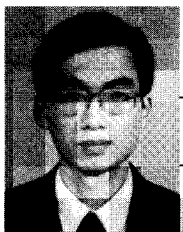
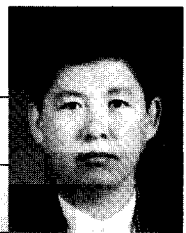


열전반도체 재료 및 발전응용 기술 현황



이 길 근
(부경대학교 재료공학부)

- '86 부산대학교 금속공학과 (학사)
- '89 부산대학교 금속공학과 (석사)
- '94 Tohoku Univ. 재료가공학과 (박사)
- '94 - '95 Tohoku Univ. 문부교관 조수
- '95 - '96 Mitsubishi Materials Co. 중앙연구소 특별연구원
- '96 - '99 한국기계연구원 선임연구원
- '99 - 현재 부경대학교 전임강사



우 병 철
(한국전기연구소 변환소자연구팀)

- '89 영남대학교 기계공학과 (학사)
- '91 경북대학교 기계공학과 (석사)
- '98 경북대학교 기계공학과 (박사수료)
- '91 - 현재 한국전기연구소 선임연구원



이 희 웅
(한국전기연구소 변환소자연구팀)

- '76 서울대학교 금속공학과 (학사)
- '78 서울대학교 금속공학과 (석사)
- '90 서울대학교 금속공학과 (박사)
- '79 - '85 홍익공전 교수
- '85 - 현재 한국전기연구소 책임연구원

1. 서 론

열전 에너지 변환은 열을 전력으로 직접변환 시키거나, 이것과 역으로 직류의 통전에 의해 냉각 혹은 가열하는 고체상태(solid state)의 에너지 변환이다. 따라서 에너지 변환부에는 기존의 화력발전이나 냉·난방기와 같이 기계적 구동요소는 전혀 없으므로 소음, 진동도 없고 신뢰성이 높은 발전 혹은 냉각·가열이 가능하다. 이것에 사용되는 재료는 열전도율이 낮고, 금속과 같이 전기전도율이 높은 반도체로서 열전 반도체 혹은 열전재료로 칭해지며, p형과 n형을 조합한 열전대로서 이용되고 있다. 이 열전대는 온도 측정에 널리 이용되고 있는 금속 열전대와 구별하여 열전변환소자라고 한다. 일반적으로 다수의 소자를 판상 혹은 원통상으로 조합한 열전모듈(thermo module)로서 사용되고 있다(그림 1).^[1, 2]

열전 에너지 변환의 응용은 민생기기로부터 우주개발에 이르기까지 넓은 분야에 이용되고 있으며, 현재 열전발전은 우주, 벽지, 심해저 등의 독립전원^[2, 3]등으로, 열전 냉각·가열은 반도체 제조공정 기기의 정밀 항온제어, 광통신용 레이저의 정밀 항온 제어, 휴대용 콜러 등에 필수적인 존재로 되어 있다. 국내에 있어서의 응용개발은 Bi₂Te₃계 화합물에 의한 냉각·가열에 관한 것이 대부분이었다. 그러나 최근의 화석 에너지 고갈과 지구 온난화 현상이 심화됨에 따라 차세대 대체 에너지의 개발과 그린에너지에 대한 수요가 증가하여, 열원의 다양화와 미활용 열에 대한 열회수 기술 개발이 요청되어 열전 반도체 재료를 이용한 열전발전에 대한 응용 개발이 검

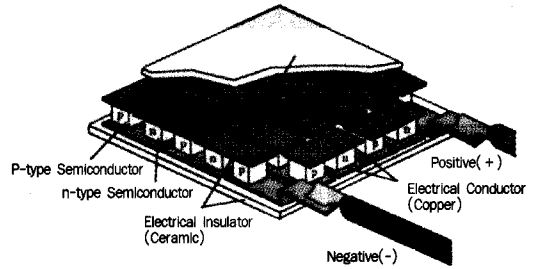
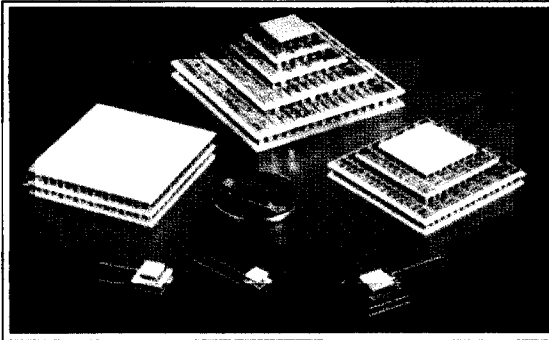


그림 1. 열전모듈과 열전모듈의 구조

토되어 지고 있다. 본 기고에서는 열전효과, 열전반도체 재료 및 발전 응용 기술의 개발 현황에 대하여 논한다.

2. 열전현상

2.1 Seebeck 효과^[4]

Seebeck 효과는 1821년에 Seebeck에 의해 발견된 현상으로 그림 2와 같이 이종의 금속선으로 회로를 구성하여 회로의 양단간에 온도차 ($\Delta T = T_h - T_c$)를 가하면, n형 반도체의 경우에는 고온부에서의 전자의 에너지 준위가 평균적으로 페르미 준위(Fermi level)보다 높은 상태로 여기된다. 높은 에너지 상태에 있는 전자는 에너지를 낮추기 위하여 저온측으로 확산하므로 그 결과 저온부는 -로 대전하고 고온부는 +로 대전하여 전기장(electric field)이 형성되는데, 이때 저온부로 향하는 전자의 흐름을 저지함으로써 평형상태를 유지하기 위한 역작용으로 재료의 양단간에 전압(ΔV)이 발생한다. 이와는 반대로 전하(carrier)가 정공(hole)인 p형 반도체의 경우에는 저온부가 +, 고온부는 -로 대전된다.

