http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.5.362

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online) / ISSN 2508-5093(Print)

레이저 조사에 따른 실리콘 솔라셀의 출력 특성

이후승[a], 배한성[b], 김성범[c], 주윤재[d], 김정오[d], 노지환[d*]

Electric Power Charging of Silicon Solar Cells using a Laser

Hu-Seung Lee[a], Han-Sung Bae[b], Seongbeom Kim[c], Yun-Jae Joo[d], Jung-Oh Kim[d], Ji-Hwan Noh[d*]

[a] *Mechanical & Metallurgical Engineering Education, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea*
[b] *School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea*
[c] *Department of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University, 346, Joongang-ro, Samcheck, Gangwon-do, 25913, Korea*
[d] *Department of Laser & Electron Beam Application, Korea Institute of Machinery & Materials, 156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 27 May 2016
Revised 12 July 2016
Accepted 2 September 2016

Keywords:
Fiber laser
Silicon solar cell
Electric power charging
Power distribution

ABSTRACT

Recently, wireless charging systems have expanded their applications from household electrical appliances to outdoor activity devices. In wireless charging systems, solar cells have versatile advantages, such as abundant raw materials within the earth, reasonable prices of products, and highest power conversion efficiency. In this study, the photovoltaic effect between a silicon solar cell and a photon of infrared wavelength was simulated using a Shockley diode equation. A solar cell power charging system was then set up to: 1) clarify mechanisms of the charging interaction based on the photovoltaic effect with a laser source, and 2) verify interdependency of the parameters: laser settings and geometrical position between a solar cell and the laser. As was observed, the solar cell generates more power when the photon was irradiated uniformly, intensively, and vertically on the surface of the solar cell.

1. 서 론

최근 에너지에 대한 세계적인 관심이 확대됨에 따라서 이차전지 분야뿐만 아니라 친환경 설비를 통한 전력발전분야가 꾸준히 관심을 받고 있다. 그 중에서 태양에너지를 이용한 전력발전은, 그 에너지원이 거의 무제한적이고 간단한 설비만으로도 전력생산이 가능하다는 장점 때문에 가정이나 산업계의 전력원으로 많이 공급되고 있다. 이러한 태양에너지 전력생산에 있어서, 실리콘 솔라셀을 이용한 전력생산은 반영구적이고 재료의 손쉬운 수급이라는 장점에 의해 가장 널리 이용되고 있으며 관련 연구 또한 그 역사가 깊다. 최근 이러한 실리콘 솔라셀의 장점을 이용하여 기존에 사용되어오던 다파장을 가지고 있는 태양에너지를 이용한 발전에 더불어 단파장을 가지는 레이저를 이용한 전력공급에 까지 그 솔라셀의 적용범위가 확대되고 있다. 이러한 레이저 응용 솔라셀 전력공급의 연구에 있어 레이저 광학계의 설계가 복잡하고 비용이 고가이며 레이저 빔의 손실이 많은 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고자

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7915
Fax: +82-42-868-7431
E-mail address: njw733@kimm.re.kr (Noh Ji Hwan).

저가형 다이오드발진방식의 파이버 레이저를 별도의 광학계 없이 솔라셀에 조사, 그 레이저의 구동변수와 레이저와 실리콘 간의 위치 변수 등에 따른 전력발전 특성을 구성하여 비교하고 분석하였다.

2. 실험장치 구성 및 이론적 배경

2.1 실험장치 구성

본 연구는 저가형 레이저를 이용한 광학계 없는 솔라셀 발전 특성에 관한 연구로, 그 시스템 및 실험구성은 Fig. 1과 같다. 반도체 다이오드발진방식의 저가형 파이버레이저(BMWorks사 개발, 980 nm, NA=0.22, P_{max}=50 W)를 실리콘 솔라셀 (Sunpower사, Model No.: C20, QE: 98% @ 980 nm)에 직접 조사하고 이때의 전력 특성을 솔라모듈측정기(PROVA사, Model No. PROVA 210, resolution: 1 mV, 1 mA)를 통하여 측정하였다. 이 때, 레이저의 조사출력과 발진방식, 그리고 솔라셀과 레이저 간의 조사각도에 따른 출력 특성을 비교, 분석하였다.

