

# 반도체 소자를 이용한 열전발전 기술

■ 이희웅, 박수동, 김봉서 / 한국전기연구원 신소재응용연구그룹

## 열과 전기 그리고 열전

인류의 번영은 우주의 시작과 함께 존재하고 있던 열을 효과적으로 이용함으로써 시작되었고, 산업사회는 열을 이용하여 육체를 대신할 동력을 얻을 수 있는 증기기관의 개발로 시작되었다고 할 수 있으나 현재와 같은 고도 산업사회의 형성은 열을 이용하여 안전성이 높고 대규모 동력원이 되는 전기를 얻을 수 있었음으로 가속화하였다고 하여도 지나치지 않을 것이다. 그만큼 엄청난 영향력을 지닌 전기이지만 열을 동력으로 변화시키는 대부분의 열발전 방식은 초기부터 현재의 원자력에 이르기까지 가열-고압증기-터빈구동-발전의 과정을 그대로 유지하고 있다.

이와 같은 기존 전기에너지 생산방식에 반한 새로운 기술적 접근으로서 제시되고 있는 발전 방식이 두 상태의 온도차를 이용하는 열전발전(Thermoelectric generation) 방식이다. 열전발전은 동력생산을 위해 인위적으로 열을 만드는 형태의 발전이 아니라 만들어져 있는 열(연소열, 폐열 및 자연에너지 상태의 열)에서 최종 소비에너지 형태인 전기를 만드는 직접 변환 기술이다. 열전기술은 우리로 하여금 크기는 우주적으로 작게는 생활 주위 곳곳에서 존재하는 다양한 온도 차이를 전기에너지로 변환시켜 줄 수 있는 미다스의 능력을 제공한다. 즉, 태양의 복사열, 쓰레기 소각장의 소각열, 각종 공장의 배폐열 및 하수구로 흘러가는 뜨거운 물 등의 인간 활동과 관련된 다양한 열원뿐만 아니라 태양열, 해수열, 지열 심지어 체온 등과 같은 바이오 열과 같이 상대적으로 온도차가 존재하는 곳에는 어디든지 열전발전을 통한 전기에너지의 생산을 기대할 수 있다.

## 열전발전의 특징

열전(Thermoelectric)이란 열과 전기 사이의 에너지 변환을 의미하며, 열전변환 소자의 양쪽에 온도 차이가 있을 때 열의 흐름에 의해 직접 전기가 발생하거나 반대로 열전변환소자에 전기를 흘리면 소자의 양쪽에 온도차가 발생하는 현상을 말하고, 전자의 경우를 열전발전, 후자의 경우를 열전냉각이라 한다.

열전효과는 1821년 독일의 T.J. Seebeck 이 구리-비스무스 또는 비스무스-안티몬 이종금속의 한쪽을 가열했을 때 회로 내에 있는 자침의 각도가 변하는 것을 발견함으로써 그 역사가 시작되었고, 프랑스의 J.C.A. Peltier와 영국의 W. Thomson을 거치면서 이론적으로 Seebeck 효과, Peltier 효과 및 Thomson 효과라는 세 가지 열전효과로 정립되었다.

열전발전기에 대한 본격적인 연구는 미국 우주계획의 일환으로 SNAP(Systems for Nuclear Auxiliary Power)이라는 대단위 사업에 포함되어 방사성 동위원소나 원자료를 열원으로 하는 열전발전기 개발이 시작되면서이다. 그 이후 우주용 뿐만 아니라 군용, 극지용, 해저용 등의 열전 발전기가 계속하여 개발되었고 최근에는 폐열을 활용하는 열전발전기에 대한 연구가 각국에서 경쟁적으로 이루어지고 있다.

열전발전에서는 태양열, 지열 등의 자연 에너지와 화석연료를 이용한 가열 에너지 및 도시배열, 산업폐열과 같은 폐열 에너지 등이 모두 열전발전의 주 에너지원으로 고려될 수 있을 뿐만 아니라 심지어  $-160^{\circ}\text{C}$ 의 천연가스와 상온 사이의 온도차를 이용하여도 전기를 얻을 수도 있다. 또한, 기타 발전방식과는 달리 구동부

가 없어 소음이나 진동이 없으며, 기계적 접촉에 의한 부품마멸이 없다는 점도 장점이다. 이로 인해 시스템의 수명이 길고 신뢰성이 높다. 반면 효율이 기존 방법에 비해 낮다는 점이나 현재 시스템 가격이 높다는 것 등은 열전발전의 실용화에 큰 제약이 되고 있다. 현재 8~10% 정도의 변환효율을 가진 열전재료가 개발되어 있으며 점차 그 효율을 높여가고 있다. 열전발전기는 표1이나 표2에서 비교한 것과 같이 엔진식에 비해서는 수명이 길고 유지보수가 거의 필요하지 않다는 점에서 유리하며, 태양광에 비해서는 부지 면적당 출력을 높일 수 있다는 점에서 적층시스템으로의 가능성이 높다고 할 수 있다. 연료로 산업배·폐열을 이용하는 열전발전 시스템(WTG, Waste Thermoelectric Generator)의 경우에는 유지비가 거의 필요 없어 효율에서의 불리함을 극복할 수 있는 경제적 시스템으로 주목받고 있다.