이 현상을 Seebeck 효과라 하며 열전발전의 원리가 된다. 이때에 발생하는 전압(ΔV)을 열기전력(thermoelectromotive force)이라 하는데 양단간의 온도차가 매우 적은 범위에서 ΔV 는 식 (1)과 같이 양단간의 온도차에 비례한다.

$$\Delta V = \alpha_{ab} \Delta T \quad (1)$$

비례상수 α_{ab} 는 주어진 도체간의 열전능 또는 Seebeck 계수라 칭하며 도체 a와 b의 절대 열전능을 각각 α_a , α_b 라고 하면 α_{ab} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_{ab} = \Delta V / \Delta T = dV_b / dT - dV_a / dT = \alpha_b - \alpha_a \quad (2)$$

Seebeck 계수는 온도 의존성을 갖는 재료 고유의 물성치로서 전자의 에너지 준위(energy level)과 밀접한 관계가 있으며 전하(carrier)의 농도와 유효질량도 Seebeck 계수의 중요한 결정인자이다. 열기전력(ΔV)은 재료 양단간에서의 페르미 준위(Fermi level)의 차이에 해당하는데 이는 전자의 흐름과 평형을 이루는 전위차와 재료 양단간의 온도차에 기인하는 페르미 준위(Fermi level) 변화량의 합과 같다.

2.2 Peltier 효과^[5]

1834년 Peltier에 의해 발견된 현상으로 그림 2와 같이 이종 금속 회로에 직류전류를 가해주면, 전류의 크기에 비례하여 한쪽의 접합부에서는 흡열, 다른 한쪽에서는 발열이 일어난다. 이는 일종의 히터 펌프(heat pumping) 현상으로 이를 Peltier 효과라고 부르는데 전자냉각의 원리가 된다. 이 흡/발열은 주열(Joule)발열과 달리 전류의 방향을 바꾸면 흡·발열도 반대로 된다. Peltier 효과에 의한 흡·발열량(Q)은 식(3)과 같이 전류(I)에 비례하며 이때에 비례상수 π_{ab} 를 Peltier

계수라 한다.

$$Q = \pi_{ab}I \quad (3)$$

Peltier 효과는 온도차에 의한 열기전력의 발생을 상쇄하는 방향으로 작용하므로 Seebeck 효과와는 가역적인 현상이다.

3.3 Thomson 효과^[6]

조성이 균일한 물질에 그림 2와 같이 양단에

온도차를 주고 온도 구배가 있는 길이 L 방향으로 전류를 흘리면 그 물질 내부에 흡열 혹은 발열현상이 일어난다. 이것은 물체의 열전능(α)이 온도에 따라 다르기 때문에 일어나는 현상으로 Thomson 효과라고 한다. Thomson 계수(τ)는 식(4)로 정의되므로 Seebeck 계수가 온도에 따라 증가하는 경우에 τ 는 +의 값을 갖는데 이때 전류의 방향이 저온부에서 고온부로 흐르면 재료전체에서는 흡열이 일어나며, τ 의 부호 또는

