

# 건물집적형 태양전지(BIPV)의 발전형 창호를 위한 실리콘 박막 태양전지 연구

임정욱 책임연구원/교수 (한국전자통신연구원 IT신소재연구실/과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과)

## 1. 서론

현재 지구온난화가 급속도로 진행되고 있는 시점에서 2015년 파리협정에서 195개의 선진국과 개도국이 모여 온실가스 감축을 이행하기로 하였고, 우리나라의 경우 2030년까지 온실가스배출전망 (BAU; business as usual) 대비 37% 감축을 목표로 제시하였다. 따라서 이를 위해 총력적 기후변화 대응체제로 전환하기로 하고 그 로드맵을 수립하였는데, 특히 신재생 에너지의 큰 축을 차지하고 있는 태양광분야의 로드맵으로 도심형 태양광 발전이 선정되었다. 이 뿐 아니라 EU에서는 2019년까지 신축건물에 대하여 제로 에너지를 의무화하기로 하였고, 전 세계적으로도 도심에서 건물들의 에너지 자급 기술을 확보하기 위한 노력이 지속될 것으로 전망된다. 기존의 태양광 발전은 결정질 실리콘을 중심으로 대부분 양산되어 왔으며, 중국 기업들의 저가화로 국내 태양광 발전 사업이 많이 위축되어 온 것이 현실이다. 하지만, 향후 도심형 발전을 위한 건물집적형 태양전지 (BIPV; building integrated photovoltaic)의 비중이 확대될 것으로 예상되고 있으며 이를 위한 박막 기반의 태양전지 연구 개발도 활발하게 전개될 것으로 예상된다. 특히, 실리콘 박막의 경우 유연 (flexible) 태양전지 보다는 투명

(transparent) 태양전지로서의 활용이 더 과급 효과도 크고 경쟁력이 있다고 판단된다. 특히, 발전형 창호를 위해서는 양산을 위한 내구성과 신뢰성의 확보와 대면적에서의 확장이 중요한데 박막 실리콘 태양전지는 비록 효율이 높지는 않지만, 양산으로의 확장 측면에서 매우 유리하다고 보여진다. 따라서 본고에서는 BIPV의 발전형 창호를 위한 실리콘 박막 태양전지의 연구 동향과 전망을 살펴보도록 한다.

## 2. 실리콘 박막 태양전지의 특징

### 2.1 실리콘 박막 태양전지의 구조

실리콘 박막은 결정질 실리콘에 비하여 두께가 매우 얇고 통상적으로 진공증착법으로 성장된다. 결정성에 따라서 비정질 실리콘과 미세결정 실리콘으로 크게 분류가 가능하다. 박막의 두께는 통상 1 마이크로 미터 이하로 300 내지 500 나노 미터의 광흡수층을 성장시킨다. 상용화된 태양전지의 대부분은 결정질 실리콘이 차지하고 있는데, 단결정과 다결정 실리콘으로 분류할 수 있다. 이러한 결정질 실리콘은 두께가 수 백 마이크로 미터에 이르고, 변환 효율도 15 내지 20%에 육박한다. 하지만, 이에 비하여 박막 실리콘 기반의 태양전지는 변환 효율이 7 내

지 13%로 상대적으로 낮아 이것이 가장 큰 단점이다. 하지만, 매우 얇기 때문에 다양한 형상과 소재의 기판에 적용이 가능하며 구조가 매우 단순하다는 것과 독성이 없고 안정성이 높다는 장점이 있다. 따라서 향후 플렉서블 태양전지나 투명 태양전지와 같은 시장에서 그 장점이 빛을 발할 수 있다.

실리콘 박막 태양전지의 개발 초기에는 여타 태양전지와 마찬가지로 효율을 높이는 데 초점을 맞추고 연구가 진행되었다. 박막 실리콘 태양전지 중 비정질 실리콘은 에너지 밴드갭이 높고, 미세결정 실리콘은 에너지 밴드갭이 결정질 실리콘과 비슷하여 흡수 파장 대역의 차이를 보이므로 이들을 직렬로 배치한 탠덤 (tandem) 구조 내지는 트리플 (triple) 구조로 설계하여 기전력을 높이고 결과적으로 효율을 높이고자 하였다. 통상 초기 효율은 14 내지 16% 정도를 보이고 있으나 (안정화 효율은 최대 13%), 여전히 결정질 실리콘의 효율에 비해서는 미치지 못하고 있으며 특히 결정질 실리콘의 저가화로 인하여 가격의 장점도 수그러든 상태다. 따라서 실리콘 박막 태양전지는 효율이 아닌 독자적인 틈새 시장 개척이 요구되고 있으며 대표적인 것이 바로 BIPV 시장이다. 박막 실리콘 태양전지가 적용될 수 있는 BIPV는 크게 두 가지로 나누어지는데 유연 태양전지와 창호형 투명 태양전지이다. 유연 태양전지의 경우도 고효율의 이슈가 있기 때문에 CIGS라든가 페로브스카이트 태양전지가 그 후보로 떠오르고 있으며 오히려 염료감응형 태양전지와 유기 태양전지의 내구성과 안정성의 부족으로 인한 창호형 투명 태양전지가 더 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

