

염료흡착 시간에 따른 염료감응형 태양전지의 출력 특성 및 내부 임피던스 분석

논문
59-1-17

Analyses of the Output Characteristics and the Change of Internal Impedance of Dye-sensitized Solar Cell According to the Adsorption Time

김희제* · 이정기** · 서현웅** · 손민규*** · 신인영*** · 안태풍§ · 김진경†
(Hee-Je Kim · Jeong-Gee Lee · Hyunwoong Seo · Min-Kyu Son · Inyoung Shin · Taepung An · Jin-Kyoung Kim)

Abstract - Dye-sensitized solar cell (DSC) has been expected to be an alternative to the conventional silicon solar cell due to simple manufacturing process and low fabrication costs. In order to improve productivity of DSC, we attempted to optimize the required time of the adsorption process. According to the change in the adsorption time from 1 to 24h, We analyzed the output characteristics and the change of internal impedance. As a result, The outputs of DSC were continuously increased until 12h of the adsorption time and remained the same after that. Also, We reconfirmed this result that 12h was optimum adsorption by the analysis of the electrochemical impedance spectroscopy because the internal impedance was similar to the output.

Key Words : Dye-sensitized solar cell, Adsorption time, Electrochemical impedance spectroscopy, Photovoltaic performance

1. 서론

저탄소 녹색 성장을 화두로 하여 많은 신재생 에너지의 개발이 활발하게 진행 중인 가운데 가장 확실한 미래 에너지원으로서 무한성, 청정성, 안정성을 두루 겸비한 태양에너지의 이용은 이제 필요가 아닌 필수이다. 전 세계 연간 에너지 소비량 (82.83×10^{12} kWh)의 약 10,000배에 달하는 태양에너지 ($795,000 \times 10^{12}$ kWh)를 지구가 받고 있다는 점만으로도 태양전지 활용의 중요성을 설명할 수 있고, 이러한 추세에 발맞추어 전 세계의 태양전지 시장은 매년 30% 이상의 성장률을 기록하며 그 규모를 키워가고 있다. 그중 가장 널리 사용되고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 원자재의 지속적인 가격 상승과 과열된 경쟁으로 인해 최근 경제성의 한계를 드러내고 있다. 여기에 기존 전지의 1/3 ~ 1/5 에 지나지 않는 저렴한 제조비용과 투명성, 광의 입사각에 둔감한 특징 등을 장점으로 하는 염료감응형 태양전지(DSC : Dye-sensitized solar cell)는 기존의 시장구조를 획기적으로 변화시킬 수 있는 유력한 후보 중 하나이다[1-9]. 1991년 스위스의 그레첼 교수가 개발한 이래로 지속적인 효율 향상을 달성한 DSC는 현재 11.6%의 최고 효율을 기록하고 있고 이론적인 효율 역시 33%에 이르는 고효율 태양전지이다 [10]. 최근에는 여러 나라에서 상용화를 목전에 두고 있을

만큼 연구가 급진전 되었지만 최대 24시간에 달하는 염료 흡착 공정은 전체 공정 소요 시간의 약 40%를 차지할 정도로 길기 때문에 생산성 저하의 원인이 되고 있다[11-12].

