태양전지를 이용한 스마트 윈도우 기술 동향

Self-powered Smart Window Technologies Using Photovoltaics

이규성 (Kyu-Sung Lee, kyusung.lee@etri.re.kr) 신소재연구실 선임연구원/실장
임정욱 (Jung Wook Lim, limjw@etri.re.kr) 신소재연구실 책임연구원
강만구 (Mangu Kang, 10009kang@etri.re.kr) 신소재연구실 책임연구원
김경현 (Kyung Hyun Kim, khyun1@etri.re.kr) 신소재연구실 책임연구원
류호준 (Hojun Ryu, hjryu@etri.re.kr) 플렉시블전자소자연구실 책임연구원

ABSTRACT

Smart window technology has become a major component of smart buildings, leading to energy savings and enhanced functionality. Smart windows work like curtains or blind screens, blocking external light sources. Smart window components employ electrochromic or photochromic materials that can selectively block sunlight when electricity is applied. The installation of low-E glass and building-integrated photovoltaics (BIPV) is being encouraged in accordance with the policy on saving building energy. To incorporate BIPV into smart windows, the transparency and colors of transparent photovoltaics must be optimized. The power sources required to operate these smart windows take advantage of the transparent color of the solar cells, which also facilitates aesthetics. Self-powered smart windows that combine electrochromic or photochromic screens with transparent solar cells suggest a promising convergent technology.

KEYWORDS 스마트 윈도우, 건물일체형 태양전지, 투명 태양전지, 독립전원, 변색소자

Ⅰ. 서론

일반적으로 사용되는 스마트 윈도우 기술은 전기를 인가하면 태양광을 선택적으로 차폐하는 기능이 구현되는 소재와 구조를 이용하는 방식으로 건축 에너지 효율화 정책 기조에 맞추어 로이유리(Low-E glass), 건물일체형 태양전지(BIPV)와 함께 에너지 절감과 건축물의 기능성 증대를 위한 스마트빌딩 기술의 주요한 구성요소가 되어가고 있다. 스마트 윈도우는 외부에서 유입되는 광원을 차단하는 블라인드 또는 커튼과 같은 역할을 위하여 투명/불투명 상태의 조절 기능뿐만 아니라 투과도를

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340504
* 본 원고는 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(KETEP 20193010014830, 20183010013820, 20163010012560).

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2019 한국전자통신연구원

조절하는 방식의 사용도 점차 요구되고 있다.

이러한 스마트 윈도우의 기능 구현은 전자산업의 발달에 따라 액정 또는 변색소자를 활용하여 점차 일상생활에 적용되기 시작하였다. 이와 같은 스마트 윈도우를 동작하기 위한 전원의 공급은 기존 전력계통 또는 외부 전원으로 연결하는 방식에서 벗어나 점차 건축 내·외부의 심미적인 요소를 위하여 태양광원을 활용할 수 있는 투광형 태양전지를 활용하여 편의성과 심미성을 개선하는 연구가 진행 중이다.

Ⅱ. 스마트 윈도우 독립 전원 기술

1. 스마트 윈도우용 BIPV 기술 개요

건물일체형 또는 건물집적형 태양광 발전시스템의 태양광(PV) 모듈은 신재생에너지의 핵심인 태양광 발전을 건축 외장재로 적용함으로써 친환경 재생에너지의 대표인 태양광 발전을 통한 전력 생산을 통한 부가가치 창출을 통한 건축물의 경제성 향상과 도심 환경에서의 에너지 효율 향상에 기여한다[1]. 건물 적용 BIPV 시스템은 기존에 넓은 면적의 별도 설치 부지가 요구되던 태양광 발전 방식과 달리 도심 건축물에 적용이 가능하며, 특히 제로에너지 건축 의무화와 같이 건축물의 전기에너지 사용의 효율성과 친환경화를 위한 기술적인 대안으로 태양광 발전은 미래 에너지 산업 분야에서 주목받고 있는 분야이다. BIPV 시스템은 단순한 태양광 패널의 건물 적용뿐만 아니라 소재, 부품, 전기, 전자, 전력, 건축, 건설 등 다양한 기술이 융합되어 이에 따른 기술 개발과 연관 산업의 파급효과가 큰 분야가 되어가고 있다.

도심의 고층 건물과 같이 에너지 소비가 점차 증가하고 있는 상황에 BIPV 시스템을 적용할 경우 여름철과 겨울철 피크 전력이 증가하는 시기 전력 수요 대응에 기여할 수 있다. 건물집적을 위한 여러 방식 중 창호 일체형 BIPV 시스템의 경우 유리 창호의 본래 기능인 투광성과 시인성을 유지하면서도, PV 셀의 배치 변화에 따라 다양한 패턴을 형성하거나, 투과율 조절을 통해 다양한 건축적 기법으로도 활용 가능하다. 보다 가시성 확보와 시감의 증대를 위해서는 기존 유리 창호에 적용된 투명 태양전지가 요구되고 있으며, 커튼월 방식과 같이 건축물의 미적요소를 고려한 설계와 시공이 점차 증가하고 있다.

기존 BIPV는 차양 장치 또는 루버(Louver) 형태로 적용되어 과도한 직사광선으로부터의 노출을 방지하면서도 어느 정도 시각적인 쾌적성을 보장해 줄 수 있는 구조이다. 루버 형태 BIPV는 또한 설치 각도를 태양광 발전에 적합한 각도로 조절하여 수직 입면에 설치되면서도 발전효율을 유지할 수 있다. 설치 환경에 따라 고정형 또는 가변형으로 다양한 디자인 적용이 가능하지만, 대부분의 루버형 BIPV 시스템의 경우 결정질 실리콘 태양전지를 사용하여 투과성 확보의 어려움과 디자인의 한계성이 존재하고, 이에 대한 대안으로 반투명 또는 투명 태양전지의 적용을 통한 채광과 시감이 개선된 건축자재 또는 스마트 윈도우의 개발이 요구되고 있다. 여기에서 더 나아가 스마트 윈도우 구동을 위한 독립전원 기술로써의 BIPV와 스마트 윈도우 기술의 결합을 통하여 활용성은 더욱 증대될 수 있으며, 다양한 소재와 구조를 갖는 태양전지의 적용이 연구되고 있다.