그림 1은 투명 태양전지를 위한 실리콘 박막 태양전지의 구조를 보여 주고 있다. 결정질 실리콘과의 차이는 단순히 두께의 차이만 존재하는 것이 아닌데 우선 비정질 실리콘의 경우는 에너지 밴드갭이 1.7 내지 1.8 eV로 결정질의 1.1 eV보다 높아 물성에 차이를 보이며 결

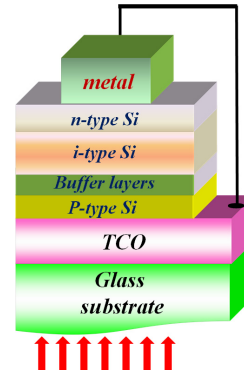


그림 1. 단일층을 갖는 비정질 실리콘 박막 태양전지의 단면 구조.

정질 실리콘은 생성된 전자들의 수집이 확산 (diffusion)으로 이루어지지만, 박막 실리콘의 경우에는 내부 전계에 의한 표동 (drift)으로 전하 수집이 이루어진다. 특히 비정질 실리콘의 상대적으로 큰 에너지 밴드갭은 전하 생성의 파장 대역이 좁아져 생성 전류가 결정질 실리콘에 비하여 매우 낮아져서 결과적으로 낮은 효율을 보여준다.

그림 1의 구조를 보면 유리 기판의 바로 위에 투명전극 (TCO; transparent conductive oxide)가 있고 이 위에 p-, i-, n- 층의 박막 실리콘이 광생성과 광수집을 담당한다. 앞서 설명한 대로 결정질 실리콘은 확산에 의한 전하 수집이 이루어져 p층과 n층으로만 구성되어 있지만, 박막 실리콘의 경우 확산거리가 짧아서 표동에 의한 수집이 이루어지고 광흡수는 주로 두꺼운 i층 (intrinsic layer)에서 이루어진다. 그리고 p층과 n층은 전계를 형성시키고 전하를 수집하는 역할을 한다. 또 효과적인 광수집과 투과도 향상을 위하여 p층과 i층 사이에 완충층 (buffer layer)을 넣기도 하며 때로는 i층과 n층 사이에 넣기도 한다 [1].

## 2.2 실리콘 박막 태양전지의 장단점

비록 효율은 낮지만, 실리콘 박막 태양전지

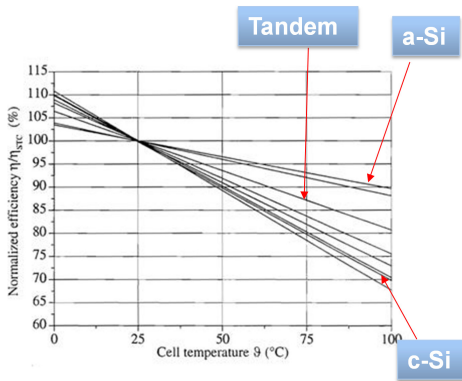


그림 2. 결정질 실리콘, tandem 박막 실리콘과 비교한 비정질 실리콘(a-Si)의 온도에 따른 효율의 변화 곡선 [3].

는 여러 가지 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 [1,2].

그림 2는 온도에 따른 효율 변화를 보여주는 곡선으로 일반적으로 결정질 실리콘의 경우, 외부 온도가 증가함에 따라 효율이 급격히 감소하는 단점이 있다. 따라서 온도가 높은 선벨트(sunbelt) 지역은 오히려 결정질 실리콘의 발전량이 감소하는 경향이 있다. 이에 비하여 그림 2에서처럼 비정질 실리콘(a-Si)은 온도 증가에 따른 효율 감소가 훨씬 적으며 일반적으로 결정성이 적을 때 이런 온도 변화는 적게 나타난다. 또 다른 비정질 실리콘의 장점은 흐린 날과 같이 태양광이 약하거나 실내광의 경우 도 효율 저하가 적어서 발전이 가능하다는 장점이 있다. 향후 발전형 창호에 적용될 경우에도 실내광 발전이 가능

하면, 효율의 상승을 기대해 볼 수 있다.

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.

### 3. 발전형 창호의 특징과 전망

#### 3.1 발전형 창호의 성능지수

통상의 태양전지의 경우, 그 성능을 좌우하는 것은 발전 효율이다. 발전효율은 태양전지의 주요 성능지수의 곱으로 결정되며, 성능지수들은 태양전지의 성능을 나타내는 중요한 지표가 된다. 그림 3은 통상적인 태양전지의 전압-전류 곡선으로 곡선의 전압과 전류축의 각각의 절편은 개방전압 ( $V_{OC}$ ) 및 단락전류 ( $I_{SC}$ )를 나타내어 태양전지의 기전력과 전하량을 결정한다. 또한, 곡선의 모양도 매우 중요한데 직사각형에 가까울수록 곡선인자 (FF; fill factor)가 100%에 가까게 된다.

