

염료감응형 태양전지의 병렬 연결에서 발생하는 전류 손실 분석

*서 현웅¹⁾, 이 경준, 손 민규, 홍 지태, **김 희제²⁾

The Analysis of the Current Loss in the Parallel Connection of Dye-sensitized Solar Cells

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

Key words : dye-sensitized solar cell(염료감응형 태양전지), current loss(전류 손실), parallel connection(병렬 연결), equivalent circuit(등가회로)

Abstract : In a research on the practical dye-sensitized solar cell, a study on a large module have preference because module must be able to generate the proper current that is possible to convert electrically. So the parallel connection of dye-sensitized solar cells which outputs a large current easily is essential. However, there is a current loss in a parallel connection of dye-sensitized solar cells and the loss becomes larger according to increasing the number of parallel connection. In this study, we analyzed the cause of the current loss in the parallel connection by using the equivalent circuit analysis. One DSC used in this experiment had an active area 8 cm^2 ($4.62 \text{ cm} \times 1.73 \text{ cm}$) and it attained a conversion efficiency of 5.43% under 1 sun illumination (P_{in} of 100 mW/cm^2) using a solar simulator.

1. Introduction

전 세계적으로 화석연료의 축적량이 눈에 띄게 감소하고 온실가스의 배출량의 급증함에 따라 이를 대체하기 위한 신·재생에너지 개발이 활발해졌다. 이러한 추세에 힘입어 세계 태양광 발전 시장은 연간 30% 이상의 고도 성장률을 기록하며 빠른 성장을 하고 있다. 다양한 태양전지가 있지만 현재 태양광 발전 시장은 결정질 실리콘 태양전지가 압도적으로 시장을 점유하고 있다. 하지만 결정질 실리콘 태양전지는 최근 원자재 부족에 따른 원가 상승과 복잡한 공정 등으로 인해 경제성의 한계에 다다른 상태이다. 이에 따라 태양전지의 경제성 한계를 극복하기 위해 염료감응형 태양전지가 그 대안으로 제시되고 있다.^(1,2) 나노 기술을 적용한 염료감응형 태양전지는 높은 표면적을 이용해 고효율은 물론 태양광 입사각에도 덜 민감하게 반응해 발전 시간이 상대적으로 더 길다. 또, 이론상의 효율도 33%로서 지속적인 연구개발이 진행된다면 미래의 태양전지 시장 구조를 바꿔 놓을 것으로 기대된다.

1991년 스위스의 그레첼 교수가 개발한 이래로^(1,2) 염료감응형 태양전지는 효율 개선을 위한

수많은 연구가 시도되었다. 하지만 고효율 염료에 관한 연구나 고다공성 및 고전도성의 TiO_2 연구, 상대전극의 박막에 관한 연구 등 대부분의 연구가 재료적인 측면에서 이루어지고 있고 전해질 분야 또한 안정도를 높이기 위한 고체 전해질의 개발에 집중하고 있는 실정이다.⁽³⁻⁶⁾ 본 연구에서는 대부분의 연구가 화학적인 접근을 통한 재료에 관한 연구에 편중되어 있다는 점에 착안해 재료가 아닌 구조적인 면으로 접근해 보았다.

염료감응형 태양전지가 상용화되기 위해서는 출력 용량의 증대가 우선되어야 한다. 단위 면적에서 나오는 수 mA, 수 mW의 전류와 전력으로는 전기적인 변환이 불가능할 뿐 아니라 이 전기에너지를 전기기기의 구동 또한 불가능하다. 따라서, 염료감응형 태양전지의 모듈화를 통해 전기적인 변환이 가능하고 실용적으로 사용할 수 있

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

는 정도의 출력레벨을 얻어야 한다. 본 연구에서는 8cm^2 유효면적을 갖는 다수의 염료감응형 태양전지를 이용해 대용량 모듈을 구성하는 시도를 했다. 하지만, 출력 전류의 증대를 위해 병렬로 연결한 모듈에서 병렬 연결된 셀의 수에 따라 출력 전류가 비례하지 않고 많은 전류 손실이 발생하는 것을 실험적으로 확인했다. 염료감응형 태양전지의 대용량 모듈화를 위해서 직렬 연결만으로 모듈을 구성하는 경우 염료감응형 태양전지 하나의 출력에 해당하는 극히 낮은 전류값 때문에 실용성을 갖추기가 어렵다. 이러한 문제의 해결을 위해 본 연구에서는 염료감응형 태양전지의 전기적인 등가회로 해석을 통해 병렬 연결에서 발생하는 전류 손실 및 효율 저하 문제를 분석했다.

