

| 열전 변환의 원리와 응용

장경욱 교수
(한서대 신소재공학과)
김일호 교수
(충주대 신소재공학과)
이정일 교수
(충주대 신소재공학과)

1. 서론

도체 또는 반도체 재료에서 Seebeck, Peltier, Thomson 효과 등의 열전 현상이 발견된 이래, 이를 발전과 냉각/가열 분야에 응용하려는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다[1,2]. 제백효과는 재료에 온도차가 존재할 때 기전력이 발생하는 현상으로 열을 전기에너지로 직접 변환하는 가장 단순한 형태인 열전발전에 응용할 수 있다. 펠티에 효과는 이종 재료의 접합부에 전류가 흐를 때 열을 흡수하거나 방출하는 현상으로 열전냉각/가열 기로 응용할 수 있다.

열전발전은 태양열, 해수의 온도차, 지열 등의 자연 상태의 열에너지에서부터 화석연료, 방사능 동위원소의 붕괴열, 소형 원자로의 열까지 다양한 열원 이용할 수 있다. 또한, 열에너지로서의 가치가 있음에도 불구하고 재활용이 어려운 온배수나 전기로, 쓰레기 소각로, 자동차 등에서 배출되는 산업 폐열을 전기에너지로 변환할 수 있다는 점에서 에너지의 효율적인 사용과 관리가 가능하다. 열전발전은 출력규모가 다른 발전 방식에 비해 작아 소용량의 발전장치를 제작할 수 있고, 구조가 간단하고 가동부가 불필요하므로 우주와 같은 극한적 환경이나, 소음이 적으며 이동이 가능하므로 군사용 발전기 등과 같이 안정성과 높은 신뢰성이 요구되는 상황에 적합한 것으로 판단된다.

현재 미국, 일본 등에서는 수백 W급의 열전발전기가 우주 및 해양 개발, 군사용, 벽지용 전원으로서 실용화되어 어느 정도의 시장을 확보하고 있다. 벽지용 열전 발전기는 무선 중계 기지국의 전원과 송유관의 부식 방지용 전원으로서 20년 이상의 가동 실적을 보이고 있다. 열전발전의 효율은 열전재료의 성능의 한계 때문에 최대 20% 정도이지만 재료의 성능과 제조 기술은 더욱 향상되는 추세이므로 소형 전원으로뿐만 아니라 새로운 대체 에너지 기술로서의 유용성과 잠재적 가능성은 매우 크다.

열전냉각은 컴프레서 방식의 냉각 시스템과 비교하면 정밀한 온도제어가 가능하고, 가동부가 없기 때문에 정숙한 냉각이 가능하고, 프레온가스와 같은 냉매가 필요 없고, 소형화가 가능하다는 이점을 갖고 있다. 열전냉각은 잠수함, 열차 및 항공기의 공조라는 대형 냉각부터 국소 냉각이

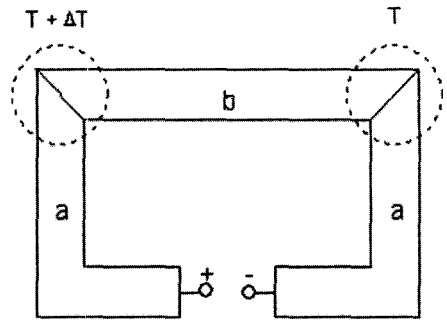
필요한 초소형 센서의 냉각까지 그 대상이 된다. 민생용으로 소형냉장고, 냉온 정수기, 휴대용 쿨러, 자동차용 에어컨 등이 있다. 무진동성의 특징을 활용하여 병원과 호텔에서의 개인용 냉장고와 와인 쿨러 등의 식품보관고로서 새로운 시장을 확대하고 있다.

대부분의 반도체는 소자화되고 점차 소형화의 경향으로 가고 있다. 따라서 열에 의한 잡음의 발생, 수명의 단축 및 출력 향상의 불안정화 등의 문제점이 나타나고 있다. 열전냉각에 의한 이들 부품의 냉각과 온도제어는 그 대책으로서 극히 효과적이다. 따라서 적외선의 각종 파장의 광검출소자, 레이저 다이오드, 전하결합소자(CCD, Charge Coupled Device), 전계효과 트랜지스터(Field Effect Transistor), 컴퓨터의 중앙처리장치(Central Processing Unit) 등의 전자 기기의 냉각에 사용된다. 또한, 열전냉각은 보수가 불필요하며, 연속적 작동이 가능하고, 무중력 하에서도 지장 없이 동작하는 등의 특징이 있기 때문에 우주 통신 분야와 위성 등 우주 관련 분야에 이용되고 있다[3]. 그 외에도 0℃ 기준 점점 장치, 반도체 제조용 항온조, 제습 건조기 등에 이용되고 있다.

여기서는 열전변환의 원리인 제벡, 펠티에, 톰슨 효과에 대해 설명하고, 열전발전과 열전냉각에 대한 개요, 열전재료의 현황과 연구 개발 상황을 정리하였다. 또한, 열전변환기술을 이용한 응용 제품을 비롯한 새로운 적용 가능성에 대한 최근의 연구 개발 동향에 대해 해설하고자 하였다.

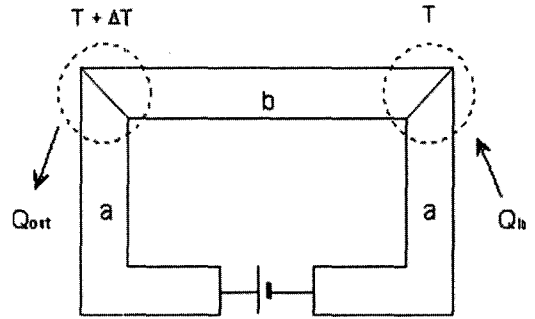
2. 열전현상

1821년 독일의 제벡은 서로 다른 두 도체를 접합시킨 폐회로 내에 자침을 두고, 접합부에 온도차를 주면 자침이 회전하는 현상을 발견하였다. 이 현상은 온도차에 의해 도체에 열기전력이 발생하여 폐회로 내에서 전류가 흐르기 때문에 일어나는 것으로, 소위 제벡효과로 알려져 있고 열을 전기에너지로 변환시키는 기본 개념이 되어 있다. 도체 또는 반도체에 온도차 ΔT 가 존재하면 열기전력 V_{ab} 는, $V_{ab} = \alpha_{ab}$



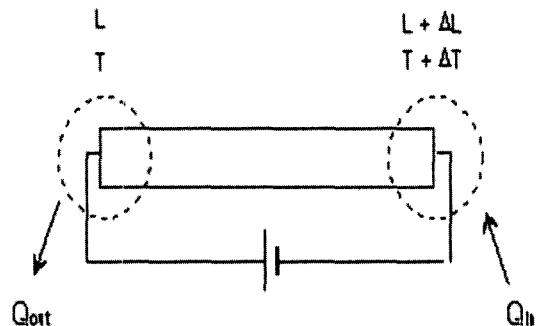
$$V_{ab} = \alpha_{ab} \Delta T$$

(a)



$$|Q_{th}| = |Q_{cool}| = \pi_{ab} I = \alpha_{ab} I T$$

(b)



$$|Q_{th}| = |Q_{cool}| = \tau I (dT/dL)$$

(c)

그림 1. 열전 현상의 개념도 ; (a) Seebeck 효과, (b) Peltier 효과, and (c) Thomson 효과.