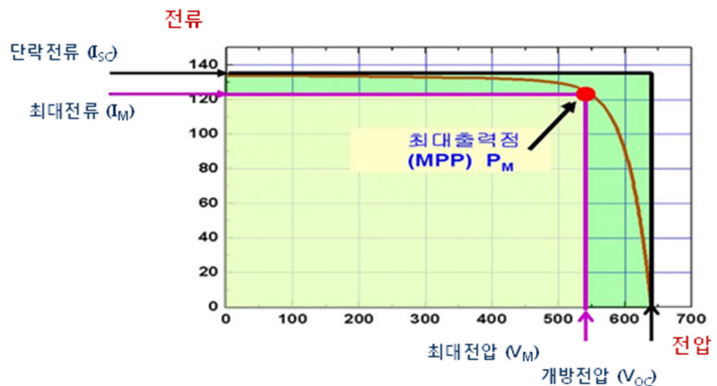


그림 3. 태양전지의 전압-전류 곡선과 주요 성능인자.

효율은 이러한 세 개의 인자의 곱으로 이루어지므로 이 3개의 값을 극대화 시키는 것이 통상의 태양전지에서 성능을 높이는 길이다.

하지만, 발전형 창호의 경우 효율과 더불어 중요한 것이 투과도이다. 따라서 투명 태양전지의 경우, 성능지수(FOM; figure of merit)를 투과도와 효

율을 모두 고려하는 것이 요구된다. 투명 태양전지의 성능지수는 여러 가지로 정의될 수 있지만, 가시광선에서의 평균 투과율을 %로 나타낸 것과 효율을 %로 나타낸 것의 곱으로 표현할 수 있다 [1]. 예를 들어 효율이 6%이고, 평균 투과도가 25% 라면, FOM은 150이 된다. 성능지수는 다른 방식으로 정의할 수도 있지만, 투과도와 효율이 고려되므로 통상의 태양전지 성능의 평가 방법과는 다르다는 것을 알 수 있다. 일반적인 투명 태양전지는 염료감응형과 유기 태양전지를 중심으로 개발되어 왔다. 특히, 염료감응형 태양전지(DSSC; dye sensitized solar cells)의 경우에는 7~11%대의 효율과 20~30%대의 투과도를 보이고, 저가 공정이 가능하다는 장점이 있어서 활발히 연구되었지만, 액체 전해질의 누수라든가 특성 저하 및 내구성에 문제가 있어서 양산 진입에는 어려움을 겪고 있다. 유기 태양전지의 경우도 내구성과 안정성 확보가 관건이며 특히, 염료감응형과 유기 태양전지는 대면적화 및 모듈화 되었을 때의 효율 저하가 커지는 것도 문제로 대두되고 있다.

### 3.2 발전형 창호 전망

현재 지구의 환경문제로 인한 지구 온난화

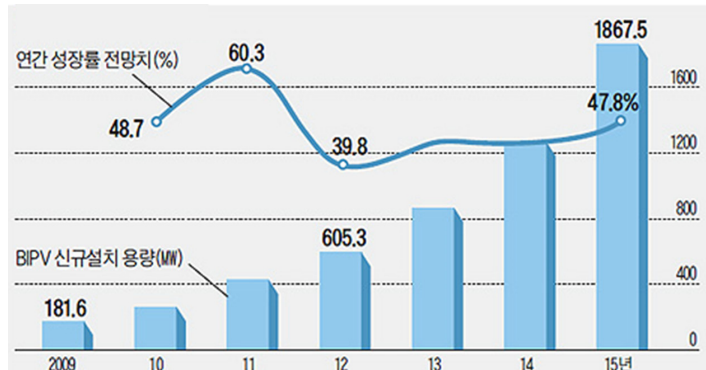


그림 4. BIPV 신규설치 용량 및 연간 성장률 (자료: 솔라 앤 에너지).

