

결정질 실리콘 컬러 태양광 모듈 기술 동향



송형준
서울과학기술대학교
안전공학과

초 록

건물 일체형 태양광 발전시장의 증가에 따라 미적(Aesthetic) 요소가 결합된 태양광 모듈에 대한 수요가 증가하고 있다. 이런 시장의 요구에 따라 다양한 색상을 가지고 있는 컬러 태양광 모듈에 대한 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다. 여러 제안된 컬러 태양광 모듈 기술 중 결정질 실리콘(crystalline-silicon) 기반 태양광 모듈에 컬러 유리 혹은 컬러 층을 도입하는 기술은 기존 실리콘 모듈의 장점인 신뢰도와 가격 측면에서 다른 방식 대비 큰 장점이 있다. 결정질 실리콘 모듈에 컬러를 구현하기 위해서는 현재 크게 세 가지 방식이 제안되고 있다. 가장 먼저 제안된 방식은 태양전지 전면에 반사 방지막 형성 시 특정 파장만 반사할 수 있는 층이 도입된 컬러 태양전지(color photovoltaic cell)를 이용하여 색상을 구현하는 방식이다. 다른 한 방식은 일반 검정색 태양전지에 반사가 가능한 입자 혹은 박막층을 태양광 모듈 전면에 도입하는 반사형(Reflective) 컬러 태양광 모듈 기술이다. 마지막으로 특정 파장을 흡수하여 다른 파장으로 발광하는 염료 혹은 안료를 이용한 발광형(Luminescent)방식에 대한 연구도 진행 중이다. 본고에서는 각 방식의 동작 특성 및 기술 동향에 대해 논의하고자 한다.

서론

2019년 기준으로 전세계 태양전지 누적 설치량은 500GW를 능가하고 있으며, 향후 2023년까지 전체 누적설치량은 TW 이상으로 증가될 것으로 예상되고 있다.^[1,2] 또한 대면적 발전소에서부터 개인용 휴대 장비에 이르는 다양한 분야에 응용되고 있다. 이러한 시장 확대는 균등화 발전비용(levelized cost of electricity, LCOE) 절감에서 이루어졌으며, 현재 기후 조건이 좋은 지역에서는 다른 발전 방식 대비 훨씬 낮은 가격으로 전기 생산이 가능해졌다.^[2] 현재 대다수의 태양광 모듈을 이용한 발전은 주로 외곽에 대규모 단지 중심으로 이루어지고 있으나, 향후 건물일체형 태양광(Building integrated photovoltaic, BIPV) 및 도심에 설치된 태양광 모듈을 이용한 발전의 증가가 예상되고 있다. BIPV 기술은 에너지 생산과 소비가 결합되는 Prosumer 개념과, Smart-grid의 기초인 분산 발전의 개념을 가지고 있기 때문에 차세대 전력 생산 방식으로 주목 받고 있다. 또한 Zero energy 건물에서 에너지를 생산할 수 있는 기술로 각광을 받고 있다. 따라서 태양광 모듈을 건축물의 커튼월, 천장, 차양, 지붕, 창호 등 다양한 형태로 융합하고자 하는 시도들이 제안되고 실제 적용되고 있다. 제시된 장점들로 인해 일반 태양광모듈 대비 고비용에도 불구하고 유럽을 중심으로 이미 BIPV가 보편화가 되었으며, 국내에서도 시장이 급속히 성장하고 있는 상황이다. BIPV는 분산 발전이 가능하면서 건물 외장재로서의 가능성을 가지고 있기 때문에 향후 시장은 연간 41% 이상 꾸준히 성장할 것으로 예측되고 있다.^[3] 또한 향후 3-4년 이내에 그 시장 규모가 2억 달러(US \$) 이상으로 급증할 것으로 예상되며, 2021년경에는 그림 1과 같이 전체 신규 태양광 설치량 중 약 13% 정도가 BIPV 모듈일 것으로 예상된다.^[4,5,6]

유럽의 다양한 BIPV 관련 업체들을 중심으로 조사한 결과 BIPV 모듈의 직면한 과제 중 시장의 요구가 가장 높은 것은 그림 1에 나타난 것처럼 가격 하락(cost reduction)이다. 기존 태양광 모듈과 같이 규격화(Standardization)가 되어 있지 않고, 설치 장소에 따라 다른 디자인이 적용

