

# 열광기전 에너지 변환과 마이크로/나노스케일 복사 열전달 연구 동향

박근한 | Univ. of Rhode Island, Assistant Professor | e-mail : kpark@egr.uri.edu

이 글에서는 열광기전 에너지 변환에 대한 대략적인 설명과 열광기전 시스템의 장단점, 그리고 열광기전 성능 개선을 위한 마이크로/나노 스케일에서의 복사열전달 연구에 대해 소개한다.

화석 연료에 의한 환경오염과 자원고갈 등의 문제는 대체 에너지 개발 및 효과적인 에너지 재생에 대한 전 지구적 관심을 촉발하였다. 최근 관심을 끌고 있는 새로운 에너지 변환 기술 중 하나는 열광기전(thermophotovoltaic; TPV) 에너지 변환이다. 열광기전 시스템은 고온의 발열체에서 나오는 적외선 영역의 광에너지를 전기에너지로 변환하는 장치로, 배열(wasted heat)의 효과적 이용, 정숙한 작동, 소형화가 가능하다. 소형 열광기전 장치를 현실화하고 성능을 개선하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있는데, 그 중 극소스케일에서의 복사열전달에 대한 연구가 많은 주목을 받고 있다. 열광기전 시스템에 대한 전반적인 이해를 돕기 위하여, 이 글에서는 열광기전 에너지 변환에 대한 개략적인 설명과 이와 관련된 최신 연구 동향을 살펴보고자 하겠다.

화석 연료는 현재 전 세계 에너지 소비의 약 85%를 담당하고 있지만, 동시에 많은 문제점을 안고 있다. 화석연료의 연소에 따른 CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>와 같은 유해가스의 배출과 CO<sub>2</sub>로 인한 지구 온난화 등의 환경 관련 문제가 대두되고 있으며, 특히 계속되는 채취로 화석연료가 빠른 속도로 고갈되고 있음은 주지의 사실이다. 따라서 대체 에너지원의 개발, 배열의 재활용, 에너지 변환 효율(energy conversion efficiency)의 개선 등으로 화석연료의 의존도를 낮추는 노력이 필요하다. 이러한 요구들을 해결하기 위한 잠재적인 후보 기술군 중 하나가 열광기전에너지 변환장치

이다. 이 글의 목적은 좀 더 많은 연구자들에게 TPV 시스템과 이와 관련된 극소스케일에서의 연구 동향을 소개하는 것이다. 2장에서 TPV 시스템의 개요에 대해서 설명한 뒤, 3장에서는 TPV 시스템의 장점과 단점을, 그리고 4장에서 TPV 시스템의 성능 개선을 위한 마이크로/나노스케일에서의 복사 열전달 연구를 다룰 것이다.

## TPV 장치의 원리

TPV 시스템의 작동 원리는 기본적으로 태양전지와 동일하다. 즉, 열광전지(TPV cell)의 밴드갭보다 큰 광에너지(photon energy)를 전자-전공 쌍(electron-hole pairs)의 생성을 통해 전기 에너지로 변환하는데<sup>(1)</sup>, 태양전지와 차이점은 광원이 태양이 아닌 고온의 에미터(emitter)라는 점이다. TPV 시스템은 에미터, 필터, 열광전지 등 크게 세 가지 요소로 이루어진다. 고온의 열원의 표면에 위치한 에미터에서 나오는 복사열은 열원의 온도에 따른 스펙트럼을 가지는데, 열광전지의 밴드갭보다 작거나 너무 큰 광에너지는 전기 내에서 열 에너지로 변환하여 온도를 높히고 성능을 저하시키므로 필요한 파장만을 투과하는 필터가 필요하다. TPV 시스템의 핵심인 열광전지는 서로 다르게 도핑된 반도체층이 p-n 접합부를 이루고 있어 이 곳에서 광에너지의 흡수를 통해 생성된 전자-전공 쌍이 전류의 흐름을 발생한다. TPV 시스템의 작동

원리를 이해하기 위해서는 열광전지에 대한 조금 더 자세한 설명이 필요하다.

