

국내 주요지역에서 태양복사 스펙트럼 분리를 이용한 태양광/태양열 하이브리드 발전시스템의 성능

니콜라스 리우* · 이현진***

*국민대학교 기계공학과 대학원, 대학원생

**국민대학교 기계공학과 대학원, 부교수

Performance of a Photovoltaic/Concentrated Solar Power Hybrid System Based on the Splitting of the Solar Spectrum in Korea

Liew, J. Y. Nicholas* · Lee Hyun-Jin***

*Graduate Student, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

**Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

†Corresponding author: hyunjinlee@kookmin.ac.kr

Abstract

Because photovoltaic (PV) cells respond only to wavelengths above the bandgap energy, only part of the solar spectrum incident on the surface of a PV is utilized. In this study, the spectrum splitting technique is used to exploit the entire solar spectrum. A wavelength-selective filter (WSF) is coated on the surface of PV cells, so the PV cell can absorb only the useful solar spectrum transmitted by the WSF. On the other hand, the solar spectrum reflected by the WSF is concentrated on thermal receivers for steam power generation in the concentrated solar power (CSP) system. We analyze the power performance of the PV/CSP hybrid using the WSF in various regions of South Korea.

Keywords: 태양광 발전(Solar photovoltaic power), 태양열 발전(Concentrated solar power), 스펙트럼 분리(Spectrum splitting), 파장 선택적 필터(Wavelength-selective filter), 하이브리드(Hybrid)

기호설명

CSP : 태양열 발전

DNI: 법선면 직달일사량 (W/m^2)

GHI: 수평면 전천일사량 (W/m^2)

PV : 태양광 발전

WSF : 파장 선택적 필터



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.6, pp.61-67, December 2020
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.6.061>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 05 October 2020

Revised: 10 November 2020

Accepted: 13 November 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

태양전지(PV)로 태양 에너지를 전기로 변환하는 과정은 전지 재료의 파장 응답성에 의해 제한된다. 결과적으로 태양광 발전은 태양 스펙트럼의 특정 파장 범위만 흡수하여 전기를 생성한다. 한편, 이용하지 못한 태양 스펙트럼은 태양전지에서 폐열로 소멸되고, 폐열로 인한 온도 상승은 PV 효율을 감소시킨다. 따라서, 유용한 태양 스펙트럼만 태양전지에 도달하도록 스펙트럼 분리 방법을 사용할 수 있다. Fig. 1은 파장 선택적 필터(WSF)를 사용하여 태양 스펙트럼을 분리하는 개념과 이를 활용한 태양광/태양열 하이브리드 발전소를 설명하고 있다. 파장 선택적 필터는 태양전지에 흡수 가능한 스펙트럼은 투과하고, 흡수되지 않는 스펙트럼은 태양열 집열기로 보낼 수 있도록 반사한다. 이러한 방식으로 태양전지의 과열을 방지하고, 태양 스펙트럼도 충분히 활용할 수 있다.

여러 연구자가 스펙트럼 분리를 이용한 PV/CSP 하이브리드 개념은 제안하였지만¹⁻³⁾, WSF의 실제 광학 물성을 고려하면서 태양열 발전의 열역학적 사이클 해석을 통한 연간 성능을 제시한 연구는 없다. 따라서, 본 연구에서는 광학 물성을 고려하기 위한 몬테카를로 광학 모델과 미국 solar electric generating station (SEGS) VI 발전소⁴⁾의 증기 동력 사이클 해석 모델을 적용하여 하이브리드 기술을 평가하는 방법을 제시하였다. 그리고, 국내 주요지역 기상데이터를 적용하여 제시된 하이브리드 기술의 발전량과 효율을 계산하였고, 동일한 규모의 태양광 발전 플랜트와 비교하여 국내 적용 가능성을 조사하였다.

