 ZT=2.4(실온)를 실현하였다는 보고도 있다.

2.3 상온용 열전재료의 종류

현재 실용화 단계 혹은 연구 단계에 있는 유망한 Telluride계 열전재료로서 Bi₂Te₃계 화합물, PbTe계 화합물 및 TAGS(AgSbTe₂-GeTe계 고용체) 등이 있다.

2.3.1 Bi-Te계

Bi₂Te₃ 화합물은 대표적인 Telluride계 열전재료이며 현재 실용화되고 있는 가장 일반적인 열전재료이다. Bi₂Te₃계 화합물은 p형 및 n형이 존재하는 열전반도체로서 그 사용 온도는 실온~550 K의 비교적 저온 영역이다. Bi₂Te₃계 화합물은 열전냉각에 가장 많이 이용되고 있으며, 광학/전자 디바이스의 냉각 혹은 정밀온도제어를 시작으로 전자기기 혹은 선박/항공기의 공조(空調)시스템, 영정보상기 혹은 저온 시험대 등의 과학기기의 냉각·온도제어 및 야외용 아이스박스 등 그 응용분야는 매우 넓다. 장기간에

걸쳐 이 재료에 관한 연구가 진행되어, 열전모듈 제조회사에서도 더 이상의 성능향상에 어려움을 겪고 있다. 최적의 Carrier 농도를 얻기 위해서 행하여져 왔던 Doping에 의한 성분조정은 이미 높은 수준까지 도달하고 있어 성분조정만으로는 더 이상의 열전 성능의 향상을 기대하기에는 힘든 것이 현재 상황이다.

Bi₂Te₃계 화합물의 결정구조는 일반적으로 육방정의 층상구조이다[10]. c축 방향으로 적층된 각 층간에는 Te-Te간의 반데르발스력에 의한 약한 결합 부분이 존재하여, Te-Te 사이에 있어서의 c축에 수직할 면(c면)에 벽개파괴가 발생하며, 기계적 성질에 이방성이 있다. 이 재료는 전기적 성질에도 이방성이 존재하여 c축에 수직인 방향의 비저항이 c축에 평행한 방향에 비하여 낮은 것으로 알려져 있다. 또한, 결정립을 미세화하면 Phonon 산란을 증가시켜 열전도율이 감소할 것으로 기대된다. 따라서 이 재료의 기계적 성질을 활용하여 전단응력을 추가하는 가공법으로 전기적 이방성과 결정립의 미세화를 촉진시키고자하는 노력이 시도되고 있다. 즉 Bi₂Te₃계 화합물의 결정이 c축에 수직인 면에 용이하게 벽개파괴를 일으키는 것을 이용하고 전단응력을 재료에 가하여 결정립의 우선배향을 촉진시켜 조직제어를 추구함과 동시에 소성변형에 수반되는 동적 혹은 정적 재결정에 의한 결정립의 미세화를 시도하고 있다. 이러한 방법으로는 분말 단조법, 압축+비틀림 성형법, 압연법, 압출법, Bulk Mechanical Alloying, 전단 압출법 등이 있다. 아토타미즈된 Bi₂Te₃계 화합물 분말을 이용하여 분말 단조법으로 z=2.7×10⁻³/K를 얻고 있고, 압축+비틀림 성형법에 의하여 Z=2.9×10⁻³/K를 얻고 있다[6].

2.3.2 Pb-Te계

PbTe계 화합물의 결정구조는 NaCl 형으로 이온 결합성이 강하고, 단일상의 고용영역은 가장 넓은 973 K에 있어서도 49.994~50.013 at.%Te로 매우 좁다[11]. p형 재료는 화학양론 조성의 PbTe에 Ag₂Te 또는 Na를, n형 재료에는 PbI₂ 또는 PbBr₂를 첨가하여 전하의 거동을 제어하고 있다. 그러나 p형 재료는 열적 안정성이 낮아 사용 중에 열전성능이 저하하므로

PbTe-SnTe 고용체로서 사용되고 있으나, 성능지수는 n형보다 낮다. 그림2 중의 3N-PbTe는 이 계에서도 가장 성능지수가 큰 $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ 로 TEGS-3N이란 상표명으로 시판되고 있다[12].

PbTe계 화합물은 1960년대의 우주용 발전의 중심 재료로써 이용되었다. 현재 가스를 원료로 하는 독립전원으로서 마이크로파 무인중계국, 지진계, 파이프라인의 음극방식 등의 전원으로써 이용되고 있다.

2.3.3 AgSbTe-GeTe계

p형 PbTe를 대신할 재료로서 개발된 것이 AgSbTe-GeTe계 다원계화합물[13,14]로 Ge과잉합금은 300 K 이상에서 높은 성능지수를 가진다.

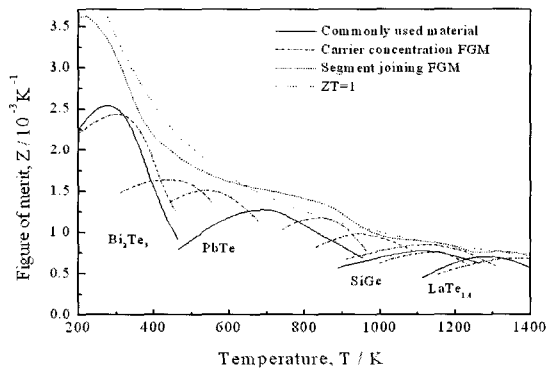
특히 $Ag_{0.15}Ge_{0.85}Sb_{0.15}Te_{1.15}$ 부근 조성의 소결체는 TAGS[3,8,14]로 불려 약 700 K에서 $Z_{max}=2.0 \times 10^{-3} K^{-1}$ ($ZT=1.4$)을 나타내어 중온영역에서 가장 성능이 우수한 p형 재료이다.

2.4 열전재료의 고효율화 방안

열전변환에서 높은 발전 혹은 냉각효율을 얻기 위해서는 높은 성능지수의 열전재료가 요구되어지며, 높은 성능지수의 재료를 얻기 위해서는 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 Seebeck 계수를 크게 하던지 혹은 전기비저항과 열전도도를 감소시킬 필요가 있다[3,8]. 이중 Seebeck 계수와 전기비저항은 전하의 농도와 전하의 이동도에 크게 의존하는 함수이다.