TPV 시스템의 에미터 온도는 보통 1,300~2,000K로<sup>(2)</sup>, 효과적인 전기 에너지로의 변환을 위해서는 열광전지의 밴드갭이 0.5~0.8eV로 최적화되어야 한다. 이는 실리콘의 밴드갭인 1.12eV보다 현저히 작은 값으로서 태양전지에 쓰이는 반도체는 TPV 발전용으로 적합하지 않음을 보여준다. 대표적인 열광전지용 반도체로  $In_xGa_{1-x}Sb$ 가 있는데, GaSb과 InSb의 배합을 통해 만들어진다. 이 중 GaSb은 0.72eV의 낮은 밴드갭을 가지고 있어 실제 TPV 시스템에 쓰여 왔다(GaSb 제조와 물특성에 관한 자세한 설명은 Bett and Sulima가 쓴 리뷰에서 찾을 수 있다<sup>(3)</sup>). GaSb와 비교한  $In_xGa_{1-x}Sb$ 의 장점은 밴드갭의 조절이 가능하다는 점이다. Coutts et al.<sup>(4)</sup>은 GaSb과 InSb의 배합비에 따라  $In_xGa_{1-x}Sb$ 의 밴드갭이 0.17eV에서 0.72eV까지 변한다는 사실을 밝혀내었다. 또 다른 열광전지용 반도체로는  $In_xGa_{1-x}As$ 가 있다.  $In_xGa_{1-x}As$ 는 GaAs와 InAs의 배합비에 따라 0.36eV부터 1.42eV의 밴드갭을 가진다<sup>(5)</sup>. 따라서,  $In_xGa_{1-x}Sb$ 나  $In_xGa_{1-x}As$ 를 사용하여 시스템의 작동 온도에 최적화된 밴드갭을 가지는 열광전지를 제작할 수

있다. 그 외에도  $InGaAsSb$ <sup>(6)</sup>,  $InAs_{1-x}Px$ ,  $InAsSbP$ <sup>(7)</sup> 등도 열광전지용 반도체로 쓰인다.

그림 1에서 보듯이, 열광전지는 전술한 반도체( $In_xGa_{1-x}Sb$ )에 도핑을 통해 구현한 p-층과 n-층을 가진다. 이 때  $In_xGa_{1-x}Sb$ 는 GaSb 기판 위에 에피택시(epitaxy) 방법으로 증착하여 만든다. 통상적으로 p-층이 n-층 위에 오도록 전지를 제작하는데, 이는 n-층이 p-층보다 위에 있을 경우 전극과 n-층의 직접적인 접촉이 전체 회로를 쇼트시킬 수도 있기 때문이다<sup>(6)</sup>. 열광전지로 복사광이 들어오면 밴드갭보다 높은 에너지를 가진 광자(photon)는 전지 내에서 흡수되면서 전자-전공 쌍을 생성한다. p-n 접합부의 공핍층(depletion region)에서 광생성된 전자-전공 쌍은 내부 전기장에 의해서 표동 전류(drift current)로 바뀐다. 반면, 공핍층 외부에서 광생성된 전자-전공 쌍은 소수 캐리어(minority carrier)를 형성하며 공핍층 경계로 확산(diffuse)하는데, 이 때 생성되는 전류를 확산 전류(diffusion current)라 한다. 결국, 전지 양 끝의 전극에서 얻는 전류는 표동 전류, p-층에서의 전자 확산 전류(electron diffusion current), 그리고 n-층에서의 전공 확산 전류(hole diffusion current)를 총합한 값이다.

TPV 시스템의 성능은 크게 양자효율(quantum efficiency)과 변환효율(conversion efficiency)에 의해서 평가한다. 양자효율은 흡수된 광자 수에 대한 전자-전공 쌍 생성수의 비로 정의한다. 즉, 흡수된 광자의 실질적인 효율도를 설명한다. 이상적인 열광전지는 흡수된 양자의 수와 생성된 전자-전공 쌍의 수가 동일하여 100%의 양자 효율을 가진다. 하지만 실제로는 전자-전공 쌍이 공핍층으로 확산하는 과정에서 일부는 다시 재결합(recombination)하여 양자효율을 감소시킨다. 그림 2는  $In_{0.2}Ga_{0.8}Sb$ (밴드갭 = 0.63eV) 열광전지의 흡수계수(absorption coefficient)와 양자효율을 보여준다.  $In_{0.2}Ga_{0.8}Sb$ 의 흡수계수와 양자효율은 밴드갭을 기준으로 파장이 길어질수록 급격히 줄어드는데, 이 영역에서의 광에너지는 긴 침투깊이(penetration depth)로 인해 공핍층을 넘어선 곳에서 흡수되며 전자-전공 쌍을 만들지 못하고 열에너지로 바뀌게 된다. 흥미로운 사실은 1 $\mu m$  정도의 짧은 파장 영역에