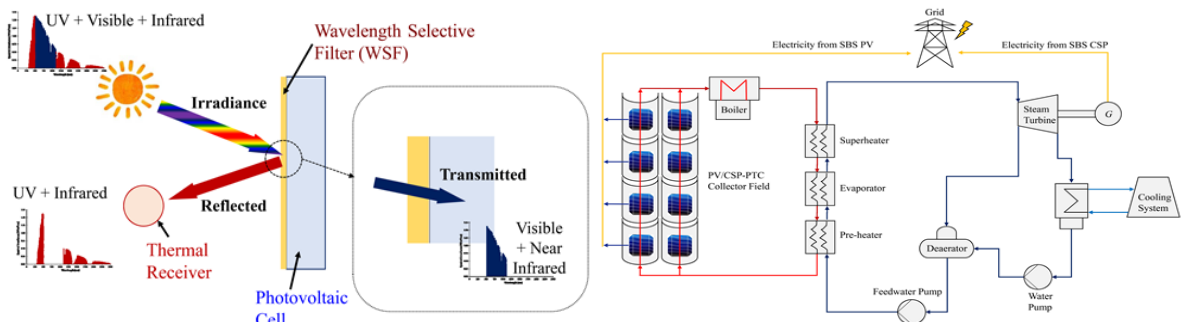


Fig. 1 Spectral splitting concept using the WSF and its application for the PV/CSP hybrid

2. 연구 방법

Fig. 1의 하이브리드 발전과 기존 태양열 발전의 차이는 반사판에 있다. 태양열 발전에서는 은 코팅을 이용한 구유형 반사판은 하이브리드 발전에서는 WSF로 코팅된 태양전지로 바뀐다. 태양전지는 WSF를 투과한 태양 복사를 이용해서 바로 전기를 생산하고, WSF에서 반사한 스펙트럼은 집광 후 열로 흡수되고 보조 보일러의 도움으로 증기 동력 사이클에 사용된다. 증기 동력 사이클은 미국 solar electric generating station (SEGS) VI을 바탕으로 설계하였다^{4,5)}. WSF는 700-1100 nm 투과 밴드를 갖도록 설계한 폴리머 필름을 적용한다고 가정하였다^{6,7)}. Fig. 2는 제작한 WSF의 광학 물성을 보여주고 있다. 설계와 달리 필름 자체의 흡수도 약 10% 정도 있고, 투과밴드도 입사각에 따라 변하는 특성을 나타내고 있다.

제안한 하이브리드 발전시스템의 태양광과 태양열 성능을 각각 평가하기 위해서는, 태양 복사에너지가 WSF의 광학 물성에 따라 투과와 반사에 의해 분리되는 과정을 모델링하여야 한다. 태양열 발전의 광학적 모델링으로 몬테카를로 방법이 널리 활용되고 있다. 몬테카를로 광선추적법은 복잡한 광학이나 복사 열전달 현상을 난수를 이용하여 확률적으로 접근하는 방법이다⁸⁾. 몬테카를로 광선추적법에서는 다수의 광선을 생성하여 반사나 투과와 같은 물리적 현상을 고려하면서 각각을 추적하고, 전체 광선의 추적결과를 바탕으로 모델링 결과를 도출한다. 기존의 몬테카를로 방법과 달리, 본 연구에서 스펙트럼 분리를 고려하기 위해서는 태양 복사 스펙트럼 분포를 만족하도록 다수의 광선을 샘플링해야 하고 각각의 광선은 파장에 대한 정보를 갖고서 Fig. 2의 광학 물성에 따라 확률적으로 투과와 반사로 분리된다. 개발한 광학 모델을 이용하여 WSF에 의한 투과와 반사로 분리된 태양 복사 에너지를 가중치 함수(W_{PV} 및 W_{TH})로 표현하였다⁹⁾.

광학 해석 결과인 가중치 함수를 태양광 발전과 태양열 발전 각각의 효율을 예측하는 해석식에 적용하였고, 효율식은 아래와 같이 표현된다. 여기서, η_{ref} , β , T_{cell} , T_{STC} 는 각각 표준조건 효율(19%), 온도계수(-0.4%/°C), 셀 온도, 표준조건 셀 온도 (25°C)이다. 또한, F_R , η_{cycle} , α_r , τ_g , A_r , U_L , $T_{m,i}$, T_a 는 각각 열제거율, 열역학 사이클 효율, 집열기 반사율, 집열기 유리 투과율, 집열기 표면적, 집열기 총괄 열전달 계수, 집열기 매체 입구 온도, 대기 온도이다.

