

쿨링패치 부착에 따른 태양광-열전 융합소자의 성능 연구

Effect of cooling patches on performance of photovoltaic-thermoelectric hybrid energy devices

이재환*, 조경아*, 박윤범*, 김상식**

Jaehwan Lee*, Kyoungah Cho*, Yoonbeom Park*, Sangsig Kim**

Abstract

In this study, we examine the availability of a cooling patch to enhance the output power of a hybrid energy device (HED) comprising a photovoltaic cell (PVC) and a thermoelectric generator (TEG). The cooling patch attached on the back of the TEG drops the temperature of the PVC via the TEG and makes a large thermal gradient across the TEG under irradiances in a range of 200 to 1000 W/m². The cooling patch is more effective for the output power of the HED as the irradiance increases, and it enhances the maximum output power of the HED to 42.1 mW at an irradiance of 1000 W/m². The increment in the maximum output power reaches 27% owing to the attachment of the cooling patch that does not consume any power.

요약

본 연구에서는 태양광소자와 열전소자로 이루어진 에너지 융합 발전소자에 쿨링패치를 적용하고 에너지 융합 발전소자의 성능을 조사하였다. 쿨링패치를 열전소자의 뒷면에 부착하였을 때, 에너지 융합 발전소자의 상층에 위치한 태양광소자의 온도가 저하되고 열전소자 양단의 온도차는 증가되었다. 태양광 복사 조도를 200 W/m²부터 1000 W/m²까지 증가시키면서 에너지 융합 발전소자의 성능을 측정해본 결과, 쿨링패치는 태양광의 조도가 증가할수록 에너지 융합 발전소자의 성능 향상에 효과적이었고 1000 W/m²에서는 42.1 mW까지 융합소자의 최대 출력 전력이 증가하였다. 본 연구에서는 쿨링패치를 에너지 융합 발전소자에 부착함으로써 에너지 융합 발전소자의 출력 전력이 27% 이상으로 증가하는 것을 확인하였다.

Key words : Hybrid energy device, Photovoltaic cell, Thermoelectric generator, Cooling patch, Output power

1. 서론

최근 태양광소자와 열전소자로 이루어진 융합소자는 신재생 에너지 발전소자로 주목받고 있다. 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 효율을

증대시키기 위해 고안된 융합 발전소자는 열전소자를 태양광소자의 아랫면에 부착하여 제작된다[1, 2]. 에너지 융합 발전소자에 태양광 에너지가 조사되면, 위쪽에 위치한 태양광소자와 아래쪽에 위치한 열전소자가 각각 광전지효과와 제백효과에 의

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University

★, ★★ Corresponding author

E-mail : chochem@korea.ac.kr, sangsig@korea.ac.kr, Tel : +82-2-3290-3909

※ Acknowledgment

This study was supported in part by the Technology Development Program to Solve Climate Change (NRF-2017M1A2A2087323), and the Brain Korea 21 Plus Project, 2021, and Korea University Grant.

Manuscript received Nov 30, 2021; revised Dec. 22, 2021; accepted Dec. 27, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해 전력을 생산한다. 에너지 융합 발전소에서 열전소자의 성능은 열전소자 양단의 온도 차에 의해 결정되며, 양단의 온도 차가 클수록 더 큰 제백 전압이 생성된다. 열전소자 상단은 태양광소자의 뒷면과 계면을 두고 맞닿아있어 태양열이 계면을 통해 태양광소자에서 열전소자로 전달된다. 따라서 높은 열전도도를 가진 계면 물질을 통해 열전소자의 성능을 향상시켜 융합소자의 출력전력을 증가시킬 수 있다[3, 4]. 또한 지금까지는 열전소자 양단에 더 큰 온도 차를 만들기 위해 전력이 소비되는 수냉이나 공냉 쿨링 시스템을 열전소자 하단에 적용시켜 왔으나[5, 6], 이러한 방식은 전력을 소모한다는 측면에서 불리하다. 그러므로 본 연구에서는 냉각 지속성은 수냉이나 공냉 쿨링 시스템보다 떨어지지만, 외부 전원을 사용하지 않아 소모 전력이 없으며 부피가 작아 집적도가 뛰어난 쿨링패치를 적용하여 열전소자 뒷면의 온도를 낮추고 이에 따른 융합소자의 성능을 분석하였다. 본 연구에서는 계면 물질로써 hexagonal-boron nitride(h-BN)와 carbon paste 혼합물을 이용하였다.