**반도체 열전발전의 원리**

가. 열전효과와 성능지수

(1) Seebeck 효과

회로의 양단간에 온도차( $\Delta T = T_H - T_C$ )를 가하면 n형

반도체의 경우에는 고온부에서의 전자가 평균적으로 Fermi level 보다 높은 에너지 상태로 여기되면서 에너지를 낮추기 위해서 전자는 저온 측으로 확산하게 된다. 그 결과 저온부는 -로 대전하고 고온부는 +로 대전하여 전계가 형성되는데, 이때에 저온부로 향하는 전자의 흐름을 저지함으로써 평형상태를 유지하기 위한 역작용으로 재료의 양단간에 전압 ( $V_S$ )이 발생한다.

이와 반대로 carrier가 hole인 p형 반도체의 경우에는 저온부가 +, 고온부는 -로 대전된다. 이 현상을 Seebeck 효과라 하며 열전발전의 원리가 된다.

**(2) Peltier 효과**

n형 반도체의 열전회로에 직류전류(I)를 가해주면 전류방향과 반대 방향으로 전도 전자가 이동한다. 이때에 금속과 반도체의 접촉부에서는 주위로부터 열에너지를 흡수한 전자가 금속으로부터 반도체의 내부로 이동하므로 -로 대전한 접촉부에서는 흡열이 일어나고 +로 대전한 접촉부에서는 발열이 일어난다. 이는 일종의 heat pumping 현상으로 이를 Peltier 효과라고 부르는데 전자냉각의 원리가 된다. Peltier 효과는 온도차에 의한 열기전력의 발생을 상쇄하는 방향으로 작용

표 1연소식 열전발전기(FTG)와 엔진식 발전기의 비교

	500W 열전발전	500W 엔진식 발전
사 용 연 료	가솔린, 경유 등	가솔린, 경유 등
소 음	100m지점에서 감지 불능	500m 지점에서 소음 감지
중 량	30kg	38kg
평균고장간격	2,000시간	250시간
보 수	불필요	150시간 가동 후 보수 필요
연 료 소 모	1.35kg/h	0.73kg/h

표 2열전발전과 태양광발전의 비교

특성 \ 종류	열전발전	태 양 광 발 전
모듈설치방식	체 적 발 전	면 발 전
부지면적당 전기출력	$\Delta T=40$ deg에서 7.7kW/m <sup>2</sup> $\Delta T=80$ deg에서 23.4kW/m <sup>2</sup>	1kW/m <sup>2</sup> (쾌청시의 지표도달 태양 에너지)
최대 출력	mW~ MW 급	대개 10~30kW 수준
변환효율	5 ~ 8 %	단결정 18% 정도 다결정 12~ 13%
특기사항	고온수 60° C, 저온수 14° C의 저급열에서 112W/m <sup>2</sup>	북위 35도 부근에서 15W/m <sup>2</sup>

하므로 Seebeck 효과와는 가역적인 현상이다.

(3) Thomson 효과

1854년에 W. Thomson은 Peltier 계수( $\pi_{A-B}$ )는 온도에 비례하지만 실험적으로는 실제의 기전력이 열역학적 관계식과 일치하지 않음을 발견하였으며 그 원인이 열전회로로 구성된 가역 열기관의 경우에 접합부를 제외한 재료 내부와 외계 사이에서 열의 출입(발열 또는 흡열)이 있기 때문으로, 이와 같은 열의 출입은 Seebeck 계수가 온도의 함수이므로 재료 내에서 온도 구배에 따라 값이 변화하기 때문에 발생하는 현상이라는 것을 알게 되었다. 이를 Thomson 효과라고 부른다.

(4) 성능지수(Figure of merit)

열전발전을 재료적 측면에서 보면 다음 3가지 요소가 만족되는 것이 가장 좋다.

- ① 소자에 형성된 온도차는 클수록 좋으므로 열전도율  $\kappa$ 는 작을수록 좋다.