2.2 관련이론

실리콘 솔라셀의 레이저 조사에 의한 전력발생 실험에 앞서, 레이저 조사에 따른 실리콘 솔라셀의 출력을 이론을 통하여 예측해 보았다[1-5]. 먼저 실리콘 솔라셀의 거동을 살펴보면, 조사되는 광에너지에 의한 전류발생은 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]-I_{ph} \tag{1}$$

여기서 I는 발생전류, I_0는 포화전류, q는 전자 한 개의 전하량, V는 발생전압, k는 볼츠만 상수, T는 주변온도, I_{ph}는 광전류로 표현된다. 또한 발생전력은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$P = V_a I \tag{2}$$

이를 바탕으로 솔라셀에서 발생하는 최대전력은 식 (3)으로 나타난다.

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_0\left(e^{qV_m/kt}-1\right)-I_{ph}+\frac{qI_0V_m}{kT}e^{qV_m/kT} \tag{3-1}$$

$$P_m = I_m V_m \cong -I_{ph}\left(1-\frac{kT}{qV_m}\right)\left(V_{OC}-\frac{q}{kT}ln\left(1+\frac{qV_m}{kT}\right)\right) \tag{3-2}$$

or

$$P_m = -I_{ph}\frac{E_m}{q} \tag{3-3}$$

한편 레이저에서 발생하는 광전류 분포의 경우, 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$P_s = P_{peak}\cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{w_o^2}\right) \tag{4}$$