ΔT 로 주어지고, 여기서 비례상수 α_{ab} 는 상대 제벡계수라 한다(그림1(a)). 제벡계수는 단위온도차 당 발생하는 기전력의 크기로 금속에서는 수십 μVK^{-1} 이 일반적이고 반도체에서는 수백 μVK^{-1} 에 이른다. 온도 계측에 이용되는 열전대(크롬엘-알루미늄, 구리-콘스탄탄, 백금 합금)는 제벡효과를 응용한 예이다.

1834년 프랑스의 펠티에는 이중 금속을 연결한 회로에 직류를 흘리면, 전류의 방향을 따라 접합부에서 흡열 또는 발열이 일어나는 것을 발견했다. 이를 펠티에 효과라 부르고 열전냉각의 원리가 된다. 직류 I를 흘릴 때 펠티에 효과에 의해 발생하는 흡·발열량 Q는 $Q_p = \pi_{ab} I$ 로 주어지고(그림1(b)), 여기서 비례상수 π_{ab} 는 펠티에 계수로 제벡계수와 $\pi_{ab} = \alpha_{ab} T$ 의 관계가 있다.

1851년 톰슨은 열역학 제2법칙으로부터 온도구배가 있는 조성이 균일한 도체에 전류가 흐르면 도체에서 열의 흡수 또는 방출이 일어나는 것을 예측했다. 이 사실은 후에 실험적으로 증명되어 톰슨 효과라 한다. 조성이 균일한 물질에 온도구배 dT/dL 이 존재하고 동시에 전류밀도 J의 직류가 흐르면 물질 내부에서 발생하는 흡·발열량 Q_T 는 수식(1)로(그림1(c)), 여기서 τ 는 톰슨 계수라 하고, 제벡계수와 수식(2)로 관계가 있다.

$$Q_T = \tau J \frac{dT}{dL} \quad (1)$$

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2)$$

제벡효과와 펠티에 효과를 응용한 열전발전 또는 열전냉각 장치의 효율에 관한 이론적 접근은 Altenkirch에 의해 시도되어 두개의 열전재료가 접합된 열전쌍의 최대작동효율 Φ_{max} 은 Carnot 효율과 성능지수에 의존하는 것으로 밝혀졌다[4]. 즉 성능지수 Z_{ab} 는 수식(3)으로 표현되며 열전재료의 물질상수 값들로 결정된다. 여기서 α_{ab} , σ_{ab} , κ_{ab} 는 열전재료쌍의 Seebeck계수, 전기전도도 및 열전도도이다.

$$Z_{ab} = \frac{\alpha_{ab}^2 \sigma_{ab}}{\kappa_{ab}} \quad (3)$$

3. 열전재료

현재 열전물성이 우수하여 실용재료로서 정착되어 있는 열전재료는 Bi-Te계 화합물, Pb-Te계 화합물 및 Si-Ge계 합금 등이 알려져 있다[5-7]. 열전재료의 성능지수는 일반적으로 온도의존성이 크므로 온도 영역에 따라 적절한 재료를 선택하여야 한다. 그림2에 대표적인 열전재료의 성능지수를 보였다. 전형적인 저온 재료(500 K 이하)는 Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , Bi_2Se_3 의 고용체이고 중온재료(500~900 K)는 PbTe, PbSe, PbTe-SnTe 고용체 또는 AgPbTe₂와 AgSbTe 3원 화

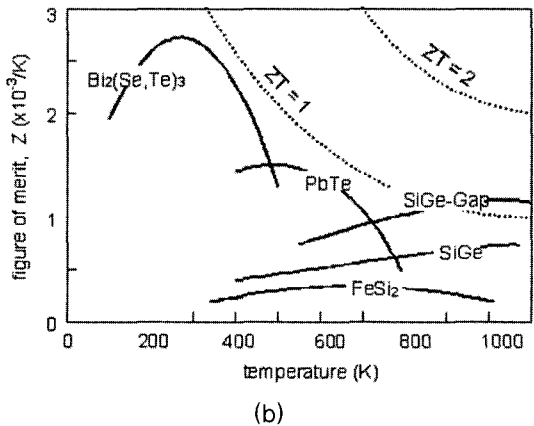
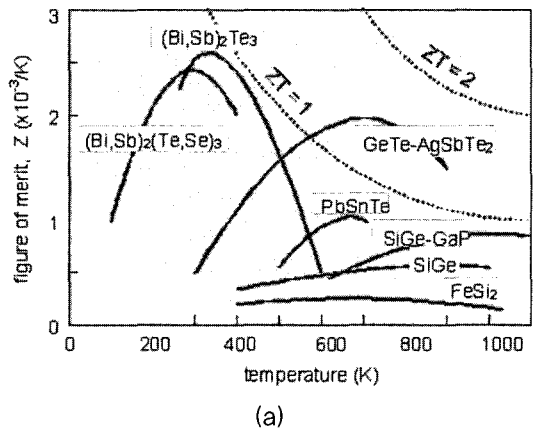


그림 2. 대표적인 열전 재료의 성능지수 ; (a) p-형 열전재료, (b) n-형 열전재료.

합물이다. 고온용 재료(900 K 이상)는 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 및 FeSi_2 와 같은 천이금속화합물을 들 수 있다.

Bi-Te계 화합물은 상온부근에서 최대의 성능지수 $3.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (성능지수에 절대온도를 곱한 값인 무차원 성능지수 ZT는 대략 1)을 보이고 n-형 및 p-형 열전재료는 각각 Bi_2Te_3 및 Sb_2Te_3 을 주성분으로 하는 고용체로, n-형으로 $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.9}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.05}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.05}$, p-형으로 $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.7}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.3}$ 또는 $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.7}(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.25}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.05}$ 등에 각각 SbI_3 과 Te나 Se 등을 첨가한 것이 알려져 있다. 이들 재료는 일방향용 방법으로 성장시킨 단결정이 열전물성의 이방성 때문에 높은 성능지수를 보이는 것으로 알려져 있으나 취약한 성질로 인해 열전소자에는 기계적 강도가 우수한 소결체를 사용하고 있다.