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \{ W_{PV} + \beta(T_{cell} - T_{STC}) \} \frac{G_{\tau}}{G} \tag{1}$$

$$\eta_{CSP} = \frac{\eta_{cycle} F_R \{ A_a W_{TH} G_b \alpha_r \tau_g - A_r U_L (T_{m,i} - T_a) \}}{A_a G} \tag{2}$$

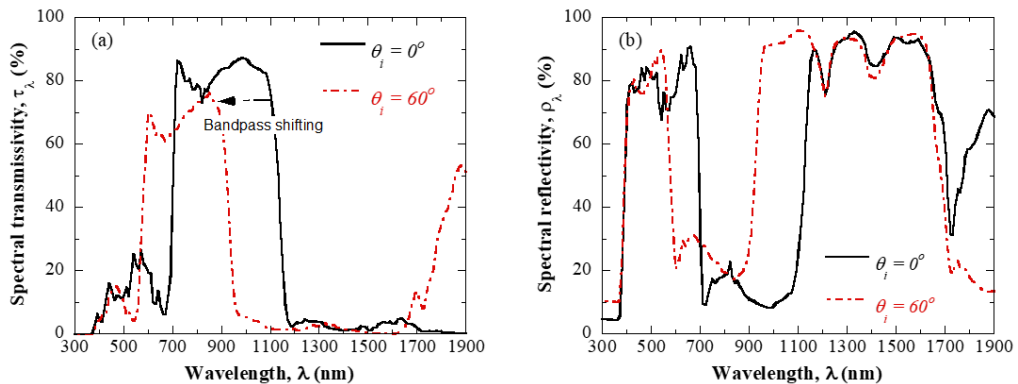


Fig. 2 Spectral optical properties of the studied WSF⁶⁾: (a) transmissivity and (b) reflectivity

국내 주요지역에 제안된 하이브리드 발전소가 건설된다고 가정하고, 위 방법을 바탕으로 표준기상년도 (TMY, typical meteorological year) 데이터를 사용하여 연간 성능을 계산하였다¹⁰⁾. Fig. 3은 서울, 대전, 대구,

광주, 제주 지역의 월간 일사량 데이터를 나타낸다. 수평면 전천일사량(GHI, global horizontal irradiance)은 거의 유사한 분포를 보여주고 있는 데 비해, 법선면 직달일사량(DNI, direct normal irradiance)은 지역에 따라 차이를 나타내고 있다. 국내 기후 특성으로 인해 전반적으로 전천일사량이 직달일사량보다 많고, 태양광 발전이 태양열 발전보다 유리한 조건임을 알 수 있다.

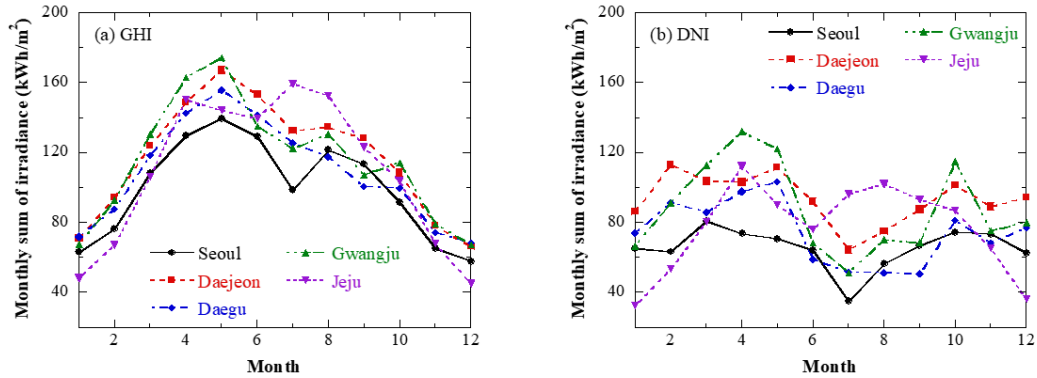


Fig. 3 Solar irradiance in major Korean cities: (a) global horizontal irradiance and (b) direct normal irradiance