위와 같은 식을 바탕으로, Fig. 2와 같이 실리콘 솔라셀의 면적을

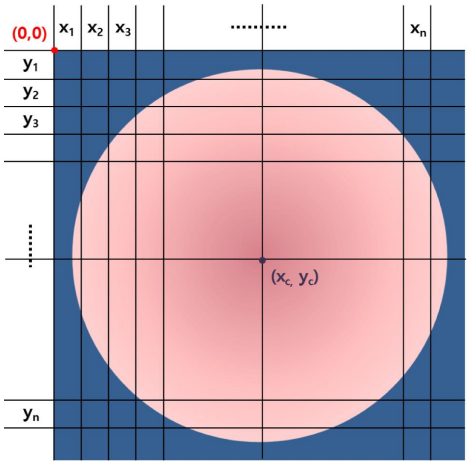

Fig. 2 Relative coordinate between solar cell and laser beam profile

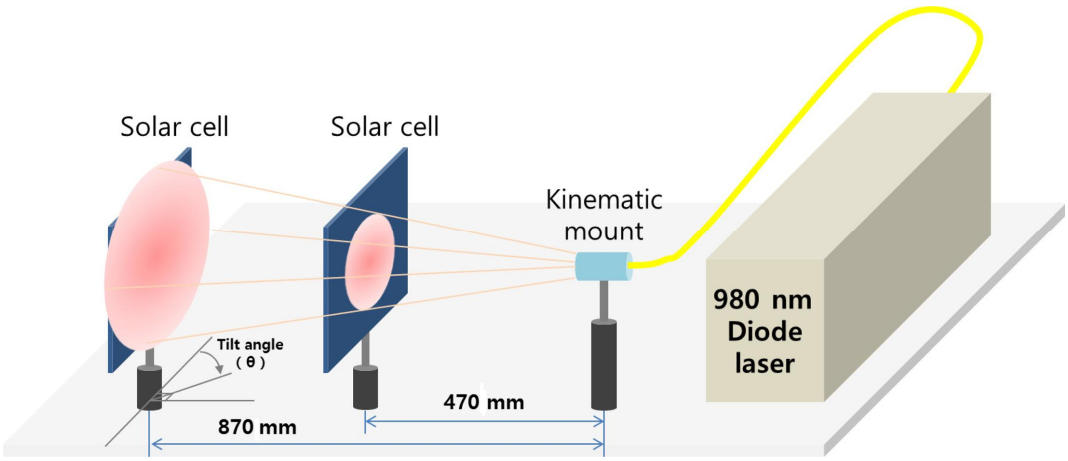

Fig. 1 Schematic of a solar cell and a laser beam configuration

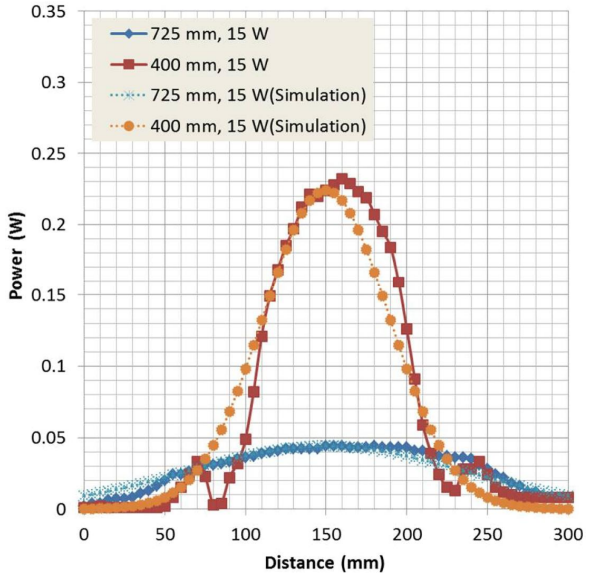

Fig. 3 Measurement of beam profile at the 15 W of laser power according to distance between laser and solar cell

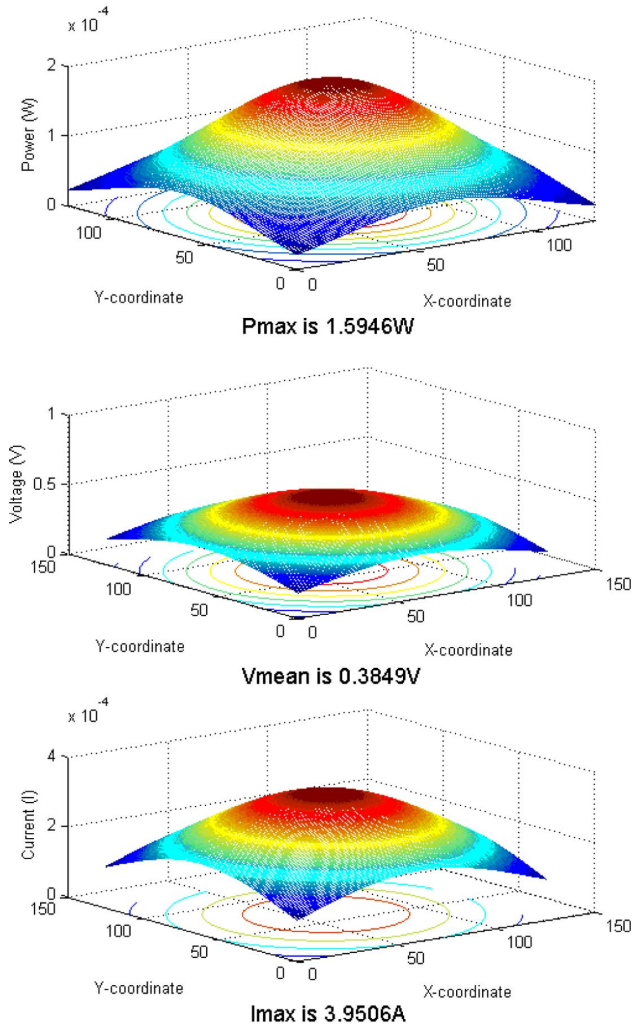

Fig. 4 Power distribution of silicon solar cell using a diode fiber laser with Gaussian profile

분할하여 가우시안 빔 분포에 따른 전력발생량을 식 (5)를 통하여 계산, 실리콘 솔라셀 충전 특성의 경향을 파악하였다.

