건물일체형 태양광발전(BIPV) 유리분야의 나노기술 응용현황

윤종호
한밭대학교
건축공학과 교수

서 론

20세기 들어 분자는 물론 원자의 속을 들여다 볼 수 있는 나노기술이 혁신적으로 발전하면서 산업전반에 걸쳐 가히 혁명적 변화를 가져오고 있다. 다양한 태양전지(solar cell)의 개발 및 효율 개선을 포함한 태양광발전(PV, photovoltaics) 기술 분야의 눈부신 발전도 각종 나노기술(nano technology)의 접목이 근간이 되고 있음은 자명한 사실이다.

태양광발전 모듈이 건축물 외피의 일부로 적용되어 건축물 외장재의 기능과 전력를 생산하는 PV모듈의 기능을 동시에 수행할 경우 건물일체형 태양광발전(BIPV, Building Integrated Photovoltaics)으로 정의하며, 이러한 기능을 수행하는 자재를 BIPV 모듈이라 한다. BIPV 모듈은 일반 PV 모듈과 달리 건물이라는 특수 환경에서 동작해야 하기 때문에 설치각도 및 온도, 음영, 채광 등등 기술적 요소는 물론 색상, 재질, 패턴 등의 디자인적 심미성 요소도 매우 중요한 개발요소이다. 따라서 가시광 투명도, 광 입사각, 온도, 색상 등의 상반적 요구 성능을 충족하면서 최대한의 발전성능을 구현하는 것이 주요 기술 혁신 목표이다.

이러한 목표를 달성하기 위해 현재 개발되고 있는 BIPV 관련 주요 나노 기술은 고투과도 태양전지의 고효율화 기술, 선택적 광이용 태양전지 기술, 입사각 비의존적 태양전지 기술, 광변조 및 흡수/증폭 나노 기술, 오염물질 자가 세정 나노기술 등이 대표적이며, BIPV가 시스템 기술이기 때문에 이들 기술의 단독 적용보다는 여러 기술을 복합 적용하여 BIPV 기술을 개발하고 있다.

본 고에서는 건축자재의 기능을 동시에 구현하는 BIPV 기술 분야 중 특히 유리 및 창호와 관련된 BIPV Glazing 유리시장의 현황을 고찰하고, BIPV 유리에 적용되고 있는 나노기술 중 최근 많은 관심을 받으며

활발히 연구 개발되고 있는 ① 투명 모듈, ② 컬러 모듈, ③ 자정/방오 모듈, ④ 자가발광집광(LSCs) 모듈 등의 4개 BIPV 모듈 관련 기술에 대해 고찰하고자 한다.[1]

BIPV Glazing 유리 시장 현황

BIPV 시장규모는 아직 확고한 시장기반이 형성된 것이 아니기 때문에 시장예측기관에 따라 다소 편차가 큰 예측 결과를 나타내고 있으며, 정확한 통계량도 확립되어 있지 못한 상황이다.

최근에 발표된 BIPV 시장규모 예측에 따르면 2019년 7월에 발표된 Grand View Research의 경우 세계 BIPV 시장규모는 2018년 현재 US$ 109.7억불 규모에서 2019년~2025년까지 연평균성장율 18.8%로 성장할 것으로 예측하였다.[2] Energias의 경우 세계 BIPV 시장의 규모가 2018~2024년까지 연평균 성장율(CAGR) 23.4%로 성장해, 현재 67억불 규모에서 2024년에 322억불 규모로 확대될 것으로 예측하고 있다.[3] 이에 반해 QY Research의 경우는 2018년 기준 70.5억불에서 2025년에 94.9억불 규모로 성장하여 연평균 성장률이 4.32% 정도 수준일 것으로 상대적으로 매우 보수적으로 예측하고 있다.[4] 한편 n-Tech Research의 예측에 따르면 전세계 BIPV 시장규모는 2015년 US$ 30억불에서 2019년 90억불을 상회할 것이며, 2022년까지 260억불로 크게 성장할 것으로 예측하고 있어 여러 예측기관 중 평균적 자세를 보이고 있다.[5]

