

표준기상 데이터와 열해석을 이용한 태양광열 모듈의 필요 냉각수량 산출

이천규* · 정효재**

**한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

Calculation of Required Coolant Flow Rate for Photovoltaic-thermal Module Using Standard Meteorological Data and Thermal Analysis

Cheonkyu Lee* and Hyo Jae Jeong**†

**† Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

Photovoltaics (PV) power generation efficiency is affected by meteorological factors such as temperature and wind speed. In general, it is known that the power generation amount decreases because photovoltaics panel temperature rises and the power generation efficiency decreases in summer. Photovoltaics Thermal (PVT) power generation has the advantage of being able to produce heat together with power, as well as preventing the reduction in power generation efficiency and output due to the temperature rise of the panel. In this study, the amount of heat collected by season and time was calculated for photovoltaics thermal modules using the International Weather for Energy Calculations (IWEC) data provided by the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Based on this, we propose a method of predicting the temperature of the photovoltaics panel using thermal analysis and then calculating the flow rate of coolant to improve power generation efficiency. As the results, the photovoltaics efficiencies versus time on January, April, July, and October in Jeju of the Republic of Korea were calculated to the range of 15.06% to 17.83%, and the maximum cooling load and flow rate for the photovoltaics thermal module were calculated to 121.16 W and 45 cc/min, respectively. Though this study, it could be concluded that the photovoltaics thermal system can be composed of up to 53 modules with targeting the Jeju, since the maximum capacity of the coolant circulation pump of the photovoltaics thermal system applied in this study is 2,400 cc/min.

Key Words : Photovoltaic-thermal module, Efficiency, Coolant, Standard meteorological data, Thermal analysis

1. 서 론

탄소중립은 대기 중 이산화탄소 농도 증가를 막기 위해 인간 활동에 의한 배출량은 최대한 감소시키고 흡수량은 증대하여 순 배출량이 '0'이 된 상태를 말하며, 인간 활동으로 배출하는 온실가스는 최대한 줄이고 배출되는

온실가스는 산림 흡수나 CCUS(Carbon capture utilization and storage)로 제거하여 실질적인 배출량을 '0'수준으로 낮추는 것을 의미한다[1].

현재를 기준으로 우리나라를 포함한 전 세계 130개국 이상에서 2050년까지 탄소중립 달성을 공표하였다[2]. 우리 정부는 '제9차 전력수급기본계획' 발표를 통해 석탄 발전과 원자력 발전을 대폭 줄여나가면서 신재생에너지를 이용한 발전을 지속하는 전략으로 탄소중립을 달성하는

†E-mail: hyojae.jeong@kitech.re.kr

것을 목표로 하고 있다[3].

2021년 전력거래소에서 발표한 전력계통시스템에 따르면 2020년 태양광 발전용량은 14.6GW로 전체 신재생에너지 발전설비 중 71%의 비중을 차지하고 있으며, 2012년 이후 매년 신규 발전설비가 46%씩 증가하였다[4]. 이와 같이, 태양광 발전은 오랜 기간에 걸쳐 기술적 성숙단계에 진입함과 동시에 규모의 경제를 실현하고 있어 향후 탄소중립 달성을 위한 주요 에너지 공급기술로 활용될 가능성이 높다[3].

태양광(PV, Photovoltaics) 발전효율은 온도 및 풍속 등 기상요소에 영향을 받는다. 일반적으로 여름철에는 모듈온도가 상승하여 발전효율이 저하되기 때문에 발전량이 감소하는 것으로 알려져 있다[5]. 태양광열(PVT, Photovoltaics Thermal) 발전은 전력과 함께 열 생산이 가능한 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라 모듈의 온도상승에 따른 발전효율 및 출력 감소를 방지할 수 있는 장점을 지니며 1970년대부터 지속적으로 연구되어 왔다[6].

PVT는 작동유체에 따라 공기식과 액체식으로 구분되며, 특히 흡수기 모듈의 발전효율 저하를 방지하기 위해 냉각부하를 예측하고 공기 및 냉각수 유량 제어 등 운전 변수에 따른 냉각효과에 대한 연구가 필요하다. 이광섭 등은 PVT 모듈에서 유입수 온도에 따른 전력 효율 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 유입수의 온도가 낮을수록 전력생산량이 증가하는 하는 것을 확인하였다[7]. 김강현과 최영진은 계절별 PV 및 PVT의 효율 비교를 통한 공기식 PVT 시스템의 태양에너지 활용효과를 분석하였으며, 외부 공기를 유입시켜 패널 온도 감소를 통해 PV 발전효율을 연평균 약 8.6% 향상시키고 약 47.5%의 열 에너지를 회수할 수 있었다[8]. 맹희규 등은 냉매를 이용한 PVT 패널의 이상냉각 성능에 관한 연구를 수행하였으며, 냉매를 사용할 경우 단상냉각 대비 열효율은 약 19%, 전기효율은 약 0.5% 상승하는 것을 확인하였다[9].

