

# 탄소전극에 기초한 구멍전도체가 없고 완전채인쇄가능한 페로브스카이트형태양빛전지의 성능에 미치는 TiO<sub>2</sub>치밀층의 효과

서철일, 김별, 고성국, 리진혁, 류권일

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...에너지를 효과적으로 리용하고 절약하기 위한 과학기술적문제들을 풀어야 하며 태양에너지, 풍력에너지를 비롯한 새로운 에너지를 개발하기 위한 연구에 힘을 넣어 그 리용전망을 확고히 열어놓아야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 487페이지)

페로브스카이트형태양빛전지는 값죽은 제작가격과 높은 효율로 하여 널리 연구되고있으며 현재 그 효율은 22%를 넘어섰다.[1-12] 페로브스카이트형태양빛전지는 일반적으로 FTO전도성기판, 치밀층 혹은 전자선택층, 다공성지지층, 페로브스카이트층, 구멍전도층, 금속전극으로 구성되어있다.

치밀층은 FTO로부터 구멍전도체(HTM)에로의 전자흐름이나 HTM으로부터 FTO에로의 구멍흐름을 막을수 있기때문에 페로브스카이트안에서 발생한 구멍과 FTO겔면의 전자수송층에 존재하는 전자사이의 재결합을 막아주고 FTO층을 통한 전자수송을 촉진하는 차단층의 역할을 수행한다.[13-16] 치밀층의 최적화는 페로브스카이트형태양빛전지의 성능에 강한 영향을 줄수 있는데 가장 일반적으로 리용하는것은 TiO<sub>2</sub>치밀층이다.[17-21] TiO<sub>2</sub>치밀층은 분무열분해법[22], 원자층침적법[23], 졸-겔법[24], 회전도포법[25], 직류자기마당부착법[26, 27], 전기화학적침적법[28], 화학기상침적법[29]으로 제조할수 있다. 또한 치밀층의 성능을 최적화하기 위하여 TiO<sub>2</sub>치밀층에 Zn[30], Li[31], Nb[32], Y[33] 등을 도핑시켜 전도성과 빛전지성능을 개선하기 위한 연구들도 많이 진행되였다. 그러나 연구결과들은 각이하며 TiCl<sub>4</sub>용액을 리용하여 제조한 TiO<sub>2</sub>치밀층이 HTM이 없고 탄소전극을 가진 태양빛전지 성능에 미치는 효과를 체계적으로 조사한 자료는 거의 없다.

이로부터 우리는 TiCl<sub>4</sub>용액의 물작용분해를 통하여 TiO<sub>2</sub>치밀층을 제조하고 그것이 탄소전극에 기초한 구멍전도체가 없고 완전채인쇄가능한 페로브스카이트형태양빛전지의 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

## 재료와 방법

### 1) TiO<sub>2</sub>치밀층의 제조

FTO전도성유리를 레이자로 부식시켜 2개의 분리된 전극을 형성하고 세척액, 증류수, 에틸알콜로 초음파세척하였다. 세척한 FTO막은 테프를 리용하여 활성면적만 내놓고 마스크를 씌웠다.

랭동기에 보관하였던 2mol/L TiCl<sub>4</sub>용액을 0.2mol/L까지 희석하여 TiCl<sub>4</sub>전구체용액을 제조하였다. 마스크를 씌운 FTO막을 희석한 TiCl<sub>4</sub>전구체용액에 잠그고 용기를 밀폐한 후 70°C에서 각이한 시간동안 유지하였다. 다음 전극을 꺼내어 물과 에틸알콜로 세척하고 100°C에서 30min동안 건조시켰다.

## 2) 페로브스카이트형태양빛전지제작

TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, 탄소파스타들은 선행방법[34]에 따라 제조하였다. 0.5 $\mu$ m두께의 메조다공성 TiO<sub>2</sub>층, 1 $\mu$ m두께의 ZrO<sub>2</sub>층, 10 $\mu$ m두께의 탄소층을 기판위에 층별로 채입쇄하였다. TiO<sub>2</sub>층과 ZrO<sub>2</sub>층은 500°C에서 30min동안, 탄소층은 400°C에서 30min동안 소결하였다.

페로브스카이트의 침적에는 1단계침적법을 리용하였다.