PbTe계 화합물은 Hot Press나 방전소결법(Spark Plasma Sintering)으로 제조하고, p-형 재료는 Ag_2Te 또는 Na를 n-형으로는 PbI_2 나 PbBr_2 를 첨가하여 캐리어 농도를 제어한다. p-형 재료는 열적 안정성이 나쁘기 때문에 사용 중에 열전능력이 열화하므로 PbTe-SnTe 고용체를 사용하지만 성능지수는 n-형보다 낮다. $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ 의 최대 성능지수는 600 K에서 $1.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 정도이다. p-형 PbTe를 대체하기 위해 개발된 것이 AgSbTe-GeTe계 다원 화합물로 Ge 과잉합금은 300 K 이상에서 높은 성능지수를 갖는다. $\text{Ag}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\text{Te}_{1.15}$ 부근 조성의 소결체는 TAGS(Tellurium-Antimony-Germanium-Silver)로 불리며 700 K에서 최대 성능지수가 $2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 로 중온 영역에서 성능이 우수한 열전재료이다. Zn_4Sb_3 계 열전재료는 700 K 부근에서 ZT값이 1.3으로 현존하는 열전재료 중 가장 높은 무차원성능지수를 보이고 있다. 하지만, 기계적으로 취약하다는 단점이 있고, Zn_4Sb_3 계 재료는 p형만 개발되어 있어 소자화를 위해서는 n형 Zn_4Sb_3 계 열전재료의 개발이 필요하다 [8].

Si-Ge 합금은 미국의 RCA社에 의해 열전재료로 개발된 이래 1025 °C까지 우수한 열전특성을 보여 고온용 재료로 주목되었다. 이 합금은 열적 기계적으로 안정하기 때문에 가공과 조립이 용이하고 고온에서 사용할 수 있으므로 열전변환 효율이 높다는 실용적인 장점이 있다. Si-Ge 합금 중 $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$ 조

성에 p형으로 B를 n형으로 P를 Doping한 것이 일반적으로 사용되고 있다. 분말야금법으로도 단결정에 비해 열등하지 않은 성능이 얻어지는 것으로 밝혀져 현재는 Hot Press법에 의한 소결체가 주류를 이루고 있다. GaP를 첨가하여 Si-Ge 합금의 열전도도를 40-50 % 낮추어 성능지수를 더욱 높이는 데 성공하였다. 그러나 Si-Ge계 재료는 원료의 가격이 높고 고온에서 내산화성이 문제가 되어 우주선의 동력 발생 장치 이외의 일반적인 용도에 이용하는 데는 문제가 있다. 한편, 천이금속 Silicide계 재료는 일반적으로 원료 가격이 저렴하고 고온 내산화성 및 강도가 우수함과 동시에 열전특성도 비교적 좋아 고온 열전발전 재료로 유망한데 그 대표적인 예가 Iron-silicide계 재료이다.

최근 Skutterudite, Clathrate, Half-Heusler 등의 결정구조를 갖는 물질이 열전특성 향상에 획기적으로 기여할 수 있다는 가능성이 제시되어, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [9-11]. 1993년 Jet Propulsion Lab에서 IrSb_3 , RhSb_3 , CoSb_3 등의 Skutterudite 구조의 화합물에 대한 열전물성 연구 결과 발표에 의하면 IrSb_3 가 400 °C 부근에서 $\text{ZT} \approx 2$ 에 달한다고 밝혔다. 고성능화에 대한 연구개발에서는 양자 우물효과와 초격자구조를 응용하기 위해 인위적으로 재료 구조를 제어한 소자 모듈이 시도되기에 이르렀다. 10 Å / 50 Å의 Bi_2Te_3 과 Sb_2Te_3 을 적층한 5.4 μm의 두께의 초격자 열전소자로 300 K에서의 무차원 성능지수 ZT는 2.4로 기존 재료의 2배 이상의 높은 값을 보였다 [12]. 초격자 구조는 전류를 나르는 홀의 이동을 쉽게 하는 반면에 열을 나르는 포논의 이동을 억제하여 ZT를 높이는 것으로 밝혀졌다. PbTe 계 화합물에서는 $\text{PbSe}_{0.98}\text{Te}_{0.02}$ /PbTe의 양자도트를 이용한 초격자소자에 의해 무차원 성능지수 1.6을 달성하였다고 발표하였다 [12].

4. 열전변환의 응용

그림3(a)는 단일쌍 열전냉각 및 가열의 개념도를 보여준다. 즉, n-형 소자측 전극에 (+), p-형 전극에 (-)전압을 걸어 n-형에서 p-형으로 전류를 흘리면 펄

티에 효과에 의해 p-n 접합에서 열이 흡수되고 각 단자 전극에서는 열이 발생한다. 이때 각 단자 전극에 적당한 방열기를 밀착시켜 발생하는 열을 외부로 방출시키면 p-n 접합부에서 냉각 대상물로부터 열을 계속 흡수하므로 냉각에 이용할 수 있다. 한편, 전류의 방향을 바꾸면 p-n 접합부에서 발열이 일어나 대상물을 가열할 수 있다. 열전가열의 특징은 가해 준 전력보다 큰 에너지를 이용할 수 있다는 점이다.

실제로는 펠티에 효과에 의해 저온부에서 흡수되는 순 열량은 전도열과 주열(Joule Heat)의 두 가지 원인에 의해 감소된다. 펠티에 효과에 의한 온도차 때문에 고온부로부터 저온부로 열전도가 일어난다. 이때 흡열 및 발열량은 수식(4), 수식(5)으로 열전 재료 쌍의 제벡계수, 전기저항 R, 열전달계수 K에 의존한다. 전류가 계속 증가하고 주열 열이 주도적으로 됨에 따라 추가적인 전류가 더 이상의 순전한 냉각을 일으키지 못하는 순간에 도달한다. 이때의 전류가 최대 전류 I_{max} 이고 최대전압 V_{max} 와 최대온도차 ΔT_{max} 는 최대 전류에서 주어진 열 부하에 대해 얻어진다. 고온부에서 방출되는 순 열량은 저온부에서 흡수된 순 열량과 가해진 전력의 합이다. 냉각 효율을 정의하는 데 사용되는 성능계수(Coefficient of Performance, COP)는 저온부에서 흡수된 순 열량을 가해준 전력으로 나눈 값으로 정의한다.