나노기술 기반의 BIPV 요소기술은 대부분 유리와 접목된 기술이기 때문에 전체 BIPV 시장 중에서 BIPV 유리시장의 잠재수요가 매우 중요하다. 앞서 BIPV 시장예측 기관 중 n-tech의 분석에 따르면 2015년 기준 BIPV 유리시장의 규모는 US$ 1억불 수준이며, 2020년에 35억불, 2022년에 63억불 수준으로 증가할 것으로 예측하고 있다. 특히 2020년을 전후로 전 세계 대부분의 국가가 제로에너지빌딩(zero energy building)의 의무화를 본격적으로 시작하며, 스마트 에너지 시티와 같은 도시 규모의 그린에너지화를 적극 추진함에 따라 BIPV 유리 시장의 규모도 큰 영향을 받을 것으로 기대된다. n-tech의 경우 2018년 제로에너지빌딩을 위한 BIPV시장 규모가 8억불에서 2022년 25억불로 큰 성장을 이룰 것으로 내다보고 있다.[5]

국내의 BIPV 시장은 아직 시장자체가 형성되었다고 보기 어려울 정도의 초기 진입단계인 실정이다. 2004년 이후 시행된 공공건물 신재생에너지 설비 의무화설치법이 BIPV의 보급 활성화에 결정적 기여를 하였으나, 이 또한 총공사비 가격 중심의 의무 할당량 산정방식에서 전기 생산량 중심의 산정방식으로 변화된 이후 BIPV 측면에서는 보급에 불리함을 가지게 되었다. 국내 BIPV시장에 대한 규모는 국내 시장조사예측기관의 조사보고서에 예측한 자료와 국외기관의 자료를 상호 비교하여 예측할 경우 2012년 기준 BIPV 시장규모가 3~5MW수준에서 2017년 82~109MW의 규모인 것으로 추정되고 있다.

그동안 설치된 국내 BIPV 시스템의 사례를 대상으로 설치 위치별 분석을 해보면 입면형, 천창형 및 차양 및 기타로 구분할 경우 입면형이 59%, 천창형이 36%로 전체의 95%를 차지하고 있다. 한편 설치방식별로 구분할 경우 커튼월, 마감재, 천창 및 기타로 구분할 때 커튼월이 56%로 가장 큰 비중을 차지하며 마감재가 31%이다. BIPV가 커튼월 형태로 적용될 경우 투광성을 가지는 것이 일반적이다. 이는 건물 입면에 설치됨으로써 BIPV가 전면에 노출되고, 건물 디자인과의 조화가 매우 중요한 요소로 고려되어야 함을 의미하며, 향후 국내에서는 본 고에서 고찰하는 나노기술 기반 BIPV 유리시장의 역할이 매우 클 것임을 시사한다.[6]

투명 BIPV모듈 기술

채광용 건축창호를 대체할 수 있는 투명한 태양전지 개발기술로 높은 가시광선투과율과 높은 발전효율을 동시에 구현해야 하는 것이 주요 기술목표이다.

현재 기술의 대부분 태양전지가 가시광선 영역을 중심

으로 반응하기 때문에, 높은 가시광선 투과율과 높은 발전 효율은 상반성을 가지고 있는 근본적 난제이다. 따라서 가시광선(VIS)은 최대한 채광용으로 투과시키고, 자외선(UV) 및 근적외선(NIR) 영역을 발전에 최대한 활용할 수 있는 선택적 파장제어 기술, 탠덤화 기술, 광변조 및 흡수/증폭 기술 등의 다양한 복합기술 개발이 필요하다.

현재 당면하고 있는 해결 이슈는 고투광성, 고효율, 장기신뢰성을 동시에 달성해야 하는 문제이다. 기존 실리콘 기반 태양전지는 불투명하고 정형화되어 다양한 응용에 제한이 있다. 현재 개발되고 있는 투명한 태양전지는 기본적으로 가시광선 투과율과 경제성 있는 효율, 장기신뢰성을 동시에 확보하는 것이 용이하지 않다.