2. 무기소재 기반 박막 태양전지

박막 태양전지는 벌크 형태의 결정질 실리콘 태양전지와 비교하여 다양한 기판 적용이 가능하고 경량화에 유리하며, 유연성과 투명 소자에 적용이

가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 박막 태양전지는 크게 무기소재 기반과 유기소재 기반의 태양전지로 분류할 수 있다. 유기 기반에 비하여 무기 기반의 박막 태양전지는 일반적으로 내구성과 안정성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있으나, 진공장비를 이용한 공정 적용과 어느 정도의 규모를 갖춘 생산시설이 요구된다. 대표적인 무기소재 기반 박막 태양전지는 비정질 실리콘, CdTe, CIGS 소재들이 개발되었으며, 점차 적용분야가 확대될 것으로 예상된다.

실리콘 박막 태양전지의 경우, 결정형 실리콘에 비하여 얇은 광흡수층으로 투명 태양전지로 제작이 용이하여, 투명 소자의 일종인 스마트 윈도우와의 일체형의 구조와 구동에 유리하다. 이러한 무기 박막 태양전지 적용 창호는 안정성이 큰 장점으로 여겨지고 있으나, 창호 적용을 위하여 건축용 창호에서 선호되는 색상 구현이 주요한 요구 사항이 되고 있으며, 투과도 확보, 효율 향상과 함께 주요한 개발 목표가 되고 있다.

가. 실리콘 박막 태양전지의 특징

실리콘 박막은 광흡수층의 두께가 통상적으로 150nm에서 350nm 정도로 100μm에서 300μm 두께의 결정질 실리콘에 비하여 매우 얇고 PECVD와 같은 진공증착 공정을 통해 형성한다. 실리콘 박막은 결정성 정도에 따라 비정질(amorphous)과 미세결정(micro-crystalline) 실리콘으로 분류가 가능하다. 이들의 변환 효율은 6~13%로 상대적으로 20% 대의 효율을 갖는 결정질 실리콘 태양전지에 비하여 낮은 효율을 보이지만, 박막 형태로 태양전지 제조가 가능하여 반투명 태양전지로의 적용이 유리하고 다양한 형상과 유연한 기판 적용 등이 가능하며, 단순한 구조로 제조되어 안정성이 높다는 장점이 있어서 스마트 윈도우 구동과 함께 투명한 창호로의 역할 수행에 적합성이 높은 편이다.

실리콘 박막 태양전지의 개발 초기에는 여타 태양전지와 마찬가지로 효율을 높이는 데 초점을 두고 연구가 진행되었기 때문에, 에너지 밴드갭이 높은 비정질 실리콘과 상대적으로 낮은 밴드갭의 미세결정 실리콘 소재의 흡수 파장 차이를 이용하여 직렬로 배열한 탠덤(tandem) 구조 내지는 트리플(triple) 구조로 설계하여 기전력을 높이고, 결과적으로 효율을 높이고자 하였다. 이러한 실리콘 박막 탠덤 또는 트리플 구조 태양전지의 초기 효율은 14~16% 정도를 보이다가, 일부 광열화로 인한 안정화 효율은 최대 13%의 효율을 보이고 있다. 실리콘 박막 태양전지의 모듈 가격은 발전량 1W당 0.2~0.3달러를 형성하고 있는데, 결정질 실리콘 태양전지 제조단가의 급격한 하락으로 가격 측면의 장점이 감소하였으나, 대면적화가 가능하고 유리기판에 직접 형성이 가능한 장점을 투명변색소자와 결합하는 스마트 윈도우에 적합한 방식으로 여겨지고 있다[2,3].

그림 1은 투명 태양전지를 위한 실리콘 박막 태양전지의 구조를 보여 주고 있으며, 비정질 실리콘 박막은 밴드갭이 1.7~1.8eV로 결정질의 1.1eV

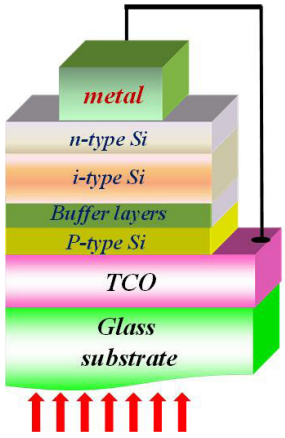


그림 1 실리콘 박막 태양전지의 구조

보다 높기 때문에 가시광선을 주로 흡수하며, 전하의 수집은 전계에 의한 수집으로 결정질 실리콘의 확산에 의한 방식과는 수집 기구가 다르다. 비정질 실리콘 태양전지의 단점은 광열화에 의하여 초기 효율에 비하여 안정화 효율이 낮아진다는 것이다. 통상적으로 20~30% 정도의 효율 감소를 보이며, 일정 시간이 지나면 포화되어 효율이 안정해지는 경향을 보인다. 따라서 발전형 창호에 적용할 경우, 광열화를 최소화하는 것도 매우 중요한 기술적 이슈 중의 하나가 될 것이다. 비록 효율은 낮지만, 실리콘 박막 태양전지는 여러 장점을 가지고 있다. 가장 대표적인 것이 광흡수층이 매우 얇기 때문에 결정질 실리콘에 비하여 재료의 소모가 적으며 반투명하게 제조할 수 있어서 투명 태양전지로 활용이 가능하다는 점이다.