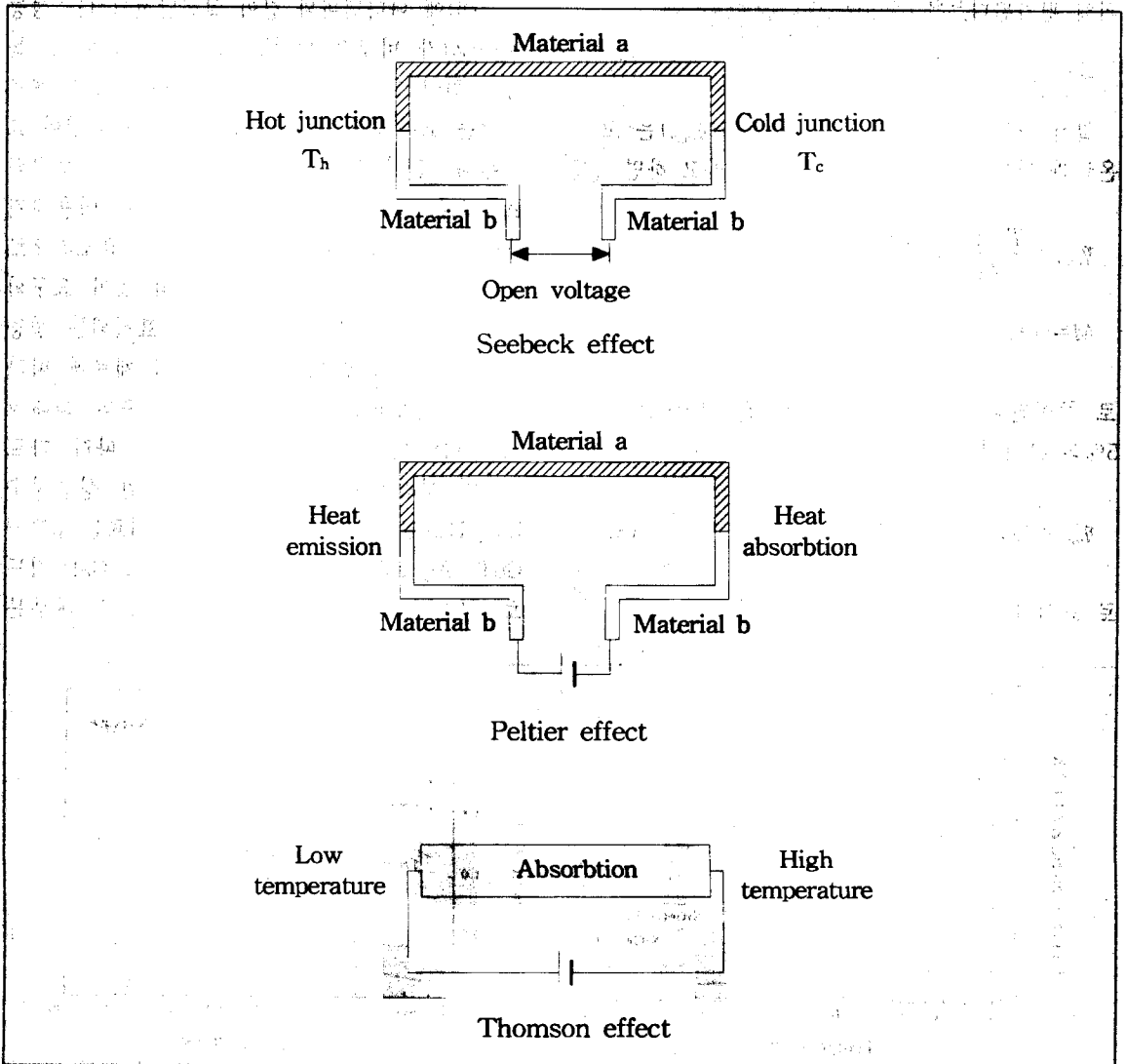


그림 2. Seebeck 효과, Peltier 효과, Thomson 효과의 비교

전류의 방향이 반대로 되면 발열이 일어난다.

$$\tau = T \cdot d\alpha/dT \quad (4)$$

3. 열전 반도체 재료

3.1 열전 반도체 재료의 성능 평가

열전 반도체 재료의 성능은 재료의 열전능, 비저항 및 열전도도를 각각 α , ρ , κ 라고 하면 식 (5)로 표시되는 성능지수 (figure of merit : Z)에 의해 평가된다.^[1-3]

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa} \quad (5)$$

열전 반도체 재료의 최대 발전효율(η_{max})은 고온측과 저온측의 온도를 각각 T_h , T_c 라고 하면

$$\eta_{max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{M-1}{M+T_c/T_h} \quad (6)$$

$$M = \{1 + Z(T_h + T_c)/2\}^{1/2} \quad (7)$$

로 주어진다.^[1,2] 또한 식 (6)은 $T_c = 300K$ 일 때 5%의 오차내의 근사식으로서

$$\eta_{max} = 4.0 \times 10^{-4} Z^{2/3} T_h^{3/2} \quad (8)$$

로 표시된다.

한편 열전냉각의 최대 성적계수(ϕ_{max})는

$$\phi_{max} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \frac{M - T_h/T_c}{M + 1} \quad (9)$$

로 표시되고, 열전 가열에서는 $\phi_{max} + 1$ 로 주어진다. 또한 흡열부가 완전 단열되어 열의 유입이 없으면, T_c 는 가장 낮은 상태로 되어 $\phi_{max} = 0$ 로 두면 최대 냉각온도차(ΔT_{max})는 다음 식으로 나타낼 수 있다.^[1,2]

$$\Delta T_{max} = (T_h - T_c)_{max} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \quad (10)$$

식(8)에 나타낸바와 같이 열전발전에서는 성능지수(Z)가 비교적 낮아도 고온부의 온도(T_h)를 높게 하여 효율을 높이는 것이 가능하지만, 재료로서는 고온에서 화학적으로 안정한 내열성이 요구된다. 한편 열전 냉각·가열은 실온 부근의 $\Delta T \leq 100K$ ($\Delta T = T_h - T_c$)의 범위에서 이용되기 때문에 성능지수(Z)가 높은 것이 필요조건으로 되어 현재에는 $3.0 \times 10^{-3} K^{-1}$ 이상의 것이 요구되고 있다. 3개의 물리정수에 의해 표시되는 성능지수는 그림 3에 나타낸바와 같이 재료에 따라 고유의 온도의존성을 가져 성능지수의 최대치 (Z_{max})를 나타내는 온도는 재료에 따라 다르다.^[1,2] 성능지수의 최대치가 무차원 성능지수 $ZT=1$ (그림 3 중 점선)을 넘는 재료는 p형의 GeTe-AgSbTe₂, n형의 Gd₂Se₃와 SiGe-GaP 정도로 현재 $ZT=2$ 를 넘는 재료는 없고 대부분