현재까지 투명 태양전지의 개발 수준은 태양전지 종류에 따라 가시광선 투과율 40~70% 수준, 최고효율 7~13% 수준을 달성하고 있지만 모두 소면적 기준 성능이며 장기신뢰성이 부족한 상황이다.

고투광성 고효율 투명태양전지가 개발된다 하더라도 실제 건축창호 또는 자동차용 창호로 상용화되기 위해서는 대면적화 관련 이슈, 셀간 파티션에 의한 불균일층의 이슈, 색상 균일도 문제 및 상왜곡 등에 대한 기술 이슈도 해결되어야 하는 문제이다.

국내 기술동향과 관련해 현재까지 투명 태양전지의 개발 수준은 유기 태양전지 가시광선 투과율 40%, 최고효율 7.2% 달성, 염료감응태양전지 가시광선 투과율 60%, 최고효율 6.2%를 달성, 페로브스카이트 이중접합 태양전지 가시광선 피크 투과율 77%(800nm), 최고효율 12.7%를 달성한 수준이다. 하지만 모두 소면적 기준 성능이며 모두 장기신뢰성을 확보하지는 못한 상황이다.

정부는 2019년 8월 알키미스트 프로젝트 공모를 통해 1 SUN 조건 공인효율 12% 이상, 가시광선 투과율 70% 이상을 동시에 구현하는 1cm^2 면적의 투명 태양전지 기술을 구현하고 KS 인증 표준조건에 따른 장기신뢰성 확보와 소재 국산화 등을 입증하며, 7년 뒤에는 건축물과 자동차용 창호일체형 태양전지 시제품을 최종결과물로 제출하는 목표로 연구 컨소시움을 선정하여 현재 2단계 연구가 진행되고 있다.[7]

그림 1. 가시광투과율 40%에 단위면적당 출력 38W의 하너지사의 BIPV 모듈(source; Hanergy)[8]

현재 기술수준과 관련해서 국외 투명 BIPV 모듈 기술의 레퍼런스 모듈은 중국 하너지(Hanergy Inc.)의 BIPV Panel로 가시광선 투광율(Tvis) 40%에 모듈면적 0.79m^2, 출력 30Wp로 단위면적당 출력으로 환산하면 38Wp/m^{2}에 해당한다. 재료는 PIN a-Si/Ge cell이다. 어느 정도의 대면적화를 구현하면서도 40% 광투과율에 3.8%의 효율을 달성한 사례이다.[8]

국내의 경우 주성엔지니어링에서 1m^2 면적 이상으로 10~30% 균일투광성을 가진 a-Si 투명모듈 및 생산 장비를 개발한 바 있다. 하지만 이 기술은 레이저스크라이빙에 의해 태양전지를 깍아내어 투광성을 확보한 기술로 a-Si이 구현할 수 있는 효율 한계가 명확하기 때문에 더 이상의 기술개발을 기대하기는 힘든 상황이다. 하지만 투광성 확보가 용이한 페로프스카이트, 유기태양전지, 염료감응태양전지에 대한 국내 연구개발진의 수준이 매우 높은 상황이며 2019 알키미스트 프로젝트 투명태양전지 기술개발의 7년뒤 개발목표 수준과 이를 대응하기 위한 지원기관의 현 기술수준을 고려할 때, 현재 국내 투명 BIPV모듈 기술 수준은 고효율 고투광성 부분에서 약 80%, 대면적화 부분에서 70% 정도 수준으로 판단된다.

컬러 BIPV모듈 기술

컬러(Colored) BIPV모듈은 건축외장재로서의 심미성을 확보하기 위해 태양전지 자체 또는 충진재, 필터, 전면유리 등에서 균일하고 다양한 대면적의 색상을 구현하면서 발전을 위한 투과손실은 최소화 하는 것이 주요 기술목표이다.