실리콘 박막 태양전지의 스마트 윈도우 적용이 유리한 다른 이유로는, 기존 결정질 실리콘 태양전지가 외부 온도 증가에 따라 효율이 급격히 감소하는 데 비하여 비정질 실리콘 박막은 온도 증가에 따른 효율 감소가 훨씬 적어 창호 형태로 적용된 BIPV에서 온도에 대해서 안정적인 효율을 보여줄 수 있다는 점이다. 또한, 하루 중 태양광 고도의 변화나 흐린 날씨의 저조도 환경에서도 비교적 효율 저하가 없으며, 실내광의 경우에도 효율 저하가 적어서 발전이 가능하다는 장점이 있는 비정질 실리콘 박막 태양전지의 스마트 윈도우 적용 가능성을 높여준다.

나. 투명 태양전지로서의 활용

투명 태양전지는 향후 BIPV 시장에서 주목받는 태양광을 적용한 창호 개발에 있어서 가장 중요한 개발 목표이자 기술이며, 기본적으로 창호의 적용을 위해서는 높은 시인성이 요구된다. 기존의 투명 태양전지 제조 방식은 그림 2의 개구형과 완전투광형으로 구분된다. 초기의 비정질 실리콘 태양전지는 개구형으로 태양광 발전부와 투과부가 서로 분리되어 있으며, 상단 그림처럼 패턴 모양 형성으로 인한 시인성 저하의 단점이 존재한다. 개구형 투명 태양전지의 투과도와 효율은 서로 trade-off 관계로 상호 제약이 발생하며, 다양한 색상 구현에 있어서 한계가 있다.

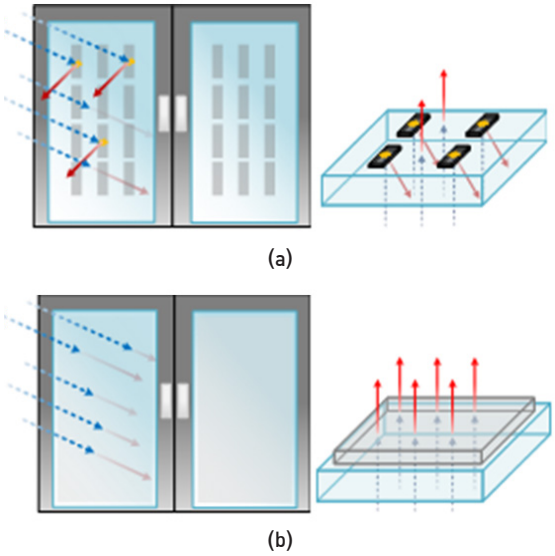


그림 2 (a) 태양광 발전부와 투과부가 분리된 개구형 (see-through) 방식 투명 태양전지와 (b) 완전투광형 투명 태양전지 구조

최근 이러한 개구형 투명 태양전지의 시인성을 개선하고자 시감이 우수한 완전투광형 투명 태양전지가 연구되고 있으며, 투과부에서 태양광 발전이 동시에 진행되며 시감이 우수한 장점과 다양한 색상 구현이 가능하여 디자인과 심미적 요소가 중요한 창호형 BIPV 적용이 유리하다. 이러한 완전투광형 태양전지는 태양전지 양단 모두에 투명전극 적용이 필요하기 때문에 저저항 고투과도의 투명전극이 요구된다.

투명 태양전지는 효율과 투과도를 동시 향상할 수 있는 기술이 매우 중요하며, 모듈 설계 시에도 레이저 스크라이빙 공정에서의 라인 간격이 투명

전극의 비저항과 밀접한 관련이 된다. 따라서 바람직하게는 투명전극의 면저항은 통상 10ohm/sq. 이하의 범위에서 가시광선 평균 투과도 85% 이상이 요구되며, 향후 대면적 완전투광형 투명 태양전지를 구현하기 위해서는 1ohm/sq. 이하의 면저항과 80% 이상의 투과도가 요구될 것으로 예상된다.

실리콘 박막 태양전지를 완전투광형으로 제조 시 효율과 투과도의 동시 향상 기술로 완충층(Buffer layer) 도입에 의한 투과도와 효율 향상 방안이 있으며, p-type 실리콘 층과 진성(Intrinsic) 실리콘 층 사이 혹은 진성 실리콘 층과 n-type 층 사이에 완충층을 형성한다[2]. 완충층은 광흡수층과 다른 에너지 밴드갭을 갖는 층으로 구성되어 있으며 광 간섭의 효과와 내부 전계의 형성을 고려한 최적의 설계를 통해 효율과 투과도의 향상을 얻을 수 있다. 완충층 삽입 시 완충층의 에너지 밴드갭과 더불어 두께와 배열하는 방식 조절에 의하여 내부 전계가 제어되어 전하 수집 특성이 향상되면 단락전류와 동시에 기전력의 변화도 발생하여 개방전압까지 동시에 향상시킬 수 있다.

다. BIPV 적용 양면발전과 저조도 발전

스마트 윈도우와 창호형 BIPV 적용을 위한 투명 태양전지의 경우, 불투명 태양전지와 달리 투명한 광흡수층을 투과한 일부 파장의 빛을 반사와 재흡수 과정을 이용하는 알비도(Albedo) 효과로 효율을 올리는 양면발전 방식의 적용도 가능하다. 그림 3과 같이 외부 태양광과 내부 실내광 모두에 의한 양면 발전 방식으로 효율 향상을 위해서 BIPV 창호 후면에서 입사되는 광 효율 극대화가 가능한 최적화 구조가 설계되어야 하고 투광형 태양전지의 경우 투과광의 포함에 의한 효과의 극대화가 가능하다.