II. 본론

1. 실험방법

그림 1은 c-Si 태양광소자, 계면 물질, 그리고 열전소자로 이루어진 융합소자의 구조와 회로도이다. 융합소자의 크기는 2.0cm(가로) × 2.0cm(세로) × 5.2mm(두께; 태양광소자(0.2 mm), 계면 물질(1.0 mm), 열전소자(4.0 mm) 두께의 합으로 나타난다)이고 c-Si 태양광소자는 이전 연구를 바탕으로 제작되었으며[7], 1Ω의 내부저항 R_{TE} 와 7.7 mV/K의 제백계수를 가지는 열전소자는 Peltier system Co. Ltd에서 구매하였다. 계면 물질로는 높은 열전도도를 가진 h-BN과 흡광도가 높고 접착력이 좋은 carbon paste를 무게비 1:10으로 섞은 혼합물이 사용되었다. 무게비 1:10 보다 h-BN을 더 많이 섞었을 때에는 접착력이 떨어져 계면 물질로 적합하지 않았다. 이 혼합물을 스크린 인쇄 기법으로 열전소자에 도포한 후에 태양광소자를 위에 부착하는 방식으로 에너지 융합 발전소자를 제작하였고, 계면 물질을 균히기 위해 가열판 위에 2시간 동안 70°C로 가열하였다. 쿨링패치는 Kokubo & Co. Ltd에서 구입하였으며 열전소자의 뒷면에 부착하였다. 직렬 저항

과 병렬 저항 값은 각각 0.8Ω과 500Ω이다. 열확산법으로 측정된 계면 물질의 열전도도는 약 315.4 mV/K이다. 융합소자의 온도는 type K thermocouple (TC)를 태양광소자의 상하부(TC1, TC2)와 열전소자의 상하부(TC3, TC4)에 부착하여 측정하였다. 에너지 융합 발전소자의 상층에 위치한 태양광 소자의 전기적 특성은 태양광 효율 분석기(PROVA-200A, PROVA)를 이용하여 측정하였으며, 열전소자의 제백전압은 전압계를 이용하여 측정하였다. 융합소자에 태양광을 가하기 위해서 태양광 시뮬레이터(XG-100E, Xelios)를 태양광 에너지원으로 사용하였고 태양 복사 조도는 일사계(MS-40, EKO instrument co., Ltd.)를 이용하여 측정하였다.

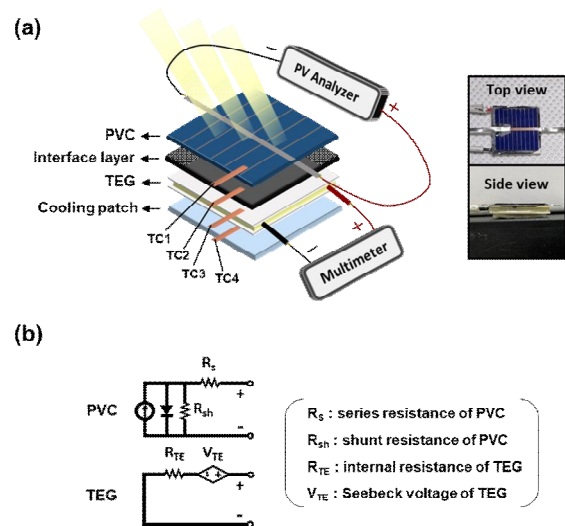


Fig. 1. (a) Schematic, optical image and (b) circuit diagram of a HED with cooling patch.