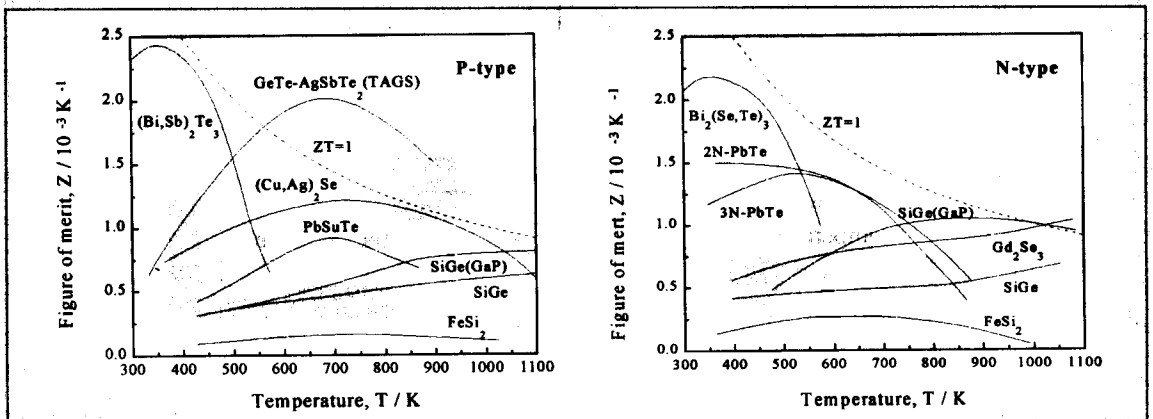


그림 3. 실용 열전재료의 종류와 성능지수의 온도 의존성

ZT=1보다 낮다. 따라서 열전 반도체 재료의 개발은 사용 온도영역에서 $ZT \geq 1$ 인 것을 목표로 하고 있다. 열전 반도체 재료는 그 열 특성을 반영하여 최고 사용온도 500K 이하의 저온용, 500~900K의 중온용, 900K 이상의 고온용 재료로서 구분되어 사용되어 지고 있다.^[2]

3.2 열전 반도체 재료의 종류

3.2.1 저온영역 열전 반도체 재료

Bi_2Te_3 화합물은 공간군 R3m에 속하는 능면체의 층상구조^[7]로서, 일반적으로 결정방위는 육방정계로서 표시된다. 같은 결정구조를 가지는 화합물로서 Bi_2Se_3 와 Sb_2Te_3 가 알려져 있으며, 이것들과 Bi_2Te_3 와의 고용체가 실온부근에서 높은 성능지수를 나타낸다.^[8] 시판되고 있는 재료는 c축의 배향성을 낮게하여 생산성을 높게 하고 있으므로 출력인자(α^2/ρ)가 낮아져 실온에 있어서의 최대 성능지수(Z_{\max})는 $2.5 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ 정도이다(그림 3). 최근 열전도도 및 기계적성질을 개선한 이방성 소결체에서는 250K에서 $Z_{\max} = 3.7 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ 을 얻은 것이 보고되고 있다.^[9]

3.2.2 중온영역 열전 반도체 재료

PbTe계 화합물의 결정구조는 NaCl형으로 이온 결합성이 강하고, 단일상의 고용영역은 가장 넓은 973K에 있어서도 49.994~50.013at.%Te로 매우 좁다.^[10] p형 재료는 화학양론 조성의 PbTe에 Ag_2Te 또는 Na을, n형 재료에는 PbI_2 또는 PbBr_2 를 첨가하여 전하의 거동을 제어하고 있다.^[2,3,7] 그러나 p형 재료는 열적 안정성이 낮아 사용중에 열전 성능이 저하하므로 PbTe-SnTe 고용체^[3,7]로서 사용되고 있으나, 성능지수는 n형 보다 낮다. 그림 3중의 3N-PbTe는 이계에서도 가장 성능지수가 큰 $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ 로 TEGS-3N이란 3M사의 상표명으로 시판되고 있다.^[3]

p형 PbTe를 대신할 재료로서 개발된 것이

AgSbTe-GeTe 계 다원계 화합물^[11,12]로 Ge 과잉 합금은 300K 이상에서 높은 성능지수를 가진다. 특히 $\text{Ag}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\text{Te}_{1.15}$ 부근 조성의 소결체는 TAGS^[2,13,14]로 불려 약 700K에서 $Z_{\max} = 2.0 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ($ZT=1.4$)를 나타내어 중온영역에서 가장 성능이 우수한 p형 재료이다. 최근 TAGS보다 큰 $Z_{\max} = 2.8 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ 을 가지는 $\text{Mg}_2\text{Ge-Mg}_2\text{Si}$ 계^[15], skutterudite 구조(IrSb_3 , FeSb_3 , CoSb_3 및 이들의 고용체)^[15] 등이 새로운 재료로서 주목을 받고 있다.

3.2.3 고온영역 열전 반도체 재료

Si-Ge 합금은 70~85at.%Si 조성에 보론(B) 혹은 인(P)을 다량 첨가하면 1273K 이상의 고온까지 p형 또는 n형 열전재료로서 우수한 성질을 나타낸다.^[16,17] Si-Ge계는 액상과 고상의 공존 온도영역이 넓어 응고시 편석이 발생하기 쉽고, 조성의 불균일성에 의한 열전특성의 저하가 현저하다. 따라서 현재의 Si-Ge계 열전재료의 합성은 조성 및 첨가물의 균일화를 간단히 제어할 수 있는 가압 소결법이 채택되고 있다.^[2] 최근 GaP를 수 mol% 첨가한 Si-Ge 소결체는 열전도도의 격자성분(κ_{ph})이 40~50% 감소하여 고온에 있어서의 성능지수가 현저히 향상되었다.^[2,3,11]

이외에 Gd_2Se_3 는 희토류(R)와 할로젠(X) 원소의 화합물로 RX , R_3X_4 - R_2X_3 , RX_2 의 2원계 화합물을 형성한다.^[11] 이들 중에서 R_3Te_4 - R_2Te_3 의 고온상은 입방정 Th_3P_4 형으로 R결합(x)의 존재에 의해 n형 반도체로 되어 일반적으로 $\text{R}_{3-x}\text{Te}_4$ ($0 < x < 1/3$)로서 표시된다. 현재 연구가 많이 진행되고 있는 화합물은 Ce_3Te_4 , La_3Te_4 및 Nd_3Te_4 계로서 1200~1400K에 있어서 높은 무차원 성능지수(ZT)를 나타낸다.^[11,18]