2. Experiment

본 연구에서 사용된 염료감응형 태양전지의 광전극은 다음과 같이 제조했다. Doctor-blade 법으로 균일 TiO_2 입자(Solaronix, HT)를 Fluorene doped Tin Oxide (FTO) 위에 약 $13\mu\text{m}$ 두께로 소결해 다공성 TiO_2 층을 형성했다. 이후, 20mM 농도의 N719 염료($\text{RuC}_{58}\text{H}_{86}\text{N}_8\text{O}_8\text{S}_2$) 용액에 24시간동안 광전극을 침착시켜 염료분자를 TiO_2 에 흡착시킨 후, 99.9% 에틸알콜($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)에 침지시켜 적층되어 있는 염료 분자를 제거함으로써 염료 단분자층을 형성해 광전극을 완성했다.

상대전극의 경우, RF Sputtering 방식으로써, 챔버 내에서 기관과 타겟 사이에 평균자유행정을 확보한 상태에서 불활성원소인 Ar을 매개로 주입하고 $2.8 \times 10^{-3}\text{Torr}$, 100°C 의 조건 하에서 150W의 RF sputter power를 60초간 인가함으로써 FTO 위에 100nm 두께의 백금 박막층을 형성했다.

앞의 과정을 통해 제작된 광전극과 상대전극을 $60\mu\text{m}$ 두께의 thermoplast hot-melt sealing sheet(SX 1170-60)를 사용해 5초간 열압착했다. Sand-blast(NORMEK, FG 1-93) 방식으로 상대전극에 뚫은 pin-hole을 통해 acetonitrile 계열의 휘발성 전해질을 주입한다. 이후, pin-hole을 sealing함으로써 휘발성을 가진 전해질이 누액되는 것을 방지해 셀을 완성한다.

완성된 전지의 I-V curve는 source meter (Model 2400, Keithley Instrument, Inc.)로 1sun ($100\text{mW}/\text{cm}^2$, AM 1.5)의 광입사하에서 진행되었다. 입사면적은 8cm^2 였고 I-V curve를 통해 개방 전압 V_{oc} , 단락 전류 밀도 J_{sc} , FF, 효율이 계산되었다.

모듈구성 실험은 유효면적 8cm^2 의 염료감응형 태양전지로 진행되었다. 대면적 셀은 Solar Simulator로 측정 가능한 범위를 넘어서기 때문에 태양광을 입력으로 측정이 진행되었다. 광입력은 $45\text{mW}/\text{cm}^2$ 였으며, 연결에 따른 셀의 출력 변화를 측정했고 이를 등가회로 해석에 적용해 보았다.

3. Result & Discussion

모듈구성 실험을 통해 실제 측정된 염료감응형 태양전지의 출력결과를 확인해 보았다. 실험에 사용된 염료감응형 태양전지는 0.81V의 출력

전압, 40.5mA의 출력전류를 갖는 유효면적 8cm^2 의 셀이다. 표 1은 1개에서 10개까지의 DSC를 병렬로 연결한 경우의 출력전압, 전류를 나타낸 것이다. 병렬 연결했기 때문에 전압이 1 셀의 값을 유지한다. 하지만, 셀 수에 비례해 증가해야 하는 전류는 증가가 크지 않고 연결된 셀 수가 늘어날수록 1 셀 출력전류의 2배로 수렴해가는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 병렬 연결에 따른 출력전압, 전류

Parallel Connection		
Number of cell	V	I
1	0.812	40.5
2	0.811	49.4
3	0.809	54.0
4	0.812	58.0
5	0.812	60.0
10	0.813	72.5

이 해석에 따라 전류 손실이 큰 병렬 연결을 배제하고 손실이 없는 직렬 연결만으로 모듈을 구성한다면 높은 전압을 쉽게 얻을 수 있다. 하지만, 1 셀에 해당하는 극히 낮은 출력전류 때문에 전력변환이 불가능해진다. 즉, DSC 모듈이 실용적인 전원으로 동작하기 위해서는 전력변환이 용이하도록 병렬 연결을 통해 적정 수준의 출력전류 레벨을 얻어야 한다.