식물의 광합성 원리에 기초한 DSC는 그림 1과 같이 투명전극 (TCO : Transparent Conduction Oxide), 나노 다공성 TiO_2 , 염료 분자 층으로 구성된 광전극과 투명전극, 백금 층으로 구성된 상대전극 사이에 산화 환원 층 전해질이 채워진 샌드위치 구조이다. 태양광이 전지에 입사되면 염료 분자가 포톤을 흡수해 여기하면서 전자를 방출함으로써 기전력을 발생시키는 원리로 동작한다. 이러한 광전극을 제조하는 과정에서의 염료 흡착 공정은 TiO_2 층이 도포된 광전극을 염료 용액에 침지시킴으로써 자유 운동하는 염료 분자와 TiO_2 입자가 공유 결합하는 형태로 진행된다. 염료 분자는 특정한 방향성 없이 운동하고 있기 때문에 TiO_2 입자와 결합하는 염료분자의 수는 TiO_2 표면이 포화되기 전까지는 흡착 시간에 비례해서 증가한다. 모든 TiO_2 입자에 염료 분자가 결합한 이후에는 시간이 지나더라도 더 이상 TiO_2 입자와의 결합은 이루어 지지 않으며, 염료분자 위에 쌓여 다중층을 형성하게 된다. TiO_2 입자와 결합하지 못한 염료분자는 DSC 제작 과정에서 염료의 단분자층을 형성하기 위해 무수에탄올을 사용해 제거되기 때문에 DSC의 특성에는 영향을 주지 못한다. 대부분의 연구에서는 TiO_2 와 염료분자 사이의 결합이 충분히 진행될 수 있도록 24시간의 염료 흡착을 선택하고 있다. 하지만 염료 흡착 시간과 DSC 출력의 상관관계를 명확히 한다면 불필요한 시간 소요를 줄임으로써 생산성 향상을 도모할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 광전극 제조 공정에 있어서의 염료 흡착 시간을 1-24시간 까지 나누어 제작함으로써 염료 흡착 시간에 따른 DSC의 출력 특성과 내부 임피던스의 변화를 측정, 분석함으로써 최적의 염료 흡착 시간을 찾아내는 시도를 했

* 시니어회원 : 부산대학 전자전기공학과 교수
** 정 회 원 : 부산대학 전자전기공학과 박사과정
*** 정 회 원 : 부산대학 전자전기공학과 석사과정
§ 비 회 원 : 인택전기전자(주)
† 교신저자, 준회원 : 부산대학 전자전기공학과 석사과정
E-mail : jk3321@pusan.ac.kr
접수일자 : 2009년 8월 13일
최종완료 : 2009년 10월 14일

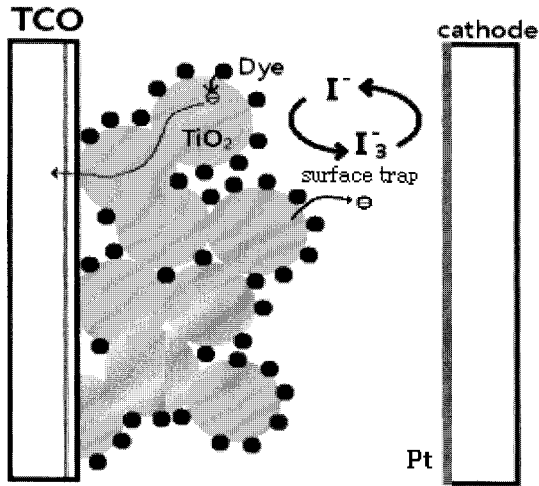


그림 1 DSC의 단면구조 및 전자의 이동
 Fig. 1 The cross section of DSC construction and movement of the electron

다. EIS(electrochemical impedance spectroscopy) 측정을 통해 TiO₂에 흡착된 염료 분자가 DSC의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 염료흡착 시간에 따른 내부 임피던스와 출력 사이의 상관관계를 도출 하였다. 제작된 DSC의 유효면적은 0.25cm², TiO₂ film의 표면적은 64.8m²/g, 실험 온도 28℃의 조건에서 염료흡착 시간이 12시간 경과했을 때가 최적의 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

2. 실험방법

대전극의 제조는 먼저 fluorine-doped tin oxide(FTO) glass(13Ω/cm², Hartford Glass Co. Inc.)에 샌드블라스트 방법으로 전해질 주입을 위한 미세구멍을 형성한다. 샌드블라스트(FG 1-93, NORMEK)의 입자크기는 5μm, blast-nozzle은 Ø 0.6mm이고, 4bar(1bar=1.019716kg/cm²)의 압력으로 모래를 분사한다. 이 후 아세톤, 에탄올, 증류수로 연속 세정한 FTO 위에 RF sputtering 방식으로 Pt층을 형성한다. 진공 챔버 내의 base pressure 를 1.0×10⁻⁵ Torr로 설정한 후, 아르곤을 주입해서 working pressure 2.8×10⁻³ Torr에 맞추고, 100℃의 조건에서 13.56MHz, 150W의 RF power를 90초간 인가하여 약 150nm두께의 Pt박막을 형성하였다.