3.2.4 내열·내산화성 열전 반도체 재료

고온의 대기 중에서 안정한 열전재료로서 CrSi_2 , $\text{MnSi}_{1.73}$, FeSi_2 및 CoSi 가 잘 알려져 있다.^[12] 성능지수는 Bi_2Te_3 및 PbTe계 화합물보다

작으나, 내열·내산화성이 높아서 재료의 표면을 보호하지 않고도 사용 가능한 특징을 가진다. 특히 $FeSi_2$ 는 자원적으로 풍부하고 유해물질을 포함하지 않는 점이 높이 평가되어 이미 응용제품이 시판되고 있다. 최근 Vining^[19]에 의해 Ru_2Si_3 , Os_2Si_3 , Rh_4Si_5 및 Ir_4Si_5 는 고온재료로서 높은 성능지수를 가질 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. 그 중에서 p형 Ru_2Si_3 는 계산 결과 $ZT \geq 2.0$ 인 것이 예측되어 현재 재료 물성에 대한 연구가 진행되고 있다.

4. 열전발전

열전 반도체 재료를 에너지변환 소자로 이용하는 열전발전은 기본적으로 온도차를 이용하여 전기를 얻을 수 있는 발전시스템이기 때문에 경

제성을 고려하지 않는다면 지구상에 존재하는 어떤 종류의 열도 열원으로 이용할 수 있다. 즉 태양열, 지열 등의 자연 에너지와 화석연료를 이용한 가열 에너지 및 도시배열, 산업폐열 등의 배·폐열 에너지 등이 모두 열전발전의 주 에너지원으로 사용될 수 있으며, $-160^{\circ}C$ 에서 수백도까지의 전 온도범위에서 발전할 수 있는 장점이 있어, 선진 외국에서는 이에 대한 연구 개발이 활발히 진행 중이다. 표 1에 열전발전에 대한 각 나라의 연구 현황을 나타내었다.^[20,21]

4.1 해수온도차 열전발전^[2]

해수온도차 열전발전(Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC)은 표층해수(깊이 10~50m에서 $20 \sim 30^{\circ}C$)와 심층해수(깊이 500~1000m에

표 1. 열전발전의 국외 연구 현황

국가	내 용	주 요 연 구 내 용
미 국		<ul style="list-style-type: none"> • NASA : Pioneer, Apollo, Voyager I, II호에 수백 W급 RTG사용 • Teledyne Energy Systems : 군용 0.1kW급 FTG개발(1985) • Global Thermoelectric : 군용 0.1kW급 FTG 개발(1986) • General Electric : SP-100우주용 100kW급 NTG 제작(1988) • Man portable TE generator 개발(1973) : 120W급 • 열전 태양열 에너지 변환 장치 개발(1979)
일 본		<ul style="list-style-type: none"> • 1955년경부터 열전 반도체 재료 실험연구 착수 • 통산성 주관 하의 New Sunshine 계획에서 연구 중
러시아		<ul style="list-style-type: none"> • 주로 군사용 열전발전기 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 레이더(radar)용 전원공급장치 - 휴대용 통신장비의 전원공급 시스템(2.5W~160W) - 송유관, 가스 공급관의 음극부식 방지용 전원공급 시스템 - 핵잠수함의 전원공급 시스템(2MW급) • lamp 이용 라디오 전원용 열전 발전기(1.6~3W급) 대량 생산(50년대 초) • 태양열 열전 발전기 개발(1967)
독 일		<ul style="list-style-type: none"> • 박막형 열전 발전기 개발(1962) • 열전 전류 발생기 개발(1967)
폴란드		<ul style="list-style-type: none"> • 열전 발전기 메카니즘 연구(1966)
프랑스		<ul style="list-style-type: none"> • RTG 개발(1969) • 연소식 열전 발전용의 재료, 연소실, 열교환기 등 개발(1973)
루마니아		<ul style="list-style-type: none"> • 반도체식 열전 발전기 개발(1974)
인 도		<ul style="list-style-type: none"> • 태양열 열전 발전기 개발(1976)
캐나다		<ul style="list-style-type: none"> • 액체연료형 열전 발전기 개발(1986) 24~32VDC, 120W

서 4~7°C)와의 온도차를 이용한 발전방식으로 전체의 온도차가 20°C 전후로 에너지 밀도는 극히 작으나, 잠정적으로는 $2.7 \times 10^{12} \text{W}$ 가 이용 가능한 것으로 계산되고 있어 자원양으로는 풍부하다고 할 수 있다. 미국의 Solar Energy Research Institute에서는 해수온도차 열전발전으로 400MW급의 발전도 가능하다고 분석하고 있다. 해수온도차 발전방식으로는 암모니아 순환식이 개발되어 있으나, 열전발전방식이 시스템의 고신뢰성, 무보수성, 안전성이 높은 장점과 열전 모듈을 단순하게 구성할 수 있는 경제성과 내환경적 안정성이 높다는 장점으로 열전 반도체 재료에 의한 발전이 검토되고 있으며 시스템 구성의 개념은 그림 4와 같다.