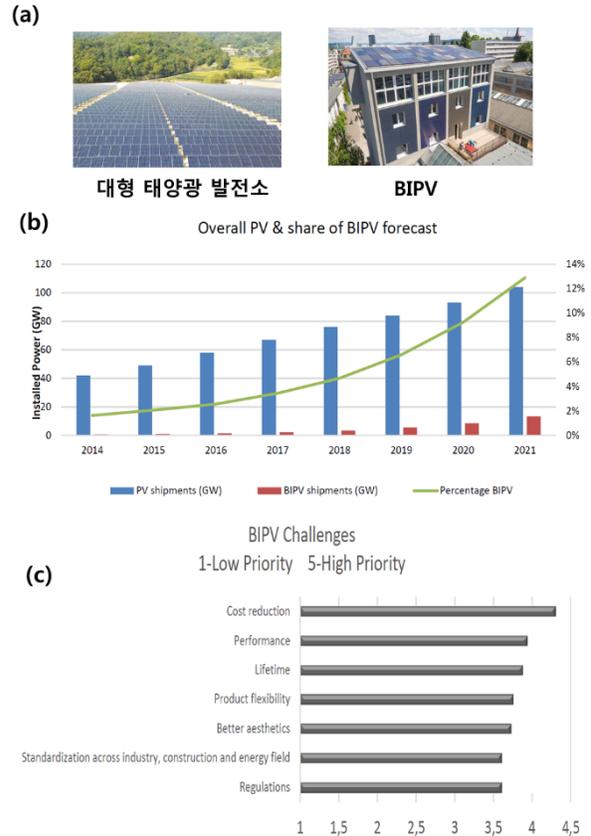


그림 1. (a) 대형 태양광 발전소와 BIPV 모듈 비교 (b) 2021년까지 태양광 모듈 설치 예상량. 2021년 전체 태양광 설치량 중 약 13%가 건물일체형 태양광 모듈로 예상됨.^[4] (c) BIPV 모듈에 대한 건축 및 설치 업체 요구 사항들.^[6] 5점에 가까울 수록 시장의 요구가 높음. 현재 컬러 및 모듈 미적 기능 향상(Better aesthetics)에 대한 시장 요구는 3.5 이상으로 높은 수준임

되어야 하는 발전방식으로 인해 설치 단가가 기존 태양광보다 상승되는 단점이 대두되고 있다. 이는 향후 표준화 및 시장 확대에 따른 모듈, 설치비용 감소로 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 다음으로 요구되는 BIPV 모듈의 특성은 장수명(Lifetime), 고효율(Performance)이다. 이 역시 태양광 모듈의 수명 개선 및 다양한 구조의 태양광 모듈 도입으로 인해 쉽게 해결될 것으로 예상되고 있다. 하지만 기존의 태양광 모듈에서 시장의 요구가 거의 없었던 미적 감각이 가미된 태양광 모듈(Better Aesthetic)에 대해서는 기존의 방식과 다른 새로운 접근이 필요하다. 태양광 모듈 혹은 전지는 입사광을 가능한 많이 흡수하여 전기

로 변환하는 효율을 높이기 위해 반사가 최소화 된 검은색 혹은 짙은 청색 계열로 구성되어 있다. 하지만 이러한 무채색의 태양광 모듈은 건축물에 결합될 경우 다른 건자재와 융합이 어려운 문제점이 대두되고 있다. 심미성에 높은 가치를 두는 건축시장에서는 검은색 위주의 단순한 색상을 가진 태양광 모듈의 설치증가에 한계가 있다. 이에 다양한 색상을 가지는 컬러 태양광 모듈에 대한 수요가 급증하고 있으며, 다양한 방법의 컬러 태양광 모듈들이 제안되고 있다. 에너지건축물의 심미성을 높이는 컬러모듈의 개발은 건축물을 이용하여 전기를 생산하는 것에 그치지 않고, 건축물의 가치를 상승시키는 효과가 있을 것으로 예상된다.