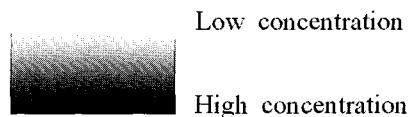
높은 성능지수를 가지는 재료를 얻기 위하여, 종래에는 열전재료의 전기적 특성의 향상에 주안점을 두고 전하농도 조절을 위한 합금설계와 설계된 합금을 단결정 성장법으로 제조하는 방법이 이용되어져 왔다[3,8]. 그러나 이 방법으로 제조된 열전재료는 기계적 강도가 낮아 열전모듈 제조를 위한 후속 공정시 가공의 난점이 지적되고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 분말야금법(용해+응고+분쇄+소결)에 의해 열전재료가 제조되고 있으나, 분말야금 공정에 의해 제조된 열전재료는 다결정 재료로서 기계적 강도는 우수하나 높은 전기비저항을 가져 열전특성이 저하하는 단점을 가지고 있다[3,8]. 이러한 분말야금 공정의 단점을 극복하기 위하여 ① 출력인자($\alpha^2/$

ρ)가 큰 물질의 열전도도의 저하, 혹은 ② 열전도도가 낮은 물질에 금속적인 전도성을 부여시키기 위한 새로운 합금설계와 여러 가지 새로운 분말재료공정 기술이 시도되고 있다. 전자는 전기적 이동도(μ)가 높은 반도체를 2종류 이상 고용시킨 소결체에 의해, 전기적 성질에 기여하지 않는 열전도도의 격자성분(κ_{ph})의 감소, 즉 결정격자의 변형장 및 결정립계에 의한 격자(Phonon) 산란의 증가를 촉진시킨다. 후자는 열전도도의 격자성분(κ_{ph})이 낮은 반도체 혹은 절연체에 첨가물(Dopant) 혹은 격자결함을 도입하여 금속적 전도를 유발시킨다.

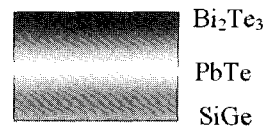


(a)

Carrier concentration FGM



Segment joining FGM



(b)

그림 4. 경사구조에 의한 성능지수의 향상.

2.4.1 경사구조화

출력인자(α^2/ρ)의 온도특성의 개선책으로서 실용 재료의 전하농도(n)를 열의 흐름 방향으로 적정화시킨 경사구조가 넓은 온도영역에서 성능지수를 크게 할 수 있다(그림4). 이 방법은 현실성이 높고 전하농도가 균일한 재료보다 성능이 우수한 것으로 보고되고 있다[15]. 경사구조화 기술과 새로운 재료개발의 적용에 의해 고효율화가 가능해 열전응용의 분야도 비약적으로 확대될 것으로 기대된다.

2.4.2 나노 입자 분산 기술

단순한 분말야금 공정(용해+분쇄+소결)을 이용한 결정립 미세화는 결정립계의 격자(Phonon) 산란 증가에 따른 열전도도의 저하효과보다 결정립 미세화에 따른 전기비저항 증가의 효과가 더욱 커서 성능지수의 향상에는 한계가 있다. 전기전도에는 기여

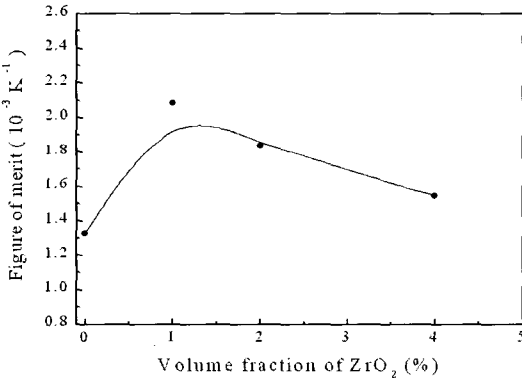


그림 5. 10nm 크기의 ZrO₂ 입자 첨가에 따른 Bi₂Te₃의 성능지수 변화.

하지 않고 격자(Phonon) 산란을 극대화하기 위하여 나노크기의 제2상의 입자를 첨가하면, 그림5와 같이 성능지수가 크게 향상되는 것으로 보고되고 있다 [16]. 이 방법은 기존의 다양한 합금계의 적용이 용이하여 그 응용이 기대된다.

2.4.3 비 균질 구조화

분말야금공정(용해+용고+분쇄+소결)에 의해 열전재료를 제조할 경우 일반적으로 결정립 크기가 감소함에 따라 성능지수 값은 증가한다. 어느 결정립 크기에서 최대치를 나타낸 후 결정립 크기의 감소와 함께 감소하는 경향을 나타낸다. 또한, 어느 결정립 크기 이상의 결정립 크기에서 결정립 크기 감소에 따른 성능지수의 증가는 결정립 크기의 감소에 의한 전기비저항의 증가 효과보다 열전도도의 감소 효과가 더욱 크게 작용하기 때문이다. 또 어느 결정립 크기 이하의 결정립 크기에서는 결정립 크기 감소에 따른 성능지수의 감소는 결정립 크기의 감소에 의한 전기비저항의 증가 효과가 열전도도의 감소 효과보다 더욱 크게 작용하기 때문이다. 높은 성능지수 값을 얻기 위해서는 낮은 전기비저항과 열전도도가 동시에 요구되나, 일반적으로 전기비저항이 낮아지면 열전도도가 증가하여 단순 분말야금 공정에 의해 결정립 크기를 제어하여 열전재료의 성능지수를 향상시키는 데는 한계가 있다. 이와 같은 상반된 요구특성을 제어하기 위하여 서로 상반된 열/전기적 특성을 가진 분말을 혼합하여 비 균질구조를 만들면 표1에 나타낸 바와 같이 혼합 전 각각의 소결체에 비하여 성능지수가 향상되는 것으로 보고되고 있다[17].

표 1. 균질구조와 비 균질구조의 Bi₂Te₃의 열전특성의 비교.

