

광결정 표면을 이용한 드론용 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템의 성능해석

이 정 현^{*,1)}¹⁾ 국방과학연구소 해양기술연구원

Performance Analysis of Photonic Crystal Enhanced Micro-Combustor Thermophotovoltaic System for Drone Application

Junghun Lee^{*,1)}¹⁾ Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 October 2020 / Revised 13 April 2021 / Accepted 30 April 2021)

Abstract

In this paper, the electrical power output of the micro-combustor thermophotovoltaic(TPV) system was analyzed. The system consists of a micro-combustor, photonic crystals(PhCs), and photovoltaic cells(PV cells). The system has a micro-combustor that can achieve over 1,000 K surface temperature by consuming 2.5 g/h hydrogen fuel. Also, this system incorporates current state-of-the-art PhCs surfaces(2D Ta PhCs and Tandem Filter) to increase electrical power output. In addition, InGaAsSb PV cell, which bandgap is 0.55 eV, was applied to convert a wide range of radiative energy. The performance analysis shows that a single micro-combustor TPV system can produce 0.4 W ~ 27.7 W electrical power with the temperature change of emitter(900 K ~ 1,500 K) and PV cell(250 K ~ 400 K).

Key Words : Thermophotovoltaic(열광전), Photonic Crystal(광결정), Micro-Combustor(마이크로 연소기), Radiative Heat Transfer(복사열전달), Drone(드론)

기 호 설 명

T : Temperature λ : Wavelength [nm]
 ϵ : Emissivity Q : Heat Loss [W]
 τ : Transmissivity E_λ : Spectral Radiation
 Φ : Photon Flux h : Heat Transfer Coef.

 V : Voltage I : Current

1. 서 론

드론은 원격 조종을 이용한 무인 비행기나 헬리콥터를 의미하며, 군사용 및 민간용으로 주목을 받고 있는 무인항공기이다. 드론을 보다 효과적으로 사용하기 위해 드론에 무기체계, 감시장비, 그리고 영상장비 등

* Corresponding author, E-mail: jh_lee@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

을 탑재하면서 드론의 무게가 증가하고, 작동 중 보다 많은 전력을 소비하는 형태로 발전하고 있다. 드론에 탑재되는 배터리 용량이 한정된 상태에서 드론의 무게 증가 및 전력사용 증가는 드론의 가동시간을 현저하게 감소시킨다. 본 연구는 보다 효율적인 드론 활용을 위해서 드론 자체적으로 전력을 생성하고, 드론의 부력형성에 도움이 될 것으로 예상되는 마이크로연소기를 활용한 소형 열광전 에너지변환시스템의 이론적인 성능을 해석하였다.

열광전 에너지변환 시스템은 태양에너지, 연소에너지, 그리고 방사성 동위원소의 에너지를 이용한 해석 및 실험이 수행되었다^[1-3]. 기존 연구에서는 방사성동위원소의 붕괴열을 이용하여 최대 30 %의 에너지 변환 효율을 보이는 것으로 연구되었다^[3]. 기존연구에서는 광전지온도 T_{PVcell} 을 300 K으로 고정시켜 해석 및 실험을 수행하여 해석 모델링을 검증하였다. 본 연구에서는 기존에 검증된 모델을 이용하여 T_{PVcell} 의 온도가 250 K ~ 400 K 변화에 따른 시스템의 성능을 해석하였다. 또한 기존 연소에너지를 이용한 열광전에너지 변환 시스템의 형상은 단순한 평판형 임에 반해^[2], 본 연구에서는 넓은 표면적으로부터 에너지 변환이 가능한 원기둥 형태의 연소기를 채택하여 해석을 수행하였다.

2. 열광전 에너지변환시스템

2.1 시스템 개요

열광전(Thermophotovoltaic) 에너지변환시스템은 열 에너지를 복사에너지로 변환시키고, 복사에너지를 광전지(Photovoltaic Cell)에서 전기에너지로 변환시키는 시스템을 말한다(Fig. 1). 열광전 에너지변환시스템은 (1) 에너지원, (2) 방사체, (3) 필터, (4) 광전지, 그리고 (5) 냉각기로 구성된다.