- ② 출력전압은 클수록 좋기 때문에 Seebeck 계수  $a$ 는 큰것이 좋다.
- ③ 큰 출력을 내기 위해서 내부저항과 소자의 저항을  $\rho$ 는 작을수록 좋다.

이 3가지 물성정수를 조합하면 다음과 같이 되고 이것을 열전물질의 성능지수라 한다.

$$Z = a^2 / \rho \kappa \quad (1)$$

나. 열전발전의 원리

반도체에 의한 열전발전의 원리는 그림 2의 단위소자(unit cell)로서 설명할 수 있다. 단위소자는  $n$ 형과  $p$ 형 두 개의 서로 다른 열전재료로서 구성되어 있고 온도  $T_c$  인 저온부와 온도  $T_H$  인 고온부 열원과 접촉하고 이 회로에 외부 부하를 가하면 다음과 같이 열의 변화가 일어난다.

- ① 고열원으로 부터 소자에 들어간 열은 열전달에 의해 저열원으로 흐른다.
- 열전도는 carrier에 의한 것과 격자 진동에 의한 것이 있는데, carrier에 의한 것이 기전력으로 나타난다. (Seebeck효과)
- ② carrier의 작용, 즉 전류에 의해 소자 내에서 주열이 발생한다.
- ③ 전류에 의해 고온부에서는 peltier 흡수가, 저온부에서는 peltier 발열이 생긴다.

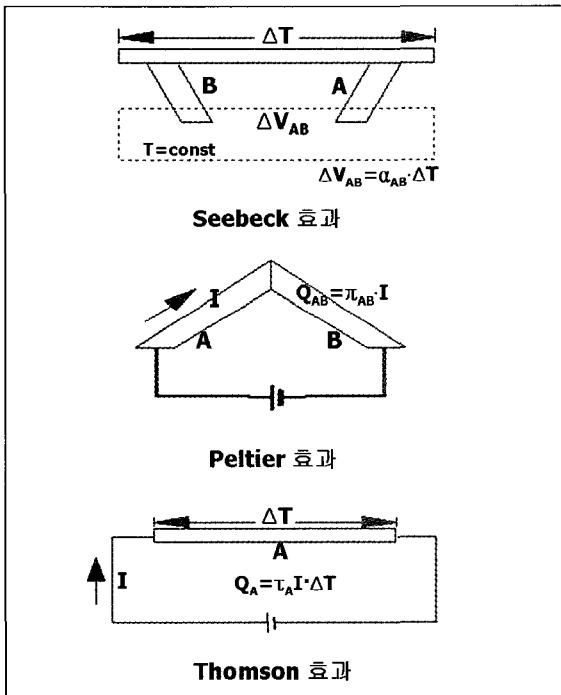


그림 1 Peltier, Seebeck, Thomson효과 비교

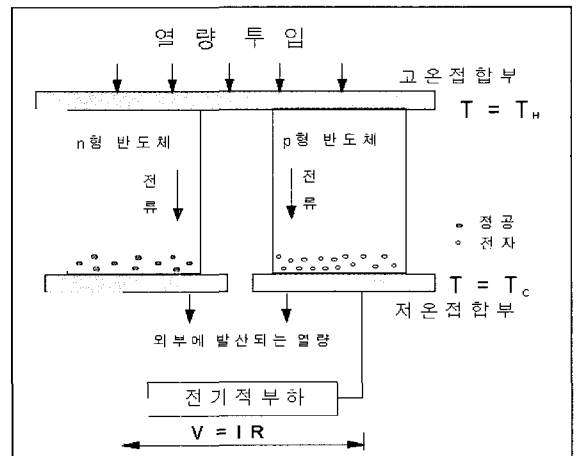


그림 2 열전발전의 원리

이 효과에 의해 고온부에서 흡수되는 열량과 저온부에서 제거되는 열량이 결정되면 소자에서 온도차  $\Delta T$ 가 형성된다.

온도차에 의해 발생하는 전압은 단위소자에 적용된  $n$ 형 및  $p$ 형 열전재료의 상대 열전능에 의해 나타나며  $V = a_{A-B} \cdot \Delta T$ 가 된다. 여기서  $a_{A-B}$ 는 서로 반대되는  $n$ 형과  $p$ 형 반도체의 상대 열전능이다. 전력은  $I \cdot R_L$ 로 표시할 수 있으며 전류는  $a_{A-B} \cdot \Delta T / (R_L + R_t)$ 이므로 외부 부하에 의해 발생하는 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \left[ \frac{a_{A-B} \cdot \Delta T}{R_L + R_t} \right]^2 R_L \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{(a_{A-B} \cdot \Delta T)^2}{4 R_t} \quad (R_L = R_t \text{ 일때})$$