결정질 실리콘을 BIPV 적용하는 경우 광량 감소



그림 3 외부 태양광과 내부 실내광에 의한 양면 발전과 저조도 발전의 예시

에 따른 급격한 효율 감소를 경험하게 되는데, 실리콘 박막 투명 태양전지의 경우 흐린 날씨나 어두워지는 환경인 저조도 효율 저하가 적기 때문에 실내광 환경에서도 에너지 밴드갭이 최적화되어 있는 경우, 결정질 실리콘 태양전지보다 높은 효율을 보이기도 한다. 이러한 이유로 on/off 방식 또는 변색소자를 투명태양전지를 독립전원으로 사용하여 모듈화하는 방식의 스마트 윈도우의 경우, 별도의 배터리 전원이 없거나 적은 용량으로도 오랜 시간 사용에 유리한 장점이 있다. 이러한 비정질 투명 태양전지 적용 BIPV 또는 스마트 윈도우와 연계한 센서, 사물인터넷(IoT) 및 스마트 기기의 보조 전력원으로도 이용을 기대해 볼 수 있다.

라. 디자인 요소: 다양한 색상 구현 기술

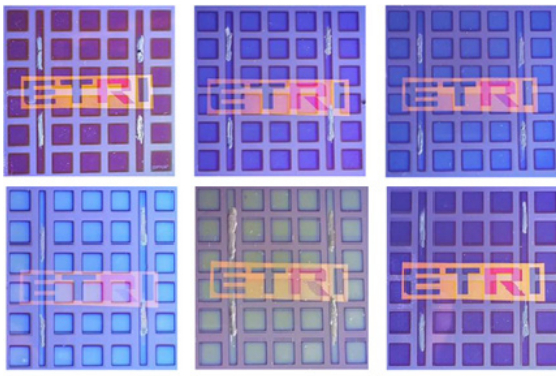
스마트 윈도우와 창호형 BIPV에 주로 활용되는 투명 태양전지는 다양한 색상 구현과 같은 미적인 요소가 필수 고려사항이다. 이러한 투명 태양전지를 적용한 스마트 윈도우 또는 창호형 BIPV의 색상은 주로 창호 외부에서 보이는 유리 전면부의 색

상 구현이 중요하며, 경우에 따라서는 유리 후면부의 색상도 함께 구현도 가능하다. 색상을 구현할 수 있는 방법의 대표적인 방법은 다음의 방식으로 분류할 수 있다.

첫 번째는 광흡수층의 소재, 두께와 배열을 바꾸는 방법이다. 통상적으로 실리콘 박막을 광흡수층으로 사용하는데, 게르마늄을 혼합하면 그 조성에 따라 에너지 밴드갭뿐만 아니라 굴절률에도 변화를 주어 색상에 변화를 주게 된다. 또한, 두께나 배열을 변화시키면 빛의 간섭에 영향을 주어 색상을 다양하게 조절할 수 있다. 그러나 색상의 변화가 크지 않으면서 태양전지의 특성에도 영향을 주어 선호되지 않는 방법이다.

두 번째는 굴절률이 다른 물질을 이용한 이종접합 방법이다. 굴절률이 다른 물질을 삽입하는 경우 굴절률과 두께 최적화에 따라서 다양한 색상 구현이 가능하다. 효율이나 투과도의 저하가 일어나지 않아야 하므로 소재의 선택과 적절한 제조 공정의 선택이 매우 중요하다.

세 번째는 투명전극의 두께나 배열을 바꾸어 색상을 구현하는 방법이며, 이종접합의 고려나 효율의 저하가 없이도 다양한 색상의 구현이 가능한 방식으로 다양한 색상을 구현하는 투명 태양전지에 유리한 방식이다. 그러나 투명전극 만의 두께 변화에 의한 색상 구현 방식 역시 투명전극의 면저항에 따라서 효율 저하를 가져올 수 있고, 투과도의 변화도 초래하므로 이를 위해서는 세밀한 튜닝이 요구된다.



출처 J. W. Lim et al., "Colored a-Si:H transparent solar cells employing ultrathin transparent multi-layered electrodes," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol 163, 2017, pp. 164-169.

그림 4 투명전극 광학두께 제어에 의하여 구현된 다양한 색상의 실리콘 박막 투명 태양전지

그림 4는 투명전극의 변화만으로도 다양한 색상을 구현할 수 있는 가능성을 보여준 실리콘 박막을 적용한 투명 태양전지로 색상을 다르게 구현하여도 효율의 편차도 크지 않은 장점이 있다. 따라서 이러한 다양한 색상의 구현 기술은 향후에 스마트 윈도우와 창호형 BIPV 적용에서 안정적인 효율에 기반한 발전 전력 이용과 함께 심미적인 요소의 창호 적용에 있어서 중요한 역할이 될 것으로 전망된다[4].

나아가 다양한 색상을 갖는 스마트 윈도우와 결합된 투명 태양전지 색상의 결정은 광흡수층을 투과한 빛과 반사된 빛의 조합으로 이루어질 수 있으며, 광흡수층, 투명전극 등 다양한 소재의 파장에 다른 굴절률의 값을 바탕으로 광학 시뮬레이션을 시행하여 최종적으로 예상되는 색을 정량적인 지표인 CIE 색좌표로 예상할 수 있다. 실제로 색상을 정의할 때 다소 주관적이 될 수 있으므로 색상 구현 시 이를 정량화하는 동시에 객관화가 요구되며, 시뮬레이션 예측으로 색상 디자인이 훨씬 쉽게 구현된다. 색상은 창호 외부인 전면뿐만 아니라 실내에서 보는 후면의 색상도 중요하며, 외부의 색상과 내부의 색상을 독립적으로 구현할 수 있는 기술 개발도 요구된다.

