

# 열전발전기술 개발 현황



박수동  
한국전기연구원 창의연구센터장

## 1. 개황

전기와 열이 일련의 반도체 결합만으로 직접 변환되어 직류전원을 생산할 수 있는 현상이 있다. 그것을 우리는

‘열전(Thermoelectric)변환기술’이라 부른다. 최근 이 열전(Thermoelectric)변환기술에 대한 사회적 관심이 매우 크다. 우리 사회에 벌어지고 있는 지구환경보호의 노력뿐만 아니라 고비용의 전기에너지 의존성이 커지며

지속적이고 친환경적인 전기 생산에 대한 관심과 소모되는 열에너지의 재사용 필요성이 더욱더 이 기술의 가치를 크게 하는 사회적 요청이 되고 있다.

지구환경보호라는 에너지와 환경 기술 분야에서의 지속적 개발 이슈로 인한 다양한 기술적 시도는 기존과는 다른 새로운 패러다임의 전기 생산 기술에 대한 관심을 증가시키는 원인이기도 하다. 요즘과 같은 새로운 전기 생산의 갈망이 현재와 미래의 희망으로 국한 할 수 있는 것일까?

사실 지금과 같은 발견과 그 발견에 대한 미래의 희망들은 역사적으로 끊임없이 지속되고 있는 호모사피엔스의 또 다른 장점들이 아닐까? 이 기술을 소개하기 전 간단히 그 시대적 소명을 되짚어 본다.

## 2. 현황

사실 현재까지도 우리가 사용하는 전기 생산 기술은 1800년대 초반에 발견된 페러데이(M. Farady)가 전자기 유도법칙을 발견한 이후, 열을 통해 운동에너지를 생산하고 이것을 이용하여 전자기유도를 발생시켜 전기를 생산하는 통상적인 방법에 주로 의존하고 있다.

실제 1799년대 볼타(Volta)에 의해 전지기술이 발견되고 이것에 의해 정전기로 국한되었던 전기응용의 한계가 극복되자 전기현상에 대한 다양한 현상들이 연구, 발견되게 되는데 열전현상은 당시 뜨거웠던 연구자들의 경쟁적 발견과 노력들에 의한 하나의 현상이었다. 그들은 단지 볼타전지, 나침반 그리고 간단한 금속과 플라스크를 포함한 기본적인 화학실험 도구를 통해 지금의 세상을 이루는 전기기술을 완성하였던 것이다.

현재 열전현상은 저항열 등과 같이 열과 전기의 직접

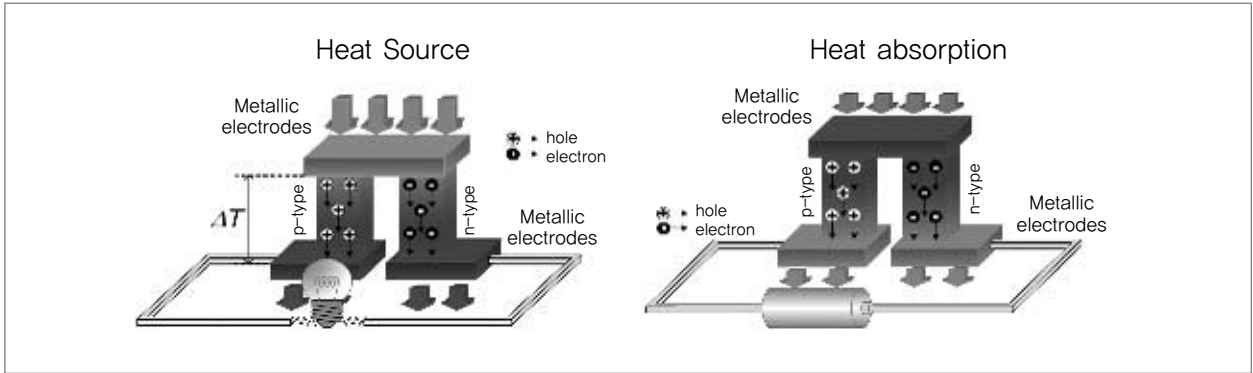
변환을 의미하는 광의의 의미보다는 반도체형 열전현상을 의미하는 일반화된 협의적 의미를 주로 나타낸다.