(2)식에 의하면 열전발전에서 큰 power를 얻기 위해서는 우선 단위소자 양단간의 온도차와 Seebeck계수의 값이 커야 한다. 소자재료의 직경이 크고 길이가 짧으면 저항을 최소화할 수 있기 때문에 큰 power를 얻을 수 있다. 그러나 형상계수에만 너무 치우치면 저항을 줄일 수는 있지만 양단의 온도차가 그만큼 작아지기 때문에 전체 효율면에서는 불리할 수도 있다. 소자 재료에 불순물을 적절히 첨가함으로써 효율을 향상시킬 수도 있다. 열전회로의 효율을 좌우하는 인자는  $T_H$ ,  $T_C$ 와 회로의 저항 및 Seebeck 계수 등이다.  $T_H$ 와  $T_C$ 가 일정한 경우에는 열전재료의 성능지수( $Z$ ) 값이 클수록 효율은 커진다.

### 열전재료 개발 현황

지금까지 알려진 열전재료는 온도구간에 따라 성능지수가 우수한  $p$ 형 및  $n$ 형 열전재료로 구분할 수 있다.  $p$ 형 열전반도체의 경우에는  $-100^\circ\text{C}$ 부터 상온의 온도 구간에서는 Bi-Te계 재료가 가장 적합하고,  $200^\circ\text{C}$ 부터  $500^\circ\text{C}$ 의 온도구간에서는 Pb-Te계 재료가 가장 적합하다. 또한  $n$ 형 열전반도체의 경우에는 그림 4에서와 같이  $-100^\circ\text{C}$ 에서 상온의 온도구간에서는 Bi-Sb-Te계 재료가 가장 적합하며 고온영역에서는 TAGS가 가장 적

합하다. 현재 실용적으로 사용되고 있는 열전재료는 Bi-Te계, Pb-Te계와 Si-Ge계의 3종류로 한정되어 있으며  $\text{Cu}_2\text{Se}$ ,  $\text{Gd}_2\text{Se}_3$  등 selenide계 열전반도체가 거의 실용단계에 있다. 고온용 재료로는  $\text{-AlB}_2$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_5\text{C}_7$ ,  $\text{B}_1\text{Si}$ ,  $\text{BP}$  등의 boron 화합물이 연구 개발되고 있으며,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{MnSi}_2$ ,  $\text{CoSi}_2$  등의 천이금속 규화물이 성능지수는 낮으나 재료가격과 가공비가 저렴하기 때문에 장래의 열전발전재료로 고려되고 있다. 최근에는 구조적으로는 비정질의 특성을 보유하면서 전자적으로는 결정질과 같은 특성을 나타내는 clathrate계 재료, skutterudite계 재료가 이론적으로 규명되고 있으며 박막재료에 대한 연구가 활발하게 이루어지면서 열전재료의 특성은 나날이 개선되고 있어 열전발전 기술의 미래를 밝게 하고 있다.

### 가. Te 화합물 열전재료

Bi-Te계 재료를 중심으로 하는 Te 화합물 열전재료는 열전재료의 고전적인 재료로서 냉각재료로는 아직까지  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 계를 능가할 만한 재료계가 개발되지 않고 있다. Bi-Te계 화합물은 단독 또는 고용체의 경우에 우수한 열전특성을 나타내는데 이들 중에서  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  조성이 기본인  $\text{Sb}_3\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 와의 의2원계(pseudo binary system) 혹은 의3원계(pseudo ternary system)의 고용체가 열전도도가 낮아 상온 부근에서의 성능지수가 크다. Bi가 과잉이면  $p$ 형 소자, Te가 과잉이면  $n$ 형 소자로 된다.

중온용 소자로는 Pb-Te계가 실용화되어 미국의 SNAP(Systems for Nuclear Auxiliary Power) 계획에서 중심적인 재료로 사용되었고, 1969년에 발사된 Nimbus 위성의 열전발전기에 최초로 탑재된 이후 Pioneer, Viking 등에 탑재되어 우주에서의 열전발전을 실현하였다.

### 나. Si-Ge계 열전재료

1960년대 중반에 미국의 RCA에서는 B 또는 P를 다량 함유한 Si-Ge 합금(70~85 at%Si)이  $1000^\circ\text{C}$  이상의 고온까지 열전특성이 우수하다는 것을 발표하였으며, 1970년대에 들어서 미국의 GE에서는 Si-Ge계 열전재료를

사용하여 흑성탄사선의 열전발전기를 개발하였다.