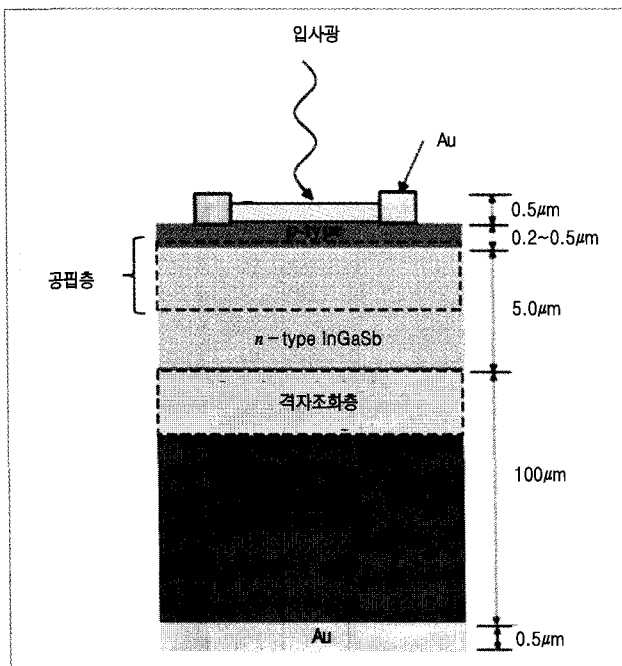


그림 1 일반적인 p-n-n TPV 전지의 개략도

서도 양자효율이 크게 감소한다는 점이다. 이 영역에서는 높은 흡수계수로 인해 표면 가까운 곳에서 전자-전공 쌍을 생성하지만, 그 중 80% 정도는 전류를 생산하지 못하고 재결합하여 열에너지로 바뀐다<sup>(8)</sup>. 즉 열광전지에서 실제로 전류 생산에 쓰이는 광에너지는 밴드갭 부근의 파장 영역뿐이며, 그 외의 에너지는 전지의 온도를 높혀 오히려 성능에 악영향을 끼친다. 이러한 점이 TPV 시스템에 필터가 필요한 이유이다. 에너지 변환 효율은 열역학적 효율로 에미터에서 방사하는 복사 에너지에 대한 열광전지에서 생산하는 전력량으로 정의한다. 즉,  $\eta = (P_{out}/P_{inc}) \times (P_{inc}/P_{emit}) = \eta_c \times \eta_f$ 로 정의할 수 있는데, 여기에서  $P_{inc}$ 는 전지에 투사되는 복사 에너지이고  $\eta_c = P_{out}/P_{inc}$ 는 전지 효율,  $\eta_f = P_{inc}/P_{emit}$ 는 필터 효율로 정의한다. 위 식으로부터 TPV 시스템의 효율을 높이기 위해서는 전지와 필터 모두의 효율을 높여야 함을 알 수 있다.

### TPV 시스템의 장점과 단점

다른 에너지 변환 장치들과 비교하였을 때 TPV 시스템의 가장 큰 장점은 다양한 열원을 사용할 수 있다는 점과 구동파트가 없다는 점이다. 다양한 산업과 발전소에서 배출되는 배열은 TPV 발전 열원으로 충분히 사용 가능하다. 또한 구동하는 요소가 없다는 점은 TPV시스템의 소형화와 더불어 소음을 최소화할 수 있다는 점에서 매력적이다. 실제로 많은 TPV에 대한 연구가 군사용, 우주용 발전을 목적으로 이루어졌으며<sup>(9)</sup>, 최근에는 MEMS(microelectromechanical system) 기술의 발전과 더불어 micro-TPV 장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다<sup>(10, 11)</sup>. TPV 발전의 소형화는 노트북, 휴대전화, iPod 등과 같은 전자 기기의 소형화 추세와 맞물려 발생하는 소형 전력장치에 대한 요구에 부응한다. 또 다른 TPV 시스템의 장점은 열광전지의 최적화를 통해서 높은 전력집적도를 보인다는 점이다. 최근에 미국 Sandia National Laboratory 에서 개발한 소형 TPV 발전기의 전력집적도는 10kW/m<sup>3</sup>에 달하는데<sup>(12)</sup>, 이는 현재 상용 배터리의 10~1,000 배에 달하는 수치로 군사용이나 무인 감식장치, 그리고 기타 소형기

