

열전발전 (Thermo electric)

한국전기연구소
 도전재료연구팀
 선임연구원 우병철

1. 서론

전기는 일반적으로 발전기를 통해서 발전을 하며 특성상 필수적으로 회전축이 필요하며 회전에 의해 소음과 에너지의 소비가 발생한다. 이러한 발전은 대부분 물의 상태변화 및 온도에 따른 팽창에너지를 이용하며 이론상 열에너지로 발생된 량을 운동에너지로 변화시켜 전기에너지로 변환된다. 열전발전은 이러한 회전도 없이 양단간의 온도차를 이용하여 기전력을 발생시킬 수 있어 에너지 관련 산업에서 발생하는 배열이나 폐열을 이용하여 발전이 가능하다. 또한 이동식 발전기로서도 충분히 가능성이 있어 개스 버너를 이용하거나 화석연료로 가열하여 발전할 수도 있다. 또한 일정한 온도가 아니더라도 기전력이 발생하며 소형이고 수명이 길며 한번 설치하면 수십 년간 아무런 조치 없이도 계속 발전할 수 있다. 이러한 열전발전은 현재 군용, 우주용, 극한지에서 많이 이용되고 있으며 우주탐사에서는 solar cell과 함께 우주선의 발전을 돕고 있다.

2. 본론

열전에 대한 기본적인 이론, 국내외 연구현황 및 응용에 대해 알아보고 실제 열전 발전기를 제조하여 그 특성을 분석한 내용을 본절에서 소개하며 소형발전의 가능성을 조사하였다.

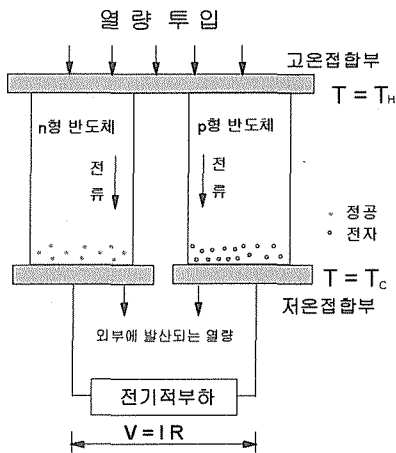
2.1 열전현상

열전현상(Thermoelectric effect)은 열과 전기 사이의 에너지 변환을 의미하며 변환소자의 양단에 온도차이가 있을 때 소자 내부의 carrier가 이동함으로 기전력이 발생하는 현상이다.

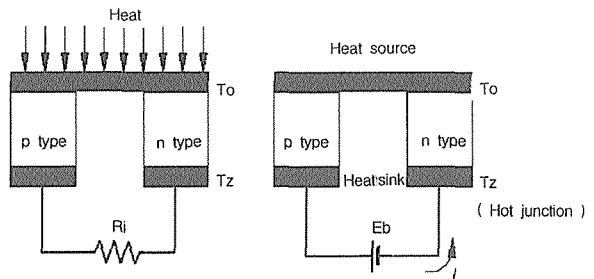
열전현상은 1900년도 초부터 연구가 시작되어 구 소련의 Ioffe가 약 4%의 변환효율을 얻을 수 있게 연구가 진행되어 현재 약 10% 이상의 변환효율을 가지고 있다. 이러한 열전은 양단간의 온도차를 이용하여 기전력을 얻어내는 Seebeck 효과, 기전력으로 냉각과 가열을 하는 Peltier 효과, 도체의 전상의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 Tomson 효과로 나눌 수 있으며 재료분야가 핵심

기술이나 제품화 과정의 시스템 기술이 더욱 부각되고 있다. 이러한 Peltier 효과를 이용하여 가습기, CPU 냉각, 냉정수기, 냉장고 등이 실용화에 많이 이용되고 있으며 핵잠수함의 발전, 해수 온도차 발전, 태양열 이용 발전 등에서는 수 MW급의 발전계획도 진행중이다. 그리고 이러한 반도체 이용 열전발전과 달리 AMTEC(alkali metal thermoelectric converter)은 열에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 특성을 갖고 있는 이온전

도체인 $\beta''-Al_2O_3$ 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 모듈화하여 집전을 할 경우 대용량 발전이 가능한 첨단 기술이지만 아직 상용화 되지 않은 상태이다.