다양한 색상이 구현되었을 때 예측되는 또 다른 고려사항은 낮과 밤의 색상의 변화이다. 낮에도 태양광의 광량의 변화에 따라 다소 색상의 차이를 보일 수 있는데, 이는 투과광과 반사광의 조합으로

색이 구성되므로 광량의 변화는 색좌표의 변화를 일으킬 수 있다. 용도에 따라서는 하루 중의 색상의 변화가 적게 일어나는 쪽을 수요자가 요구한다면 이에 맞게 설계되어야 하며, 반면에 색상의 극적인 변화를 요구하는 곳에서는 이에 맞는 설계도 고려되어야 한다. 따라서 색상을 구현하는 기술도 구현 자체로 뿐만 아니라 스마트 윈도우 적용 또는 창호형 BIPV 적용에 있어서 기술 개발 단계에서도 고려되어야 한다.

3. 유기·하이브리드 소재 태양전지

스마트 윈도우의 기능 구현을 위한 대표적인 전기변색소자의 작동을 위한 전기를 공급하는 방법으로는 기존 전력선에 의한 유선 전기 공급, 리튬이차전지와 같은 배터리에 의한 공급, 태양전지에 의한 공급이 가능하다. 태양전지에 의한 공급으로 전기변색이 가능한 스마트 윈도우는 반투명 또는 투명 태양전지의 적용이 필요하다. 반투명이 가능한 태양전지로는 무기박막 기반 태양전지, 그리고 유기·하이브리드 소재 태양전지가 가능하며 태양광에 의한 전기변색을 광전기변색(PEC) 스마트 윈도우로 최근 에너지 절감과 심미적 기능으로 많은 관심을 받고 있다.

스마트 윈도우 적용 유기·하이브리드 소재 태양전지는 설치 환경과 건축 요구사항에 맞춘 가시광선 투과도의 조절(반투명/투명), 자유로운 색상 조절, 인쇄 공정과 같은 저가 대량생산에 유리한 공정 적용과 플렉서블 기판 및 소재의 구현이 요구되기도 한다. 또한 독립전원 방식의 무선 자가 발전에 의한 스마트 윈도우의 구현이 바람직하다. 유기·하이브리드 소재 태양전지로는 염료감응 태양전지(DSSC), 유기 태양전지(OPV), 페로브스카이트 태양전지(PSC) 등이 주요 후보로 연구되고 있

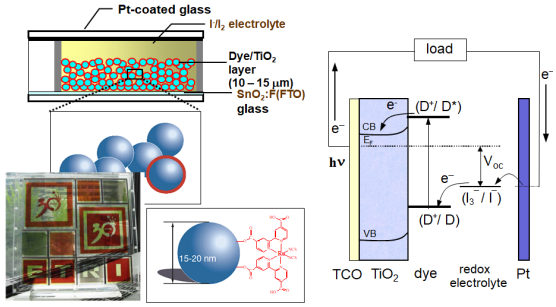


그림 5 염료감응 태양전지의 구조와 작동원리

으며 적용이 가능하다.

전기변색소자와 일체된 광전기변색 스마트 윈도우 태양전지는 나노입자 산화물 박막, 전해질 등 전기변색소자와 유사한 구조의 염료감응 태양전지를 에너지 생성원으로 이용하면서 전기변색이 가능한 폴리머 소재를 결합하여 연속으로 적층하고 대면적화에 유리한 방식의 스마트 윈도우가 제안되고 있으며, 산업화를 위한 시제품 개발이 진행되고 있다.

염료감응 태양전지는 그림 5와 같이 일반적인 반도체 접합 방식의 결정질 또는 박막 태양전지와 달리 화학방식의 광전기를 생성하는 방식으로 가시광선을 흡수한 염료(D)에서 생성된 전자–정공

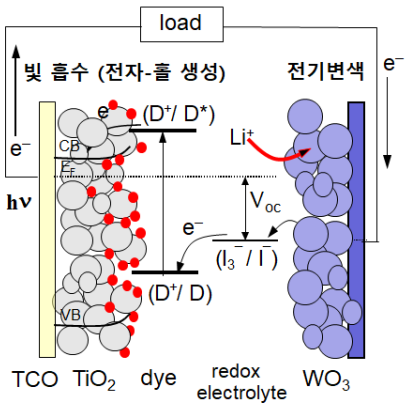


그림 6 염료감응 태양전지를 이용한 전기변색소자 일체형 소자(PECD)

을 전극으로 전달하여 전기를 생성하고, 산화–환원 전해질(I_3^-/I^-)의 산화–환원 반응에 의하여 염료가 상대전극으로부터 전자를 전달받아 전기를 생성하는 방식으로 태양전지의 작동이 완성된다.

염료감응 태양전지와 전기변색소자를 일체형으로 구성한 광전기변색소자(PECD)는 그림 6과 같은 구조가 가능함이 Nature에 소개되었으며, 루세륨계 염료가 흡착된 나노입자 티타늄 산화물 전극(빛 흡수 전자 생성), 나노입자 텅스텐 산화물 전극(전기변색), 그리고 두 전극 사이의 산화/환원 소재, Li 이온전해질을 포함하는 구조로 0.6~0.9V의 기전력으로 빛에 의하여 염료가 흡착된 TiO_2 전극에서 발생한 전자를 WO_3의 박막의 Li의 산화를 조절하여 전기변색소자를 구현함을 보고하였다[5].

유기 태양전지를 이용한 전기변색소자는 유기 태양전지를 전기변색소자의 상부와 하부에 각각 구성하여 유기 태양전지로부터 발생한 기전력으로 전기변색소자를 구동하였으며, 유기 태양전지–전기변색소자–유기 태양전지의 3층 구조로 일체화하는 방식도 보고되는 등 유기·하이브리드 소재는 다양한 구조 적용이 가능하다[6].