앞에 논의 된 것처럼 컬러 태양광 모듈 역시 건물에 적용되기 위해서는 아래 네 가지 조건이 만족되어야 한다.^[5,6,7] 가장 먼저 다양한 색상을 잘 나타낼 수 있어야 한다. 컬러 태양광 모듈이 여러 건축물에 융합되기 위해서 건축물의 외벽 색상과 유사한 색상 구현이 필요하다. 현재 건축물의 외벽은 개발된 페인트 색상들을 고려하면, 태양광이 가능한 많은 색상들을 구현하는 것이 매우 필요하다. 아직 몇 가지 정도의 색상을 구현하는 것이 필요하다는 수요가 제안되거나 조사된 적은 없지만, 다양한 색상을 구현할수록 다양한 건축물에 적용될 가능성이 높아진다. 두 번째로 고려할 사항은 컬러를 구현하면서도 높은 효율을 구현할 수 있어야 한다. 기존 검은색의 태양광 모듈에 건축물에 사용되는 일반 페인트로 색상을 칠 할 경우 가격적 측면에서 유리하고, 기존 건물과 동일한 색상으로 융합될 수 있다. 하지만 건축용 페인트의 경우 투과도가 매우 낮아, BIPV 모듈 효율이 매우 낮아 질 것이다. 이에 컬러 태양광 모듈을 구현함에 있어서 컬러 구현에 의한 효율 감소가 최소화 하는 방식의 접근이 필요하다. 또한 색상간의 효율차이를 줄이는 것 역시 안정적인 건물 일체형 태양광 모듈 구현에 필요하다.^[8,9] 세 번째로 요구되는 항목은 장수명이다. 컬러 태양광 모듈은 주로 건축물에 적용될 수 있기에 건축 자재로서 최소한의 수명을 보장해야 한다. 최소 20년 이상 장기간 동안 안정적으로 발전하는 것을 요

구 받고 있다.^[8] 마지막으로 위에 제시된 3 가지 특성을 원활하게 만족하면서도 컬러층 도입으로 인한 가격 상승이 적어야 한다. 다른 모든 성능이 뛰어나더라도 가격 경쟁력이 확보되지 않으면 시장 확대에 한계가 있다. 따라서 컬러층 도입으로 인해 가격 상승이 최소화 방식이 시장에서 선택될 것이다.

이러한 점들을 고려 할 때 현재 주된 연구 및 개발 방향은 결정질 실리콘 태양광 모듈을 이용하여 컬러 태양광 모듈을 구현하는 방법에 집중되고 있다. 결정질 실리콘 태양광 모듈의 경우 20년 이상 수명이 보장되면서도, 가격이 낮은 장점이 있다. 또한 모듈에 사용되는 부품 중 여러 층에 색을 낼 수 있는 재료들을 도입하여, 다양한 방식으로 컬러 구현이 가능할 것으로 예측된다. 용액 공정 기반 박막 태양전지의 경우 색상과 성능 측면에서 좋은 결과들을 많이 보여주고 있으나, 아직 장기 신뢰성 부족 및 비싼 가격으로 인해 건축 시장에서 수요가 많지 않다.^[10,11,12] 이에 본고에서는 현재까지 제안된 결정질 실리콘 기반 태양광 모듈을 이용하여 색상을 구현하는 기술에 대해 설명하고자 한다. 또한 각 방식의 동작 원리 및 현재까지의 기술 개발 동향에 대해 논의하고자 한다.

본 론

결정질 실리콘 태양전지를 이용하여 컬러 태양광 모듈을 제작하기 위해 제시된 기술은 그림 2와 같이 크게 세 가지로 구분된다. 먼저, 태양광 모듈을 구성하는 태양 전지의 색을 이용하여 발색하는 방법이다. 전지 내부에서 특정 파장을 반사시키거나, 입사광 중 일부만 투과시켜 컬러를 구현하는 방식이다. 두 번째로 제시된 방법은 반사가 가능한 층을 모듈 전면에 도입하여 외부에서 오는 빛을 반사하여 색상을 구현하는 방식이다. 마지막으로 Down convertor 와 같이 높은 에너지의 빛을 이용하여 낮은 에너지로 재 발광하는 발광층을 삽입하여 컬러를 구현하는 것도 가능하다.