그림 1. 쿨링패치가 부착된 융합소자의 (a) 구조, 사진과 (b) 회로도

2. 결과 및 토의

그림 2는 에너지 융합 발전소자에 쿨링패치를 부착하지 않았을 때(a)와 부착했을 때(b) 태양광소자의 전류-전압 곡선을 복사 조도 200 1000 W/m²부터 1000 W/m²의 범위에서 나타낸 것이다. 단락회로 전류 I_{SC} 는 쿨링패치의 부착 여부와 관계없이 조도가 200 W/m²부터 1000 W/m²까지 증가함에 따라 15 mA부터 99 mA까지 증가하였다. 하지만 동일한 조도에서 쿨링패치에 의한 I_{SC} 의 변화는 측정되지 않았다. 반면에, 개방회로 전압 V_{OC} 은 조도의 증가와 더불어 쿨링패치의 부착에 따라 증가하는 것을 확인하였다. 조도가 200 W/m²일 때는 쿨

링패치 부착에 따른 V_{OC} 의 변화가 미미했지만 조도가 1000 W/m^2 일 때는 V_{OC} 가 0.543 V 에서 0.563 V 로 증가하였다. 이는 태양광 소자의 온도가 쿨링패치 부착으로 인해 감소함에 따라 태양광소자의 개방 전압, 그리고 이에 따른 변환 효율이 증가하기 때문이다[8, 9]. 조도 1000 W/m^2 에서 쿨링패치의 부착으로 인해 태양광소자의 온도가 약 9°C 감소함을 확인하였고, 조도가 200 W/m^2 일 때는 온도가 약 3°C 정도 감소하였다는 것을 고려하면 복사조도가 증가할수록 쿨링패치 부착으로 인한 태양광소자의 온도 감소 폭이 증가하며 이에 따라 V_{OC} 의 증가 폭도 증가하는 것을 알 수 있다.

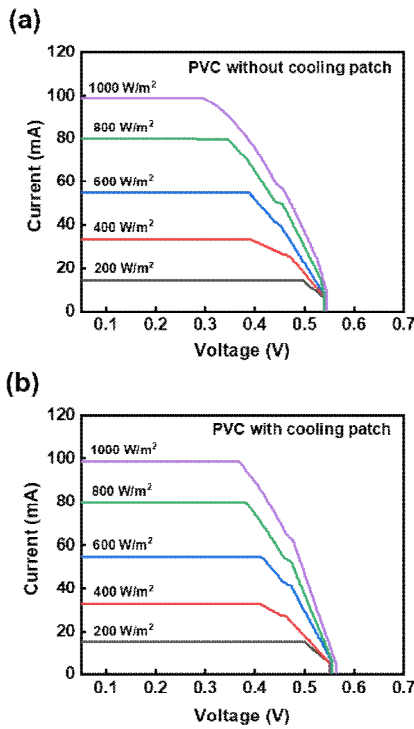


Fig. 2. I-V curves of the PVCs in the HEDs (a) without cooling patch and (b) with cooling patch.

그림 2. (a) 쿨링패치를 부착하지 않았을 때와 (b) 부착했을 때 에너지 융합 발전소자 상층에 위치한 태양광소자의 I-V 곡선

그림 3은 에너지 융합 발전소자에서 태양광 조도에 따른 열전소자의 제벡전압을 나타낸 그래프이다. 태양광소자와 비교하여 열전소자는 태양광 조도가 낮을 때에도 쿨링패치 부착 효과가 두드러지게 나타났다. 태양광 조도가 200 W/m^2 일 때는 쿨링패치 부착으로 인해 TC3와 TC4의 차이인 ΔT 가 약 1.3°C 에서 2.8°C 로 증가하였고, 1000 W/m^2 에서도 6.1°C 에서 11.8°C 로 증가하여 조도와 관계없

이 약 2배 정도 증가하는 것을 확인하였다. ΔT 에 비례하여 제벡전압 V_{TE} 도 쿨링패치를 부착함에 따라 200 W/m^2 에서는 10.2 mV 에서 18.2 mV 로, 1000 W/m^2 에서는 47.3 mV 에서 89.9 mV 로 증가하였다.