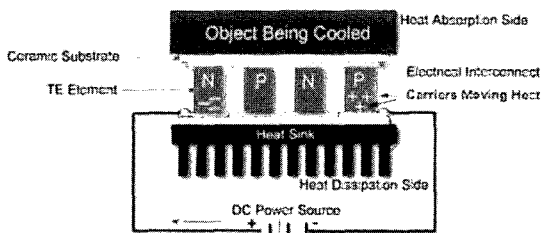
$$Q_c = \alpha_{ab} T_c I - \frac{1}{2} RI^2 - K\Delta T \quad (4)$$

$$Q_h = \alpha_{ab} T_h I - \frac{1}{2} RI^2 - K\Delta T \quad (5)$$

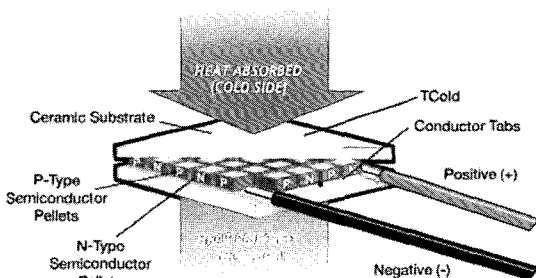
일반적으로 열전냉각·가열은 그림3(b)와 같이 여러 쌍의 p-n 접합을 전기적으로 직렬 접속한 열전 모듈을 사용하고 있다. 전형적인 냉각용 열전모듈은 p-형과 n-형 Bi₂Te₃계 열전소자로 구성되며 통상적으로 두께 4 mm에 면적 3×3 mm² 으로부터 두께 5 mm에 면적 60×60 mm² 정도까지 이고 3개에서 127까지의 열전쌍으로 구성된다. 모듈의 저온부는 수축하고 고온부는 팽창하므로 열응력을 받기 때문에 단면적 50×50 mm² 이상의 모듈은 일반적인 것은 아니다. 하나의 모듈보다 넓은 면적의 냉각은 여러 개

의 모듈을 사용해서 온도를 제어한다. Heat Pumping 능력은 1~125 W 정도로 고온부와 저온부의 최대 온도차는 70 ℃에 이르며 보다 큰 온도차(130 ℃까지)를 얻기 위해 설계된 다단 적층모듈(Cascade Type Module)도 있다. 실용적으로 얻을 수 있는 최저 온도는 -100 ℃ 정도이다. 그림4에 여러 가지 형상의 다단 적층 모듈을 보였다.

열전발전은 그림5(a)와 같이 소자의 p-n 접합부를 가열하고 반대편 접합부를 방열기 등으로 저온으로 유지하여 온도차를 발생시키면 제벡효과에 의해 p-형 전극에 (+), n-형 전극에 (-) 전압이 발생한다. 이 양극에 외부 부하를 연결하면 전류가 흐르므로 전력

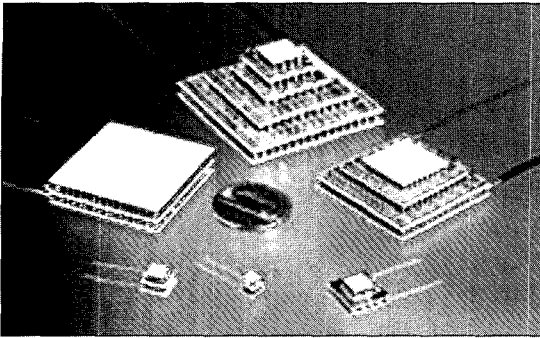


(a)

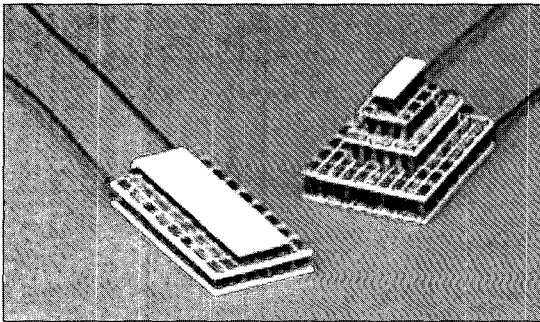


(b)

그림 3. 열전냉각의 원리 ; (a) 냉각의 개념도, (b) 열전 모듈.



(a)

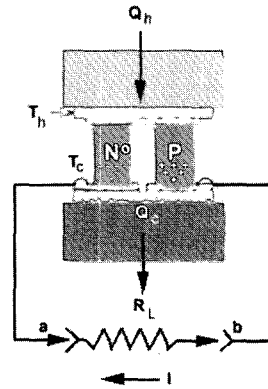


(b)

그림 4. 다양한 형상의 다단 적층형 열전모듈.

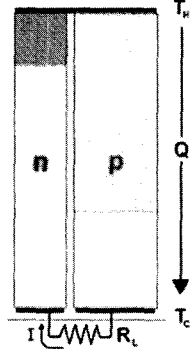
의 추출이 가능하다. 이때 최대 출력은 $V=(1/2)\alpha_{ab}\Delta T$ 즉, $I=(1/2)(\alpha_{ab}\Delta T/R)$ 에서 수식(6)으로 얻어진다. 열전발전모듈은 열전냉각모듈과 같이 다수의 열전쌍을 직렬로 연결하는 것이 일반적이거나 큰 전류가 필요한 경우에는 병렬로 연결하여 사용하기도 한다. 열전발전모듈은 동작 온도범위가 높을수록 변환 효율이 높아지므로 소자의 온도구배에 따라 각 온도 영역에서 성능지수가 큰 이종 열전재료를 접합하는 분할형 모듈(Segmented Type Module)(그림5(b)) 또는 이종재료의 모듈을 적층하는 다단 적층모듈(그림 5(c))을 사용하기도 한다.

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \alpha_{ab}^2 \frac{\Delta T^2}{R} = \frac{1}{4} ZK\Delta T^2 \quad (6)$$



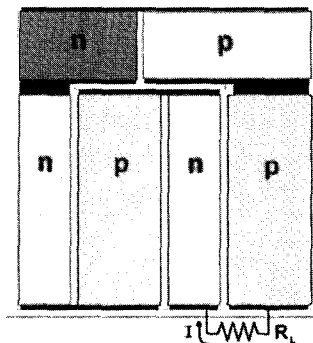
(a)

Segmented Generator



(b)

Cascaded Generator



(c)

그림 5. 열전발전의 원리 ; (a) 열전발전의 개념도, (b) 분할형 모듈, (c) 적층형 모듈.