는 점점 그 문제의 심각성이 커지고 있으며, 국제 사회의 공조로 이를 늦추거나 막을 수 있는 해결책을 내놓는 것이 중요하다. 이를 위해 2015년 파리협정에서는 195개국 이 참가하여 금세기말까지 지구 평균 온도 상승 폭을 산업화 이전 대비 2도 이하로 낮추기로 결의하고 각국이 온실가스 감축량 목표를 상정하였다. 우리나라의 경우, 2030년까지 온실가스 배출 전망을 BAU (Business As Usual) 대비 37% 감축을 목표로 제시하였는데 대표적인 것이 바로 도심형 발전으로 에너지 자립이 가능한 제로에너지 빌딩을 2025년부터는 의무화하게 된다. 제로 에너지 빌딩을 위한 여러 기술 중에서 가장 대표적인 친환경 에너지 발전이 바로 BIPV이다. 최근에도 BIPV 시장은 그림 4에서처럼 급속한 성장을 보였고, 제로 에너지 빌딩이 의무화되면 보다 폭발적으로 그 수요가 증가할 것으로 예상된다. 현재 대부분의 BIPV시장은 지붕형이나 타일형에 국한되어 있고, 창호형의 경우 시범적으로만 채택되었고, 수명에 대한 보장이 없는 관계로 본격적인 양산이 아직은 이루어지지 않고 있다. 긍정적인 전망 중의 하나는 만일 발전형 창호가 BIPV 시장에 본격적으로 발을 들이는 경우 전체 BIPV 시장의 90% 이상을 점유할 것으로 예상하는 곳도 있다.

비근한 예로 에너지 절감을 위한 열선을 차단하는 로이유리의 경우도 유럽에서 건물의 경우 그 채택을 의무화하면서 시장이 폭발적인 증가를 보인 사례가 있기 때문에 발전형 창호의 경우도 비슷한 경향을 보일 것으로 예상된다. 다만, 현재는 발전형 창호의 내구성과 대면적 안정성을 위해서 가장 적합한 소재가 개발될 필요가 있으며, 그 대표적인 후보 중의 하나가 바로 비정질 실리콘 박막이다. 현재는 효율과 투과도의 성능과 내구성이 중요한 발전형 창호의 선결 조건이지만 시장이 성숙해지면 시감이나 색상 같은 조건들도 매우 중요한 개솔 개발 항목이 될 수 있다.

#### 4. 투명 박막 실리콘 태양전지 연구 동향과 전망

##### 4.1 투과도와 효율 동시 향상 기술

앞서 언급한 대로 발전형 창호의 성능지수에는 효율 뿐 아니라 투과도가 포함된다. 비정질 실리콘 태양전지로 투명 태양전지를 제조할 때 두 가지의 형태가 존재하는데 그림 5에 묘사되어 있다. 이전의 대부분의 비정질 실리콘 태양전지는 개구형으로서 그림에서와 같이 전기 발전이 이루어지는 광흡수층이 패턴 모양으로 형성되고, 나머지 부분은 투과되는 형태로 되어 있다. 따라서 전기 발전과 광투과의 부분이 서로 분리된 것이 특징이며, 효율과 투과도는 서로 trade off 관계를 갖게 된다.

개구형의 경우는 발전부의 면적에 비례하여 효율이 결정되고 발전부가 없는 투과부의 면적에 비례하여 투과도가 결정되므로 효율과 투과도가 서로 맞물려 있으며 동시에 효율과 투과도를 향상시키는 것이 어렵다. 또한, 불투명한 패턴들이 존재하여 시감이 떨어지며 다양한 색상을 구현하는 것도 어렵다. 최근에는 이러한 문제들을 개선하고자 시감이 우수한

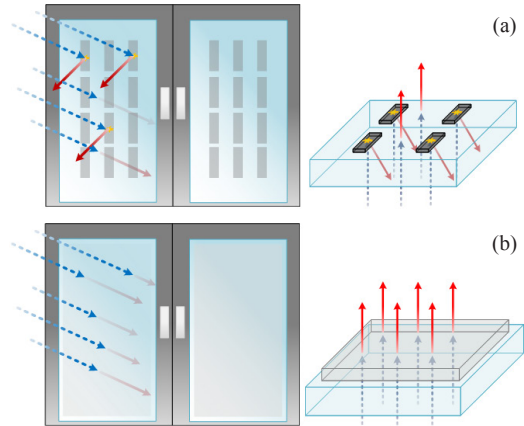


그림 5. 두 가지 형태의 비정질 실리콘 기반의 투명 태양전지로 (a) 개구형, (b) 완전투광형 태양전지 [4].

완전투광형 태양전지가 연구되고 있다. 그림 5의 (b)에서와 같이 완전투광형은 전기 발전부와 투과부가 일치하여 시감이 우수한 장점이 있으며 다양한 색상의 구현이 가능하다. 또한, 효율과 투과도를 동시에 향상시킬 수 있는 기술 구현도 가능하다.

향후 대면적의 발전 창호를 제작하고자 할 때는 시감의 확보를 위하여 금속 그리드를 없애거나 그 간격을 넓게 하는 것이 필요한데 이를 위해서는 투명전극의 우수한 특성 확보가 필수불가결하다. 투명전극의 면저항은 통상 10 ohm/sq. 이하와 가시광선 평균 투과도 85% 이상이 요구되는데 향후 대면적에 완전투광형 태양전지를 구현하기 위해서는 1 ohm/sq. 이하의 면저항과 80% 이상의 투과도가 요구될 것이다.

