

## 나노구조 소재를 이용한 태양 전지 동향 III

나노구조 소재를 이용한 태양전지는 다양한 방법을 통해서 시도되고 있다. 지난번 연재에서 주로 소개된 dye-sensitized 태양전지는 광반응성 유기물/TiO<sub>2</sub>와 같은 유기-무기 복합체로 이루어졌다. 이러한 구조는 전자 전도성 고분자/정공 전도성 고분자 접합, 전도성 고분자/CdSe quantum wire 등으로 확장되었다. 이러한 구조의 태양전지는 고분자가 사용되므로 유연성이 있으며, 얇고, 생산원가가 낮아질 수 있어서 많은 관심을 끌고 있다. 하지만 기존 태양전지를 대체하여서 실용화시키기 위해서는 광-전기 변환효율을 향상시켜야 한다. 앞으로 사용될 용어의 통일을 위해서 특정 파장에서의 광-전기 변환 효율은 QE (Quantum Efficiency), 태양광에 대한 에너지 전환 효율은  $\eta$  로 표시하도록 하겠다.

### 1. 유기물/유기물 복합체 태양전지

무기물 반도체 태양전지에서 태양광에 의해서 생성된 전자와 정공은 p-n junction에서 형성된 후 각각 conduction band와 valence band에서 전극으로 자유롭게 이동한다. 반면에 유기물 태양전지에서는 태양광에 의해서 생성된 전자-정공(excitons)은 서로 강하게 묶여있다. 따라서 추가적인 광 여기가 일어나기 어려우므로 태양전지의 효율이 감소하게 된다. 효율을 증가시키려면 전자와 정공을 효과적으로 분리해야 하며 이를 위해서는 그림1(좌)와 같이 전자 전도성 물질과 정공 전도성 물질간의 접촉면적을 최대한 늘려야 한다. [1]

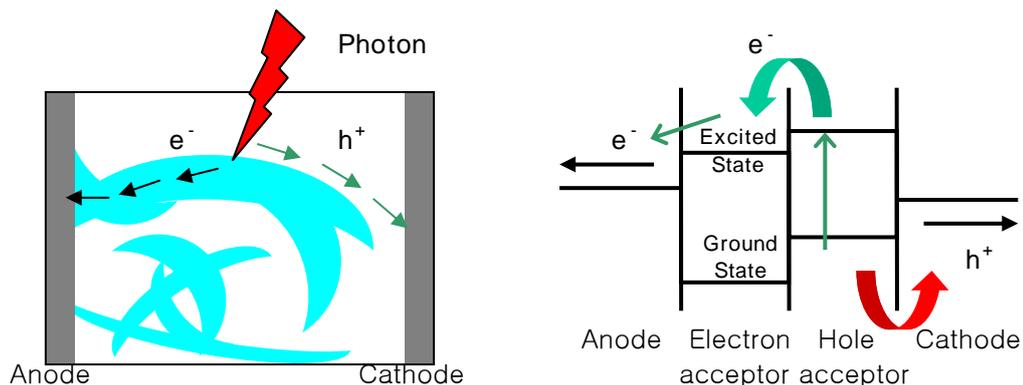


그림1 광-전기 변환효율 향상을 위한 유기물 혼합 태양전지 개념도(좌) 및 band alignment (우) : (하늘색) 전자 전도성 물질, (흰색) 정공 전도성 물질

Yu *et al.* [2]은 정공-전도성 고분자와 전자 acceptor인 C<sub>60</sub> 혼합물을 통해

서 단일파장에 대해서 29%의 광변환효율 (QE)을 얻었다. Yu and Heeger [3], Halls *et al.* [4]은 전자 전도성 고분자와 정공 전도성 고분자를 혼합하여서 5 ~ 8%의 QE을 얻었다. 이는 각 전도성 고분자 단일막에 비해서 매우 높은 효율을 나타낸 것으로 전자-정공 분리에 의한 효과로 판단된다. 이와 같은 전도성 고분자 blending은 단순히 spin coating을 통한 막 형성 중에 발생하는 phase separation을 이용하였다. 이를 적극적으로 조절하고자 blending한 고분자들을 annealing 하여서 막 위치에 따른 조성 변화를 일으키고 상호 혼합을 증진시켜서 QE 29%,  $\eta$  1.9%를 달성하였다. [5] 고분자-고분자 blending과는 달리 유기물 단분자-고분자의 경우 annealing은 막의 surface roughness를 증가시켜서 collecting 전극간에 합선을 유발시킨다. 이를 방지하고자 spin coating 후 metal capping을 통해서 surface roughness현상을 방지하였다. [6]