광 전극은 FTO glass에 TiO₂ (Ti-Nanoxide HT/SP, Solaronix) paste를 Doctor-blade 방법을 이용하여 약 50μm의 두께로 도포한 후 450℃에서 30분간의 소성을 통해 다공성 구조를 형성하였다. FE-SEM(field emission scanning electron microscopy, S-4200, Hitachi) 을 통해 확인한 결과, 소성된 TiO₂의 두께는 약 9μm이며 입자의 지름은 약 20nm였다.(그림 2) Surface Area analyzer (BET(Brunauer-Emmet-Halenda); Micromeritics Co., ASAP 2010, USA)를 이용하여 분말의 표면적을 측정하였다. 그 결과 TiO₂의 표면적은 64.8m²/g로 확인할 수 있었다. 0.5mM 농도의 N719 염료 (cis-bis (isothiocyanato) bis (2,2'-bipyridyl)-4-4'-

dicarboxylato)-ruthenium(II)-bis-tertabutylammonium, RuC₃₈H₈₆N₈O₈S₂) 용액에 광 전극을 침지시켜 염료 흡착을 진행했다. 이 때 염료 흡착 시간에 따른 DSC의 출력 특성 비교를 위해 염료 흡착은 1~24 시간 까지 다양하게 진행되었다. 그 후 99.9% 에틸알콜(C₂H₅OH)에 침지시켜 적층되어 있는 염료 분자를 제거하고 염료 단분자층을 형성함으로써 광전극을 완성하였다. 여기서, 적층되어 있는 염료 분자는 TiO₂ 표면에 흡착한 염료분자와 전해질 사이의 접촉을 방해하고 발생한 전자의 재결합을 유도해서 전체적인 효율을 저하시키게 되므로 반드시 염료 단분자층을 형성해야 한다.

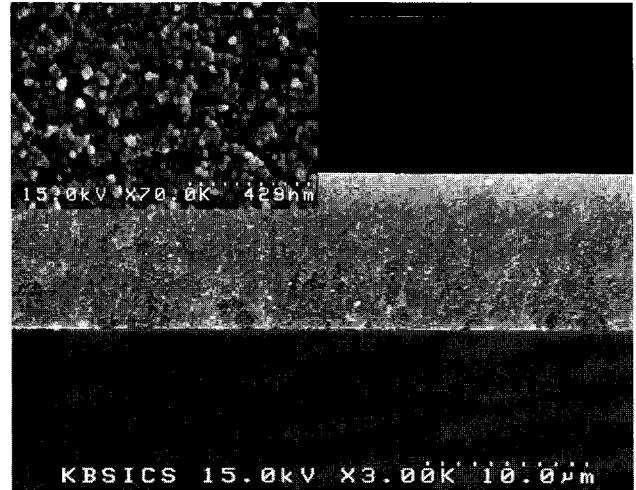


그림 2 TiO₂ 박막의 SEM 사진
 Fig. 2 The SEM photo of TiO₂ film

위와 같이 제작된 광전극과 상대전극을 60μm 두께의 thermoplast hot-melt sheet (SX 1170-60, Solaronix)를 사용해 7초간 100℃의 온도에서 열 압착하고, 샌드블라스트한 미세구멍을 통해 0.5M LiI, 0.05M I₂, 0.5M 4-tertbutylpyridine 을 포함하는 전해질을 주입하였다. 휘발성인 전해질의 누출을 막기 위해 cover glass로 미세구멍을 실링 하여 DSC를 완성하였다.

완성된 전지의 출력특성은 solar simulator를 이용하여 표준 광원 1sun(100mW/cm², AM 1.5) 조건에서 source meter (Model 2400, Keithley Instrument, Inc.)로 측정하였다. 유효면적은 0.25cm²였고, I-V curve와 식(1), (2)를 통해 개방전압 (V_{oc}), 단락전류(I_{sc}), FF, 효율(η)이 계산되었다.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{\in}} \times 100(\%) \quad (2)$$