비정질 실리콘 태양전지를 완전투광형으로 제조할 때, 효율과 투과도를 동시에 향상시키는 기술이 필요한데 가장 대표적인 방법이 완충층을 도입하는 것이다. 완충층을 도입하면 투과도와 효율을 모두 향상시킬 수 있으며 p층과 i층 사이 혹은 i층과 n층 사이에 위치시킨다 [1,5]. 완충층은 광흡수층과 다른 에너지 밴

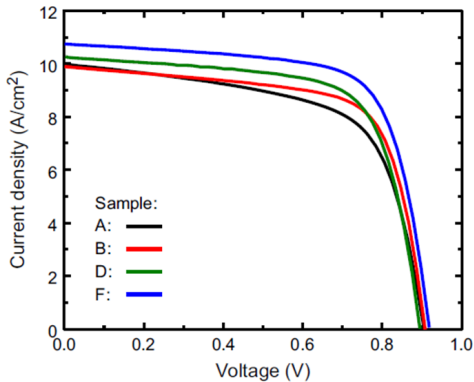


그림 6. 박막 실리콘 투명 태양전지에서 n/i 완충층의 배열을 변화시킴으로써 전류-전압 곡선에 다양한 변화를 주었고, 광흡수층 조건은 동일함 [1].

드갭을 갖는 층으로 구성되어 있으며 광 간섭의 효과와 내부 전계의 형성으로 인하여 최적의 설계를 통해 효율과 투과도의 향상이 극적으로 이루어 질 수 있다.

완충층을 삽입할 때, 완충층의 에너지 밴드갭 뿐 아니라 두께와 배열도 매우 중요한데, 다양한 배열 변화를 통해 내부 전계를 제어하면 전하 수집 능력을 높여서 단락전류를 높일 뿐 아니라 동시에 기전력에도 변화를 주어 개방전압도 동시에 높일 수 있다.

그림 6은 일례로 n/i의 완충층의 배열을 변화시킨 다양한 조건으로 (A, B, D, F) 동일한 광흡수층에 적용하여 셀을 만들어 광조사 상태의 전류-전압 곡선을 얻은 것인데, F의 조건에서는 단락전류와 개방전압 모두 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 투과도도 매우 우수한 결과를 보여 향후 완전투광형 투명 태양전지의 경우 성능지수가 급격하게 증가될 수 있는 기술로 사용할 수 있다. F의 경우는 결과적으로 0.25 cm<sup>2</sup>의 셀에서 효율 6.9%와 가시광선 투과도 23.6%를 보여 성능지수 163의 우수한 값을 보였다.

#### 4.2 재흡수와 양면발전을 통한 효율 향상 기술

투명 태양전지의 경우, 일반적인 불투명 태

양전지와 비교하여 일부의 빛이 투과하기 때문에 이를 다시 재활용할 수 있고 그 경우 보다 높은 효율을 기대할 수 있다. 기존의 염료 감응형 태양전지의 경우, 후면에 금속 grid가 존재하여 후면에서 빛을 비추거나 투과된 빛을 반사시켜 재활용하는 경우 그 효율이 떨어졌다. 따라서 투과된 빛을 다시 반사시켜 재활용하는 경우에 후면에 금속 grid 면적을 최소화시키거나 아예 적용시키지 않는 것이 좋다. 일반적으로 모듈을 제작할 때 후면에 금속 패턴이 들어가는데 투명전극의 면저항이 낮은 경우, 이러한 불투명한 금속의 면적을 최소화시킬 수 있으므로 투명전극의 전도도를 높이면서도 높은 투과도를 확보하는 기술이 매우 중요하다.

효율을 향상시킬 수 있는 첫 번째 방법은 투과된 빛을 반사시켜 재흡수하여 효율을 올리는 방법이다.

그림 7(a)는 비정질 실리콘 박막 태양전지를 이용하여 투명 태양전지를 제조하고 후면에 거울을 두어 반사시켰을 때, 투과된 빛이 반사되어 후면으로 재흡수되는 구조를 보여 주고 있다. 통상 투과도는 20~30% 정도인데 주로 장파장의 빛이 투과되어 나가고 거울을 통해 반사된 빛은 다시 후면 투명전극 (back TCO) 을 투과하여 광흡수층에 재흡수된다. 이 경우, 비정질 실리콘 박막에서의 완충층의 조건에 따라 향상되는 효율의 값에 차이를 보이는데 이는 광흡수층과 다른 band gap을 갖는 완충층들의 배열과 두께에 따라 광 간섭이 달라지기 때문이다. 그림 7(b)는 완충층이 최적화된 경우의 전압-전류 곡선을 거울을 놓기 전과 후를 비교하여 보여 준 것이다. 거울을 사용하는 경우, 재흡수로 인하여 단락전류 (Jsc) 의 값이 20% 정도 향상됨을 알 수 있고, 효율도 20% 정도 향상된다 [6].