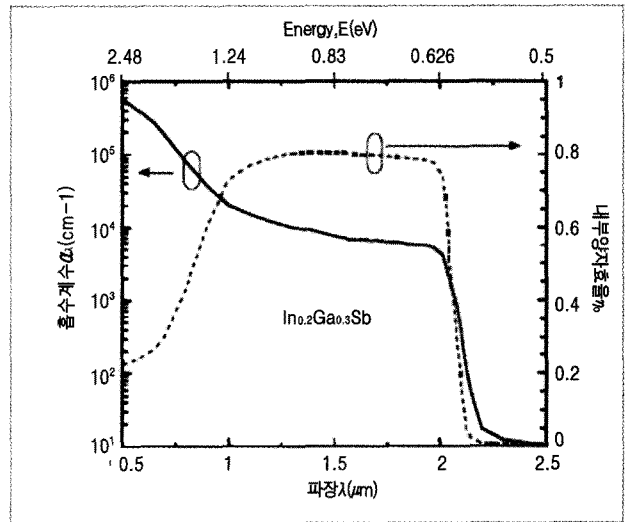


그림 2 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Sb(밴드갭 = 0.63eV)의 흡수계수와 양자효율

기의 전력요구를 충족시킨다.

하지만, 낮은 에너지 변환 효율과 전력 생산량은 TPV 발전의 가장 명백한 문제점으로 남아 있다. 이는 복사에너지의 일부만이 전기에너지로 변환 가능하기 때문인데, 이러한 문제들을 해결하는 가능한 방법 중 하나가 마이크로/나노스케일에서의 복사열전달을 적용하는 것이다. 예를 들면, 마이크로/나노구조를 가진 에미터나 필터의 개발을 통해 효율 향상을 꾀할 수 있다. 또한 최근의 연구는 에미터와 열광전지간의 간격을 복사에너지의 특정 파장보다 작게 유지하므로 전력 생산량을 10배 이상 증가시킬 수 있음을 밝혀냈다<sup>(5, 13)</sup>. 전통적인 복사 열전달로는 길이 스케일이 복사 파장과 비슷하거나 더 작을 경우에 일어나는 복사에너지의 주목할 만한 증가를 설명할 수 없고, 새로운 의미의 근접장 복사 열전달(near-field radiative heat transfer)의 적용이 필요하다. 즉 TPV 시스템의 성능향상을 위해서는 마이크로/나노스케일에서의 근접장 복사 열전달의 기초 연구와 이를 응용한 TPV 시스템 개발이 선행되어야 하겠다.

