

염료감응형 태양전지의 대면적화를 위한 최적 구조 연구

서현웅, 김미정, 홍지태, 김희재
부산대학교 전자전기공학과

A Study on The Optimum Structure of Dye-sensitized Solar Cell for Upscaling

Hyunwoong Seo, Mijeong Kim, Jitae Hong, Heeje Kim
Pusan National University Department of Electronics & Electrical Engineering

Abstract - A lot of researches about dye-sensitized solar cell (DSC) are recently being conducted. Because DSC has several advantages to pass the limits of silicon solar cells such as a low manufacturing expense, a simple manufacturing process and its transparency. But most researches on DSC are still conducted about the unit cell and laboratory-centered. That is, present researches on DSC are not practical. Therefore, researches about large area cells and modules have to be prerequisites for DSC to have the practicality. Characteristics of large area DSC are so different from those of small area DSC in aspect of fill factor and efficiency. In this study, we made an experiment on finding suitable size of DSC that has the most effective power according to the variation of active area. In detail, the experiment was conducted about the optimum ratio of length to width and we introduced the ratio of active area to non-active area to find the active area which has the best output. Because small DSC doesn't have the best output in comparison with total area of cell although the smaller DSC has the better efficiency. As a result, we achieved the optimum ratio of length to width of 8:3 and active area of 8cm^2 as the optimum size for upscaling DSC.

1. Introduction

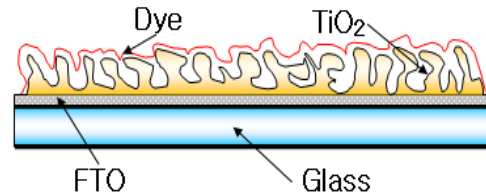
세계 태양광 발전 시장은 2003년까지 연평균 36%의 지속적인 성장을 보임은 물론 2004년 이후로는 67%, 45%의 성장률을 기록하는 등 최근 가파른 상승세를 기록하고 있다. 현재 태양광 발전 시장은 Si계 태양전지가 대부분을 점유하고 있는 상태이지만 Si계 태양전지 분야는 원자재 부족에 따른 원가 상승과 복잡한 공정 등으로 인해 경제성의 한계에 다다른 상태이다. 이에 따라 태양전지 가격의 한계 돌파를 위해 대안으로 제시되는 것이 염료감응형 태양전지(dye-sensitized solar cell : DSC)이다. 염료감응형 태양전지는 나노기술을 응용한 제3세대 신형 태양전지로 1991년 스위스의 그레첼 교수가 개발한 이래[1] 효율 개선을 위한 수많은 연구가 진행 중에 있다. 하지만 고효율 염료에 관한 연구나 고다공성 및 고전도성의 TiO_2 연구[2], 상대전극의 박막에 관한 연구[3] 등 진행 중인 대부분의 연구가 재료적인 측면에서 이루어지고 있고 전해질 분야 또한 안정도를 높이기 위한 고체 전해질의 개발[4]에 집중하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 대부분의 연구가 화학적인 접근을 통한 재료에 관한 연구에 편중되어 있다는 점에 착안해 재료가 아닌 구조적인 면으로 접근해 보았다. 염료감응형 태양전지는 여기된 염료분자로부터 발생한 전자가 확산의 형태로 이동해 전지 외부로 빠져나가는 매커니즘 때문에 전자의 내부 이동거리가 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 동일한 유효면적을 가지는 전지라 할지라도 그 형태에 따라 상이한 효율을 출력할 수 있다는 것을 의미한다. 또, 이와 같은 맥락에서, 염료감응형 태양전지의 유효면적이 증가하는 것에 비례해 short circuit current(I_{sc})는 증가하지만 면적의 증가에 따른 내부 이동거리의 증가로 효율이나 Fill Factor(FF)가 크게 감소한다는 사실도 알 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서는 실용적인 염료감응형 태양전지 모듈의 구성을 위한 대면적화의 기본 과정으로 최적 구조를 가지는 셀에 대해 연구해 보았다. 그 결과, 8:3의 가로:세로 길이 비율과 8cm^2 의 유효면적이라는 최적화된 구조를 얻을 수 있었고 이를 통해 0.8V의 open circuit voltage(V_{oc})와 51.7mA의 I_{sc} 를 가지는 효율 2.9%의 염료감응형 태양전지를 제조했다.