재료, 화학적인 연구에 비해 아주 적은 수이지만, 일부 연구에서 이미 염료감응형 태양전지의 전기적인 등가회로 해석이 시도되었다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 해석의 포인트에 따라서 등가회로의 형태가 다른 경우도 있으나 대부분의 등가회로는 그림 1과 같이 전류원과 다이오드, 커패시터 및 직, 병렬 저항 성분으로 구성된 형태를 나타내고 있다.⁽⁷⁾

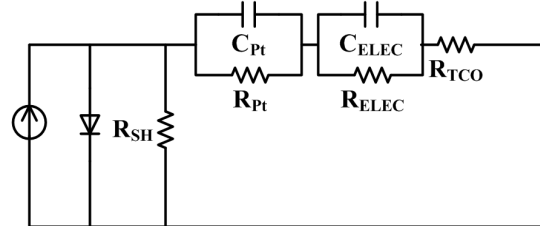


Fig. 1 염료감응형 태양전지의 등가회로

여기서, R_{TCO} 는 투명전극의 표면 저항 성분이고, C_{Pt} 와 R_{Pt} 는 백금 상대전극의 표면에서 전하 전달에 의한 impedance이다. 또, C_{ELEC} 과 R_{ELEC} 은 전해질 내에서 이온에 의한 전하 전달과 관련된 impedance이고, TiO_2 /염료/전해질 계면에서 전자 전달과 관련해서는 다이오드와 같이 동작한다. R_{SH} 는 역전자 전달에 의한 병렬 저항이다.⁽⁷⁾

C_{Pt} , C_{ELEC} 이 $10\mu\text{F}/\text{cm}^2$, $1\text{F}/\text{cm}^2$ 으로 상당히 크다는 점과 직류 전류원으로 동작하는 염료감응형 태양전지의 특성상, 커패시터 성분은 회로 해석에서 무시할 수 있다. 커패시턴스를 제외한 후의 직렬 저항 R_{Pt} , R_{ELEC} , R_{TCO} 를 합해 R_s 라고 두고, 다이오드 내부 저항과 병렬 저항 R_{SH} 의 합성 저항을 R_{SH}' 라 한다.

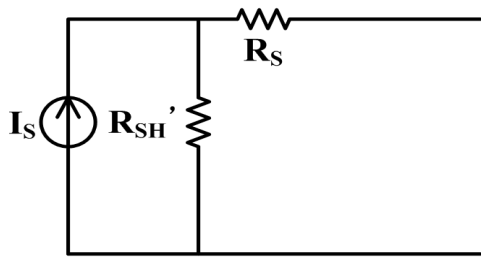


Fig. 2 간략화된 염료감응형 태양전지 등가회로

그러면, 그림 1의 등가회로는 그림 2와 같이 전류원과 직, 병렬 저항의 회로로 간략화되고, 이를 Thevenin-Norton 등가회로 해석을 통해 그림 3과 같이 전압원과 두 개의 직렬 저항으로 표현할 수 있다. 이 때, 직렬 저항 R_{SH} 와 R_S 는 합성 저항 R 로 표현할 수 있다.

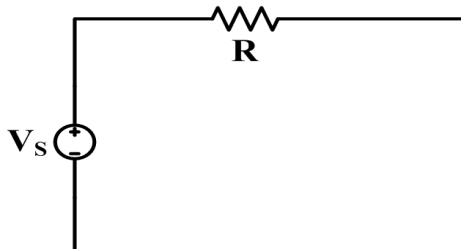


Fig. 3 Thevenin-Norton 변환된 등가회로

그림 4는 부하(R_L)를 연결했을 때의 등가회로이다. 전류원(I)은 Thevenin-Norton 등가 이론에 따라 V_S/R 값을 갖게 되고, I_{SC} 는 R_L 이 0일 때, 즉, 회로가 단락되었을 때 전류이므로 I 와 값을 갖는다. 최근 Grätzel이 발표한 고효율 셀(V_{oc} 0.846V, J_{sc} 17.73mA/cm²)을 적용시키면, 1cm²의 유효면적에서 R 은 약 47.7Ω이 된다. 즉, R 값은 일반적인 load에 비해 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이는 내부 병렬 저항이 작아서 많은 전류를 부하가 아닌 내부 저항 쪽으로 흘리게 되어 출력 전류의 감소를 유발한다.