### TPV 장치와 마이크로/나노스케일 복사 열전달

전술하였듯이, TPV 시스템의 성능을 향상시키기 위해

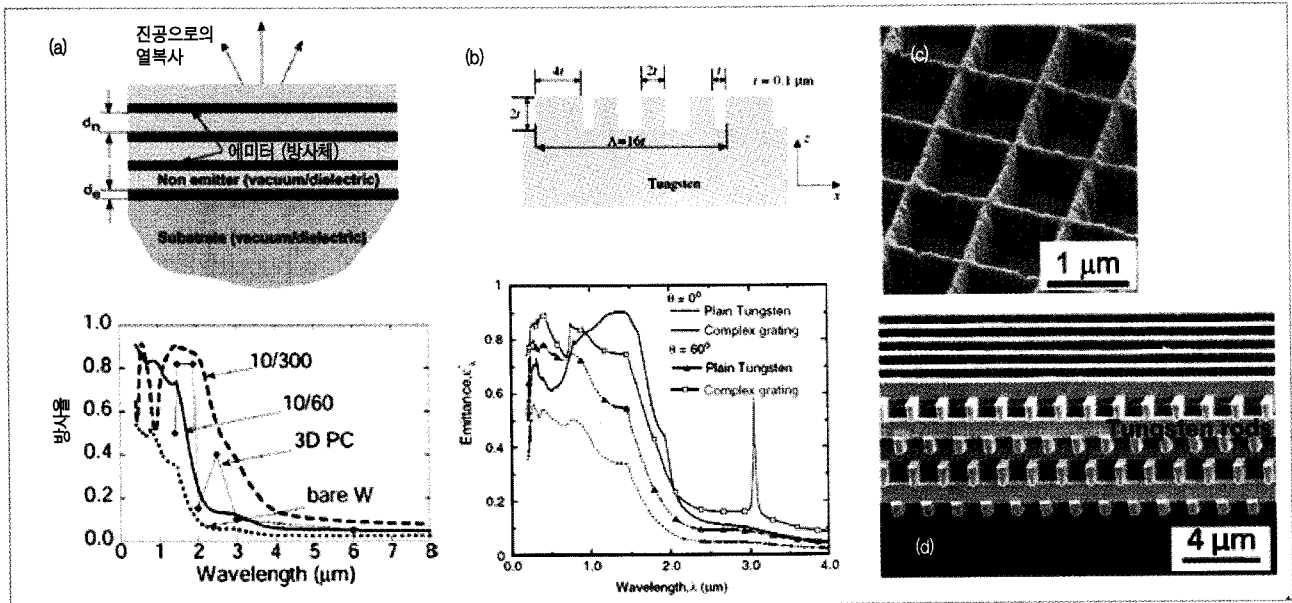


그림 3 TPV 에미터의 성능 향상을 위한 마이크로/나노구조물 (a) 1D 텅스텐/실리카 광결정체와 방사율<sup>(14)</sup> (b) 1D복합 격자구조와 방사율<sup>(15)</sup> (c) 2D 텅스텐 격자 에미터<sup>(24)</sup> (d) 3D 텅스텐 광결정체<sup>(19)</sup>

서는 열광전지의 개선뿐 아니라 에미터와 필터의 최적화를 통한 효율의 향상이 필요하다. 만약 에미터에서 나오는 복사에너지가 열광전지의 최적 발전 스펙트럼에 집중되어 있거나 파장선택(wavelength-selective) 필터를 통해 불필요한 광에너지가 걸러진다면 전체적인 에너지 변환 효율을 높일 수 있을 것이다. 최근 다양한 1D, 2D, 3D 마이크로/나노구조물들이 새로운 TPV용 파장선택 에미터와 필터 용으로 연구되고 있다. MIT의 Gang Chen 그룹에서는 10nm 두께의 텅스텐과 300nm 두께의 실리카 필름으로 이루어진 1D 주기적 구조물의 분광 방사율(spectral emissivity)이 가시광선-근적외선 영역에서 1에 가까운 값을 가진다는 사실을 밝혀냈다<sup>(14)</sup>. 이는 다층(multilayer) 실리카 필름에서의 간섭효과와 더불어 텅스텐 필름에서의 필터링 효과 때문이다. Chen and Zhang<sup>(15)</sup>은 1D 마이크로 복합 격자구조(complex gratings)의 에미터 설계해석을 통해 이 구조의 방사율은 관심 스펙트럼에서 높은 값을 가질 뿐 아니라 모든 방사방향으로도 그 값이 일정함을 증명하였다. 제작의 편이와 해석의 간단함으로 인해 1D 마이크로/나노 에미터에 대한 연구가 활발하지만, 2D 격자 구조<sup>(16-18)</sup>와 3D 광결정(photonic crystal) 구조<sup>(19)</sup> 역시 파장

선택 에미터로 쓰일 수 있다. 그림 3은 위에서 소개한 1D 구조물과 2D 텅스텐 격자, 그리고 3D 텅스텐 광결정 에미터들을 보여준다. 필터에 관한 연구 역시 다양한 물질과 구조를 이용하여 이루어지고 있다. 일례로 Wu가 제안한 얇은 절연층(dielectric film) 위에 만들어진 2μm 주기의 2D 구리 격자는 1.6μm 부근의 파장에서 높은 투과율을 보이고 다른 파장영역의 광에너지는 걸러낸다<sup>(20)</sup>. 실리콘과 실리카 필름의 1D 광결정 구조 역시 1.78μm보다 짧은 파장에서는 높은 투과율을 보이지만 그보다 긴 파장의 광자는 반사하여 좋은 필터 역할을 한다<sup>(21)</sup>.

마이크로/나노구조를 이용한 에미터와 필터의 성능 향상에 대한 연구와 함께 주목을 받고 있는 TPV 관련 연구는 근접장 복사 열전달을 이용한 비약적인 전력생산의 증가에 대한 연구이다. 두 열복사체 사이의 간격이 특성파장보다 작아지면 전파파(propagating wave)뿐 아니라 복사체의 표면에만 존재하는 소멸파(evanescent wave)도 에너지의 전달에 관여하기 시작한다. 즉, 광터널 효과(photon tunneling effect)와 표면 플라리톤 공명(surface polariton resonance)과 같은 근접장 효과에 의해서 에너지 전달량이 증가하는데<sup>(22)</sup>, 이론에 따르면 복사