다. 천이원소 규화물계 열전재료

천이원소 규화물 중에서 대표적인 FeSi<sub>2</sub>는 n-type 열전재료로 내열성과 내산화성이 우수하고 가격이 저렴하기 때문에 열전성능이 낮음에도 불구하고 고온용 열전재료로 주목받고 있다. FeSi<sub>2</sub>는 순도 98% 이상의 전해철, 규소, 망간, 코발트 등을 고온에서 용해 후 분쇄한 분말을 냉간프레스한 후 소결하여 제조한다.[1] p-type 재료로는 고망간 규화물(HMS)이 유망한 재료로 제시되고 있는데 HMS 재료는 Mn:Si=1:1.7의 조성비를 갖는 재료로 단결정 성장법에 의해 고순도의 재료를 얻을 수 있다. 그 외에도 CoSi, CrSi<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> 재료 등이 고온의 대기 중에서 사용 가능한 열전재료로 기대되고 있으며, ReSi<sub>2</sub>, NbSi<sub>2</sub> 및 TaSi<sub>2</sub>는 용점이 2000°C 이상이기 때문에 1000°C~1600°C에서 사용 가능한 열전재료로 연구되고 있다.

라. 산화물계 열전재료

최근 일본에서는 고온에서 안정한 특징을 지닌 산화물계 열전재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

원래 산화물 열전재료는 그 원자구조상 mobility 가 기존 반도체 열전재료에 비해 현저히 낮기 때문에 열전용으로는 적합하지 않은 재료로 취급되었으나, 나트륨-코발트산화물 재료의 경우 기존의 Bi계나Pb계 열전재료와 달리 화학적으로 안정하고 무독성이라는 장점에 더해 저항이 낮고 열전변환량이 높은 재료로 알려지면서 향후 열전재료의 유력한 후보군으로 각광을 받고 있다. 최근에 일본에서 성능지수가 기존의 금속계 열전재료에 가까운 특성을 지닌 산화물 열전재료가 발표되어 비상한 관심을 끌고 있다.[2]

마. 박막 및 PGEC 열전재료

현재 열전발전 기술의 적용에 가장 큰 제약점은 성능지수가 낮다는 점이라고 할 수 있다. 현재 열전재료의 성능지수는 ZT≈1 정도에 머무르고 있는데 이를 2~3 정도로 상승시킬 수 있다면 열전냉각이나 열전발

전 기술은 기존의 냉각 또는 발전기술과 충분히 경쟁성이 있다. 일부 연구자들은 고체물리 이론을 이용하여 열전재료의 성능지수에는 한계가 없다는 주장을 펴고 있으며 열전재료의 성능에서 개선의 가능성이 충분하다는 점을 주장하기도 한다. 실제로 1990년대 후반부터 서로 다른 두 가지 방법에 의해 이러한 가능성에 대한 접근이 시도되었고 일부에서 그 효과가 나타나고 있다.

그 하나의 접근방법이 기존의 3차원 재료의 개념을 저차원화한 것이다. 저차원화를 통해 공간에 영향을 받는 분자밀도나 전자의 산란을 최대한 감소시키고 성능지수를 향상시킬 수 있다는 것으로[3], 이를 뒷받침하는 성공적인 결과들로 ZT≈2에 달하는 인공재료들이 1차원의 재료나 박막의 다중화를 통해 제시된 바 있다.[4][5]

두 번째는 원자 배열을 바꿈으로 전하 스펙트럼, 양자분산 및 산란과정을 변화시키는 접근방법으로 Slack의 Phonon-Glass-Electron-Crystal(PGEC)의 개념을 이용하는 것이다.[6] 이들 재료는 열전도성에서는 비정질의 특징을 보이면서 결정질의 전자특성을 보이고 있는 재료로서 clathrate계, 반 Heusler 합금, 개량 Chacogenide계 및 skutterudite계 열전재료가 여기에 속하는 재료들이다. 이들 중 특히 skutterudite계 열전재료는 MX<sub>3</sub>을 기본조성으로 하는 2원계 합금(여기서 M은 Co, Rh 또는 Ir 원소, X는 P, As 또는 Sb의 질소족 원소)으로 구조상 2개의 void를 포함하고 있어 희토류 원소가 쉽게 채워질 수 있고 특성의 변화를 용이하게 줄 수 있는 재료이며 p형이나 n형 모두에서 높은 성능지수를 얻을 수 있는 재료로 주목받고 있다.[7]

각종 열전발전기와 그 특징

현재 실용화된 열전발전 시스템은 주로 연소식 열전발전(FTG), 방사성 동위원소 붕괴열 이용 열전발전(RTG), 원자력 열전발전(NTG)으로 벽지용, 군용, 우주용 전원으로 이용되고 있으며 태양열 이용 시스템(STG), 폐열이용 시스템(WTG), 지열이용 시스템(GTG), 해수이용 시스템(OTEC)등은 현재 개념 설계

단계에 있거나 일부 이용단계에 와 있다.