DSC의 내부 impedance는 EIS(SP-150, Biologic SAS)에 의해 상온에서 10mHz~1MHz의 주파수 범위로 측정되었다. 측정시 인가된 바이어스 전압은 DSC의 V_{oc} 값이었고, AC의 진폭은 10mV였다. 임피던스 특성은 Nyquist diagram 으로 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 1~24 시간 동안의 염료흡착 시간에 따른 I_{SC} 와 V_{OC} 변화를 나타낸 그래프이다. 1~4시간의 짧은 흡착 과정으로는 TiO_2 입자에 염료 분자가 흡착되기 충분하지 않은 시간이기 때문에 극히 낮은 전류를 기록한다. 이는 12시간의 흡착까지 동일한 것으로 흡착 시간에 비례해서 출력 전류가 증가하는 것을 알 수 있다. TiO_2 에 흡착된 염료분자의 수가 많을수록 광 여기에 의해 발생하는 전자 수가 많아지게 되고, 결과적으로 DSC의 출력 전류가 증가하게 된다. V_{OC} 의 경우는 I_{SC} 만큼의 큰 변화를 보이지는 않지만, I_{SC} 와 마찬가지로의 경향을 보인다. 짧은 시간의 흡착에서는 0.62V의 전압을 기록한 반면, 충분한 흡착이 진행된 후의 V_{OC} 는 0.74V 까지 상승해 약 20%의 증가를 보인다. 이는 surface trap의 감소에 의한 것으로 TiO_2 입자에 흡착되는 염료 분자의 수가 증가함에 따라 그림 1에 나타낸 surface trap의 수는 감소하게 되고 결과적으로 V_{OC} 의 증가를 가져오게 된다[12].

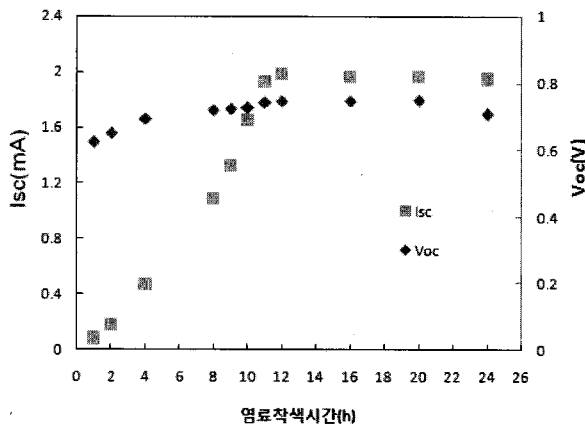


그림 3 염료 흡착 시간에 따른 I_{SC} 와 V_{OC} 변화.
Fig. 3 The change of I_{SC} and V_{OC} according to the adsorption time

염료흡착 시간이 늘어남에 따라 I_{SC} 와 V_{OC} 가 증가하는 경향은 12시간 동안의 흡착까지 나타난다. 이때의 I_{SC} 는 약 3.92mA, V_{OC} 는 0.7V 이다. 하지만 12시간 이상의 염료흡착 시간에서는 더 이상 I_{SC} 와 V_{OC} 가 증가하지 않고, 일정한 값을 보인다. 즉, 12시간 정도 염료흡착이 진행되면, 대부분의 TiO_2 입자에 염료 분자가 흡착되고, 흡착하는 염료 분자 수가 증가하지 않으므로 더 이상 출력 전류도 증가하지 않는 것이다. V_{OC} 또한 염료 분자의 충분한 흡착으로 대부분의 surface trap이 사라지고 남은 trap은 더 이상 감소하지 않기 때문에 일정한 값을 갖는 것이다. 앞서 언급한 식 (1)과 (2)를 이용해 서로 다른 염료흡착 시간을 갖는 DSC의 효율 변화를 그림 4에 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 염료 흡착 시간에 따른 I_{SC} , V_{OC} 변화에서는 V_{OC} 보다 I_{SC} 가 지배적인 factor 이다. 따라서 DSC의 효율 역시 I_{SC} 의 변화와 유사하다는 것을 알 수 있다.

$$J_{SC} = \int qF(\lambda)[1-r(\lambda)]LHE(\lambda)\phi_{e-inj}(\lambda)\eta_{CC}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$= \int qF(\lambda)[1-r(\lambda)]LHE(\lambda)\Phi(\lambda)_{ET} d\lambda$$

이는 식 (3)으로도 설명이 가능하다. 식 (3)은 light harvesting efficiency(LHE)와 단락 전류 밀도 (J_{SC}) 사이의 상호관계를 나타낸다. 여기서 q 는 전하량, $F(\lambda)$ 는 파장 λ 에 따른 전자 발생률, $r(\lambda)$ 는 전도성 유리의 흡수 및 반사에 의한 빛의 손실량, $\Phi_{e-inj}(\lambda)$ 는 염료로부터 여기되어 TiO_2 로 주입되는 전자, η_{CC} 는 광전극에서의 전하수율, $\Phi(\lambda)_{ET}$ 는 전자의 이동량으로 정의된다[13-15].

