

대면적 페로브스카이트 태양전지 제작을 위한 슬롯-다이코팅 방법

Slot-die Coating Method for Manufacturing Large-area Perovskite Solar Cell

오주영, 하재준, 이동근

한양솔라에너지

Ju-young Oh(vvole@naver.com), Jae-jun Ha(jjha5@naver.com),
Dong-geun Lee(dg8222@hanmail.net)

요약

페로브스카이트 태양전지는 기존의 실리콘 태양전지를 대체하는 차세대 태양전지로서, 페로브스카이트 구조를 가진 유-무기 하이브리드 물질을 광 활성층으로 사용하는 태양전지 소자로 고효율, 저가의 용액 공정 및 저온 공정에 유리한 장점들을 가지고 있으며 지난 10년간 빠른 효율 향상을 보여주었다. 이러한 페로브스카이트 태양전지의 상용화 과정에서 대면적 코팅 방법에 대해서 연구개발이 진행되어야 한다. 대면적 페로브스카이트 태양전지 대면적 코팅 방법 중 하나로 슬롯-다이 코팅방법에 대해서 연구 진행하였다. 메니스커스를 이용하여 기판 위를 지나가며 용액을 코팅하는 방법으로 3D printer에 메니스커스를 장착하여 코팅을 할 수 있도록 하였다. 코팅 시 작용하는 변수로는 bed 온도, coating speed, N₂ blowing간격, N₂ blowing 높이, N₂ blowing세기등이 있으며 이를 조절하여 페로브스카이트 흡수층을 제작 진행하였으며, 대면적 소자 제작을 위한 코팅 조건을 최적화 하였다.

■ 중심어 : | 페로브카이트 태양전지 | 슬롯다이 | 대면적 | 상용화 | 안정성 |

Abstract

The perovskite solar cell is a next-generation solar cell that replaces the existing silicon solar cell. It is a solar cell device using an organic-inorganic hybrid material having a perovskite structure as a photoactive layer. It has advantages for the process and has shown rapid efficiency improvement over the past decade. In the process of commercialization of such perovskite solar cells, research and development for a large-area coating method should be carried out. As one of the large-area perovskite solar cell large-area coating methods, the slot-die coating method was studied. By using a meniscus to pass over the substrate and coating the solution, the 3D printer was equipped with a meniscus so that it could be coated. Variables that act during coating include bed temperature, coating speed, N₂ blowing interval, N₂ blowing height, N₂ blowing intensity, etc. By controlling these, the perovskite absorption layer was manufactured and the coating conditions for manufacturing large-area devices were optimized.

■ keyword : | Perovskite Solar Cell | Slot Die | Large Area | Commercialization | Stability |

* 본 연구는 중소벤처기업부에서 지원하는 2019년도 산학연 Collabo R&D 사업(No. S2798421)과 농촌진흥청 연구사업(세부 과제번호:PJ01624704)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

접수일자 : 2021년 11월 29일

수정일자 : 2021년 12월 23일

심사완료일 : 2021년 12월 23일

교신저자 : 이동근, e-mail : dg8222@hanmail.net

I. 서론

우리가 살아가는 생활 속에서 필수적인 요소인 에너지에 대한 관심은 증가 하고 있으며, 현재 우리나라를 비롯한 천연가스나 석유, 석탄 등의 천연 자원의 매장량이 없는 에너지 수입국가에서는 에너지 수입에 대한 고민이 늘어나고, 현재 전 세계적으로 에너지 고갈 문제가 심각해지면서 화석연료의 가격은 급상승 하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 신재생 에너지에 대한 관심이 늘어나고 있는 추세이다[1].