4.2 태양열 이용 열전발전

해양의 심해와 표층의 온도차도 엄밀히 말한다면 태양열에 의해서 온도차가 발생한다고 할 수 있으나, 해수온도차를 제외한 태양에너지를 이용한 열전발전으로는 solar pond가 가장 우수한 시스템으로 알려져 있다. 물은 열 용량이 큰 매체로서 이 성질을 이용하여 저수지 등에 태양에너지를 집적하여 이용하는 방법을 solar pond라 한다. solar pond에서의 열 이용은 구조가 비

교적 간단하여 지역에 따라서는 오래전부터 수영장의 온수공급이나 지역 난방 등에 많이 적용하여 왔는데 최근에는 이를 이용하여 전기를 얻고자 하는 시도가 이루어지고 있으며 인공적으로 호수를 만들기도 한다. 인도의 뉴델리의 기온을 기초로 하여 계산한 결과로는 호수로부터 얻어지는 온수의 양은 97°C 전후의 $2 \times 10^4 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$, 60.5°C의 온수는 $5 \times 10^4 \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ 정도에 달하고 효율은 27.5% 및 34% 정도까지 나타나고 있어 응용 가능성이 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 또한 solar pond에 의한 발전 단가도 30년간 15.6%의 효율로 사용한다고 계산하여 0.1\$/kW 정도가 되어 경제성이 매우 높은 것으로 평가되어, 표 2에 나타낸바와 같이 다양한 연구가 진행되고 있다.

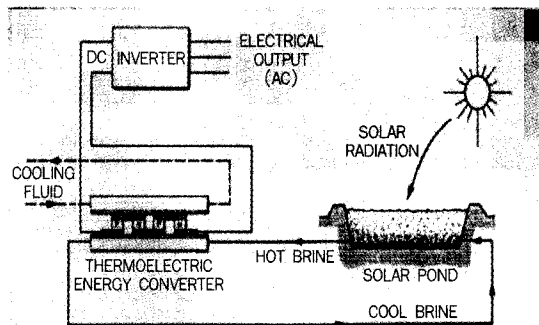


그림 5. Solar pond 열전발전의 도식도

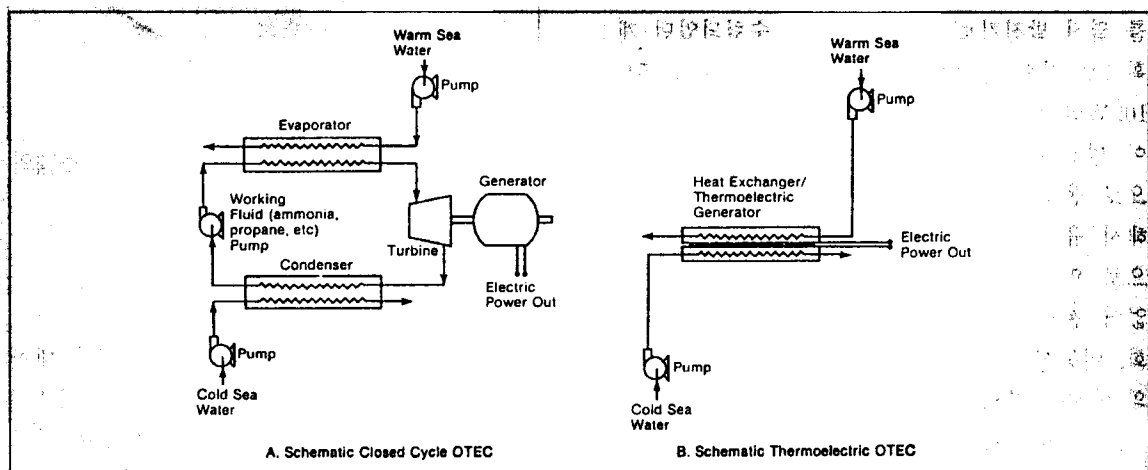


그림 4. 해수온도차 발전의 도식도

표 2. 태양열 이용(solar pond) 열전발전의 연구 예

수행주체 또는 Project명	수행기관	수행년도	전 력	위치 및 용도
Ohio주	Ohio 주립대학	1979		Ohio주 Columbus 열이른 모델 확인 실험용
Salton Sea Solar Pond Project	J.P.L	1982~1987	5MW	California Salton Sea 50~600MW급
California주 Project	캘리포니아 주		300kW	San Diego
Utah			10GW	Great Salt Lake
Israel Ein-Bokek	Inst. of Desert Reserch	1981	150kW	Dead Sea
Israel			6kW	Sdom

4.3 연소열 이용 열전발전

연소열 이용 열전발전(Fueled Thermoelectric Generator : FTG)기술은 1960년대 초 부터 미 육군의 US Army Electronics Technology and Devices Laboratory를 중심으로 Silent Lightweight Electric Energy Plants(SLEEP : Signature Lightweight Electric Energy Plants라고도 함) 계획의 일환으로 Army Liquid Fueled Thermoelectric Generator Program을 추진하여 상용화 하였다. SLEEP 계획은 야전용 무전기의 전원 공급용 엔진식 발전기가 소음이 크고 신뢰성도 떨어지며 계속적인 보수가 요구되므로 이를 열전 발전기로 대체하기 위해 수립되었던 계획으로 계획 당시에는 0.1, 0.3, 0.5, 1.5, 3.0, 5.0, 10kW급의 열전 발전기를 대상으로 하였다.^[21]

이 발전기들은 대부분 저온부는 강제 공냉방식으로 온도를 유지하고 고온부는 연소가스에 의해서 유지하는 방식을 사용하였다. 이러한 특성으로 인해서 효율은 다소 떨어지지만 회전부가 없어 전자파가 발생하지 않으므로 신뢰성, 경량화, 이동성, 연료의 다양성, 무보수성 등의 육군의 야전에 필요한 특징을 최대한 발휘하였다.