	Seebeck coefficient (μV/K)	Specific electric resistivity (10 ⁻⁵ Ωm)	Thermal conductivity (W/mK)	Figure of merit (10 ⁻³ K ⁻¹)	Particle size (μm)	Remark
Bi ₂ Te ₃ powder I	-140	0.78	1.5	1.67	5	Low ρ High κ
Bi ₂ Te ₃ powder II	-170	1.45	1.12	1.7	2	High ρ Low κ
Mixed powder (I + 40 %II)	-150	0.85	1.23	2.15		

2.5 새로운 열전소재 기술

2.5.1 마이크로 열전소재

p형과 n형의 열전재료를 정방향으로 절단하여 도전재료로 회로를 구성하여 발전과 냉각기능을 가지는 열전소자를 만드는 것이 가능하다. 일반적으로 열전소자는 기계가공에 의하여 만들어지고 정방향의 Element 크기는 mm 이상이다. 한편, 최근에 마이크로 열전소자에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 이것은 마이크로 머신 혹은 미소전기기계시스템(Microelectromechanical System : MEMS)기술의 급속한 발전에 동반하여 마이크로 열전소자는 다음과 같은 분야에 응용이 기대되고 있기 때문이다.

- ① 휴대형 마이크로 에너지원
- ② 국부온도제어용 전자냉각 디바이스
- ③ 적외선 혹은 가스검출용 마이크로 센서

마이크로 열전소자의 예로서는 1988년에 판매된 열전시계가 유명하다. 그 시계에 폭 80 μm , 높이 600 μm 의 Element로 구성된 마이크로 열전소자가 10개 장착되어 인간의 체온과 대기의 온도차에 의해 시계에 전력을 공급한다. 최근에는 현재 사용되고 있는 리튬전지보다 에너지 밀도가 높은 마이크로 에너지원이 요구되어 가스 연소를 병용하는 마이크로 열전발전기의 개발도 미국 등에서 검토되고 있다. 그 경우에는 열전변환 효율이 낮아도 액체연료를 사용하면 전체적으로 에너지 밀도가 리튬전지를 초과할 가능성이 있다고 예측되고 있다. 현재 마이크로 연료전지의 연구개발도 급속히 진행되고 있지만 열전발전에 기초한 마이크로 전원은 연료전지에 비하여 많은 장점을 가지고 있다.

한편, 열전발전에 비하여 열전냉각의 응용은 소자의 크기에 관계없이 많이 진행되고 있다. 예를 들어 광통신용 반도체 레이저의 온도제어에 비교적 소형의 열전소자가 사용되고 있다. CPU의 방열이 모바일 PC의 고속화를 제약하는 문제점으로 지적되어 마이크로 열전소자에 의한 전자냉각이 매력적인 해결책으로서 주목되고 있지만, 아직 실용화까지는 많은 문제점이 있다. 열전발전과 냉각 이외에 마이크

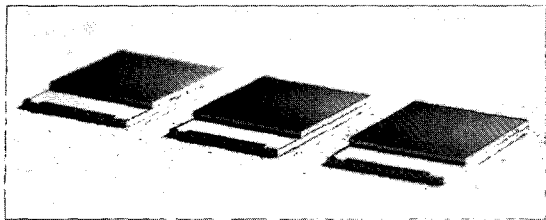
로 열전소자는 적외선 카메라의 소자, 수소 검출 센서로서의 응용도 검토되고 있다.

보통의 열전소자는 절단가공 등의 공정을 거쳐 만들어지지만 열전재료는 전반적으로 취약하고 강도가 낮기 때문에 서브 mm 스케일의 기계가공은 매우 곤란하다. 그래서 마이크로 열전소자의 가공법에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다. 특히 평면형 박막 열전소자에 대한 연구가 증가하고 있다. 이것은 종래의 열전소자의 구조에 비하여 평면형 열전소자가 소형화가 용이하기 때문으로 생각된다. 그러나 평면형보다 종래의 구조가 여러 가지 장점을 가지고 있어, 종래형의 미소화에 대한 연구가 중시되고 있다. 그 예로서 실리콘 몰딩법이 개발되어 Bi-Sb-Te계 마이크로 열전 Element(폭 40 μm × 높이 > 300 μm)의 제조가 보고되고 있다.

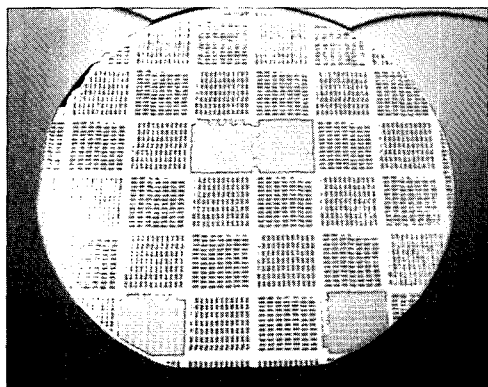
2.5.2 박막형 열전냉각소자 개발현황

마이크로프로세서를 비롯한 고집적회로의 처리속도가 비약적으로 향상되고 선폭과 같은 특성치(Feature Scale)가 감소함에 따라 첨단전자부품의 발열량이 커지며 이를 효율적으로 제거하는 기술이 제품개발에 있어서 중요한 부분을 차지한다. 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.

현재 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. 독일의 Micropelt社는 Fraunhofer IPM연구소의 기술을 이전받아 웨이퍼 상의 반도체 공정을 이용한 초소형 열전소자를 제작하여 상용화하고 있다(그림 6). 두 장의 실리콘 기판 위에 P형과 N형의 열전재료



(a)



(b)

그림 6. 반도체 제조기술을 이용한 박막형 미세 열전냉각소자(독일 Micropelt社).

를 각각 증착하여 합착하는 방식으로 제조된 소자는 그 크기가 1 mm 내외로 냉각능력은 약 0.3 W(at $\Delta T = 20 K$)에 이른다.