열광전 에너지변환 시스템은 다음과 같은 에너지 변환 과정을 거친다. 먼저, 에너지원으로부터 발생한 에너지를 방사체(Emitter)에서 흡수한다. 방사체는 에너지를 흡수하며 방사체의 표면온도 T_e 가 증가하게 된다. 일반적으로 열광전 에너지변환시스템은 표면온도가 1,000 K이 넘는 고온 조건에서 작동된다. 표면의 온도가 증가할수록 방사체 표면에서 발생하는 복사에너지 E_e 가 증가한다. 이렇게 발생한 복사에너지는 광전지(Photovoltaic Cell, PV Cell)에 조사되어 전력을 발

생시킨다. 전력으로 전환되지 못한 복사에너지는 광전지의 온도를 상승시키는데, 광전지는 일반적으로 온도가 높을수록 광전지 자체의 에너지변환 효율이 감소한다. 따라서 광전지를 지속적으로 냉각해줄 수 있는 냉각기가 필요하다.

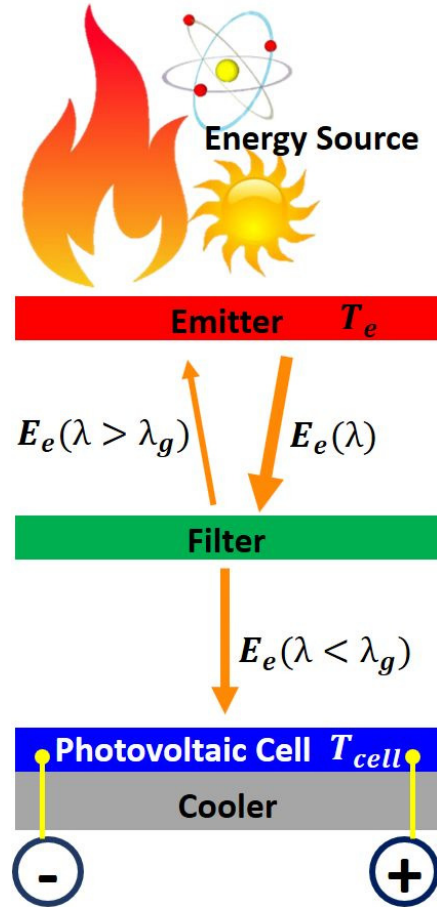


Fig. 1. Thermophotovoltaic System Concept Drawing

광전지에서는 밴드갭 E_g (bandgap) 이상의 복사에너지만 전력으로 변환이 가능하다. 예를 들어 우리가 흔히 알고 있는 태양광 발전 패널은 실리콘(Si)기반의 광전지로, 밴드갭 E_g 이 약 1.1 eV이며, 약 $\lambda_g = 1130$ nm 파장 이하의 단파장 고에너지 복사에너지 $E_e(\lambda < \lambda_g)$ 만 전력생성이 가능하다. 본 연구에서는 열광전 에너지변환시스템의 에너지 변환 효율을 개선하기 위해 필터(Filter)를 추가로 설치하였다. 필터는 단파장 고에너지의 복사에너지는 광전지로 조사하고, 장파장 저에

너지의 복사에너지 $E_c(\lambda > \lambda_g)$ 는 다시 방사체로 반사하는 역할을 한다.

마이크로 연소기의 경우 기존 연구에서 다공성 물질(Porous Foam/Medium)을 이용하여 동일 연료 대비 높은 표면 온도를 달성한 연소기를 차용하였다⁴⁾. 또한 방사체(Emitter)와 필터(Filter)의 표면 복사 특성을 개선하고, 낮은 밴드갭 에너지를 가지는 광전지를 적용하여 시스템 성능을 해석하여 보다 높은 전력을 생성할 수 있도록 설정하였다.

2.2 연구 중점

2.2.1 시스템 구성

Fig. 2는 드론용 마이크로 연소기 마이크로 연소기 열광전에너지변환 시스템을 나타내고 있다. 기존연구에서는 평판형 연소기를 이용한 열광전 에너지변환 시스템이 연구되었으나, 본 연구에서는 드론에 적합한 형상인 원통형으로 선정하였다²⁾. 본 시스템이 드론에 적용하기 적합한 형상으로 선정된 이유는 다음과 같다. (1) 시스템의 크기와 무게가 상대적으로 작아 드론에 장착하기 용이하고, (2) 연료 연소물이 드론 하부로 배출되어 드론 부력에 도움이 되며, (3) 대기 중에 냉각기(Cooler)가 노출되어 있고 인접한 부위에 프로펠러가 회전하고 있어 지속적인 강제대류가 발생하여 열관리에 용이할 것으로 보이기 때문이다.

