

광 입사각에 따른 염료감응형 태양전지의 발전특성 분석

*서 현웅¹⁾, 손 민규, 이 경준, 장 진주, 홍 지태, **김 희제²⁾

The Characteristic Analysis of the Dye-sensitized Solar Cells as the Change of Incident Angle

*Hyunwoong Seo, Minkyu Son, Kyoungjun Lee, Jinju Jang, Jitae Hong, **Heeje Kim

Key words : dye-sensitized solar cell (염료감응형 태양전지), incident angle (광입사각), photovoltaic characteristics (발전특성), Si solar cell (실리콘 태양전지)

Abstract : Dye-sensitized solar cells (DSCs) have been proposed as a substitute for overcoming the limitation of Si solar cells because DSC has the various applications using advantages of DSC such as low cost, transparency and flexibility. Although some people point out low efficiency of DSC as the important problem at present, general views say that actually cumulative power is not insufficient as compared with Si solar cell. Therefore, we analyzed the characteristics of both cells according to the change of incident angle in this study. The insensibility about the incident angle has more developable time. Finally, DSC is able to fill a shortage of power caused from low efficiency of DSC for same time by developing during impossible time to develop in Si solar cell. As a result, DSC has 75% and 210% cumulative power of Si solar cell in summer and winter under the standard sunshine duration.

1. Introduction

최근 전 세계가 겪는 심각한 문제 중의 하나는 에너지 자원의 부족이다. 20세기의 주 에너지원이었던 화석연료는 매장량이 바닥을 보이기 시작한지 오래되었기 때문에 새로운 에너지원의 개발이 절실한 상황이다. 더 이상 매장된 자원으로는 현재의 에너지난을 해결할 수 없기에 신재생에너지의 개발은 선택이 아닌 필수가 되었다. 그 중에서도 태양전지는 현재의 어려움을 해결하기에 더없이 좋은 수단이다. 지금 이 순간에도 인류가 소비하는 에너지량의 10,000배를 상회하는 엄청난 양의 에너지가 태양광의 형태로 지구에 공급되고 있다. 하지만, 현재 널리 사용되고 있는 실리콘 (Si) 태양전지는 생산에 있어서 고가의 장비 및 재료가 요구되고, 그 재료 또한 점차 고갈되어 가고 있다.

이러한 태양전지의 한계를 넘어서기 위한 새로운 형태의 태양전지가 염료감응형 태양전지(DSC: Dye-sensitized Solar Cell)이다.⁽¹⁻⁶⁾ 식물의 광합성 원리에서 착안한 DSC는 다른 광전 장치들에 비해 상대적으로 저렴한 단가와 높은 효율을 보이고 있다. 그 구조는 투명전극 위에 나노 다공질의 TiO₂ 층과 그 위에 단분자층으로

올려진 염료분자층으로 구성된 광전극과 투명전극 위에 백금 (Pt) 층이 올려진 상대전극, 그리고 광전극과 상대전극의 사이를 채우고 있는 산화환원용 전해질로 구성된 샌드위치형 구조이다. 광전극을 통해 입사된 광을 염료가 흡수, 여기해 전자를 방출하고, 이 때 발생하는 기전력을 사용하는 원리로 동작한다.^(7,8)

이론상의 효율이 33%에 달하는 DSC이지만, 실제 최고 효율은 11.6%이고, 실질적인 상용 효율은 6~7%로 보고되고 있다. 그러나, DSC는 Si 태양전지의 15%를 상회하는 효율에 비해 낮은 효율임에도 이미 실용성을 갖추어가는 단계에 이르렀다.⁽⁹⁾ 투명성과 flexibility, 그리고 염료에 따른 다양한 색상 창출은 DSC만의 특징으로 다양한 응용이 가능하고, 제조단가가 Si 전지의 1/3~1/5에 지나지 않다는 점도 낮은 효율을 충분히 커버하고 있을 뿐 아니라 광 입사각에 둔감해 발전

1) 부산대학교 전자전기공학과

E-mail : woong_1980@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2770 Fax : (051)513-0212

2) 부산대학교 전자전기공학과

E-mail : heeje@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2364 Fax : (051)513-0212

가능시간 면에서도 Si 전지를 앞선다.⁽¹⁻³⁾

본 연구에서는 실제 제작한 DSC와 Si 전지의 발전 특성을 실증적인 측면에서 비교, 분석하고, 이를 통해 DSC의 실용화 가능성을 확인해 보았다.