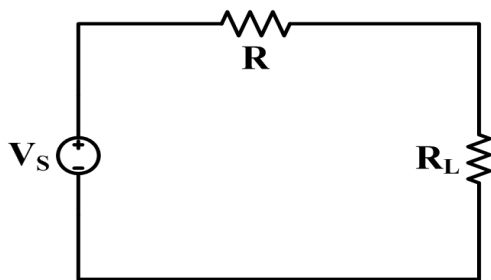


Fig. 4 부하를 연결한 등가회로

셀의 직렬 또는 병렬연결의 수가 늘어날 때의 등가회로 해석을 아래에 했다. 그림 5는 2개의 염료감응형 태양전지를 병렬로 연결한 것을 등가회로로 표현한 것이다. 이 때, 부하에 흐르는 전류 I_L 은 식 1과 같이 나타낼 수 있다. 부하 R_L 이 $R/2$ 에 비해 상대적으로 큰 값이라면 I_L 은 $2I$ 보다 작은 값이 되는 것이 명백하다. I_L 이 $2I$ 에 가까운 값을 갖기 위해서는 R_L 이 0에 가까운 값, 즉, 단락상태가 되어야 한다. R_L 이 R 만큼 작은 값을 가지는 부하라고 가정을 해도 병렬 연결하는 셀

의 수를 더 많이 늘인다면 식 2에 의해 I_L 은 I 에 수렴하게 된다. 결국, 전류원 I 를 n 개 병렬연결 하더라도 출력전류로 I 만큼을 얻는데 지나지 않는 것이다.

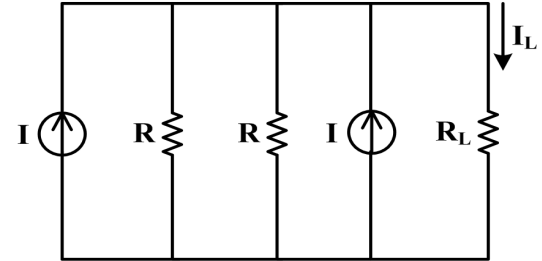


Fig. 5 병렬연결된 2개의 셀의 등가회로

본 연구는 앞서 살펴 본 등가회로 해석을 이용해 병렬연결 상의 전류 손실을 해결하려는 시도를 했다. 그림 6(a)는 직렬로 연결한 2개의 셀을 다시 병렬로 연결한 구성의 전기적인 등가회로이다.

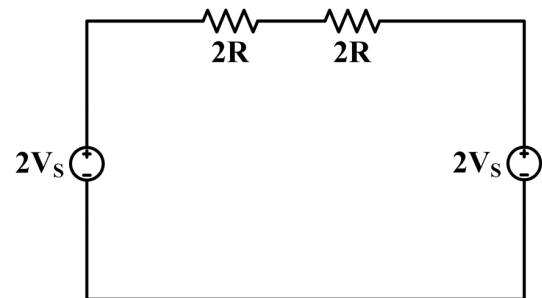


Fig. 6(a) 직, 병렬연결된 4개의 셀의 등가회로

이를 Thevenin-Norton 등가 회로 해석을 통해 전압원을 전류원으로 바꾸고 두 개의 병렬저항과 두 전류원을 하나로 정리하면 병렬 전류원은 합해지고 병렬 저항값은 반이 되어 그림 6(b)와 같이 나타낼 수 있다.

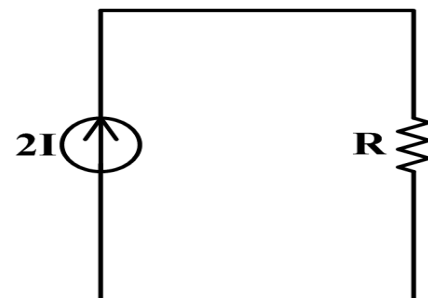


Fig. 6(b) 그림 6(a)를 간략화한 회로

즉, 모듈 구성에서, 직렬 연결한 셀 수와 병렬 연결한 셀 수가 같다면, 내부 impedance는 1 셀의 impedance와 일치하게 된다. 병렬연결에서 발생하는 전류 손실은 연결되는 셀의 수가 많아질수록 작아지는 내부 임피던스 때문이므로, 병렬 연결된 셀 수 이상으로 직렬 연결되면 내부 impedance의 감소를 막을 수 있는 것이다. 이는 염료감응형 태양전지 모듈 구성에 있어서 손실을 최소화하기 위해서 아주 유용한 것이다.

