

단결정 실리콘 태양전지 최적 운전조건을 위한 전기적 특성 분석

김지웅¹, 최용성^{1,a}, 이경섭¹, 조수영², 황종선³

¹ 동신대학교 전기공학과

² 성화대학 항공전기전자과

³ 전남도립대학 신재생에너지전기과

Analysis of Electrical Properties for Optimal Operating Conditions of Mono-crystalline Si Solar Cell

Ji-Woong Kim¹, Yong-Sung Choi^{1,a}, Kyung-Sup Lee¹, Soo-Young Cho²,
and Jong-Sun Hwang³

¹ Department of Electrical Engineering, Dongshin University, Naju 520-714, Korea

² Department of Aerospace Electrical and Electronic, Sunghwa College, Gangjin 527-812, Korea

³ Department of Renewable Energy Electricity, Jeonnam Provincial College, Damyang 517-802, Korea

(Received June 13, 2011; Revised July 12, 2011; Accepted July 24, 2011)

Abstract: This paper was investigated the electrical properties for optimal operating conditions of monocrystalline silicon solar cell. The output of electricity for monocrystalline solar cell was investigated according to the distances between solar cell and halogen lamp and to the resistances by the variable resistor.

Keywords: Internal impedance, Si solar cell, Mono-crystalline, Electrical characteristics

1. 서 론

오늘날까지 전 세계 에너지 수요의 대부분은 석유, 석탄, 그리고 천연가스와 같은 화석연료의 연소에 의해 충족되어 왔다. 그러나 유한한 매장량의 화석 연료는 급격히 고갈되고 그것들의 연소는 지구온난화의 주범인 이산화탄소를 대기 중에 축적시키며 지구온난화를 가속하여 기후변화 등의 심각한 문제를 야기하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 이산화탄소의 발생을 억제해야할 뿐만 아니라, 태양, 풍력, 수력, 조력 및 지열에너지와 같은 신재생에너지원의 시급한 개발이 필요하다. 다행스럽게도 현재까지 알려진 청정 에너지원 중에서 태양 에너지는 차체

대 에너지원으로 커다란 가능성을 보여주고 있다 [1-3].

태양전지는 빛을 전기로 직접 바꾸어 주는 전자소자이다. 태양전지는 크게 두 과정에 의해 전류를 생성하는데 하나는 태양전지에 비춰진 빛을 흡수하여 입사광자의 에너지가 반도체의 대역폭보다 큰 경우 전자-정공쌍을 생성하는 것이다. 다른 하나는 p-n 접합에 의한 이들 캐리어의 수집이다. 그러나 캐리어의 수집 그 자체만으로는 전력을 생산할 수 없다. 전력을 생산하기 위해서는 전압도 발생되어야 한다. 전압은 광기전력 효과라 알려진 과정에 의해 발생한다.

광기전력 효과란 금속-반도체 혹은 p-n 접합에 빛을 조사시킬 때, 금지대 폭보다 큰 에너지를 가진 입사 광자에 의해서 전자-정공 쌍이 생성되어 접합 양단에 광기전력이 발생하는 현상이다 [4-6].

a. Corresponding author: yschoi67@dsu.ac.kr

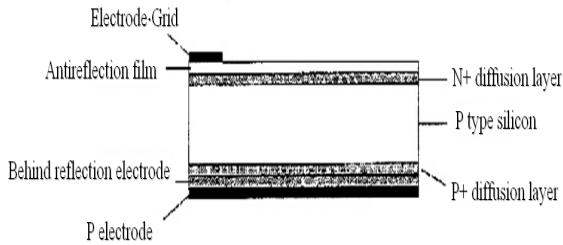


Fig. 1. Si solar cell diagram.

태양전지는 구성하는 물질에 따라 실리콘 (단결정, 다결정 및 비정질), 화합물 반도체 (III-V족 및 II-IV족 화합물) 및 유기 태양전지 (염료감응형 및 유기분자접합형) 등으로 나눌 수 있다. 이 중 실리콘 태양전지가 현재 상용화되고 있으며 광전변환 효율이 우수한 이점이 있다 [7]. 본 실험에 쓰인 태양전지는 단결정 Si 태양전지이다. Si를 깨끗하게 정제시켜주면 그것이 진성 반도체가 되고, 여기에 최외각 전자가 5개 짜리 원소를 도핑 시켜주면 N형 반도체가 된다. 또한 최외각 전자가 3개짜리 원소를 도핑시켜주면 P형 반도체가 된다 [8].