(그림 1) Thermoelectric의 원리



(그림 2) 열전발전과 열전냉각

2.2 국내외 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 재료 기술을 축적하고 있으며 거의 냉각용 재료에 국한

하여 연구되었으며 최근에는 전기연구소를 비롯하여 연세대, 영남대, 충남대, 고려대, 한국전자, 에너지연구소, 서모텍 등에서 많은 연구가 진행되어 전자분야, 항공 항공분야, 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 열전냉

각에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 일부에서는 열전발전 분야에도 관심을 가지고 있다.

〈표 1〉 국내외 열전관련 연구현황

연구기관	주요 연구내용
한국전기연구소	<ul style="list-style-type: none"> 반도체의 module 제작과 관련된 연구 수행 열전소자의 제조에 응용할 수 있는 전기기술, 금속/세라믹 접합기술 보유 전력전자 및 시스템 분야의 전문 연구소
KIST	<ul style="list-style-type: none"> 전자냉각용 소자인 Bi-Te계의 재료 연구 - 선진국보다 우수한 성능 발표
연세대학교	<ul style="list-style-type: none"> Bi-Te계 합금 박막의 열전특성 변화 연구 (확산장벽의 영향, 두께특성, 첨가물의 영향, 열처리 특성, 양단 접점의 재질 변화에 따른 특성 등)
영남대학교	<ul style="list-style-type: none"> 열전모듈에서의 열의 이동량 측정, 최적운전조건 연구
충남대학교	<ul style="list-style-type: none"> Bi-Sb-Se-Te계 합금의 결정성장 속도가 열전특성에 미치는 영향에 대한 연구
고려대학교	<ul style="list-style-type: none"> 열전냉각을 응용한 레이저 다이오드 제작
Thermo tech.	<ul style="list-style-type: none"> 열전냉각 재료의 기업화 시도 및 제작
한국전자	<ul style="list-style-type: none"> 열전분야 재료 제조, module 제작, 냉각응용 등에 대해 사전조사 실시

2.3 열전재료

지금까지 알려진 열전재료 중에서 온도구간에 따라 성능지수가 우수한 p, n형 열전재료가 다르며 약 200℃ 이하에서는 Bi-Te- α 계가 가장 우수하며 약 500℃까지는 Pb-Te- α 계가 유효하고 그 이상의 온도에서는 Si-Ge- α 계가 가장 우수한 특성을 나타냈다고 알려져 있으며 다음 (그림 3, 4)에서 그 특성을 나타내었다.

여기서 Figure of merit은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z = \alpha^2 / \rho \mu$$

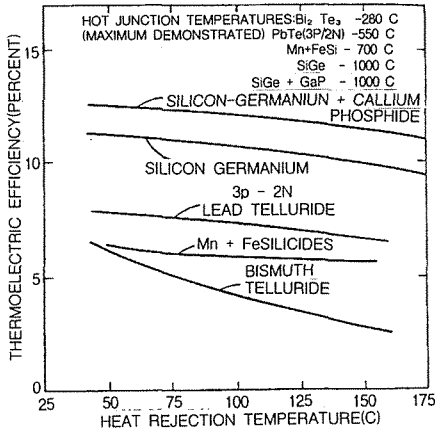
여기서 Z : Figure of merit

α : Seebeck factor ($\alpha = V_s / \Delta T$, 기전력 / 온도차)

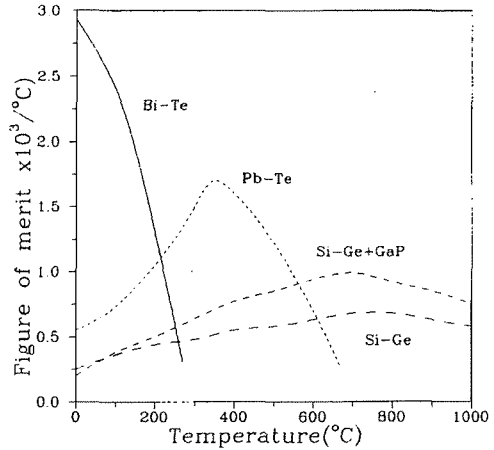
ρ : Resistivity

μ : Thermal conductivity

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



(그림 3) 저온에서의 열전재료 특성



(그림 4) 고온에서의 열전재료 특성

2.4 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°C 에서 수백도까지의 전 온도범위에서 발전할 수 있는 장점이 있다.