BIPV 모듈의 표면색상(color) 및 패턴(pattern), 질감(texture), 시각효과(visual image) 등의 의장적 요소는 PV를 건축시장에 보급하기 위한 가장 중요한 요구성능 중 하나이다. 기존에 해결방법은 태양전지 표면에 적용되는 반사방지(AR) 코팅의 두께 조절을 통해 태양전지 자체에서 색상을 구현하였지만, 최근에는 외부에서 태양전지가 거의 보이지 않게 하는 Invisible PV 또는 Hidden PV 기술이 BIPV 기술분야 중 가장 활발히 개발되고 있다. 이 기술도 발전성능은 최대한 유지하면서 균일하고 다양한 색상 구현을 해야하는 상반성을 가진 목표를 달성해야 함으로 IR 투과잉크 기술, 확산 또는 선택투과성 코팅의 솔라필터 기술, 디지털 프린팅 기술 등에 다양한 나노관련 첨단기술이 요구된다.

그림 2. 국내에서도 현재 다양한 종류, 색상, 크기의 컬러 모듈이 활발히 개발되고 있다. (image: Orange Cube, 한밭대학교)

현재 기술적 이슈는 대면적 저가화 고효율 컬러BIPV 모듈을 구현해야 하는 것이다. 컬러 BIPV모듈 기술의 핵심은 건축 외장재의 마감과 거의 유사한 형태의 다양한 색상, 패턴, 재질 등을 대면적으로 구현하면서 효율손실을 최소화해야하는 것이 가장 큰 기술이슈이다. 실용화를 위해서는 내구성확보 및 저가화 이슈도 당연히 해결되어야 하는 숙제이다.

국내기술개발 현황은 2018년부터 에너지기술평가원에서 지원한 연구 컨소시움에서 스퍼터링방식의 컬러 BIPV 모듈을 개발한 바 있으며, 2019년에도 2개의 연구 컨소시움이 컬러 BIPV모듈 개발관련 연구과제가 착수되었다. 현재 SI인터내셔널, 포스코, 옥토끼, SG에너지, 코오롱/신성, 아반시스 등 여러 기업에서 자체적으로 다양한 방식의 컬러 BIPV 유리 기술 개발을 활발히 진행 중에 있다.

국외 컬러 BIPV 모듈 기술은 2010년 이후 유럽을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 이미 시장에 상용화 제품이 출시되고 있는 수준이다. 특히 스위스의 연구소 및 기업 들이 이 분야 기술을 선도하고 있다. 미국에서는 전기자동차로 유명한 Tesla Solar에서 2017년 4가지 종류의 컬러 BIPV 지붕재 모듈을 발표하여 이 분야에 대한 관심을 크기 끌어올리기도 했다. SwissINSO Kromatix, Archinsolar, CSEM, Solaxess, Sunovation, Onyx Solar, Megasol, Ertex Solar, SUPSI, Fraunhofer Institute, CSTB 등 매우 다양한 유럽의 기업과 연구기관이 기술개발에 관여하고 있다.

기술수준은 스위스 Kromatix 제품의 경우 면적 2m^2 이상의 스퍼터링기반 컬러 BIPV 모듈을 회색은 10%, 연회색은 15% 투과손실로 8개 색상 제품군의 투과손실이 8~15% 수준의 상용화 제품을 출시하고 있다.

자정/방오 BIPV모듈 기술

태양광모듈의 전면부에는 먼지, 수분, 모래 등의 축적이 발생되며, 일부 연구에 따르면 이로 인해 발전출력이 50%까지 감소될 수 있다고 보고된다. 최대의 발전성능 확보를 위해서는 유리 표면의 청결 유지가 바람직하지만, 주기적 세척과 관리를 위해서는 급수 및 노동력의 높은 비용이 수반된다. 따라서 PV모듈 표면의 오염물질을 스스로 제거할 수 있는 나노기술 기반 자정(self-cleaning)기능을 가진 고성능 방오코팅(anti-soiling coating) 기술은 BIPV의 심미성과 유지 보수성 및 발전성능을 개선할 수 있는 핵심 기술분야 중 하나이다.