열발전 System 구성을 위해서는 p-n 접합 기술, 고온 및 저온 열교환부의 열전달, 출력전압 조절용 DC-DC Convertor, 직교류 변환용 DC-AC Convertor 등 관련된 기술이 필요하다. 또한, 열원으로 석탄, 석유, LPG 등 기존의 화석 연료 이외에 Sr⁹⁰, Pu²³⁸, Cs¹³⁷ 등의 방사성 동위원소 이용에 관한 기술과 태양열 또는 다양한 온도 범위의 산업폐열을 이용할 수 있는 집열기술의 개발이 병행되어야 한다.

4.1 열전 냉각

상용으로 이용되는 열전모듈은 상온 이하에서 작동되고 냉각기로 사용될 때 매우 안정적이고 신뢰성이 높다. 일반적으로 열전냉각은 고신뢰성, 소형, 저중량, 정밀 온도 제어 등의 조건이 요구될 때 사용한다. 열전냉각기는 낮은 COP가 단점이 되지 않는 25 W 이하의 용도에 적합하다. 열전냉각 시스템은 냉각 대상물, 방열기, 직류 전원, 전기 제어부로 구성된다. 열전모듈의 고온부는 방열기에 연결되고 냉각판을 사용한 자연 대류 또는 팬을 통한 강제 공냉, 수냉이 고온의 방열기를 냉각시키는 데 사용된다. 열전냉각을 위한 저가이고 일반적인 목적의 열전모듈로 Melcor가 만드는 FRIGICHIP CP 시리즈 열전모듈들이 상용으로 이용 가능하다. 잠재적인 사용 범위는 소형 전자부품의 냉각에서부터 가정용 냉장고와 냉난방 에어컨에 이른다.

4.1.1 전자 부품의 냉각

일반적인 대형 냉각 시스템은 전자부품과 같은 국소적인 냉각에 적당하지 않기 때문에 열전냉각에 의한 온도 제어는 매우 효과적인 대안이다. 각종 반도체 소자와 열전냉각 소자는 양자 모두 고체전자소자이므로 전기적으로 작동과 제어가 가능하기 때문에 적합성이 매우 우수하다.

적외선검출소자는 적외선 분광광도계, 광통신 수광소자, 복사온도계, 화염검출기, 적외선 영상장치, 적외선 현미경 등에 널리 이용되고 있다. 적외선검출소자는 온도 상승에 의해 암전류가 증가하므로 신호/잡음비가 저하한다. 또한, 온도 변화에 따라 분광감도특성, 응답속도 및 감도가 크게 좌우된다. 따라서 일정한 온도로 유지하는 것이 바람직하다. 통상

광검출소자를 열전냉각모듈의 냉각면에 밀착시키고 진공 또는 질소가스로 충전된 금속용기 중에 밀봉하여 사용한다[3]. 3단 적층모듈을 이용하여 InSb 적외선 검출소자의 냉각과 온도 제어가 가능한 적외선 센서를 그림6에 보였다. 1단으로는 최대온도차가 60~70 °C이지만 2단으로는 100 °C, 6단에서는 126 °C 까지 유지할 수 있다. 주위 온도가 변하면 냉각면에 부착한 써미스터로부터 얻어지는 온도 정보에 따라 열전모듈에 흐르는 전류를 조절하므로 적외선검출소자의 온도를 일정하게 유지할 수 있고 고감도의 안정한 출력을 얻을 수 있다.

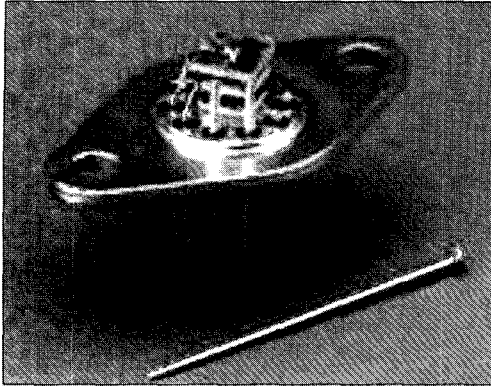
X선 천문학에 사용되는 CdZnTe 검출기를 -30 ~ -40 °C로 냉각시키면 검출기의 누출 전류를 줄일 수 있고 에너지 분해능을 상당히 향상시킬 수 있다[12]. 이런 작은 용량에 적용을 위해 단지 3 W의 전력이 사용된다.

레이저 다이오드는 광통신, 복사기, 디스크메모리 등에 이용된다. 레이저 다이오드는 온도 상승에 의해 발진출력과 효율이 낮아지고 발진 임계전류 값이 증가하여 레이저 다이오드 구동회로에 부담을 주고 온도 상승을 조장하여 열화를 촉진한다. 또한, 발진 파장과 파장 분포가 변하여 잡음발생의 원인이 된다. 따라서 레이저 다이오드를 주위온도와 상관없이 298 K 부근의 온도로 유지시키는 것이 중요한 기술의 하나이다[3].

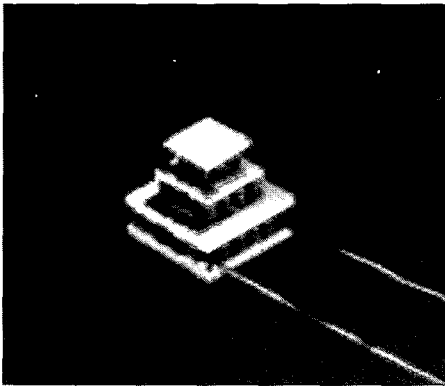
전하결합소자(CCD, Charge Coupled Device)는 광전소자를 20만 개 이상 집적한 것으로 영상을 전기 신호로 변환시킨다. 열전냉각에 의해 저온으로 온도를 유지시키면 암전류가 낮아져 안정한 고감도, 고해상도, 고품질의 영상이 얻어진다[3].

마이크로파 GaAs 전계효과 트랜지스터(FET, Field Effect Transistor)는 마이크로파 통신, 위성 통신, 레이더 등이 널리 이용되고 있다. 적층모듈로 GaAs FET을 냉각하면 잡음을 더욱 낮추어 우주의 통신위성으로부터의 미약한 전파를 수신할 수 있다[3].

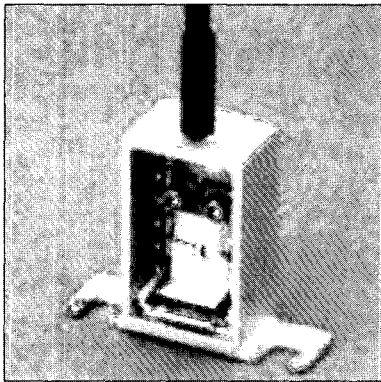
광전자 증배관은 미약한 광의 계측에 이용된다. 광전자에 의해 암전류가 흐르고 S/N비가 낮아진다. 열전냉각에 의해 전극을 냉각하면 암전류가 감소하고 측정 감도를 향상시킬 수 있다[3].