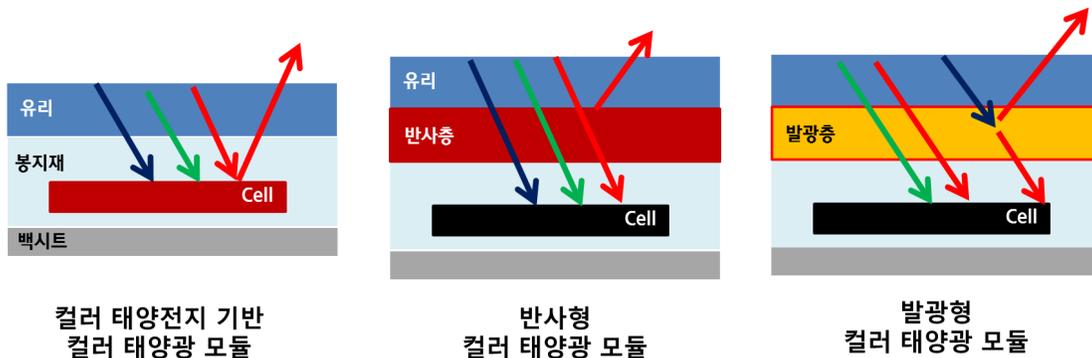


그림 2. 결정질 실리콘 모듈을 이용한 컬러 모듈 구현 방식 개념도

컬러 태양전지를 이용한 기반 컬러 모듈

컬러 태양전지를 이용한 컬러 모듈은 모듈에 가장 기본 단위가 되는 태양전지에 색상을 구현하는 방식이다. 결정질 실리콘 태양전지는 입사광의 반사를 최소화하기 위해 n-p 형으로 형성된 다이오드 위에 질화 규소(SiNx) 혹은 다른 금속 산화 및 질화물 층을 증착한다(그림 3(a)). 이때 반사 방지막 두께가 아주 얇은(수십 nm) 경우 전 파장에서 반사가 줄어들어 태양광에 입사되는 빛의 양을 극대화 할 수 있다. 얇은 두께로 반사방지막 층을 형성하면 태양전지의 효율은 상승하나, 검은색을 나타나게 되어 미적 요소가 감소하게 된다. 태양전지에서 발생하는 반사를 최소화하기 위해서는 반사방지막의 두께(d)와 굴절률(n)의 곱($d \times n$)이 반사(λ)대역의 1/4로 설계한다. 이때 전면에서 입사되는 빛의 반사에 의한 손실을 최소화 시킬 수 있다. 하지만 반사방지막의 두께를 수 백 nm

이상으로 늘리게 되면 그림 3(b)와 같이 특정 파장을 반사하여 색상을 구현하는 컬러 태양전지 구현이 가능하다. 두꺼운 단일 층의 반사방지막을 사용하거나, SiNx와 굴절률이 다른 층의 반사막을(예, MgF, SiOx, Al₂O₃ 등) 추가하면, 특정 파장만 반사하는 태양전지를 구현할 수 있다.^[13] 컬러 태양전지들을 기존 모듈 제작 방식으로 연결하면 그림 3(c)와 같은 컬러 태양광 모듈 구현이 가능하다. 현재까지 설치된 BIPV 용 컬러 태양광 모듈은 대부분 이 방식으로 기반으로 제작되었다.

기존 태양전지 공정에 반사막 두께만 조절하거나, 반사층만 추가하면 되기에 컬러 태양광 모듈 제작에 필요하여 늘어나는 공정의 수가 적다. 따라서 가격 측면에서 다른 방식들 대비 유리한 장점이 있다. 또한 다양한 컬러를 가지는 태양전지를 한 모듈에 연결하는 경우 모듈 내부에서도 다양한 색상들을 구현할 수 있는 장점이 있다. 하지만

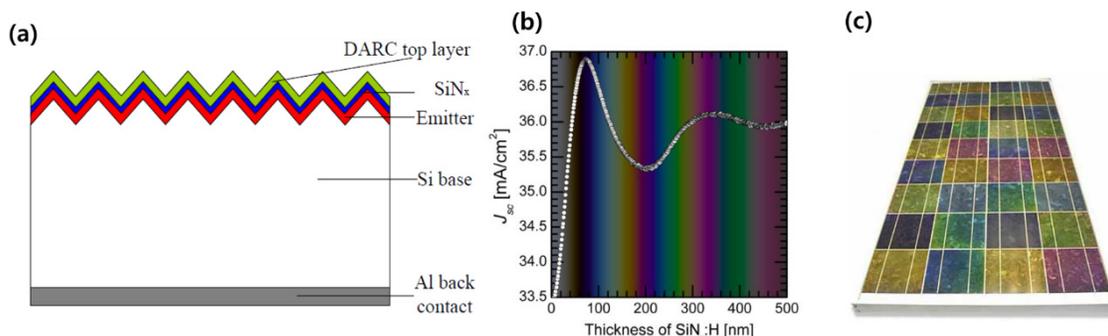


그림 3. (a) 결정질 실리콘 태양전지 반사방지막 구조, SiNx와 굴절률이 다른 박막으로 태양전지 표면을 형성할 경우 색상 구현이 가능하다. (b) 반사방지막 두께에 따른 태양전지의 색상 분석.^[13,14], (c) 컬러 태양전지를 이용한 모듈(Sinovoltaic 사)