P형과 N형 반도체를 그림 1과 같이 결합시키면 태양전지 판이 되고 외부의 광에너지가 이 전지판에 닿게 되면 전기 에너지로 바뀌면서 전기를 발생시키게 되는 것이다 [9].

태양전지는 동일한 구성재료, 크기를 갖더라도 입사하는 빛의 파장 및 각도, 주변 온·습도 등의 환경에 따라 출력이 달라지고 그로 인해 효율도 달라지게 된다 [10].

본 논문에서는 태양전지에 외부저항을 직렬로 연결하여, 그 외부저항에 걸리는 전압-전류를 측정해서 출력전력을 구하였다. 그런 뒤, 최대전력전달조건 (Z_S : 내부 임피던스, Z_L : 부하임피던스일 때, $Z_S=Z_L$ 이면 출력은 최대가 된다는 이론)에 의하여 외부임피던스와 출력전력과의 관계를 토대로 내부임피던스를 유추해서 태양전지의 회로 상 최적운전조건을 구하기 위해 광원과 태양전지 간의 거리에 따른 I-V특성을 측정하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 쓰인 태양전지는 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 크기의

Table 1. Technical data of solar cell.

PV equipments	
Size (W×H×L) [mm]	200×297×100
Terminal voltage [V]	2.2
Short current [mA]	1200
Variable resistor	
Size (W×H×L) [mm]	100×297×100
Variable resistance [Ω]	0.3/0.5/1/2/3/5/10/20/50/100
Other peripheral units	
Voltmeter	moving coil type class 0.5
Ammeter	moving coil type class 0.5
Halogen lamp [W]	100

단결정 Si 태양전지이다. 먼저, 외부 저항에 따른 단결정 실리콘 태양광 전지의 출력 전압 및 전력을 측정하기 위하여 태양전지와 가변저항을 직렬 연결하였다. 그리고 전류계를 가변저항과 직렬연결하고 전압계를 병렬 연결하여 외부저항에 대한 전류와 전압을 측정할 수 있도록 하였다. 광원은 230 V, 100 W의 할로겐램프를 사용하였으며 가변저항의 조정범위는 100 Ω , 50 Ω , 20 Ω , 10 Ω , 5 Ω , 3 Ω , 2 Ω , 1 Ω , 0.5 Ω , 0.3 Ω 이다. 동일한 거리에서 가변저항을 이용하여 저항을 변화시켜가며 출력 전압과 전류를 측정 후, $P=VI$ 라는 식을 이용하여 출력 전력을 측정하였다.

또한, 태양전지와 광원 사이의 거리를 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm로 변화를 주었다. 각 거리에서 외부저항 값을 바꾸어 가며 측정함으로써 거리에 따른 단결정 실리콘 태양광 전지의 출력 전압 및 전력을 측정 하였다. 이 밖의 측정 조건은 온도 29°C, 습도 18%를 유지하였다. 조도는 태양전지 중심에서 측정하였으며, 태양전지와 광원 사이의 거리가 20 cm일 때는 330 lux, 30 cm일 때는 132 lux, 40 cm일 때는 99 lux, 50 cm일 때는 53 lux였다. 표 1은 실험에 사용된 장치 사양을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 태양전지의 일사량 특성

자연 태양광은 시간과 장소에 따라 일사량 변화가

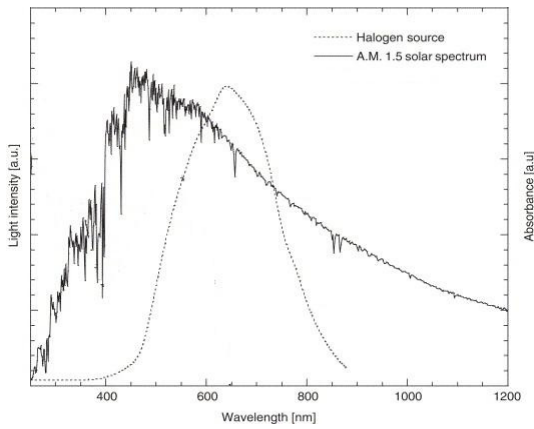


Fig. 2. Spectrum of sunlight and halogen light.