$$P_m = \sum P_{x_i y_j} = \sum I_{x_i y_j} V_{x_i y_j}$$
$$= \sum \left(P_{peak} \cdot \exp\left(-\frac{2(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}{w_0^2} \right) \times \frac{q}{kT} ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \right) \quad (5)$$

여기서 가우시안 빔 분포는 파워미터를 이용하여 Fig. 3과 같이 측정한 값을 통하여 보정하였으며 다른 변수들은 PV analyzer를 통한 측정값을 대입하였다. 여기서, 400 mm 거리 빔의 중심반경 80 mm지점에 나타나는 출력 이상 패턴은 파이버 레이저의 멀티모드 빔들이 겹쳐지면서 발생하는 링 형상의 강도 분포이며, 빔이 진행하면서 자연스럽게 제거되는 패턴이다. 따라서 이를 무시하고 보정한 값을 대입한 결과, Fig. 4와 같은 실리콘 표면에서 거리에 따른 전력발생 분포를 확인할 수 있었다. 이는 실제 레이저 출력 15 W, 레이저와 솔라셀 간의 거리 400 mm에서 측정한 값인 최대출력 1.521 W, 최대출력에서의 전압 0.398 V, 최대출력에서의 전류 3.822A와 유사한 경향을 보였으며, 발생한 오차는 온도분포 측정오류 및 포화전류 측정 오류에 기인하는 것으로 판단된다.

3. 실험 및 고찰

위와 같은 이론을 바탕으로 실리콘 솔라셀의 레이저 충전 특성을 레이저의 변수 특성 및 레이저와 솔라셀 간의 조사변수 특성에 대하여 실험하고 이를 고찰하였다.

3.1 레이저 파형에 따른 솔라셀 출력 특성

먼저 레이저의 파형에 따른 기초 특성을 파악하였다. 레이저의 파형을 펄스모드(pulsed mode)와 연속파형모드(continuous wave mode)로 구분하여 비교하고 이에 더하여 레이저의 출력 및 레이저와 솔라셀 간의 거리에 따른 특성을 Fig. 5와 같이 비교하였다. 이는 저항이 없을 때의 전압을 시간에 따라 비교하여 출력이 안정영역으로 들어서는 시간을 알아냄과 동시에 여러 조건에 따른 솔라셀 양단에 걸리는 전계의 세기 차이를 파악하기 위함이다. 그 결과, 펄스레이저에 비해 연속파형레이저의 경우가 더 높은 전압 특성을 보이는 것을 알 수 있었으며, 같은 연속파형레이저의 경우, 레이저 출력이 높을수록 더 가파른 시간에 따른 전압 변화를 보였다. 하지만 Fig. 5(c)와 같이, 과도한 레이저 출력의 조사 시 최종 전압이 오히려 감소하는 효과를 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 과도한 에너지의 솔라셀 입력은 솔라셀 광전효과의 포화를 일으켜 결론적으로 출력 전압을 낮추는 효과를 가져 오는 것에 기인하는