이 같은 열전현상의 최초 발견에 대해서는 현재 다소의 의문이 따른다. 즉 일반적으로는 독일의 치과의사이자 과학자였던 Seebeck이 이종 금속의 접합점을 각기 다른 온도에 배치하고 이 상태에서 나침반의 자침이 회전하는 현상을 발견한 것이라 알려졌고, 이 같은 이유로 이종 금속 접합부 양단의 온도 차이에 의한 전하의 이동현상을 '제베크효과'라 부르고 있다. 하지만 최근 이탈리아 과학자들은 열에 의한 분극현상으로 그 발견을 해석했던 제베크의 발견에 앞서 그 근본적 원리에 보다 실체적으로 접근한 이는 앞서 전지 발견의 공적을 언급한 이탈리아 과학자 볼타이며, 볼타는 이종 금속과 온도 차이에 의한 전기현상의 변화를 1794년에 이미 발견했다고 보고하고 있다. 이 같은 사실들은 잘 알려진 과학적 사실이라 앞으로 우리는 지금의 제베크효과를 '볼타효과'로 바꿔 불려야 할지도 모를 일이다.

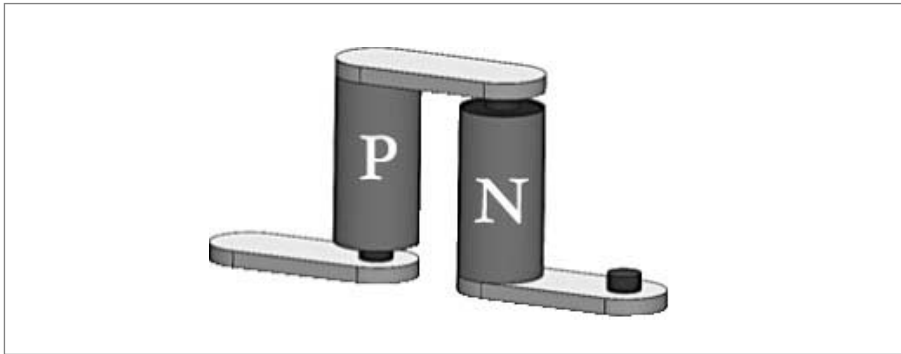
전술한 바와 같이 열전변환에 의한 발전은 상대적으로 낮다고 평가되는 에너지 변환효율에도 불구하고 전통적 열기관과 달리 기계적으로 복잡한 기구의 필요없이 직류 전원을 생산할 수 있어 화석연료 연소에 의한 CO<sub>2</sub> 발생이 없고 발전구조가 매우 간단해 기존 전기 생산기술과의 결합을 통해 재생효율을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 기존 기술로는 전기에너지로의 재생이 매우 어려운 저온의 저급 열까지도 전기 생산에 이용될 수 있는 매우 효과적인 발전기술로 점차 부각되고 있다.

또한 기본적으로 소음, 진동 등이 없으며 같은 기존 발전방식에서의 문제점도 없다.

기타 방식으로는 재활용이 불가능한 100℃ 이하의 저급 열을 이용한 발전도 가능하며 궁극적으로는 어떠한



[그림 1] (좌)Seebeck효과를 이용한 반도체형 열전발전의 원리  
(우) Peltier효과를 이용한 전자냉각의 원리



[그림 2] 열전발전쌍의 전기적구성도

온도환경이라도 온도 차이만 있다면 전기에너지를 생산할 수 있는 발전 방법이다.

열전변환의 원리를 이용한 전기 생산의 원리는 그림 1로 간단히 설명할 수 있다. 전극에 의해 열과 전기적으로 결합된 반도체에 재생하고자 하는 열원에 의해 열량이 유입되고 이것에 의해 반대편 전극과의 온도 차이가 발생하게 되면 각 반도체에서는 유입된 열에 의해 반도체 내부에서는 전자(n형 반도체)와 정공(p형 반도체)의 이동이 일어나고 이것에 의해 전압 즉, 열기전력(Thermo electromotive force)이 발생하게 된다. 이때 반도체 종류에 따라 온도구배에 대응하는 극성은 반대가 되고 이 상태가 전극으로 서로 연결되면 서로의 전위차를 상쇄

하기 위한 전하의 흐름, 즉 전류가 생기게 된다. 이 현상을 이용하는 것을 열전발전 이라 한다.