대표적인 신재생에너지원으로는 풍력, 지열, 수열, 해양에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지, 수소에너지, 수소에너지, 연료전지, 태양에너지원을 이용한 신재생 에너지에 대한 연구와 보급이 늘어나고 있는 추세이다. 그 중에서 태양에너지에서 태양광을 이용하여 빛에너지를 전기에너지로 변환시키는 방식을 가장 많이 사용하고 있으며, 태양전지는 소재에 따라서 분류가 되는데 무기(Inorganic) 태양전지, 유기(Organic) 태양전지, 유-무기 하이브리드 (Organic-Inorganic) 태양전지로 분류되고 있다.

먼저 결정질 실리콘 태양전지와 화합물 반도체 태양전지는 현재 태양전지 시장에서 90% 이상 사용되고 있고 높은 효율과 내구성을 갖지만 극도로 정제된 원료만 사용하며, 고도의 기술이 요구되고 가격이 고가이며, 깨지기 쉽다는 문제점이 있다. 유기 태양전지 또한 낮은 내구성을 단점을 가지고 있다. 3세대 태양전지인 연료감응 태양전지는 기존의 유기, 박막 태양전지와 달리 n-i-p 구조를 가지며 염료에서 생성된 전자-홀쌍이 순간적으로 전자는 전자전달체로 홀은 홀전도체로 전달되는 원리로 작동하는 태양전지이며, 상대적으로 낮은 순도의 소재로 고효율을 달성할 수 있는 원리를 갖고 있지만 액체 전해질을 사용하여 누액으로 인한 장기 안정성에 대한 문제와 낮은 효율로 인하여 대규모적인 상용화의 어려움이 있다[2].

페로브스카이트 태양전지는 기존의 실리콘 태양전지를 대체하는 차세대 태양전지로서, 페로브스카이트 구조를 가진 유-무기 하이브리드 물질을 광 활성층으로 사용하는 태양전지 소자로 고효율, 저가의 용액 공정 및 저온 공정에 유리한 장점들을 가지고 있으며 2009

년 Tsutomu Miyasaka 교수가 MaPbI_3 페로브스카이트 물질을 최초로 사용하여 3.8%의 광전 변환 효율을 기록하였다[3]. 이후 많은 연구를 통해서 높은 성장률을 보인 페로브스카이트 태양전지는 2014년 한국화학연구원 팀이 스피코팅 방법을 이용한 모듈 제작으로 (10 cm x 10 cm) 8.9%의 효율을 보고하였다[4]. 또한, 2015년 경희대 임상혁 교수 연구팀은 p-i-n소자 구조를 갖는 페로브스카이트 모듈 제작으로 (10 cm x 10 cm) 12.9%를 보고하였다[5]. 2021년 현재 광전 변환 효율 25.2%까지 발전하며 차세대 태양전지로서 빠른 성장을 보였다.

페로브스카이트 태양전지 흡수층으로 사용되는 페로브스카이트 물질은 ABX_3 구조를 가지며 유기 양이온(A)와 금속 양이온(B), 음이온(X)는 할로겐화합물 또는 산화물을 포함한다[6-8]. A는 유기 양이온중 메틸암모늄(MA : CH_3NH_3), FA, $\text{HN}=\text{CHNH}_3^+$, 또는 $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$ B는 2가,3가 양이온 (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Pd^{2+} , Cd^{2+} , Ge^{2+} , Sn^{2+} , Pb^{2+} , Eu^{2+} , Bi^{3+} , Sb^{3+}) 가 사용되며 X는 할로겐 음이온 (I, Br, Cl) 등으로 구성된다. 페로브스카이트 태양전지는 광 수확(light harvesting)가 넓고[9-13], 전하 캐리어 이동도(charge carrier mobility)가 빠르며 확산길이(diffusion length)가 길다는 장점이 있다[14][15].