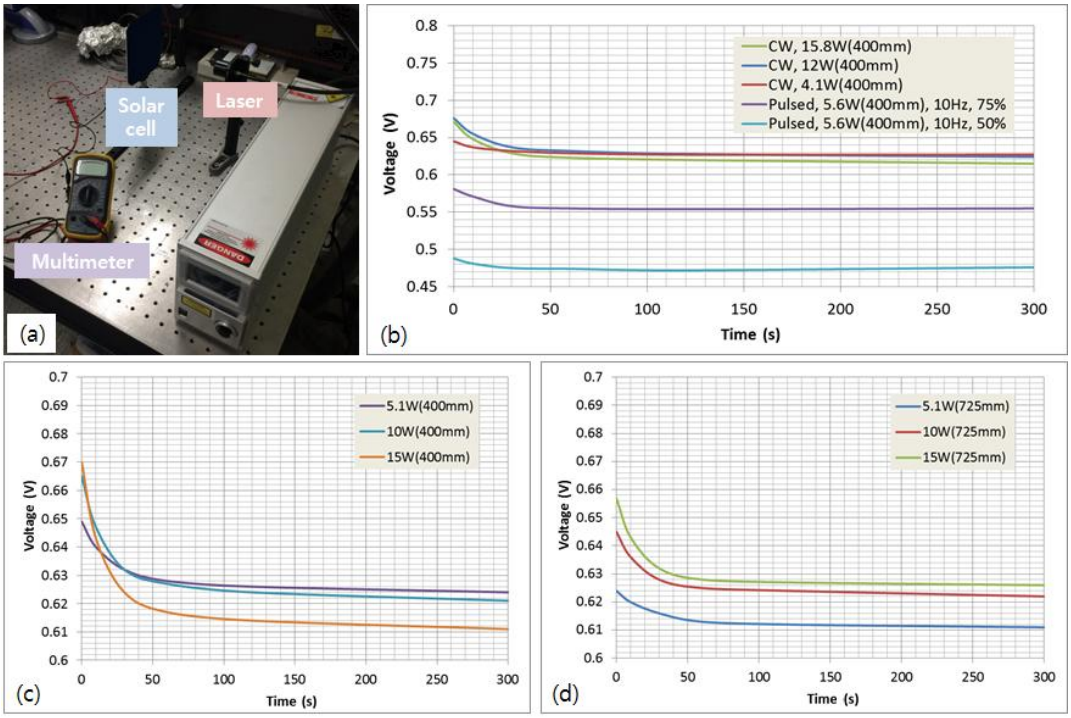

Fig. 5 (a) Solar cell laser system configuration. Voltage output according to time with (b) laser irradiation mode dependency (c, d) laser irradiation power dependency, and distance between laser and solar cell dependency.

것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로, 레이저의 출력 특성이 안정영역으로 수렴하는, 레이저 조사 시작으로부터 120초 이후에 전력 특성을 확인하였으며 비교적 높은 전압 특성을 보이는 연속파 형모드를 이용하여 실험을 수행하였다.

3.2 레이저 출력에 따른 솔라셀 출력 특성

일반적인 솔라셀 특성곡선과 같이, 입력되는 광 에너지의 크기에 따른 PV 특성곡선과 더불어, 레이저와 솔라셀의 거리에 따라 변하는 레이저 파형에 따른 PV 특성곡선을 Fig. 6과 같이 확인하였다. 그 결과, 솔라셀에 조사되는 광 에너지의 출력이 높을수록 솔라셀을 통하여 발생하는 출력이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 레이저와 솔라셀 간의 거리가 짧을수록 광 에너지 조사량에 따른 솔라셀의 최대출력 값의 변화가 적은 것을 알 수 있었다. 이는 거리가 멀어질수록 발생하는 레이저 조사 에너지의 손실과 더불어 높은 광 에너지 밀도에서는 레이저의 광 전력 변환효율이 떨어짐에 기인한 것임을 알 수 있다. 이를 바탕으로 각 조건별 솔라셀의 최대출력 및 에너지 변환효율 값을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 조사되는 광 에너지가 커질수록 솔라셀의 최대출력 값은 커지나 그 변환효율은 점점 줄어들어 21 W의 조사 출력에서는 에너지 변환효율이 약 5~8%로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이는 실리콘 솔라셀의 광전효과 포화량을 넘어서는 에너지가 조사됨에 기인한 것으로 판단된다.

