

이 보고서는 코스닥 기업에 대한 투자정보 확충을 위해 발간한 보고서입니다.

혁신성장품목분석보고서

 YouTube 요약 영상 보러가기

태양전지(3세대)

페로브스카이트 태양전지가 향후 시장 성장을 주도할 강력한 대체기술

요약

배경기술분석

심층기술분석

산업동향분석

주요기업분석



작성기관

NICE평가정보(주)

작성자

박광태 책임연구원

- 본 보고서는 「코스닥 시장 활성화를 통한 자본시장 혁신방안」의 일환으로 코스닥 기업에 대한 투자정보 확충을 위해, 한국거래소와 한국예탁결제원의 후원을 받아 한국IR협의회가 기술신용평가기관에 발주하여 작성한 것입니다.
- 본 보고서는 투자 의사결정을 위한 참고용으로만 제공되는 것이므로, 투자자 자신의 판단과 책임하에 종목선택이나 투자시기에 대한 최종 결정을 하시기 바랍니다. 따라서 본 보고서를 활용한 어떠한 의사결정에 대해서도 본회와 작성기관은 일체의 책임을 지지 않습니다.
- 본 보고서의 요약영상은 유튜브로도 시청 가능하며, 영상편집 일정에 따라 현재 시점에서 미게재 상태일 수 있습니다.
- 카카오톡에서 “한국IR협의회” 채널을 추가하시면 매주 보고서 발간 소식을 안내 받으실 수 있습니다.
- 본 보고서에 대한 자세한 문의는 작성기관(TEL.02-2124-6822)로 연락하여 주시기 바랍니다.



한국IR협회

태양전지(3세대)

페로브스카이트 태양전지가 향후 시장 성장을 주도할 강력한 대체기술

■ 3세대 태양전지는 경제성, 유연성 등의 장점이 있으나, 아직 연구개발 및 실증화 단계

태양전지는 태양으로부터의 빛 에너지를 전기로 변환하는 반도체 소자로, 상용화 단계에 따라 1세대, 2세대, 3세대 태양전지로 분류할 수 있으며, 소재에 따라 실리콘계, 화합물 반도체계, 유기계 태양전지로 구분된다. 현재 태양전지 시장은 1세대 태양전지인 결정질 실리콘 태양전지가 90% 이상을 점유하고 있고, 3세대 태양전지는 연구개발 및 실증화 단계로 효율 향상 및 안정화가 필요한 상황이다. 3세대 태양전지는 생산단가가 저렴하여 경제성이 뛰어나며, 유연 모듈을 활용한 다양한 응용성, 원재료 공급의 용이성 등의 장점으로 시장에서 높은 관심을 받고 있다. 특히, 페로브스카이트 태양전지는 높은 광전변환효율과 낮은 생산단가로 인해 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 차세대 태양전지로 주목받고 있다.

■ 태양광 발전용량은 늘고 있으나, 3세대 태양전지 시장은 아직 도입기 단계

세계 각국은 에너지 안보 강화, 대기오염 개선, 기후변화 대응, 에너지 빈곤 해소 등의 해결책으로 신·재생에너지 산업에 대한 투자를 확대하고 있다. 2019년 세계 태양광 에너지 누적 발전용량은 627GW로 전체 발전용량의 24%를 차지하였다. 2019년 신규 설치된 태양광 발전용량은 115GW로 전년 대비 22.5% 증가하였다. 태양광 발전 설치 면에서 기록적인 한해를 기록하였는데, 이는, 전 세계 많은 국가에서 태양광에 대한 투자가 확대되고 있음을 보여준다. 반면, 3세대 태양전지 시장은 아직 도입기 단계로, 2018년 28백만 달러에서 연평균 12.83%의 성장률을 시현하여 2023년에는 51백만 달러의 시장규모를 형성할 것으로 전망된다.

■ 3세대 태양전지 중 상용화 가능성이 가장 높은 기술은 페로브스카이트 태양전지

3세대 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지가 사용될 수 없는 틈새시장을 중심으로 해외 기업에 의해 일부 상용화되었고, 발전용으로는 결정질 실리콘 태양전지와 경쟁이 되지 않고 있다. 특히, 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 것으로 평가받는 페로브스카이트 태양전지의 경우에는 아직 상용화에 성공한 기업은 없는 것으로 파악된다. 국내의 경우 3세대 태양전지로 상용화에 성공한 기업은 아직 없으나, 기술력은 해외 대비 우수한 수준에 있는 것으로 파악된다. 특히, 페로브스카이트 태양전지 기술은 국내 대학과 연구소에서 지속적으로 효율 및 안정성 향상 기술을 보고하며 기술개발 혁신을 주도하고 있다. 이에, 정부의 적극적인 지원과 산업계와의 공동 연구가 원활하게 진행된다면, 향후 시장 선점의 가능성이 높을 것으로 판단된다. 국내·외에서 페로브스카이트 태양전지를 연구하는 주요 연구소 및 학교로는 한국화학연구원, 성균관대학교, UNIST, EPFL, HZB, CAS 등이 있으며, 산업계에서는 한화솔루션, 유니테스트, 한국전력, 신성이엔지, Oxford PV 등의 업체들이 참여하고 있다.

I. 배경기술분석

태양전지는 빛 에너지를 전기로 변환하는 재생에너지 기술

태양전지 시장의 90% 이상을 1세대 태양전지인 결정질 실리콘 태양전지가 점유하고 있으며, 3세대 태양전지는 연구개발 및 실증화 단계로 효율 향상 및 안정화가 필요한 상황이다.

■ 태양전지의 종류 및 구동원리

태양전지(Solar Cell)는 태양으로부터의 빛 에너지를 광전효과(Photoelectric Effect)에 의해 전기에너지로 변환하는 반도체 소자로, 상용화 단계에 따라 1세대(결정질 실리콘 태양전지), 2세대(박막 태양전지), 3세대 태양전지로 분류할 수 있다. 소재의 종류에 따라서는 실리콘계, 화합물 반도체계, 유기계 태양전지로 구분되며, 현재 결정질 실리콘 태양전지가 전체 시장의 90% 이상을 차지하고 있고, 박막 태양전지가 약 8% 수준의 시장을 점유하고 있다.

3세대 태양전지에는 염료감응 태양전지(Dye Sensitized Solar Cell; DSSC), 유기 태양전지(Organic Photovoltaic; OPV), 페로브스카이트(Perovskite) 태양전지, 실리콘 와이어(Si-Wire) 태양전지 등이 있으나, 아직은 효율 향상, 안정화, 양산체계 구축 측면에서 지속적인 연구개발이 필요하다.