컬러 모듈이 나타나는 색상이 각도에 따라 변화하는 단점이 있다. 앞에 언급된 바와 같이 반사막의 두께, 굴절률에 따라 반사되는 색상이 정해진다. 이 때 입사되는 빛의 각도(θ)가 변경되게 되면, 반사되는 빛의 파장이 $\cos\theta$ 만큼 변경된다. 따라서 관찰자 위치에 따른 컬러 태양광 모듈의 색상 차가 발생하게 된다. 심미성을 떨어트리는 또 하나의 원인은 컬러 태양전지가 있는 부분과, back sheet 가 노출되어 있는 하얀색 부분의 색상 차가 발생한다. 그림 3(c)에 나타난 것처럼 모듈 전체 영역 중 컬러 태양전지가 채워진 부분은 각자의 독특한 색상을 구현 할 수 있다. 하지만 전지와 전지 사이의 빈 면적은 하얀색 back sheet 가 그대로 노출되는 문제점은 극복되어야 한다. 한편 가격적인 측면에서도 컬러 태양전지 기반 방식은 매력적이지 못하다. 시장의 대다수가 검은색 결정질 태양전지 중심으로 구성되어 있기에, 컬러 태양전지는 소량 생산으로 기존 태양전지 대비 단가 상승이 불가피 하다. 또한 각 색상마다 다른 두께의 반사막을 가진 태양전지를 생산해야 하기에, 컬러 태양전지 수급 및 재고 관리에 어려움이 있어 단가 상승이 필연적이다. 이는 향후 시장 규모에 따라 변화 될 수 있으나, 현재로서는 시장 경쟁력 확보 차원에 어려움이 존재한다. 제시된 단점들의 극복이 컬러 태양전지를 이용한 모듈 시장 확대를 위해 필연적이다.

반사 유리를 이용한 컬러 태양광 모듈

컬러 태양전지를 기반 모듈에 단점을 극복하기 위해 시장에서 널리 사용되는 검은색 기반의 결정질 실리콘 태양전지를 그대로 이용하면서도 색상을 내는 방식에 대해 활발한 연구 및 제품 개발들이 진행되고 있다. 그림 4와 같이 반사 층이 들어가 있는 컬러 유리를 이용하여 컬러 모듈을 구현하는 방식은 큰 관심을 끌고 있으며, 시장에 다양한 색상의 제품들이 제시되고 있다. 이 기술은 컬러 태양전지에서 색상구현을 위해 필요했던 반사 층을 모듈 전면에 사용되는 유리로 옮긴 방식이다. 유리에 색상을 구현하기 위해서는 유리와 굴절률이 다른 층이 그림 4(b)처럼 삽입한다.^[15] 유리에 반사막을 구성하는 층의 굴절률 및 두께를 조절하면, 컬러 태양전지 방식과 동일하게 특정파장에서 빛을 반사하는 구조를 구현할 수 있다. 그리고 반사가 되지 않는 빛은 손실 없이 후면에 있는 태양전지 어레이로 전달된다. 입사광 중 반사되어 색상을 구현하는 만큼을 제외하고는 전기로 변환될 수 있어 효율측면에서 유리하다. 이때 반사 층은 장기간 고온과 자외선 조사에도 안정적인 층을 구현하기 위해 주로 화학기상방법(Chemical vapor deposition, CVD) 방법들을 사용하고 있다. 전면 유리에 반사막만 적용된 경우, 유리 후면에 있는 태양전지 어레이의 모양이 그대로 나타나게 되어 컬러 품질 저하가

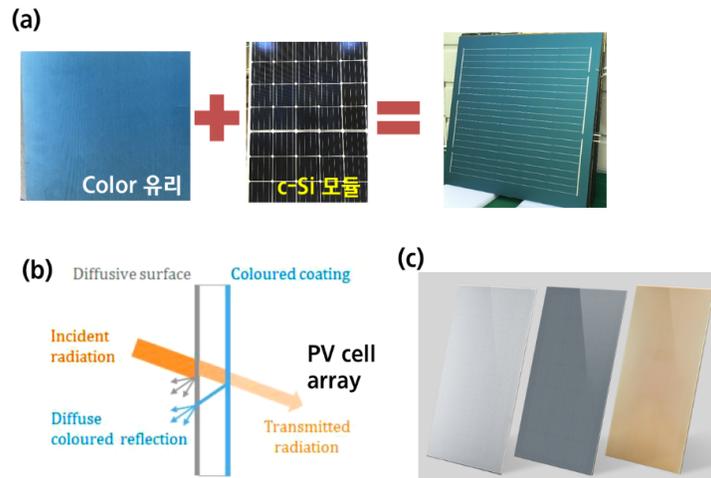


그림 4. (a) 반사막이 결합된 컬러 유리를 이용한 컬러 모듈 개념도 (b) 반사막과 산란층을 이용한 컬러 유리 동작 원리.^[15] (c) 반사층이 삽입된 컬러 유리를 이용한 Sunnovation 사의 모듈