전지로 입사하는 광에 대해 DSC는 약 20% 정도되는 TCO 표면의 반사를 제외하고 나면, 대부분의 투과된 빛을 염료 분자가 흡수한다. 따라서 TiO_2 표면에 흡착한 염료 분자의 수가 증가하면 동일한 광에 대해서 더 많은 photon을 흡수하게 됨에 따라 전지의 LHE(λ)가 증가한다. 염료분자 자체의 absorption spectra 에 따라 파장별 이용률의 차이는 있지만, 전체적인 흡수율이 향상되므로 LHE는 가시광 영역 전 파장 내에서 증가하게 되는 것이다. 고효율 DSC에서 $\Phi(\lambda)_{ET}$ 는 1에 가까운 고정 값이고, q , $F(\lambda)$, $r(\lambda)$ 는 상수 값이므로 LHE(λ)의 증가가 J_{SC} 의 증가를 유도하는 것이다.

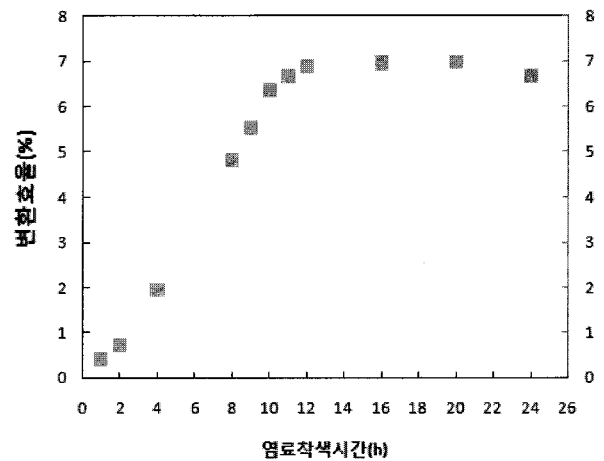


그림 4 염료 흡착시간에 따른 DSC의 효율 변화
Fig. 4 The change efficiency according to the adsorption time

다시 말해 빛을 흡수한 염료는 여기되어 전자를 방출하고 이렇게 발생된 전자는 TiO_2 전도대로 주입되어 확산에 의해 TCO에 전달되어 전류가 흐르게 되는 DSC의 원리에서 TiO_2 입자에 흡착된 염료의 수가 증가하면 동일한 입사광에 대해 더 많은 염료가 여기되고, 따라서 더 많은 전자를 내놓기 때문에 J_{SC} 가 증가하는 것이다.

TiO_2 입자의 크기가 수~수십nm 정도로 매우 작기 때문에, 그 표면에 흡착되는 염료 분자는 최고 배율의 SEM으로도 확인할 수 없다. 따라서 흡착되는 염료 분자의 증가는 간접적으로 확인해야 한다. 여기서는 내부 임피던스의 변화를 통해 흡착되는 염료 분자의 정도를 확인한다. 내부 임피던스 변화, 특히 중간 주파수 영역 내에서 나타나는 두 번째 semicircle의 변화는 TiO_2 입자에 대한 염료 분자의 커버 상태와 밀접한 연관이 있다. TiO_2 표면상의 surface trap에서는 전해질이 접촉되어 있기 때문에 전자의 재결합이 발생하고 V_{OC} 가 감소하는 원인이 된다. 다시 말하자면, surface trap에서 나타나는 전자 trap 현상은 DSC의 내부 임피던스

에서 직렬 저항 성분 증가의 원인이 된다. 이는 다른 문헌에서도 확인할 수 있다[16]. 따라서 TiO_2 표면에 흡착된 염료 분자 수에 따라 전자 trap 수가 변화하고, 이는 내부 임피던스 크기의 변화로 이어지는 것이다. 즉, TiO_2 표면에 더 많은 염료 분자가 존재할수록 중간 주파수 영역의 저항 값은 줄어들게 된다.