2. Experiment

2.1 광전극의 제작

염료감응형 태양전지의 광전극은 염료감응형 태양전지의 기본 제작공

정을 토대로 제작했다. 다공질 나노 크기의 균일 TiO_2 입자를 투명전극(transparent conducting oxide : TCO) 위에 $10\mu\text{m}$ 두께로 스크린 프린팅하고 450°C 에서 0.5시간동안 소성해 다공질 구조를 형성한 후 방진상태에서 2시간동안 자연 냉각시켰다. 그 후, 염료분자층의 코팅을 위해 N719 염료(cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl)-4,4'-dicarboxylato)-ruthenium(II)bis-tertbutylammonium, $\text{RuC}_{38}\text{H}_{86}\text{N}_8\text{O}_8\text{S}_2$)에 24시간(상온)동안 침착시키고 99.9% 에틸알콜($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)에 20여분간 침지시켜 염료 고분자의 단분자층을 형성했다. (그림 1 참조)



〈그림 1〉 염료감응형 태양전지 광전극의 구조

2.2 상대전극의 제작

상대전극은 sand-blast 공정을 통해 pin-hole을 형성한 후 광전극과 동일한 투명전극 위에 Radio Frequency Magnetron Sputtering 방식을 이용해 2.8×10^{-3} Torr, 100°C 에서 150W의 RF sputter power를 인가함으로써 $0.2 \sim 0.3\mu\text{m}$ 의 두께로 촉매작용을 위한 Pt 박막층을 형성했다. Pt 박막의 두께는 100nm 이상이 되면 염료감응형 태양전지의 효율에 영향을 미치지 않지만[5] 특성 비교를 위한 parameter가 아니기 때문에 모든 셀을 동일한 두께로 sputtering했다.

2.3 염료감응형 태양전지의 제작

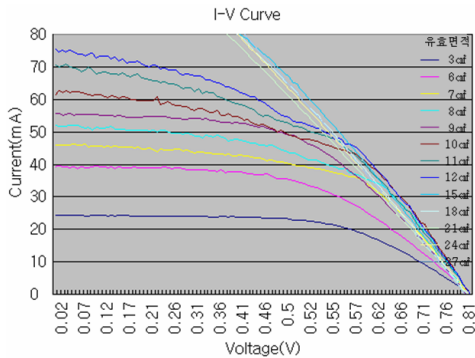
위 방식을 통해 제조한 광전극과 상대전극을 $60\mu\text{m}$ 두께의 Thermoplast hot-melt sealing sheet를 사용해 5초간 100°C 로 열과 압력을 가해 실링하고 pin-hole을 통해 low viscosity의 iodide에 50mM의 tri-iodide가 함유된 redox electrolyte를 주입한 후 pin-hole을 실링함으로써 염료감응형 태양전지를 완성했다. 실험은 염료감응형 태양전지의 가로:세로 길이 비율 및 유효면적 변화에 의한 영향에 의한 특성을 정확히 파악할 수 있도록 전지의 구조 및 크기를 제외한 모든 공정 및 재료가 동일한 환경 조건에서 처리되었다.

2.4 측정

먼저, 가로:세로 길이 비율에 의한 영향을 측정하기 위해 동일한 6cm^2 의 유효면적을 가지는 8종류의 염료감응형 태양전지를 각각 1:6, 1.2:5, 1.5:4, 2:3, 3:2, 4:1.5, 5:1.2, 6:1의 가로:세로 길이 비율로 나누어 제작했다. Solar Simulator로 air mass(AM) 1.5의 조건 하에서 각각의 광전특성을 측정 후 그 결과를 비교했다. 광전극과 상대전극 사이의 거리, 즉, 전자가 셀 내부에서 이동하는 거리가 짧아질수록 FF는 좋아지지만 FF가 좋다는 것이 반드시 좋은 출력을 가지는 것이 아니기 때문에 효율 및 출력전력을 고려해 최적 비율을 얻었다. 그리고 위 실험을 통해 얻은 최적의 가로:세로 길이 비율을 고정한 채 3cm^2 의 유효면적에서부터 27cm^2 의 유효면적까지의 염료감응형 태양전지를 제작해 결과를 비교했다. 염료감응형 태양전지는 유효면적에 비례해 I_{sc} 와 출력전력은 증가한다. 또, 효율이나 FF는 유효면적에 반비례해 감소하기 때문에 이러한 parameter들은 최적의 유효면적을 결정하는데 적합한 기준이 되지 못한다. 그래서, 본 연구에서는 출력전력의 증가율, FF의 감소율을 이용해 유효면적 변화에 따른 각종 parameter의 감소 및 증가 경향을 분석하고 또, 실용적 대면적화에 있어서 경제성을 고려해 유효면적에 대한 나머지 면적(여기서 무효면적이라 지칭한다.)의 비율 개념을 적용함으로써 최적의 유효면적을 도출했다.