페로브스카이트전구체용액(32%)은 요드화메틸암모니움, 요드화연(99.999%, 《Sigma-Aldrich》), 염화연(99.999%, 《Sigma-Aldrich》)을 무수디메틸포름아미드용액에 풀어서 제조하였다. 전구체용액속에서 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I, PbI<sub>2</sub>, PbCl<sub>2</sub>의 물질량비는 4 : 3 : 1이었다. 이 용액을 리용하기 전에 약 2h동안 방온도에서 교반하였다. 페로브스카이트전구체용액을 칼도포법으로 탄소층위에 피복시켰다. 100°C로 가열된 막위에 칼도포한 후 막의 색깔은 즉시 노란색으로부터 검은밤색으로 변하였는데 이것은 페로브스카이트가 형성되었다는것을 보여준다. 페로브스카이트에로의 충분한 전환을 담보하기 위하여 페로브스카이트전구체용액이 침적된 막을 100°C에서 30min동안 가열하였다. 모든 제조공정은 방온도, 대기환경속에서 진행하였다.

## 3) 특성측정

TiO<sub>2</sub>치밀층의 형태는 주사전자현미경(SEM, 《JS-6610A》)으로 조사하였다. 치밀층의 결정구조는 X선회절분석기(XRD, 《SmartLab》)로 분석하였다. 치밀층의 두께는 표면분석기(《Micro XAM-100》)로 측정하였다. 치밀층의 광학적투과도는 자외가시선분광광도계(《DU 730》)를 리용하여 측정하였다. 순환볼탐메터(CV)측정은 전기화학분석기(EIS, 《CHI604E》)를 리용하여 진행하였다. CV측정은 Ag/AgCl비교전극과 Pt선대극을 리용한 3전극체계에서 진행하였다. CV측정용전해질은 0.5mol/L KCl, 0.5mmol/L K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, 0.5mmol/L K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>을 포함한 수용액이다. 빛전지의 전기화학적임피던스스펙트럼측정은 전기화학분석기(EIS, 《CHI604E》)를 리용하여 주파수영역 1~10<sup>6</sup>Hz, 압조건, 편의전압 0.8V에서 진행하였다. 전류세기-전압특성측정은 전기화학분석기를 리용하여 AM 1.5빛복사조건에서 진행하였다. 리용된 마스크면적은 0.04cm<sup>2</sup>였다.

## 결과 및 논의

탄소전극에 기초한 구멍전도체가 없고 완전채입쇄가능한 페로브스카이트형태양빛전지의 구조를 그림 1의 ㄱ)에 보여주었다. 먼저 FTO위에 TiCl<sub>4</sub>전구체용액의 물작용분해에 의하여 TiO<sub>2</sub>치밀층을 형성하였다. 다음 메조다공성TiO<sub>2</sub>층, ZrO<sub>2</sub>층, 탄소층을 TiO<sub>2</sub>치밀층위에 차례로 채입쇄하였다. 그다음 페로브스카이트전구체용액을 칼도포법을 리용하여 1단계침적법으로 3개의 층안에 직접 침투시켰다.(그림 1의 ㄴ)) 전지의 에네르기준위도해를 그림 1의 ㄷ)에 보여주었는데 에네르기준위들의 위치는 선행연구자료[34]에 기초하였다. 전지요소들의 에네르기준위의 정함으로 하여 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>의 락기상태(-3.8eV)로부터 TiO<sub>2</sub>(-4.2eV)에로의 전자추출과 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>의 바닥상태(-5.3eV)로부터 탄소층(-5.0eV)에로의 구멍수집이 효율적으로 진행될수 있다.[34]

TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해에 의해 FTO위에 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 주사전자현미경(SEM)사진은 그림 2와 같다.