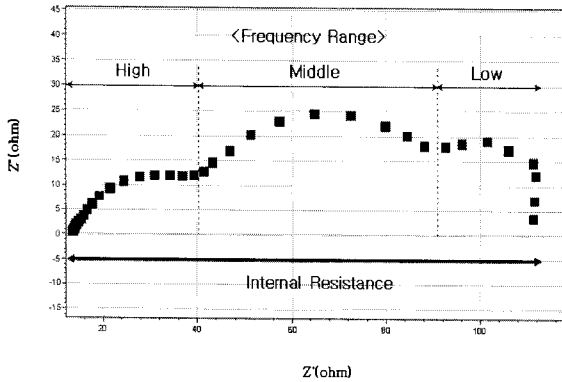


그림 5 DSC의 EIS Nyquist 선도
Fig. 5 EIS Nyquist diagram of DSC

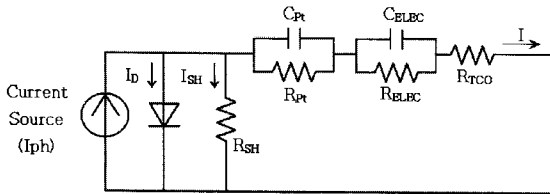


그림 6 DSC의 전기적인 등가회로
Fig. 6 The electrical equivalent circuit of DSC

일반적인 DSC의 EIS 나이키스트 선도는 그림 5와 같이 나타난다. 전체 주파수 영역에 대해 3 개의 semicircle이 나타나는데 이때, 1MHz 이상의 영역은 투명전극의 표면저항에 의한 저항성분 이고, 고주파 영역(100Hz~1MHz)의 첫 번째 semicircle은 Pt 상대 전류에서의 전하수송, 중간 주파수 영역(1~100Hz)의 두 번째 semicircle은 TiO_2 /염료/전해질 계면에서의 전자 이동, 마지막 저주파수 영역의 (10mHz~1Hz) semicircle은 전해질 내의 ion 이동에 관한 내부 임피던스이다[17-21]. 이를 전기적인 등가회로로 나타내면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

그림 7은 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 시간 동안 염료 흡착을 진행했을 때, 완성된 DSC의 주파수에 따른 임피던스를 나타내는 그래프이다. 염료 흡착 시간이 1시간에서는 두 번째 semicircle의 저항 성분이 약 171Ω을 나타내었고, 2시간 일 때에는 107Ω을 나타내 매우 큰 임피던스 값을 나타내었지만 염료 흡착 시간이 4시간, 8시간일 때에는 각각 56Ω, 46Ω으로 급격하게 줄어들었고, 12시간 이후에는 약 30Ω으로 흡착시간이 짧을 때와 비교 했을 때 1/5~1/3에 해당하는 작은 임피던스 값이 일정하게 나타났다. 즉, TiO_2 에 흡착된 염료 분자 수가 적고 TiO_2 표면과 전해질이 접촉되는 surface trap이 많기 때문에 염료 분자로부터 발생하는 전자

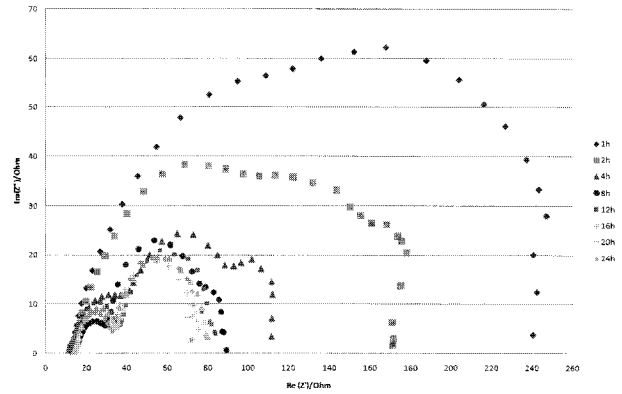


그림 7 DSC의 주파수에 따른 임피던스 특성
Fig. 7 The characteristics of internal impedance according to the frequency

