

염료감응 태양전지 연구개발 동향

박한균 선임연구원, 전용석 선임연구원/팀장, 윤호경 선임연구원, 강만구 책임연구원 (한국전자통신연구원 태양광전환기술연구팀) |
오수영 소장 (한국전자통신연구원 융합부품 소재연구부문)

1. 서론

1954년 Chapin, Fuller, Pearson에 의해 처음으로 결정성 실리콘 물질을 이용한, 실용 가능한 에너지 변환 효율 (4.5 %)의 태양전지가 개발된 이후에도, 태양전지의 중요성에 대한 사회적 공감은 바로 커지는 않았다 [1]. 태양전지가 현재와 같이, 세계적인 주목을 받고 발전하게 된 계기는 70년대의 두 차례 세계 오일쇼크 이후, 대체 에너지에 대한 시장의 요구가 커졌기 때문일 것이다. 최근 국제 유가는 150불까지 넘나드는 등, 100불 이상의 고공 행진을 계속하고 있다.

현재의 기술 수준에서는, 태양광발전으로 1 kWh의 전력을 생산하는 비용은 25~50 cent로, 석탄에 비해서는 6~50배 높고, 같은 신재생 에너지인 풍력보다도 4~9배 높다 [2]. 이처럼 경제적으로 불리한 조건에도 불구하고, 태양광발전이 미래의 에너지 문제를 해결할 수 있는 대체 에너지로서 많은 주목을 받는 가장 큰 이유는, 그 이용 가능한 에너지의 총량이 어떤 에너지원에 비해서도 압도적으로 크기 때문이다 [2]. 이러한 높은 잠재적 가능성으로 인해, 현재의 낮은 시장 점유율에도 불구하고, European Renewable Energy Council에서는 2040년경에는 세계 전력수요의 약 25 %인 9113 Twh에 이를 것으로 전망하고 있다. 이러한 전망을 대 전제로, 미래에는 태양광발전이 여타의 에너지에 비해 필적할만한 경제성을 확보할 수 있다는 가정이 필요하므로, 미래

의 태양전지 개발의 성패는 경제성 확보에 달려있다고 해도 지나친 말은 아닐 것이다. 염료감응 태양전지는 진공장비를 요구하지 않는 등의 이유로 제조단가가 낮아 경제성이 고려된 차세대 태양전지의 좋은 후보가 되고 있다. 또한 반투명한 형태로 제작이 가능하여 창유리의 대체재로 적용이 가능하다는 것 때문에 경제성이 충분한 차세대 태양전지로 고려되고 있다. 본 고에서는 염료감응 태양전지 분야의 최근 동향을 분야별로 구성하여 설명하고자 한다.

2. 본론

2.1 작동원리

구성요소를 살펴보기 위해서는 염료감응 태양전지의 구조와 작동원리의 설명이 필수적일 것이다. 단위전지의 구조와 단위전지를 이용한 모듈 형태의 구조를 그림 1에 표시하였다.

그림 1(a)에 표시된 구조를 기본으로 갖는 염료감응 태양전지는 FTO ($F:SnO_2$) 전도성 유리 표면에 TiO_2 나노입자를 코팅하여 일전극을 완성한다. 완성된 일전극은 다양한 색상의 염료에 코팅하여 준비되고, 백금 등의 촉매가 입혀진 반대전극을 포개고, 전해질을 채움으로써 완성된다. 따라서 대표적인 구성 요소는 전도성을 갖는 투명기판, 나노입자, 염료, 반대전극, 전해질, 밀폐제로 나눌 수 있다. 그림 1(b)에서 나타낸 모듈 구조는 그림 1(a)에서 보여주는 단위전지를 연결하는 금속 연결 전극도 필요하다. 금속 전극의 역할은 각각의 단위전지를 직렬로 연결해 주

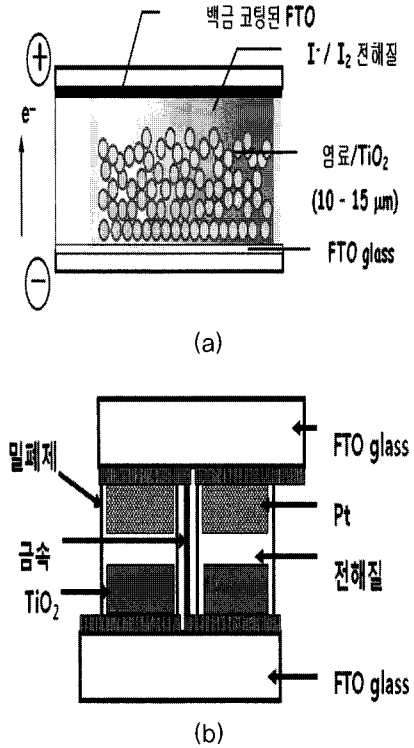


그림 1. (a) 염료감응 태양전지 구조, (b) 모듈 구조.