본 연구에서는 미국냉동공조학회에서 제공하는 IWEC (International Weather for Energy Calculations) 데이터를 이용하여 국내기업에서 개발한 PVT 모듈을 대상으로 계절별, 시간별로 집열량을 산출하고, 이를 기반으로 열해석을 이용해 PV 패널의 온도를 예측 후 발전효율 향상을 위한 냉각수량을 산출하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 PVT 모듈 사양

본 연구에 적용된 태양광열 모듈은 50 W의 전력을 생산할 수 있는 모듈로 폴리카보네이트로 제작된 케이스 안에 PV패널과 집열판으로 구성되어 있으며, PV 패널의

길이는 1,700 mm이고 폭은 165 mm이다. PV 효율은 25 °C에서 17.83%로 공인인증을 받았고 PVT 모듈의 냉각수로 에틸렌글리콜과 물이 4:6으로 혼합된 브라인(brine)이 적용되었으며, 유량 범위는 400 cc에서 2,400 cc로 순환펌프에 의해 제어된다.

2.2 PV 패널의 집열량 산출

본 연구에서는 미국냉동공조학회에서 제공하는 표준기상 데이터인 IWEC 데이터를 활용하여 제주지역의 PVT 모듈의 시간에 따른 PV 패널의 집열량을 산출하였다. PVT 모듈의 경사각은 20°로 적용하였고, 계절별 집열량 분석을 위해 봄, 여름, 가을, 그리고 겨울철을 기준으로 IWEC 데이터에서 4, 7, 10, 그리고 1월의 수치를 추출하여 월평균 데이터를 계산에 적용하였으며, 전체 태양에너지에서 PV 발전량을 제외한 82.17%의 태양열이 PV 패널에 집열된다고 가정하였다. PV 패널의 집열량 산출에는 본 연구진이 이전 연구에서 적용한 수식을 사용하였으며[10], 폴리카보네이트로 제작된 케이스 안에 PV 패널이 위치하므로 태양에너지 흡수율과 방열계수를 각각 0.81 W/m²·°C와 0 W/m²·°C로 가정하였다.

2.3 PV 패널의 온도 산출

본 연구에서는 집열량에 따른 PV 패널의 온도 산출을 위해 열해석을 이용하였다. Fig. 1에 열해석에 적용된 형상을 나타내었으며, 격자수는 15,720개이다. 열해석에는 외부 대류열전달 계수를 10 W/m²·°C로 가정하였고, PV 패널 하부에는 5 mm 두께의 단열재가 적용되어 있어 열전달이 없다고 가정하였으며, 외기온도로 IWEC 데이터에서 추출한 시간별 월평균 데이터를 적용하였다. PVT에 유입되는 열에너지로 앞 절의 PV 패널의 집열량 산출 결과를 적용하였다. PVT 내부 빈 공간은 질소로 충전되어 있어 유동이 없는 상태로 가정하였다. 본 연구에서는 ANSYS Steady-State Thermal 프로그램을 이용하여 열해석을 수행하였다. 열해석에 적용된 소재의 열물성을 Table 1에 나타내었다.

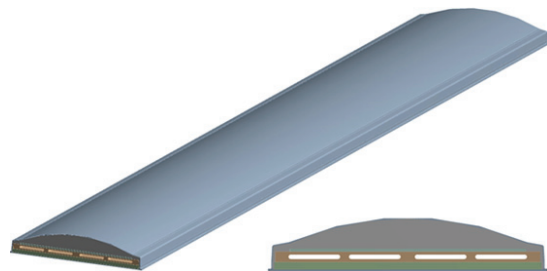


Fig. 1. Geometry of a PVT module for thermal analysis.

Table 1. Properties of materials for thermal analysis

	Density (kg/m ³)	Heat capacity (J/kg·°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)
Aluminum	2,689	951	237.5
Polycarbonate	1,200	1,200	0.22
Polyethylene	930	2,300	0.4
PV cell	2,330	5,723	148
N2	1.138	1,041	0.0242

2.4 온도에 따른 PV 패널의 효율 산출

본 연구에서는 온도에 따른 PV의 효율을 아래 식(1)을 이용하여 계산하였다[11].