수도 적고, TiO_2 /염료/전해질 계면에서의 electron loss도 많아서 임피던스 값이 매우 크게 나타나는 것이다. 하지만 임피던스의 크기는 염료흡착 시간이 길어짐에 따라 작아지게 되고, 약 12시간 이상의 염료 흡착이 진행된 경우 비슷한 크기와 형태의 그래프를 보인다. 즉 TiO_2 표면에 염료 분자가 충분히 흡착함으로써 발생하는 전자 수도 많아지고, TiO_2 /염료/전해질 계면 역시, 접촉성능이 좋아짐에 따라 저항성분이 감소하는 것이다. 따라서 EIS 분석을 통해서도 12시간의 염료 흡착이 DSC 성능에 최적이라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 DSC의 생산성 향상을 위해서 가장 긴 공정 시간을 필요로 하는 염료 흡착 공정의 최적화를 시도하였다. 염료 흡착 시간에 따른 DSC의 출력 특성과 내부 임피던스의 변화를 측정, 분석함으로써 최적의 염료흡착 시간을 도출하였다. 염료 흡착 시간을 1~24시간으로 변화시킨 DSC의 I_{sc} 와 V_{oc} 의 변화를 확인한 결과, 12시간의 염료 흡착까지는 늘어난 흡착시간에 비례해서 I_{sc} 와 V_{oc} 가 증가하는 경향이 나타났으나 그 이후의 시간에서는 거의 변화가 없었다. 이는 염료흡착 시간에 따른 DSC의 내부 임피던스의 변화에서도 확인되었다. 염료흡착 시간이 12시간 이하인 DSC의 내부 임피던스는 TiO_2 /염료/전해질 계면의 큰 저항 성분으로 인해 매우 큰 값을 보였지만 염료흡착 시간이 12시간 이상인 DSC의 내부 임피던스는 충분히 흡착한 염료 분자에 의해 작은 값이 일정하게 나타났다. 따라서 DSC의 염료 흡착 공정에서 12시간의 흡착시간이 최적의 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-D00283)