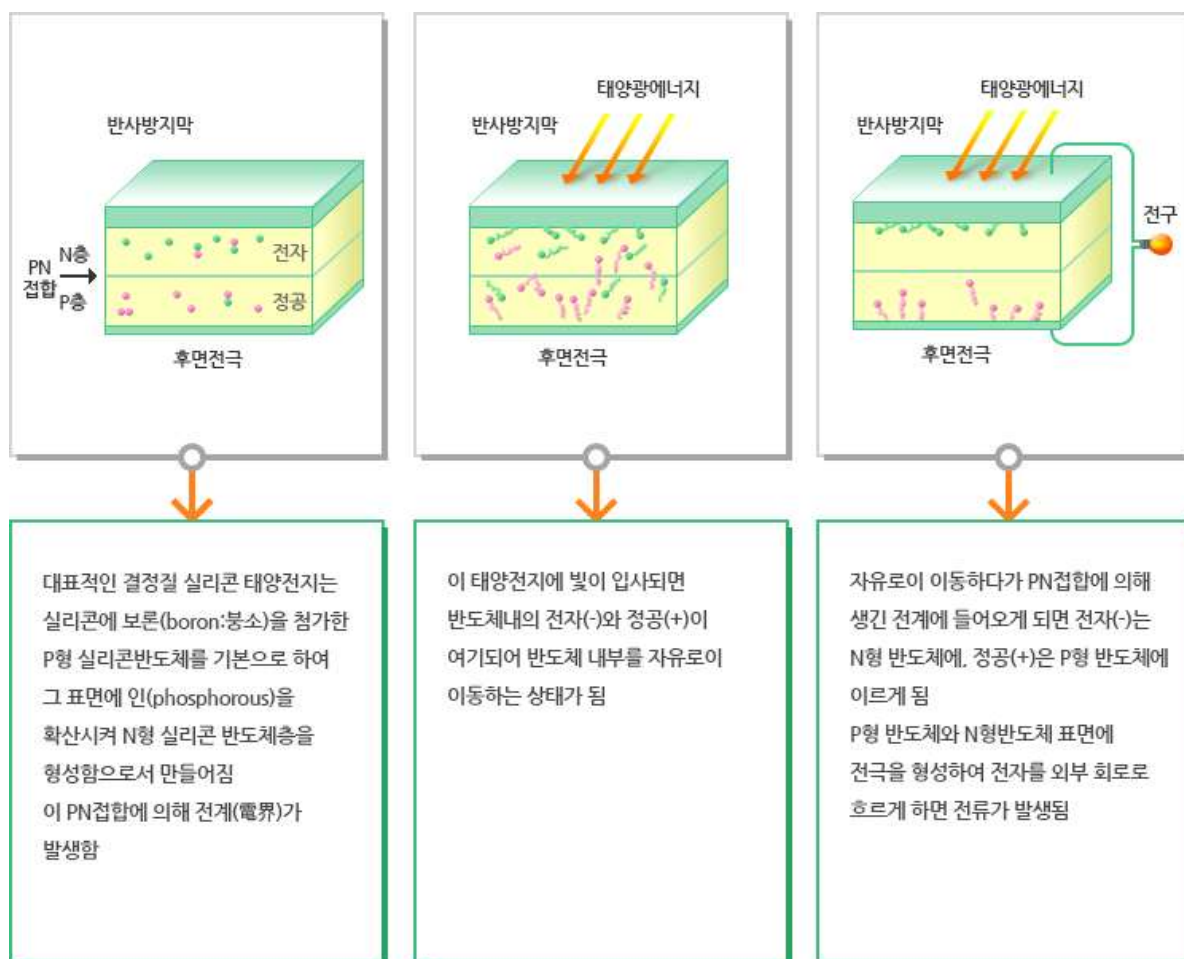
[그림 1] 태양전지의 상용화 단계별 분류



*출처: NICE평가정보

태양전지의 종류별로 구조 및 메커니즘에는 차이가 있으나, 기본적인 구동원리는 PN 접합(Junction) 구조의 결정질 실리콘 태양전지를 통해 이해할 수 있다 [그림 2]. 태양전지에 태양광이 조사되면 내부에서 전자(Electron)와 정공(Hole)이 발생하게 되는데, 발생한 전하들은 각각 N형 반도체와 P형 반도체로 이동하는 현상에 의해서 전위차(광기전력)가 발생하고 이때 부하(Load)가 연결되면 전류가 흐르게 되는 원리이다.

[그림 2] 결정질 실리콘 태양전지의 구조 및 구동원리



*출처: 한국에너지공단 신·재생에너지센터

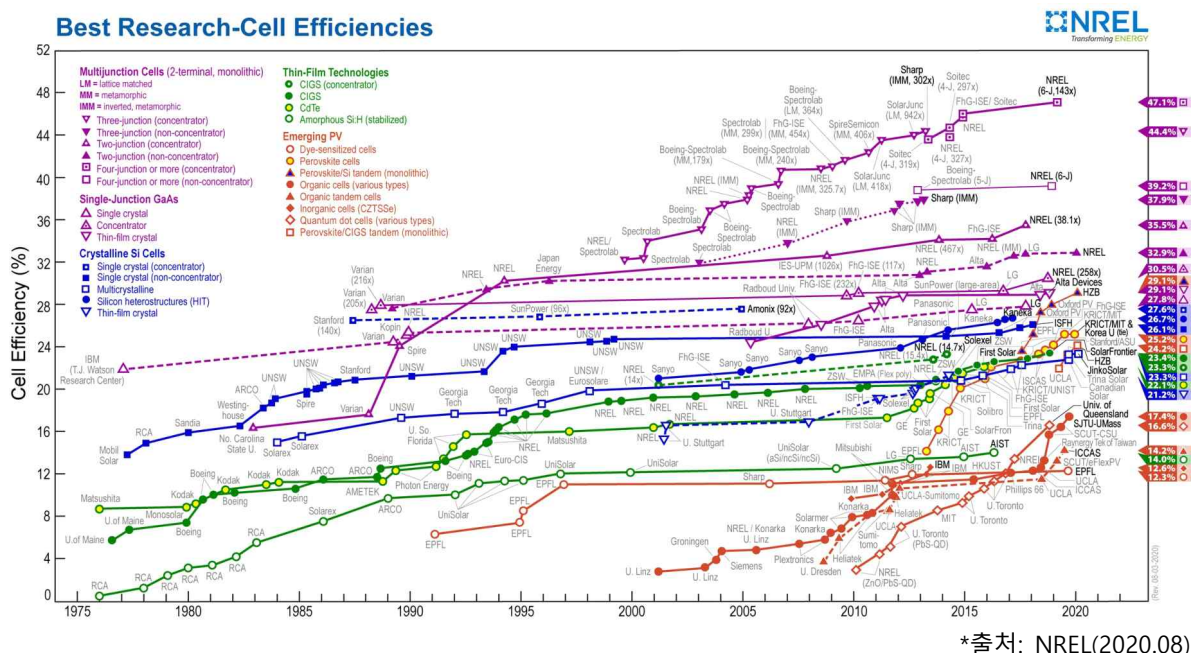
■ 1세대 태양전지

1세대 태양전지인 결정질 실리콘 태양전지는 산업 초기 광전변환효율(Power Conversion Efficiency; PCE) 향상을 중심으로 기술이 발전하였고, 시장 경쟁이 치열해짐에 따라 가격 경쟁까지 가중되어 고효율과 저가격을 동시에 만족시킬 수 있는 기술이 요구되고 있다. 대표적으로 PERC(Passivated Emitter and Rear Cell), PERL(Passivated Emitter Rear Locally Diffused), IBC(Interdigitated Back Contact), HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer), EWT(Emitter Wrap Through), MWT(Metal Wrap Through) 등 기존 태양전지 구조를 변경하여 광전변환효율을 높이는 기술이 개발 및 상용화 중에 있다.

1950년대부터 결정질 실리콘 태양전지의 광전변환효율은 꾸준히 증가하여 현재 26% 수준(Lab 수준)을 시현 중이며, 2017년 일본의 Kaneka에서 HIT 구조를 사용하여 26.7%의 최고 광전변환효율을 시현하였다 [그림 3].

한편, 결정질 실리콘 태양전지는 높은 광전변환효율과 오랜 기간에 걸쳐 축적된 공정 기술 및 내구성(수명 25년 이상) 등 많은 장점을 지니고 있으나, 낮은 흡수 계수(Absorption Coefficient)로 인해 입사광(Incident Light)을 완전히 흡수하려면 200 μm 두께 이상의 실리콘 웨이퍼(Wafer)가 요구된다. 실리콘의 소모량은 곧 태양전지의 가격을 좌우하기 때문에, 웨이퍼의 두께를 최소화하면서 광전변환효율을 높일 수 있는 기술이 연구되고 있다.

[그림 3] 태양전지 종류별 광전변환효율



2세대 태양전지

2세대 태양전지인 박막 태양전지는 유리, 금속, 플라스틱 기판 위에 수 μm 두께의 박막을 증착하여 이를 광 흡수층(Absorption Layer)으로 사용하는데, 소재에 따라 비정질 실리콘(Amorphous Si; a-Si) 태양전지, 화합물 반도체 기반의 CdTe 태양전지, CIGS 태양전지 등으로 구분된다. 박막 태양전지는 비교적 단순한 제조공정과 함께 실리콘 기판 대신 유리나 같은 저가의 기판 사용이 가능하여 가격경쟁력 확보에 유리하다.

비정질 실리콘 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지 대비 실리콘 소모량이 1/100 수준으로, 광전변환효율이 낮은 단점에도 불구하고 경제적인 장점으로 인해 초기 박막 태양전지 시장을 주도하였다. 그러나, 점차 폴리실리콘 가격이 안정세에 접어들면서 경쟁력이 크게 약화된 상황이다. 비정질 실리콘 태양전지는 낮은 광전변환효율을 개선하기 위해, 탠덤(Tandem), 트리플(Triple) 타입의 적층형 박막 태양전지로 구조 변화를 시도하였으나, 발표된 최고 효율은 아직 14% 수준이다 [그림 3].



CdTe 태양전지는 카드뮴(Cd)과 텔루라이드(Te) 기반의 태양전지로 박막 태양전지 가운데 생산단가가 가장 낮다. CdTe 태양전지는 2015년 미국의 First Solar에서 22.1%의 최고 효율을 달성하였으며, 양산 모듈의 효율은 16%에 가까운 수준으로 미국을 중심으로 대규모 발전용 시장에서 자리매김하고 있다. CdTe는 원소 간 결합력이 강하고 다른 형태의 화합물을 만들지 않아 증착 등 비교적 간단한 제조 방식으로 박막을 형성할 수 있으나, 원자재인 카드뮴이 독성물질이기 때문에 유해성 검증이 필요하며, 시장 확대에 한계가 있다. 또 다른 원자재인 텔루라이드는 생산량이 극히 적어 생산 규모 확대에 걸림돌로 작용할 수 있다.

CIGS 태양전지는 구리(Cu), 인듐(In), 갈륨(Ga), 셀레늄(Se) 화합물 기반의 태양전지로 박막 태양전지 가운데 광전변환효율이 가장 우수하다(발표된 최대 효율 23.4%). 그러나, CIGS 태양전지는 4가지 소재의 화합물을 광 흡수층으로 이용하기 때문에 2가지 물질을 사용하는 CdTe 태양전지보다 박막 증착이 어렵고, 생산단가도 높다. 광 흡수층 증착을 위해 4가지 소재에 열을 가해 동시에 증착시키는 방법이 사용되고 있으나, 소재 사용률이 낮고 대면적화에 불리한 단점이 있다. CIGS 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지에 가장 가까운 수준의 광전변환효율 달성이 가능할 것으로 평가되지만, 아직 대면적화와 대량생산 체계 구축에 대한 해결과제가 남아있다.