다음은 열전발전 소자의 발전원리를 나타내고 있으며 P-N 반도체간의 온도차에 의한 발전임을 알 수 있다.

열전발전에 대해서는 지열, 태양열, 해수온도차, 연료전지, 배열가스, 승용차, 원자로, 가스, 전력 계통 등의 열원을 이용하여 Ocean thermal energy conversion(OTEC), Solar pond, Fueled thermoelectric generator(FTG), Radioisotope ther-

moelectric generator(RTG), Nuclear thermoelectric generator(NTG)등의 연구가 진행중이며 다음 <표 2>에 요약하였다.

2.4.1 해양온도차 열전발전

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

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

〈표 2〉

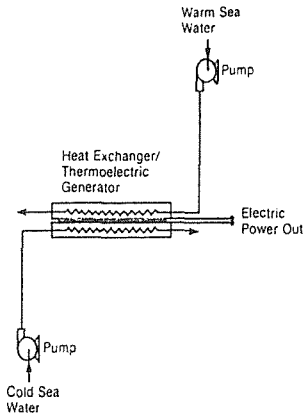
TEG 국외 연구현황

국 가	내 용	주 요 연 구 내 용
미 국		NASA : Pioneer, Apolo, Voyager I, II 호에 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 열전 해양 열에너지 변환 장치 개발(1979)
일 본		1955년경 부터 열전 반도체재료 실험연구 착수 통산성 주관하의 New Sunshine 계획에서 연구 중 : TEC/AMTEC 병행 연구
러 시 아		주로 군사용 열전발전기 개발 - radar용 전원공급장치 - 휴대용 통신장비의 전원공급시스템(2.5W~160W) - 송유관, 가스공급관 음극부식 방지용 전원공급 시스템 - 핵잠수함의 전원공급 시스템(2MW급) lamp 이용 radio 전원용 열전발전기(1.6~3W급) 대량생산(50년대 초) 태양열 열전발전기 개발(1967)
독 일		박막형 열전발전기 개발(1962) 열전전류발생기 개발(1967)
폴 란 드		열전발전기 mechanism연구(1966)
프 랑 스		RTG 개발(1969) 연소식 열전발전용 재료, 연소실, 열교환기 등 개발(1973)
루마니아		반도체식 열전발전기 개발(1974)
인 도		태양열 열전발전기 개발(1976) - 집전판 표면 coating, 집중기기
카 나 다		액체연료형 열전발전기 개발(1986) 24~32Vdc, 120W

열전발전 시스템의 고신뢰성, 무보수성, 안전성이 높은 장점과 열전모듈을 단순하게 구성하여 경제적으로 내환경적 안정성이 높다는 장점으로 많이 이용할 것으로 예상되고 시스템의 구성은 (그림 5)와 같다.

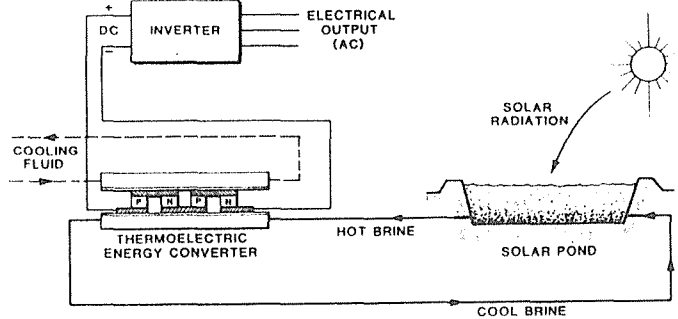
2.4.2 Solar pond 열전발전

물은 열용량이 큰 매체로서, 이 성질을 이용하여 저수지 등에 태양에너지를 수집, 저장하여 이용하는 방법을 solar pond라 한다. solar pond에서의 열이용은 구조가 비교적 간단하여 지역에 따



B. Schematic Thermoelectric OTEC

(그림 5) OTEC 열전발전의 도식도



(그림 6) Solar pond 열전발전의 도식도

라서는 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 모의하여 계산한 결과로는 호수로부터 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%

정도까지 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.

그리고 이러한 solar pond project를 수행하거나 계획중인 내용은 <표 3>과 같다.