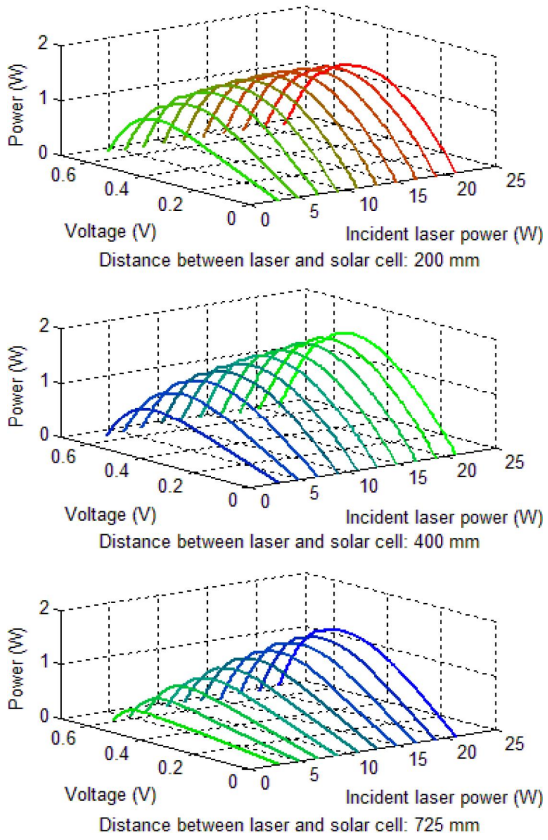

Fig. 6 Power-voltage curve of the silicon solar cell according to incident laser power and distance between laser and solar cell

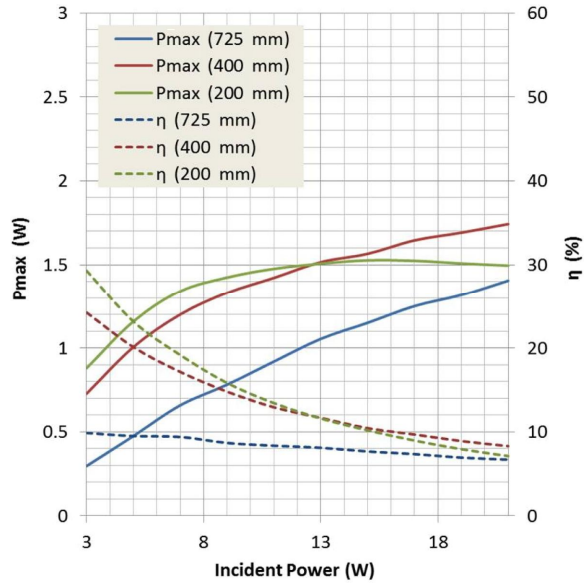

Fig. 7 Maximum output power and photo-electric power conversion efficiency according to incident laser power and distance between laser and solar cell

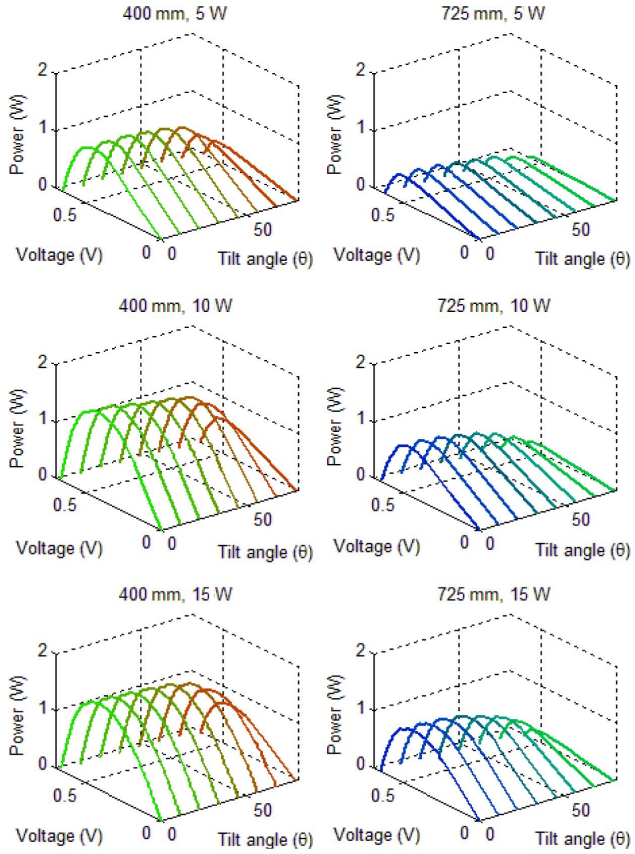

Fig. 8 Power-voltage curve of the silicon solar cell according to incident laser power and angle between laser and solar cell