#### 가. 연소식 열전발전기

##### (Fuel Combustion Thermoelectric Generator)

1960년대 초부터 미육군에서는 Silent Lightweight Electric Energy Plants(SLEEP) 계획의 일환으로 야전용 무전기 전원공급용 열전발전기 개발을 추진하였다. 제일 먼저 개발된 것은 1983년부터 1986년 사이에 Global Thermoelectric 사에서 제작한 500W급 열전발전기이다. 이 발전기는 열전재료로 PbTe를 사용하였고 고온부의 온도는 565°C, 저온부는 강제 공냉방식에 의해 165°C로 유지하였다. 한편 100W급 발전기는 생화학제 원격검침시스템전용의 전원으로 Teledyne Energy System사에 의해 1985년에 개발 완료되어 TELAN/DECAP라는 상품명으로 1988년부터 미육군에 배치되고 있다.

#### 나. 동위원소 열전발전기

##### (Radioisotope Thermoelectric Generator)

미국의 DOE에서는 1956년부터 인공위성 전원용으로 SNAP(Systems for Nuclear Auxiliary Power) 계획을 추진하여 방사성 동위원소 붕괴열을 열원으로 하는 열전발전기(RTG)를 개발하였다. 1959년 1월에 제작된 SNAP-3은 세계 최초의 방사성동위원소를 열원으로 하는 열전발전기로서 1961년 6월에 개량형인 SNAP-3B7이 미해군의 항해용 위성인 Transit 4A에 탑재되어 성

공적으로 발사되었다. SNAP-3은  $^{210}\text{Po}$ 를 열원으로 하고 27쌍의 열전소자로 구성되어 있으며 출력 5.3W로 변환효율은 5.5%이었다. 또한 SNAP-19는 2대의 RTG를 결합한 형태로  $^{238}\text{Pu}$ 를 열원으로 하며 변환효율은 6% 이상이다.

Pioneer나 Voyager의 경우에는 장기간 비행하기 때문에 이에 필요한 전력을 공급하기 위한 MHW(Multi-Hundred Watt)가 개발되었는데 이는 Pioneer나 Voyager가 태양 바깥쪽으로 비행하기 때문에 태양전지에 의해서는 전력을 공급받을 수 없고 장기간 전력을 공급하기 위해서는 핵에너지를 이용하는 열전발전기가 최적이기 때문이다. Voyager에는 3대의 MHW-RTG가 탑재되었는데 열원으로는  $^{238}\text{Pu}$ 를, 열전소자는 Si-Ge 재료를 이용하였으며, 12년 동안 혹성의 정확한 영상과 유용한 정보를 지상에 전송하여 열전발전 시스템이 엄격한 우주환경하에서 높은 신뢰성이 있다는 것을 실증하였다. 1989년에 발사된 목성탐사위성 Galileo 이후의 우주탐사선에 탑재된 시스템은 열원으로 GPHS(General Purpose Heat Source)를 사용하고 있으며 최근 토성을 탐사한 Cassini 탐사선에도 3개의 GPHS가 탑재되었다.

#### 다. 원자력 열전발전기(NTG)

원자력 열전발전은 원자로 내에서 발생하는 반응열을 열원으로 하며 직접식과 간접식이 있다. 직접식은 중성자의 반사관이 있는 Be벽을 통하여 모듈의 고온부를 가열하는 방식으로 1960년 초에 구 소련에서 군사위성으로 개발한 Romashuka가 대표적이다. 소자로는 SiGe계 소결소자가 사용되었고 0.6~1.0kW의 출력이며 Cosmos위성에 탑재한 것으로 알려져 있다. 간접식은 직접방사형과 compact 변환형의 2가지가 있으며 직접방사형은 원자로의 발열을 액체금속 또는 heat pipe에 의해 취하고 모듈 고온부를 가열하는 방식이다. 이 형태는  $^{235}\text{U}$ 를 연료로 하고 냉각재로  $^{78}\text{Na-22K}$  액체금속을 사용하는 SNAP-10A가 1965년에 실험궤도에서 540W의 발전을 하였다. 열전재료는 SiGe/GaP이며 효율은 로외 방식으로 1.6%로 낮다.