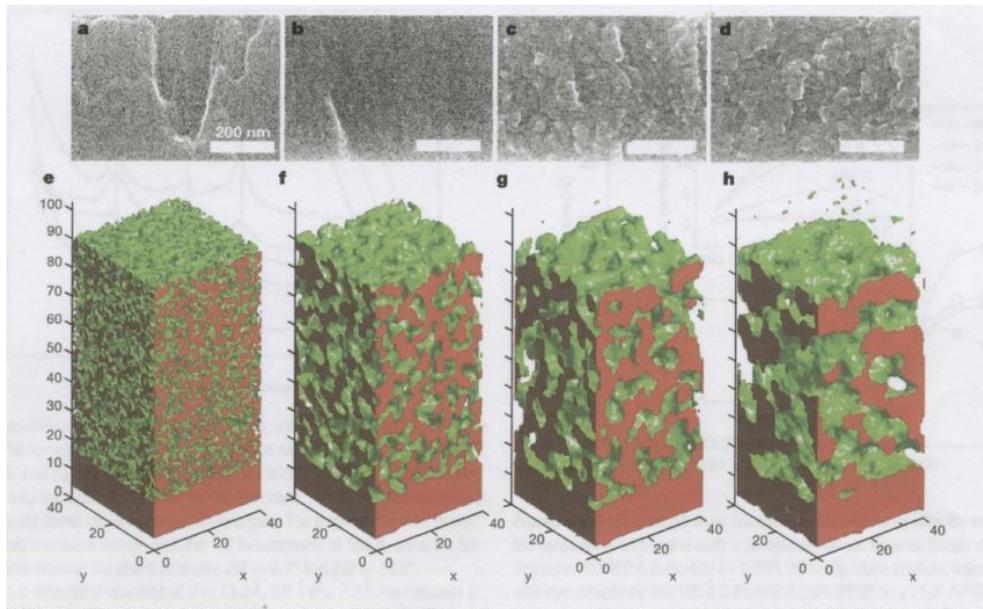


그림2 (a-d) 500 nm 두께인 CuPc:PTCBI(4:1) 막의 온도에 따른 SEM 단면도 (e-f) simulation으로 온도에 따른 CuPc/PTCBI interface 확인함

## 2. 결정성 물질 첨가를 통한 전자-정공 분리 효율 향상

다양한 종류의 전도성 고분자를 조합하고 적절한 처리를 하여서 전자-정공의 분리 효율을 매우 향상시켰지만 아직도 기존 무기물 박막 태양전지에 비해서 낮은 광-전기 변환효율을 나타내고 있다. 전자-정공 분리에 효율적인 물질 조합을 이루었더라도 막 내부에는 전극과 연결되지 않은 독립된 영역이 존재한다. 이 영역은 빛에 의해서 여기된 전자, 정공을 포획해서 다시 재결합시키는 역할을 한다. 이를 극복하고자 전도성 고분자 대신에 결정성 dye [7,8], 반도체 나노구소 소재 [9-12]를 사용하기도 하였다.

전하의 전도성을 높이기 위해서 결정성이 뛰어난 discotic liquid crystal인 hexabenzocoronene (A)을 정공 전도성 물질로 사용하고 EP-PTC (B)를 전자 전도성 물질로 사용하였다. (분자 구조는 그림2 참조) 이 두 물질을 함께 섞어서 상호간의 접촉 면적을 증가시키자 490 nm 파장의 빛에 대해서 QE 34%를 얻었다. [7]

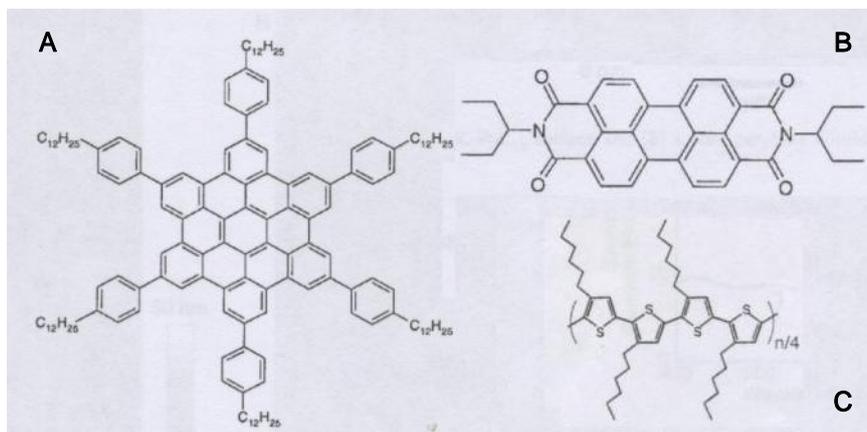


그림3 태양전지에 사용된 물질들의 분자식:

A: hexabenzocoronene, B: EP-PTC, C: P3RT

EP-PTC는 정공 전도성이 우수한 것으로 알려진 poly(3-hexyl thiophene) (P3HT, 그림3 C)와 blending되어서 QE 10%를 얻기도 하였다. [8] EP-PTC/P3HT는 각각 결정화되어 있으므로 자체적인 전도성이 높으며 interface에서 전하가 효과적으로 전달되므로 광여기된 전자를 효율적으로 분리할 수 있다. 이러한 개념은 고분자-무기물 반도체 복합체에도 사용되었다. Hyunh *et al.*은 0차원 quantum dot CdSe을 정공 전도성 고분자인 P3HT와 섞어서 QE 16%를 달성하였다. [9] 이때는 그림4와 같이 빛에 의해서 여기된 정공은 P3HT 쪽으로 전달되며 전자는 CdSe 쪽으로 전달된다.

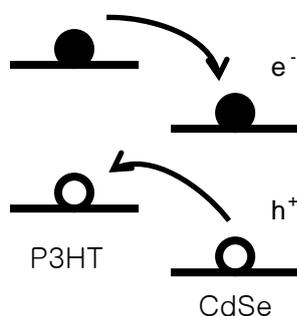
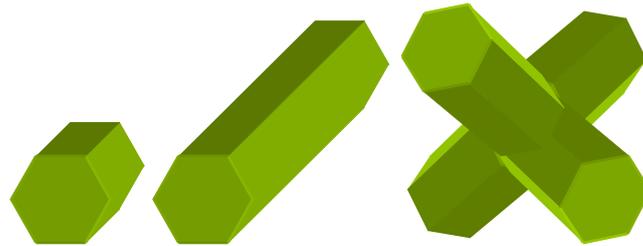


그림4 P3HT와 CdSe 나노입자간의 energy level 및 전자, 정공의 이동방향 [10] CdSe의 형태를 quantum dot에서 quantum wire로 바꾸자 QE가 54% 이상으로 증

가하였으며 표준 측정 조건 (AM1.5 g)에서 태양광 변환 효율 ( $\eta$ ) 1.7%를 달성하였다. [10] CdSe 입자의 크기가 증가하고 dot에서 wire로 구조가 바뀌면서 전도도가 증가하므로 변환 효율도 증가하는 것으로 판단된다. 이러한 CdSe의 구조를 wire에서 branched 형태로 발전시킬 경우 CdSe/전도성 고분자간의 interface가 증가하므로 광전류 증가를 통해서 광변환 효율 증대로 이어질 것으로 예상된다. [11]



quantum dot    quantum wire    branched quantum wire (tetrapod)

그림5 CdSe 나노구조 물질들의 구조

CdSe 나노구조 소재 이외에도 band gap 3.2 eV인 ZnO 나노입자와 전도성 고분자를 혼합하여서 태양전지를 제작할 경우 ~510 nm 단일파장에서 QE 40%를 얻었으며 태양광 변환 효율 ( $\eta$ ) 1.6%를 달성하였다. [12]

### 3. 결론

본 연재에서는 전도성 고분자 blending, QD/고분자 복합체와 같은 비교적 새로운 개념의 태양전지에 대해서 소개하였다. 기존의 태양전지에 비해서 비교적 간단한 공정으로 생산되므로 다양한 substrate, 다양한 모양도 이 가능하며 생산원가도 기존 태양전지에 비해서 낮을 것으로 예상된다. 지속적인 물질 개발과 최적화를 통해서 태광에 대한 에너지 전환 효율  $\eta$  을 10% 이상으로 높인다면 앞에서 열거한 장점으로 인해서 실용화를 이룰 수 있을 것으로 예상된다.

### 4. 참고문헌

- [1] Jenny Nelson, *Science*, **293**, 1059 (2001)
- [2] G. Yu *et al.*, *Science*, **270**, 1789 (1995)
- [3] G. Yu and A. J. Heeger, *J. Appl. Phys.*, **78**, 4510 (1995)
- [4] J. J. M. Halls *et al.*, *Nature*, **376**, 498 (1995)
- [5] M Granström *et al.*, *Nature*, **395**, 257 (1998)
- [6] P. Peumans *et al.*, *Nature*, **425**, 158 (2003)
- [7] L. Schmidt-Mende *et al.*, *Science*, **293**, 1119 (2001)

- [8] J. J. Dittmer *et al.*, *Adv. Mater.*, **12**, 1270 (2000)
- [9] W. H. Hyunh *et al.*, *Adv. Mater.*, **11**, 923 (1999)
- [10] W. H. Hyunh *et al.*, *Science*, **295**, 242 (2002)
- [11] D. J. Milliron *et al.*, *Nature*, **430**, 190 (2004)
- [12] W. J. E. Beek *et al.*, *Adv. Mater.*, **16**, 1009 (2004)