2.5.3 나노 구조 열전소자

최근 나노기술(Nano-technology)을 이용하여 열전재료를 개발하고 소자를 제조함으로써 열전냉각 성능을 획기적으로 향상시킨 연구 성과가 발표된 바 있다. 그림7은 실온에서의 열전성능지수(ZT)값 향상 추이를 나타낸 것으로, 1950대에 Bi_2Te_3 나 이에 Sb, Se 등을 첨가한 합금재료를 발견한 이래 이렇다 할 성과를 얻지 못하다가 2000년대에 접어들면서 획

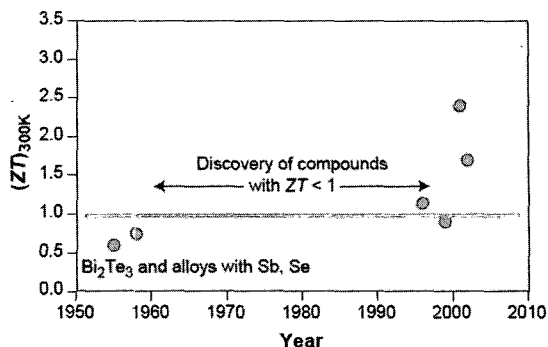


그림 7. 실온에서의 $BiTe$ 계 열전 성능 지수로 나타낸 열전 재료 연구 개발의 역사[5].

기적 개선을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 나노 기술을 이용한 결과로서 1990년대 전반 미국의 연구자들이 제안한 저차원 재료의 이론적 예측에 의해 열전변환재료의 나노 구조 제어라는 개념이 도입되게 되었다. 재료 그 자체가 2차원적인 층상구조를 가지는 것에 대응하여 나노 스케일의 구조를 인공적으로 제어하는 것에 의해 재료의 구조를 저 차원화하여 열전변환재료의 성능을 크게 향상 시키고자 하는 개념은 지금까지의 접근 방식과는 달리 완전히 다른 접근 방식이다. 이 접근 방식은 무차원 성능지수 ZT가 5를 넘는 재료를 얻는 것도 가능함을 이론 계산 결과로 보여준다.

2005년 현재 나노 구조 제어된 저차원재료로서 2차원 재료로 칭해지는 수 nm의 박막을 층상으로 배열하여 얻어지는 인공초격자와 1차원 재료라고 칭해지는 직경이 나노 스케일인 나노 와이어로 대별할 수 있다.

1990년대 초반 미국 MIT의 Hicks와 Dresselhaus는 양자구속효과를 감안한 계산을 통하여, Bi_2Te_3 양자 우물구조(Quantum well Structure)에서 열전성능지수가 3차원 벌크(Bulk)상의 수치보다 몇 배 이상 커질 수 있다고 예측했다[18]. 이러한 접근법을 이용하여 여러 가지 양자구속형 열전재료를 합성하고 그 열전성능을 평가한 연구결과를 보고하였다 [19-22].

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 2.4 까지 향상시킨 연구결과를 발표하였다[23]. 그들이 제조한 열전냉각소자와 앞에 소개한 MIT의 Dresselhaus 그룹이 만든 열전냉각소자는 나노구조체를 이용하는 방식에서 차이점을 보인다. 그림8(a)에서는 격자 층에 나란한 방향으로 전류와 열전달이 이루어지는데, 전자가 초격자층내에서 2차원운동을 하면서 전달되는 것과 달리 포논은 격자층 계면(Interface)에 의하여 산란되는 것을 알 수 있다. 반면,

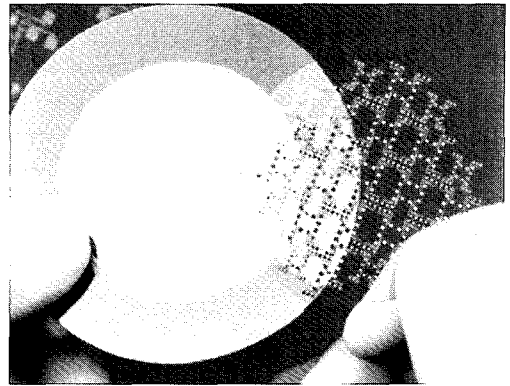


그림 9. 초격자구조를 이용한 박막형 열전냉각소자.

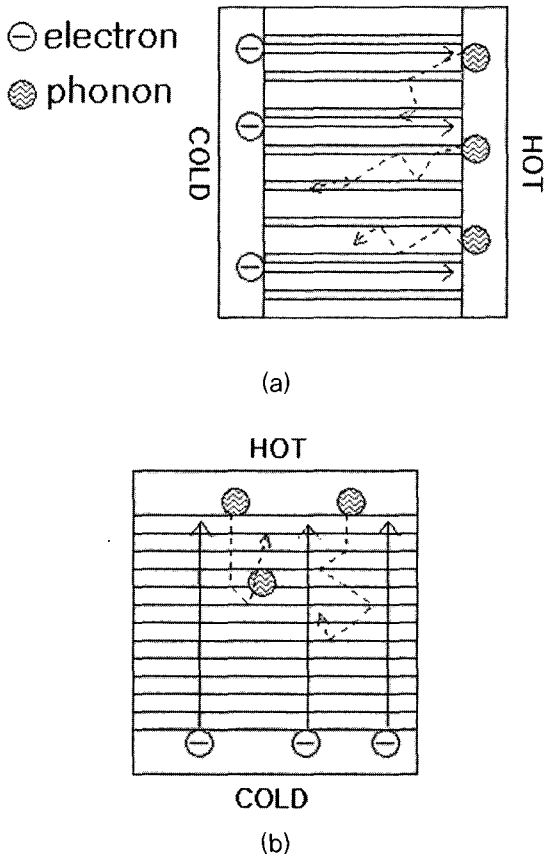


그림 8. 초격자 나노구조체를 이용한 열전냉각소자 ; (a) MIT, (b) RTI.

그림8(b)에 표현된 열전냉각방식에서는 전류와 열전달이 초격자층에 수직방향으로 이루어진다. 이 경우 포논은 계면 산란으로 인하여 이동이 더욱 방해받을 것으로 쉽게 알 수 있으나, 열전성능을 높으려면 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 구조에서는 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 32.2 K의 절대냉각이 가능하고 약 700 W/cm^2 의 냉각력을 갖춘 열전냉각소자(그림 9)를 선보였다.