(a)



(b)



(c)

그림 6. 적외선 센서용 열전 모듈.

4.1.2 냉장고와 에어컨

CFC 생산과 배출에 대한 에너지 비용과 환경 규제 또한 늘어나게 되었다. 해결책으로 고려되는 대체 냉각 방식 중 하나가 열전냉각 기술이다. 열전냉각은 이동용 냉장고와 같이 냉각이 필요한 열량이 그리 크지 않거나 또는 군사용과 같이 에너지 비용이 주된 문제가 안 되는 경우에 적용된다. 현재 상용화된 예로 냉온 정수기, 차량용 Picnic Cooler, 화장품 냉장고, Wine Cooler 등이 있다. 하지만, 열적 용량이 큰 부품이나 공간을 냉각하기에는 상대적으로 낮은 COP(온도차 약 20 °C에서 작동될 때 0.5 이하)와 높은 에너지 비용 때문에 적용이 제한적이다. Melcor의 TEC TM 시리즈와 같은 열전모듈이 저가의 열용량이 큰 냉각기를 만들기 위해 특별히 개발되었다. 개량된 열전냉장고들에 대한 다양한 특허들이 출원되어 있다[12].

4.1.3 특수용도

군용, 우주용, 의학용 제품을 위한 열전냉각 기기들이 개발되어 있다. 압축식 냉동기는 액화된 냉매와 기화된 냉매가 혼합되어 있고, 윤활유의 공급도 쉽지 않아 우주의 무중력 하에서 사용은 매우 어렵다. 열전냉각은 소형 경량이고, 보수가 필요 없고, 무중력 하에서도 작동에 지장이 없다는 특징 때문에 우주 관련 용도에 적용하기에 적합하다. 이외에도 태양전지로 구동되는 열전냉각기 헤드기어(야구모자), 농축 오렌지 주스를 얻기 위한 열전 “극저온농축셀”, 인터쿨러를 통해 흐르는 유체를 가열하거나 냉각시키기 위한 열전냉온기 등이 개발되었다[12]. 이 냉온기는 엔진 마력을 높이기 위해 엔진 터보차저의 압축 상태로부터 기체를 냉각하기 위해 사용된다. 또한, 엔진이나 변속기의 오일을 냉각하는 데 사용할 수도 있다. 차량의 객실에 공급되는 공기를 냉각하거나 가열하는 데 사용될 수도 있다.

4.1.4 계측기

열전냉각은 국소냉각, 정밀 온도제어, 냉열 양용이 가능한 특징을 갖고 있어 분광광도계, 크로마토그래피, 열류계, 로점계, 습도계, 0 °C 기준점점 등 계

측기로의 응용은 오래전부터 시도되어 왔다[3]. 0℃ 기준점점의 온도는 온도 측정 정확도에 직접적인 영향을 준다. 기준 점점용 용기 내의 순수한 물을 열전 냉각/가열로 물과 얼음의 공존 상태가 자동적으로 유지하면 정밀한 0℃ 기준 점점이 가능하다.

4.1.5 초전도체의 냉각

동산화물 초전도체에서 초전도 천이온도의 상승은 초전도 전자기기의 작동에 필요한 극저온을 얻기 위한 냉각 방식으로 열전냉각에 대한 관심을 불러 일으켰다. 2개의 1단 열전냉각모듈이 알루미늄상자를 냉각하고, 상자 내부에 초전도 기기를 직접 냉각하기 위한 4단 적층모듈을 배열하였다. 고온부의 온도를 냉각수로 282 K로 일정하게 하면 4단 적층모듈의 저온부 온도는 149 K에 도달한다. 이 온도 이하로 열전냉각을 위해서는 더 높은 성능지수값이 필요하고 성능지수가 $5 \times 10^3 \text{ K}^{-1}$ 인 경우 3단 적층모듈에서 저온부의 온도는 박막 $\text{HgBa}_2\text{CaCuQ}_{6+\delta}$ 의 초전도 천이 온도에 가까운 125 K에 도달할 것으로 예측된다 [12].

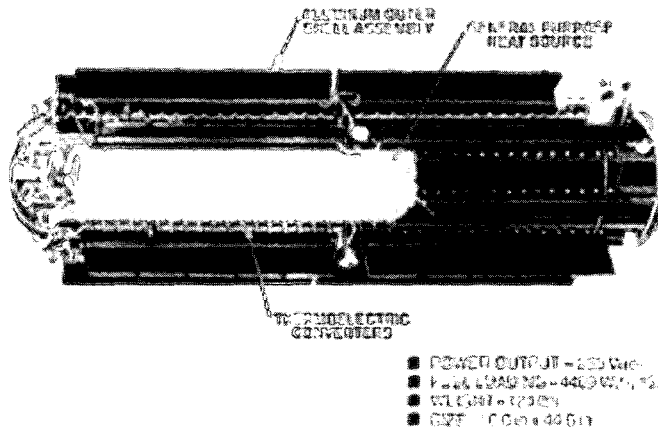
4.2 열전 발전

최근 환경 문제나 지구 온난화 문제에 대한 공공의 관심이 증가하여 상용 대체 발전 방법으로 열전 발전의 가능성이 높아지고 있다. 열전발전은 환경 친화적이고 발전을 위한 온도 범위가 넓어 유연한 발전 방법이지만 상대적으로 낮은 효율(전형적으로 5%)때문에 발전 비용이 문제되지 않는 의학용, 군사용 또는 우주 탐사를 위한 방사능 동위원소 전원(Radioisotope Thermoelectric Power Generator, RTG)과 같은 우주용 적용이나 송유관과 해상 부표와 같은 무인 전원에 제한적으로 사용된다.

4.2.1 우주탐사선용 전원

우주탐사선 전원에 사용된 RTG의 개요를 그림 7에 나타내었다. 중심부에 배치된 캡슐 속의 방사성 원소가 붕괴할 때 얻어지는 복사열을 열원으로 이용한다. 열전모듈의 냉각은 발전기의 주위에 설치된 방열판을 사용하여 우주 공간에 방출하는 것에 의해 행해진다. 다양한 형태의 RTG가 제작되었고 아폴로

General Purpose Heat Source (GPHS) Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG)



The three Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) provide electrical power for Cassini's instruments and computers. They are being provided by the U.S. Department of Energy.

그림 7. 상용 열원을 사용한 RTG의 구성.