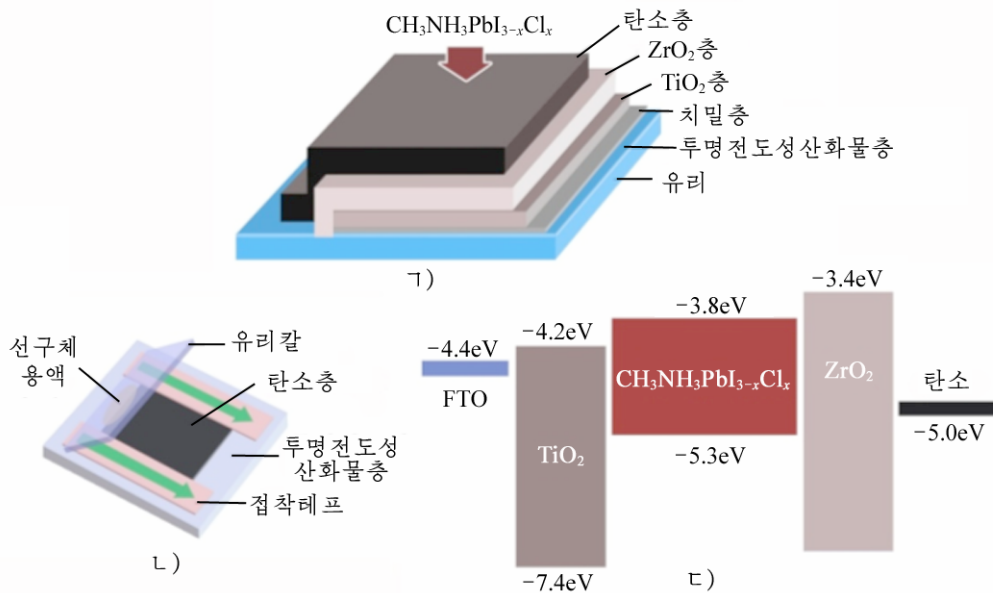


그림 1. 탄소전극에 기초한 구멍전도체가 없고 완전채인쇄가능한 페로브스카이트형태양빛전지의 구조(㉠)), 칼도포법을 이용한 페로브스카이트전구체용액의 1단계 침적법(㉡)), 전지의 에너지준위도해(㉢))

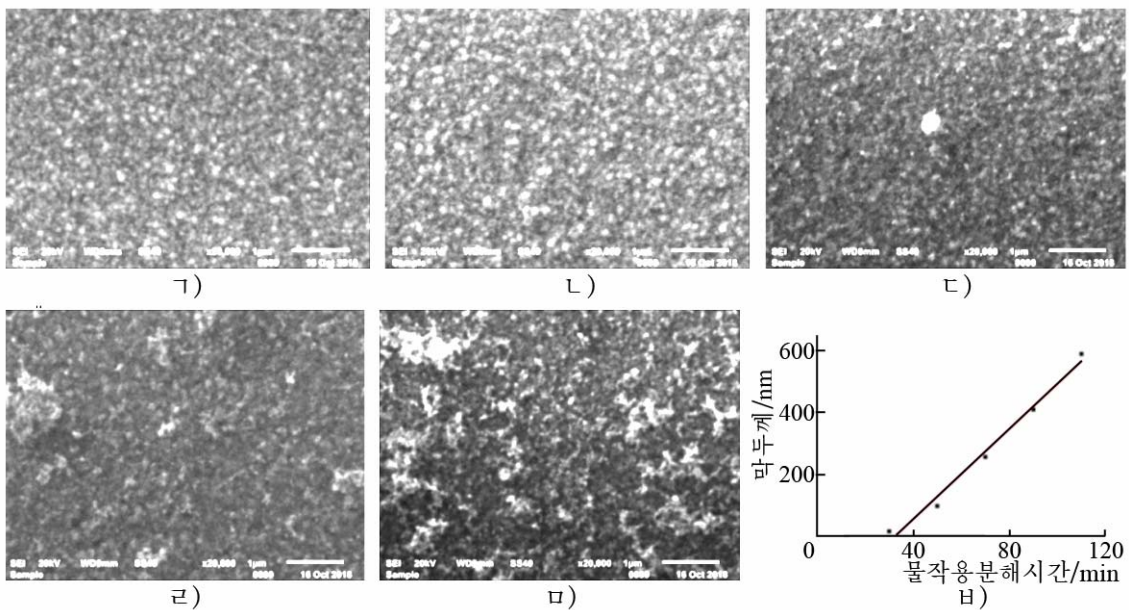


그림 2. FTO위에 형성된  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 주사전자현미경사진과 막두께

㉠)~㉡)는 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우,

㉢)는 물작용분해시간에 따르는 막두께의 변화

그림 2에서 보는바와 같이 물작용분해시간이 30min일 때에는 매우 작은 립자들이 형성되었는데 이것은 FTO기판의 결면을 충분히 덮는데 불충분하였다. 물작용분해시간이 점차 길어짐에 따라 보다 치밀한  $\text{TiO}_2$ 막이 형성되었다. 물작용분해시간이 90min이상일 때에는 보다 큰 응집덩어리들이 형성되었다. 형성된 막의 두께를 표면분석기로 측정한 결과는

TiCl<sub>4</sub>용액의 물작용분해시간이 길어짐에 따라 치밀층의 두께가 15~590nm범위에서 선형적으로 증가한다는것을 보여주었다.(그림 2의 b))