<표 3> Solar Pond 열전발전 project(예)

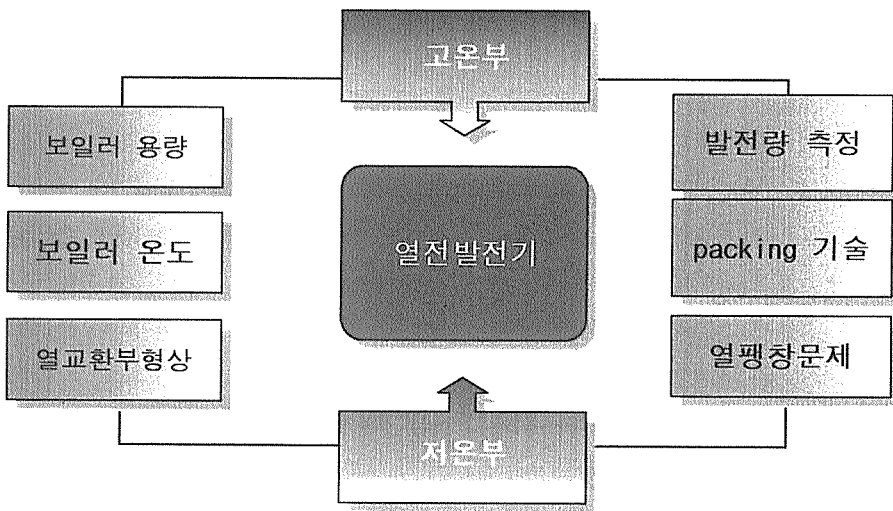
수행주체 또는 project명	수행기관	수행년도	전 력	위 치 및 용 도
Ohio주	Ohio 주립대학	1979		Ohio주 Columbus 열이론 모델 확인 실험용
Salton Sea Solar Pond project	J.P.L	1982~1987	5MW	California Salten Sea 50~60MW급 계획중
California주 Project	캘리포니아 주		300kW	San Diego
Utah			10GW	Great Salt Lake
Israel Ein-Bokek	Inst. of Desert Research	1981	150kW	Dead Sea
Israel			6kW	Sdom

2.5 열전발전 시스템 구성

일반적으로 많이 사용되고 있는 열전발전 시스템은 관에 부착되는 형, 직접 열교환형, 프리즘형 열전발전 시스템으로 분류할 수 있으며 2t 두께의 Cu판을 $200 \times 600 \times 50(\text{mm}^3)$ 의 사각 튜브형 열교환기를 제작하여 고온과 저온의 물을 순화시키

면서 열전발전 특성을 조사하였다.

또한 각 모듈의 특성은 $30 \times 15 \times 15(\text{mm}^3)$ 의 원통형 에폭시 관의 중앙에 열전모듈을 넣고서 밀봉하여 양단에 고온과 저온수를 순화시키면서 열전특성을 조사하였으며 시스템의 구성은 (그림 7)과 같으며 열전발전 시스템의 형상은 같은 형상으로 제작하였다.