본 형상은 기존연구의 C7-27의 구조를 참고하였다⁴⁾. Fig. 2(A)는 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템의 단면을 나타내고 있다. 기존 연구의 연소기와 다른 점은, 기존 연구에서는 연소기의 외경이 원기둥형태지만, 2차원 탄탈륨 광결정(2D Ta PhC)의 제작성을 고려하여 본 연구에서는 연소기 외부 형상을 평면으로 구성된 정팔각기둥 형태로 고려하였다. 외경의 형상을 정팔각형으로 변경하며 방사체(Emitter)의 표면은 소폭 증가하였으나, 기존 연구의 표면적과 유사한 형상으로 채택하였다(3.2절). Fig. 2(B)는 길이방향의 단면과 마이크로 연소기의 길이정보를 나타내고 있다.

마이크로 연소기 열광전 에너지변환 시스템의 전력 발전 성능을 분석하기 위해서는 Fig. 1에 도시되어 있는 각각의 구성품들의 물성치 정보가 필요하다. 에너지원(Energy Source)의 경우 기존 연구에서 다공성 물질을 이용하여 동일 연료 사용량 대비 높은 표면온도를 달성한 마이크로 연소기를 선정하였다⁴⁾. 방사체(Emitter)와 필터(Filter)의 경우 나노 광결정(Photonic Crystal) 기술을 이용한 표면의 물성치를 사용하였다

⁵⁻¹⁰⁾. 마지막으로 광전지의 경우 상대적으로 낮은 밴드갭(~0.55 eV)을 가지는 InGaAsSb 광전지를 선택하여 보다 많은 복사에너지를 전력으로 변환 가능한 시스템으로 구성하였다¹¹⁾. 광전지 냉각기의 경우 대기에 노출된 핀 형상으로 선정하였다.

기존연구결과를 보면 다공성 물질이 없을 경우 가압 없이 주입된 연료가 연소실에서 연소된 후 약 20~25 m/s 이상의 고속으로 배출된다는 연구 결과가 있다¹⁵⁾. 본 논문에서는 전력발전량을 예측하기 위해 연료가 연소되는 특성에 영향을 미칠 수 있는 연소기 내부 형상을 변경하지는 않았다.

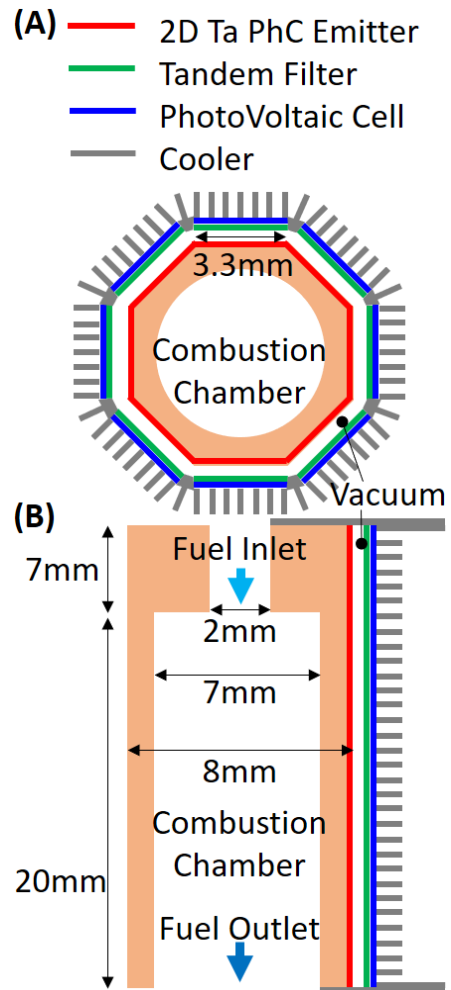


Fig. 2. Geometry of micro-combustor thermo-photovoltaic system (A) cross section view with legend, and (B) longitude section view

2.2.2 방사체와 필터의 광결정 표면

방사체(Emitter) 및 필터(Filter)의 복사특성은 광결정(Photonic Crystal)을 이용하여 개선이 가능하다. 광결정은 방사체 혹은 필터의 표면에 1-D, 2-D, 그리고 3-D 나노 구조물을 주기적으로 배열하여 표면의 복사특성을 바꾸는 기술을 말한다. 광결정 기술을 이용하여 광전지에서 전력으로 변환이 가능한 단파장 고에너지 복사에너지를 상대적으로 많이 방출하는 방사체 설계 가능하며, 광전지에서 전력 변환이 가능한 단파장의 고에너지 복사에너지만 투과시키는 필터를 설계할 수 있다(장파장의 저에너지 복사에너지는 필터에서 반사되어 방사체로 재흡수 되도록 설계). 본 연구에서는 높은 성능을 보여주었던 2차원 탄탈륨 광결정 방사체와 탠덤 필터(Tandem Filter)의 복사특성을 적용하여 해석을 수행하였다(Fig. 3).