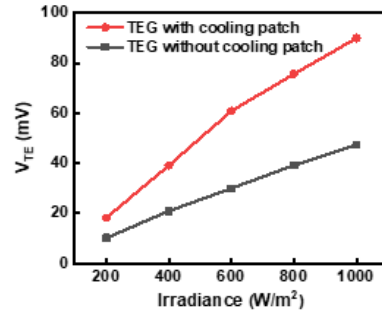


Fig. 3. Seebeck voltages of TEGs in the HEDs without or with cooling patch at irradiances of $200\sim 1000 \text{ W/m}^2$. 그림 3. 조도 $200 \text{ W/m}^2\sim 1000 \text{ W/m}^2$ 에서 쿨링패치 부착 여부에 따른 에너지 융합 발전소자 내 열전소자의 제벡 전압

그림 4는 에너지 융합 발전소자에서 태양광 조도에 따른 태양광소자의 최대 출력 전력(a), 열전소자의 최대 출력 전력(b), 그리고 에너지 융합 발전소자의 최대 출력 전력(c)을 쿨링패치의 유무에 따라 나타내었다. 태양광소자의 최대 출력 전력 P_{\max_PVC} 는 그림 2의 I-V 특성에서 최대 출력 전력을 가지는 I, V값을 추출하여 계산된 값이다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 태양광 조도가 증가할수록 태양광소자에서 쿨링패치 부착효과가 두드러지게 나타난다는 것을 알 수 있다. 태양광 조도가 200 W/m^2 일 때는 쿨링패치 부착에 따른 P_{\max_PVC} 의 변화를 보이지 않았지만, 1000 W/m^2 일 때 P_{\max_PVC} 는 쿨링패치 부착을 통해 32.5 mW 에서 40.1 mW 로 23% 넘게 태양광소자의 최대 출력 전력이 증가하였다. 쿨링패치 부착을 통해 태양광소자의 온도 저하가 클수록 태양광소자의 출력전력이 더 많이 증가되는 것을 확인하였다. 태양광소자 외에 에너지 융합 발전소자 내에서 또 하나의 전력 생산을 담당하는 열전소자의 최대 출력 전력 P_{\max_TEG} 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_{\max_TEG} = \frac{V_{TE}^2}{4R_{TE}} \quad (1)$$

태양광 조도가 1000 W/m^2 일 때 에너지 융합 발전소자에 쿨링패치를 부착함으로써 P_{\max_TEG} 는 0.6

mW에서 2.0 mW로 증가하였다.

III. 결론

본 연구에서는 태양광-열전 에너지 융합 발전소자의 출력 전력을 향상시키기 위한 방법으로 쿨링패치 적용을 제시하였다. 열전소자 뒷면에 부착된 쿨링패치는 200 W/m²부터 1000 W/m²에 이르는 태양광 조도에서 에너지 융합 발전소자의 온도를 전반적으로 낮추었다. 쿨링패치 부착을 통해 태양광소자의 온도를 낮추고 열전소자 양단의 온도차를 크게 하여 에너지 융합 발전소자의 출력 전력이 증가되었다. 특히 태양광 조도가 1000 W/m²에서는 쿨링패치를 부착함으로써 에너지 융합 발전소자의 최대 출력 전력이 27% 이상으로 향상되었고, 이를 통해 외부로부터 전원을 연결하지 않고도 쿨링패치를 이용해 에너지 융합 발전소자의 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

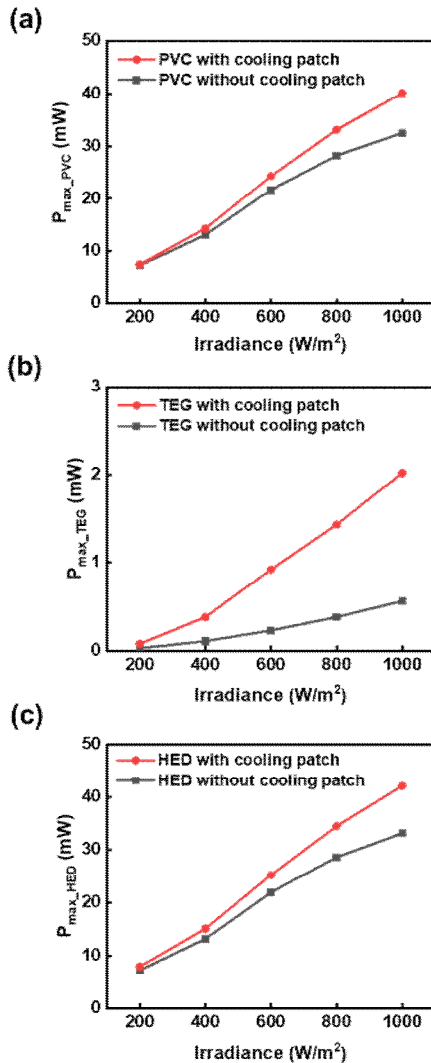


Fig. 4. Maximum output power of (a) PVC, (b) TEG, and (c) the HED without or with the cooling patch at irradiances in the range of 200 to 1000 W/m².