본 논문에서는 페로브스카이트 태양전지의 대면적화를 연구하기 위해서 슬롯-다이 코팅 방법과 저온 밀봉 소재에 대한 연구를 진행하였다. 기존 스피코팅 방법으로 페로브스카이트 광 흡수층을 코팅하는 방법에서 대면적에 적용하기 위해서 슬롯-다이 코팅방법을 연구 진행하였다. 코팅 시 발생하는 변수인 bed 온도, 코팅 속도, N_2 blowing간격, N_2 blowing높이, N_2 blowing세기에 대한 특징을 파악하여 페로브스카이트 태양전지의 광 흡수층 소재로 사용하기에 최적조건을 찾기 위한 연구를 진행하였다. 그리고 페로브스카이트 태양전지 소자를 저온 밀봉 진행하기 위해서 밀봉소재 특성 파악에 대한 연구를 진행하였다. 밀봉 소재의 가교율, 접착력 평가를 함께 진행하여 밀봉소재로의 적합성에 대한 연구를 진행하였다.

II. 이론적 배경

1. 페로브스카이트 태양전지

페로브스카이트란 명칭은 1839년 우랄산맥에서 발견된 CaTiO_3 광물에서 유래된 이름으로, 러시아의 광물학자인 L. A. Perovski의 이름을 따서 만들어졌다. 일반적으로 페로브스카이트 물질은 CaTiO_3 와 같은 ABX_3 의 결정구조를 갖는 물질을 일컫는다. 유기 하이브리드 페로브스카이트는 A 자리에 MA^+ , FA^+ 와 같은 유기 양이온, B 자리에는 Pb^{2+} 와 Sn^{2+} 과 같은 금속 양이온, X 자리에는 I, Br, Cl 과 같은 할로젠 음이온이 위치해 있는 3차원 구조로 형성되어 있다. 이에 대표적인 물질로는 MAPbI_3 , FAPbI_3 를 들 수 있다. 이 물질들은 광흡수 계수 ($>3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$), X 자리의 할로젠 음이온 치환으로 인한 밴드갭 조절의 용이함, 긴 전하의 확산 거리 ($\sim 1 \mu\text{m}$) 및 전하의 높은 이동도를 가지고 있기 때문에 태양전지의 광활성층으로써 주목받고 있다.

2. 페로브스카이트 구조적인 특성

페로브스카이트 물질들은 Goldschmidt tolerance factor (t)와 기술되어 있는 octahedral factor (μ)에 따라서 결정구조가 결정된다. r_A 와 r_B 는 원소의 ionic radius를 말하며 geometric factor만 고려했기 때문에 원소 사이의 physicochemical interaction은 고려하지 않고 structural formability나 intrinsic stability를 예측하는데 사용된다. Goldschmidt tolerance factor는 페로브스카이트 구조의 안정성을 나타내는 수치이며, 수치가 1에 가까울수록 안정적인 cubic 구조를 나타내며 수치가 따라서 결정구조가 결정된다. Octahedral factor는 페로브스카이트 구조의 BX_6 의 구조적인 안정성을 나타내는 수치이며, 0.8~1.0 일 때 페로브스카이트 구조가 안정적인 구조를 형성한다고 한다. 따라서 새로운 페로브스카이트 구조를 갖는 물질을 설계할 때, Goldschmidt tolerance factor의 이론적인 계산을 통해서 안정적인 구조를 갖는 물질을 설계할 수 있다.

III. 실험 방법

1. 온도

슬롯-다이 코팅에서 박막 결정화에 영향을 크게 받는 것은 bed온도이다. 박막 결정화에 영향을 주게 되며, 박막 특성을 달라지게 하는 중요한 요인이 된다. Bed 온도에 따라서 박막 결정화 속도가 달라지게 되며, grain size에 영향을 주게 된다. 그렇기 때문에 온도변수를 고려하여 실험을 진행해야 한다.

[그림 1]은 slot-die coating 진행 시 bed 온도 변화에 따른 CsFAMAPb(I,Br)_3 박막의 Uv-visible spectroscopy 데이터이다. 가시광 영역에서 박막이 흡수,투과하는 영역을 확인 할 수 있었다. 온도가 높아질수록 투과율은 낮아지고 흡수율은 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 가시광 영역에서 박막이 흡수를 시작하는 지점을 에너지로 변환하여 광학적 밴드갭을 계산할 수 있는데, 확인된 밴드갭은 1.63eV로 확인가능하였다.