나노기술 기반의 자정기능을 가진 고성능 방오 코팅은 PV모듈 전면에 부과되기 때문에 투과율, 심미성, 안전성, 내구성 및 경제성을 확보하는 것이 주요 기술목표이다.

현재의 기술적 해결이슈는 고투과 고내구성의 방오 코팅기술 개발이다. 현 수준의 방오코팅 기술은 내구연한이 2~3년으로 짧으며, 투과도가 낮고 비용도 260euro/litter 이상으로 매우 고가이다. 비용효과적 경제성 및 내구성과 성능을 개선해야 하는 이슈를 가지고 있다.

국외 기술현황은 EU에서 진행되고 있는 SolarSharc 프로젝트에서 표면의 오염물질을 스스로 제거할 수 있는 자정기능을 가진 고성능 방오코팅(anti-soiling)을 개발하였으며 이 프로젝트의 수행기관은 Advanced Resins and Coatings Innovation Centre, Opus Materials Technologies, Onyx Solar, CEA-LITEN, Millidyne and TW 등이다. SolarSharc 프로젝트에서는 나노입자 구조를 통한 투과율 개선을 통해 발전효율을 4%정도 개선시키고 건축적 응용측면에서 심미성도 개선시킨 방오코팅을 개발하였다. 실리카 기반의 무독성 공정에 확장성 있는 제조가 가능하다. 높은 내구연한과 자정기능은 물론 반사방지 기능과 고온에 대한 저항성을 보유하고 있다. 반사방지기능을 통해 가시광선 투과율이 93% 이상을 나타낸다. 무기-유기 하이브리드 코팅은 두께가 수 미크론에 불과하다. 비점착성 유기 그룹에 화학적으로 결합된 다기능성 실리카(유리) 망을 통해 손쉽게 발수 및 그에 따른 오염을 방지한다. 물방울은 표면을 적시는 대신 코팅에 의해 물방울의 형태로 낮은 각도에서도 손쉽게 굴러 떨어진다. 또한 먼지나 모래와 같은 고체 오염원은 바람 또는 최소한의 물에 의해서도 손쉽게 제거된다. 이 프로젝트가 목표로 하는 시장은 상업용 태양광 발전소와, BIPV 분야이다. 현재 TRL6의 기술 준비 프로토타입 수준에서 BIPV의 TRL9 인증, 데모 수준에 이르기까지 SolarSharc 코팅 및 새로운 자정 BIPV 모듈을 상용화를 추구하고 있다.[9]

자가발광집광 BIPV모듈 기술

앞서 투명 BIPV모듈 기술은 태양전지 자체에서 여러 기술의 응용을 통해 높은 투광성과 발전효율을 달성하는 것에 반해, 자가발광집광(LSC; luminescent solar concentrators) 기술은 가시광선과 UV 및 NIR을 광학적으로 완전 분리하여 가시광선은 실내로 투과하고 분리된 UV 또는 NIR을 측면으로 굴절 또는 집광하여 유리의 측면 단부에서 기존 태양전지를 통해 발전을 하는 기술이다.

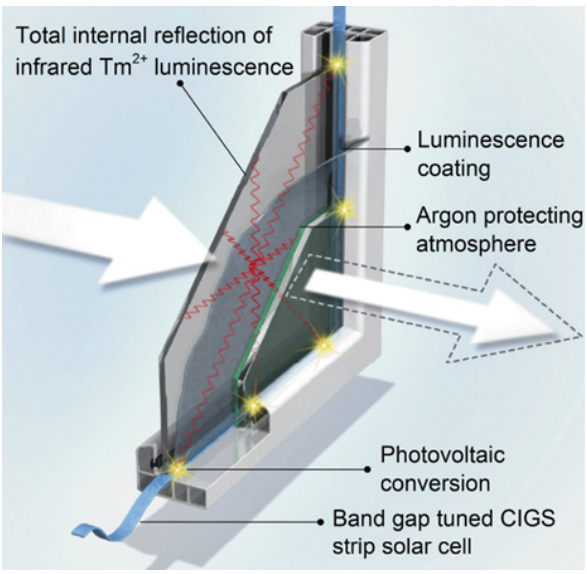

그림 3. LSCs를 적용한 PV-window 개념도. 가시광은 투과시키고 UV 및 NIR은 LSCs층을 통해 창호 단부로 굴절되어 단부에 설치된 태양전지로 발전을 하게된다. (source: TU Delft)[10]