그러나 단위 반도체쌍으로부터 발생한 전력은 그 양이 매우 적기 때문에 다수의 반도체쌍들을 전극에 의해서 서로 직렬로 연결함으로써 발생 전력을 증가시키고 이렇게 구성되어진 단위소자를 열전발전용 소자라고 한다(이 원리를 반대로 이용한 것이 펠티어 냉각 또는 전자냉각으로 불리는 열전냉각 기술의 원리다).

이 같은 발전의 원리는 그 규모를 대형화한 경우에도 기본은 동일하다. 다만, 대규모 전력을 효율적으로 생산하기 위해서는 활용 대상 열의 효율적 채열 방법과 열원의 특성에 대응한 모듈설계가 중요하다. 특히, 최근 들어



[그림 3] 열매순환식 적층형 열전발전모듈 개발 예  
(좌) 100W급 적층식 열전발전유닛, Power Inc., (우)한국전기연구원에서 개발한 적층식 열전발전유닛

열전발전을 직접적으로 이용하고자 하는 많은 노력들이 실제 응용에서는 그 기대만큼의 성과를 얻지 못하고 있는데 대부분의 이유가 다양한 열원에 효율적으로 대응할 수 있는 최적의 소자 개발이 이루어져 있지 않기 때문이다. 따라서 열전발전을 적극적으로 이용하기 위한 최우선적 기술개발 요소는 바로 적용 시스템에 가장 최적화된 열전소자의 개발이 될 것이다.

물론 최근 열전소재 분야에서의 혁신적인 연구 성과들이 2000년 전후로 매우 활발히 보고되고 있으나 실제 전력 생산의 핵심적 요소인 소자화에 대해서는 아직 본격 실용화를 위한 집중적 연구가 필요한 상황이다.

현재 상용화된 대부분의 열전소자는 상용시장 대부분의 수요를 차지하고 있는 전자냉각 구현을 위해 제작된 것들로 자동차용과 같이 일부 최적화 노력이 함유된 소자 개발은 최근 들어 미국, 일본 등의 연구기관과 한국전기연구원 등에서 보고되고 있는 실정이다.

열전발전시스템에 대해서는 현재까지 주로 미국의 경우 우주항공 및 군사용으로 개발되어 적용되었으나 최근 일본과 독일을 중심으로 민수분야에서의 조속한 적용

가능성을 위한 연구들도 매우 활발하게 진행되고 있다.

우리나라의 경우, 열전발전의 산업적 응용기술 분야에는 선진국에 비해서도 뒤지지 않은 성과를 보고하고 있다. 한국전기연구원에서는 저온폐열 활용가능성을 확인, 10kW급 열전발전시스템뿐만 아니라 최고 400℃까지의 열원을 재생할 수 있는 3KW급 열전발전시스템을 재료 및 소자단까지 자체 개발하여 그 가능성을 실증함으로써 열전발전기술의 조기 산업화 가능성을 세계적으로 증명한 바 있다.

### 3. 전망

열전발전을 통해 구현할 수 있는 전기생산량을 현재 기술에 준하는 단위소자와 시스템화 조건으로 평가하면 대형 산업발전의 경우를 고려했을 때, 고온부와 저온부와의 온도차가 100℃인 조건에서 최소 1kW/m<sup>2</sup> 이상의 전력생산(Bi-Te계)이 가능하다. 소자의 소형화를 통해 다양한 센서의 독립 전원으로 활용할 수 있는 소형발전의 경우 온도차 5℃ 조건에서 ~1.0mW/cm<sup>2</sup> 내외의 전력을 생산할 수 있다.

[표 1] 열전발전의 구현가능 성능

구분	매크로(대형)발전	마이크로(소형)발전
단위출력(m <sup>2</sup> )	1kW/m <sup>2</sup> (ΔT=80°C) 이상 (Bi-Te계 기준)	~1.0mW/cm <sup>2</sup> (ΔT=5°C) 내외 두께(thickness) : ~500μm 내외
상용급 최대출력(규격)	10kW (한국전기연구원, 적층식, 150°C급 폐열 이용)	12mW(ΔT=1.0°C), Citizen, Japan (9mmx9mmx2000mm, 384쌍, 6소자)
응용분야	산업 및 자동차 폐배열 이용 발전시스템, 태양열 등의 자연열 이용 발전시스템, 병합발전 시스템 등	IT기기의 보조전원, 센서전원, 체열발전원
참조	Bi-Te계 열전소자 기준	Bi-Te계 열전소자 기준

향후 예측되는 전기에너지 생산단가의 증가추세는 친환경 녹색에너지의 필요성을 언급하지 않더라도 그 실용적 가치는 크게 부각될 수밖에 없다.