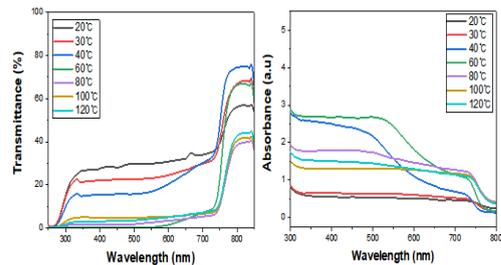
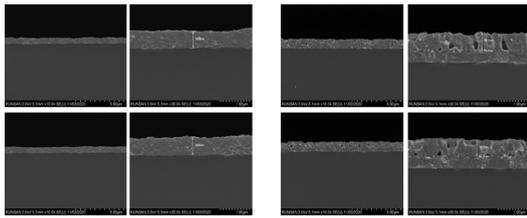


그림 1. bed 온도 변화에 따른 CsFAMAPb(I,Br)_3 Uv-visible spectroscopy data

[그림 2]은 Slot-die coating 진행시 bed 온도 변화에 따른 단면 SEM 데이터이다. 40도와 50도 두 가지를 비교해봤는데, 동일조건에서 coating을 진행했을 때 온도가 높은 50도에서 박막의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있었다. 온도가 높아질 때 박막의 두께가 얇아지는 것은 bed 온도에 의해서 MAI가 증발하여 박막의 두께가 얇아졌다는 것을 확인할 수 있었다.



Glass / Bed 40°C Glass / Bed 50°C
 그림 2. bed 온도 변화에 따른 박막 SEM 단면 이미지

[그림 3]은 온도에 따른 Slot-die coating 진행 시 bed 온도 변화에 따른 XRD 데이터이다. 온도는 20도 부터 120°C까지 비교해보았다, 온도가 낮을 때 (20°C~40°C) 까지는 PbI₂ peak을 확인 할 수 있었지만, 온도가 60도 부터는 PbI₂ peak이 사라지는 것을 확인 할 수 있다. 온도가 높아질수록 결정화가 잘되어 PbI₂ peak이 사라지는 것임을 알 수 있었다.

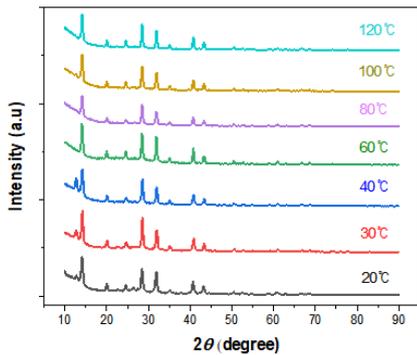


그림 3. bed 온도 변화에 따른 CsFAMAPb(I,Br)₃ XRD data

2. 속도

그 다음으로 페로브스카이트 층을 slot-die coating 할 때, 진행과정에서 코팅 속도가 변수로 작용하게 된다. 속도가 빠르게 코팅 될 경우 박막의 두께가 얇아지고, 속도가 느려질 경우에는 박막의 두께가 두꺼워지게 된다. 그렇기 때문에 페로브스카이트 layer로 사용하기 적절한 속도값을 알아야 한다. 페로브스카이트 층에 현재 사용하고자 하는 precursor는 CsFAMAPb(I,Br)₃를 사용하고자 한다. 현재 많은 연구로써 알려진 Pb를 포함한 페로브스카이트 precursor의 경우에는 장파장 대역에서 충분한 광흡수 특성을 확보하기에 최적화 되었

다고 알려진 500~600nm의 두께를 맞추고자 한다.