3.3 레이저 조사각도에 따른 솔라셀 출력 특성

마지막으로 솔라셀과 레이저 간의 조사각도에 따른 솔라셀 출력 특성을 Fig. 8과 같이 파악해보았다. 앞의 실험에서 알 수 있듯이, 725 mm의 거리에서는 400 mm의 거리에서의 비해 평균적인 최대 출력 값이 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 레이저 빔의 확산에 의한 자연적인 현상이라고 할 수 있다. 또한 그림 9와 같이, 각도에 따른 출력 특성의 경우, 약 0~50°의 각도에서는 각도에 따른 출력 특성곡선의 차이가 비교적 적은 반면에 그 이상의 각도에서는 출력이 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이는 조사되는 레이저의 입사각이 커지더라도 그 전체적인 광 에너지가 솔라셀에 전달되기만 한다면 전체적인 솔라셀 출력 특성에는 큰 변화가 없다는 것을 말하며, 조사각도에 의한 광 에너지의 손실이 출력 감소의 주요한 요인이 된다는 것을 말한다.

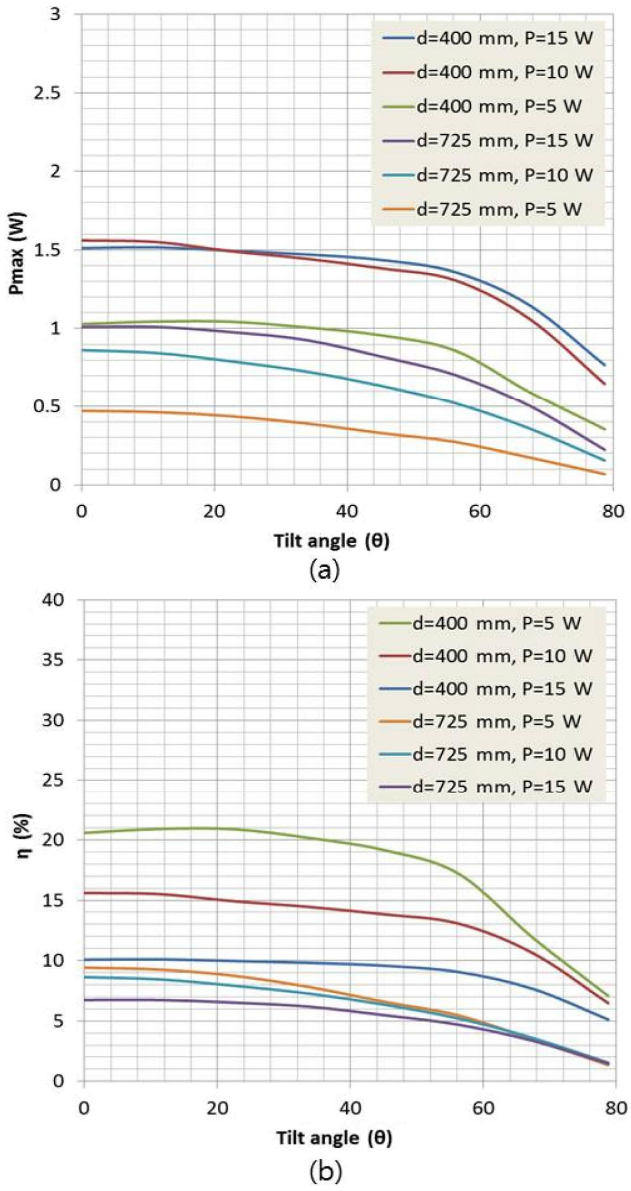

Fig. 9 Maximum output power and photo-electric power conversion efficiency according to incident laser power and angle between laser and solar cell