■ 3세대 태양전지

1세대 태양전지는 지속적인 연구개발로 그리드 패리티(Grid Parity, 재생에너지의 발전단가가 기존 화석연료의 발전단가와 같아지는 시점)를 달성하면서 상용화에 성공하였으나, 더 이상의 광전변환효율 향상 및 생산단가 절감은 쉽지 않을 것으로 판단된다. 반면, 3세대 태양전지는 생산단가가 저렴하여 경제성이 뛰어나며, 유연 모듈을 활용한 다양한 응용성, 원재료 공급의 용이성 등의 장점으로 시장에서 높은 관심을 받고 있다. 특히, 3세대 태양전지는 현재 상용화 전 단계에 있는 기술로, 해외 선진기업과의 기술 격차가 작아서 국내 기업에 의한 핵심소재 개발, 태양전지의 효율 개선 및 안정성(수명) 향상 기술개발, 생산 장비 국산화를 통해 기술 및 시장 선점이 가능한 분야로 평가받고 있다.

[표 1] 태양전지 종류별 주요 특징

세대	종류	특징
1세대	결정질 실리콘	불투명, 고효율, 장기 안정성 우수, 벤딩(Bending) 가능
2세대	CdTe	낮은 생산단가, 카드뮴의 독성으로 시장 확대 한계
	CIGS	결정질 태양전지 수준의 효율 구현 가능, 대면적화 어려움
3세대	DSSC	투명하고 다양한 색 구현이 가능, 효율성 및 내구성 향상이 요구됨
	OPV	생산단가가 낮고, 플라스틱 필름 위에도 박막 형성이 가능하여 웨어러블 기기 적용이 가능, 효율성 및 내구성 향상이 요구됨
	페로브스카이트	투명하고 유연하여 응용 분야가 다양함, 고효율 구현이 가능, 열에 취약하고, 환경 독성물질인 납이 포함될 수 있음

*출처: NICE평가정보

II. 심층기술분석

실리콘 태양전지를 대체할 차세대 태양전지로 주목받는 페로브스카이트

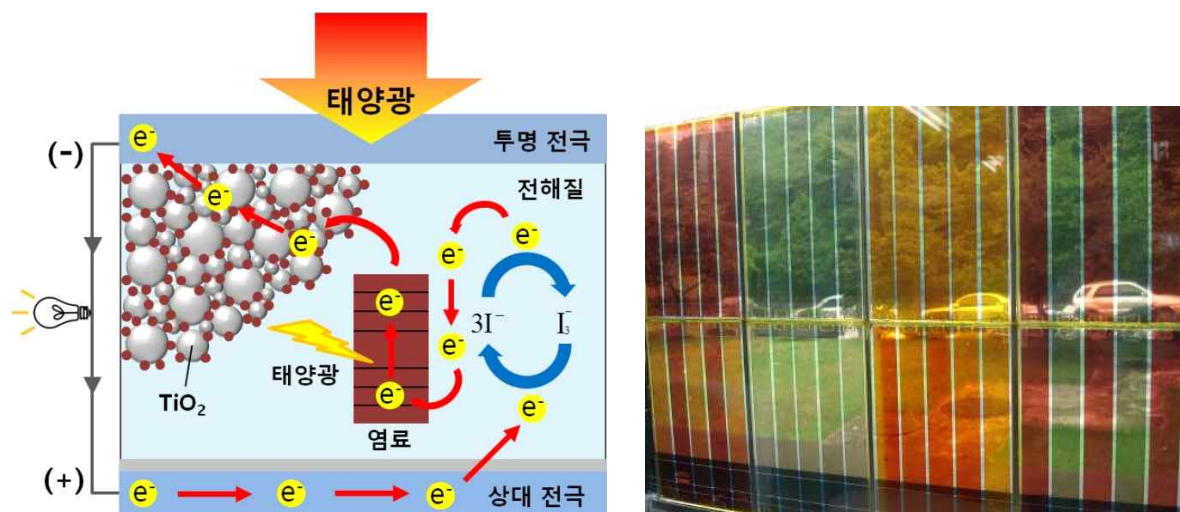
3세대 태양전지는 투명하고 유연한 특성으로 인해 건축자재, 휴대용 기기, 의류 등 다양한 분야에 적용할 수 있다. 특히 페로브스카이트 태양전지는 높은 광전변환효율과 낮은 생산단가로 인해 실리콘 태양전지를 대체할 차세대 태양전지로 주목받고 있다.

■ 염료감응 태양전지(DSSC) 기술

DSSC는 금속산화물 반도체 나노입자(Nano Particle) 표면에 특수한 염료(Dye)를 흡착시키고, 흡착된 염료가 태양광 에너지를 흡수해 광전기화학적(Photoelectrochemical) 반응을 유도하는 태양전지이다. DSSC는 가시광선을 선택적으로 흡수하는 염료 고분자, N형 반도체 역할을 하는 금속산화물 반도체 나노입자(TiO_2 , ZnO , SnO_2 등), P형 반도체 역할을 하는 전해질(Electrolyte), 촉매용 상대 전극, 투명전극(Transparent Electrode) 등으로 구성되며, 비교적 간단한 소자 구조를 갖고 있다.

DSSC의 경우 태양광 에너지의 흡수는 염료가 담당하고, 생성된 전자-정공의 분리/이송은 전자 농도 차에 의해 확산하는 방식으로 반도체 나노입자에서 이루어진다. 태양광이 전지에 입사되면 투명기관과 투명전극을 투과한 광자(Photon)는 염료에 의해 흡수된다. 염료는 태양광 흡수에 의해 여기 상태(Excited State)가 되면서 전자를 생성하고, 이렇게 생성된 전자는 금속산화물 반도체 나노입자로 이송되어 투명전극을 통해 외부회로로 흘러가서 전기에너지를 전달하게 된다. 태양광 흡수에 의해 산화된 염료는 전해질 용액으로부터 전자를 공급받아 원래 상태로 환원된다 [그림 4]. 이때 사용되는 전해질은 주로 I^-/I_3^- 의 산화/환원 쌍으로, 상대 전극으로부터 전자를 받아 염료에 전달하는 역할을 담당한다.

[그림 4] DSSC의 구동원리 및 제품 사진



*출처: KIC News, KIST

금속산화물은 주로 나노입자 또는 나노튜브(Nano Tube) 형태로 제조하는데, 이는 넓은 표면적을 제공하여 염료 분자의 흡착을 유도하고, 염료에서 생성된 전자를 전극까지 효율적으로 이동시키기 위함이다. 또한, 산화물 전극 내에 존재하는 공극을 연결시켜 전해질의 확산을 용이하게 한다.

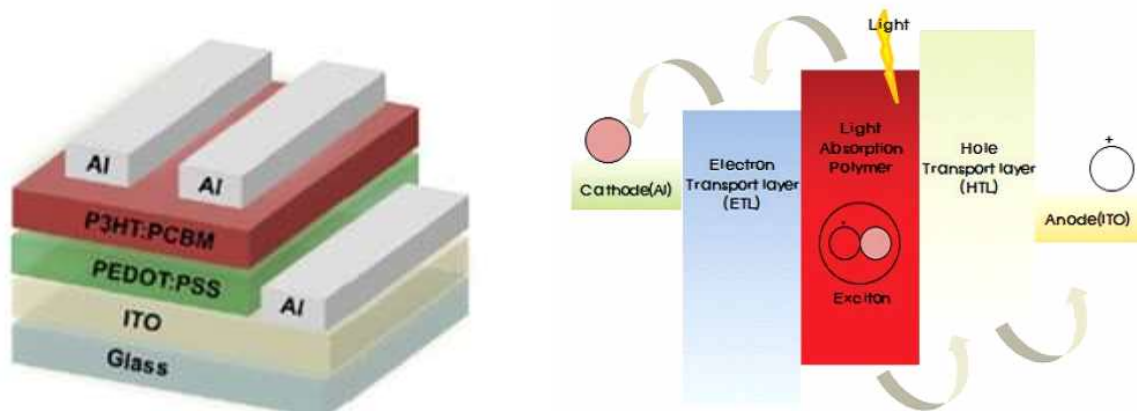
DSSC는 결정질 실리콘 태양전지 대비 우수한 가격경쟁력을 갖추고 있고, 높은 광 투과도 및 유연성 등의 장점이 있다. 그러나, 광전변환효율이 낮고, 장기 안정성이 낮을 뿐만 아니라 상용화를 위한 대면적화가 상대적으로 어려운 단점이 있다. 이에, 산업계에서는 상용화를 위한 모듈 제조공정 기술의 개발, 모듈 대면적화 기술개발을 진행하고 있으며, 관련 특허 확보 및 수출모델 구축에 적극적인 활동을 진행하고 있다.

■ 유기 태양전지(OPV) 기술

OPV는 양극(Anode)과 음극(Cathode) 사이에 전도성 유기재료를 이용하여 광 흡수층을 구성한 태양전지로, 기본적인 구조는 이중층 구조(Bi-Layer Structure)와 복합박막 구조(Bulk Heterojunction)로 나눌 수 있다. 이중층 구조는 높은 일함수(Work Function)를 갖는 투명전극인 인듐주석산화물(Indium Tin Oxide; ITO)을 양극으로 하고 낮은 일함수를 갖는 금속을 음극으로 하여 이 사이에 전자 주개(Donor) 물질과 전자 받개(Acceptor) 물질을 층으로 쌓은 형태이다. 복합박막 구조는 전자 주개 물질과 전자 받개 물질이 벌크 상태로 섞여 있는 상태이며, 광 흡수층의 계면이 넓어 광전변환효율이 개선되는 장점이 있다.