Fig. 3(A)는 2차원 탄탈륨 광결정의 수직방향 방사율 측정 데이터를 보여주고 있다⁹⁾. 2차원 탄탈륨 광결정의 방사율을 보면 파장이 2250 nm 이하의 고에너지 단파장 복사에너지 영역의 방사율 ϵ 이 높아, 동일 표면온도 대비 단파장의 고에너지 복사에너지가 많이 방출되는 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(B)는 탠덤 필터의 수직방향 투과율 측정 데이터를 보여주고 있다⁶⁾. 탠덤 필터는 파장이 2250 nm 이하의 고에너지 단파장 복사에너지의 투과율 τ 가 높으며, 장파장의 저에너지 복사에너지는 반사하는 특성을 알 수 있다. 이러한 복사특성은 광전지에서 전력으로 변환 가능한 복사에너지만 광전지로 조사시키고, 광전지에서 전력으로 변환이 불가능한 장파장의 저에너지 복사에너지는 반사시켜 시스템 효율 증대에 기여한다.

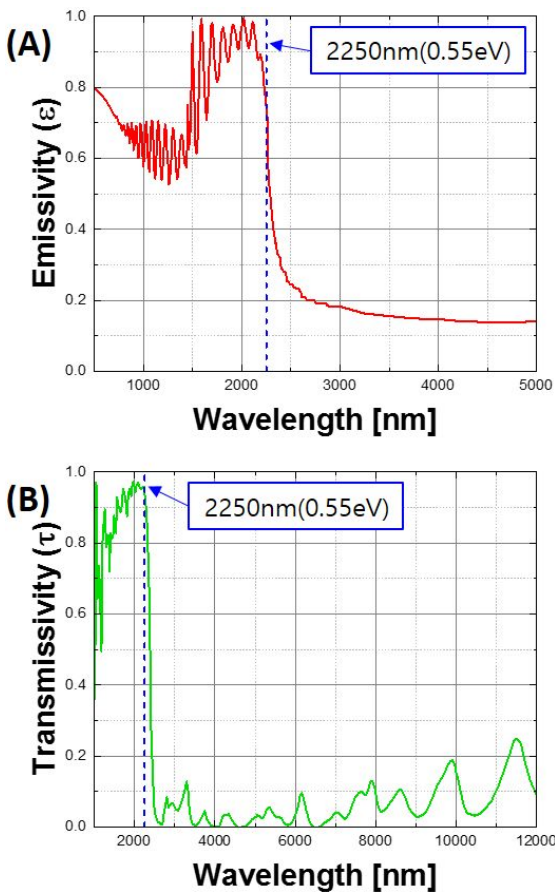


Fig. 3. Experimentally measured radiative property of (A) 2D Ta PhC Emitter, and (B) Tandem Filter

2.2.3 광전지의 밴드갭에너지

열광전 에너지변환시스템에서 광전지의 밴드갭은 시스템 전반에 큰 영향을 미친다. Fig. 3에서 방사체와 필터의 복사특성은 모두 2250 nm를 기점으로 급격히 변하는 복사특성을 가지고 있다. 그 이유는 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템에서 사용하는 광전지의 특성을 반영하여 설계하였기 때문이다. 본 연구에서는 InGaAsSb 광전지의 밴드갭 에너지인 $E_g = 0.55 \text{ eV}$ 를 기준으로 모델링 하였다. 여기서 0.55 eV에 해당하는 복사에너지 파장이 $\lambda_g = 2250 \text{ nm}$ 이다. InGaAsSb 광전지에서는 2250 nm 이하의 파장대 복사에너지만 전력으로 변환이 가능하다. 따라서 열광전 에너지변환시스템의 효율 증대를 위해서 방사체에서는 2250 nm 이하 파장의 복사에너지를 상대적으로 많이 방출하는 복사특성이 필요하며, 필터에서는 2250 nm 이하 파장의 복사에너지를 주로 투과시키는 복사특성이 필요하다. 이러한 이유로 기존에 연구개발된 2차원 탄탈륨 광결정과 탠덤 필터를 선택하게 되었다.