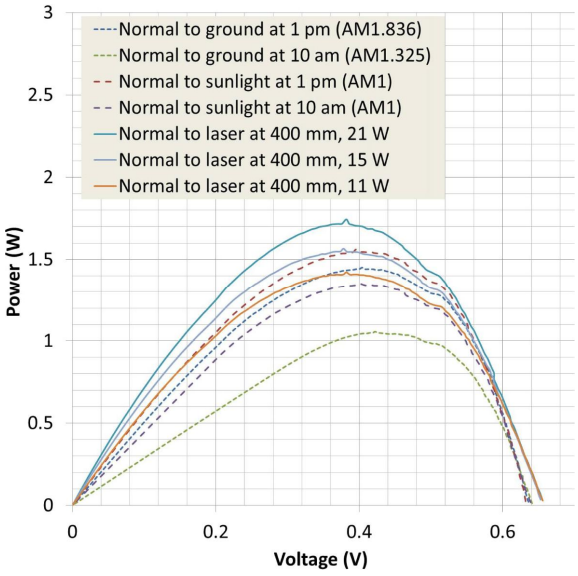

Fig. 10 Solar cell laser electric power charging comparison with solar energy

3.4 태양에너지와의 솔라셀 출력 특성 비교

위와 같은 특성을 가지는 다이오드 레이저를 이용한 솔라셀 충전 특성을 실제 태양에너지와 비교, 다이오드 레이저의 솔라셀 전력충전 실효성을 검증하였다. 그 결과, Fig. 10과 같이 실제 태양에너지와 비교하였을 때, 태양에너지를 1,000 W/m^{2}로 가정하면 약 15 W의 출력이고, 이에 해당하는 광 에너지를 비교해보면 이는 유사하거나 더 높은 출력 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

최근 에너지 분야에 대한 관심과 더불어 실리콘 솔라셀에 대한 사회적 요구와 수요는 갈수록 커지고 있다. 본 논문에서는 이러한 실리콘 솔라셀을 이용하여 간단한 저가형 레이저를 통한 전력 특성을 확인해보았다. 그 결과, 펄스모드의 광 에너지보다는 연속파형 모드의 광 에너지에서 더 우수한 전압 특성을 보였으며, 그 연속파형 모드의 솔라셀 조사에 있어서, 조사에너지가 클수록 출력되는 전력은 커지지만 효율은 떨어지는 특성을 확인하였다. 또한 조사되는 거리가 멀어 누설되는 광 에너지가 많아질수록 출력 특성이 떨어지는 것을 확인하였으며, 광 에너지의 입사량이 같으면 총 출력 에너지에는 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다. 또한 최대효율은 5 W의 레이저 출력에서 20%의 광전효율을 나타내었고, 최대출력의 경우, 15 W의 레이저 출력에서 약 1.5 W의 광전효과에 의한 솔라셀 전력을 얻어낼 수 있었다. 최종적으로 이러한 저가형 레이저를 이용한 솔라셀 전력과 15 W의 태양에너지를 이용한 솔라셀 전력의 특성을 비교한 결과, 저가형 레이저의 경우가 더 우수하거나 비슷한 충전 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

References

[1] Saga, T., 2010, Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production, NPG Asia Mater., 2:3 96-102.

[2] Lee, J. S., Kim, K. H., 2007, Solar Cell Engineering, Greenpress, Korea, 37-50.

[3] PV Education, n.d., viewed 20 April 2016, Solar Cell Operation, <http://pveducation.org>.

[4] NASA, 2011, High Intensity Laser Power Beaming Architecture for Space and Terrestrial Missions, NASA Center for Aerospace Information.

[5] Daniel, E. R., 2006, High Intensity Laser Power Beaming for Wireless Power Transmission, A Thesis for a Master, Cleveland State University, United State of America.

[6] Yang, S. Y., Choi, S. D., Kim, G. M., Jun, J. M., Gong, B. C., 2010, Characteristics of Strengthening for Thin Metals by Laser Beam, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 19:2 216-223.

[7] Baik, S. Y., 2011, Development of Automatic Precision Inspection System for Defect Detection of Photovoltaic Wafer, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:5 666-672.