3. 결과 및 토의

개발한 평가방법을 검증하기 위해, 실리콘 결정질 태양전지에 WSF를 코팅하고 라미네이션을 진행하여 샘플을 제작하였다. 제작한 태양전지 10개를 직렬로 연결하고, 대기온도 5~8°C의 야외조건에서 발전량을 측정하였다. Fig. 4는 일사량 변화에 따른 측정된 태양전지 발전량과 개발한 해석 방법을 이용하여 계산한 발전량의 비교를 보여주고 있다. 평균적으로 3% 정도 오차 범위에서 실험 결과와 잘 일치하였고, 이는 광학 모델과 태양광 성능 모델이 적합함을 증명하고 있다. 태양열 성능 모델은 실질적인 발전 플랜트 구현이 어려우므로, WSF가 없는 조건에서 태양열 발전소 운전 데이터⁵⁾와 비교를 통해 자체적으로 검증하였다.

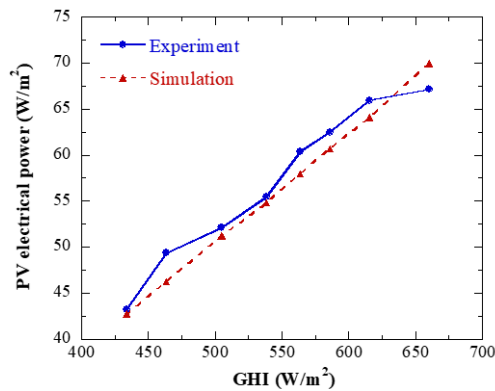


Fig. 4 PV power comparison between simulation and experiment

Fig. 5는 제안된 하이브리드 발전소에서 두 개의 하부 시스템 - PV와 CSP의 월별 발전량을 각각 보여준다. 월별 발전량의 변화는 Fig. 3에서 제시된 월별 일사량의 변화와 유사하다. 봄과 가을에 직달일사량이 높아 태양열 발전량이 많고, 태양광 발전량도 높은 경향을 보인다. 여름에는 태양광 발전량이 높은 대기 온도로 인해 일사량과 비교하면 발전량이 상대적으로 낮다. 즉, 효율이 다른 계절에 비해 낮다.

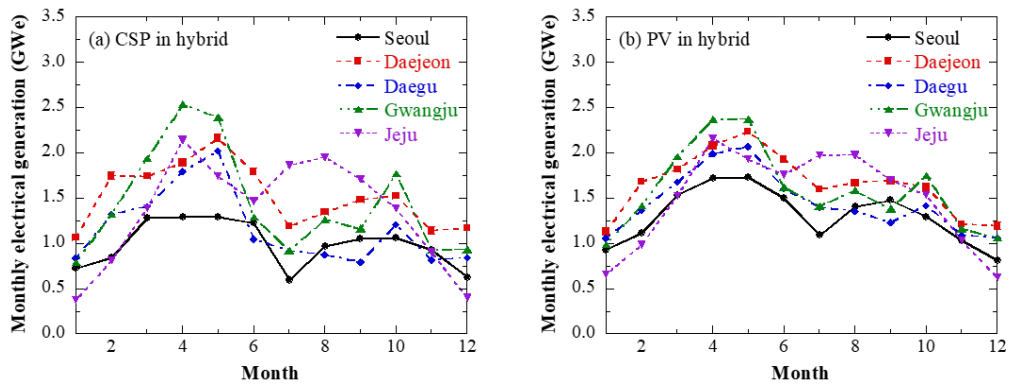


Fig. 5 Monthly power generation of the proposed hybrid plant: (a) concentrated solar power and (b) solar photovoltaic power

하이브리드 시스템의 연간 발전량과 효율은 Fig. 6에 제시하였다. 평균적으로 일사량이 낮으므로 서울에 있는 시스템의 발전량이 가장 낮다. 태양광과 태양열 두 시스템의 합산 연간 발전량은 대전에서 가장 높았고, 광주, 제주가 그 뒤를 이었다. 효율 측면에서 하이브리드 태양열 발전의 연간 효율은 제주(6.94%)에서 가장 높았고, 대전(6.83%), 광주(6.73%), 대구(5.87%), 서울(5.53%) 순으로 나타났다. 태양광 발전의 연간 효율은 모든 지역에서 거의 동일하며, 가장 높은 곳은 제주(7.68%), 가장 낮은 곳은 서울(7.27%)이다.