[그림 4]는 Slot-die coating 진행 시 속도에 따른 두께 데이터이다. 속도 100~300(mm/min)까지 측정 진행하였으며 속도가 빨라질수록 두께가 얇아지는 것을 확인 할 수 있었다. 해당 data를 통해서 페로브스카이트 층에 사용하기 적절한 속도는 180(mm./min)임을 알 수 있었다.

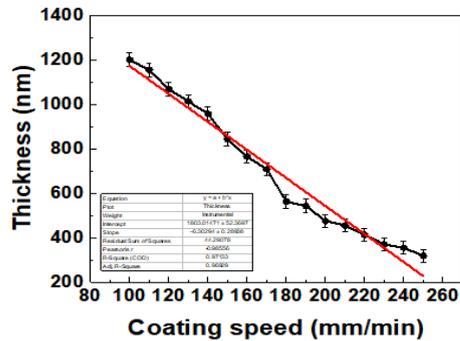


그림 4. 슬롯-다이 코팅 속도에 따른 Thickness data

[그림 5]는 Slot-die coating 진행 시 속도에 따른 Uv-visible spectroscopy 데이터이다. 앞서 두께를 확인했듯이 속도가 빨라질수록 두께는 얇아지기 때문에 Uv-vis data에서도 속도가 빨라질수록 박막의 두께가 얇아져 투과율은 높아지고, 흡수율은 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 본 data를 통해서도 100mm/min~160mm/min까지의 투과율 및 흡수율이 높은 것을 확인 할 수 있었다

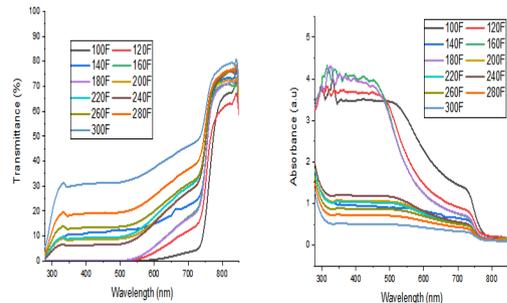


그림 5. 코팅 속도에 따른 CsFAMAPb(I,Br)₃ Uv-visible spectroscopy data

3. N₂ blowing 간격과 높이

그 다음으로는 N₂ blowing 간격과 높이에 대해서 연구를 진행하였다. 본 연구에서 N₂ blowing의 경우 Meniscus가 지나가고 난 후에 N₂ blowing 노즐이 따라오게 되어있는 구조로 되어있다. N₂ blowing은 페로브스카이트 precursor를 glass위에 coating하고난 후에 진행된다. 그 이유로는 N₂ blowing이 페로브스카이트 박막 결정화에 영향을 주기 때문에 뒤에 따라오게 된다. 앞서 실험을 진행하였던 온도와 속도는 60도, 180(mm/min) 로 고정하고 질소 간격 (20~40mm), 질소 높이(5~15mm)로 변화시키며 실험하였다.

[그림 6]은 Slot-die coating 진행 시 질소 간격과 높이에 따른 두께 데이터이다. N₂ blowing 노즐과 meniscus의 간격이 멀어질수록 박막의 두께는 동일하게 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 1차적으로 slot-die의 bed 영향으로 페로브스카이트 박막의 결정화가 진행되어 거리가 멀어질수록 페로브스카이트 layer의 박막 두께가 두꺼워지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 N₂ blowing 노즐의 높이에 대해서는 박막 두께가 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

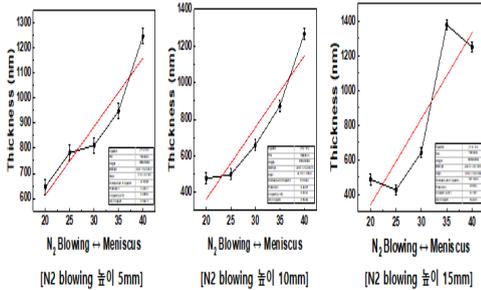


그림 6. N₂ blowing 노즐과 meniscus의 간격, 높이에 따른 Thickness data

[그림 7]은 Slot-die coating 진행 시 질소 간격과 높이에 따른 Uv-visible spectroscopy 데이터이다. 앞서 데이터를 통해서 간격이 멀어질수록 두께가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 두께가 증가함으로써 흡수율과 투과율 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 간격 25mm, 높이 10mm일 때 두께와 UV-vis에서 우수한 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