참 고 문 헌

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, D. Fitzmaurice, "Optical electrochemistry steady-state spectroscopy of conduction band electrons in a metal oxide semiconductor electrode", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 183, pp. 89-93, 1991
- [2] M. Gratzel, "Photoelectrochemical cells", *Nature* Vol. 414, pp. 338, 2001
- [3] Michael Grätzel, "Dye-sensitized solar cells", *J. Photochem. Photobio. C: Photochem. Rev.*, Vol. 4, pp. 145, 2003
- [4] M. Durr, A. Schmid, M. Obermaier, S. Rosselli, A. Yasuda, G. Nelles, "Low-temperature fabrication of dye-sensitized solar cells by transfer of composite porous layers", *Nature*, Vol. 4, pp. 607, 2005
- [5] M. Gratzel, "A photovoltaic device structure based on internal electron emission", *Nature*, Vol. 421, pp. 6923, 2003
- [6] Hee-Je Kim, Yong-Chul Kim, Ji-Tae Hong, Mi-Jeong Kim, Hyun-Woong Seo, Je-Wook Park, Jin-Young Choi, "A Study of the Photo-Electric Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cell Under Lower Light Intensity", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 513-517, 2007
- [7] Hee-Je Kim, Yong-Chul Kim, Jin-Young Choi, Ho-sung Kim, Dong-Gil Lee, Ji-Tae Hong, "염료감응형 태양전지 광전극의 초음파 열처리를 통한 광전효율 개선에 관한 연구", *Trans. KIEE*. Vol. 57, No. 5, MAY, 2008
- [8] Hee-Je Kim, Sung-Joon Park, Jin-Young Choi, Hyun-Woong Seo, Mi-Jeong Kim, Kyoung-Jun Lee, Min-Kyu Son, "가로-세로 비율에 따른 염료감응형 태양전지의 최적 조건 도출 및 모듈 제조", *Trans. KIEE*. Vol. 58, No. 1, JAN, 2009
- [9] Keun-Ju Song, Jin-Young Choi, Ji-Tae Hong, Mi-Jeong Kim, Hyun-Woong Seo, Dong-Yoon Lee, Hee-Je Kim, "스퍼터링 증착한 Pt 전극을 가지는 염료감응형 태양전지의 셀 폭 변화에 따른 전기적 특성 연구", *Trans. KIEE*. Vol. 56, No. 5, MAY, 2007
- [10] B. O' Regan, M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature*, Vol. 353, pp. 737, 1991
- [11] S. Nakade, Y. Saito, W. Kubo, T. Kanzaki, T. Kitamura, Y. Wada, and S. Yanagida, "Enhancement of electron transport in nano-porous TiO₂ electrodes by dye adsorption", *Electrochem. Commun.* Vol. 5, pp.804, 2003
- [12] S. Sakaguchi, H. Ueki, T. Kato, T. Kado, R. Shiratuchi, W. Takashima, K. Kaneto, and S. Hayase, "Quasi-solid dye sensitized solar cells solidified with chemically cross-linked gelators: Control of TiO₂/gel electrolytes and counter Pt/gel electrolytes interfaces", *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* Vol. 164, pp.117, 2004
- [13] J. R. Durrant, S. A. Haque, E. Palomares, "Towards optimisation of electron transfer processes in dye sensitised solar cell", *Chem. Rev.* Vol. 248, pp. 1247, 2004
- [14] Y. Tachibana, H. Hara, K. Sayama, H. Arakawa, "Quantitative Analysis of Light-Harvesting Efficiency and Electron-Transfer Yield in Ruthenium-Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells", *Chem. Mater.* Vol. 14, pp. 2527, 2002
- [15] R. Katoh, A. Furube, T. Yoshihara, K. Hara, G. Fujihashi, S. Takano, S. Murata, H. Arakawa, M. Tachiya, "Efficiencies of Electron Injection from Excited N3 Dye into Nanocrystalline Semiconductor (ZrO₂, TiO₂, ZnO, Nb₂O₅, SnO₂, In₂O₃) Films", *J. Phys. Chem. B* Vol. 108, pp. 4818, 2004
- [16] Yuhei Ogomi, Shohei Sakaguchi, Takashi Kado, Mitsuru Kono, Yoshihiro Yamaguchi, Shuzi Hayase, "Ru Dye Uptake under Pressurized CO₂ Improvement of Photovoltaic Performances for Dye-Sensitized Solar Cells", *Journal of The Electrochemical Society*, 153 (12) A2294-A2297 (2006)
- [17] L. Han, N. Koide, Y. Chiba, A. Islam, T. Mitate, "Modeling of an equivalent circuit for dye-sensitized solar cells: improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells by reducing internal resistance", *C. R. Chimie* Vol. 9, pp. 645-651, 2006
- [18] M. Murayama, T. Mori, "Evaluation of treatment effects for high-performance dye-sensitized solar cells using equivalent circuit analysis", *Thin Solid Films* Vol. 509, pp. 123-126, 2006
- [19] Hyunwoong Seo, Min-Kyu Son, Kyoung-Jun Lee, Jeonghoon Kim, Ji-Tae Hong, Hee-Je Kim, "레이저 식각 및 그리드 전극을 적용한 염료감응형 태양전지의 효율 향상 연구", *Trans. KIEE.*, Vol. 57, pp. 1802-1806, 2008
- [20] L. Han, N. Koide, Y. Chiba, A. Islam, R. Komiya, N. Fuke, A. Fukui, R. Yamanaka, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells by reduction of internal resistance", *Applied Physics Letters* Vol. 86, pp. 213501, 2005
- [21] N.Koide, A.Islam, Y.Chiba, L.Han, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit", *J. Photochem. Photobio. A: Chem.* Vol. 182, pp. 296-305, 2006

저 자 소 개



김희제 (金熙濟)

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 전기공학과 교수 재직 중.



이정기 (李廷基)

1972년 1월 31일생. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 한국 전기연구원 인증신뢰성 평가실 재직 중.



서현웅 (徐鉉雄)

1980년 10월 25일생. 2006년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정 재학 중.



손민규 (孫珉圭)

1982년 6월 7일생. 2008년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



신인영 (申仁英)

1985년 8월 16일생. 2009년 부산대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



안태풍 (安泰豊)

1964년 9월 19일생. 1992년 성균관대학교 전자공학과 졸업. 현재 인택전기전자(주) 재직 중.



김진경 (金珍暻)

1986년 11월 14일생. 2009년 부경대학교 자연과학대학 물리학과 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.