2.5.4 나노 와이어

나노 와이어 연구의 주류는 새로운 재료를 이용하는 연구는 아니고 열전변환재료의 기본재료인 Bi를 직경이 나노 스케일인 와이어상으로 가공하여 양자효과를 발현시키고자 하는 연구이다. 이 양자효과가 나타나는 와이어의 직경은 약 200 nm로 알려져

있다. Bi를 나노 와이어상으로 하는 것에 의해 성능 향상이 이루어지는 것이 이해하기 어려울지 모르나, 이것은 Bi 내부를 움직이는 Carrier의 집단적 크기(도프로이파장)와 비교하여 와이어의 직경이 작아지면 양자효과가 무시되지 않는 것에 기인한다. 나노 와이어 연구는 나노 구조 제어에 의해 양자효과를 극단적으로 출현시켜, 재료의 열전변환 소자로서의 성능을 향상시키는 것이다.

나노 와이어가 열전변환재료로서 실제 사용되는 경우에는 1개의 와이어로서는 사용할 수 없기 때문에 수10~수1000만 개의 와이어를 단면적 수 mm² 중에 집속시킨 소자로서 사용된다.

나노 와이어 소자의 연구는 1990년대 후반부터 활발하게 진행되고 있다. 보통의 3차원 재료인 Bi는 실온부근에서 Seebeck 계수의 절대치가 50~120 $\mu\text{V}/\text{K}$ 정도인 것에 비하여 와이어의 직경을 9 nm 정도로 하면 Seebeck 계수의 절대치가 수십 mV/K로 향상되는 것으로 보고되고 있다. 이 결과가 Bi의 양자효과에 의한 것인지 아직 불분명하나, 나노 와이어화하는 것에 의해 종래의 Bi와는 완전히 다른 거동을 나타내는 하나의 결과이다.

성능지수의 하나의 파라메타인 저항률의 측정에 대해서는 현재 연구가 진행되고 있다. 3차원 재료인 Bi의 실온에서의 저항률은 1 $\mu\Omega/\text{m}$ 정도이지만 나노 와이어 소자의 저항률은 수 m Ω/m 까지 다양한 값들이 보고되고 있다. 이러한 저항률의 차이는 나노 와이어 소자의 접촉저항에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 나노 와이어의 실용화를 위해서는 접촉저항의 문제를 해결하여야 할 것으로 판단된다.

나노 와이어 소자에 대해서는 현재 Bi를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 재료를 Bi에 한정할 필요는 없다. 양자효과가 기대되는 여러 가지 재료를 이용한 연구개발이 향후 진행될 것으로 예상된다. 이것에 의해 개발된 재료는 종래에 보아왔던 재료와는 완전히 다른 열전성능을 나타낼 것으로 기대된다. 나노 스케일의 구조제어가 비교적 용이하게 이루어지고 있는 현재 실정에서 나노구조재료의 연구개발은 향후 큰 주류가 될 것으로 예상된다. 열전변환재료로서 광범위하게 실용화되고 있는 Bi₂Te₃ 계가 개발되어 약 50년, 나노 구조 제어재료가 열전

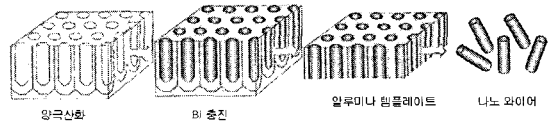


그림 10. 열전변환재료의 나노 와이어화[9].

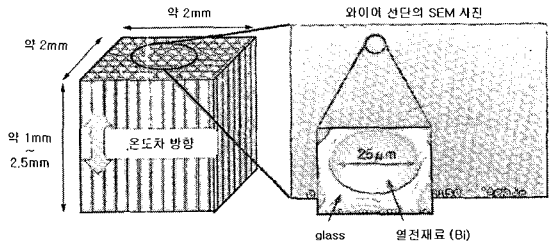


그림 11. 와이어 직경 25 μm 의 마이크로 와이어 소자[9].

변환재료의 새로운 문을 열 가능성이 높다.

3. 열전변환기술의 응용

3.1 냉각에의 응용[24]

3.1.1 광통신

장거리, 대정보량의 광통신을 위해서는 약 50~100 km 간격으로 설치되어 있는 레이저 다이오드가 발생시키는 적외선의 파장을 일정한 범위내에 제어하며, 적외선 파장의 제어를 위해서는 레이저 다이오드의 온도제어가 매우 중요하다. 따라서 레이저 다이오드는 매우 신뢰성이 높은(약 15~20년의 평균 수명) 소형의 열전모듈 위에 탑재되어, 냉각면이

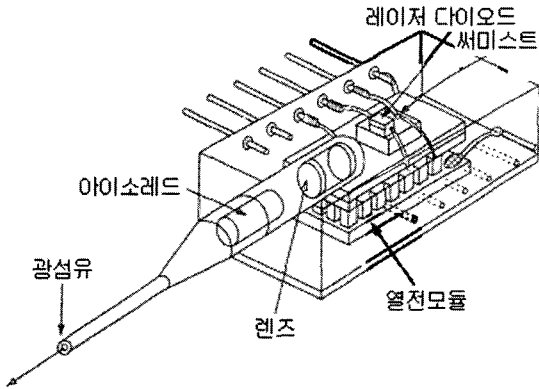


그림 12. 광신호 발신, 증폭용 레이저 모듈.

$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도로 온도 조절되고 있다(그림12). 최근의 고밀도 광통신에서는 신호용 광원 레이저의 온도 조절 외에도 신호광을 특수한 광섬유 안에서 증폭하는 역할을 담당하는 신호광 여기용 레이저의 냉각·온도조절에도 열전모듈이 대량으로 사용되고 있다.