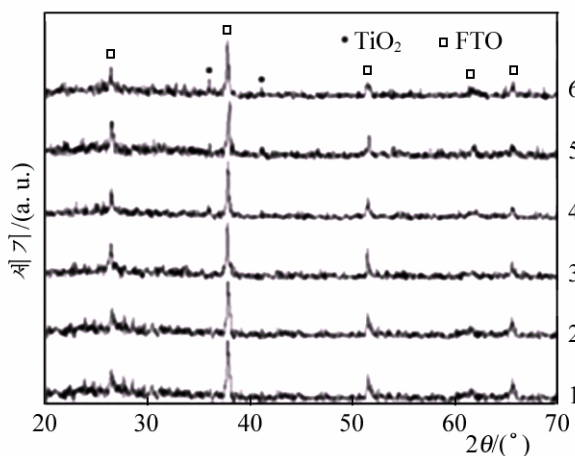


그림 3. FTO위에 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 X선 회절스펙트르

1은 FTO, 2-6은 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우

FTO위에 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 X선 회절스펙트르분석결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 36.0, 41.2°에서의 봉우리는 루틸형TiO<sub>2</sub>상의 (101), (111)결정면에 각각 해당된다. 이것은 염소이온을 포함한 산용액에서는 루틸형TiO<sub>2</sub>상이 형성되는 경향성이 있다는것을 보여주며 이것은 FTO기판의 루틸형결정구조가 루틸형TiO<sub>2</sub>상의 핵성장을 촉진할 수 있다는 선행연구자료[29]와 일치하였다. 물작용분해시간이 길어질수록 TiO<sub>2</sub>회절봉우리는 더 높아졌는데 이것은 그림 2의 b)에서 보는바와 같이 막의 두께가 증가한다는것을 보여준다.

TiCl<sub>4</sub>전구체용액의 물작용분해시간이 각이할 때 FTO위에 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 투과스펙트르를 그림 4의 ㄱ)에 보

여주었다.

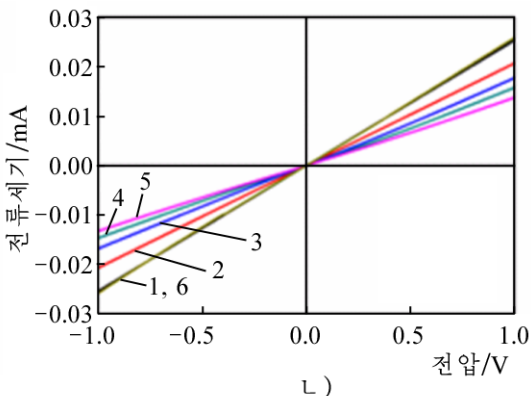
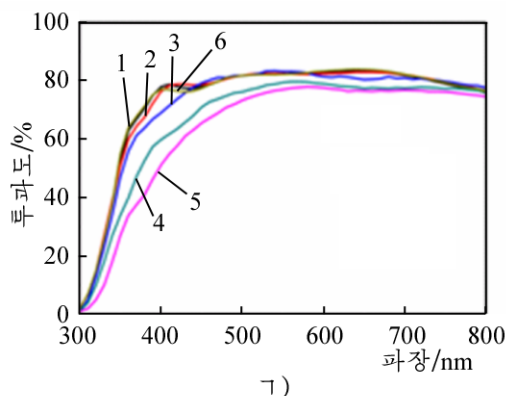


그림 4. FTO위에 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 투과스펙트르(ㄱ))와 선형주사볼타모그램(ㄴ))

1-5는 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우, 6은 FTO(대조)

그림 4의 ㄱ)에서 보는바와 같이 FTO기판의 투과도는 전체 보임빛영역에서 약 85% 정도의 투과도를 보여주었다. TiO<sub>2</sub>치밀층의 투과도는 TiCl<sub>4</sub>전구체용액의 물작용분해시간이 30min으로부터 110min까지 길어짐에 따라 85%로부터 70%까지 감소하였다. TiO<sub>2</sub>치밀층의 투과도는 70min까지는 큰 변화가 없었지만 그 이상에서는 크게 감소하였다. TiO<sub>2</sub>치밀층의 투과도가 낮아질수록 페로브스카이트층에 들어오는 빛량이 감소하여 빛전지의 효율이 감소하게 된다.

TiCl<sub>4</sub>전구체용액의 물작용분해에 의해 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 전도도특성을 평가하기 위하여 FTO/TiO<sub>2</sub>치밀층/탄소구조의 선형주사볼타모그램을 측정하였는데 그 결과는 그림 4의 ㄴ)와 같다. 적용된 편의전압에서 전류세기의 선형적인 증가는 TiO<sub>2</sub>치밀층의 옴저항을

답을 보여준다.[38] 그림 4의 ㄴ)에서 보는바와 같이  $\text{TiCl}_4$ 전구체용액의 물작용분해시간이 길어짐에 따라  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 전도도는 감소하였는데 이것은  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 두께가 증가하는데 원인이 있다.