OPV는 태양광을 받으면 광자의 흡수로 전자 주개 물질이 여기 상태가 되어 전자-정공 쌍이 생성된다. 전자-정공 쌍이 분리영역으로 확산되어 전하 분리가 발생하고 전자는 전자 받개 물질을 통하여 음극으로, 정공은 전자 주개 물질을 통하여 양극으로 이동하여 외부로 전류가 흐르게 된다. 정공수송층(Hole Transport Layer; HTL)으로는 전도성 고분자인 PEDOT:PSS가 많이 사용되나, 산성 물질이기 때문에 전극을 열화시키는 단점이 있어 이를 해결하기 위한 소재개발이 이뤄지고 있다. 전자수송층(Electron Transport Layer; ETL)은 ZnO, TiO₂ 등의 금속산화물이 많이 사용되며, 음극은 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 불화리튬(LiF) 등이 주로 사용된다.

[그림 5] OPV의 구조 및 구동원리



*출처: 물리학과 첨단기술(2017), 기계와 재료(2011)

OPV는 재료가 저렴하고 인쇄나 잉크젯 등의 도포 공정으로 태양전지를 제조할 수 있어 생산단가가 낮으며, 플라스틱 필름 위에도 박막을 형성할 수 있어 웨어러블 기기 등 다양한 적용이 가능한 장점이 있다. 다만, 상용화를 위해서는 광전변환효율 및 안정성 향상을 위한 유기소재 개발 및 대량생산을 위한 양산 기술의 확보가 필요한 것으로 파악된다.

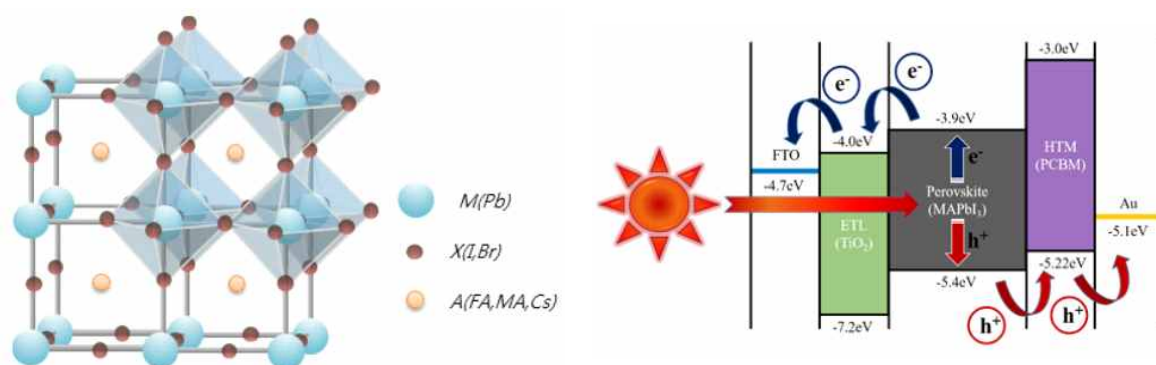
■ 페로브스카이트(Perovskite) 태양전지 기술

페로브스카이트라는 명칭은 1839년 우랄산맥에서 발견된 CaTiO_3 광물을 연구한 러시아의 광물학자 L. A. Perovski의 이름을 따서 지어졌고, 두 종류의 양이온과 한 종류의 음이온이 1:1:3의 비율로 결합한 ABO_3 화학조성을 가진 결정구조를 의미한다. 페로브스카이트는 초기에 금속산화물 물질로 발견되어 강유전체, 압전체, 초전도체 등으로의 연구가 진행되어 오다, 2009년에 일본 도쿄대학교의 Miyasaka 교수 연구팀이 유·무기 복합 페로브스카이트 물질을 태양전지의 광 흡수층에 세계 최초로 적용하면서 페로브스카이트 태양전지의 개발이 시작되었다.

일본에서 최초로 개발한 페로브스카이트 태양전지는 액상 페로브스카이트 결정을 사용해 광전변환효율이 3% 수준에 머물러 큰 관심을 받지 못하였으나, 2012년 성균관대학교 박남규 교수 연구팀에서 고체 페로브스카이트 결정을 사용해 광전변환효율을 9.7%까지 향상시키면서 주목받기 시작하였다.

태양전지에 활용되고 있는 페로브스카이트는 금속산화물 계열이 아닌 유기물과 무기물이 혼합된 형태의 AMX_3 결정구조를 갖는 물질을 광 흡수체로 이용하고 있다 [그림 6]. A는 유기양이온 물질로 메틸암모늄(Methylammonium) 또는 포름아미디늄(Formamidinium)이 주로 사용되고 있고, M은 금속양이온으로 납(Pb)이 가장 많이 사용되고 있으며, X는 할로젠 음이온 물질로 아이오다이드(I⁻), 브로마이드(Br⁻) 등이 가장 많이 사용된다.

[그림 6] 페로브스카이트의 결정구조 및 구동원리



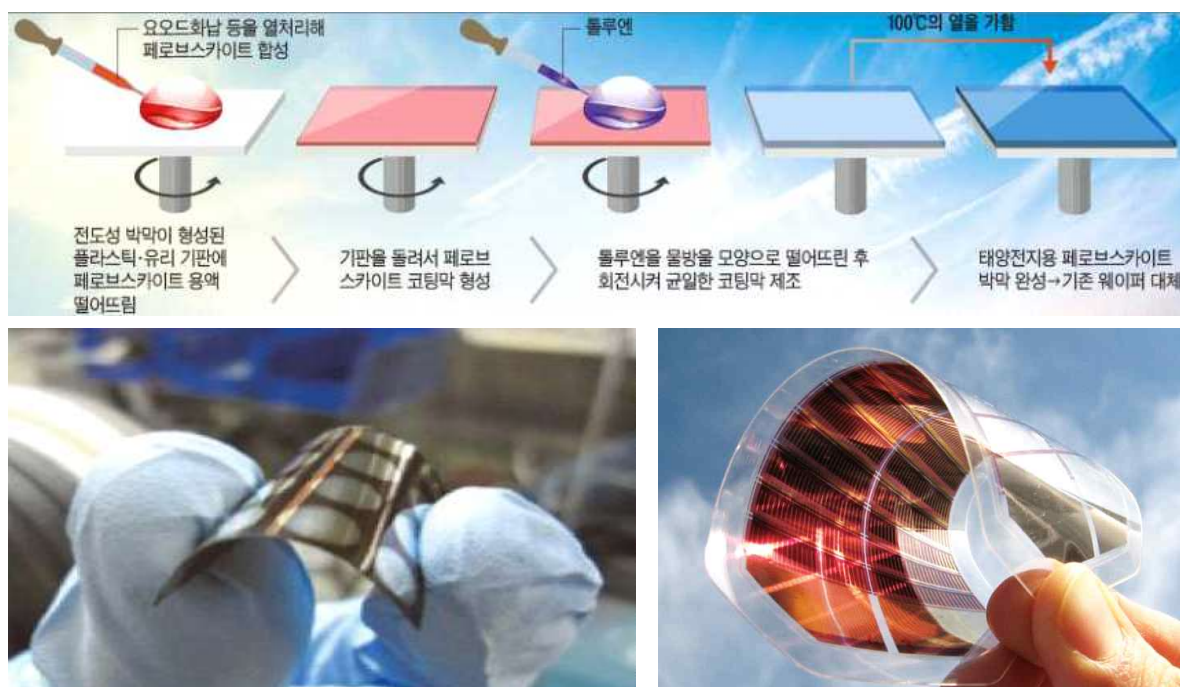
*출처: 물리학과 첨단기술(2019)

유·무기 복합 페로브스카이트 물질은 할로젠 음이온의 종류와 성분에 따라 밴드갭(Band Gap)을 조절할 수 있는 특징이 있는데, 이를 통해 태양광의 흡수영역을 조절함으로써 다양한 색상을 구현할 수 있고, 최근에는 탠덤(Tandem) 태양전지로 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 페로브스카이트는 가시광선 영역에서 높은 광 흡수계수를 갖고 있어 $0.5 \mu\text{m}$ 이하의 얇은 두께에서도 충분한 태양광 에너지를 흡수할 수 있으며, 전자-정공 쌍의 낮은 결합에너지로 인해 재결합 손실(Recombination Loss)이 적어, 고효율 달성이 가능한 것으로 보고되고 있다.

페로브스카이트 태양전지의 구동원리는 광 흡수층인 유·무기 복합 페로브스카이트 층에서 빛을 흡수하여 전자-정공 쌍을 생성한 뒤 내부 전기장에 의해 전자-정공 쌍을 분리한다. 전자는 ETL에 의해 선택적으로 수집되고, 정공은 HTL에 의해 수집된다 [그림 6]. 대표적인 유·무기 복합 페로브스카이트 물질로는 MAPbI_3 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), FAPbI_3 ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbI}_3$) 물질이 가장 많이 사용되고 있고, 최근에는 단일물질이 아닌 MAPbBr_3 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$) 또는 FAPbBr_3 ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$)와 같은 물질을 혼합하여 안정성을 유지하는 연구가 진행되고 있다.

페로브스카이트 태양전지의 제조를 위한 기본적인 공정은 [그림 7]과 같다. 먼저 요오드화납 등을 열처리해 페로브스카이트 합성, 이를 전도성 박막이 형성된 기판에 코팅한다. 이후 톨루엔을 균일하게 코팅한 뒤 약 100°C 에서 열처리하면 태양전지용 페로브스카이트 박막이 형성된다. 최종적으로 태양전지 소자로서 작동할 수 있게 전극을 형성한다.