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma \log \phi] \quad (1)$$

여기서, η 는 효율, η_r 은 PV 패널의 온도가 25 °C 일 때 효율, β 는 온도계수(°C⁻¹), T_r 은 25 °C, T_c 는 PV 패널의 온도(°C), γ 는 일사량(W/m²), 그리고 ϕ 는 일사량 1000 W/m²을 나타낸다. 본 연구에서는 γ 를 0으로 가정하였고, β 에 성능시험을 통해 도출된 0.084를 적용하였다.

2.5 PVT 모듈의 냉각수량 산출

본 연구에서는 PV 패널의 온도를 최고 발전효율을 보이는 25 °C까지 냉각시키기 위한 냉각부하를 아래 식(2)을 이용하여 산출하였다.

$$\dot{Q} = \frac{C_{p,pv} m_{pv} (25 - T_{pv})}{3,600} \quad (2)$$

여기서, \dot{Q} 는 냉각부하(W), $C_{p,pv}$ 는 PV 패널의 비열(J/kg·°C), T_{pv} 는 PV 패널의 온도(°C), 그리고 m_{pv} 는 PV 패널의 질량인 1.2675kg을 나타낸다.

PVT 모듈의 냉각수량을 산출하기 위해 아래 식(3)을 이용하였다.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q} S}{C_{p,c} (T_{out} - T_{in})} \quad (3)$$

여기서, \dot{m}_c 는 냉각수 유량(kg/s), $C_{p,c}$ 는 냉각수의 비열(3,515 J/kg·°C), 그리고 T_{in} 과 T_{out} 은 냉각수 입출구의 온도(°C)를 나타내며, 냉각수 입구의 온도는 15 °C로 적용하였다. S 는 식(2)에 의해 산출된 PV 패널의 냉각부하를 PVT 모듈 전체 냉각부하로 변환하기 위한 계수로 본 연구에서는 수치해석 결과로 산출된 1.7을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig 2는 계절별 시간에 따른 PV 패널의 집열량을 나타낸 것이다. PV 집열량은 모든 계절에서 정오를 지난 13시에 최대를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 일조시간 내 포물선의 형태로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한, PV 집열량이 4월, 7월 그리고 10월의 경우 유사하게 나타난 반면 1월에 가장 낮게 나타나는데 이는 겨울철 북서풍 바람 계열과 한라산의 영향으로 하층운의 생성이 잦아지기 때문으로 보인다[12].

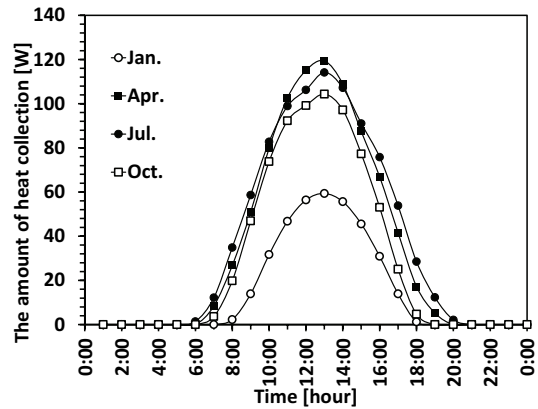


Fig. 2. The monthly average amount of heat collection of PV panel versus time.

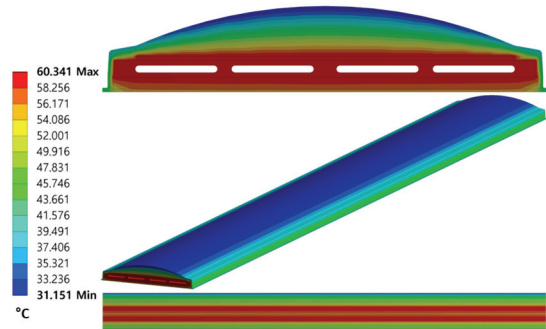


Fig. 3. Temperature distributions on cross section and outer surface of PVT and upper surface of PV panel at 1 pm in July at Jeju.

Fig 3은 냉각수가 흐르지 않는 조건에서 7월 13시의 경우 PVT 모듈의 단면, 외부 표면, 그리고 PV 패널 상부면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 복사열에 의해 열에너지가 집중되는 PV 패널의 온도가 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, 외부 대류에 의해 냉각되는 PVT 모듈 상부의 온도가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. PV패널 상부면 온도의 경우 중심에서 멀어질

수록 외부로의 열전달에 의해 온도가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있으므로 PVT 모듈 하루 4개의 유로 중 중간에 위치한 두개의 유로의 냉각부하가 나머지 유로의 경우보다 클 것으로 예상된다.