유기·하이브리드 소재 적용 태양전지 중에서 급격한 효율 향상으로 주목받고 있는 페로브스카이트 태양전지는 높은 광흡수 계수를 가지며 얇고 투명한 광전 소자를 가능하다. 페로브스카이트의 MoO_3 투명전극을 수직으로 공유하여 에너지 수집/저장의 원활한 통합, 색상 조절이 가능한 소자를 구현하였다[7]. 색상은 저장 에너지량과 에너지 소비량을 실시간으로 나타낼 뿐만 아니라 완전 충전 상태에서 장시간 광노출을 방지하여 광전도성을 향상시킬 수 있어서 페로브스카이트 태양전지를 적용한 스마트 윈도우 소자로 활용도 가능하다.

최근 한국에너지기술연구원에서 무전원 광감응 자동 색변환 유리 및 필름 기술을 보고하고 광흡수층을 이용한 광감응 방식으로 센서 역할을 하면서, 외부 전원 없이 변색 기능과 빛의 세기에 따른 투과도 조절 가능한 스마트 윈도우 기술을 발표하였다. 그림 7과 같이 광변색 금속산화물과 다양한 도핑을 통한 착색/탈색에 의한 변색 기능이 가능하면서 용액공정 이용 저생산단가 방식을 적용한 것으로 보고하였다[8].



출처 Reprint with Author's permission from https://energium.kier.re.kr/sub040103/articles/view/tableid/news/category/6/id/3797

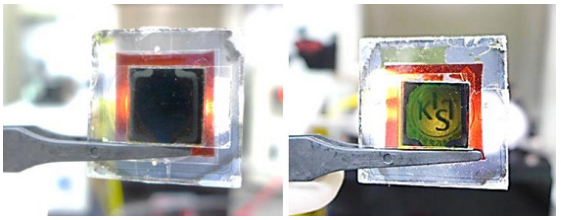
그림 7 무전원 광감응 자동 색변환 유리 기술

유기·하이브리드 소재 태양전지는 투과도 조절, 다양한 색상, 플렉서블, 인쇄공정으로 전기변색소자와 결합하여 스마트 윈도우에 매우 유망한 기술이다. 그러나 스마트 윈도우 창호로서 유기·하이브리드 소재 태양전지를 구성하는 유기 소재, 전해질 등의 장기 내구성 확보를 위한 이슈들이 있다. 다양한 디자인이 가능하며 심미적 기능이 우수한 유기·하이브리드 소재 태양전지를 적용한 스마트 윈도우 산업화는 소재의 내구성을 확보하기 위한 연구와 태양전지와 전기변색소자의 일체화 융합화 설계 기술의 발전에 따라 가능할 것으로 예측된다.

III. 스마트 윈도우 변색 기술

1. 스마트 윈도우 전기변색 기술

스마트 윈도우의 전기변색 기술은 인가된 전기를 통하여 유리 창호의 차단(on/off) 또는 명암을



출처 Reprint with Author's permission from https://www.kist.re.kr/kist_web/?sub_num=1467&state=view&ord=0&idx=621

그림 8 자외선 반응 가시광성 차폐 색변환 유리

조절하거나 색상과 투과도를 조절하는 방식의 결합으로 건물 디자인과 어울리는 다양한 색상의 적용과 함께 투명한 유리 창호로도 역할을 수행할 수 있는 기술로 국내외 여러 연구기관에서 연구 개발이 진행 중이다.

전기변색 방식의 스마트 윈도우는 전원 공급에 따라 전기화학반응 발생을 이용하여 색 또는 명암을 변하게 하는 방식으로 외부 광차단과 적외선 파장의 열 흡수를 통한 건물 에너지 절약에도 기여할 수 있다. 전기변색 방식으로 열변색(TC), 광변색(PC), 전기변색(EC) 방식과 태양광의 UV 등에 반응하는 소재를 활용한 광전기변색(PEC) 방식 등이 있으며, 별도 전원 공급을 하지 않는 방식도 개발이 진행 중이나 반응속도, 투과도, 색상 등 개선 연구가 진행 중이다. 국내에서는 그림 8과 같이 KIST와 영국 캠브리지대 공동연구로 자외선에 반응하여 가시광선 영역의 빛을 차폐할 수 있는 소재와 태양전지의 결합 방식을 발표하기도 하였다[9].

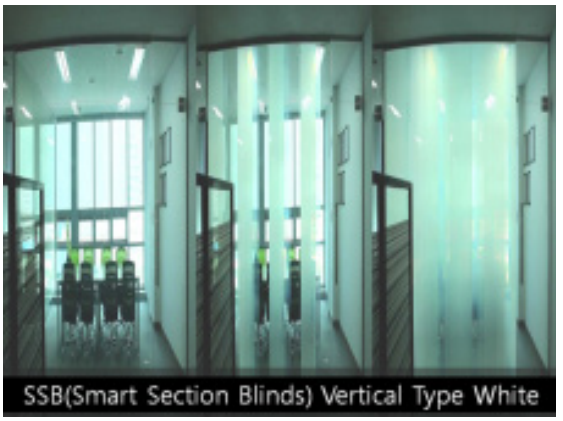


그림 9 WO_3와 NiO를 이용한 무기물계 전기변색소자의 개념도

전기변색 기술은 1969년 S. K. Deb이 전기변색 특성의 가능성을 발표한 이후, 1973년 네덜란드 필립스 연구소의 C. J. Schoot가 전기변색 메모리 디스플레이 구현한 연구 결과를 발표한 이후 전기변색 현상을 나타내는 소재 관련한 많은 연구가 진행되었으며, 현재까지 알려진 대표적인 무기물계 전기변색 물질로는 산화텅스텐, 산화니켈 및 프러시안 블루가 있다. 한편 보다 빠른 변색시간 및 다양한 색을 활용하기 위해서 유기물계의 전기변색 물질도 연구되었는데, 이중에는 비올로겐(Viologen)이 가장 널리 연구되고 있으며 전형적인 색상인 청색 이외 색 구현을 위해서 폴리아닐린(Polyaniline), 폴리에틸렌 다이옥신 사이오펜(PEDOT) 등의 소재가 지속적으로 연구되고 있다. 그림 9에 전형적인 전기변색소자의 개념도를 나타내었다.