2. Experiment

본 연구에서 사용된 염료감응형 태양전지는 다음과 같이 제조했다. Doctor-blade 법으로 균일 TiO₂ 입자 (HT/SP, Solaronix)를 Fluorene doped Tin Oxide (FTO, Hartford) 위에 약 13 μ m 두께로 소결해 다공성 TiO₂ 층을 형성하고, 이후, 20mM 농도의 N719 염료 (cis-bis(isothiocyanato) bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)-ruthenium(II)-bis-tertabuty lammonium, RuC₅₈H₈₆N₈O₈S₂) 용액에 12시간동안 TiO₂ 층이 형성된 광전극을 침착시켜 염료분자를 TiO₂에 흡착시킨 후, 99.9% 에틸알콜 (C₂H₅OH)에 침지시켜 적층되어 있는 염료 분자를 제거함으로써 염료 단분자층을 형성해 광전극을 완성했다. 상대전극의 경우, RF sputtering 방식을 이용해 Pt 박막을 제조했다. 불활성원소인 아르곤 (Ar)을 매개로 주입하고 2.8 $\times 10^{-3}$ Torr, 100 $^{\circ}$ C의 조건에서 150W의 RF sputter power를 60초간 인가하게 되면, 약 100nm 두께의 Pt 층이 형성된다. 앞의 과정을 통해 제작된 광전극과 상대전극을 60 μ m 두께의 thermoplast hot-melt sealing sheet (SX 1170-60, Solaronix)를 사용해 5초간 가열, 압착했다. Sand-blast (NORMEK, FG 1-93) 방식으로 상대전극에 뚫은 pin-hole을 통해 acetonitrile 계열의 휘발성 전해질을 주입한 후, pin-hole을 sealing함으로써 DSC를 완성했다.

완성된 전지의 I-V curve는 source meter (Model 2400, Keithley Instrument, Inc.)로 1sun (100mW/cm², AM 1.5)의 광 입사하에서 진행되었다. 입사면적은 0.25cm²였고 I-V curve를 통해 개방 전압 (V_{oc}), 단락 전류 밀도 (J_{sc}), fill factor (FF), 효율을 계산했다. 전체적인 성능을 광원과 전지 사이의 각이 90 $^{\circ}$ 인 상태에서 측정했고, 광 입사각의 변화에 따른 출력은 10 $^{\circ}$ 의 각도 변화마다 측정되었다.

3. Result & Discussion

그림 1은 1sun 조건에서 측정한 DSC와 Si 태양전지의 I-V 특성 곡선이다. 예상한 바와 같이, Si 전지가 DSC에 비해 약 2배 수준의 출력을 내고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 태양전지를 이용해 발전을 하는 것은 기후, 날씨 등의 자연조건에 크게 영향을 받기 때문에 항상 최적화된 조건 (1sun, 90 $^{\circ}$ 로 광입사, 적정 온도)하에서 가능한 것이 아니다. 따라서, 아래의 광 입사각에 따른 출력 변화를 비교해 볼 필요가 있다.

그림 2, 3, 4, 5는 Voc, Jsc, FF, 효율의 항목에 대해 DSC와 Si 전지를 비교한 그래프이다. 4가지 항목 중 가장 작은 변화를 보인 그림 2의 Voc의 경우, DSC는 20 $^{\circ}$ 의 입사각까지 초기 값을