3.12 반도체 프로세스

열전모듈은 반도체 칩 제조의 전단계 공정에 있어서 실리콘 웨이퍼를 처리하는 공정에 넓게 이용되고 있다. 그 이유는 반도체 전처리 공정에서 IC와 LSI의 미세회로를 형성시키는 데는 온도관리가 매우 중요하다. 온도조절의 정밀도는 일반적으로 \pm

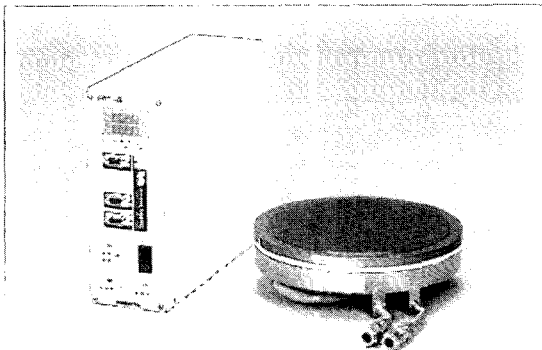


그림 13. 실리콘 웨이퍼 냉각 플레이트.

$0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도의 정밀 온도조절을 요구하며, 실온에 있어서 이러한 정도의 정밀도로 조절하는 시스템으로는 열전냉각이 가장 적합하다. 또한, 열전모듈을 이용한 시스템은 소형, 경량으로 전체 설비의 경량·소형화에 크게 기여한다. 한 예로서 그림13에 $150\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 실리콘 웨이퍼를 실온부근까지 급냉하여 일정온도로 유지하는 실리콘 웨이퍼 냉각 플레이트를 나타내었다.

3.1.3 적외선 센서

적외선 센서는 센서 자체의 온도가 높게 되면 신호광과 잡음광의 비(S/N비)가 작게 되어 감도가 현저하게 저하되므로 적외선 센서는 냉각을 해주어야 한다. 적외선 센서를 냉각하는 경우, 열전모듈로는 1단 모듈보다 온도차를 크게 줄 수 있는 다단모듈이 사용된다(그림14). 열전모듈을 이용한 적외선 센서 장치의 대표적인 예로서는 온도분포 측정용의 Thermo-grapher, 인공위성의 자세 제어장치 등을 들 수 있다.

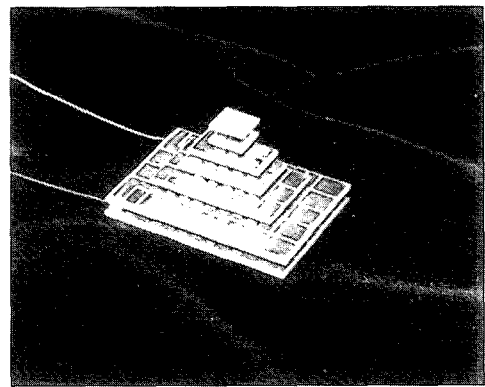


그림 14. 다단 열전모듈.

3.1.4 제습기

열전모듈은 소형, 고성능의 제습기에 적합하여, 분석가스의 제습, 보관고의 제습, 배전반의 제습 등에 넓게 이용되고 있다.

3.1.5 유전자 증식장치

PCR법이라고 칭해지는 유전자 증식장치는 90℃ ↔ 50℃의 온도사이클을 반복하며 유전자를 증식시킨다. 이를 위해 다른 방법도 사용할 수 있지만, 가열/냉각의 응답성이 우수한 열전모듈이 사용되고 있는 경우가 많다.

3.1.6 휴대용 쿨러 박스

열전모듈을 이용하여 냉각온도 약 5℃ 정도인 휴대용 쿨러 박스가 제작, 판매되고 있다. 이 경우 열전모듈 1개의 소비전력은 약 50 W 정도이므로, 자동차의 배터리로부터 전원을 공급받을 경우에는 자동차 엔진이 멈추지 않아야 하는 단점이 있다. 또한, 병원, 호텔용으로 소형의 보냉고(保冷庫)가 사용되고 있다.

3.1.7 냉장고

열전모듈을 이용한 냉각방식은 기존의 콤프레셔 방식과 달리 특정의 프레온 가스 혹은 대체 프레온 가스를 사용하지 않는다. 이 때문에 환경적 측면에서 콤프레셔 방식을 대체할 수 있는 방식으로 냉장고 등의 응용에 큰 기대가 모아지고 있다. 프론제 가스는 1996년부터 규제가 시작되어 최종적으로 2020년에 사용이 전면 규제될 예정이나, 상황에 의해 전면 규제의 시기가 앞당겨질 가능성도 크다. 또한, 일본에서는 1998년에 가전제품의 재활용법이 공포되어, 이후부터 프론식 콤프레셔를 사용한 냉장고에 대해서는 냉장고의 폐기에 프레온의 회수가 의무 사항으로 되어있다. 현재는 회수비용이 아직 소비자에게 부담되고 있지 않으나, 최종적으로는 상품의 가격에 첨가되어 소비자에게 부담이 될 것이다.

성능 면에서 본 열전냉각 방식의 특징을 표2에 나타내었다. 소음에 관해서는 콤프레셔 방식 특유의 기동음이 없으므로 10 dB 정도 소음을 낮출 수 있어, 체감적으로는 거의 무음의 냉장고가 가능하다. 또한, 최근 온도표시를 하는 냉장고가 등장하는 등 냉장고 내의 온도제어에 대해서도 관심이 집중하고 있다. 열전냉각 방식은 소자에 가해지는 전압을 제어함으로써 용이하게 냉각능력을 제어할 수 있어, 온도의 제어면에서는 유리하다. 열전냉각 방식에서는

주위온도가 냉장고 온도보다 낮아도 소자에 가해지는 전압의 극성을 바꾸어줌으로써, 냉장고 내를 일정한 온도로 유지할 수 있다. 기존의 콤프레셔 방식에서 구조상 용이하게 해서는 이와 같은 기능을 가지게 하는 것이 곤란하다. 또한, 열전냉각 방식은 소형이 될수록 냉장고 중량을 줄일 수 있는 것도 매우 유리한 점으로 들 수 있다. 수년 전까지만 하여도 열전냉각 방식의 냉장고는 효율이 나쁘다고 생각되어져 왔으나, 소형 냉장고, 쿨러 박스에 있어서는 콤프레셔 방식과 거의 동등의 소비전력으로 작동시키는 것이 가능하여, 암모니아 흡수식보다도 소비전력량을 적게 할 수 있다. 또한, 열전냉각 방식은 시스템의 최적설계에 의해 약 70%의 습도(콤프레셔 방식: 약 40%)를 유지한 채로 냉장보관이 가능하므로 채소, 건조하기 쉬운 치즈 등의 신선도를 장시간 유지할 수 있다.