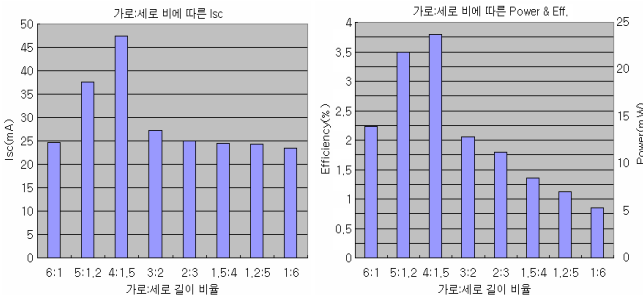
3. Result

3.1 가로:세로 길이 비율의 최적화



〈그림 2〉 가로:세로 길이 비율에 따른 I-V Curve

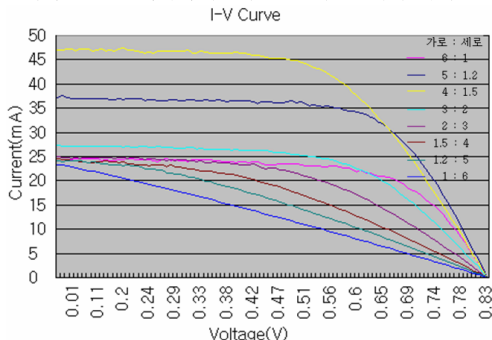
그림 2는 6cm²의 동일한 유효면적을 가지면서 가로:세로 길이 비율이 서로 다른 염료감응형 태양전지의 I-V curve이다. 측정 결과, open circuit voltage(Voc)는 0.83V 정도로 비슷했지만 길이 비율에 따라 전류나 효율 등 전반적인 면에서 큰 차이를 보였다.(그림 3 참조) 5:1, 4:1.5, 3:2의 비율에서는 FF뿐만 아니라 출력전류에서 많은 차이가 있었고, 나머지 비율에서는 Voc, Isc가 비슷했지만 FF 차이로 출력전력에서 다른 결과를 보였다. FF가 가장 좋은 것은 예상대로 양 전극 사이의 거리가 짧은 6:1 비율의 유효면적이었지만 출력전류가 크지 않아서 가장 좋은 출력을 내지 못했다. 이는 전지 내부에서 전극까지의 전자 이동은 원활하지만 가로 길이와 함께 길어진 전극의 저항 성분이 증가함에 따른 결과임을 알 수 있다. 동일한 소재의 TiO₂와 염료를 사용함으로써 같은 level의 band-gap을 형성해 Voc가 비슷한 값을 가지는 상태에서 태양전지의 저항이 구조에 따라 차이를 보였기 때문에 Isc 값이 달라지는 것이다. 즉, 최적의 구조는 최소의 저항을 가짐으로써 가장 큰 Isc와 power를 출력하는 태양전지의 구조라는 것을 말하고 이는 4:1.5의 가로:세로 길이 비율을 갖는 태양전지라고 결론지을 수 있다.



〈그림 3〉 가로:세로 길이 비율에 따른 Isc, Power, Efficiency

3.2 유효면적의 최적화

그림 4는 염료감응형 태양전지의 가로:세로 길이 비율을 앞선 실험에서 얻어진 4:1.5로 고정된 상태에서 유효면적의 변화에 따른 광전특성을 나타낸 각각의 I-V curve이다. 유효면적이 11cm² 이상이 되면 FF가 0.5 이하로 떨어져서 효율적인 전력 생산이 어렵기 때문에 10cm²이하의 유효면적을 선택해야 함을 알 수 있다. 또, 최고의 효율을 얻을 수 있는 태양전지를 제조하고자 한다면 가능한 작은 크기의 전지를 제조하면 되지만 이러한 경우 발전을 하는 유효면적에 비해 부가적으로 사용된 면적, 무효면적이 크게 넓어져서 염료감응형 태양전지의 최대 장점인 경제