3. 모델링

3.1 시스템 전력 생성 모델링

마이크로 연소기를 이용한 열광전 에너지변환시스템의 모델링은 기존 연구 결과를 참고하여 도출하였다^{3,12)}. 방사체의 온도에 따른 파장대별 복사에너지 E_c 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_c(\lambda) = \epsilon_c(\lambda) \cdot E_{b\lambda}(\lambda, T_c) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\epsilon_c(\lambda)$ 는 Fig. 3(A)의 2차원 탄탈륨 광결정의 데이터이며, $E_{b\lambda}$ 는 흑체복사에너지(Blackbody Radiation)로 주어진 온도에서 발생하는 최대 복사에너지로 정의되며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc_0}{\lambda k_B T}} - 1 \right)} \quad (2)$$

식 (2)에서 h 는 플랑크 상수, c_0 은 진공에서 빛의 속도, k_B 은 볼츠만상수 이다. 방사체에서 발생한 복사에너지는 광전지 표면의 필터에서 일부 반사되어 다시 흡수판으로 돌아오는 과정을 반복하게 된다. 이러한 과정을 거치며 최종적으로 광전지에 조사되는 복사에너지 E_{cell} 를 등비수열의 합의 모양으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_{cell}(\lambda) = \frac{\epsilon_c(\lambda) \cdot E_{b\lambda}(\lambda, T_c) \cdot F}{1 - (1 - \tau_{filter}(\lambda)) \cdot (1 - \epsilon_c) \cdot F^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 τ_{filter} 는 필터의 투과율(Fig. 3(B)의 탠덤 필터 데이터)이다. F 는 형태계수(View Factor)로, 방사체와 광전지 사이의 복사에너지 전달 정도를 나타낸다. 본 모델링에서 방사체 표면과 광전지 표면이 가깝게 붙어 있으므로 0.99로 계산하였다. 기존 연구에서도 방사체와 광전지 표면을 충분히 가깝게 설정하여 실험을 수행하였다^[1]. 식 (3)에서 계산된 광전지에 도달하는 복사에너지 E_{cell} 는 Shockley-Queisser 광전지 모델을 이용하여 전력발생량을 도출하였다^[13]. 먼저 광자 플럭스 Φ (Photon flux, number/m²)는 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$\Phi_{cell,external} = \int_0^{\lambda_g} E_{cell}(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc_0} d\lambda \quad (4)$$

$$\Phi_{cell,internal} = \int_0^{\lambda_g} E_{b\lambda}(\lambda, T_{PVcell}) \cdot \frac{\lambda}{hc_0} d\lambda \quad (5)$$

$\Phi_{cell,external}$ 와 $\Phi_{cell,internal}$ 은 각각 광전지에 조사되는 광자플럭스와 광전지에서 생성되는 광자플럭스를 의

미한다. 식 (4)와 식 (5)에서 λ_g 는 광전지 밴드갭 에너지에 해당하는 파장으로, 본 모델링에서는 2250 nm (0.55 eV)로 설정하였다. 식 (5)의 T_{PVcell} 은 광전지의 온도를 의미한다. 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 단락전류 I_{SC} (Short Circuit Current)를 계산하면 다음과 같다.

$$I_{SC} = q \cdot A \cdot (t_s \cdot \Phi_{cell,external} - 2t_c \cdot \Phi_{cell,internal}) \quad (6)$$

식 (6)에서 q 는 전자의 전하량이며, A 는 광전지의 면적으로, 방사체의 면적과 동일한 $A = 712.8 \text{ mm}^2$ (Fig. 2의 팔각기둥 옆면적, 3.3 mm × 27 mm × 8)으로 계산하였다. t_s 와 t_c 는 수집확률(Collection probabilities)을 의미하는데, 이상적으로 가정하여 두 값 모두 1로 설정하였다^[12]. 암전상태에서의 포화전류 I_0 (Dark Saturation Current)는 다음과 같이 계산된다.

$$I_0 = \frac{q \cdot 2A \cdot t_c \cdot \Phi_{cell,internal}}{f_c} \quad (7)$$

식 (7)에서 f_c 는 재결합율(Radiative recombination)을 의미하며 기존 연구와 동일하게 0.2로 설정하였다^[12]. 개방회로전압 V_{OC} (Open Circuit Voltage)과 광전지 전류-전압 관계는 각각 식 (8)과 식 (9)와 같이 계산된다.

$$V_{OC} = \frac{k_B T_{PVcell}}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (8)$$

$$I = I_{SC} + I_0 \left[1 - \exp \left(\frac{q \cdot V}{k_B \cdot T_{PVcell}} \right) \right] \quad (9)$$

최종적으로 도출되는 최대전력 P 는 식 (9)의 관계를 만족하는 전압(V)과 전류(I)를 곱한 값의 최댓값으로 계산이 가능하다($P = V \cdot I$).

3.2 모델링 입력 값 도출

본 모델링을 이용하여 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템의 최종적인 전력 발생량을 얻기 위해서는 방사체의 표면온도 T_c 와 광전지의 표면온도 T_{PVcell} 가 결정되어야 한다.