$\text{TiCl}_4$ 전구체용액의 물작용분해시간을 각이하게 변화시켜 형성시킨  $\text{TiO}_2$ 치밀층을 리용하여 제조한 구멍전도체가 없고 탄소전극을 리용한 페로브스카이트형태양빛전지의 전류세기-전압특성곡선과 빛전지의 특성값들은 그림 5, 표 1과 같다.

그림 5와 표 1에서 보는바와 같이  $\text{TiCl}_4$ 전구체용액의 물작용분해시간이 30min일 때에는 치밀층이 완전히 형성되지 않은것으로 하여 FTO결면에서 재결합이 증가한 결과 전지의 열린회로전압, 단긴회로전류세기, 충만인자가 매우 낮았다.  $\text{TiCl}_4$ 전구체용액의 물작용분해시간이 길

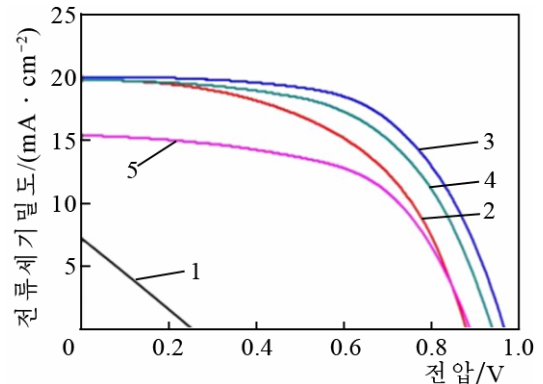


그림 5.  $\text{TiCl}_4$ 의 물작용분해시간을 각이하게 변화시켜 형성시킨  $\text{TiO}_2$ 치밀층을 리용하여 제조한 구멍전도체가 없고 탄소전극을 리용한 페로브스카이트형태양빛전지의 전류-전압특성곡선  
1-5는 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우

표 1. 제작된 태양빛전지의 특성값들

$\text{TiCl}_4$ 의 물작용분해 시간/min	열린회로 전압/V	단긴회로전류세기 밀도/(mA·cm <sup>-2</sup> )	충만 인자	효율 /%
30	0.25	7.21	0.25	0.45
50	0.87	19.81	0.52	8.96
70	0.96	20.01	0.60	11.53
90	0.93	19.82	0.57	10.01
110	0.88	15.4	0.56	7.59

어질수록 빛전지의 열린회로전압, 단긴회로전류세기, 충만인자가 상당히 개선되었는데 70min일 때 최대로 되었다. 이것은  $\text{TiCl}_4$ 전구체용액의 물작용분해에 의하여 형성되는  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 피복도가 증가하여 FTO결면에서의 재결합률이 줄어든데 원인이 있다. 그러나  $\text{TiO}_4$ 전구체용액의 물작용분해시간이 90min이상으로 증가할 때에는 열린회로전압, 단긴회로전류세기, 충만인자가 감소하였다. 이것은 그림 4의 ㄱ)와 ㄴ)에서 보는바와 같이  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 두께가 증가할수록 빛의 투과도와 전도도가 감소하는데 원인이 있다.

우리는 FTO위에 형성된  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 차단특성을 구체적으로 조사하기 위하여 CV측정을 진행하였다. 적혈염  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ 의 수용액속에서  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 과  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ 사이의 가역적인 산화환원반응이 FTO결면우에서 일어난다.[35-37] 적혈염을 포함한 수용액속에서  $\text{TiCl}_4$ 의 물작용분해시간을 조절하여 형성시킨  $\text{TiO}_2$ 치밀층들의 순환볼타모그람을 그림 6의 ㄱ)에 보여주었다.

그림 6의 ㄱ)에서의 그래프는  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 가역적인 전기화학적거동을 보여주었다. 물작용분해시간이 길어질수록 순환볼타모그람의 전류세기봉우리는 감소하다가 물작용분해시간이 70min일 때 제일 작고 그 이상에서는 증가하였다. 또한 봉우리사이의 너비는 물작용분해시간이 길어짐에 따라 증가하였다. 이것은 FTO결면에 존재하는  $\text{TiO}_2$ 치밀층이 전자전달을 막아준다는것을 말해준다. 한편 70min이상에서는 전류세기봉우리가 증가하였는데 이것은  $\text{TiO}_2$ 치밀층의 두께가 지나치게 두꺼워지면 막에 틈이 생길수 있기때문에 루셀전류가