발생한다. 이를 방지하기 위해 컬러 유리 제작 시 산란층의 추가가 필수적이다. 산란층은 후면에 있는 태양전지의 패턴을 가려주어 컬러 모듈의 심미성을 크게 개선할 수 있다. 또한 반사된 빛의 일부를 다시 태양광 모듈 내부로 집어넣어 모듈의 효율을 향상시킬 수도 있는 장점이 있다. 이로 인해 효율저하가 적으면서도, 심미성이 높고, 가격 경쟁력 확보가 가능한 컬러 태양광 모듈이 가능하다. 스위스의 Swissnso 사와 École polytechnique fédérale de Lausanne 에서는 이 방식을 이용하여 다양한 색상의 컬러 유리들을 제안하였다. 색상 별로 효율 감소 정도는 조금 다르게 나타나지만 대략 15~20% 내외의 효율 저하가 보고되었다.^[15] 현재는 반사형 컬러 유리를 이용하여 모듈 효율 저하를 줄이면서도 저 가격으로 제작하는 방식에 대해 여러 회사에서 도전하고 있다. Swissnso 사 이외에도 독일의 Sunnovation, 네덜란드의 Kameleon solar, 미국 Tesla 등 여러 회사에서 유사한 방식의 시제품들을 제안하고 있다. 국내 회사들도 컬러 유리 분야와 모듈 분야에서 해당 기술에 대한 활발한 연구 개발들이 진행되고 있는 상황이다.

그림 4(b)에서는 증착되어 있는 안료와 박막을 이용하여 컬러유리를 구현하는 방식에 대해 표시하였지만, 그림 5에 나타난 것과 같이 mica 와 같이 산화 타이타늄(TiO₂)

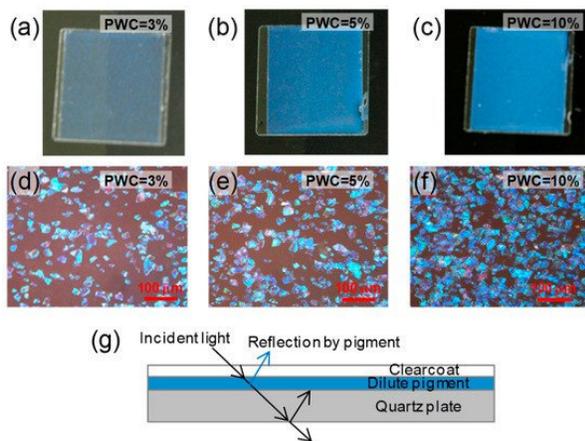


그림 5. (a,b,c) mica 안료 농도에 따른 컬러 유리 색상 분석 및 (d, e, f) 현미경 사진 이미지. (g) mica 안료 기반 컬러 유리도 기준 방식과 동일하게 반사막층이 유리 하부에 형성됨^[16]

core 와 유리(SiO₂) shell 로 구성되어 있는 반사 안료 (Pigment)를 적용한 모듈도 제안되고 있다.^[16] SiO₂ 로 쌓여있는 TiO₂ 층의 두께를 두껍게 하면 적색 계열의 색상이 반사되고, 얇게 제작하면 청색 계열 색상을 나타내는 안료를 구현할 수 있다. 이 방식은 진공 증착이 아닌 용액 공정 기반으로 모든 공정이 이루어지기에 단가 측면에서 유리하다. 또한 반사 안료 방식은 안료가 특정 방향으로 배열되지 않아서 컬러 모듈의 각도 의존성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 일본 Toyota 의 경우 차량용 컬러 태양광 모듈 개발을 위해 mica 안료를 이용한 컬러 유리 및 컬러 모듈 개발을 하고 있으며, 독일 sunnovation 을 비롯한 다수의 연구그룹에서 이 방식을 이용한 컬러 모듈에 대한 개발을 진행 중이다. 향후 반사가 가능한 염료를 이용한 컬러 태양광 모듈의 시장 확대에 기대를 하고 있다.