Fig 4는 열해석을 통해 도출된 계절별 시간에 따른 PV 패널의 온도를 나타낸 것이다. 1월의 경우 13시를 제외한 시간에서 PV 패널의 온도가 25 °C이하로 유지하는 것을 확인할 수 있고 4월과 10월의 경우에는 9시부터 17시를 제외한 시간에서 PV 패널의 온도가 25 °C이하로 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 7월의 경우 7시부터 20시를 제외한 시간에서 PV 패널의 온도가 25 °C이하로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

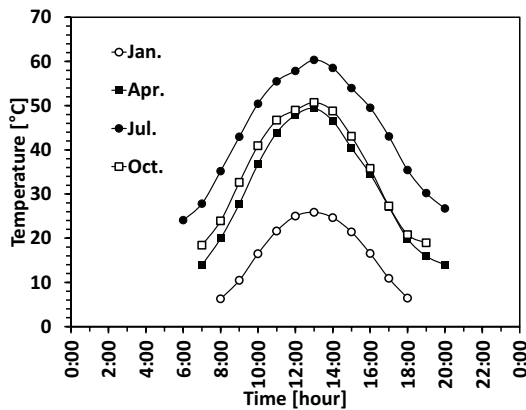


Fig. 4. Temperature of PV panel versus time.

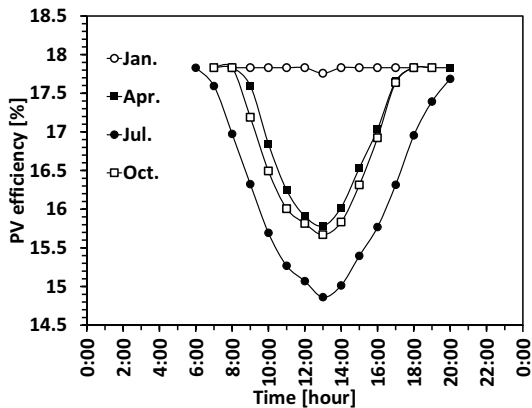


Fig. 5. PV efficiency versus time.

Fig 5는 시간에 따른 PV 패널의 효율을 나타낸 것이다. 1월의 경우 대부분의 시간에서 PV의 시험인증 효율을 보이고 있고 4월, 7월, 그리고 10월의 경우 일조시간 대부분의 시간에서 시험인증 효율 보다 낮은 효율을 보이고 있

어 전력 생산량을 향상시키기 위해 PVT 모듈의 냉각이 필요한 것으로 확인된다.

Fig 6는 시간에 따른 PV 패널의 온도를 25 °C 이하로 유지하기 위한 PVT 모듈의 냉각부하를 나타낸 것이다. PVT 모듈의 냉각부하는 Fig 2의 시간에 따른 PV 패널의 집열량 결과와 유사하게 포물선의 형태를 나타내고 있고 외기온도가 가장 높은 7월의 경우 가장 높게 나타났으며, 1월의 경우에는 13시를 제외한 모든 시간에서 0으로 나타났다. 10월의 PVT 모듈의 냉각부하는 PV 패널의 집열량이 더 높은 4월의 경우보다 높게 나타나는데 이는 외기온도가 4월보다 10월에 더 높게 나타나기 때문으로 보인다. 따라서, PVT 모듈의 냉각부하는 PV 패널의 집열량보다 외기온도의 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

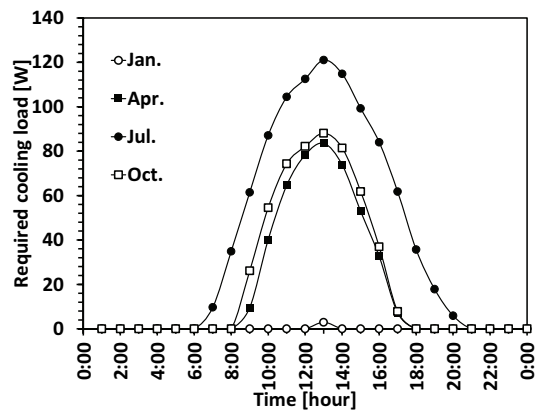


Fig. 6. Required cooling load of PVT module versus time.