또 다른 방법은 양면발전 (bifacial generation)으로 창호 외부의 태양광이 전면에서 입사하는 것과 실내광이 후면에서 동시에 입사

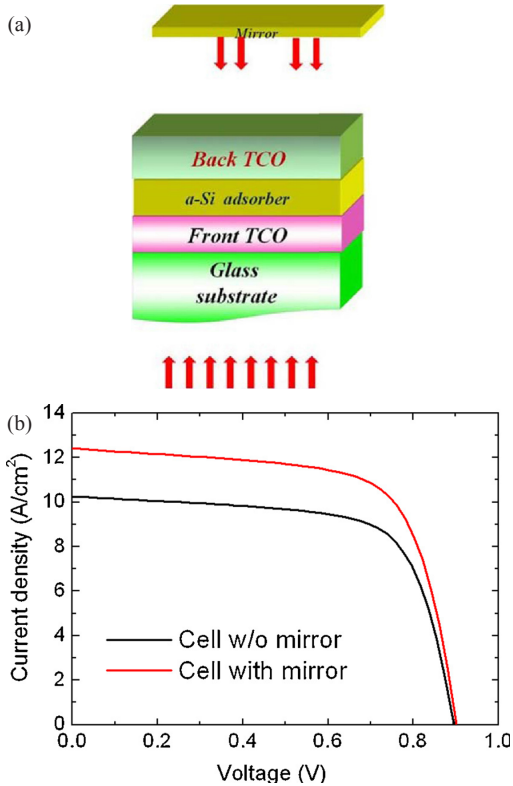


그림 7. (a) 거울 반사를 이용하여 재흡수를 하는 실리콘 박막 투명 태양전지의 구조 및 (b) 거울 반사를 이용하여 재흡수한 경우와 거울을 쓰지 않는 경우의 전압-전류 곡선 [6].

하여 양면으로 전기 발전이 이루어지는 경우이다. 비정질 실리콘 태양전지의 경우에는 결정질 실리콘과는 달리 광량이 적은 실내광에도 발전이 가능하기 때문에 실내광에 의한 발전에 의하여 효율 향상을 기대할 수 있다. 물론, 실내광의 광량에 따라서 발전량은 달라지게 된다. 실제로 창호에 투명 태양전지가 적용된다면 낮의 경우에는 그림 8과 같이 외부 태양광과 내부 실내광에 의하여 동시에 전기 발전이 가능하므로 양면발전에 의하여 효율이 단면발전에 비하여 향상될 수 있다. 이 경우에도 후면의 완충층이나 투명전극에 의하여 효율 향상의 정도가 달라질 수 있는데, 이것도

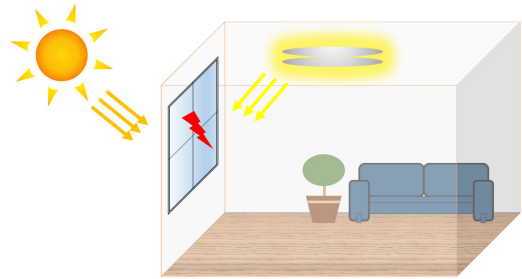


그림 8. 외부의 태양광과 내부의 실내광에 의한 양면 발전을 보여주는 개념도.

광학 설계를 통해 빛의 간섭을 고려한 최적화 과정이 요구된다.

대부분의 효율 향상은 전류밀도의 향상에 기인하여 나타나며, 태양광이 없는 밤에도 전기 발전이 가능하다는 장점이 있다.

### 4.3 다양한 색상 구현 기술

투명 태양전지의 활용은 주로 발전형 창호에 있으므로 미적인 요소를 고려하지 않을 수 없다. 미적인 요소 중 가장 대표적인 것이 다양한 색상의 구현 기술이다. 색상은 주로 창호 외부에서 보이는 전면부의 색상을 구현하는 것이 중요한데 경우에 따라서는 후면부의 색상도 함께 구현할 수도 있다. 색상을 구현할 수 있는 방법은 여러 가지가 있는데 대표적으로 3가지 정도로 분류할 수 있다. 첫 번째는 광흡수층의 두께, 소재 혹은 배열을 바꾸는 방법이다. 통상적으로 실리콘 박막을 광흡수층으로 사용하는데 여기에 게르마늄을 혼합하면 그 구성에 따라서 에너지 밴드갭 뿐 아니라 굴절률에도 변화를 주어 색상에 변화를 주게 된다. 또한, 두께를 바꾸거나 배열을 변화시키면 빛의 간섭에 영향을 주어 색상에 변화를 가져 올 수 있다. 하지만, 색상의 변화가 크지 않으면서 태양전지의 특성 또한 변화를 주게 되어 색상만을 위해서는 선호되는 방법은 아니다.