따라서 BIPV 모듈의 유리 부분에는 태양전지가 존재하지 않기 때문에 완전투명한 상태로 가시광선 투과율을 70% 이상 확보할 수 있는 장점이 있는 반면, 단부로의 집광효율이 재결합 손실 등으로 인해 매우 낮으며, 발전에 NIR영역만 활용해야 하는 점과 단부에서 음영손실, 미스매칭 등으로 인해 전체 발전성능이 매우 낮은 것을 해결해야 하는 것이 주요 기술목표이다.

당면 해결이슈는 자가발광집광(LSCs) BIPV 모듈의 경우 현재 LSCs 층의 집광성능이 매우 낮기 때문에 고효율화를 위한 각종 요소기술의 개발이 이루어져야 하며, LSCs의 단부측 발전이 이루어지는 부분에서는 LSCs로부터 유도되는 광여기파장에 대응할 수 있는 태양전지 및 음영과 미스매치 등의 효율저하를 최소화 할 수 있는 기술개발이 고효율화를 위해 근본적으로 필요하다.

LSCs 기반기술의 상용화 제품으로 호주의 ClearVue가 가장 선도적 기술을 보유하고 있다. 0.85m^{2}의 BIPV 창호에 가시광선 투과율 70%, 발전효율 2.5%의 성능을 실험적으로 실증하였다. 2019년에는 2.76m^{2}면적에 70% 가시광투과율, 1.89%의 발전효율을 달성한 모듈을 상용화 하였다.[8]

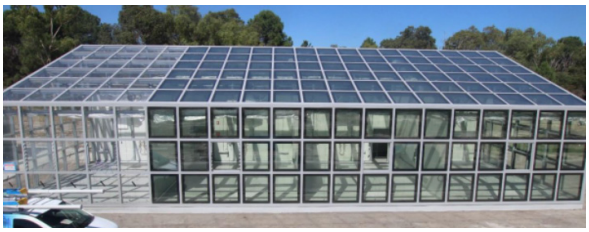

그림 4. 70% 가시광투과율, 30W/m^2 출력의 LSCs 기반 창호로 구성된 ClearVue사의 PV 유리온실 실증사례, 2021.4. (source: Clear Vue)[11]

그림 5. LSCs를 이용한 Domal smart windows의 실증사례, Milan Design Week 2018 (source: Eni)[12]

국내의 경우 LSCs 기술에 기반한 BIPV 모듈의 제작 또는 기술개발 사례는 아직 보고되고 있지 않으며, 기초적 연구 단계이다.

참고문헌

[1] 국가나노기술정책센터, 나노기술 기술동향 보고서, 제3기 국가나노기술지도 기반, 2020. 9. 29

[2] Grand View Research, 2019. 7

[3] Bloomberg, 2019. 4

[4] QY Research, 2019. 6.

[5] n-tech Research report, 2017. 2

[6] 2018 기술혁신기반 기후산업별 세부추진전략 – BIPV, 2018

[7] 2019년도 알키미스트 프로젝트 난제정의서(신재생분야 2), 2019. 8

[8] Specrrally-selective energy-harvesting solar windows for public infrastructure applicatoins, Appled Sciences, 2018. 8

[9] How Nanotechnology is Providing a Solution for Photovoltaic Systems, by Posted by Nanoneophyte, 2018. 12

[10] https://www.tudelft.nl/en/faculty-of-applied-sciences/about-faculty/departments/radiation-science-technology/research/research-groups/luminescence-materials/student-projects

[11] https://www.solarquotes.com.au/blog/clearvue-solar-greenhouse-mb1962/

[12] https://www.eni.com/en-IT/operations/concentrators-solar-luminescent.html