심하여 측정의 정확도가 떨어지기 때문에 보통 자연 태양광과 빛의 세기 및 파장분포가 유사한 인공 태양광원을 사용하게 된다. 그림 2는 Pasquier 등이 할로겐램프와 태양광의 비교를 위하여 스펙트럼을 분석한 결과이다 [11]. 본 실험에 쓰인 할로겐램프는 스펙트럼을 분석하였을 때 그림 2에서 보이는 것처럼 자연 태양광과 오차가 발생하게 된다. 따라서 이 오차를 보정해야 하지만, 본 실험은 파장에 따른 출력의 측정만 비교하였기 때문에 이를 무시하였다.

태양전지의 내부 전기적 특성을 평가하기 위하여 단결정 실리콘 태양전지에 할로겐 램프를 이용하여 빛을 조사하며 측정한 결과이다. 태양전지와 할로겐 램프 거리를 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm로 각각 변화를 주었다. 태양전지의 전기적 특성을 분석하기 위하여 가변저항을 이용하여 동일한 거리에서 저항을 100 Ω, 50 Ω, 20 Ω, 10 Ω, 5 Ω, 3 Ω, 2 Ω, 1 Ω, 0.5 Ω, 0.3 Ω으로 변화시켜 가며 측정한 결과 태양전지와 광원간 거리 50 cm에서는 외부 저항이 10 Ω일 때 0.32 W의 최대전력이 나타났으며, 40 cm일 때는 5 Ω일 때 0.49 W, 30 cm일 때는 3 Ω일 때 0.77 W, 20 cm일 때는 2 Ω일 때 1.08 W의 최대 출력값이 나타났다. 이에 대하여 실험 결과를 전류에 따른 전압 및 전력 그래프로 나타낸 것이 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6이다.

그림 3~6을 보면 전류의 증가에 따라 전압그래프는 어떤 특정한 전류값을 점근선으로 하여 점차 감소하는 형태를 보여준다. 20 cm에서는 0.66 A, 30 cm에서는 0.46 A, 40 cm에서는 0.31 A, 50 cm에서는

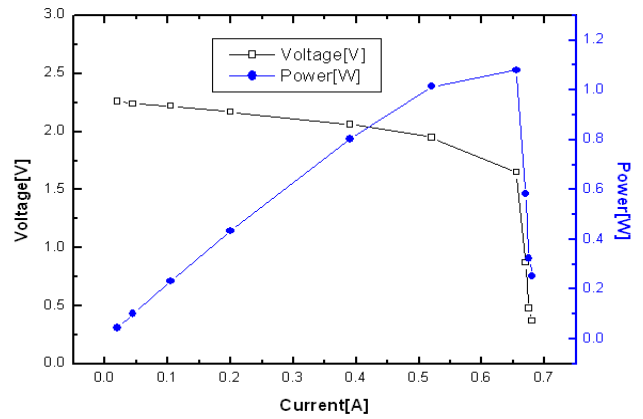


Fig. 3. The power output according to distance by 20 cm between solar cell and halogen lamp.

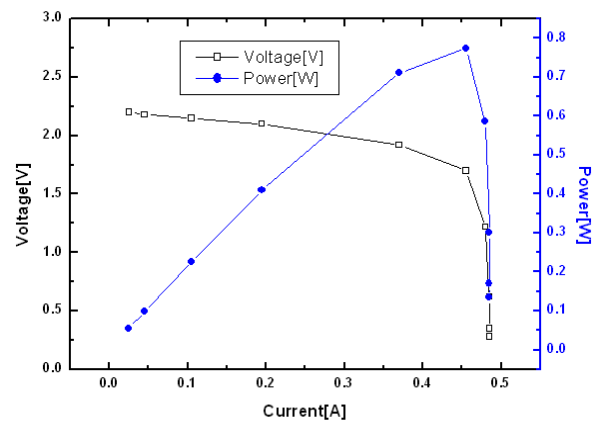


Fig. 4. The power output according to distance by 30 cm between solar cell and halogen lamp.