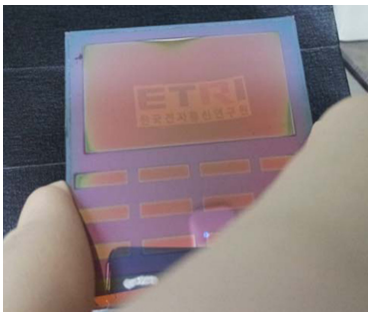


그림 9. 실리콘 박막 태양전지에 산화구리 박막을 삽입하여 배열에 따라 다른 색을 구현하는 모습 [7].



그림 10. 실리콘 박막 태양전지에 투명전극의 조건을 바꾸어 구현된 다양한 색상의 투명 태양전지 모습 [4].

두 번째는 이중접합을 이용하는 방법이다. 굴절률이 다른 물질을 삽입하여 색상에 변화를 주는 방법으로 굴절률과 두께에 따라서 다양한 색상 구현이 가능하다. 하지만, 이 방법을 사용하는 경우 효율이나 투과도의 저하가 일어나지 않아야 하므로 소재의 선택과 제조가 매우 중요하다. 그림 9는 실리콘 박막 투명 태양전지에 산화구리를 적용하여 다양한 색상을 구현한 모습인데 두께와 소재가 동일함에도 불구하고 배열만 변화시키더라도 다른 색을 구현하는 모습을 볼 수 있고, 결과적으로는 효율이 비슷한 값이 얻어졌다 [7].

세 번째 방법은 투명전극의 두께나 배열을 바꾸어 색상을 구현하는 방법인데, 이 방법이 가장 선호되는 이유는 이중접합을 고려하지 않아도 되고, 효율의 큰 변화 없이도 다양한 색상의 구현이 가능하기 때문이다. 하지만, 투명전극만의 두께 변화는 역시 면저항에 따라서 효율 저하를 가져올 수 있고, 투과도의 변화도 초래

하므로 이를 위해서는 세밀한 튜닝이 요구된다. 그림 10은 투명전극의 변화만으로도 다양한 색상을 구현할 수 있는 가능성을 보여준 투명 태양전지로 효율의 편차도 크지 않은 장점이 있다. 따라서 이러한 다양한 색상의 구현 기술은 향후에 발전형 창호가 개발되었을 때 매우 중요한 부분을 차지할 것으로 기대된다.

투명 태양전지에서의 색상의 결정은 광흡수층을 투과한 빛과 반사된 빛의 합성으로 이루어지는데 이를 위해서는 광흡수층, 투명전극 등 다양한 소재의 파장에 다른 굴절률의 값이 확보되어야 하며 이들 자료를 바탕으로 광학 시뮬레이션을 시행했을 때 최종적으로 예상되는 색을 정량적인 지표인 CIE 색좌표로 예상할 수 있다. 실제로 색상을 정의할 때 다소 주관적이 될 수 있으므로 향후 색상 구현이 되었을 때 이를 정량화하는 동시에 객관화하는 것이 요구되며 시뮬레이션을 통해 예측하게 되면 색상



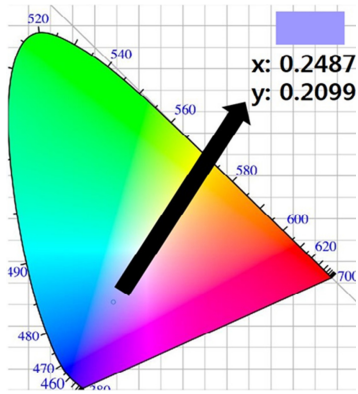


그림 11. CIE 색좌표 상에서 투명 태양전지의 광 간섭을 시뮬레이션하여 색좌표를 예측하는 모식도 [4].

디자인이 훨씬 쉽게 구현된다. 그림 11은 투명 전극의 조건을 변화시켰을 때 투명 태양전지에서 예측되는 색상을 CIE 색좌표 상에 표현한 것이다. 그림에서 나타난 좌표는 자주색을 나타내고 있다. 투명전극의 조건을 바꾸었을 때는 다른 색상이 예측되며 실제로 구현된 색상은 이와 거의 일치한 결과를 보였다 [4]. 또한, 색상은 창호 외부인 전면 뿐 아니라 실내에서 보는 후면의 색상의 구현도 중요하다. 이 경우 외부의 색상과 내부의 색상을 독립적으로 구현할 수 있는 기술 개발도 요구되고 있다.

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 설계가 또한 갖추어져야 한다. 따라서 색상을 구현하는 기술도 구현 자체로 뿐 아니라 세부 기술에서는 고

려할 사항이 많음을 알 수 있고 이에 대한 기술 개발도 현 시점에서는 고려되어야 한다.