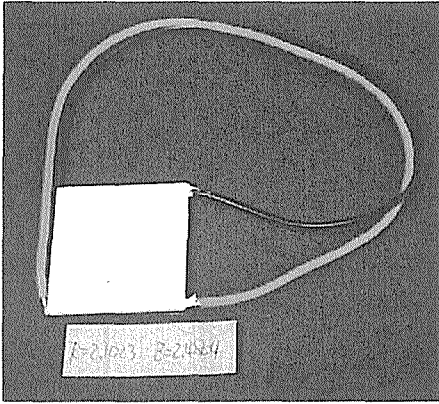
(그림 7) 열전발전 시스템의 구성

2.6 열전모듈의 열해석

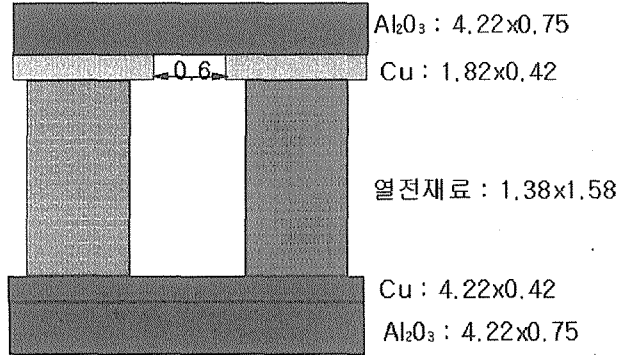
열전재료인 P, N형 반도체를 수 백개를 직렬로 조합하여 열전모듈을 제작하는데 일반적으로 전도되는 열량과 열전모듈에 전달되는 온도와의 특성을 조사하기 위해서 열전모듈의 열특성을 조사하였다. 본 특성조사에 사용된 모듈의 국내의 T사에서 제조된 모듈로서 그 치수와 동일하게 설정하여 열특성을 조사하였으며 그 형상 특성은 (그림 8)과 같다.

(표 4) 열해석에 사용한 열전모듈의 열전도 특성

재료 종류	Thermal Conductivity [W/mm ² °C]
Al ₂ O ₃	0.026
Al	0.235
Cu	0.401
P형 cell	0.00156
N형 cell	0.00152



(그림 8) 국산 열전모듈의 형상

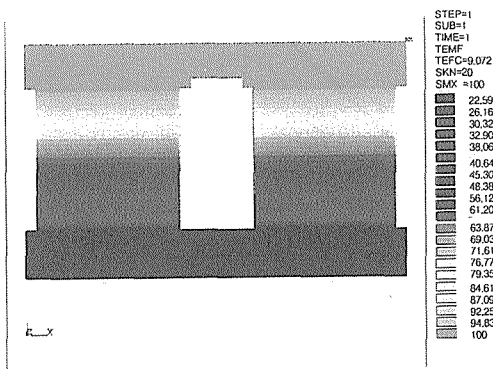


(그림 9) 해석용 열전모듈의 형상

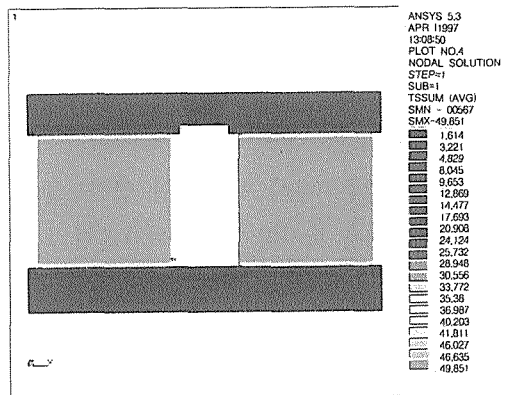
(그림 9)에서와 같이 열전모듈은 P형과 N형 반도체와 전극, 절연 및 형상유지를 위한 알루미늄 층으로 구성되어 있으며 이러한 재료들의 전도 열전달 계수는 <표 4>와 같으며 이러한 특성치를 이용하여 평형 열전달 특성을 ANSYS를 이용하여 조사하였으며 다음 (그림 10)과 같다.

그리고 (그림 10)에서 설정한 조건은 실제 국내의 T사에서 제조되는 제품의 치수를 사용하여

는데 이것은 열전모듈의 형상을 유지하고 제조 및 설치시 안전도를 고려한 치수이다. 또한 온도변화를 알아보면 알루미늄 층에서는 거의 온도변화가 없으며 전극부에서 부터 온도변화가 발생하여 P, N형 열전소자부에서 거의 대부분의 온도가 변화됨을 알 수 있었으며 그 결과는 다음 (그림 11)과 같다.



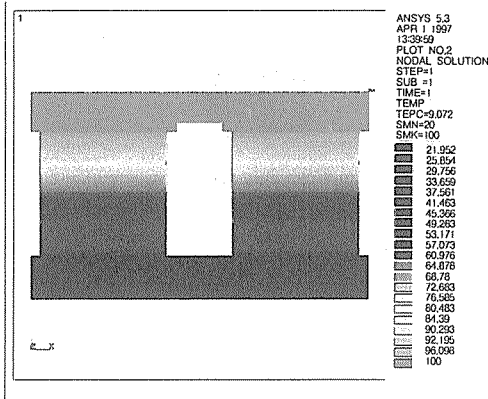
(그림 10) 전도 열전달 특성(고온 100℃, 저온 20℃)



(그림 11) 전도 열전달 특성

이러한 특성에서 가장 열전단이 어려운 알루미늄 나층의 두께를 절반으로 줄이고 전극층의 두께도

마찬가지로 절반으로 줄인 경우의 열전단 특성을 (그림 12)에 나타내었는데 두께를 줄임에 따라 양단의 온도차가 더 발생하고 있음을 알 수 있다.