[그림 7] 페로브스카이트 박막 제조공정(상) 및 페로브스카이트 태양전지 사진(하)



*출처: 한국화학연구원, 성균관대학교, Science Trends

■ 기술개발 동향

3세대 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지 대비 소재의 가격이 저렴하고, 공정이 간단하여 가격 경쟁력 측면에서 유리하였다. 그러나 폴리실리콘 가격의 하락과 공정 기술의 성숙으로 인해, 결정질 실리콘 태양전지가 모듈 효율 22% 수준에서 가격이 0.2\$/W 수준까지 떨어지면서 3세대 태양전지의 상용화는 더욱 어려워지고 있다. 이에, 최근에는 페로브스카이트에 다른 태양전지를 결합한 탠덤 구조를 통해 결정질 실리콘 태양전지를 대체하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 2020년 독일의 HZB(Helmholtz-Zentrum Berlin)에서 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지로 29.1%의 광전변환효율을 기록하였고, 영국의 Oxford PV는 2021년까지 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지를 상용화하겠다고 발표하였다. 다만, 페로브스카이트 태양전지의 상용화를 위해서는 효율 하락(Degradation) 문제에 대한 해결은 필수적일 것으로 판단된다.

Ⅲ. 산업동향분석

태양광 발전용량은 늘고 있으나, 3세대 태양전지 시장은 아직 도입기

전 세계적으로 태양광 에너지의 보급은 빠르게 확대되고 있다. 다만, 3세대 태양전지의 경우 결정질 실리콘 태양전지와 경쟁력을 갖추기 전까지는 시장이 확대되기 어려울 것으로 전망된다.

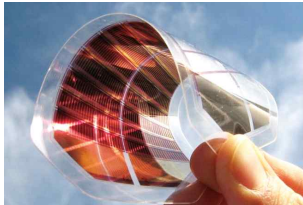
■ 정부 정책에 민감하며, 전·후방산업 연관 효과가 높은 산업

오늘날 세계 각국은 지구온난화의 한계를 돌파하기 위한 혁신적인 노력을 진행하고 있으며, 이를 위해 새로운 에너지를 찾아내고, 저탄소 기술을 개발함으로써 새로운 산업혁명을 일으키고 있다. COP21 파리 선언 이후, 선진국에서는 태양경제의 실현을 위한 신재생에너지 정책을 추진하여 에너지 위기를 극복하고, 동시에 지구온난화 방지를 추구하는 방향으로 나아가고 있다.

미국은 전 오바마 정부가 2030년까지 이산화탄소 32% 절감을 위한 석탄 화력발전 감축을 요구하는 ‘청정전력계획’, 30여 개 주에서 의무적으로 재생에너지를 공급하도록 하는 ‘재생에너지 의무할당제’인 RPS(Renewable Energy Portfolio Standard)를 도입하는 등 신재생에너지 관련 정책을 펼쳤다. 그러나, 트럼프 정부는 2017년 06월 파리 기후협정 탈퇴 의사를 발표하고 화석에너지 자원의 개발 및 생산의 활성화 정책을 세울 것을 발표하였으며, 오바마 행정부에서 도입된 석탄 제약 규제를 전면 재검토하겠다는 방침을 제시하였다.

국내의 경우, 2017년 12월 ‘신·재생에너지 3020 이행계획’을 발표하고, 향후 2030년까지 신·재생에너지 발전량을 20%, 발전용량은 63.8GW로 확대하는 것을 목표로 설정하였다. 또한, 2020년 07월 발표한 ‘한국판 뉴딜 종합계획’에 따라, 태양광 보급을 위한 주민참여형 이익공유사업 도입, 농촌·산단 융자지원 확대, 주택·상가 등 자가용 신재생설비 설치비를 20만 가구까지 지원할 계획이다.

[표 2] 태양전지의 전·후방 연관 산업구조

후방산업	태양전지	전방산업
- 폴리실리콘 - 금속산화물 - 투명전극 - 유·무기화합물	1, 2세대 태양전지 3세대 태양전지 - DSSC, OPV, 페로브스카이트	- 태양광 발전소 - 웨어러블 기기 - 친환경 자동차 - 건물 일체형 태양광 발전
		

*출처: NICE평가정보

태양전지 산업은 전방 및 후방산업 모두에 파급효과가 큰 산업으로, 폴리실리콘, 유·무기화합물, 투명전극과 같은 부품·소재 산업부터 발전, 건축, 자동차, 웨어러블 기기 등 다양한 전방산업 분야와 연계가 높은 분야이다 [표 2].

■ 진입장벽이 높고, 원가경쟁력과 막대한 자본력이 요구되는 산업

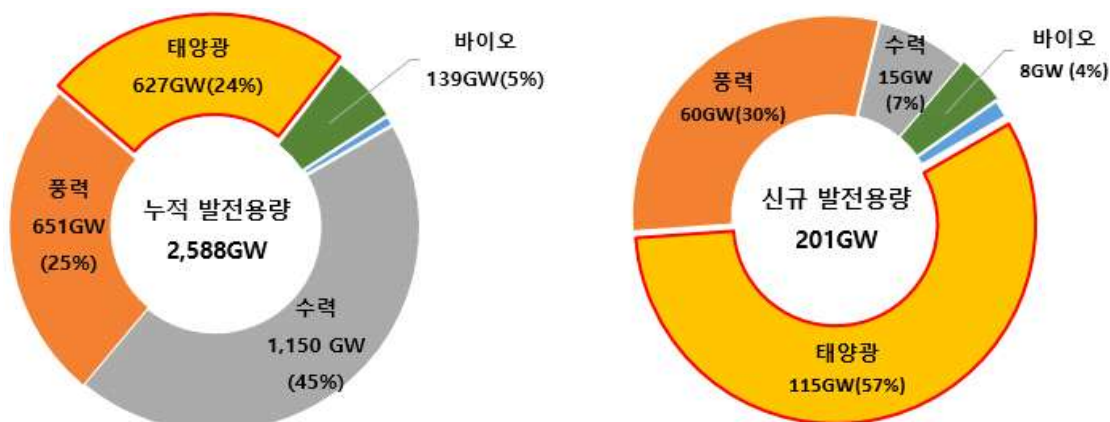
태양전지는 유·무기, 금속 소재의 제어를 바탕으로, 전자 이동통로를 구성하여 소자로 구현한 것으로, 화학, 물리, 전자 등에 대한 높은 이해를 요구하는 기술집약적 산업이다. 탠덤 구조, 투명·유연 태양전지 등으로의 확장이 진행됨에 따라 기술의 난이도는 더욱 높아지고 있으며, 높은 기술적 난이도가 시장 진입장벽으로 작용하고 있다.

또한, 태양전지 산업은 신제품 출시에 따른 가격상승이 동반되지 않아, 시장여건 개선 효과는 원가경쟁력을 가진 상위 기업들에 집중되고 있다. 이에, 원가경쟁력과 막대한 자본력으로 산업의 헤게모니를 확보한 중국이 시장을 주도하고 있다. 태양광 시장 조사업체인 PV InfoLink에 따르면, 2019년 태양광 모듈 생산량 Top 10에서 3위(한화솔루션)를 제외한 나머지 9개 업체가 모두 중국 기업(1위: JinkoSolar, 2위: JA Solar)인 것으로 조사되었다.

■ 국내·외 태양광 발전 시장현황

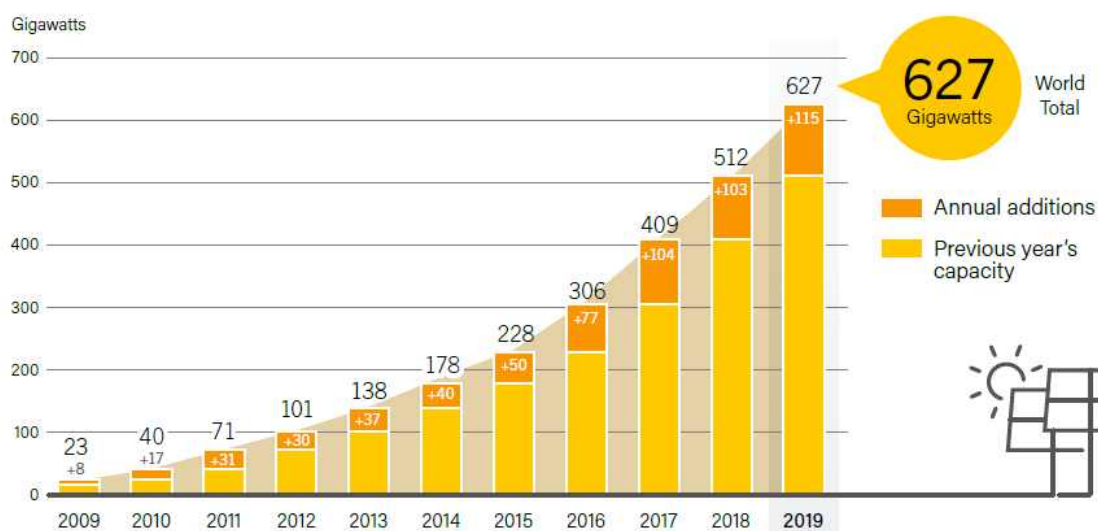
세계 각국은 에너지 안보 강화, 대기오염 개선, 기후변화 대응, 에너지 빈곤 해소 등의 해결책으로 신·재생에너지 산업에 대한 투자를 확대하고 있다. 2020년 REN21에서 발간한 'Renewables 2020 Global Status Report'에 따르면, 2019년 세계 재생에너지 누적 발전용량은 2,588GW이며, 이 중 태양광은 627GW로 전체 발전용량의 24%를 차지하였다. 2019년 신규 설치된 발전용량은 총 201GW이며, 이 중 태양광이 115GW가 신규로 설치되어 누적 발전용량은 전년 대비 22.5% 증가하였다 [그림 8]. 태양광 발전 설치 면에서 기록적인 한해를 기록하였는데, 이는, 전 세계 많은 국가에서 태양광에 대한 투자가 확대되고 있음을 보여준다. 2019년 세계 태양광 시장은 120GW 이상의 신규 설치가 예상됐으나, 중국의 부진으로 인해 115GW가 설치된 것으로 추정된다. 2019년 세계 태양광 시장은 예상보다 낮은 성장세를 기록하였으나, 여전히 11.7% 수준의 높은 성장세를 기록한 것으로 파악된다.

