

열전모듈을 이용한 열에너지 변환 기술과 응용

우병철, 이회용, 이동윤
한국전기연구소

Energy conversion & application of thermoelectric module

B.C.Woo, H.W.Lee, D.Y.Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서론

인간의 역사상 거의 모든 기술과 공학적, 역사적 사건중 가장 첫 번째로 꼽는 것이 불의 발견이라고 할 수 있고 생식에서 가공식의 시작이고 에너지의 이용기술의 시작이라고 할 수 있다. 열에너지의 이용기술은 증기터빈, 내연기관, 발전소 등의 응용기술로 많은 발전을 거듭하고 있으나 열에너지와 전기에너지간의 변환에서는 여러 측면에서 손실을 가지고 있다.

또한 일정한 온도의 유지측면과 발생하는 열을 이용하는 측면에서는 일정규모에 따라서 이용하는 기술도 다양하며 그 효율도 차이를 나타내고 있다.

Thermoelectric 현상은 양간가의 온도차에 의해서 기전력이 발생하는 현상이며 1821년 독일의 Seebeck이 처음 개념을 도입하였고 러시아의 A.F.Ioffe가 실용화 가능한 열전현상으로 발전시켰다.

이러한 열에너지와 전기에너지간의 변환을 양쪽의 온도차가 발생할 때 소자 내부의 carrierr가 이동함으로써 기전력이 발생하는 현상이다. 열전발전은 이러한 현상을 시스템화한 것으로 자연 에너지 및 산업폐열 등 이용할 수 있는 열원이 다양하며 에너지의 다단계 이용을 통해 에너지의 이용율을 높일 수 있으며 저급 열을 이용하여 전기를 얻을 수 있는 유일한 방법이다.

열전모듈은 국내에서 생산되어 판매되고 있는 제품을 사용하여 열전특성을 분석하고 열전발전으로의 이용 가능성을 타진하였으며 전기적 열적인 특성을 분석하여 그 성능을 알아 보았다.

2. 열전현상과 그 특성

열전변환은 도체 중에 전장과 온도차가 동시에 존재할 때 나타나는 세가지 열전효과인 Seebeck효과, Peltier효과 및 Thomson효과를 기본으로 하며 특히 열전발전은 이들 중 온도차에 의해서 발생하는 효과인 Seebeck효과와 밀접한 관련이 있으며 열전소자의 단위소자(unit cell)를 다음 그림 1에 나타내었다.

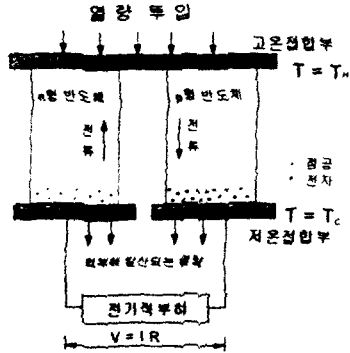


그림 1 열전현상의 도식도

단위소자의 의쪽의 접촉면이 양호하다고 한다면 이회로에 외부 부하를 가하면 내부의 열적인 변화가 일어나며 열원으로부터 소자에 들어간 열은 열전달에 의해 저열원으로 흐른다. 이 과정에서 열전도는 carrier에 의한 것과 격자 진동에 의한 것이 있으며 carrier에 의한 것이 기전력으로 나타나게 되며 이러한 carrier의 작용으로 전류에 의한 기전력으로 소자 내에서 주울열이 발생한다. 전류에 의해 고온부에서는 peltier 흡수가 일어나고 저온부에서는 peltier 발열이 생긴다. 이 효과에 의해 고온부에서 흡수되는 열량과 저온부에서 제거되는 열량이 결정되면 소자에서 온도차 ΔT 가 발생한다. 이러한 Peltier효과를 이용하여 가습기, CPU냉각, 냉장수기, 냉장고등이 실용화에 많이 이용되고 있으며 핵 잠수함의 발전, 해수온도차발전, 태양열이용 발전 등에서는 수MW급의 발전계획도 진행중이다. 그리고 이러한 반도체 이용 열전발전과 달리 AMTEC(alkali metal thermoelectric converter)은 열에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 특성을 갖고 있는 이온전도체인 $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ 고체 전해질 양단에 ΔT 를 주면 가열부 셀 내부에 충전된 Na의 증기압차가 driving force가 되어 Na^+ 이온의 이동이 일어나게 된다. 전해질을 통과한 Na^+ 이온이 전극계면에서 중성화(Neutralization)하면서 응축과정에서 전기를 발생하게 되는데 이때 발생하는 전기를 모듈화 하여 집전을 할 경우 대용량 발전이 가능한 첨단기술이지만 아직 상용화 되지 않은 상태이다.