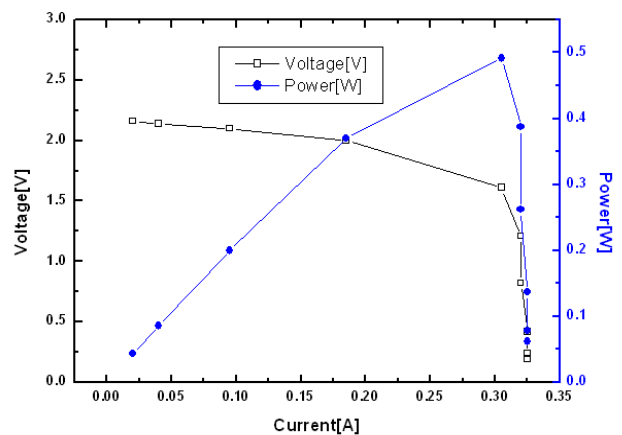


Fig. 5. The power output according to distance by 40 cm between solar cell and halogen lamp.

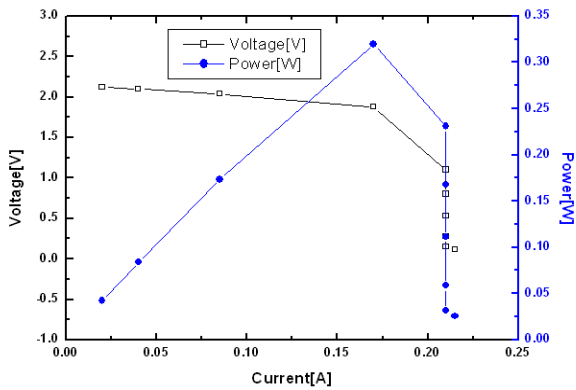


Fig. 6. The power output according to distance by 50 cm between solar cell and halogen lamp.

0.17 A를 점근점으로 하여 전압이 감소하였다. 그리고 전류가 0에 가까운 상태, 즉 개방상태의 전압에 가까워지면 거리에 상관없이 2.1 V~2.2 V로 비슷한 전압값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

3.2 외부저항에 따른 태양전지의 전기적 특성

태양전지의 온도와 관련한 출력전력과의 관계를 식으로 정리하면 다음 식 (1)과 같다.

$$P_m(t) = P_m \times Q \times [1 + \alpha(T - 25)] \quad (1)$$

$P_m(t)$ 는 동작 조건에서의 최대출력을 나타내며, P_m 은 정격출력(온도 25°C에서 일사강도 1 kW/m²), Q 는 동작조건에서의 일사강도[kW/m²], T 는 동작조건에서의 태양전지 표면온도[°C], α 는 온도계수 -0.005/°C이다.

위 식 (1)로 미루어 볼 때 태양전지의 온도가 상승하면 출력전력 또한 상승하게 된다. 할로겐램프와 태양전지간 거리가 가까워질수록 할로겐램프에서 방사되는 열에 의해 전지의 온도도 상승하게 된다. 따라서 램프-전지 간 거리가 가까워질수록 일사량뿐만 아니라 온도에 의해서도 출력이 상승하게 됨을 알 수 있으나, 본 실험에서는 이러한 영향을 무시하고 실험하였다.

전력의 경우 전류가 증가할수록 점점 증가하다가 특정 전류값에서 최대값을 갖고 다시 감소한다. 표 2에서 보는 바와 같이 태양전지와 광원간 각 거리별로 최대 전류는 다르게 나타났으며 거리가 가까워질수록

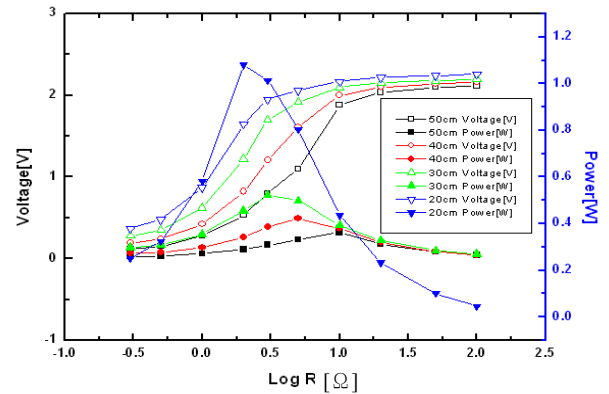


Fig. 7. The power output according to distance and external resistance.

Table 2. The electrical properties according to distance between solar cell and halogen lamp.