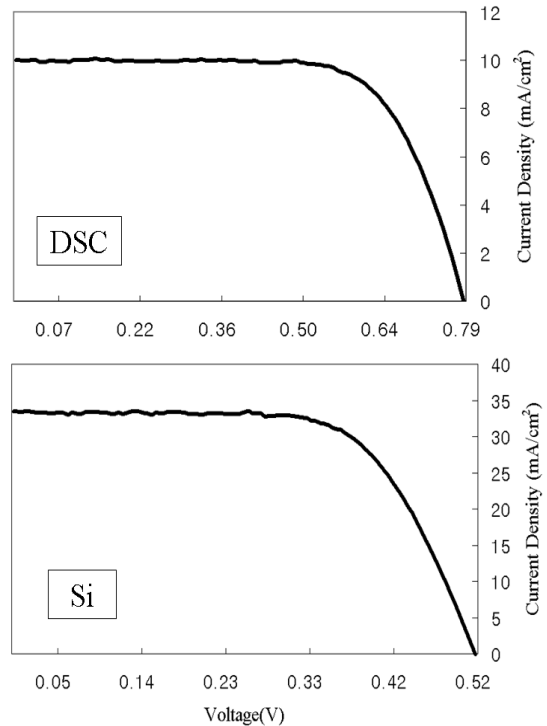


Fig. 1 DSC와 Si 태양전지의 출력 특성 곡선

유지한 반면, Si 전지는 40 $^{\circ}$ 의 입사각 이후부터 감소를 시작했다. 실제 발전 가능한 수준을 결정하는 것은 출력 전류이지만, 이 때 전압을 고려하지 않는 것은 어느 정도의 광 입사만으로도 최대값과 유사한 출력 전압을 나타내기 때문이다. 즉, 출력 전압이 감소하는 경우는 이미 광 입력이 발전 가능한 수준 이하임을 의미한다. 따라서, 전압의 측면에서 본 DSC와 Si 전지의 발전 가능한 광 입사각의 한계는 각각 20 $^{\circ}$, 40 $^{\circ}$ 임을 확인할 수 있다.

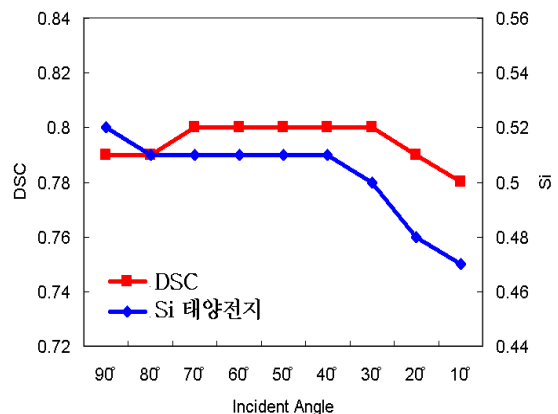


Fig. 2 DSC와 Si 전지의 Voc 비교

그림 3의 Jsc 비교의 경우, 양 쪽 다 입사각의 변화를 따라 크게 변하고 있음을 보인다. 하지만, Jsc 역시 Si 전지의 감소가 DSC보다 빠르다는 것에는 변함이 없다. DSC는 약 60 $^{\circ}$ 의 광 입사각까지 거의 감소하지 않는 Jsc를 보이고, 발전

가능 기준을 90° 발전량의 90%라고 하는 경우, 50° 근처에서 그 기준 이하의 값을 보였지만, Si 전지는 90°에서부터 입사각이 감소함에 따라 감소를 시작해 70° 이후부터 기준 이하로 떨어지는 것을 확인했다.