그림 4. 조도 200 W/m²~1000 W/m²에서 쿨링패치 부착 여부에 따른 (a) 태양광 소자, (b) 열전소자, (c) 융합소자의 최대 출력 전력

이에 따라 태양광소자와 열전소자 각각의 최대 출력 전력의 합으로 나타나는 에너지 융합 발전소자의 최대 출력 전력 P_{max_HED}은 쿨링패치 부착을 통해 낮은 태양광 조도인 200 W/m²에서도 4% 이상 향상되었고, 1000 W/m²에서는 27% 넘게 향상되었다. 태양광 조도가 높을 때 뿐만 아니라 태양광 조도가 낮을 때에도 P_{max_HED}가 향상된 것은 낮은 태양광 조도에서도 쿨링패치 부착을 통해 P_{max_TEG}가 증가하였기 때문이다.

References

- [1] Y. Li, S. Witharana, H. Cao, M. Lasfargues, Y. Huang, and Y. Ding, "Wide spectrum solar energy harvesting through an integrated photovoltaic and thermoelectric system," *Particuology*, vol.15, pp.39-44, 2014. DOI: 10.1016/j.partic.2013.08.003
- [2] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, and Y. Shi, "Enhanced performance of solar-driven photovoltaic-thermoelectric hybrid system in an integrated design," *Solar energy*, vol.88, pp.182-191, 2013. DOI: 10.1016/J.SOLENER.2012.12.002
- [3] E. Yin, Q. Li, and Y. Xuan, "Thermal resistance analysis and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system," *Energy Conversion and Management*, vol.143, pp.188-202, 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.004
- [4] Y. Park *et al.*, "Performance of Hybrid Energy Devices Consisting of Photovoltaic Cells and Thermoelectric Generators," *ACS applied materials & interfaces*, vol.12, no.7, pp.8124-8129, 2020. DOI: 10.1021/acsami.9b18652
- [5] S. Soltani, A. Kasaeian, H. Sarrafha, and D. Wen, "An experimental investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system with nanofluid

application,” *Solar Energy*, vol.155, pp.1033–1043, 2017. DOI: 10.1016/j.solener.2017.06.069

[6] W. Gu, T. Ma, A. Song, M. Li, and L. Shen, “Mathematical modelling and performance evaluation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system,” *Energy Conversion and Management*, vol.198, pp.111800, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111800

[7] J. Kim *et al.*, “Double antireflection coating layer with silicon nitride and silicon oxide for crystalline silicon solar cell,” *Journal of Electroceramics*, vol.30, no.1, pp.41–45, 2013. DOI: 10.1007/s10832-012-9710-y

[8] V. J. Fesharaki, M. Dehghani, J. J. Fesharaki, and H. Tavasoli, “The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency,” pp.20–21, 2011.

[9] P. Singh and N. M. Ravindra, “Temperature dependence of solar cell performance—an analysis,” *Solar energy materials and solar cells*, vol.101, pp.36–45, 2012. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.02.019

BIOGRAPHY

Jaehwan Lee (Member)



2021 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
2021~present : MS candidate in Electrical Engineering, Korea University.

Kyongah Cho (Member)



1993 : BS degree in Chemistry, Sungshin Women’s University.
1995 : MS degree in Physical Chemistry, Sungshin Women’s University.
2000 : PhD degree in Physical Chemistry, University of Tokyo.
2002~present : Research Professor, Korea University.

Yoonbeom Park (Member)



2015 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
2015~present : Ph.D. candidate in Electrical Engineering, Korea University.

Sangsig Kim (Member)



1985 : BS degree in Physics, Korea University.
1987 : MS degree in Solid State Physics, Korea University.
1996 : PhD degree in Applied Physics, Columbia University.

1996~1998 : Post-Doc, University of Illinois at Urbana-Champaign.

1998~1999 : Research Engineer, University of Illinois at Urbana-Champaign.

1999~present : Professor, Korea University