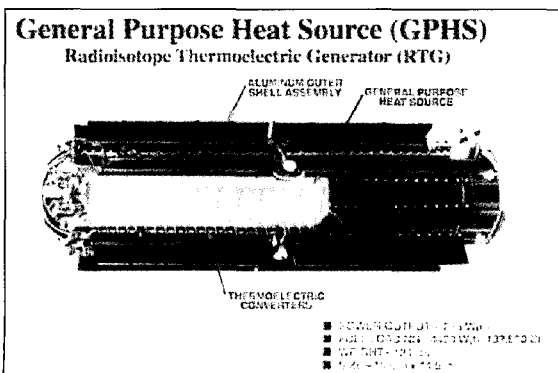


그림 3 Cassini 토성 탐사선에 탑재된 GPHS 열전발전기

라. 폐열식 열전발전기

(Waste Heat Thermo-electric Gnerator)

폐열식 열전발전(WTG)은 산업용 열장치나 발전소, 가정 등에서 배출되는 폐열을 재활용하기 위한 열전발전 시스템으로, 종래 수W~수십W 정도의 시험적 연구 개발 개념에서 탈피하여 점차 수 kW 규모로 그 목표치가 급속히 확장되고 있다.

폐열의 활용 가능성에 대해서는 이미 1972년도에 미국 내무성 소속의 Pacific Northwest Water Laboratory에서 1600MW급의 화력발전소에서 12MW급의 전력을 회수할 수 있으며차제기기의 전력소비를 제외한 순전력은 3.066~8.79MW를 얻을 수 있다는 것을 제시한 바 있으며 자동차의 배기열을 이용한 1kW급의 열전발전기가 미국의 Hi-Z사에서 제작된 바 있다. 최근 러시아의 RIF 사에서는 가스폐열을 이용한 5kW급의 열전발전기를 개발하여 발표하였다.[8]

국내에서는 한국전기연구원에서 100°C이하의 열을 이용하여 1kW급의 발전기를 제작한 것이 열전발전에 대한 최초의 성과라 할 수 있다. 최근에는 포항제철의 산업과학기술연구소에서 폐열을 활용하기 위한 방안의 하나로 열전발전에 대하여 연구를 시작하였다.

마. 해수온도차 열전발전과 Solar pond 열전발전

현재 계획되거나 일부 개발이 진행되고 있는 열전발전 기술 중에 해수온도차 열전발전 방식과 solar pond 열전발전 방식이 있다. 해수온도차 열전발전 방식

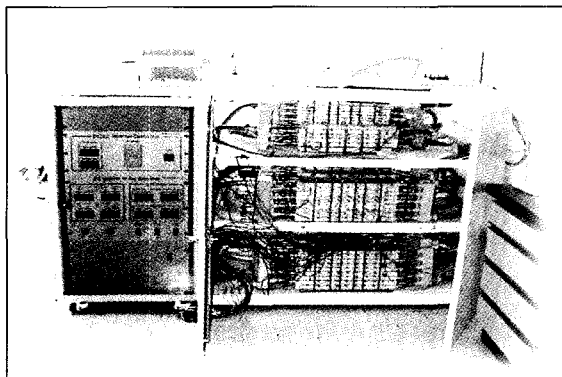


그림 4 전기연구원에서 개발한 1kW급 열전발전기

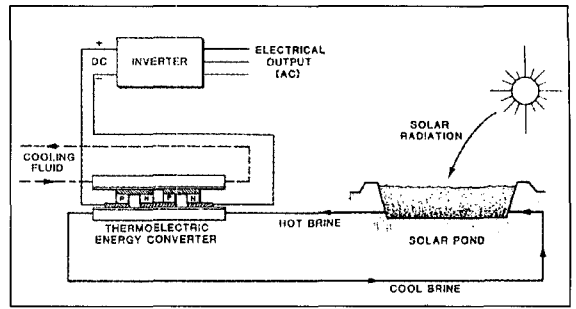


그림 5 Solar pond시스템의 개략도

(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)은 깊이 10~50m에서 온도가 20~30°C인 표층해수와 깊이 500~1000m에서 4~7°C인 심층해수와 온도차를 이용한 발전방식이다. 에너지밀도는 극히 작으나 잠재적으로는  $2.7 \times 10^{12}$ W가 이용가능한 것으로 계산되고 있어 자원양으로는 풍부하다. 미국의 태양에너지연구소(Solar Energy Research Institute)에서는 OTEC 발전으로 400MW급의 발전도 가능하다고 분석하고 있다.