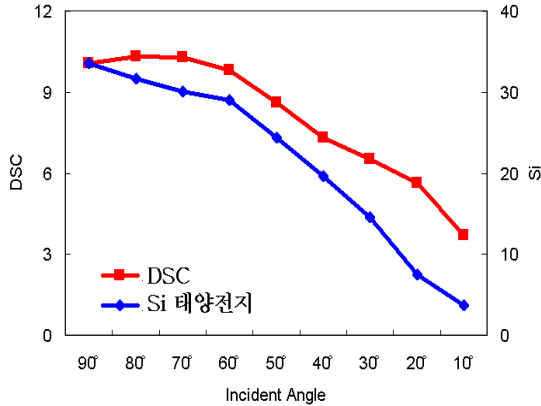


Fig. 3 DSC와 Si 전지의 Jsc 비교

그림 4의 FF는 그 절대값에 있어서 DSC, Si 전지 사이에 큰 차이가 없는 수치이다. 일반적인 태양전지가 대체로 0.65에서 0.75 사이의 값을 갖기 때문에 서로 다른 기준이 필요치 않다. 일단, 두 전지 모두 입사각의 감소와 함께 증가하는 FF를 보임을 알 수 있다. 이는 성능이 좋아졌다는 의미가 아니라 출력 전류의 감소에 따른 반대현상이라고 해석할 수 있다. 큰 출력 전류의 전지가 반드시 낮은 FF를 갖는 것은 아니지만, 낮은 출력 전류일수록 dark current에서 보이는 I-V 곡선에 가까운 출력을 보인다는 사실을 통해 이러한 관계를 확인할 수 있다. Si 전지의 FF 증가가 DSC보다 더 빠른 것은 단지 앞선 Jsc의 감소에 반비례해서 나타난 결과이지, Si 전지가 DSC보다 광 입사각 변화에 둔감하다는 것을 의미하지는 않는다. 이는 그림 5의 효율 비교를 통해서 다시 확인할 수 있다.

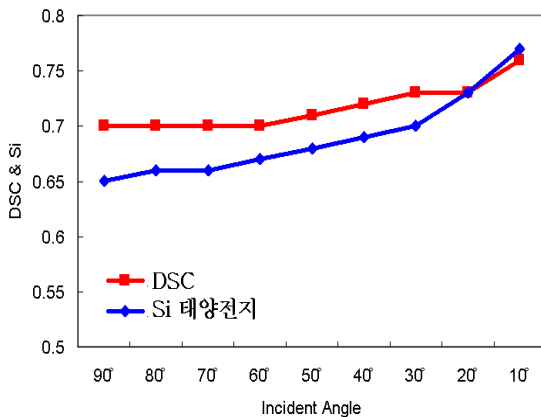


Fig. 4 DSC와 Si 전지의 FF 비교

그림 5의 효율 비교는 그림 3의 Jsc 그래프와 거의 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. DSC의 출력은 60°까지 출력 저하를 보이지 않고, 50° 근처에서 발전 기준 이하로 떨어지지만, Si 전지는 지속적인 감소를 시작해 60°에서 70°사이에서 기준 이하의 출력을 나타내었다.

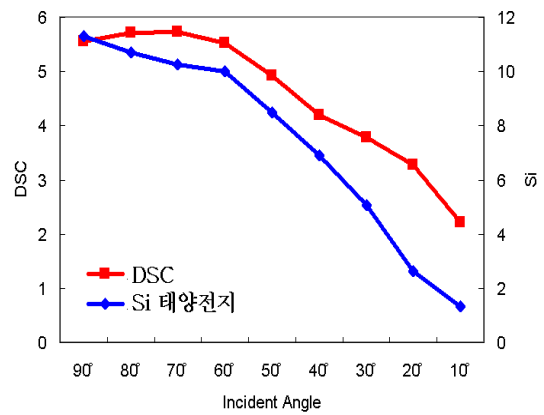


Fig. 5 DSC와 Si 전지의 효율 비교

이상의 결과를 정리해보면, DSC의 경우는 광 입사각 50°까지, Si 전지는 약 65°까지 발전 가능한 수준이라고 할 수 있다. 이를 국내 날씨에 적용해 실제 발전 가능한 시간과 하루 간의 출력 등을 계산해 보았다. 연중 가장 해가 긴 하지를 기준으로, 태양전지를 지표로부터 30° 각도로 세운 상태에서 발전한다고 하면, DSC는 일조시간 14시간 중 10시간 동안 발전이 가능하고, Si 전지는 7시간 동안 발전이 가능하다. 또, 해가 가장 짧은 동지 기준에서 DSC는 일조시간 10시간 중 4시간 동안, Si 전지는 약 1시간가량 발전이 가능해진다. 이를 하루 동안의 발전량으로 비교해보면 하지의 경우, DSC가 약 55.7mWh를, Si 전지가 약 75.1mWh를 발전하고, 동지의 경우, DSC가 약 21.5mWh를, Si 전지가 약 10.0mWh를 발전한다. 발전량을 1년 단위로 계산하게 되면 그 차이는 거의 없게 된다. 물론, 하지와 동지의 입사각의 세기가 다르고, 그에 따른 발전 특성이 본 연구와 정확히 일치하지는 않겠지만, 여기에서 보이는 경향과 일치하는 결과를 보일 것이다. 여기에, Si 전지에 비해 1/3에서 1/5 정도인 DSC의 발전단가까지 고려하게 되면, 결국, DSC가 Si 전지를 대체하기에 충분하다는 것을 확인할 수 있다.