(그림 12) 전도 열전달 특성

(절연부 줄인 경우, 고온 100℃, 저온 20℃)

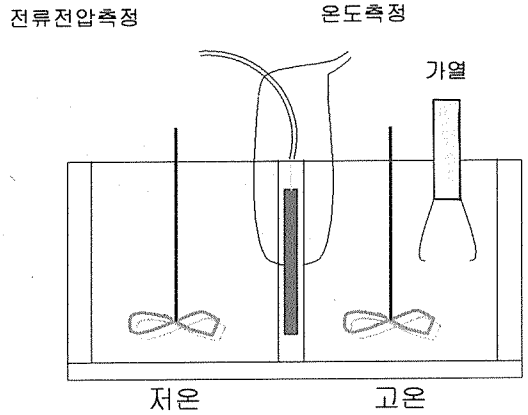
이러한 열특성에서 얻어진 결과를 토대로 실제 양단간의 온도변화에 따른 열전성능을 조사하여 온도차에 따른 모듈의 특성을 얻는데 이용할 수 있으며 온도차에 따른 특성치를 얻을 수 있다.

2.7 열전발전 특성

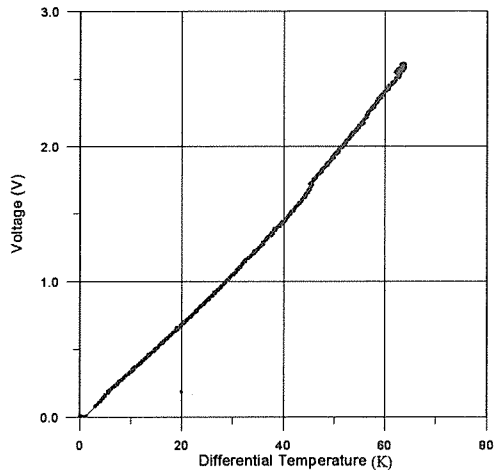
2.7.1 열전모듈의 무부하 특성

상온시 내부저항이 약 2Ω인 열전모듈 하나의 전기적 특성을 조사하기 위해서 (그림 13)과 같은 소형 수조시스템을 제작하여 한쪽은 저온수를 순환시키고 한쪽은 가열하여 온도를 변화시키면서 그때의 기전력을 측정하였다.

(그림 14)는 양단간의 온도차에 따른 모듈 하나의 기전력 특성을 조사하였으며 이때의 저온단의 온도는 23℃이었으며 저항은 2.23Ω, Figure of merit은 2.45이었다.



(그림 13) 열전모듈의 특성 측정 장치

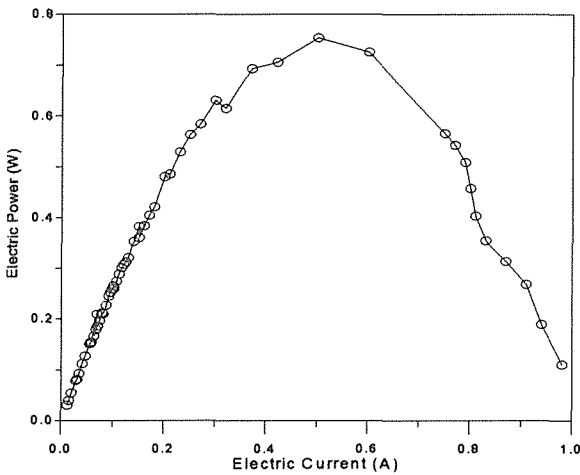


(그림 14) 열전모듈의 온도차에 따른 기전력

(그림 14)에서 알 수 있듯이 양단의 온도차와 기전력과의 관계는 거의 직선적인 관계임을 알 수 있고 그 기울기는 약 0.04V/℃의 특성을 가지고 있었다.

2.7.2 열전모듈의 부하 특성

앞절에서는 아무런 저항을 가하지 않은 상태에서의 기전력의 발생특성을 조사하였고 본절에서는 저항의 변화에 따른 전류와 전력의 변화를 조사하였다. (그림 15)는 앞절과 동일한 열전모듈을 사용하여 고온부를 90℃, 저온부를 15℃로 유지한 후 열전발전 특성을 조사하였다.