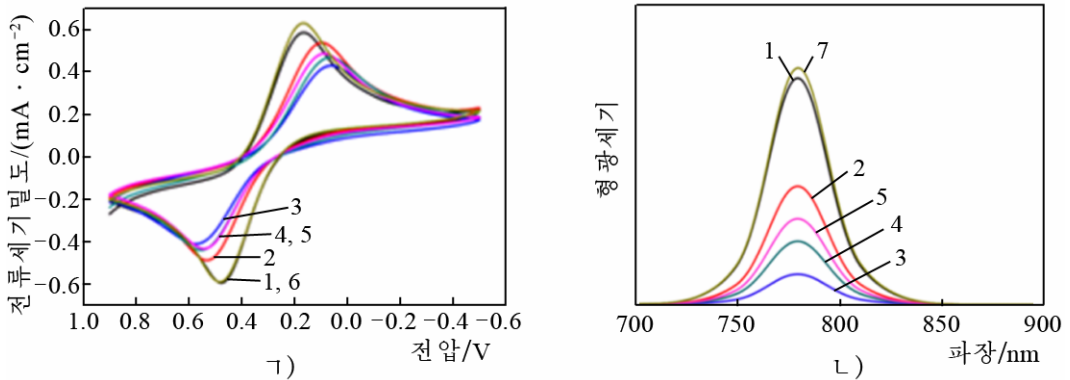


그림 6. TiO<sub>2</sub>치밀층의 순환볼타모그람(㉠)과 PL스펙트럼(㉡)

1-5는 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우, 6은 FTO, 7은 FTO/페로브스카이트

생겨난다는것을 보여준다. 이 결과는 FTO우에 치밀층이 입혀질 때 FTO겔면의 반응부위가 치밀층에 의해 차단되기때문에 순환볼타모그람의 전류세기봉우리가 감소하고 봉우리사이의 너비가 증가한다는 선행연구결과[37]와 일치하였다.

TiO<sub>2</sub>치밀층의 전하전달능력을 더욱 평가하기 위하여 PL분석을 진행하였다. 그림 6의 ㉡)는 FTO/페로브스카이트와 FTO/TiO<sub>2</sub>치밀층/페로브스카이트막의 PL스펙트럼을 보여주었다. FTO/페로브스카이트막에 비하여 TiO<sub>2</sub>치밀층을 가진 막들은 명백한 PL소광특성을 보여주었다. PL소광특성은 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 길어짐에 따라 작아지다가 70min에서 가장 낮아지고 그 이후부터는 증가하였다. 이것은 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 70min일 때 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층의 전하전달능력이 가장 크다는것을 보여준다.

계면전하이동과 재결합과정에 대하여 조사하기 위하여 전기화학적임피던스스펙트럼측정을 진행하였다. 이 전지구조에서 페로브스카이트는 빛수집체로서의 기능과 구멍전도체로서의 기능을 동시에 수행하기때문에 우리는 TiO<sub>2</sub>/페로브스카이트계면에서의 전하이동저항과 페로브스카이트/탄소계면에서의 전하재결합저항[34]을 평가하는데 중점을 두었다. TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간을 각이하게 변화시켜 형성시킨 TiO<sub>2</sub>치밀층을 리용하여 제조한 페로브스카이트형태양빛전지의 나이퀴스트선도와 등가회로는 그림 7의 ㉠)와 같다. 표 2에 EIS로부터 얻어진 특성값들을 주었다.

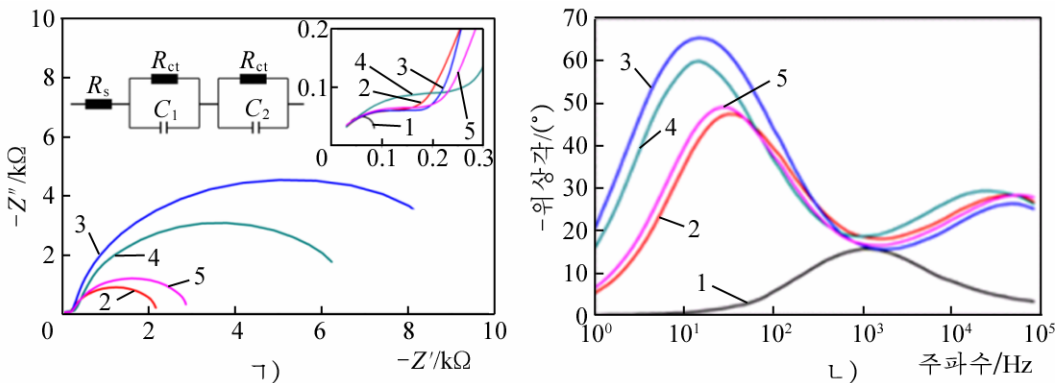


그림 7. TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간을 각이하게 변화시켜 형성시킨 TiO<sub>2</sub>치밀층을 리용하여 제조한 페로브스카이트형태양빛전지의 나이퀴스트선도(㉠)와 보데선도(㉡)