3. 국내의 연구현황

열전소자를 응용한 시스템 기술이 가장 발달된 분야는 우주, 항공용이며 군용, 생체분야, 전자분야 등에서도 연구가 많이 되고 있으며 미국과 러시아, 일본등 대부분의 기술개발은 선진국에서 이루어지고 있으며 재료 및 시스템 기술의 종합이라고 할 수 있다.

먼저 국내에서는 KIST에서 약 10년간의 재료기술을 축적하고 있으며 거의 방각용 재료에 국한하여 연구되었으며 최근에는 전기연구소를 비롯하여 연세대, 영남대, 충남대, 고려대, 한국전자, 에너지연구소, 서모텍 등에서 많은 연구가 진행

되어 전자분야, 항온 항습분야, 의료분야, 열전발전분야에 많은 기술을 축적하고 있다.

Thermoelectric에 대해 가장 활발한 연구는 미국에서 이루어지고 있으며 DOE, NASA, Hi-Z, SERI, Global, GE, Teledyne, Ohio 및 Utah주립대, 일본에서는 東北大, 東京大, 大阪大, Yamaguchi大 및 電中研, 電總研등에서 열전냉각에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 일부에서는 열전발전분야에도 관심을 가지고 있다.

4. 열전재료

지금까지 알려진 열전재료 중에서 온도구간에 따라 성능지수가 우수한 p, n형 열전재료가 다르며 약 200℃이하에서는 Bi-Te-α계가 우수하며 약 500℃까지는 Pb-Te-α계가 유효하고 그 이상의 온도에서는 Si-Ge-α계가 가장 우수한 특성을 나타낸다고 알려져 있으며 그림2와 3에 그 특성을 나타내었다.

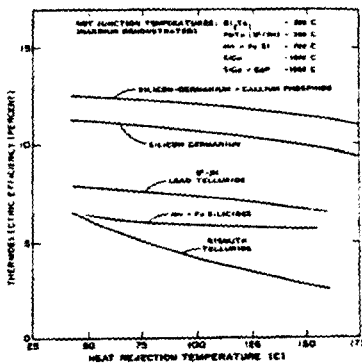


그림 2 저온에서의 열전재료 특성

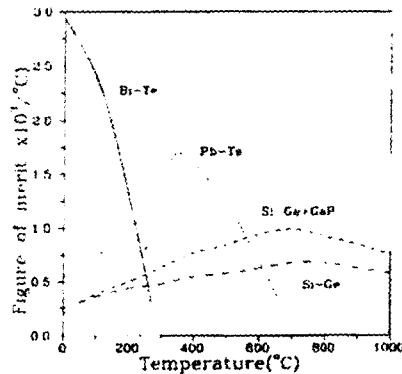


그림 3 고온에서의 열전재료 특성

여기서 Figure of merit은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \kappa}$$

여기서 Z : Figure of merit α : Seebeck factor ($\alpha = V_s / \Delta T$, 기전력/온도차)
 ρ : Resistivity κ : Thermal conductivity

이러한 열전효율계수는 주어진 온도대에 따라 변하며 사용되는 주위 연결부의 열전달특성에 영향을 받는다. 일반적으로 알려진 접합부의 평활도, Roughness, 압착력등에 의해서 계수값이 크게 변하며 주어진 온도대에서 가장 우수한 특성을 나타내는 재료를 선택하여야 한다.

5. 열전발전

열전발전은 기본적으로 온도차를 이용하여 전기를 얻을 수 있는 발전시스템이기 때문에 경제성을 고려하지 않는다면 지구상에 존재하는 어떤 종류의 열도

열원으로 이용할 수 있다. 즉 태양열, 지열 등의 자연 에너지와 화석연료를 이용한 가열 에너지 및 도시배열, 산업 폐열 등의 폐열 에너지 등이 모두 열전발전의 주 에너지원으로 사용할 수 있으며 -160℃에서 수백도까지의 전 온도범위에서 발전할수 있는 장점이 있다.