4. Conclusion

DSC는 최근 한계에 달한 Si 전지를 대체할 수 있는 유력한 후보로 거론되고 있다. 이는 DSC의 낮은 발전단가는 물론, 투명성과 flexibility 등 DSC만의 장점을 이용해 다양한 응용이 가능하기 때문이다. 효율 면에서 Si 전지에 비해 뒤떨어진다는 것이 문제로 지적되었지만, 실제로 광 입사각에 둔감한 DSC의 특성상, 실질적인 누적 발전량은 크게 부족하지 않다. 이는 본 연구에서 보여준 DSC와 Si 전지의 광 입사각에 따른 발전 특성 비교를 통해 알 수 있다. 실험 결과, DSC는 광 입사각 50°까지, Si 전지는 약 65°까지 발전 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이를 국내 일조시간에 적용한 결과, DSC는 1일 중 최대 10시간에서 4시간 동안 발전 가능하고, Si 전지는 최대 7시간에서 1시간 동안 발전 가능성을 확인했다. 하루 동안의 발전량을 비교하면, 일조시간이 긴

경우 DSC가 Si 전지에 비해 약 75% 정도, 일조시간이 짧은 경우 Si 전지보다 오히려 더 많은 발전량을 보임으로써 연간 발전량은 크게 차이 나지 않음을 알 수 있었다. 따라서, DSC가 실용화 가능한 수준의 효율 수준으로 양산 가능하게 되면 Si 전지의 대체로서 충분하다고 예상된다.

Highly-Ordered TiO₂ Nanotube Arrays in Dye-Sensitized Solar Cells", Nano Lett. Vol. 6, pp. 215.

후 기

본 연구는 기초연구지원기초과학: 단독연구 (과제번호: D00283) 염료감응형 태양전지 연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Gratzel, 2001, "Photoelectrochemical cells", Nature, Vol. 414, pp. 338.
- [2] M. Durr, A. Schmid, M. Obermaier, S. Rosselli, A. Yasuda, G. Nelles, 2005, "Low-temperature fabrication of dye-sensitized solar cells by transfer of composite porous layers", Nature Mater. Vol. 4, pp. 607.
- [3] D. Zhang, T. Yoshida, T. Oekermann, K. Furuta, H. Minoura, 2006, "Room-Temperature Synthesis of Porous Nanoparticulate TiO₂ Films for Flexible Dye-Sensitized Solar Cells", Adv. Funct. Mater. Vol. 16, pp. 1228.
- [4] B. O'Regan, M. Grätzel, 1991, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature, Vol. 353, pp. 737-740
- [5] B. O'Regan, M. Grätzel, 1991, "Optical electrochemistry I: steady-state spectroscopy of conduction band electrons in a metal oxide semiconductor electrode", Chem. Phys. Lett., Vol. 183, Pages 89-93
- [6] M. Gratzel, 2003, "A photovoltaic device structure based on internal electron emission", Nature. Vol. 421, pp. 6923.
- [7] M.K Nazeeruddin, R. Humphry-Baker, P. Liska, M. Gratzel, 2003, "Investigation of Sensitizer Adsorption and the Influence of Protons on Current and Voltage of a Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cell" J. Phys. Chem. B, Vol. 107, pp. 8981.
- [8] P. Wang, S.M. Zakeeruddin, J.E Moser, Humphry-Baker, P. Comte, V. Aranyos, A. Hagfeldt, M. K. Nazeeruddin, M. Gratzel, 2004, "Stable New Sensitizer with Improved Light Harvesting for Nanocrystalline Dye-Sensitized Solar Cells" Adv. Mater. Vol. 16, pp. 1806.
- [9] G. K. Mor, K. Shankar, M. Paulose, O.K. Oomman, C. A. Grimes, 2006, "Use of