이는 아래의 실험 결과를 통해 확인 가능하다.

DSC를 1개에서 5개까지 병렬로 연결한 구성에서 DSC를 2, 5개씩 직렬로 연결해 출력 전압, 전류를 확인했다.(표 2) 앞서 살펴 본 것과 마찬가지로, 병렬 연결된 셀의 수가 늘어나는 경우 출력 전류 손실이 크게 나왔다. 그러나 직렬 연결된 셀을 추가해 병렬연결 수보다 많이 하는 경우, 출력전류도 병렬연결 수에 비례해 증가하는 것이 확인되었고 이는 직렬연결 수가 많아질수록 더욱 효과적이었다.

Table 2 직, 병렬연결에 따른 출력전압, 전류

연결	전압 (V)	전류 (mA)	전압 (V)	전류 (mA)
직렬	2 (cells)		5 (cells)	
1 (cell)	1.61	40.1	4.05	41.8
2 (cells)	1.62	73.7	4.03	83.2
3 (cells)	1.62	92.9	4.07	122.8
4 (cells)	1.62	102.7	4.05	153.6
5 (cells)	1.62	108.6	4.08	170.2

4. Conclusion

염료감응형 태양전지의 실용화를 위해서는 대용량 모듈을 구성하는 것이 우선되어야 한다. 대용량 모듈의 구성에 있어서, 변환 가능한 수준의 출력 전류 레벨을 얻기 위해 염료감응형 태양전지를 병렬로 연결하는 경우, 출력 전류가 연결된 셀 수에 비례해 증가하지 않고, 어느 정도의 증가를 보이다가 수렴하게 된다. 본 연구에서는 병렬연결 시에 나타나던 효율 저하를 등가회로 해석을 통해 파악하고 해결방안을 찾음으로써 대용량 모듈의 구성이 가능한 방법을 제안했다. 등가회로 해석상에서 저항, 커패시턴스 등 세부 소자들의 정확한 값을 파악하지 못한 점은 앞으로 풀어가야 할 문제이지만, 앞으로의 모듈 구성에 출력 전류 감소를 막을 수 있는 시도임은 틀림없다고 하겠다.

후 기

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

References

[1] 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

[2] B. O'Regan, M. Grätzel, 1991, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature, Vol.353, Pages 737-740

[3] K.J.Jiang, J.B.Xia, N.Masaki, S.Noda,

S.Yanagida, 2008, "Efficient sensitization of nanocrystalline TiO₂ films with high molar extinction coefficient ruthenium complex", Inorg. Chim. Acta., Vol. 361, Pages 783-785

[4] S. Ngamsinlapasathian, 2004, "Highly efficient dye-sensitized solar cell using nanocrystalline titania containing nanotube structure", J. Photochem. Photobio. A: Chem., Vol. 164, Pages 145-151

[5] S.S.Kim, Y.C.Nah, Y.Y.Noh, J.Jo, D.Y.Kim, 2006, "Electrodeposited Pt for cost-efficient and flexible dye-sensitized solar cells", Electrochimica Acta., Vol. 51, Pages 3814-3819

[6] H.Matsui, K.Okada, T.Kawashima, T.Ezure, N.Tanabe, R.Kawano, M.Watanabe, 2004, "Application of an ionic liquid-based electrolyte to a 100 mm×100 mm sized dye-sensitized solar cell", J. Photochem. Photobio. A: Chem., Vol. 164, Pages 129-135

[7] L. Han, N. Koide, Y. Chiba, A. Islam, T. Mitate, 2006, "Modeling of an equivalent circuit for dye-sensitized solar cells: improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells by reducing internal resistance", C. R. Chime, Vol.9, Pages 645-651

[8] N. Koide, A. Islam, Y. Chiba, L. Han, 2006, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit", J. Photochem. Photobio. A: Chem., Vol. 182, Pages 296-305

[9] M. Murayama, T. Mori, "Evaluation of treatment effects for high-performance dye-sensitized solar cells using equivalent circuit analysis", Thin Solid Film, Vol. 509, Pages 123-126

[10] L.Han, N.Koide, Y.Chiba, A.Islam, R.Komiya, N.Fuke, A.Fukui, R.Yamanaka, 2005, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells by reduction of internal resistance", Applied Physics Letters, Vol. 86, Pages 213501