열전발전은 지열, 태양열, 해수온도차, 연료전지, 배열가스, 승용차, 원자로, 가스, 전력계통 등의 열원을 이용하여 Ocean thermal energy conversion(OTEC), Solar pond, Fueled thermoelectric generator(FTG), Radioisotope thermoelectric generator(RTG), Nuclear thermoelectric generator(NTG)등의 연구가 진행중이며 표 1에 요약하였다.

표 1 TEG 국의 연구현황

국가	주요 연구 내용
미국	NASA:Pioneer, Apollo, Voyager I, II호에 수백 W급 RTG사용 Teledyne Energy Systems:군용 0.1kW급 FTG개발(1985년) Global Thermoelectric:군용 0.1kW급 FTG 열전발전기(1986) General Electric:SP-100우주용 100kW급 NTG 제작(1988) Manportable TE generator 개발(1973) : 120W급 열전해양열에너지 변환 장치 개발(1979)
일본	1955년경 부터 열전반도체재료 실험연구 착수 통산성 주관 하의 New Sunshine계획에서 연구 중 : TEC/AMTEC 병행 연구
러시아	주로 군사용 열전발전기 개발 - radar용 전원공급장치 - 휴대용 통신장비의 전원공급시스템(2.5W~160W) - 송유관, 가스공급관 음극부식 방지용 전원공급 시스템 - 핵잠수함의 전원공급 시스템(2MW급) lamp이용 radio 전원용 열전발전기(1.6~3W급) 대량생산 태양열 열전발전기 개발(1967)
독일	박막형 열전발전기 개발(1962) 열전전류발생기 개발(1967)
폴란드	열전발전기 mechanism연구(1966)
프랑스	RTG 개발(1969) 연소식 열전발전용 재료, 연소실, 열교환기 등 개발(1973년)
루마니아	반도체식 열전발전기 개발(1974)
인도	태양열 열전발전기 개발(1976)-집전판 표면 coating, 집중기기
캐나다	액체연료형 열전발전기 개발(1986) 24~32Vdc, 120W

Ocean thermal energy conversion(OTEC)는 표층해수(깊이 10-50m에서 20-30℃)와 심층해수(깊이 500- 1000m에서 4-7℃)와의 온도차를 이용한 발전방식으로서 전체의 온도차가 20℃전후로 에너지 밀도는 극히 낮으나 잠정적으로는 $2.7 \times 10^{12} \text{W}$ 가 이용 가능한 것으로 계산되고 있어 자원 그 자체의 량으로는 풍부하다고 할 수 있다. 미국의 Solar energy research institute)에서는 OTEC 발전으로 400MW급의 발전도 가능하다고 분석하고 있다.

OTEC의 방식으로는 암모니아 순환식이 개발되어 있으나 동작부가 없다는 장점 등에 의해 열전재료에 의한 OTEC가 검토되고 있다.

물은 열용량이 큰 매체로서, 이 성질을 이용하여 저수지 등에 태양에너지를 수집, 저장하여 이용하는 방법을 solar pond라 한다. solar pond에서의 열이용은 구조가 비교적 간단하여 지역에 따라서는 오래전 부터 수영장의 온수공급이나 지역 난방 등에 많이 적용하여 왔는데 최근에는 이를 이용하여 전기를 얻고자 하는 시도가 이루어지고 있으며 인공적으로 호수를 만들기도 한다. 인도의 뉴델리의 기온을 모의하여 계산한 결과로는 호수로 부터 얻어지는 온수의 양은 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. SERI의 분석에 의하면 Solar Pond에 의한 발전단가는 30년간 15.6%의 효율로 사용한다고 계산하여 0.1\$/kW 정도가 되어 경제성이 매우 높은 것으로 평가되고 있다.

6. 열전발전기의 열특성

열전재료인 P, N형 반도체를 수 백개를 직렬로 조합하여 열전모듈을 제작하는데 일반적으로 전도되는 열량과 열전모듈에 전달되는 온도와의 특성을 조사하기 위해서 열전모듈의 열특성을 조사하였다. 본 특성조사에 사용된 모듈의 국내의 T사에서 제조된 모듈로서 그 치수와 동일하게 설정하여 열특성을 조사하였으며 그 특성은 그림과 같다.