표 2. 소형 냉장고에 있어서 열전 방식과 콤프레셔 방식의 특성 비교.

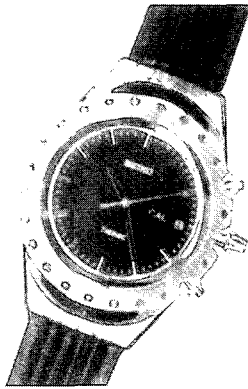
	열전냉각 방식	콤프레셔 냉각 방식
청음성	15 dB	23 dB
온도의 제어성	±0.2℃ 이하 가능	±1℃ 이상

열전냉각방식 냉장고의 새로운 개념으로서, 열전냉각소자의 특성을 활용하여 개개의 식품보존에 적당한 온도를 만들어, 각 식품의 보존조건에 적합한 보존고, 숙성고 등 지금까지의 콤프레셔 방식에서는 불가능한 열전냉각 방식 특유의 상품전개가 가능하다.

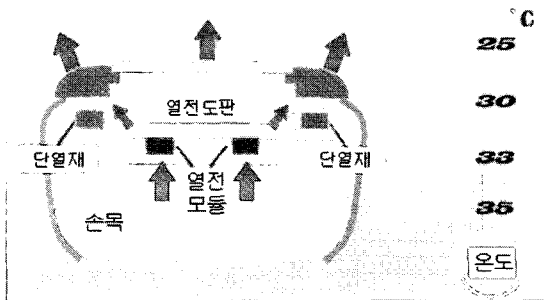
3.2 발전에의 응용[24]

3.2.1 손목시계의 전원

아날로그식 손목시계는 상품화된 후 약 30년이 경과하였다. 그 사이 IC, Rota 자석, 수정진동자 등 시계를 구성하는 요소부품의 소비전력은 각 단계에서 감소하여, 현재에는 평균 1.5 V ~ 1 μA 정도(1~2 μW)의 소비전력으로 손목시계를 구동시킬 수 있게 되어, 통상 사용되고 있는 전자기기로서는 가장 에너지 효율이 좋은 제품의 하나이다. 한편, 사람의 인체는 50~100 W 정도의 발열체로 알려져 있고, 피부로부터



(a)



(b)

그림 15. 1998년에 판매된 열전 손목시계와 열전 손목시계의 개념.

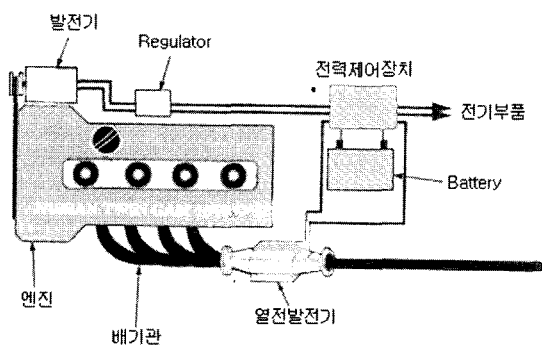
터 수 mW/cm^2 정도의 열이 방출되고 있다. 손목시계의 뒷면의 면적이 10 cm^2 라고 하면 수 10 mW 의 열류가 손목시계를 통과할 것이 예상되고, 이 열류에 의한 온도차 (고온부 약 $30\text{ }^\circ\text{C}$, 저온부 약 $29\text{ }^\circ\text{C}$)에 의해 수십 μW 의 전력을 얻어 손목시계를 구동시킬 수 있을 것으로 기대된다.

그림15에 1998년 12월에 일본에서 판매된 열전손목시계를 나타낸다. 이 시계의 구조는 손목으로부터 시계 뒷면에 받은 열이 시계 내부에 내장된 열전모듈을 통과한 후 시계 케이스를 통하여 방출하도록 되어 있다. 또한, 비착용시에는 전력을 공급할 수 있도록 2차전지가 내장되어 있다. 이 시계를 상온에서

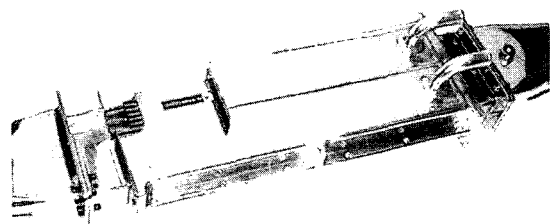
착용 시 200 mV 이상의 전압이 얻어져 시계의 구동 전력 및 2차전지에의 전력 공급에 충분한 발전이 이루어졌다. 이와 같이 인간의 인체와 대기와의 미소한 온도차를 열전발전에 이용한 열전손목시계는 광범위한 열원의 이용을 보여주는 좋은 예이다.

3.2.2 자동차 배기열 발전

자동차에 있어서 에너지는 원료인 가솔린으로부터 엔진에 의해 기계에너지로 변환된다. 이때의 효율은 약 30% 정도이다. 나머지 에너지는 열로서 라지에터와 엔진 본체로부터 약 40% 정도, 배기가스로부터 약 30% 정도가 외부로 방출되고 있다. 또한, 축에 전달된 에너지는 각종 구동부품의 마모와 보조



(a)



(b)

그림 16. 자동차 배기열 발전시스템과 열전발전기 시제품.

구동 등에 의해 소비되어, 최종적으로 주행에 사용되는 에너지는 원료인 가솔린이 가진 에너지의 약 15% 정도로 추산된다. 배기가스의 온도는 촉매 콘버터부에서 약 300~500℃로 그 배기열량은 약 2kW ~ 10kW 정도로서, 이 배기열을 이용하여 약 500W의 전력을 얻어 전력시스템의 보조전력으로 사용하면, 약 10% 정도의 연비절감이 기대되어 이에 대한 연구개발이 활발히 진행 중이다. 일본의 닛산 자동차에서 진행 중인 자동차 배기열 발전시스템의 개략도와 개발된 열전발전기를 각각 그림16에 나타내었다.