또한 민수용으로는 산간벽지 또는 휴대용 열전 발전기가 일부 사용되고 있는데 전력 수요량

이 적은 곳에 기존의 내연기관으로 발전하는 경우의 설치단가 및 보수 등의 문제점을 제거할 목적으로 사용하고 있다. 이러한 예로서는 산간 지방에 있는 마이크로파 송신 중계소용 전원이란든지 극지의 기상 모니터 장치용 전원 등이 있다.^[21,22]

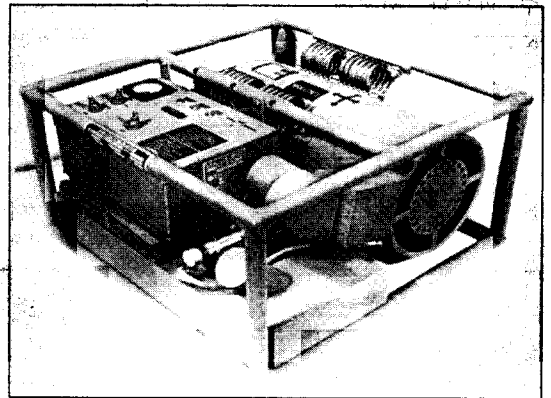


그림 6. 100W급 연소열 이용 열전발전 시스템의 형상

4.4 지열이용 열전발전

최근 우리나라의 지열이용의 가능성에 대한 연구 보고서에 의하면, 마산, 창원부근의 지층에서 약 100℃ 부근의 열원을 발견하였으며 이를 이용한 열전발전소의 구축도 가능하리라 판단된

다. 지열에 대한 이용기술은 해수를 이용하여 저온부를 구성하고 고온부를 지열에 의한 온수 또는 다른 매체를 이용하여 폐회로를 구성한 복합 열전발전이 일반적으로 제안되고 있다.

4.5 방사성 동위원소 붕괴열 이용 열전발전

열전 발전기의 이용기술의 시작은 우주선의 시작과 더불어 시작되었다고 해도 과언이 아니라고 할 수 있다. 미국의 DOE(Department of Energy)에서는 1956년부터 인공위성용 전원으로 사용할 목적으로 SNAP(Systems for Nuclear Auxiliary Power)계획을 추진하여 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 발열이나 소형 원자로를 열원으로 하는 열전 발전기를 개발하여 왔다. 1959년 제작이 완료된 SNAP-3는 세계에서 최초로 방사성 동위원소를 열원으로 하는 열전 발전기(Radioisotope Thermoelectric Generator : RTG)를 사용하는 인공위성을 상용화하였으며 Apollo, Pioneer, Voyage, Galileo호 등에서 이용하고 있는 실정이다.^[21]

이외 미 해군, 연안경비대, 연구기관 등에서 초계, 지시용 부표, 발광 신호장치, 해양의 온도, 유속을 송신하는 장치의 전원으로도 이용되고 있다.

4.6 원자로 열 이용 열전발전

원자로 내에서 발생하는 반응열을 열원으로 하는 원자로 열 이용 열전발전(Nuclear Thermoelectric Generator : NTG)에는 직접식과 간접식이 있으며 직접식은 중성자의 반사판이 있는 Be벽을 통하여 모듈의 고온부를 가열하는 방식으로 1960년 초에 구 소련에서 발족한 RORSAT(Soviet Nuclear Powered Ocean Reconnaissance Satellite) 계획에 의해 군사위성으로 개발한 Romashuka가 대표적이다. 소자로는 SiGe계 소결 소자가 사용되었고 0.6~1kW급의 출력이며 Cosmos 위성에 탑재한 것으로 알려져 있다. 간접식은 원자로의 발열을 액체금속 또는 히터 파이프에 의해 모듈 고온부를 가열하는 방식이다. 이 형태는 ²³⁵U를 연료로 하고 냉각재로 78Na-22K 액체금속을 사용하는 SNAP-10A라는 이름으로 1965년에 540W의 발전을 하였다. 현재는 JPL(Jet Propulsion Laboratory Department of Energy)의 SP-100 계획에 연결되어 100kW-1MW의 전력을 우주에서 공급하는 시스템의 실용화 개발을 진행하고 있다.^[21]

4.7 배·폐열 이용 열전발전^[23,24]

2차 산업의 발전과 더불어 에너지원의 사용은 증가하고 있지만, 사용된 에너지의 회수율은 극히 미약하여 에너지의 효율적 이용 차원에서 화력 발전소와 가스 터빈 발전소의 배·폐열 및 LNG 냉열 등의 배·폐열을 이용한 열전발전 연구가 진행되고 있다. 그림 8은 1990년 미국의 Hi-Z사에서 제작한 디젤 트럭의 배기열을 이용한 열전 발전기로 1kW급의 전력을 얻을 수 있으며, 그림 9는 보일러의 고온수와 냉온수를 이용한 열전 발전기의 형상을 나타내었다.