[그림 8] 세계 재생에너지 보급현황



*출처: REN21(2020), NICE평가정보 재가공

[그림 9] 세계 태양광 발전 누적 및 연도별 신규 용량

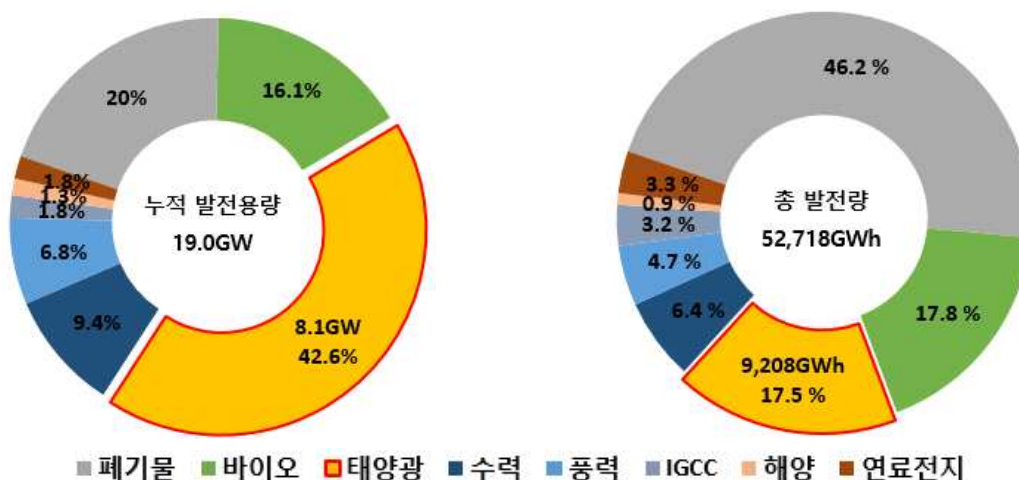


*출처: REN21(2020)

한국수출입은행의 ‘2020년 1분기 태양광 산업동향’에 따르면, COVID-19 사태 발생으로 인해, 2020년 세계 태양광 수요는 90~120GW로 전망치에 대한 하향 조정이 불가피하며, 사상 처음으로 역성장할 것으로 예상된다. Big 2(중국 및 미국) 시장의 안정적인 성장세와 개도국 등 신흥시장 부상으로 2020년 세계 태양광 시장은 최대 150GW까지 성장할 것으로 전망됐으나, COVID-19의 팬데믹(Pandemic)화로 인해 전 세계 주요국이 섰다운 되면서 태양광 프로젝트 연기가 속출하고 있는 상황이다.

한편, 2019년 한국에너지공단에서 발간한 ‘신·재생에너지 보급통계’에 따르면, 2018년 기준 국내 신·재생에너지 누적 발전용량은 19.0GW이며, 이 중 태양광은 8.1GW로 전체 발전용량의 42.6%를 차지하였다. 총 발전량은 52,718GWh로, 이 중 태양광은 9,208GWh로 전체 발전량의 17.5%를 차지하였다 [그림 10]. 정부는 2030년까지 태양광 발전용량을 33.5GW로 증설한다고 발표함에 따라, 앞으로도 태양광에 대한 투자는 지속될 전망이다.

[그림 10] 국내 신·재생에너지 보급현황



*출처: 한국에너지공단(2019), NICE평가정보 재가공

■ 국내 · 외 3세대 태양전지 시장현황

태양광 발전 시장은 폴리실리콘, 잉곳/웨이퍼, 태양전지/모듈, 발전시스템 등으로 구분할 수 있으며, 이 중 3세대 태양전지의 경우 아직 도입기 단계이다. 특히, 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 것으로 평가받는 페로브스카이트 태양전지의 경우에는 아직 상용화에 성공한 기업은 없는 것으로 파악된다. 이에, 세계적인 수준의 페로브스카이트 태양전지 기술력을 보유한 국내 연구진에 의해 시장 선점이 가능한 분야이다.

BCC Research의 'Alternative Photovoltaic Solar Cell Technologies'에 따르면, 세계 3세대 태양전지 시장은 2018년 28백만 달러에서 연평균 12.83%의 성장률을 시현하여 2023년에는 51백만 달러의 시장규모를 형성할 것으로 전망된다 [그림 11]. 지역별로는 2018년 기준 유럽이 11.6백만 달러로 가장 크고, 아시아/태평양 지역이 10.9백만 달러, 북미 지역이 4.5백만 달러로 파악된다. 국내의 경우, 2018년 6억 원에서 연평균 14.14% 성장하여 2023년 12억 원의 시장규모를 형성할 것으로 전망된다 [그림 12].

[그림 11] 세계 3세대 태양전지 시장규모 및 전망

(단위: 백만 달러)



*출처: BCC Research(2019), NICE평가정보 재가공

[그림 12] 국내 3세대 태양전지 시장규모 및 전망

(단위: 억 원)



*출처: BCC Research(2019), NICE평가정보 재가공

IV. 주요기업분석

아직 상용화에 성공하지 못한 3세대 태양전지, 해답은 페로브스카이트 태양전지

3세대 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지가 사용될 수 없는 틈새시장(건물 유리, 액세서리 등 유연성과 투명함이 요구되는 분야)을 중심으로 해외 기업에 의해 일부 상용화되었고, 발전용으로는 결정질 실리콘 태양전지와 경쟁이 되지 않고 있다. 또한, 고효율이 가능한 페로브스카이트 태양전지의 경우, 전 세계적으로 아직 상용화에 성공한 기업이 없다.

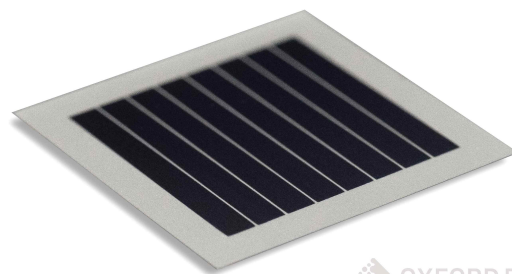
■ 해외 주요 산·학·연 현황

해외에서 3세대 태양전지를 연구하는 주요 연구소 및 학교로는 EPFL(스위스), HZB(독일), CAS(중국), NREL(미국), University of Oxford(영국) 등이 있으며, 산업계에서는 Heliateck(독일), Opvius(독일), Merck(독일), Bauer(독일), Solaronix(스위스), G2E(스위스), Oxford PV(영국), G24 Energy(영국), Dyesol(호주), Mitsubishi(일본), Panasonic(일본) 등의 업체들이 참여하고 있다. 유럽을 중심으로 3세대 태양전지 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 실증화 및 상용화가 일부 진행 중이다.

[영국/Oxford PV] Oxford PV는 2010년 페로브스카이트 태양전지가 히스테리시스(Hysteresis) 특성을 갖는 것을 최초로 보고한 영국 옥스퍼드대학의 Snaith 교수 연구실에서 분사(Spin-out)해 설립되었으며, 페로브스카이트 태양전지 상용화에 가장 가까운 기업으로 파악된다. Oxford PV는 2018년 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지로 28%의 광전변환효율을 달성하여 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)로부터 공식 인증을 받았고, 2023년까지 효율을 37%까지 향상시키기 위한 연구를 진행하고 있다.

Oxford PV는 2021년까지 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지를 상용화하겠다고 발표하였는데, 매년 상용화 시기가 늦춰지는 점을 보았을 때, 아직 고온·다습한 환경에서의 안정성(열화현상) 문제를 완벽히 해결하지는 못한 것으로 추정된다.

[그림 13] Oxford PV의 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지



OXFORD PV

*출처: Oxford PV



[스위스/EPFL] EPFL(로잔 연방 공과대학교)은 3세대 태양전지 관련 원천특허 및 다수의 핵심 특허를 보유하고 있으며, Gratzel 교수 연구팀을 중심으로 DSSC 및 페로브스카이트 태양전지 기술을 선도하고 있다. Gratzel 교수 연구팀은 국내 성균관대학교의 박남규 교수 연구팀과 공동으로 페로브스카이트 성능 개선 연구를 진행하면서 고체 전해질을 적용하였고 광전변환효율이 9.7%에 이르는 페로브스카이트 태양전지를 개발하였다. 또한, 2013년에는 금속산화물을 이용하여 다공성 구조를 구현하고, 그 위에 페로브스카이트를 순차적으로 코팅하면서도 균일한 구조를 갖도록 하면서 페로브스카이트 태양전지의 광전변환효율을 14%까지 상승시켰다. 해당 결과는 페로브스카이트 태양전지로는 최초로 NREL 효율 차트(Best Research-Cell Efficiencies)에 등장하였다.