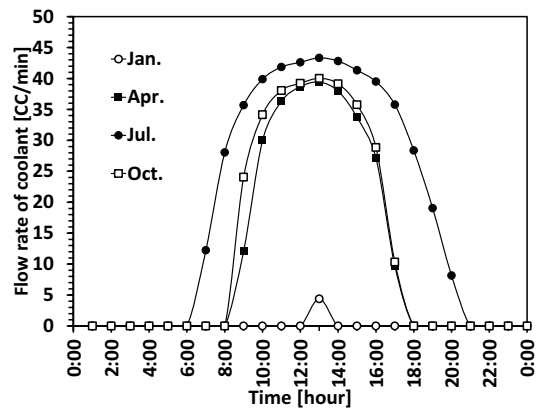


Fig. 7. Flow rate of coolant of PVT module versus time.

Fig 7은 PVT 모듈의 시간에 따른 냉각수량을 나타낸 것이다. 단일 PVT 모듈의 냉각수량은 0 cc/min에서 최대 45 cc/min으로 나타났다. 복수의 PVT 모듈을 이용하여 제주

지역에 설치할 경우 Fig. 7에 나타난 최대 냉각수량을 이용하여 PVT 모듈 구성에 따른 냉각수 순환펌프의 용량 산정이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주지역의 표준기상 데이터를 이용하여 시간에 따른 PVT 모듈 내 PV 패널의 집열량을 산출하고 열해석을 이용하여 PV 패널의 온도를 예측 후 시험인 중 PV 효율을 달성하기 위한 PVT 모듈의 냉각수량을 산출하였다. 본 연구를 통해 제주지역의 계절별 시간에 따른 PV 효율을 최소 15.06%에서 17.83%로 확인할 수 있었으며, 최대 PVT 모듈의 냉각부하가 121.16 W로 예측되어 단일 PVT 모듈의 최대 냉각수량으로 45 cc/min을 산출하였다. 본 연구에서 적용한 PVT 시스템의 냉각수 순환펌프의 최대 용량은 2,400 cc/min으로 제주지역을 대상으로 할 경우 최대 53개의 PVT 모듈로 시스템을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 제조분야 온실가스 미세 먼지 동시저감 기술개발사업 “예열연소 부하를 절감하는 배열회수 열에너지저장 시스템 개발”(No. 20015703)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 2050 Carbon Neutrality Commission, “Carbon Neutrality,” <https://www.2050cnc.go.kr/eng/contents/view?contentsNo=41&menuLevel=2&menuNo=48>. last accessed on the 2nd August 2022.
- United Nations, “For a livable climate: Net-zero commitments must be backed by credible action,” <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>. last accessed on the 2nd August 2022.
- Cheon, Y., “Review of Global Carbon Neutral Strategies and Technologies,” *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 59, No. 1, pp. 99-112, 2022.
- Han, S -G., Noh, Y.-S., Hyon, B.-J., Park, J.-S., and Joo, D., “Development of a 3 kW Grid-Tied PV Inverter with GaN HEMT Considering Thermal Considerations,” *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 26, No. 5, pp. 325-333, 2021.
- Cha, W.-C., Park, J.-H., Cho, U.-R., and Kim, J.-C., “A Study on Solar Power Generation Efficiency Empirical Analysis according to Temperature and Wind speed,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 1, pp. 1-6, 2015.
- Kim, P., “The Fundamental Researches to Evaluate PVT Module Performance,” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-9, 2018.
- Lee, K.-S., Lee, E.-J., and Kang, E.-C., “Experimental Study on the PVT Inlet Water Temperature Dependent Power Efficiency Characteristics,” Vol. 12, No. 3, pp. 31-35, 2016.
- Kim, K., and Choi, Y., “Seasonal Analysis of Solar Energy Utilization Effect of Air-based PVT System by Comparing with Photovoltaic System,” Vol. 42, No. 4, pp. 69-78, 2022.
- Maeng, H., Kim, J., and Kim, Y., “A Comparative Study on Two-Phase Cooling Performance of PVT Panels using Refrigerants,” *Proceedings of KSME 2021 Plant Division Spring Conference*, pp. 175-176, May 2021, Jeju, Republic of Korea.
- Lee, C., and Jeong, H. J., “Performance Analysis of Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Using Typical Meteorological Year,” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 42, No. 4, pp. 15-31, 2022.
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M., and Poggi, P., “Calculation of the Polycrystalline PV Module Temperature using a Simple Method of Energy Balance,” *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 4, pp. 553-567, 2006.
- Kim, D.-J., “Characteristics of sunshine and cloudiness change in Jeju island,” *Jeju Development Research*, Vol. 15, pp. 179-201, 2011.

접수일: 2022년 10월 7일, 심사일: 2022년 12월 6일,
게재확정일: 2022년 12월 12일