계획에서는 달 표면에 배치된 지진 관측용 기기의 전원, 파이오니아 10, 11호, 바이킹 1, 2호, 보이저 1, 2호, 갈릴레오와 카시니 등의 우주 탐사선 전원으로 약 5~10년의 작동 실적을 자랑하고 있다. 우주선 Galileo Jupiter의 전원으로 효율 6.7%의 294 W(5.28 W/kg급) 열전발전기를 채택하였다. 하나의 전원 모듈로 최대 약 300 W의 출력을 갖는 것도 제작되었고 통상 여러 개의 모듈이 탑재되어 있다.

최근 우주용 RTG는 모듈형 방사성 열전발전기 ((Modular Radioscope Thermoelectrical Generator)를 적용하고 있다[13]. MOD RTG는 모듈형 열원과 열전모듈로 구성되어 조합이 가능한 모듈형 열전변환기이다, 4개의 소결 Pu^{238} 산화물 연료 Pellet을 열원으로 250 W의 열에너지를 공급하도록 설계되었고. 현재 Galileo와 Ulysses 우주선에 열원으로 작동되고 있다. p-형은 B를 도핑한 SiGe, n-형은 GaP를 도핑한 Si-Ge계 열전재료가 사용된다. 고온(1273 K)와 저온(573 K)에서 작동되어 하나의 열전쌍으로 3.5 V로 2.1 W를 생산하고 있다. 각 열원 주변에 8개의 열전쌍이 직렬로 연결되어 30.8 V로 19 W를 생산하는 모듈형 전원을 형성한다. 18개의 열원 모듈을 사용하면 340 W급 발전기를 구성할 수 있고 이 경우 비전력은 7.9 W/kg이었다.

한편, 특수 용도로 박막 열전모듈은 소형 핵발전 심장박동기의 전원으로 이용되고 있으며 화학 전지보다 위험성적은 것으로 보고되었다.

4.2.2 손목시계의 전원

세이코에서 발표된 세계 최초의 열전 손목시계의 발전 시스템은 손목의 체온 열과 케이스를 통한 방열에 의해 항상 1~3 °C의 온도차를 내는 것이 가능하다. 열전 시계에는 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 의 소자 104개를 하나의 모듈로 한 것을 10개 직렬로 접속하여 사용한다[14]. 온도차 1 °C로 10 μW 의 출력이 얻어지고(내부저항 k Ω , 개방전압 0.2 V) 2차 전지를 충전하는 데 사용한다. 이 마이크로 발전모듈은 마이크로 냉각모듈로서도 이용할 수 있고 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 의 124개 모듈의 최대 냉각 능력은 0.88 W 최대 온도차는 56 K가 되는 성능이 확인되고 있다 [14].

4.2.3 상용 열전발전기

열전발전기의 주된 특징은 고신뢰성, 적은 보수, 긴 수명 등이고 대부분 8,000시간 이상 연속적으로 가동되고 있다. 미국의 Teledyne Energy System社와 캐나다의 Global Thermoelectric Inc.에서 10~550 W에 이르는 상용 열전발전기를 생산하고 있다. 현재 71개의 열전쌍으로 구성된 75 mm² 크기의 표준 모듈은 19W의 출력을 낼 수 있다. Global Thermoelectric Inc.는 모듈 크기 508×279×483 mm²에서 1549×1549×1016 mm²에 이르는 15~550 W급 열전발전기를 공급하고 있다. 대부분의 열전발전기는 프로판이나 천연가스과 같은 기체 연료로 가동되지만 경유를 주로 하는 액체 연료로 가동되기도 한다.

기체 연료 발전기의 구성은 연료 공급부, 버너, 방열기, 전기제어 부분으로 구성된다. 연료공급부의 주요 기능은 버너에 공급되는 연료의 압력을 일정하게 제어하여 연료의 양을 조절하는 것이다. 상용 TEG에 사용되는 열전재료로 Global社는 PbTe, Teledyne社는 Bi₂Te₃계 재료를 주로 사용한다. PbTe를 사용할 때는 산화를 방지하기 위해 불활성 기체로 밀봉한다. 유입되는 열 중 4~9%를 전기에너지로 변환시킨다. 방열기는 일반적으로 여러 개로 조합된 알루미늄 핀을 사용하여 열전모듈로부터 열을 방출한다. 자연 대류나 강제 공냉, 수냉을 채용한다. TEG에서 중요한 부분은 전기제어부로 접화, DC-DC 변환, 출력 제어, 안전 차단을 제공한다.

상용 TEG의 용도 중 하나는 천연가스공급관이나 송유관의 음극보호 부식 방지에 적용하는 것이다. 음극보호 방식에는 저전압, 고전류의 전원이 필요하다. 열전발전은 특성상 저전압, 고전류가 얻어지기 때문에 이런 용도에 적합하다. 이 경우 사용되는 연료는 별도의 공급이 필요 없이 직접 파이프에서 뽑아 쓸 수 있다. 산이나 언덕 정상에 위치한 무선 중계소의 전원에도 사용되고 있다.

4.2.4 폐열을 이용한 열전발전

현재 거의 재활용되지 못하는 산업 폐열을 이용하여 전기를 생산할 경우 연료비용 문제가 없기 때

문에 열전발전은 적합하다. 자동차 엔진은 상당한 양의 에너지가 배기가스, 냉각수, 윤활유와 복사를 통해 대기 중으로 방출된다. 자동차가 정상적인 속도일 때 전형적인 에너지 낭비량은 20~30 W로 추정된다. 자동차 및 디젤 엔진 배열로부터 전력을 회수하여 연비를 높일 목적으로 열전발전에 대한 연구개발이 일본에서 진행되고 있다. 2000 cc급 가솔린을 대상으로 할 때 열회수율 42%, 총합 효율 2.5%, 출력 200 W 이상(열입력 8 kW, 배기입구 온도 600 °C)이 달성될 것이라는 전망이다. 최근 일본에서 닛산 자동차 등의 연구에 의하면 CoSb₃계 스쿠테루다이트 화합물과 Bi₂Te₃계 화합물로 구성된 분할형 열전 모듈과 열교환기를 일체화한 열전발전기가 자동차 머플러에 장착되어 평지 주행 모드의 운전으로 141.2 W의 전력을 얻은 것으로 보고되었다. 발생한 전력은 배터리에 충전되어 발전기의 전원 보조에 이용된다.