2. 액정 및 분극입자 변색 기술

전기변색 기술과 유사한 변색기술로는 액정을



출처 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/69/Vitswell_vertical_SSB.png/800px-Vitswell_vertical_SSB.png CC BY-SA 3.0.

그림 10 PDLC의 동작원리

이용한 방법과 분극입자를 활용한 변색기술이 있다. 액정을 이용한 방법은 PDLC로 불리며, 이 기술은 고분자 매트릭스 내에 액정을 분산시킴으로써 전압 인가 시 액정의 정렬을 통해 투명한 상태를 얻을 수 있으며, 인가된 전압을 제거함으로써 불투명한 상태를 구현할 수 있다[10].

이러한 PDLC의 경우는 건축물의 실외의 변색기능을 추구하기보다는 실내에 적용함으로써 개인 프라이버시 및 보안성 향상을 위해 사용하는 경우가 많다. PDLC 기술을 액정을 이용하기 때문에 매우 짧은 시간 내에 변색이 가능하지만, 창호 자체의 색상 변화라기보다는 헤이즈를 이용하며 전원 인가 시에만 투명한 상태를 얻을 수 있어 일반적으로 소비전력이 높은 것으로 알려져 있으며, 그림 10에 PDLC의 동작원리를 나타내었다.

기타 유사기술로는 분산된 극성 입자를 이용하는 SPD 기술이 있다. SPD는 극성을 갖는 입자를 용액 내에 분산시킴으로써 변색을 유도하는 기술이다. 용액 내에 분산된 분극입자들은 인가된 전장에 의해서 수직 정렬함으로써 투과도가 바뀌는 방식이다. 분산되는 입자는 PDLC의 경우와 유사하게 전압을 인가할 경우 정렬하여 빛을 투과시키며, 전압을 제거 시 극성 입자의 무작위 분산에 의해 발색이 되는 원리로 동작한다. 따라서 인가 전압의 수준을 다양하게 바꿈으로써 발색도를 조절할 수 있는 장점이 있다. 그러나 PDLC의 경우와 동일하게 투명상태를 유지할 경우 지속적 전력의 소모가 일어나서 전력 측면에서는 다소 불리할 수 있으며, 그림 11에 SPD의 원리를 나타내었다.

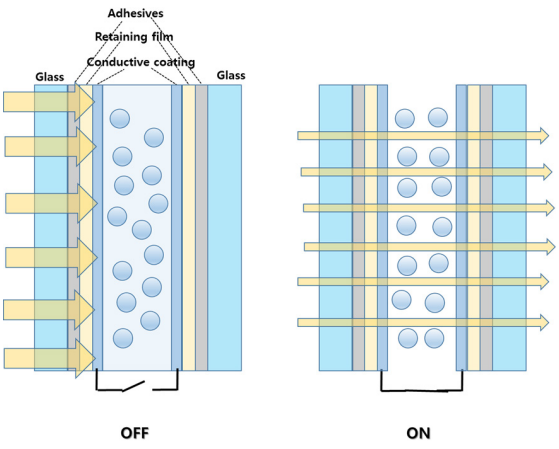


그림 11 SPD의 동작원리

Ⅳ. 스마트 윈도우 응용 및 전망

1. BIPV 적용 스마트 윈도우

태양광 발전 또는 태양전지는 신재생에너지의 대표적인 에너지 생성원으로 넓은 면적에 태양광 입사각을 고려하여 설치하는 태양광 발전 방식에서 점차 도심 건물 에너지 효율 향상과 도심 태양광 발전을 위한 건물일체형 태양광(BIPV)으로 발전되면서 빌딩 내부에서 사용하는 전력량을 분담하고자 하는 노력이 증가하고 있다. 특히 투명태양전지 기술 개발을 통하여 창호 자체에서 전기를 발전할 수 있는 장점이 있는 투명 창호 태양전지 기술은 고층 건물에 넓은 창호면적에 적용하는 경우, 상당량의 에너지 발전원의 역할을 할 수 있어서 주목받고 있다. 건물일체형 태양전지는 투명 창호 이외에 건축물 외장재로 적용이 점차 확대되고 있으며, 설치 공간 확보와 대형 건물 신재생 의무 설치, 발전차액 제도, 그린빌딩 인증제도 시행도 진행 중이다.

향후에는 일체형으로 배치되어 스마트 윈도우와 투명 태양전지가 함께 배열되는 형태로 개발이 진행될 수 있는데, 이 경우에는 높은 투과도의 투명 태양전지가 요구되면서도 충분한 구동 전력의 생산이 가능해야 한다. 하지만 우수한 시감과 효율적인 면적 배치 등을 고려할 때 이러한 방향의 연구

가 진행되어야 한다.

특히, 투명하거나 반투명한 BIPV가 적용된 스마트 윈도우는 앞서 기술된 무기 박막 투명 태양전지, 유기·하이브리드 소재 반투명/투명 태양전지 이외에도 가시광선을 적외선으로 방출시켜서 가장자리에 위치한 PV에 의하여 수집되는 집광 방식, 불투명한 결정질 실리콘 또는 CIGS 태양전지를 이용하여 매우 얇은 스트링 형태로 제조하는 방식 등도 기술 개발에 따라 적용이 확대되고 있다.