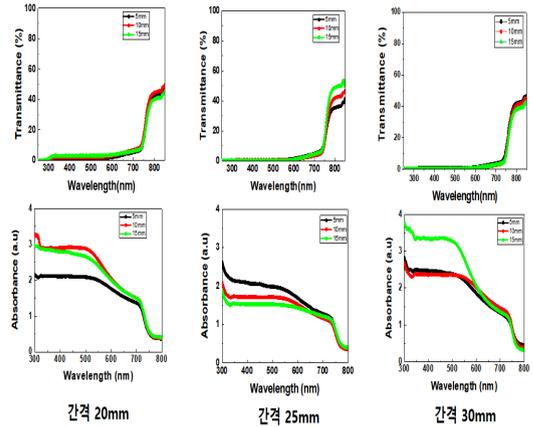


그림 7. N₂ blowing 노즐과 meniscus의 간격, 높이에 따른 Uv-visible spectroscopy data

4. N₂ blowing 세기

그 다음으로는 질소세기에 따른 실험을 진행하였다. 슬롯-다이 코팅 진행 시 meniscus가 앞에 지나가고 N₂ blowing 장비가 뒤에 따라오게 되는데 이때 N₂ blowing의 세기에 따라서 두께 변화가 발생하게 된다. 그렇기 때문에 본 장비에서 가능한 N₂ blowing 세기인 0.1 bar ~ 0.2 bar까지 세기를 변화시키며 코팅을 진행하였다.

[그림 8]은 Slot-die coating 진행 시 질소세기에 따른 두께 데이터이다. 0.1 bar ~ 0.2 bar 까지 진행하였는데 세기가 증가할수록 두께는 얇아지는 것을 확인 할 수 있었다. 페로브스카이트 층에 사용하기 적절한 두께인 500 ~ 600nm를 생각했을 때 0.15 bar에서 실험을 진행하였다.

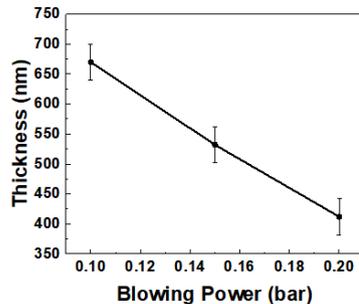


그림 8. N₂ blowing 세기에 따른 Thickness data

[그림 9]는 Slot-die coating 진행 시 질소세기에 따른 Uv-visible spectroscopy 데이터이다. 질소세기가 높을수록 페로브스카이트 layer의 두께가 얇아지는 것을 확인한 것처럼 두께가 얇기 때문에 투과율은 높아지며, 흡수율은 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다. 위 데이터 확인을 통해서 0.15 bar로 진행하고자 한다.

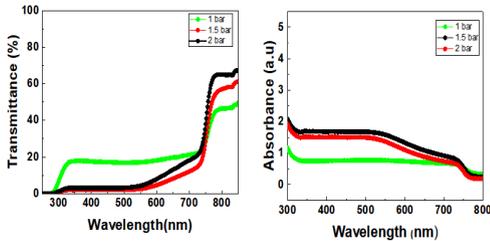
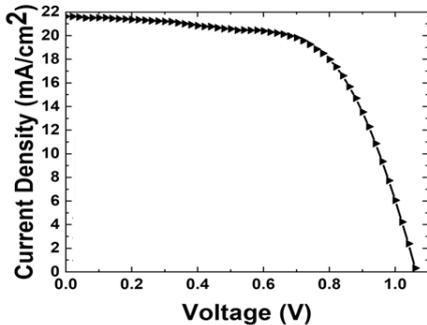