〈그림 4〉 유효면적 변화에 따른 I-V Curve

성이 줄어들 수 있다. 따라서 최적의 출력을 얻기 위해서는 지나치게 넓은 유효면적을 가져서는 안 된다. 유효면적:무효면적 parameter를 사용해 비교한 결과, 유효면적 7cm² 이상이 되어야 무효면적의 비율이 1이하로 낮아져 어느 정도의 실용성이 확보되므로 최적 유효면적은 7이상의 유효면적을 선택해야 한다는 것을 알 수 있었다.(표 1 참조) 마지막으로, 가장 효율적인 전력 출력이라는 관점에서 유효면적의 증가에 따른 출력전력의 증가율을 비교해 보았다.(표 1 참조) 유효면적에 따른 출력전력을 단순 비교하게 되면 유효면적이 극단적으로 커지지 않는 이상 지속적으로 증가하기 때문에 정확한 판단 기준이 될 수 없다. 따라서 출력전력이 증가하는 정도를 고려함으로써 효율성에 대한 근거를 얻을 수 있는 것이다. 유효면적 8cm²까지는 면적의 증가에 따른 출력전력의 증가율이 10% 이상인 반면, 그 이후로는 증가율이 크게 감소함을 알 수 있다. 즉, 7~8cm²사이의 유효면적 중에서 유효면적이 가장 큰 셀이 최적의 출력을 낼 수 있으므로 최적 유효면적은 8cm²라는 결론을 얻을 수 있다.

〈표 1〉 유효면적의 변화에 따른 염료감응형 태양전지의 특성

Active Area (cm ²)	Isc (mA)	Pmax (mW)	FF	Eff. (%)	무효면적 (유효면적 기준 1)	Power 증가율 (%)
3	24.38	11.60	0.59	3.9	1.584	
6	39.48	17.32	0.55	3.1	1.07	49.30
7	46.27	20.50	0.55	3.00	0.982	18.37
8	51.68	22.63	0.54	2.9	0.912	10.39
9	55.72	23.00	0.51	2.6	0.858	1.63
10	62.74	24.84	0.50	2.5	0.777	8.00
11	70.94	25.21	0.44	2.5	0.768	1.48
12	75.71	26.75	0.43	2.4	0.732	6.13
15	90.64	28.71	0.40	2.1	0.649	7.34
18	109.95	28.74	0.34	1.7	0.588	0.08
21	122.66	28.47	0.28	1.5	0.541	-0.94
24	132.35	27.69	0.27	1.3	0.505	-2.74
27	135.23	29.56	0.27	1.2	0.475	6.77

4. Conclusion

본 연구에서는 염료감응형 태양전지의 대면적 모듈화 연구에서 선행되어야 하는 최적 출력을 내는 염료감응형 태양전지의 구조를 찾는 시도를 해 보았다. 먼저, 동일한 유효면적에 서로 다른 가로:세로 길이 비율을 가지는 염료감응형 태양전지의 광전특성을 비교함으로써 4:1.5라는 최적 비율을 얻었다. 그리고 정해진 가로:세로 비율을 가지는 다양한 유효면적의 염료감응형 태양전지를 이용해 최적 유효면적을 찾는 실험을 했다. 그 결과, FF와 출력전력의 증가율, 그리고 유효면적:무효면적이라는 새로운 parameter를 이용해 최적의 유효면적 8cm²라는 결과를 도출했다. 본 연구의 결과를 적용해 염료감응형 태양전지의 대면적 모듈 구성에 활용한다면, 저효율의 한계를 극복해 실용성을 갖추하고자 하는 당 분야의 연구에 기여할 것이라 기대한다.

후기

본 연구는 한국과학재단 기초과학연구사업기금 (No. R01-2004-000-10318-0)에 의한 염료감응형 태양전지 연구의 일환으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, Optical electrochemistry steady-state spectroscopy of conduction band electrons in a metal oxide semiconductor electrode, Chemical Physics Letters, Volume 183, Issues 1-2, 89-93, 1991
- [2] S.Ngamsinlapasathian, S.kulkaemaruehai, Highly efficient dye-sensitized solar cell using nanocrystalline titania containing nanotube structure, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 164, Issues 1-3, 145-151, 2004
- [3] S.S. Kim, Y.C. Nah, Y.Y. Noh, J. Jo, D.Y. Kim, "Electrodeposited Pt for cost-efficient and flexible dye-sensitized solar cells", Electrochimica Acta, Volume 51, Issue 18, 3814-3819, 2006
- [4] H. Matsui et al. Application of an ionic liquid-based electrolyte to a 100mm×100mm sized dye-sensitized solar cell, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 164, Issues 1-3, 129-135, 2004