체 간 거리에 따라 흑체복사(black-body radiation)보다 적게는 10배부터 많게는 100만배 이상 증가할 수 있다<sup>(23)</sup>. 이러한 이론적 배경을 이용하여 근접장 TPV(nearfield TPV)를 실현하면 전력 생산에 획기적인 증가를 가져올 수 있을 것이다. 필터를 생략하여 에미터와 TPV 전지 사이의 간격을 최소화하면서 그에 따른 복사에너지의 증가와 생산전력의 증가를 꾀하는 것이 근접장 TPV 시스템의 핵심이다. 그림 4에서는 근접장 TPV 시스템의 개념도와 이론적으로 계산한 에미터-전지 간격에 따른 생산전력과 에너지 변환 효율의 변화를 보여준다<sup>(13)</sup>. 2,000K의 텅스텐 에미터가 300K의  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{Sb}$  전지와 시스템을 이루었을 때, TPV 전지로 투사하는 복사 에너지와 그에 따른 전력 생산량은 에미터-전지 간격이 줄어들수록 가파른 증가를 보여준다. 간격이  $10\mu\text{m}$ 일 경우와 비교했을 때,  $100\text{nm}$  간격이었을 때의 전력 생산량은 10배 이상 증가한다. 에미터-전지 간격이  $10\text{nm}$ 일 때

전력 생산량은  $1\text{MW}/\text{m}^2$ 로, 약  $25\text{cm}^2$ 의 면적을 가지는 TPV 시스템만 있으면 미국의 평균 가정의 일일 전력소비를 감당할 수 있다. 에너지 변환 효율 역시 에미터-전지 간격이 작아질수록 다소 좋아진다. 하지만, 간격이  $10\text{nm}$  이하가 되면 효율이 오히려 떨어지는데, 이는 간격이 작을수록 표면 가까이에서 흡수되는 광에너지가 많아져 양자 효율이 떨어지기 때문이다. 이상의 결과를 보았을 때 근접장 TPV 시스템은 성능 개선의 측면에서 매우 매력적인 선택이 될 수 있다. 하지만,  $100\text{nm}$  이하의 에미터-전지 간격을 실현하기는 기술적으로 매우 어려운 일임에 틀림이 없다. 또한 이렇게 작은 간격이 유지되었을 때 열광전지의