그림 9. N₂ blowing 세기에 따른 CsFAMAPb(I,Br)₃ Uv-visible spectroscopy data

[그림 10]은 광 흡수층 코팅에 Slot-die 코팅을 이용해서 만든 소자의 데이터이다. slot-die coating 시 고려되는 변수를 파악하여 최적 조건으로 만들었으며 각각의 변수에서의 조건 최적화를 추가적으로 진행하여 효율 특성을 높일 수 있는 방법을 찾기 위해서 추가적인 연구를 진행하고자 한다.



Active area	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF(%)	Eff (%)
1 cm ²	1.06	21.62	62.83	14.43

그림 10. Slo-die 코팅을 이용해서 만든 소자의 JV curve data

결과적으로 Slot-die coating 진행 시 장비가 가지고 있는 변수인 bed 온도, coating speed, N₂ blowing간격, N₂ blowing 높이, N₂ blowing세기 등을 확인해보았다. 장비가 가지고 있는 변수범위에서 최

적 공정조건은 bed 온도 60°C, coating speed 180mm/min, N₂ blowing간격 25mm, N₂ blowing 높이가 10mm, N₂ blowing세기 1.5bar인 것을 확인 할 수 있었다. 이후 slot-die coating 방법을 이용한 대면적 페로브스카이트 태양전지 제작의 경우 위 조건을 이용하여 흡수층 연구를 진행하고자 한다.

IV. 결론

페로브스카이트 태양전지는 2009~2021년까지 3.8% → 25.2%에 이르는 빠른 광전 변환 효율의 성장세를 보이며 차세대 태양전지로서 주목을 받게 되었다. 하지만 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 위한 대면적 연구개발 및 수분 및 산소 등의 외부요인과 고온에서의 안정성 확보를 위한 밀봉공정에 대한 연구가 요구되었다. 본 연구는 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 위한 대면적 코팅 방법에 대한 연구를 진행하였다.

페로브스카이트 태양전지는 외부 환경에 영향을 받기 때문에 이를 최소화하기 위한 방안을 모색하였으며 이러한 문제점을 해결하기 위해서 외부 환경에 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 찾아야 한다. 이를 보완하기 위해서 실험은 글로브박스 안에서 진행하였으며 슬롯-다이 코팅에 있어서 발생하는 변수 (bed 온도, 코팅속도, N₂ blowing 간격, N₂ blowing 높이, N₂ blowing 세기) 에 대해서 조건을 확인하고 최적 코팅 조건을 확인하였다.

향후 슬롯다이 코팅 방법을 이용한 페로브스카이트 태양전지에 대한 연구를 추가적으로 진행하여 상용화 및 안정성이 확보된 페로브스카이트 태양전지 모듈에 대한 연구를 추가적으로 진행할 예정이다. 이를 위해 glass to glass 구조에서의 라미네이션 공정에 대한 연구도 추가적으로 진행하여 온도 및 외부 환경으로부터 안정성이 확보된 모듈에 대한 연구를 진행하고자 한다.