1-5는 물작용분해시간이 각각 30, 50, 70, 90, 110min인 경우

표 2. 등가회로와 실험자료로부터 얻어진 빛전지의 특성값들

TiCl <sub>4</sub> 의 물작용분해 시간/min	전하재결합 저항/ $\Omega$	극대주파수 /Hz	재결합전자 수명/ms
30	54.4	1000.0	0.16
50	1 875	31.6	5.04
70	8 912	14.7	10.83
90	6 093	14.7	10.83
110	2 510	26.1	6.10

그림 7의 ㄱ)에서 보는바와 같이 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 길어질수록 페로브스카이트/탄소층계면에서의 전하이동저항(첫번째 반원)은 크게 변하지 않았지만 TiO<sub>2</sub>/페로브스카이트계면에서의 전하재결합저항(두번째 반원)은 크게 변화되었다. TiO<sub>2</sub>/페로브스카이트계면에서의 전하재결합저항은 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 길어짐에 따라 증가하다가 70min일 때 가장 크고 그 이상에서는 감소하였다. 한편 물작용분해시간이 30min일 때의 전하재결합저항은 거의 무시할수 있을 정도로 작았는데 이것은 TiO<sub>2</sub>치밀층이 거의 형성되지 않았다는것을 보여주며 HTM이 없는 전지구조에서 치밀층이 전하재결합을 막아주는 중요한 역할을 한다는것을 보여준다. 물작용분해시간이 길어짐에 따라 전하재결합저항이 증가하는 것은 TiO<sub>2</sub>치밀층의 두께가 증가하는것으로 하여 FTO와 페로브스카이트계면사이의 전하재결합을 효율적으로 막아주는데 원인이 있다. 또한 70min이상에서 전하재결합저항이 감소한것은 TiO<sub>2</sub>치밀층의 두께가 너무 두꺼운것으로 하여 막에 틈이 생기고 투과도가 감소한데 원인이 있다. 이 실험자료는 TiO<sub>2</sub>치밀층이 전하재결합과정과 나아가서 총적인 전지성능에 큰 영향을 미친다는 선행연구자료[19, 20]와 유사하다.

그림 7의 ㄴ)는 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간을 각이하게 변화시켜 형성시킨 TiO<sub>2</sub>치밀층을 리용하여 제조한 페로브스카이트형태양빛전지의 보데선도를 보여주었다. 방정식  $\tau = 1/2\pi f_{\max}$ 에 기초하여 전지의 재결합전자수명을 계산하였다. ( $f_{\max}$ 는 보데선도로부터 얻어진 중간주파수반원의 주파수최대값) 전지의 재결합전자수명( $\tau$ )은 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 70, 90min일 때가 제일 길었다. 이미 언급한것처럼 재결합전자수명이 증가한것은 TiO<sub>2</sub>치밀층에 의하여 FTO와 페로브스카이트사이에서의 전하재결합률이 감소하는데 원인이 있다.

## 맺 는 말

우리는 TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간을 조절하여 각이한 TiO<sub>2</sub>치밀층을 제조하고 그것이 HTM이 없고 탄소전극을 가진 페로브스카이트형태양빛전지의 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 물작용분해시간이 70min일 때 얻어진 TiO<sub>2</sub>치밀층은 약 100nm의 두께와 80%정도의 투과도를 보여주었다. 우리는 HTM이 없는 전지구조에서 치밀층이 전하재결합과정과 전지성능에 결정적인 영향을 미친다는것을 밝혔다. TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 70min일 때 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층은 전하전달능력이 가장 높았으며 FTO와 페로브스카이트사이에서의 전하재결합을 효과적으로 막아주었다. TiCl<sub>4</sub>의 물작용분해시간이 70min일 때 형성된 TiO<sub>2</sub>치밀층을 리용하여 제조한 페로브스카이트형태양빛전지의 성능은 열린회로전압 0.96V, 단긴회로전류세기 20.01mA/cm<sup>2</sup>, 충만인자 0.60, 효율 11.53%로서 가장 높았다.