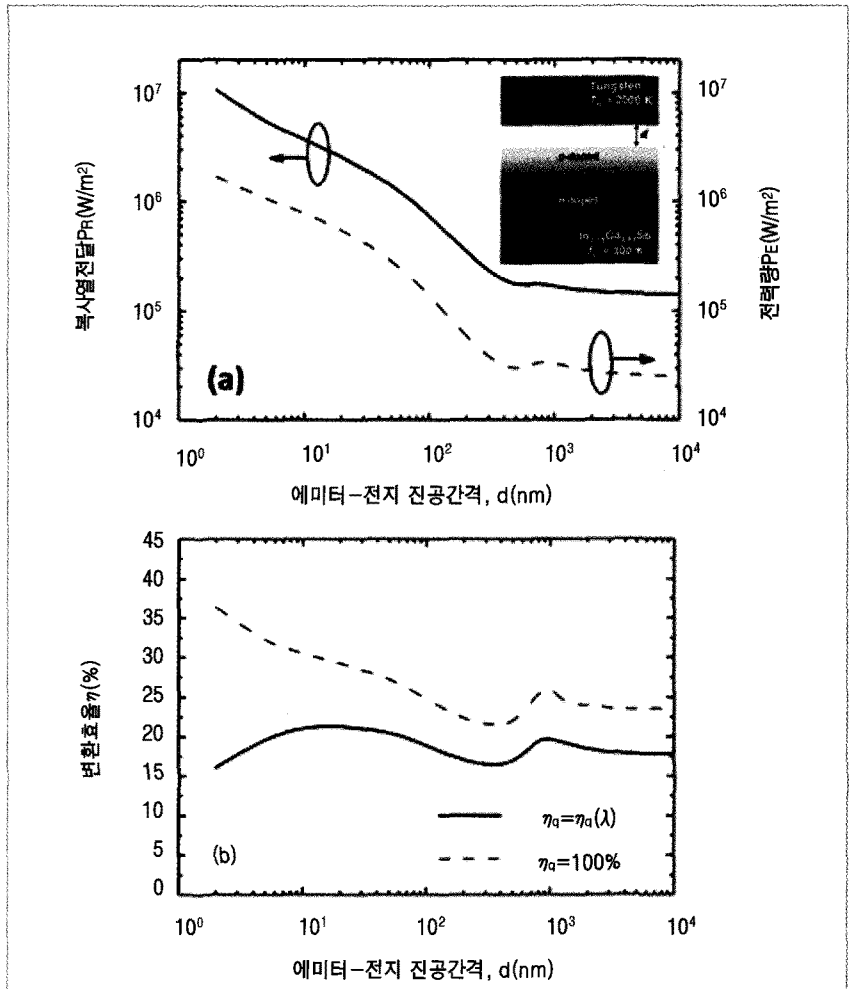


그림 4 근접장 TPV 시스템의 성능 해석. (a) TPV 전지로 투사하는 복사 에너지와 그에 따른 생산 전력. 삽입한 그림은 계산에 사용한 TPV 시스템을 나타낸다. (b) 동일한 시스템의 에너지 변환 효율

온도를 실온에 가깝게 제어하는 것도 심각한 문제이다. 이러한 점들로 인해 아직은 이론에 머물고 있지만, 마이크로/나노테크놀로지의 도움으로 근접장 TPV 시스템이 이른 미래에 실현될 것이라 기대한다.

### 맺음말

이 글을 통하여 우리는 TPV 에너지 변환 시스템과 성능 향상을 위한 최근의 극소스케일에서의 연구 동향을 간략히 살펴보았다. 여러가지 아직 해결되지 않은 공학적 쟁점이 남아 있음에도 불구하고, 배열의 효과적 이용, 정숙한

작동, 소형화 가능한 측면에서 보았을 때 TPV 시스템은 상당히 매력적인 차세대 소형 발전 시스템이라 할 수 있다. 마이크로/나노테크놀로지의 발전은 TPV 시스템 각 구성요소의 전례가 없는 성능 향상을 가능하게 하였으며, 더 나아가 TPV 시스템의 미래를 엿볼 수 있게 하였다. 활발한 후속 연구를 통해 TPV 시스템이 실생활에 사용되기를 기대한다.

#### 참고문헌

- (1) Messenger, R. A., and Ventre, J., 2004, *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- (2) Charache, G. W., Baldasaro, P. F., Danielson, L. R., DePoy, D. M., Freeman, M. J., Wang, C. A., Choi, H. K., Garbuzov, D. Z., Martinelli, R. U., Khalfin, V., Saroop, S., Borrego, J. M., and Gutmann, R. J., 1999, "Ingaassb Thermophotovoltaic Diode: Physics Evaluation," *J. Appl. Phys.*, 85, pp. 2247–2252.
- (3) Bett, A. W., and Sulima, O. V., 2003, "Gasb Photovoltaic Cells for Applications in Tpv Generators," *Semicond. Sci. Technol.*, 18, pp. S184–S190.
- (4) Coutts, T. J., Allman, C. S., and Benner, J. P., May, 1997, "Thermophotovoltaic Generation of Electricity," Third NREL Conference, AIP:NY.
- (5) Whale, M. D., and Cravalho, E. G., 2002, "Modeling and Performance of Microscale Thermophotovoltaic Energy Conversion Devices," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17, pp. 130–142.
- (6) Mauk, M. G., and Andreev, V. M., 2003, "Gasb-Related Materials for Tpv Cells," *Semicond. Sci. Technol.*, 18, pp. S191–S201.
- (7) Gevorkyan, V. A., Aroutiounian, V. M., Gambaryan, K. M., Kazaryan, M. S., Touryan, K. J., and Wanlass, M. W., 2004, "Liquid-Phase Electroepitaxial Growth of Low Band-Gap P-Inaspsb/N-Inas and P-Inasp/N-Inas Diode Heterostructures for Thermo-Photovoltaic Application," *Thin Solid Films*, 451–452, pp. 124–127.
- (8) Renaud, P., Raymond, F., Bensaid, B., and Verie, C., 1992, "Influence of Photon Recycling on Lifetime and Diffusion Coefficient in Gaas," *J. Appl. Phys.*, 71, pp. 1907–1913.
- (9) Nelson, R. E., 2003, "A Brief History of Thermophotovoltaic Development," *Semicond. Sci. Technol.*, 18, pp. S141–S143.
- (10) Yang, W. M., Chou, S. K., Shu, C., Li, Z. W., and Xue, H., 2004, "A Prototype Microthermophotovoltaic Power Generator," *Appl. Phys. Lett.*, 84, pp. 3864–3866.
- (11) Xue, H., Yang, W., Chou, S. K., Shu, C., and Li, Z., 2005, "Microthermophotovoltaics Power System for Portable Mems Devices," *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 9, pp. 85 – 97.
- (12) Basu, S., Chen, Y.-B., and Zhang, Z. M., 2007, "Microscale Radiation in Thermophotovoltaic Devices – Review," *Int. J. Energy Res.*, 31, pp. 689–716.
- (13) Park, K., Basu, S., King, W. P., and Zhang, Z. M., 2008, "Performance Analysis of near-Field Thermophotovoltaic Devices Considering Absorption Distribution," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 109, pp. 305–316.
- (14) Narayanaswamy, A., and Chen, G., 2004, "Thermal Emission Control with One-Dimensional Metalodielectric Photonic Crystals," *Phys. Rev. B*, 70.
- (15) Chen, Y. B., and Zhang, Z. M., 2007, "Design