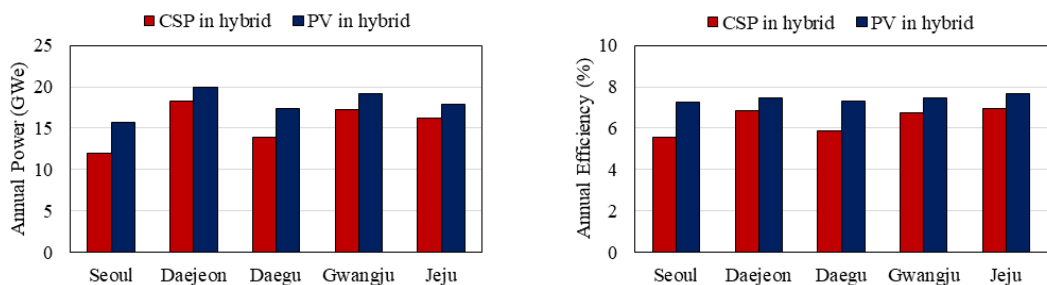


Fig. 6 Annual performance of the proposed hybrid plant: (a) power generation and (b) efficiency

Fig. 7은 하이브리드 시스템의 태양광과 태양열 발전량을 모두 고려한 효율을 보여준다. 그리고, 하이브리드 기술의 성능 비교를 위해서 동일한 규모의 단독 태양광 발전소의 효율도 같이 도시하였다. 단독 태양광 발전의 효율은 지역별로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 하이브리드 발전의 효율은 도시별로 다소 차이가 있고, 모든 도시

에서 단독 태양광 발전보다 낮은 효율을 보인다. 제안된 하이브리드 기술이 국내에서는 기존 태양광 발전 대비 효율 측면에서는 나은 성능을 보여주지 못하고 있다. 우선, 국내에서 직달일사량이 풍부하지 않아 태양열 발전이 효과적이지 못하기 때문이다. Fig. 2에서 광학 물성이 보여주듯이, 본 연구의 WSF는 700-1100 nm 투과 밴드를 갖도록 제작되었다. 태양광 발전의 효율 향상뿐만 아니라 태양열 발전을 통한 열저장을 염두에 두고, 700 nm 태양 스펙트럼도 반사하여 태양열 발전에 사용할 수 있도록 하였다. 하지만, 국내에서는 낮은 태양열 발전량으로 인해 과도하게 반사되도록 설계되었다. Fig. 7에는 미국 피닉스의 성능 비교도 같이 제시되었다. 피닉스 처럼 직달일사량이 높은 지역에서는 제시된 하이브리드가 단독 태양광 발전보다 더 높은 효율을 낼 수 있다. 또한, Fig. 2의 광학 물성은 WSF가 완벽하지 않음을 보여주고 있다. 제작된 WSF의 내부 흡수율은 10% 정도의 일사량 손실을 초래하였고, 입사각에 따른 투과 밴드의 이동도 태양광과 태양열 사이의 스펙트럼 분리를 설계대로 이루지 못하는 요인이 되었다.