#### 4.4 향후 기술 전망

비정질 실리콘 태양전지의 경우, 높은 안정성과 내구성을 갖기 때문에 대면적의 발전형 창호로 상용화 될 큰 잠재력을 지니고 있다. 하지만, 역시 가장 큰 약점은 낮은 효율이다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 앞에서 제시되었던 양면발전을 통한 효율 향상을 기대할 수 있고, 투과도가 다소 낮아지더라도 tandem 구조를 통해 효율을 향상시켜 10~12% 정도의 효율을 기대할 수 있다. 향후 기술 발전은 이렇게 고효율화 하는 것이 가장 큰 숙제가 될 것이다. 또한, 광열화의 문제가 있는데 기존의 비정질 실리콘에 비하여 두께가 낮아 광열화가 훨씬 적을 것으로 예상된다. 또한, 발전형 창호로 개발될 경우 여러 가지 기능을 갖추는 태양전지의 구현이 전망되는데 앞서 제시된 다양한 색상의 구현과 다양한 디자인을 갖는 구성은 우선적으로 개발될 것이고, 창호의 단열 기능을 통해 에너지를 절감하는 기술 또한 병행될 것으로 예상된다. 현재 기후 협약에 따라서 에너지를 생산하고 절감하는 건물의 기능이 중요시되고 향후에는 의무화되는데 이 경우 필수불가결한 기술이 바로 다기능 발전형 창호이다. 이제 발전형 창호의 비중은 폭발적으로 증가할 것으로 예상하는 것에는 그 누구도 의심의 여지가 없다. 내구성을 갖추고 무독성의 소재인 실리콘 박막이 본격적으로 개발될 경우 그 파급 효과가 클 것으로 예상된다.

### 5. 맺음말

지금까지 실리콘 박막 기반의 투명 태양전지의 기술 현황과 전망을 살펴 보았다. 우리

나라와 같이 국토 면적이 좁은 곳에서는 일반 토지에 태양전지 패널을 설치하여 발전하는 것은 효율적이지 못하며 미관상으로도 좋지 못하다. 또한, 대부분의 전력 소비가 도시에서 이루어지고 있기 때문에 도심에서 미관을 해치지 않고 전력을 생산하는 기술이 매우 중요한 화두가 되고 있다. 이러한 시대적 요구에 부응하여 발전형 창호를 개발하는 것은 매우 중요하다. 현재 내구성과 안정성 및 무독성 등은 이러한 발전형 창호로서 갖추어야 할 필수 조건이 되었다. 실리콘 박막은 이런 의미에서 가장 적합한 소재라고 볼 수 있다. 투명 태양전지의 요건 중의 중요한 것은 기존의 불투명한 태양전지와는 달리 효율 뿐 아니라 투과도의 향상도 중요하며 효율과 투과도를 동시에 향상시킬 수 있는 기술 확보가 중요하며 실리콘 박막의 경우 완충층의 기술 개발을 통해 이를 확보하였다. 또한, 효율 향상을 위해서 투과된 빛을 재흡수하기 위한 반사 거울을 사용하는 방법과 외부 태양광과 실내광을 동시에 조사하여 양면발전을 하는 방법이 가능하며 기술 개발을 통해 효율이 향상됨을 확인하였다. 향후 발전형 창호로 적용될 경우 실제 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 발전형 창호로 양산될 경우 미적인 효과를 위해 다양한 색상을 구현하는 기술의 확보가 중요한데 이 경우 효율과 투과도의 저하가 크지 않아야 한다. 광흡수층을 변화시키거나 이중접합을 이용하는 방법이 있지만 효과적이고 다양한 색상 구현을 위해서는 투명전극의 조건을 변화시키는 방법이 선호된다. 향후에는 발전형 창호가 비약적으로 발전될 것으로 예상되며 이를 위해서는 여러 가지 가능성을 함께 갖추어지는 기술 개발이 요구된다.

## 참고 문헌

[1] J. W. Lim et. al, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol 128, p 301-306, 2014.

- [2] S. H. Lee et. al, Progress in Photovoltaics: Research and Application, vol. 23, p 1642-1648, 2015.
- [3] A. Shah 외, Thin film silicon solar cells, EPFL press, 2010
- [4] G. Kim 외, EUPVSEC 2016, oral presentaion, 2016
- [5] J. W. Lim et. al, ECS Solid State Letters, vol. 2, p Q47-Q49, 2013
- [6] J. W. Lim et. al, Materials Research Bulletin, vol. 58, p 153-156, 2014.
- [7] S. H. Lee et al, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol 117, p 519-525, 2014.

## 제재역력



성명 : 임정욱

◆ 학력

·1994년

KAIST 전자재료공학과 공학사

·1996년

KAIST 재료공학과 공학석사

·2001년

KAIST 재료공학과 공학박사

◆ 경력

·2001년 - 현재

·2006년 - 현재

한국전자통신연구원

IT신소재연구실 책임연구원

과학기술연합대학원대학교

차세대소자공학과 전공책임교수