3.2.1 기존연구 실험결과와 모델링 조건 비교

방사체의 표면온도는 기존 마이크로 연소기의 표면 온도 실험 결과 범위를 참고하여 설정하였다. 기존 연구에서 측정된 연소기의 표면온도를 본 모델링에서 사용 가능한지 판단하기 위하여 아래와 같은 분석을 수행하였다. 기존 연구에서는 다음 식을 통해 마이크로 연소기 표면에서 발생하는 복사에너지와 대류열손실을 계산하였다^[4,14].

$$Q = \epsilon \sigma A (T_e^4 - T_0^4) + h_{conv} A (T_e - T_0) \quad (10)$$

식 (10)에서 σ 는 스테판-볼츠만 상수, A 는 방사체의 표면적, T_0 는 외부환경 온도를 의미한다. 방사체의 표면적은 기존 원기둥형태에서 팔각기둥형태로 변경되었지만, 표면적은 변동이 미소하므로 식 (10)에서 기존 연구와 본 연구의 차이는 없다.

기존 논문에서 연소기 표면의 방사율(ϵ)을 0.78, 자연대류열전달계수 h_{conv} 를 15 W/m²K으로 설정하였다^[4]. 방사율의 경우, 본 논문에서 적용한 2차원 탄탈륨 광결정 방사체의 평균방사율 $\epsilon_{e,ave}$ 를 식 (11)을 통해 계산한 결과 0.212~0.349(at 900 K ~ 1,300 K)라는 값을 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_{e,ave}(T_e) = \frac{\int_0^\infty \epsilon_e(\lambda) \cdot E_{b\lambda}(\lambda, T_e) d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T_e) d\lambda} \quad (11)$$

이와 함께 본 논문에서 설정한 모델에서 방사체와 필터 사이의 공간을 진공으로 가정하여 대류로 인한 열손실은 발생하지 않으므로 h_{conv} 는 0 W/m²K에 가까운 값을 가지게 된다. 이러한 환경조건은 기존연구의 해석 및 실험 조건과 동일하게 사용되었다^[1,3].

3.2.2 방사체 표면온도 범위설정

3.2.1절의 분석을 토대로 기존연구에 비해 방사체 표면에서 손실되는 열에너지(복사에너지+대류열전달)가 작음을 알 수 있으므로, 기존연구에서 측정된 연소기의 표면온도보다 2차원 탄탈륨 광결정을 적용한 본 연구의 시스템 표면온도가 더 높은 온도 달성이 가능하다. 기존 연구의 다공성 물질질을 적용한 연소기에 2.7 g/hour로 수소연료를 공기와 혼합 하여($\phi_{\text{혼합비율}} =$

0.85, H₂/air) 연소시킨 결과 표면온도가 약 900 K ~ 1,300 K 범위로 측정되었다^[4]. 따라서 본 논문에서는 방사체 표면온도를 기존 연구 결과 범위를 포함한 900 K ~ 1,500 K에서의 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템의 성능해석을 수행하였다.

3.2.3 광전지 온도 범위설정

식 (5) 및 식 (9)를 보면, 광전지온도 T_{PVcell} 가 광전지의 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 마이크로 연소기 열광전 에너지변환시스템을 드론에 적용하게 되면 광전지에 붙어있는 핀 형태의 냉각기(Fig. 2(C) Cooler)가 대기 중에 노출된다. 광전지의 온도는 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$Q_{waste} = h_{fin} A_{fin} (T_{PVcell} - T_{air}) \quad (12)$$

Q_{waste} 전력으로 변환되지 못한 에너지이며, T_{air} 는 대기온도로 대한민국 기준으로 연중 약 250 K ~ 300 K이다. T_{PVcell} 을 명확히 정의하기 위해선 냉각기 핀의 형상이 결정되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 냉각기 설계를 포함하지 않으므로, 광전지의 온도는 연중 대기온도 대역을 포함한 250 K ~ 400 K 범위로 가정하여 해석을 수행하였다. 기존 해석^[12] 및 실험^[1] 연구에서는 T_{PVcell} 을 300 K으로 고정하여 연구를 수행하였으나, 본 연구에서는 대기환경 변동을 고려하여 기존 연구보다 넓은 범위의 온도대역으로 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