하지만 열전변환기술은 아직도 산업화의 초기 단계로 장시간의 실증결과가 미흡하고 재료분야에서의 개발

성과에 비해 전기 생산의 최소 단위체인 발전용 소자의 개발 부족이 본격적인 상용화의 어려움이 되고 있다.

이 같은 기술적 어려움을 극복하기 위한 다양한 시도가 국가 주도로 이루어지고 있으며, 민간분야에서도 관련 분야에 대한 본격적인 연구들이 수행되고 있어 조만간 상용화가 예상된다.

[표 2] 열전발전이 가능한 응용분야의 열원 특성 및 설치 검토 시스템

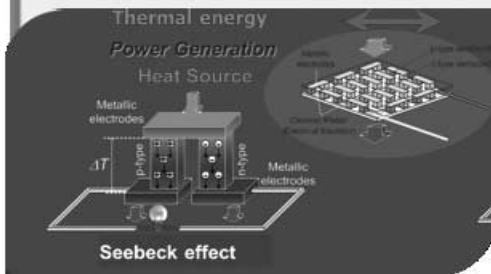
응용분야	열원특성	설치가능 시스템
산업기기	배가스 10~500°C, 온배수 0~100°C 수증기 100~200°C, 제품습열 10~1,200°C	전력, 화학, 철강, 요업, 종이펄프, 석유정제분야 굴뚝, 연소기벽, 발열 설비벽 등
폐기물 소각로	폐열 : 최고 700°C	사이클론, 건식반응로, 필터,연돌, 연소기벽체 등
발전소	100~700°C	탈유황장치, 복수기, 플라이에시 회수장치, 열교환기
분산전원화	복합발전에 의한 효율향상 온수, 증기, 온수+증기, 배가스 : 400~450°C	디젤엔진, 가스터빈, 가스엔진
자동차	매니홀더 : 500~900°C	실린더블럭, 머플러 부분
자연에너지	태양에너지 : 1kW/m <sup>2</sup> 지열	태양열 발전, 지열발전, 태양광/열 복합발전



### 열전발전기술의 장단점

#### 열전발전의 장점

- 친환경 고체 발전방식, 장수명
- 시스템이 간단하여 구축/관리 용이
- 재생이 어려운 중저온 폐열의 재생에 적합
- 마이크로화 가능 향후 소형 IT기기 전원 활용가능(체열발전 등)



#### 열전발전의 단점

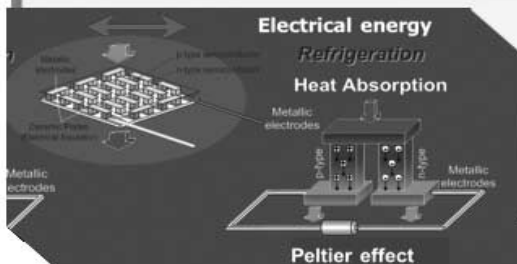
- 낮은 변환효율(인입 열량/생산전력량)
- 평가기준 불분명 / 기술표준화 미흡  
현재 물질성능지수(ZT)만 일반화 측정기술의 표준화가 이루어지지 않음(미국 주도의 물질지수 표준화 시작(2010) - 한국, 한국전기연구원)
- 기술적으로 시장진입기 단계의 기술로 상업화를 위한 엔지니어링 데이터가 미흡(Stage at LAB to Field)
- 온도차 확보를 위한 다양한 어셈블리화 기술 필요
- 현재 대형시장이 없음  
기술적 상용화에 파급효과가 큰 차량분야를 중심으로 상업화 초기단계 진입



### 열전냉각기술의 장단점

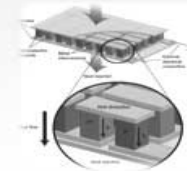
#### 열전냉각의 장점

- 반도체 기술을 이용한 고체 냉각방식, 장수명, 고속냉각
- 소형 냉각기기 적용(낮은 온도차, 즉시 냉각효과)  
[소형 냉온장고, 화장품 냉장고, 광학기기에서의 냉각]  
→ 10°C 이하의 냉각, 25W이하의 열부하에서는 기존 가스냉각 방식에 비해 우수
- 마이크로화 가능 → 박막화, 집적화, IT 디바이스의 능동형 냉각장치 응용가능
- 차량용 공조분야에서 대형시장으로 성장