발광층을 이용한 컬러 태양광 모듈

컬러 유리를 구현하는 다양한 방식 중 다른 하나는 발광층을 도입하여 컬러를 구현하는 방식이다. 그림 6(a)에 나온 것처럼 유기물, core/shell 구조 나노 크리스탈은 높은 파장의 빛을 흡수하여 낮은 파장으로 빛으로 재발광 (Photoluminescence)할 수 있다. 이때 흡수할 수 있는 파장과 재발광하는 파장 사이(Stoke-shift) 차이가 크고, 재발광 효율이 높은 염료들을 이용하면, 광 이용효율 손실을 최소화 하면서 색상들을 구현할 수 있다. 입사되는 태양광의 청색 및 자외선 파장을 흡수하여 녹색 혹은 적색으로 발광할 수 있기에, 태양광을 이용하여 다양한 색상들을 만들 수 있다. 또한 발광 파장을 간단한 합성을 통해 변경하는 것이 쉬우며, 발광되는 파장의 반치폭을 줄이면 순도가 높은 컬러 태양광 모듈들을 구현할 수 있다. 색상 발광이 가능한 염료 층을 그림 6(b)와 같이 태양광 모듈의 전면 유리 혹은, 봉지재에 결합한 경우 다양한 색상을 구현하는 컬러 태양광 모듈의 구현이 가능하다. 반사 안료 기반 태양광 모듈과 유사하게, 용액 공정을 기반으로 태양광 모듈 구현이 가능하기에, 공정 단가 측면에서도 장점이 있다. 그리고 다양한 색상 구현에 매우 유리하며, 각도 의존성도

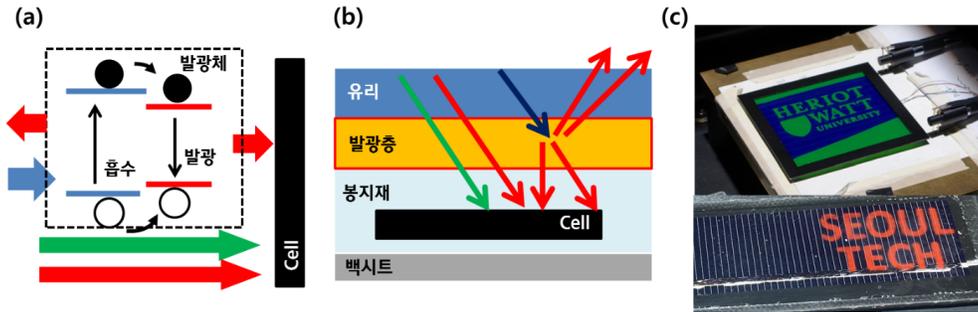


그림 6. 발광층을 이용한 컬러 태양광 모듈의 (a) 구동 원리 및 (b) 구조, 개념도, (c) 발광 층 patterning 을 통한 녹색 및 적색 Graphical 컬러 태양광 모듈^[17]

적은 장점이 있다. 또한 농도를 적절하게 조절하여 채도 조절도 가능하다. 그뿐만 아니라 용액 공정이 가능한 특성을 이용하여, 영국 Heriot watt 대학 그룹과 본 저자 연구 그룹에서는 그림 6(c)처럼 특정 영역에만 선택적 인쇄 (patterning)을 통해 가능성이 높은 Graphical 태양전지 구현하였다.^[17]

하지만 이 방식의 경우, 현재까지 사용 가능한 염료의 한계가 있다. 먼저 높은 에너지 빛을 흡수하여 낮은 에너지로 재발광하는 방식을 이용하기에 녹색 및 적색과 같이 에너지가 낮은 가시광선을 구현하기에는 유리하나, 입사되는 태양광 중 자외선 비율이 낮아 청색 컬러 모듈 및 컬러 유리 구현에는 매우 어렵다. 둘째로 대부분의 연구의 경우 유기 나 양자점 기반 염료를 사용하였는데, 이 염료들의 장기 신뢰성에 대한 보증이 아직 부족한 상황이다. 마지막으로 컬러 유리에 적당한 염료들의 가격이 매우 비싼 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 나노 금속 입자들의 Plasmonic 현상을 이용한 발광형 모듈도 제안되었다.^[18] 향후 안정성이 높은 염료들이 개발되고, 청색을 구현하는 방법이 제안된다면 발광 층이 삽입된 컬러 태양광 모듈도 시장에 진입할 수 있을 것으로 예상된다.

결론

컬러 태양광 모듈은 BIPV 시장 확대에 따라 수요가 급증하고 있다. 현재까지 제안된 여러 가지 기술 중 결정질

실리콘을 이용한 컬러 태양광 모듈의 경우 가격이 낮으면서도 안정적인 성능을 보여주어 시장에서 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 결정질 실리콘 태양전지를 이용하여 컬러 태양광 모듈은 구현하는 방식은 크게 3 가지로 구분할 수 있다. 먼저 각 태양전지의 반사방지막의 두께를 조절하여 색상을 구현하는 방식이다. 다음으로는 모듈 전면 유리 층에 얇은 박막들을 증착하여, 입사광의 일부를 반사하여 색상을 구현할 수 있다. 마지막으로 태양광을 흡수하고 재 발광할 수 있는 염료 혹은 안료들을 이용하여 다양한 색상을 구현하는 방식이 있다. 각각의 컬러 구현 기술은 장단점을 가지고 있기에, 향후 시장에서 필요한 저 가격, 고 신뢰성, 높은 심미성을 구현할 수 있는 기술이 컬러 태양광 모듈 기술을 선도할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(NRF-2019 R1F1A1057693)의 지원을 받아 작성 되었습니다.