모델링을 통해 해석한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(A)는 T_{PVcell} 를 고정하고 T_e 변화에 따른 전력 발생량을 계산한 결과이다. 전체적으로 T_e 이 증가할수록 더 높은 전력이 생성됨을 알 수 있다. 그 이유는 방사체의 표면 온도가 높을수록 단파장의 고에너지 복사에너지가 많이 발생하기 때문이다(식 (2) 참조). 이와 함께 T_{PVcell} 가 낮을수록 동일 T_e 대비 높은 전력에너지를 생성함을 알 수 있다. T_{PVcell} 가 높을수록 V_{OC} 가 증가하지만(식 (8) 참조), 광전지의 전압(V)과 전류(I)의 관계(식 (9) 참조)에서 최대 전력을 생성하

는 값($V \times I$)이 감소하기 때문이다. 광전지의 온도에 따라 전력 생성량이 바뀌지만, 방사체의 온도 변화에 따라 전력생성량이 더 크게 변동됨을 알 수 있다.

Fig. 4(B)는 전체 T_e 및 T_{PVcell} 변화에 따른 전력생성량을 보여주고 있다. Fig. 4(B)에서 검은색 실선은 등전력선을 나타내고 있다. 본 해석 범위에서 한 개의 시스템은 최소 0.38 W($T_e = 900$ K, $T_{PVcell} = 400$ K), 최대 27.7 W($T_e = 1,500$ K, $T_{PVcell} = 250$ K)의 전력을 생성함을 알 수 있다. 안정적인 전력 생성 확보를 위해서는 지속적으로 높은 표면온도 달성이 가능한 시스템 설계가 필요하다.

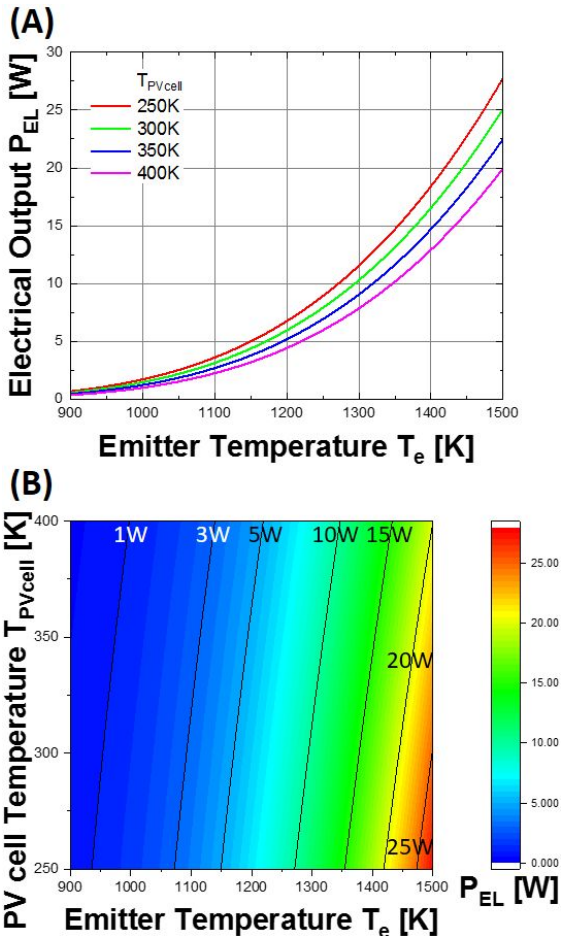


Fig. 4. Electrical power output with respect to emitter temperature(T_e) and photovoltaic cell temperature(T_{PVcell}) for (A) given T_{PVcell} , and (B) overall data

5. 결론

본 논문에서는 마이크로 연소기 열광전 에너지변환 시스템의 성능해석을 수행하였다. 이상적인 조건에서 최대 전력 생성량을 평가하기 위해 높은 효율을 보여준 구성품으로 시스템을 구성하였다. 연소기는 연소 성능을 향상시켜 표면온도를 상승시킨 다공성 물질을 이용한 마이크로 연소기로 선정하였다. 방사체와 필터는 광결정 기술을 이용하여 광전지의 밴드갭을 고려한 복사특성을 가지는 2차원 탄탈륨 광결정과 탠덤 필터로 선정하였다. 광전지는 비교적 넓은 파장대역의 복사에너지를 전력으로 변환 가능한 InGaAsSb 광전지를 적용하였다($E_g = 0.55$ eV). 방사체와 광전지의 온도에 따른 성능평가를 수행한 결과 본 논문에서 설정한 범위에서 최소 0.38 W ~ 27.7 W 범위로 전력이 생성됨을 알 수 있었다. 시스템의 전력 발전량은 방사체 표면온도에 크게 좌우된다.