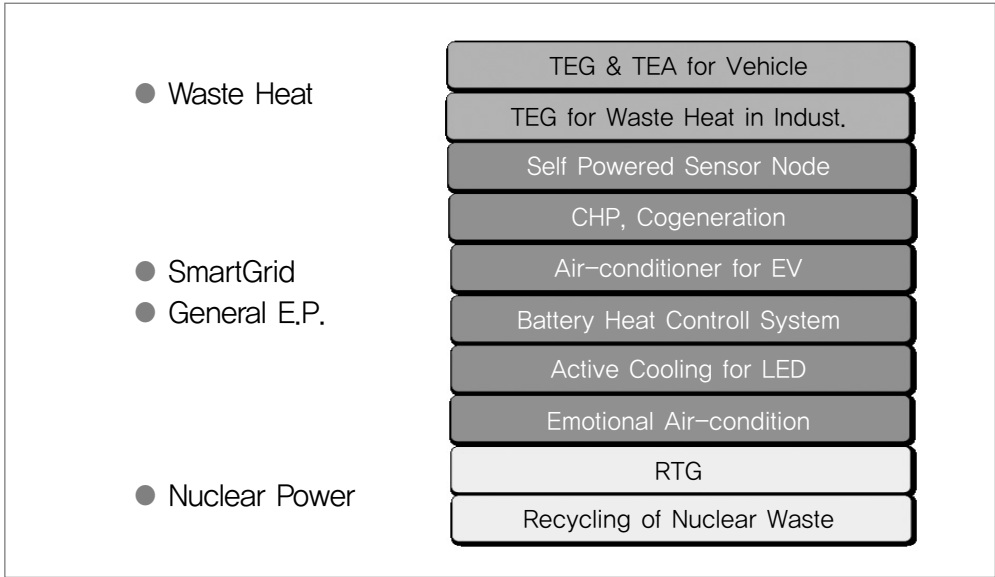


#### 열전냉각의 단점

- 상대적으로 낮은 변환효율[COP]
- 일반적 냉각조건인 경우 기존 가스냉각에 비해 ~1/4수준[COP]
- 방열을 위한 추가 어셈블리의 필요
- 냉각분야에 적용될 물질이 매우 제한적(Bi-Te계)
- 기술의 성숙도가 높음(신규시장 및 기술개발에 혁신 필요)
- 미국 AMERIGON사의 경우, 혁신적 상품(기존 물질)의 개발로 신시장 창출 [차량공조용 시트(CCS) 현재 600억 시장확대 중]



[그림 4] 열전발전기술의 장단점 및 열전냉각기술의 장단점



[그림 5] 열전발전기술의 응용분야

실제 현재와 같은 연구개발의 노력과 일본이나 독일과 같이 보다 집중화된 국가지원이 민간분야에서의 노력과 잘 조화된다면, 단기적으로는 내연차량의 폐열을 활용하는 열전발전시스템과 산업폐열 재생용 열전발전시스템의 적용가능성이 크고 장기적으로는 태양에너지, 지열, 신원자력 기술로서의 응용 개발가능성이 매우 크다.

열전기술에 매진하고 있는 한 연구인으로서 이 같은 긍정적인 예측들이 가까운 미래에 우리 생활 속에 꽃피울 수 있기를 진심으로 소망하며, 그 소망을 다하는 의미 있는 성과를 위해 최선을 다할 것이다. KEA

[참고문헌]

1. T. J. Seebeck, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, p. 265(1822).
2. J. C. A. Peltier, Ann. Chem. Phys., 56, p. 371(1834)
3. W. Thomson, Proc. Roy. Soc. Edinburgh, p. 91(1851).
4. G. Pastorino Journal of Thermoelectricity No1(2009)
5. Kishi et al, ICT1998
6. R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts and B. O'Quinn, Nature, 413, p. 597(2001).
7. 에너지자원기술개발 기술기획 분석보고서 (열전발전분야), 에너지관리공단(2005).
8. 에너지자원기술개발 기획보고(열전변환소자), 에너지기술기획평가원(2010)