쓰레기의 소각 시 발생하는 열을 이용한 60 W급 열전발전기가 소각로 공장의 보일러 부문에 설치되어 소규모 현장 실험을 한 결과 하루 200 ton을 소각하는 대형 시스템에 대한 분석 결과 약 2000 W가 회수될 것으로 예측되었다. 시험 제작된 열전발전기는 Bi₂Te₃계 열전 모듈이 사용되었고 집열핀에 의한 직접 가열형인 경우 예열 공기를 이용하여 집열판 온도 221 °C, 냉각판 온도 17.2 °C에서 최대 출력 548 W를 얻은 것으로 보고되었다.

수소와 산소의 화학반응으로부터 전력을 얻는 연료전지는 그 반응 과정에서 열이 발생한다. 인산형 연료전지의 폐열을 열전발전 시스템에 적용하였다.

4.2.5 태양열 열전발전

태양에너지는 깨끗하고 무한하기 때문에 지구나 우주에서 가장 가능성 있는 에너지원 중 하나이다. 이런 점에서 태양열 열전발전기는 매우 매력적이다. 태양열 열전발전은 태양열 집적기와 열전발전기를 조합하여 구성된다. 현재 태양열 열전발전의 낮은 효율을 극복하고자 고효율 열이온/열전 변환 방식에 대한 연구가 보고되고 있다. 이 방식은 고효율 변환을 위해 열이온 변환기를 열전발전기에 조합한 것

이다.

4.3 열에너지 센서로 열전모듈의 이용

127개 P/N 접합으로 구성된 30 mm × 30 mm 크기의 열전 모듈이 60~200 K에서 복사열유량 측정에 적용되어 80 K에서 27 μV/(W/m²)의 감도를 보였다 [12]. 이것은 일반적인 열유량 센서보다 10배 정도 높은 것으로 극저온에서 사용 가능성을 보여준다.

초음파를 사용하여 화학 반응과 물질 전달의 속도와 수율 향상을 이룰 수 있다. 열전 방식의 초음파 강도 센서는 흡수물질(실리콘) 내에 삽입한 열전쌍으로 구성된다[12]. 초음파가 매질 내에서 투과될 때 초음파의 흡수에 의해 흡수물질의 온도가 상승하고 온도의 변화는 초음파 강도로 변환될 수 있다.

물방울이 형성될 때 펄트에 효과에 의해 생기는 열적 진동을 감지하여 물의 응축을 예방적으로 검출하기 위한 센서가 개발되었다[12].

1.5 m³/s까지의 저속의 유체 흐름을 측정하기 위한 새로운 센서와 방법이 개발되었다[12]. 이 기기의 뛰어난 장점은 센서에 의해 발생하는 열적 섭동은 무시할 정도로 작아 유체 온도를 변화시키지 않는다는 점이다.

5. 결론

열전변환 기술은 냉각기, 발전기 또는 열에너지 센서로 응용되어 군사용, 항공용, 실험기기, 생물학, 제약, 산업용, 상용 제품과 같은 거의 모든 영역에서 사용되고 있다.

대용량 열전 냉각기와 발전기의 적용은 낮은 효율로 인하여 사용이 제한적이지만 에너지 비용과 CFC 생산과 방출에 관한 환경 규제는 새로운 대안으로서 열전변환의 가능성을 높이고 있다.

열전변환기기의 효율이 다른 방식에 비해 상당히 낮고, 열전모듈의 제작비용이 높고, 열교환 및 전달 등의 주변기술의 개선이 필요하다는 등 열전변환 기술을 상업적으로 적용하기에는 해결되어야 할 문제점들이 적지 않다. 열전기술의 실용화를 위해서는 열전재료, 열전모듈, 주변기술 등의 요소기술과 합

개 에너지 System의 이용기술에 대한 연구가 필요하다. 또한, 열전재료의 효율을 높이기 위한 제조공정기술을 포함한 새로운 재료 개발·제조 기술과 열전모듈 제조기술의 개량이 요구된다.

참고 문헌

[1] R. R. Heikes and R. W. Ure, Jr. ; "Thermoelectricity : Science and engineering", Interscience publisher, 1961

[2] 太田時男 ; "半導體熱電氣", 日刊工業新聞社, 1964

[3] 上村欣一, 西田勳夫 ; "熱電半導體とその應用" 日刊工業新聞, 1988

[4] H. J. Goldsmid ; "Thermoelectric refrigeration", Plenum press, 1982

[5] 西田勳夫 ; "熱發電素子の現狀", 自動車研究, 6, p79, 1980

[6] D. M. Rowe ; "Development of Fine Grained Germanium-Silicon Alloy Technology at UVIST, Cardiff", Proc. 4th ICTEC, Arington, p 96, 1982

[7] A. C. Yang and F. D. Shepherd ; "N- and P-type Single Crystal Bismuth Telluride", J. Electrochem. Soc., 108, p197, 1961

[8] 藤井一牟 ; "Zn-Sb系熱電變換材料およびモジュールの高性能化", 金屬, p799, 2004

[9] 松原賞衛 ; "魅力的なスクッテルダイト系熱電材料?素子", 金屬, p761, 2004

[10] 阿武宏明 ; "半導體クラスレートの魅力的熱電特性", 金屬, p779, 2004

[11] 山中伸介, 牟田浩明, 黒崎健 ; "ホイスラ-合金系熱電變換材料", 金屬, p805, 2004

[12] S. B. Riffat and Xiaoli Ma ; "Thermoelectrics : a review of present and potential application", Appl. Thermal Eng., p913, 2003

[13] D. M. Rowe ; "CRC Handbook of Thermoelectrics", CRC Press, 1995

[14] 米田征司, 大野吉弘 ; "熱電發電システムのあらまわし", 金屬, p808, 2004

저자|역력



성 명 : 장경욱

- ◆ 학 력
- 1982년 연세대 금속공학과 공학사
- 1989년 연세대 대학원 금속공학과 공학 석사
- 1994년 연세대 대학원 금속공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
- 1982년 - 1987년 풍산 소재개발실
- 1995년 - 현재 한서대 신소재공학과 교수



성 명 : 김일호

- ◆ 학 력
- 1990년 연세대 금속공학과 공학사
- 1992년 연세대 대학원 금속공학과 공학 석사
- 1996년 연세대 대학원 금속공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
- 1996년 - 1998년 한국전자통신연구원(ETRI) 화합물반도체연구부 Post-Doc.
- 1998년 - 현재 충주대 신소재공학과 교수



성 명 : 이정일

- ◆ 학 력
- 1981년 성균관대 금속공학과 공학사
- 1987년 연세대 대학원 금속공학과 공학 석사
- 1995년 연세대 대학원 금속공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
- 1981년 - 1985년 (주)LG금속 가공기획부
- 1987년 - 1995년 한국과학기술연구원 금속연구부 post-doc.
- 1996년 - 현재 충주대 신소재공학과 교수