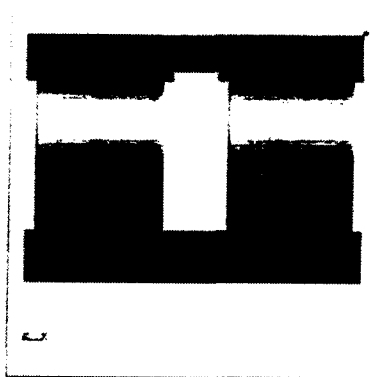


그림 4 열전모듈의 온도분포

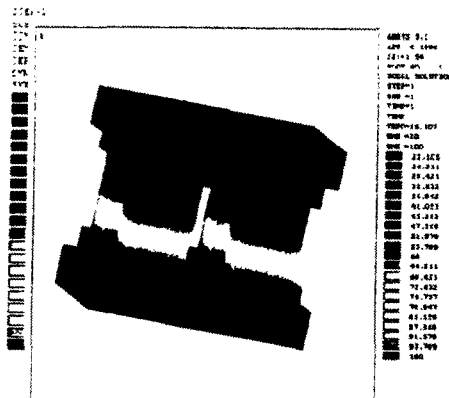


그림 5 열전모듈의 3차원 온도분포

여기서 사용된 재료의 특성은 국내에서 생산되는 제품의 특성치를 사용하였으며 1개의 열전재료에서 양단에 20°C, 100°C인 상태에서 자연상태의 정상상태에서 온도분포도와 온도변화율을 나타내었다. 본 그림에서 알 수 있듯이 열전재료에 해당되는 영역에서 거의 대부분의 온도변화가 일어나고 있으며 그에 따라 기전력으로 발생된다.

7. 열전모듈의 발전특성

상온시 내부저항이 약 2Ω인 열전모듈 하나의 전기적 특성을 조사하기 위해서 소형 수조시스템을 제작하여 한쪽은 저온수를 순환시키고 한쪽은 가열하여

온도를 변화시키면서 그때의 기전력을 측정하였다.

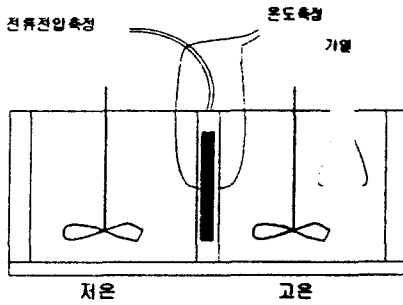


그림 6 열전달 특성의 측정장치

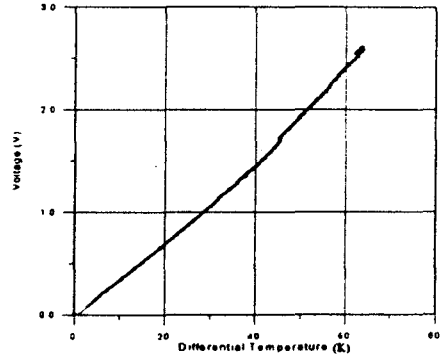


그림 7 열전소자의 기전력 변화

이러한 특성에서 가장 열전단이 어려운 알루미늄층의 두께를 절반으로 줄이고 전극층의 두께도 마찬가지로 절반으로 줄인 경우의 열전달 특성을 그림 12에 나타내었는데 두께를 줄임에 따라 양단의 온도차가 더 발생하고 있음을 알 수 있다. 다음 그림은 열전모듈의 부하특성으로서 저온단과 고온단의 온도가 15℃, 95℃인 경우의 결과이다.

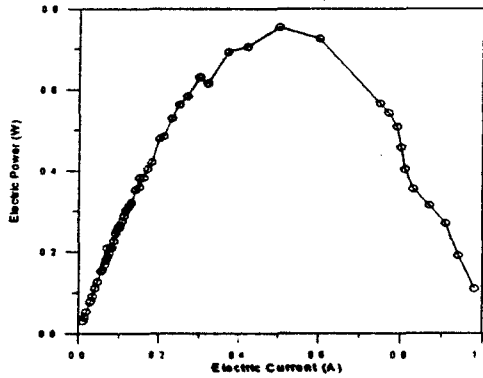


그림 8 열전모듈의 전류-전력과의 관계

8. 결론

국내외에서 생산된 열전모듈은 각기 사용되는 영역에 따라 다양한 형상의 제품이 이용되고 있으나 본 연구에서는 국내 T사(ThermoTEK)에서 제작된 열전모듈을 사용하여 내부저항 2.23Ω, Figure of merit 2.45에서 상온과 100℃사이에서 전기적 성능지수는 0.04W/℃이었다.