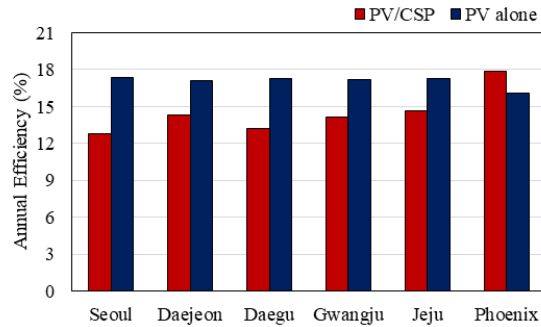


Fig. 7 Comparison of annual efficiency with existing PV system

4. 결론

파장 선택적 필터를 이용하여 태양 스펙트럼을 분리하고, 분리된 스펙트럼을 태양광 발전과 태양열 발전에서 각각 활용하는 하이브리드 시스템의 성능을 국내 주요 도시 기상데이터를 바탕으로 분석하였고, 결론은 다음과 같다.

- (1) 제안된 하이브리드 시스템의 연간 최대 발전량은 대전에서 가능하며, 이는 서울지역보다 태양광과 태양열 각각 27%, 53% 높은 발전량이다.
- (2) 국내에서, 해외에서 높은 직달일사량을 갖는 지역과 달리, 제안된 하이브리드 시스템의 연간 성능은 단독 태양광 발전보다 낮기 때문에 국내에 적용하기 위해서는 파장 선택적 필터의 투과 밴드를 변경하거나 내부 흡수율을 줄이는 추가적인 노력이 필요하다.
- (3) 국내에서는 제안된 하이브리드 기술은 발전 효율을 증대시키는 관점보다는 태양열 발전의 장점인 열저장과 연계한 안정적인 태양 에너지 활용 관점에서 접근하는 것이 바람직하다.

후기

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(NRF-2016R1A2B4012875, 2018M1A3A3A02065823)입니다.

REFERENCES

1. Jiang, S., Hu, P., Mo, S., and Chen, Z., Optical Modeling for a Two-stage Parabolic Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal System Using Spectral Beam Splitting Technology. *Sol Energy Mater Sol Cells*. Vol. 94, No. 10, pp. 1686-1696, 2010.
2. Crisostomo, F., Taylor, R. A., Surjadi, D., Mojiri, A., Rosengarten, G., and Hawkes, E. R. Spectral Splitting Strategy and Optical Model for the Development of a Concentrating Hybrid PV/T Collector. *Appl Energy*. Vol. 141, pp. 238-246, 2015.
3. Ulavi, T. U., Davidson, J. H., and Hebrink, T., Analysis of a Hybrid PV/T Concept Based on Wavelength Selective Mirror Films. *J Sol Energy Eng*. Vol. 136, No. 3, p. 31009, 2014.
4. Kearney, D. A., Solar Electric Generating Stations (SEGS). *IEEE Power Eng Rev*. Vol. 9, No. 8, pp. 4-8, 1989.
5. Cohen, G. E., Kearney, D. W., and Kolb G. J., Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA; 1999.
6. Fisher, K. C., Yu, Z. J., Striling, R., and Holman, Z., PVMirrors: Hybrid PV/CSP Collectors That Enable Lower LCOEs. *AIP Conf Proc*. Vol. 1850, No. 1, 20004, 2017.
7. Yu, Z. J., Fisher, K. C., and Holman Z., Evaluation of Spectrum-splitting Dichroic Mirrors for PV Mirror Tandem Solar Cells. *Photovolt Spec Conf (PVSC)*, 2015 IEEE 42nd. pp. 1-4, 2015.
8. Lee, H. J., Chai, K. K., Kim, J. K., Lee, S. N., Yoon, H. K., Yu, C. K., and Kang, Y. H., Optical Performance Evaluation of a Solar Furnace by Measuring the Highly Concentrated Solar Flux. *Energy*. Vol. 66, pp. 63-69, 2014.
9. Liew, N. J. Y. and Lee, H. J., Numerical Analysis of Hybrid Photovoltaic-thermal Systems Utilizing Different Spectral Bandpass Filters. *Renew Energy*. Vol. 144, pp. 15-29, 2019.
10. Lee, H. J., Kim, S. Y., and Yun, C. Y., Generation of Typical Meteorological Year Data Suitable for Solar Energy System and Analysis of Solar Irradiance Data, *New & Renewable Energy*. Vol. 13, No. 3, pp. 24-33, 2017.