(그림 15) 열전모듈의 전류-전력과의 관계

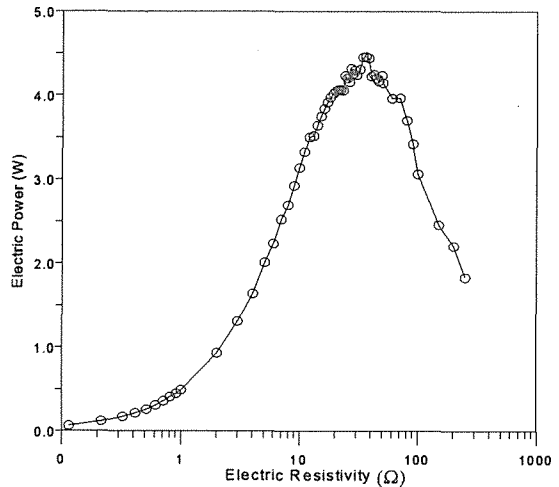
2.7.3 열전발전 시스템의 부하 특성

(그림 16)은 보일러를 이용하여 제작한 열전발전시스템에서 열전모듈을 10개를 직렬로 조합하여 열전발전 특성을 측정한 결과로서 약 30~35 Ω의 저항에서 최대전력을 얻을 수 있었다.

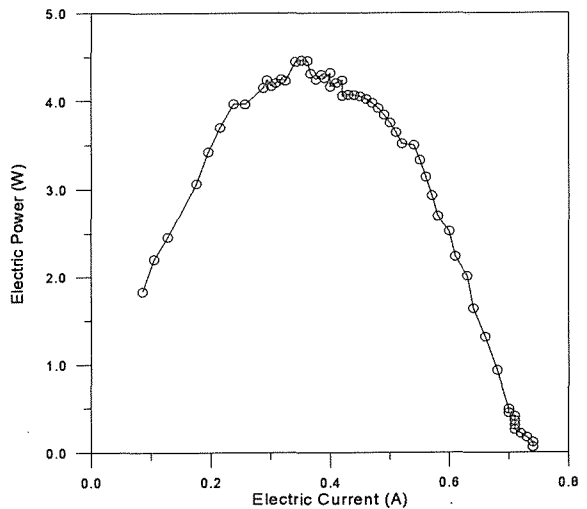
이때의 열전성능지수와 고온과 저온특성은 95, 15℃로서 앞의 결과와 동일하며 직렬로 연결함에 따라 부하의 크기는 약 10배의 저항에서 최대값을 얻을 수 있었다.

이때 열전발전기의 저항의 변화에 따른 부하특성을 조사하였는데 최대전력은 약 4.5W 정도이지

만 고전류의 특성에 적합한 저항을 사용하여 측정하여야 하는데 전류의 한계치에 가까워 약간의 오차를 가지고 있을 것으로 예상하였으며 실제 계산적으로는 약 0.5~0.6A 부근에서 최대값이 나올 것으로 예상되었으며 그때의 값은 6W 정도의 값이 예상되었으며 실험치는 (그림 17)과 같다.



(그림 16) 열전발전기의 저항-전력과의 관계



(그림 17) 열전발전기의 저항-전력과의 관계

3. 결론

열전과 이와 관련된 연구현황과 이용방향에 관한 연구가 여러 분야에서 수행되고 있으며 미래형 에너지원이라는 장점으로 인해서 더욱 많은 연구가 수행되고 있다.

선진 외국에서 연구되고 있는 많은 결과를 바탕으로 국내에서 제작된 열전모듈을 사용하여 열전발전시스템을 구성해 보았고 내부저항 크기의 2~

3배의 저항에서 최대의 기전력을 발생하고 적절한 용량의 열전발전기를 제작할 수 있으며 열전냉각 또한 이것과 같은 결과를 얻을 수 있음을 알았다.

국내 T사(Thermo TEK)에서 제작된 열전모듈을 사용한 경우 내부저항 2.23Ω , Figure of merit 2.45에서 상온에서 100°C 사이에서 전기적 성능지수는 $0.04\text{W}/^{\circ}\text{C}$ 이었다.