2. 자동차용 스마트 윈도우

자동차 산업에서도 건축 산업과 더불어 에너지 효율 향상과 편의성 증대를 위해서 태양전지와 스마트 윈도우 적용의 모색이 진행 중이다. 후방 룸미러에 적용된 전기변색 거울이 대표적인 스마트 유리 기술로 후방 차량에서 과도한 광량의 빛의 눈부심으로부터 불편함을 방지하기 위하여 적용된 전기변색 거울은 미국 GENTEX사에서 대부분을 생산 중이다. 자동차의 선루프 등 태양 직사광을 받기에 유리한 위치에 태양전지를 설치하여 자동차 정지 중에 필요한 내부 공기 순환 등의 공조에 이용함과 동시에 스마트 윈도우를 적용한 투과도 조절 기능의 개발도 진행 중이다.

현재 투명 태양전지를 자동차의 선루프에 적용되는 기술은 많이 개발되었으나, 아직은 투과도와 시인성이 낮은 것이 현실이다. 점차 완전투광형의 투명 태양전지로 기술 개발이 이루어지면 결정질 실리콘 태양전지에서 유기 태양전지, 페로브스카이트 태양전지 혹은 실리콘 박막 태양전지 등으로 개발 중심이 옮겨져야 하며, 이 경우 스마트 윈도우와의 결합된 소자 개발도 가능할 것으로 예상된다.

또한, 보다 높은 투과도를 요구하는 측면이나 후면 창의 경우에는 시인성이 뛰어난 투명 태양전지와 스마트 윈도우의 결합이 절실히 요구되며, 비교적 높지 않은 투과도를 요구하면서도 개인 보호나 태양광 차단을 위하여 태양전지 구동의 스마트 윈도우의 채택은 매우 중요하다. 향후 기술 개발이 더 진행된다면 70% 이상의 가시광선 투과도를 요구하는 자동차의 전면창에도 태양전지 구동형 스마트 윈도우 적용이 가능할 것으로 기대되고 있다.

V. 결론

친환경 건축 기술과 신재생 에너지 기술이 점차 정보통신(ICT) 기술과의 융합을 통하여 새로운 형태의 부가가치가 높은 기술로의 전환이 진행되고 있으며, 이러한 차원에서 스마트 윈도우 기술이 건축자재화가 진행되고 있는 BIPV 태양광 기술을 독립전원으로 이용하는 기술은 단순 조합 방식에서 벗어나서 시스템화로의 진행이 전망되고 있다. 이를 위해서 내구성에서 유리한 무기박막 투명 태양전지와 색상과 다양한 형태에 유리한 유기 또는 하이브리드 소재 방식의 반투명 태양전지를 전력 구동원으로 하여 전기변색으로 대표되지만, 다양한 소재와 액정 또는 분극성 입자의 제어를 통한 스마트 윈도우 기술 개발 연구가 다양하게 진행 중이다.

이러한 스마트 윈도우 기술은 주변 광량과 날씨에 반응하여 동작할 수 있는 기술로 에너지 절감과 건축물의 기능성 부여를 통한 스마트빌딩 기술의 한 부분으로 기존 전력 계통과 별도로 일체화된 전원 시스템을 포함하면서도 색상구현과 투과도의 확보를 통한 심미성을 향상시킨 시스템화의 연구가 점차 활발하게 진행될 것으로 전망된다.

용어해설

PECVD 플라즈마를 이용한 화학기상증착법으로 전구체와 반응가스의 화학반응을 통해 진공에서 증착이 이루어지며, 플라즈마를 인가하여 반응성을 높여 공정 온도를 낮추어 증착하는 방법

탠덤(Tandem) 구조 광흡수층의 대역이 서로 다른 2개의 층을 직렬로 배열하여 기전력과 효율을 높이고자 한 태양전지의 구조

알비도(Albedo) 효과 빛의 반사로 인하여 다시 재흡수되어 효율 향상에 기대하는 효과

약어 정리

BIPV	Building Integrated PhotoVoltaics
CdTe	Cadium Telluride
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
DSSC	Dye-Synthesized Solar Cells
EC	ElectroChromic
ICT	Information and Communications Technology
IoT	Internet of Things
LED	Light Emitting Diodes
Low-E	Low Emissivity
OPV	Organic PhotoVoltaics
PC	PhotoChromic
PDLC	Polymer Dispersed Liquid Crystal
PEC	PhotoElectroChromic
PECD	PhotoElectroChromic Device
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PSC	Perovskite Solar Cells
PV	Photovoltaics
SPD	Suspended Particle Device
TC	ThermoChromic

참고문헌

[1] 윤종호, "건물일체형 태양광 발전(BIPV) 기술 동향," J. KIEEME, Vol. 27, No. 1, 2014, pp. 1-7.

[2] J. W. Lim et al.,"Highly transparent amorphous silicon solar cells fabricated using thin absorber high-bandgap-energy n/i-interface layers," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 128, 2014, pp. 301-306.

[3] S. H. Lee et al., "CuO/a-Si:H heterojunction thin film solar cell with an n-type uc-Si:H depletion-assisting layer," Progress in Photovoltaics: Research and Application, vol. 23, 2015, pp. 1642-1648.

[4] J. W. Lim et al., "Colored a-Si:H transparent solar cells employing ultrathin transparent multi-layered electrodes," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol 163, 2017, pp. 164-169.

[5] C. Bechinger et al., "Photoelectrochromic windows and display," Nature 383, 1996, pp. 608-610.

[6] A. L. Dyer et al., "A vertically integrated solar-powered electrochromic window for energy efficient buildings," Advanced Materials, Vol. 26, Issue 28, 2014, pp. 4895-4900.

[7] F. Zhou et al., "Perovskite photovoltachromic supercapacitor with All-transparent electrodes," ACS Nano Vol. 10, No. 6, 2016, pp. 5900-5908.

[8] https://energium.kier.re.kr/sub040103/articles/view/tableid/news/category/6/id/3797

[9] http://kist.re.kr/kist_semicon/?sub_num=3829&ord=0&pageNo=5&state=view&idx=621

[10] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/69/Vitswell_vertical_SSB.png/800px-Vitswell_vertical_SSB.png