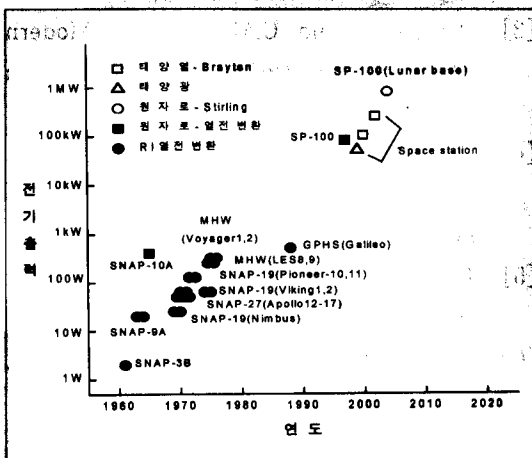


그림 7. 우주선 및 인공위성용 열원의 추이

5. 향후 전망



1,000 Watt and 200 Watt Waste Heat Recov Units Will Replace Alternator on Diesel Tri

그림 8. 디젤 트럭의 배기구에 설치된 1kW급 열전 발전기의 형상

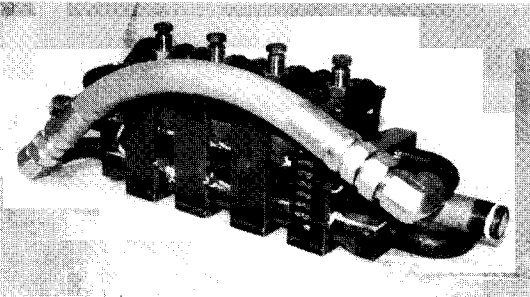


그림 9. 고온수와 냉온수를 이용한 열전 발전기의 형상

열전 반도체 재료를 에너지 변환 소자로 이용하는 열전 발전기술은 지금까지 극지, 군용, 우주, 항공분야 등 특수한 목적에서만 사용되어 왔지만, 탄소세 도입, Green round, 기후협약 등 전 세계적으로 에너지의 사용과 배출문제가 제한됨에 따라 차세대 청정 대체 에너지의 개발과 에너지 이용 효율의 극대화 측면에서 민생 분야도 열전발전 기술의 도입이 부각되고 있다. 이러한

민생용 열전 발전기의 도입은 효율의 향상, 열전 모듈의 가격 저하, 신소재의 개발 등으로 인해 더욱 가속화되고 있으며 Solar pond, 지열발전, 해수온도차 발전 등에서 수백 kW에서 MW급의 발전기가 계획 또는 구동되고 있는 실정이다.

열전 반도체 재료의 발전분야에의 응용, 확대와 함께 재료적 측면에서도 높은 에너지 변환 효율을 가진 새로운 열전 반도체 재료가 요구되어, 열전 반도체 재료의 성능지수를 향상시키기 위한 새로운 재료 기술이 개발되고 있으며, 특히 향후의 열전 반도체 재료의 개발은 재료의 전기적 특성을 제어한 균질 열전 반도체 재료보다 열적 특성을 제어한 비균질 열전 반도체 재료의 개발에 초점이 맞추어져 진행되고 있다. 이러한 기술 개발 노력에 의해 가까운 미래에 열전 에너지 변환 기술의 비약적인 발전 시대가 도래할 것으로 많은 전문가에 의해 예견되어 지고 있으며, ZT=1 정도인 열전 반도체 재료에서 반도체 분야의 메모리 기술의 발전과 같은 획기적인 기술의 발전이 있을 것으로 전망되어 지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 西田勳夫:セラミックス, 21(1986)516.
- [2] 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).
- [3] D.M.Rowe and C.M.Bhandari: Modern Thermoelectrics, Holt, Rinehart & Winston Ltd, London, (1983) p.113.
- [4] T.J.Seebeck: Abhandlungen der Deutschen Alcademic der Wissenschaften zu Berlin, (1822), p265.
- [5] J.C.A.Peltier: Ann. Chem. Phys., 56(1834)371.
- [6] W.Thomson: Proc. Roy. Soc. Edinburgh, (1851) p.91.
- [7] D.R.Lovett: Semimetals & Narrow-Bandgap Semiconductors, Pion Ltd,

- London, (1977) p.139.
- [8] R.B.Horst and L.R.Williams : Proc. 4th Int. Conf. Thermoelectric Energy Conv. (ICT), (1982) p.119.
- [9] 海部宏昌, 坂田亭, 磯田辛宏, 西田勳夫 : 日本金屬學會誌, 53(1989)958.
- [10] R.F.Brebrick and R.S.Allgaier : J. Chem. Phys., 32(1960)1826.
- [11] C.Wood : Rep. Prog. Phys., 51(1988)459.
- [12] R.D.Rosi, E.F.Hockings and N.E.Lindenbald : RCA Rev., 22(1961)82.
- [13] E.A.Skrabek : Proc. 9th Inter. Soc. Energy Conv. Eng. Conf. (IECEC), (1974) p.160.
- [14] E.A.Skrabek : Proc. 11th IECEC, (1976) p.1567.
- [15] Y.Noda, H.Kon, Y.Furukawa, I.A.Nishida and K.Masumoto : Proc. 12th ICT, (1993) p.206.
- [16] B.Abeles and R.W.Cohen : J. Appl. Phys., 35(1964)247.
- [17] J.P.Dishukes, L.Ekstrom, E.F.Steigmeier, I.Kudhan and D.S.Beers : J. Appl. Phys., 35(1964)2899.
- [18] C.Wood : Proc. 1st European Conf. Thermoelectrics (ECT '87), (1987) p.1.
- [19] C.B.Vining : Proc. 9th ICT, (1990) p.249.
- [20] D.M.Rowe : CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Inc., New York (1995)
- [21] 일본 전력중앙연구소 : 반도체 열전발전의 가능성 연구 (1993)
- [22] M.Schultz, J.P.Mchugh and W.A.Tiller : J. Appl. Phys., 33(1962)2443.
- [23] K.Matsuura : Waste Heat Recovery TEG for the Production of Hydrogen Gas, VII school of thermoelectricity, Kyiv, Ukraina, (1996) p.1.
- [24] D.K.Benson and T.S.Jayadev : Proc. 3rd ICTEC, (1980) p.27.