[그림 14] EPFL Gratzel 교수 연구팀에서 개발한 3세대 태양전지



*출처: EPFL

[독일/Heliatek] Heliatek은 2006년 독일의 두 대학(Technical University of Dresden, University of Ulm)에서 분사해 설립되었으며, 'HeliaSol' 이라는 OPV를 개발하여 상용화하였다. Heliatek은 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정 기술개발을 통해 품질 및 생산성이 향상된 OPV 대량생산 기술을 확보하고 있으며, 절연기술을 개발해 장기 안정성을 확보하였다. 해당 제품은 유연한 특성으로 인해, 주로 곡면 형태의 빌딩 외벽에 적용되고 있다.

[그림 15] Heliatek의 롤투롤 제조공정 및 OPV 설치 사진



*출처: Heliatek

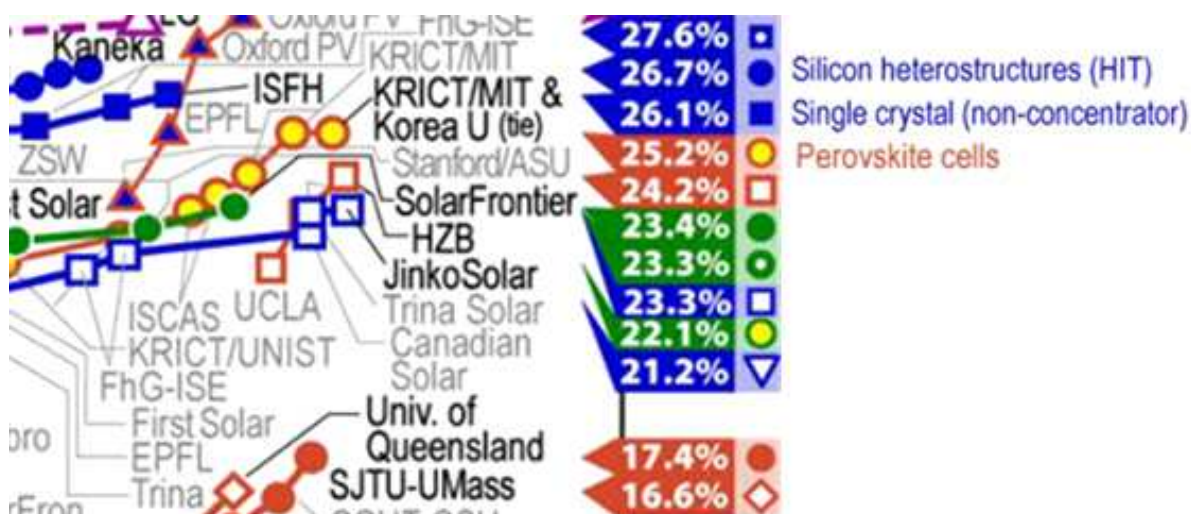
■ 국내 주요 산·학·연 현황

국내에서 3세대 태양전지를 연구하는 주요 연구소 및 학교로는 한국화학연구원(서장원 박사), 성균관대학교(박남규 교수), UNIST(석상일 교수), 고려대학교(노준홍 교수), 서울대학교(김진영 교수), KAIST(신병하 교수), 경희대학교(임상혁 교수) 등이 있으며, 산업계에서는 한화솔루션, 유니테스트, 한국전력, 신성이엔지, 동진썬미켈, 코오롱인더스트리 등의 업체들이 참여하고 있다. 국내의 경우 3세대 태양전지로 상용화에 성공한 기업은 아직 없으나, 기술력은 해외 대비 우수한 수준에 있는 것으로 파악된다. 특히, 페로브스카이트 태양전지 기술은 국내 대학과 연구소에서 지속적으로 효율 및 안정성 향상 기술을 보고하며 기술개발 혁신을 주도하고 있다. 이에, 정부의 적극적인 지원과 산업계와의 공동 연구가 원활하게 진행된다면, 향후 시장 선점의 가능성이 높을 것으로 판단된다.

[한국화학연구원] 한국화학연구원은 2013년에 이중층 구조의 페로브스카이트 태양전지 기술을 개발하였고, 2014년에는 기존에 사용되던 MAPbI₃ 대신 FAPbI₃ 기반의 페로브스카이트 물질을 활용하여 17.9%의 광전변환효율을 달성해 세계 최고 기록을 경신하였다. 이는 단일 용매도포방법을 이용해 FAPbI₃에 MAPbBr₃를 약 15% 혼합하여 단락전류(Short Circuit Current Density, Jsc) 값을 높인 기술로 현재까지도 가장 범용적으로 사용되고 있다.

이후, 한국화학연구원은 순차적 도포방법(Sequential Deposition), 요오드 처리(Iodide Management), 페로브스카이트 표면 패시베이션(Passivation) 기술 등을 개발하며 광전변환효율을 향상시켰고, 2017년 22.7%의 광전변환효율을 기록하며 상용화를 위한 효율, 안정성, 대면적화 기술을 확보한 것으로 평가받고 있다. 최근에는 MIT(Massachusetts Institute of Technology)와의 공동 연구를 통해 페로브스카이트 태양전지 광전변환효율을 25.2%까지 끌어올렸고, 2019년 08월 NREL 효율 차트에 등재된 뒤 현재까지 세계 최고 효율로 기록되고 있다. 해당 결과는 상대적으로 저렴한 용액기술 공정을 도입해 결정질 실리콘 태양전지와 효율 격차를 1.5%로 줄인 것으로, 상용화를 위해 한 발짝 더 다가간 것으로 판단된다.

[그림 16] NREL 효율 차트



*출처: NREL(2020.08), NICE평가정보 재가공

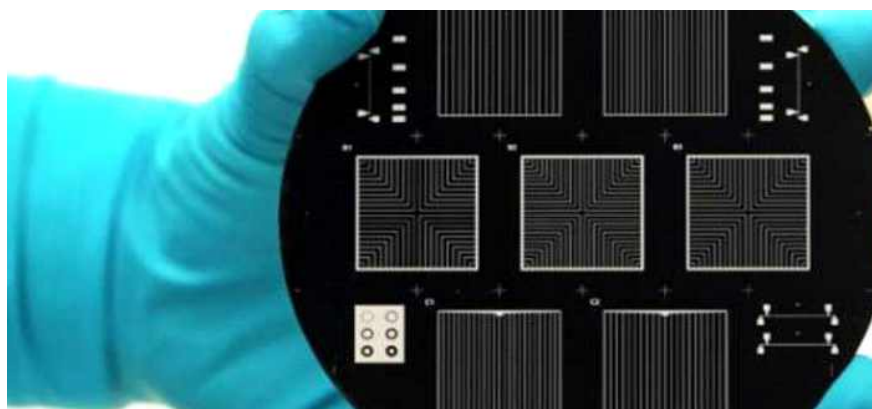
[한화솔루션] 한화케미칼, 한화큐셀, 한화첨단소재가 합병되어 설립된 한화솔루션은 모듈&시스템, 다운스트림, 에너지 리테일 사업을 영위하고 있는 글로벌 태양광 토탈 솔루션 기업이다. 한화솔루션 큐셀부문은 2019년 태양광 모듈 생산량 기준으로 세계 3위를 차지하고 있으며, 국내(충청북도 음성군)와 해외(중국 장쑤성 치둥시, 말레이시아 셀렝고르주 사이버자야)에 태양전지 생산공장을 구축하고 있다.

2012년 독일 큐셀 인수 후 본격적으로 다운스트림 사업에 진출하였으며, EPC(Engineering, Procurement, Construction) 수주/건설사업 위주의 사업 전개를 통해 2019년 말까지 전 세계적으로 2GW의 시공 실적을 보유하고 있다. 다만, EPC 사업의 리스크 대비 낮은 수익성을 해소하고 회사의 중장기 수익성을 제고하기 위해, 2019년부터는 단순 EPC 시공에서 탈피하여 태양광 발전소 개발부터 시공, 매각까지 다운스트림 전 영역을 아우르는 투자개발형 사업으로의 전환을 진행하고 있다.

한편, 한화솔루션 큐셀부문은 판교 미래기술연구소와 독일 탈하임 R&D센터에서 3세대 태양전지인 페로브스카이트 태양전지 연구개발을 진행하고 있다. 약 1년 전부터 연구개발 조직을 만들고 석·박사 인력을 채용하면서, 본격적인 연구를 시작한 것으로 파악된다. 현재 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지를 개발 중인 것으로 파악되며, 아직은 공식적으로 발표된 연구결과는 없으나 규모의 경제와 1세대 태양전지를 생산하면서 확보한 기술력을 바탕으로 상용화에 박차를 가할 것으로 판단된다.