	Current at MPPT [A]	MPPT [W]	External resistor at MPPT [Ω]
50 cm	0.17	0.32	10
40 cm	0.31	0.49	5
30 cm	0.46	0.77	3
20 cm	0.66	1.08	2

더 많은 전류가 흘렀다. 이에 따라 최대출력 또한 거리가 가까워질수록 더 높게 나타났다. 다만, 각 거리에 따라 최대출력이 나타나는 전류값이 다른 양상을 보였다.

외부 저항에 따른 각 거리별 전압 및 전력을 보다 쉽게 비교하기 위한 것이 그림 7이다. 그림 7을 보면 외부 저항이 증가함에 따라 각 거리별 전압이 증가하는 속도가 다르다는 것을 알 수 있다. 그러나 외부 저항이 무한히 증가하게 되면 전압은 2.1 V~2.2 V의 비슷한 전압값으로 수렴한다는 것 또한 알 수 있다. 또한 거리가 가까워질수록 최대출력이 급격히 상승한다는 것도 알 수 있다. 그러나 각 거리별 최대출력이 발생하는 외부저항 값은 표 2에서와 같이 다르게 나타난다는 것도 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 단결정 실리콘 태양전지의 최대전력 전달조건을 찾기 위한 기초 연구로서 거리 및 외부저항에 따른 전류-전압 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 태양전지와 광원 간의 거리가 가까워질수록 조도가 높아졌다. 20 cm에서는 330 lux, 30 cm에서는 132 lux, 40 cm에서는 99 lux, 50 cm에서는 53 lux였다. 결국 태양전지와 광원 간의 거리는 빛의 세기와 반비례한다고 생각할 수 있다. 그런데 거리가 가까워질수록 최대전력은 증가하므로 결국 빛의 세기가 증가할수록 최대 출력값도 높게 나타난다고 생각할 수 있다.
2. 본 실험에 쓰인 단결정 Si 태양전지는 외부저항이 아무리 증가하여도 출력 전압은 2.1 V~2.2 V를 초과하지 않았다. 따라서 같은 태양전지라면 빛의 세기에 상관없이 개방전압이 일정하다. 반대로 외부 저항이 0 Ω에 가까워지면 출력전압도 0 V에 가까워지는 것을 알 수 있다.
3. 빛의 세기가 세질수록 포화되는 광전류의 크기가 커진다. 또한 광전류의 크기는 방출된 전자의 수와 비례하므로 결국 빛의 세기는 방출되는 전자의 수와 비례한다고 생각할 수 있다.
4. 같은 모듈에서 광원-태양전지간 거리에 따라 내부 저항이 다른 이유는 거리가 가까워질수록 광원에서 발산되는 열에 의해 태양전지의 내부 온도가 올라가는데, 반도체 특성상 온도가 높아짐에 따라 전도대로 전이되는 전자의 수가 증가하여 저항이 감소하기 때문으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20104010100380)

REFERENCES

- [1] R. García-Valverde, C. Miguel, R. Martínez-Béjar, and A. Urbina, *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 5352 (2008).
- [2] B. O'Regan and M. Gratzel, *Nature*, **353**, 737 (1991).
- [3] A. L. Endros, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **72**, 109 (2002).
- [4] *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed, (John Wiley, New York, 1985) p. 790.
- [5] S. W. Glunz, S. Rein, W. Warta, J. Knoblauch, and W. Wettling, *Second World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion* (Vienna, Austria, 1998) p. 1343.
- [6] T. Y. Kwon, D. H. Yang, M. K. Ju, W. W. Jung, S. Y. Kim, Y. W. Lee, D. Y. Gong, and J. Yi, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **95**, 14 (2011).
- [7] D. Fuchs and H. Sigmund, *Solid-State Electron.*, **29**, 791 (1986).
- [8] J. P. Charles, M. Abdelkrim, Y. H. Muoy, and P. Mialhe, *Sol. C.*, **4**, 169 (1981).
- [9] I. Gordon, S. Vallon, A. Mayolet, G. Beaucarne, and J. Poortmans, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **94**, 381 (2010).
- [10] S. T. Kim, C. H. Park, G. H. Kang, W. C. K. Lawrence, H. K. Ahn, G. J. Yu, and D. Y. Han, *J. KIEEME*, **21**, 12 (2008).
- [11] A. D. Pasquier, S. Miller, and M. Chhowalla, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **90**, 1828 (2006).