향후 본 연구논문에서 제시하고자 하는 열광전 시스템의 효율 최적화를 위해 T_{PVcell} 를 가능한 낮게 유지할 수 있는 냉각기에 대한 연구가 필요하다. 또한 드론 사이즈에 따라 다수의 열광전 에너지변환시스템이 탑재 가능성에 대한 검토 및 배출 가스로 인한 드론의 부력형성 연구가 필요하다.

References

- [1] A. Lenert, D. M. Bierman, Y. Nam, W. R. Chan, I. Celanovic, M. Soljagic, and E. N. Wang., "A Nanophotonic Solar Thermophotovoltaic Device," *Nature Nanotechnology* 9, pp. 126-130, 2014.
- [2] W. R. Chan, V. Stelmakh, W. R. Allmon, C. M. Waits, M. Soljagic, J. D. Joannopoulos, and I. Celanovic., "An Integrated Microcombustor and Photonic Crystal Emitter for Thermophotovoltaics," *Journal of Physics: Conference Series* 773, 012108, 2016.
- [3] J. Lee, S. Cheon, S. Hong, and Y. Nam., "A Radioisotope Thermophotovoltaic Converter with Nanophotonic Emitters and Filters," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 108, pp. 1115-1125, 2017.
- [4] Q. Peng, W. Yang, Jiaqiang E, H. Xu, Z. Li, W,

- Yu, Y, Tu, Y. Wu., "Experimental Investigation on Premixed Hydrogen/Air Combustion in Varied Size Combustors Inserted with Porous Medium for Thermophotovoltaic System Applications," *Energy Conversion and Management* 200, 112086, 2019.
- [5] V. Rinnerbauer, S. Ndao, Y. X. Yeng, W. R. Chan, J. J. Senkevich, J. D. Joannopoulos, M. Soljagic, and I. Celanovic, "Recent Developments in High-Temperature Photonic Crystals for Energy Conversion," *Energy & Environmental Science* 5, 8815, 2012.
- [6] E. Brown, G. Nichols, P. Baldasaro, D. DePoy, S. Burger, L. Danielson, W. Topper, T. Tahmlow., "The Status of Thermophotovoltaic Energy Conversion Technology at Lockheed Martin Corp, Department of Energy," United States, 2003.
- [7] M. Garin, D. Hernandez, T. Trifonov, and R. Alcobilla., "Three-Dimensional Metallo-Dielectric Selective Thermal Emitters with High-Temperature Stability for Thermophotovoltaic Applications," *Solar Energy Material & Solar Cells* 134, pp. 22-28, 2015.
- [8] R. Bhatt, I. Kravchenoko, and M. Gupta., "High-Efficiency Solar Thermophotovoltaic System Using a Nanostructure-based Selective Emitter," *Solar Energy* 197, pp. 538-545, 2020.
- [9] T. A. Walsh, J. A. Bur, Y. Kim, T. Lu, and S. Lin., "High-Temperature Metal Coating for Modification of Photonic Band Edge Position," *Journal of Optical Society of America*, Vol. 26, No. 7, 2009.
- [10] F. O'sullivan, I. Celanovic, N. Jovanovic, J. Kassakian, S. Akiyama, and K. Wada., "Optical Characteristics of One-Dimensional Si/SiO₂ Photonic Crystals for Thermophotovoltaic Applications," *Journal of Applied Physics* 97, 033529, 2005.
- [11] W. Chan, R. Huand, C. Wang, J. Kassakian, J. Joannopoulos, and I. Celanovic., "Modeling Low-Bandgap Thermophotovoltaic Diodes for High-Efficiency Portable Power Generators," *Solar Energy Material & Solar Cells* 94, pp. 509-514, 2010.
- [12] A. Lenert, Y. Nam, D. M. Bierman, and E. N. Wang., "Role of Spectral Non-Idealities in the Design of Solar Thermophotovoltaics," *Optics Express* 22, A1604-A1618, 2014.
- [13] W. Shockley, and H. J. Queisser., "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," *Journal of Applied Physics* 32, 510, 1961.
- [14] X. Yang, Z. He, S. Cha, L. Zhao, S. Dong, and H. Tan., "Parametric Analysis on the Combustion and Thermal Performance of a Swirl Micro-Combustor for Micro Thermophotovoltaic System," *Energy* 198, 117312, 2020.
- [15] Jiaqiang E, W. Zuo, X. Liu, Q. Peng, Y. Deng, and H. Zhu., "Effects of Inlet Pressure on Wall Temperature and Exergy Efficiency of the Micro-Cylindrical Combustor with a Step," *Applied Energy* 175, pp. 337-345, 2016.