## 참 고 문 헌

- [1] A. Kojima et al.; J. Am. Chem. Soc., **131**, 6050, 2009.
- [2] J. Y. Jeng et al.; Adv. Mater., **25**, 3727, 2013.
- [3] Q. Chen et al.; J. Am. Chem. Soc., **136**, 622, 2013.
- [4] M. Liu et al.; Nature, **501**, 395, 2013.
- [5] C. W. Chen et al.; Adv. Mater., **26**, 6647, 2014.
- [6] T. Salim et al.; J. Mater. Chem., A **3**, 8943, 2015.
- [7] Z. L. Ku et al.; Sci. Rep., DOI:10.1038/srep03132, 2013.
- [8] L. F. Liu et al.; J. Am. Chem. Soc., **137**, 1790, 2015.
- [9] A. Mei et al.; Science, **345**, 295, 2014.
- [10] J. Z. Chen et al.; Adv. Energy Mater., **6**, 1502009, 2016.
- [11] A. Ummadisingu et al.; Nature, **545**, 208, 2017.
- [12] [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg), 2016.
- [13] E. J. Juarez-Perez et al.; J. Phys. Chem. Lett., **5**, 4, 680, 2014.
- [14] D. Bi et al.; J. Phys. Chem. Lett., **4**, 1532, 2013.
- [15] A. Marchioro et al.; Nat. Photonics, **8**, 3, 250, 2014.
- [16] B. Conings et al.; Adv. Mater., **26**, 2041, 2014.
- [17] P. Vivo et al.; Org. Electron., **41**, 287, 2017.
- [18] C. X. Zhang et al.; Appl. Surf. Sci., **388**, 82, 2016.
- [19] C. Liang et al.; Appl. Surf. Sci., **391**, 337, 2017.
- [20] X. K. Huang et al.; Electrochim. Acta, **231**, 77, 2017.
- [21] X. K. Huang et al.; Sol. Energ. Mat. Sol., **C 164**, 87, 2017.
- [22] P. J. Cameron et al.; J. Phys. Chem., B **107**, 14394, 2013.
- [23] J. H. Yum et al.; J. Phys. Chem., C **118**, 30, 16799, 2014.
- [24] L. Kavan et al.; Chem. Phys. Chem., **15**, 6, 1056, 2014.
- [25] A. Hayakawa et al.; Appl. Phys. Lett., **90**, 16, 163517, 2017.
- [26] S. M. Waita et al.; J. Electroanal. Chem., **637**, 79, 1, 2009.
- [27] Q. Q. Liu et al.; Surf. Coat. Technol., **231**, 126, 2013.
- [28] L. Kavan et al.; J. Electroanal. Chem., **346**, 291, 1, 1993.
- [29] A. Yella et al.; Nano Lett., **14**, 2591, 2014.
- [30] M. C. Wua et al.; Sol. Energ. Mat. Sol., **C 157**, 447, 2016.
- [31] D. T. Liu et al.; Nano Energy, **31**, 462, 2017.
- [32] M. Yang et al.; J. Mater. Chem., A **2**, 19616, 2014.
- [33] H. Zhou et al.; Science, **345**, 542, 2014.
- [34] B. Kim et al.; J. Electron. Mater., **47**, 10, 6266, 2018.
- [35] H. Krysova et al.; Electrochim. Acta, **232**, 44, 2017.
- [36] L. Kavan et al.; J. Phys. Chem., C **121**, 342, 2017.
- [37] B. Roose et al.; Nano Energ., **30**, 517, 2016.
- [38] C. C. Wu et al.; J. Phys. Chem., C **120**, 26710, 2016.



## **Effects of TiO<sub>2</sub> Compact Layer on the Performance of the Fully Screen Printable Hole-Transport Material-Free Mesoscopic Perovskite Solar Cells with Carbon Electrode**

*So Chol Il, Kim Pyol, Ko Song Guk, Ri Jin Hyok and Ryu Kwon Il*

The performance of the perovskite solar cell made by using TiO<sub>2</sub> compact layer, which was formed when the hydrolyzing hour of TiCl<sub>4</sub> precursor solution was 70 minutes, is the highest with a short-circuit current density of 20.01mA/cm<sup>2</sup>, an open circuit voltage of 0.96V, a fill factor of 0.60 and the power conversion efficiency of 11.53%. The compact layer in the solar cell structure with no hole-transport material plays a decisive role—this originated in the increase of the charge transport ability and a charge recombination resistance in the TiO<sub>2</sub> compact layer.

Keywords: compact layer, one-step deposition method, HTM-free solar cells