Solar pond는 열용량이 큰 매체로서의 물의 성질을 이용하여 저수지 등에 태양에너지를 수집, 저장하여 이용하는 방법으로 열이용 구조가 비교적 간단하여 지역에 따라서는 오래 전 부터 수영장의 온수공급이나 지역 난방 등에 많이 적용하여 왔는데 최근에는 이를 이용하여 전기를 얻고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 인도의 뉴델리의 기온을 모의하여 계산한 결과 호수로부터 얻어지는 온수의 양이 97°C 전후의 온수는  $2 \times 10^{-4} \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$ , 60.5°C의 온수는  $5 \times 10^{-4} \text{kg/s} \cdot \text{m}^2$  정도에 달하고 효율은 27.5% 및 34% 정도 까지 나타나고 있어 응용 가능성이 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 그림 5에 열전발전을 위한 Solar pond시스템의 개략도를 나타냈다.

맺는말

열전발전 기술은 에너지 분야에서 혁명적인 가능성이 있음에도 불구하고 현재까지의 낮은 변환효율 때문에 에너지 재생기술로서의 주도적 지위에는 이르지 못하고 있는 것이 기술적인 현실이다. 그러나 인공심장

박동기용, 비상 통신전원용, 극한지용, 우주용으로의 열전발전기술은 이미 그 실용성이 입증되어 있으며, 최근 미국, 유럽연합, 일본 등의 대체에너지 개발 정책을 통한 대규모 연구 지원에 힘입어 기술적으로 많은 진보를 이룩하고 있는 점으로 보아 열전발전의 실용화는 그만큼 더 가까워지고 있다.

불과 10여년 전만 해도 열전학자들은 열전발전의 효율이 5%를 넘지 못하고 있는 상황을 보며, 열전발전의 실용화 시점을 20년 후가 될 것으로 예상하였다. 그러나 채 5년이 지나지 않은 현재 열전발전용 신소재의 눈부신 발달로 인해 종래 1에도 미치지 못하였던 열전재료의 성능지수가 2.5 정도인 재료까지도 발표되고 있으며 변환효율 역시 경사화를 통해 13% 정도로 높아진 결과들이 발표되고 있는 등 열전발전의 실용화 시기는 크게 앞당겨지고 있고 이미 일부 분야에서는 설치 단계에 이르고 있다. 이런 추세로 나가면 10년 이내에 열전발전기술은 열전냉각기술과 함께, Si 반도체가 누렸던 20년 정도의 경제적, 기술적 파급효과를 미치리라 예상할 수 있다.

점차 에너지 위기가 고조되고, 환경문제가 대두됨에 따라 어떤 형태의 열원이라도 사용이 가능하면서도 무공해 발전인 열전발전이 각광을 받아야 할 것은 당연하다. 특히 에너지 부존자원이 거의 없어서 대부분의 에너지를 수입하여야 하는 절대 에너지 의존국인 우리나라에서의 열전발전 분야의 연구 필요성에 대해서는 더 이상의 논의가 무의미하다. 따라서 미국이나 일본처럼 대규모 연구자금을 투입하지는 못하더라도, 열전발전 기술을 에너지 절약이나 대체에너지 개발 측면에서 지속적으로 연구 환경을 조성하고 지원하는 노력을 기울여야 할 것이다.

#### [참고문헌]

1. Birkholz, U et. al, "Polycrystalline Iron Disilicide as a Thermoelectric generator Material in CRC handbook of Thermoelectric, ed, by D.M.Rowe, CRC Press, New York, 1995 pp.287-298)
2. M. Mikami, R. Funahashi, High-Temperature Thermoelectric Properties of Single-Crystal  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  Inter' l Conf. on Thermoelectrics proceedings(2003) pp200-202)
3. Hicks와 Dresselhaus (Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S., "Thermoelectricfigure of merit of one dimensional conductor", phys.Rev. B47(1993), pp16631-16634)
4. Harman, T. C., Taylor,P.J., Spears, D.L., and Walsh, M. P., "PbTe based quantum-dot thermoelectric materials with high ZT", Proc. 18th Int. Conf. on Thermoelectrics, Baltimore, MD, IEEE catalog 99TH8407, (1999), pp280-284)
5. Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T., and O' Quinn, B. C., "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit", Nature 413,(2001), pp597-602)
6. Slack, G.A., "New Materials for Thermoelectric cooling", in CRC Handbook of Thermoelectrics, ed. D.M. Rowe, CRC Press, Boca Raton, FL,(1995), pp.407-440)
7. Uher, C., " Skutterudite: Prospective Thermoelectrics", in Semiconductors and Semimetals, Vol 69, Volume ed, T. M. Tritt, Academic press(2001), pp.139-253)
8. RIF Corporation : Cylinder Thermo-generator Elements