참고 문헌

- [1] 정윤경, 태양광 산업 및 모듈가격 전망과 대내외 대응 전략 연구, 연구보고서 2013-21, 2013.
- [2] S. I. Seok, "Solvent-engineering for high performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells," *Nature Materials*, Vol.13, pp.897-903, 2014.
- [3] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, et al "Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.131, No.17, pp.6050-6051, 2009.
- [4] J. Seo, S. Park, Y. C. Kim, N. J. Jeon, J. H. Noh, S. C. Yoon, and S. I. Seok, "Energy Environ.," *Sci.*, Vol.7, p.2642, 2014.
- [5] J. H. Heo, H. J. Han, D. S. Kim, T. K. Ahn, and S. H. Im, "Energy Environ.," *Sci.*, Vol.8, p.1602, 2015.
- [6] H. S. Kim, S. H. Im, and N. G. Park et al, "Effect of Different Hole Transport Materials on Recombination in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite-Sensitized Mesoscopic Solar Cells," *J. Phys. Chem. Lett.*, Vol.4, No.9, pp.1532-1536, 2013.
- [7] M. A. Green, A. H. Baillie, and H. J. Snaith et al, "The emergence of perovskite solar cells," *Nature Photonics*, Vol.8, pp.506-514, 2014.
- [8] Q. Q. Lin, A. Armin, R. C. R. Nagiri, P. L. Burn, and P. Meredith, "Nat.," *Photonics*, Vol.9, pp.106-112, 2015.
- [9] P. Loper, M. Stuckelberger, B. Niesen, J. Werner, M. Filipic, S. J. Moon, J. H. Yum, M. Topic, S. D. Wolf, C. Ballif, and J. Phys, "Chem.," *Lett*, Vol.6, pp.66-71, 2015.
- [10] Xie Ziang, Liu Shifeng, Qin Laixiang, Pang Shuping, Wang Wei, Yan Yu, Yao Li, Chen Zhijian, Wang Shufeng, Du Honglin, Yu Minghui, and G. G. Qin, "Refractive index and extinction coefficient of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ studied by spectroscopic ellipsometry," *Opt. Mater. Express*, Vol.5, pp.29-43, 2015.
- [11] H. S. Kim, C. R. Lee, J. H. Im, K. B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S. J. Moon, R. H. Baker, J. H. Yum, J. E. Moser, M. Gratzel, and N. G. Park, "Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%," *Scientific Reports*, Vol.2, No.591, 2012.
- [12] C. W. Chen, S. Y. Hsiao, C. Y. Chen, H. W. Kang, Z. Y. Huang, and H. W. Lin, "Optical properties of organometal halide perovskite thin films and general device structure design rules for perovskite single and tandem solar cells," *J. Mater. Chem. A*, Vol.3, pp.9152-9159, 2015.
- [13] C. Wehrenfennig, M. Z. Liu, H. J. Snaith, M. B. Johnston, and L. M. Herz, "Charge-carrier dynamics in vapour-deposited films of the organolead halide perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$," *Energy Environ. Sci.*, Vol.7, pp.2269-2275, 2014.
- [14] V. Gonzalez-Pedro, E. J. Juarez-Perez, W. S. Arsyad, E. M. Barea, F. F. Santiago, I. M. Sero, and J. Bisquert, "General working principles of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ perovskite solar cells," *Nano Lett.*, Vol.14, pp.888-893, 2014.

저자 소개

오주영(Ju-Young Oh)

정회원



- 2020년 2월 : 군산대학교 물리학과 (이학사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 군산대학교 물리학과(이학석사)
- 2019년 7월 ~ 현재 : 한양솔라에너지 주임연구원

〈관심분야〉 : 과학, 정보통신

하 재 준(Jae-jun Ha)

정회원



- 1990년 2월 : 고려대학교 졸업
- 2002년 8월 : 고려대학교 경영대학원(경영학석사)
- 2020년 2월 : 충북대학교 빅데이터 박사과정 수료
- 2021년 4월 ~ 현재 : 한양솔라에너지 연구소장

〈관심분야〉 : 과학, 정보통신, 빅데이터

이 동 근(Dong-Geun Lee)

정회원



- 2001년 8월 : 한양대학교 전자통신 공학(공학석사)
- 2020년 2월 : 충북대학교 빅데이터 학과(공학박사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : ㈜한양솔라에너지 대표이사

〈관심분야〉 : 유무기 하이브리드 페로브스카이트 3세대 광소자 슬롯다이 코팅 디바이스 스마트팜 인공지능 모델, 데이터마이닝