[신성이엔지] 신성이엔지는 고효율 태양전지 및 모듈 생산에서부터 발전소 시공까지 수행하는 태양광 토탈 솔루션 기업으로, 충청북도 증평군과 음성군에 태양전지 및 모듈 생산공장을 운영하고 있다. 2016년부터 3세대 태양전지 개발을 위해 ‘고효율($\geq 25\%$) 결정질 실리콘/페로브스카이트 탠덤 태양전지 기술개발’ 과제(주관: UNIST 송명훈 교수)에 참여하고 있으며, 해당 과제를 통해 최근 21.2%의 광전변환효율을 기록한 것으로 파악된다. 탠덤 태양전지는 광 흡수율을 높이기 위해 성질이 다른 반도체를 연속적으로 쌓은 전지로, 공동연구팀은 생산단가가 낮은 실리콘 태양전지(p-Si Al-BSF Solar Cell) 위에 페로브스카이트 태양전지를 접합해 고효율과 가격경쟁력을 확보하고자 노력하고 있다. 아직은 연구개발 단계로 상용화까지는 시간이 다소 소요될 전망이며, 동일 기술을 개발 중인 Oxford PV, 한화솔루션 등과의 경쟁이 예상된다.

[그림 17] UNIST-신성이엔지 공동연구팀이 개발한 탠덤 태양전지



*출처: UNIST

■ 3세대 태양전지 시장 내 국내 코스닥 기업 현황

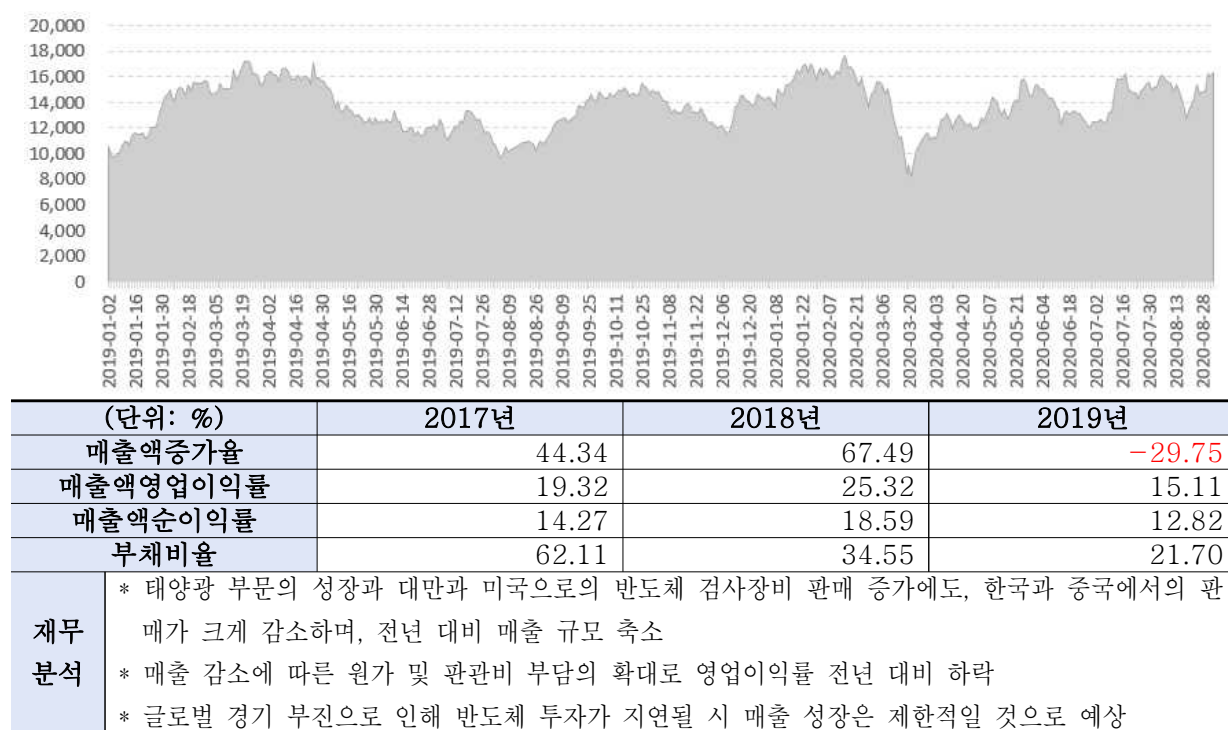
[유니테스트] 유니테스트는 2000년 반도체 검사장비 개발 및 제조를 목적으로 설립되었고, 2011년 신·재생에너지 설비 설치전문기업으로 선정되면서 태양광 사업을 시작하였다. 유니테스트는 태양광 인버터, 온도와 일사량을 알려주는 기상관측반, 채널감시 통신모듈과 접속모듈을 포함한 접속반, 발전시스템의 정보를 표시하는 모니터링 시스템을 자체적으로 개발하였고, 태양광 발전시스템 EPC 사업까지 수행하고 있다.

유니테스트는 태양전지 사업에 진출하기 위해 2016년에 한국화학연구원으로부터 저온 용액공정 기반의 페로브스카이트 태양전지 기술을 이전받았고, 15억 원 규모의 공동 연구개발 프로젝트를 추진해 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지를 개발 중이다. 유니테스트는 2019년 11월 페로브스카이트 태양전지 모듈의 광전변환효율을 14.8%까지 끌어올려 Sub-module(200~800cm²) 분야에서 세계 최고 효율을 NREL로부터 인증받았다.

2020년 08월 26일에는 한국전력공사 전력연구원과 유리창호형 페로브스카이트 태양전지 사업화를 위한 업무협약(MOU)을 체결하였다고 발표하였다. 페로브스카이트 태양전지는 반투명하고, 무게가 가벼워 건물의 외벽이나 유리창 등에 부착이 가능한데, 국토 면적이 좁고 고층 건물이 많은 국내 환경에 적용 시 사업성이 있을 것으로 평가된다. 공동연구팀은 향후 상용화를 통해 20층 빌딩에 적용 시 200kW급 이상의 전력 생산이 가능할 것이라고 설명하고 있다.

유니테스트는 2016년부터 지속적인 연구개발을 통해 페로브스카이트 태양전지의 양산 공정 기술과 대면적 모듈 제작 기술을 확보한 것으로 알려졌으나, 아직 상용화까지는 시간이 필요한 것으로 파악된다.

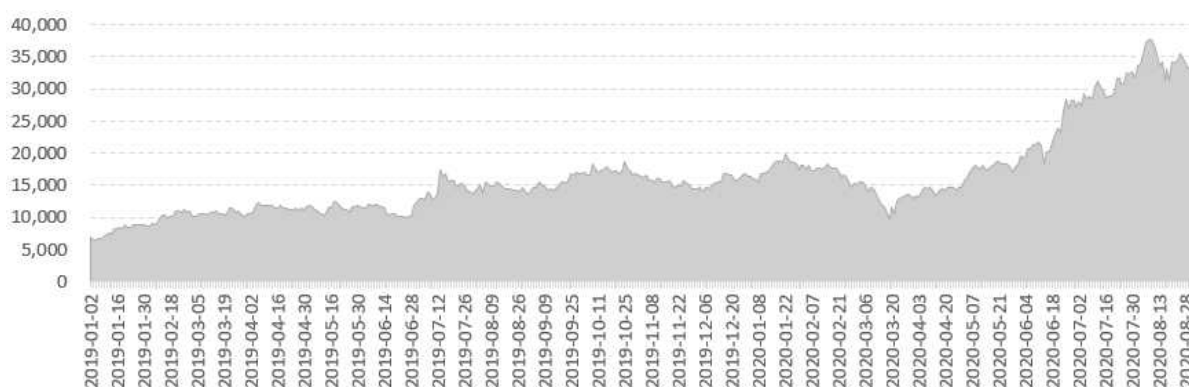
[그림 18] 유니테스트 주가추이(2019년~2020년 9월) 및 주요 재무현황/분석



*출처: Kisvalue, NICE평가정보 재가공

[동진썬미켄] 동진썬미켄은 2008년 한국과학기술연구원(KIST) 태양전지연구센터(센터장: 박남규, 現 성균관대학교 교수)로부터 DSSC 기술을 이전받았고, 현재까지 관련 특허 200여 개를 출원하였다. 동진썬미켄은 신성장동력이 되는 고부가가치 사업구조를 구축하고 기존의 발포제와 반도체 및 디스플레이용 감광액 등 전자재료 위주의 사업구조에서 벗어나고자, DSSC를 핵심 연구 분야로 선정하여 상용화를 위해 노력하고 있다. 그러나, 결정질 실리콘 태양전지의 모듈 가격이 0.2\$/W 수준까지 떨어진 상황에서 DSSC가 사업성이 있을지는 의문이다.

[그림 19] 동진썬미켄 주가추이(2019년~2020년 9월) 및 주요 재무현황/분석



(단위: %)	2017년	2018년	2019년
매출액증가율	2.64	5.36	5.81
매출액영업이익률	9.16	8.58	11.98
매출액순이익률	5.73	5.80	6.71
부채비율	149.32	148.60	133.30
재무 분석	* 반도체 및 디스플레이 산업향 감광액, 박리액, 식각액 등의 납품 및 8세대 LCD용 Wet Chemical, 발포제 등의 수출 호조로 전년 대비 매출 증가 * 매출 증가 및 원가율 개선으로 전년 대비 영업이익률 상승 * COVID-19 확산에 따른 전방산업의 공장 일시 가동 중단 등으로 전자재료, 발포제 등의 판매가 축소될 전망이며, 이에 따른 고정비 부담이 늘어 수익성이 저하될 것으로 예상		

*출처: Kisvalue, NICE평가정보 재가공