4. 향후 전망

열전변환기술은 지금까지는 주로 항공, 우주 및 군수용 등의 제한적 분야에서 일부 특수 용도로만 이용되어져 왔다. 그러나 최근 에너지 고갈과 지구 온난화에 따른 환경 및 에너지 문제의 해결과 함께 산업의 고도화에 따른 정밀 제어 장치 및 삶의 질 향상에 일익을 담당할 수 있는 기술로서 점차 자리 매김되어 가고 있다. 그 추세를 반영하듯 발전과 냉각의 모든 분야에서 열전변환기술을 응용한 다양한 제품들이 연구/개발 단계를 지나 제작, 판매되고 있으며, 특히 상온 부근에서 작동하는 열전변환장치의 이용은 급속히 사용량이 증가하고 있다. 그러나 이러한 응용은 아직 시작 단계로서 그 응용범위의 확대를 위한 노력들이 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. 열전변환기술의 범용적 실용화를 위하여 높은 에너지변환효율을 가진 열전재료가 요구되어진다. 열전재료의 성능 지수를 향상시키기 위한 새로운 소재 가공 및 합성 기술이 개발되고 있으며 특히 나노 기술을 이용한 고풍성화 및 마이크로 열전소자의 개발로 가까운 미래에 열전변환기술의 비약적인 발전 시대가 도래할 것으로 예견되고 있다.

참고 문헌

- [1] 上村欣一, 西田勳夫: 熱電半導?とその應用, 日刊工業新聞社, 東京, (1988).
- [2] D.M.Rowe : CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Inc., New York (1995)
- [3] 西田勳夫: セラミックス, 21(1986), 516.
- [4] D. M. Rowe and C. M. Bhandari : Modern Thermoelectrics, Holt, Rinehart & Winston Ltd, London, (1983), 15, 113.
- [5] A. Majumdar, " Thermoelectricity in Semiconductor Nanostructures," Science 303, 777, 2004
- [6] C. B. Vining, "Semiconductors are cool," Nature 413, 577, 2001
- [7] B. C. Sales, "Smaller Is Cooler," Science 295, 1248, 2002
- [8] 西田勳夫: セラミックス, 21(1986), 516.
- [9] 日本セラミックス協會, 日本熱電學會, "熱電變換材料", 日刊工業新聞社 (2005).
- [10] D.R.Lovett : Semimetals & Narrow-Bandgap Semiconductors, Pion Ltd, London, (1977) p. 139.
- [11] R.F.Brebrick and R.S.Allgaier : J. Chem. Phys., 32(1960), p. 1826.
- [12] D.M.Rowe and C.M.Bhandari : Modern Thermoelectrics, Holt, Rinehart & Winston Ltd, London, (1983), p. 113.
- [13] R.D.Rosi, E.F.Hockings and N.E.Lindenbald : RCA Rev., 22(1961), p. 82.
- [14] E.A.Skrabek : Proc. 9th Inter. Soc. Energy Conv. Eng. Conf. (IECEC), (1974), p. 160.
- [15] C.B.Vining : Proc. 9th ICT, (1990), p. 249.
- [16] Y.Noda, H.Kon, Y.Furukawa, I.A.Nishida and K.Masumoto : Proc. 12th ICT, (1993), p.206.
- [17] 이길근, 박홍일 : 한국분말야금학회지, 7(1)(2000), p. 6.
- [18] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Effect of Quantum-Well Structures On the Thermoelectric Figure of Merit," Phys. Rev. B 47, 12727, 1993.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] T. Koga, et. al., "Thermoelectric figure of merit of Bi/Pb1-xEuxTe superlattices," Phys. Rev. B 62, 16703, 2000
- [22] T. C. Harman, et al., "Quantum dot superlattice

thermoelectric materials and devices," Science 297, 2229, 2002

[23] R. Venkatasubramanian, et al., "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit," Nature 413, 597, 2001.

[24] 이길근, 기계와 재료, 12권, 3호(2000) p. 31.

저|자|약|력



성 명 : 하국현

- ◆ 학 력
- 1984년 부산대 금속공학과 공학사
- 1986년 부산대 대학원 금속공학과 공학 석사
- 1998년 경상대 대학원 재료공학과 공학 박사

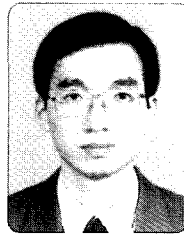
- ◆ 경 력
- 1989년 - 현재 한국기계연구원 분말재료연구센터 책임연구원



성 명 : 김동호

- ◆ 학 력
- 1996년 서울대 화학공학과 공학사
- 1998년 한국과학기술원 화학공학과 공학 석사
- 2002년 한국과학기술원 화학공학과 공학 박사

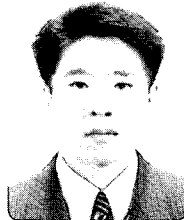
- ◆ 경 력
- 2002년 - 현재 한국기계연구원 표면기술연구센터 선임연구원



성 명 : 이길근

- ◆ 학 력
- 1986년 부산대 금속공학과 공학사
- 1989년 부산대 대학원 금속공학과 공학 석사
- 1994년 Tohoku Univ. 재료가공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1994년 - 1995년 Tohoku Univ. 문부교관조수
- 1995년 - 1996년 Mitsubishi Materials Co. 종합연구소 특별연구원
- 1996년 - 1999년 한국기계연구원 선임연구원
- 1999년 - 현재 부경대 신소재공학부 부교수



성 명 : 유지훈

- ◆ 학 력
- 1994년 한양대 금속재료공학과 공학사
- 1996년 한양대 대학원 금속재료공학과 공학석사
- 2001년 한양대 대학원 금속재료공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 2001년 - 2002년 한양대 BK21 재료인력양성사업단 Post-doc
- 2002년 - 2003년 스위스연방로잔공대(EPFL) Post-doc
- 2003년 - 현재 한국기계연구원 분말재료연구센터 선임연구원



성 명 : 김옥중

- ◆ 학 력
- 1983년 아주대 기계공학과 공학사
- 1985년 KAIST 기계공학과 공학석사
- 1998년 KAIST 기계공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1985년 - 현재 한국기계연구원 에너지기계연구센터 책임연구원