참고문헌

- [1] International Energy Agency, Renewables 2018, 2018.
- [2] N. M. Haegel, R. Margolis, T. Buonassisi, D. Feldman, A. Froitzheim, R. Garabedian, M. Green, S. Glunz,



- H.-M. Henning, B. Holder, I. Kaizuka, B. Kroposki, K. Matsubara, S. Niki, K. Sakurai, R. A. Schindler, W. Tumas, E. R. Weber, G. Wilson, M. Woodhouse, S. Kurtz, Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges, *Science*, 356, 141 (2017)
- [3] 한국과학기술정보연구원, KISTI 마켓리포트 건물 일체형 태양전지시스템(2016)
- [4] N-Tech Research, BIPV Technologies and Markets: 2015–2022, (2015)
- [5] Grand view research, Building-integrated Photovoltaics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (C-Si, Thin Film), By Application (Roofs, Walls, Glass), By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2019 - 2025, (2019)
- [6] EU PV sites, BIPV market and stakeholders survey, (2017)
- [7] P. Heinstejn, C. Ballif, L.-E. Perret-Aebi, Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths, *Green*, 3, 125 (2013)
- [8] D. C. Jordan, T. J. Silverman, B. Sekulic, S. R. Kurtz, PV degradation curves: non-linearities and failure modes, *Progress in Photovoltaics*, 25, 583 (2017)
- [9] J. Palm, L. Tautenhahn, J. Weick, R. Kalio, J. Kullmann, A. Heiland, S. Grönstedt, N. Schmidt, P. Borowski, F. Karg, BIPV Modules: Critical Requirements and Customization in Manufacturing, 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), (2018).
- [10] W. Zhang, M. Anaya, G. Lozano, M. E. Calvo, M. B. Johnston, H. Miguez, H. J. Snaith, Highly Efficient Perovskite Solar Cells with Tunable Structural Color, *Nano Letters*, 15, 1698 (2015).
- [11] S. Lee, G. Y. Yoo, B. Kim, M. K. Kim, C. Kim, S. Y. Park, H. C. Yoon, W. Kim, B. K. Min, Y. R. Do, RGB-Colored $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ Thin-Film Solar Cells with Minimal Efficiency Loss Using Narrow-Bandwidth Stopband Nano-Multilayered Filters, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11, 9994, (2019)
- [12] S. G. Hashmi, A. Tiihonen, D. Martineau, M. Ozkan, P. Vivo, K. Kaunisto, V. Ulla, S. M. Zakeeruddin, M. Grätzel, Long term stability of air processed inkjet infiltrated carbon-based printed perovskite solar cells under intense ultra-violet light soaking, *Journal of Material Chemistry A*, 5, 4797 (2017).
- [13] M. Li, L. Zeng, Y. Chen, L. Zhuang, X. Wang, H. Shen, Realization of Colored Multicrystalline Silicon Solar Cells with $\text{SiO}_2/\text{SiNx:H}$ Double Layer Antireflection Coatings, *International Journal of Photoenergy*, 2013, 352473 (2013).
- [14] Y. Chen, Y. Yang, Z. Feng, P. P. Altermatt, H. Shen, Color modulation of c-Si solar cells without significant current-loss by means of a double-layer anti-reflective coating, 27th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, 2014 (2012).
- [15] N. Jolissaint, R. Hanbali, J.-C. Hadorn, A. Schler, Colored solar facades for buildings, *Energy procedia*, 122, 175 (2017).
- [16] T. Masuda, Y. Kudo, D. Banerjee, Visually Attractive and High-Power-Retention Solar Modules by Coloring with Automotive Paints, *Coatings*, 8, 282 (2018)
- [17] E. Klampafitis, D. Ross, G. Kocher-Oberlehner, B. S. Richards, Integration of Color and Graphical Design for Photovoltaic Modules Using Luminescent Materials, *IEEE Journal of Photovoltaics* 5, 1 (2015)
- [18] G. Peharz, K. Berger, B. Kubicek, M. Aichinger, M. Grobbauer, J. Grätzer, W. Nemitz, B. Großschädl, C. Auer, C. Prietl, W. Waldhauser, G. C. Eder, Application of plasmonic coloring for making building integrated PV modules comprising of green solar cells, *Renewable Energy*, 109, 542 (2017).