- of Tungsten Complex Gratings for Thermophotovoltaic Radiators," Optics Communications, 269, pp. 411-417.
- (16) Heinzl, A., Boerner, V., Gombert, A., Blasi, B., Wittwer, V., and Luther, J. (2000) Radiation Filters and Emitters for the NIR Based on Periodically Structured Metal Surfaces Journal of Modern Optics Taylor & Francis Ltd, pp. 2399-2419.
- (17) Pralle, M. U., Moelders, N., McNeal, M. P., Puscasu, I., Greenwald, A. C., Daly, J. T., Johnson, E. A., George, T., Choi, D. S., El-Kady, I., and Biswas, R., 2002, "Photonic Crystal Enhanced Narrow-Band Infrared Emitters," Appl. Phys. Lett., 81, pp. 4685-4687.
- (18) Sai, H., Kanamori, Y., and Yugami, H., 2003, "High-Temperature Resistive Surface Grating for Spectral Control of Thermal Radiation," Appl. Phys. Lett., 82, pp. 1685-1687.
- (19) Lin, S. Y., Moreno, J., and Fleming, J. G., 2003, "Three-Dimensional Photonic-Crystal Emitter for Thermal Photovoltaic Power Generation," Appl. Phys. Lett., 83, pp. 380-382.
- (20) Wu, T. K., 1997, "Infrared Filters for High-Efficiency Thermovoltaic Devices," Microwave Opt. Tech. Lett., 15, pp. 9-12.
- (21) O'Sullivan, F., Celanovic, I., Jovanovic, N., Kassakian, J., Akiyama, S., and Wada, K., 2005, "Optical Characteristics of One-Dimensional Si/SiO<sub>2</sub> Photonic Crystals for Thermophotovoltaic Applications," J. Appl. Phys., 97, pp. 033529.
- (22) Polder, D., and Vanhove, M., 1971, "Theory of Radiative Heat Transfer between Closely Spaced Bodies," Phys. Rev. B, 4, pp. 3303-3314.
- (23) Fu, C. J., and Zhang, Z. M., 2006, "Nanoscale Radiation Heat Transfer for Silicon at Different Doping Levels," Int. J. Heat Mass Transfer, 49, pp. 1703-1718.
- (24) Sai, H., Yugami, H., Akiyama, Y., Kanamori, Y., and Hane, K., 2001, "Spectral Control of Thermal Emission by Periodic Microstructured Surfaces in the near-Infrared Region," J. Opt. Soc. Am. A, 18, pp. 1471-1476.

## 기계용어해설

### 램 제트(Ram-jet)

압축기를 사용하지 않는 제트로, 연소에 필요한 공기를 엔진의 전진 운동에 의해 베르누이의 정리를 응용, 고속으로 흡입하여 단순한 실린더내에서 압축하고 연료를 분사, 점화, 연소시켜 추진력을 얻는 방식의 제트 엔진의 일종.

### R값(R값; R value)

강재를 굽히면 영구변형이 남게 되고, 강판은 완만한 곡선을 그리므로 이 곡선의 정도를 측정하여 강판의 스트레치 스트레인에 대한 감수성을 R값으로 지시하는 것.

### 방사 보일러(Radiation Boiler)

노 주위에 다수의 방사수관이나 과열기까지 배치하여 대부분의 열이 방사에 의하여 전달하도록 만든 보일러.