는 역할을 하게 되는데, 이 금속 전극은 현재 대부분 은페이스트를 이용하여 스크린 프린팅방법 등으로 준비된다.

모듈 구조에서 설명을 더하면, 그림 1(b)에 보여주듯, 두 개의 단위전지를 연결하기 위해서 기판의 FTO 전도성 영역이 일부 에칭되어야 한다. 현재 이 에칭은 대부분 1024 nm Nd:YAG 레이저, 혹은 기계적 에칭으로 이루어지고 있으며, 전해질을 통한 단위전지의 연결을 봉쇄하기 위해 금속연결 전극 사이는 다시 밀폐제로 분리된다.

2.2 전도성 유리 기판 [3-5]

염료감응 태양전지에 사용되는 기판은 섭씨 500도 이상의 열처리 이후에도 전도성을 잃지 말아야 하는 조건을 만족시켜야 한다. 디스플레이 등에 많이 쓰이는 인듐이 사용되는 ITO의 경우 섭씨 300도 이

상에서 인듐의 휘발성으로 인해, 열처리 이후 전도도가 매우 떨어지므로 높은 전도성의 이점에도 불구하고, 염료감응 태양전지 제작에는 사용하지 않는다. 따라서 현재는 대부분 인듐대신 불소가 처리된 FTO를 사용하는데, FTO는 ITO에 비해 전도성이 좋지 않아서 태양전지의 효율을 떨어뜨린다. 현재 국내 상업적으로 FTO를 공급하는 업체는 없어, 대부분 Pilkington에 의존하며, 수요는 염료감응 태양전지 상업화가 되기 전까지는 크지 않아 가격이 현재로서는 매우 비싸다. 최근 ETRI, KIST, 고려대학교, 삼성, LG 등, 다양한 연구기관에서 Al이 포함되는 ZnO를 이용하여 높은 온도 열처리에서도 전도성을 잃지 않는 투명 전도성 기판을 준비하는 등, 기판에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 물론 이런 연구들이 염료감응 태양전지에 적용하기 위한 것은 아니지만, 실용화될 경우, 기판의 가격을 크게 낮추고 효율도 올릴 수 있는 계기가 될 것이다. 일본 Fujikura의 Tanabe연구팀은 2004년에 ITO의 전도성을 응용하기 위해, ITO 기판 표면에 FTO를 박막으로 추가 코팅함으로써 인듐의 휘발을 막는 실험을 수행하였다. 이렇게 함으로써, 기판의 전도도를 10% 이상 향상시키고 투과율도 높여 ITO만 사용했을 경우보다 50% 이상의 효율 상승을 입증했다.

2.3 염료 [6,7]

현재 판매되고 있는 염료는 대부분 Ru 금속 이온을 함유한다. Ru은 희귀금속이지만, 염료의 사용량이 크지 않아, 재료의 부족을 걱정하지는 않고 있다. 기본적인 원리는 염료 분자가 빛을 받으면, Ru 금속 이온의 전자가 주변에 있는 리간드로 들뜨게 되고, 이 전자는 다시 TiO₂의 전도성띠에 잡히게 된다. 금속이온의 전자가 들뜨는 것이 기본적인 시작이므로, 더 낮은 효율을 보이는 금속 이온을 찾으려는 노력도 있었으나, 크게 성공하지 못하였다. 현재 가장 많이 쓰이고 있는 염료는 N719는 개발자 Nazeeruddin을 기리기 위해 그의 첫 알파벳을 이용하고 있으며, 그 외에도 다양한 N 시리즈의 염료들이 개발되어 있다. 국내에서는 희귀금속을 함유하지 않는 상대적으로 저가의 염료를 고려대학교의 고재중 교수 연구팀에서 K 시리즈로 개발 중에 있다. 현재 염료감응 태

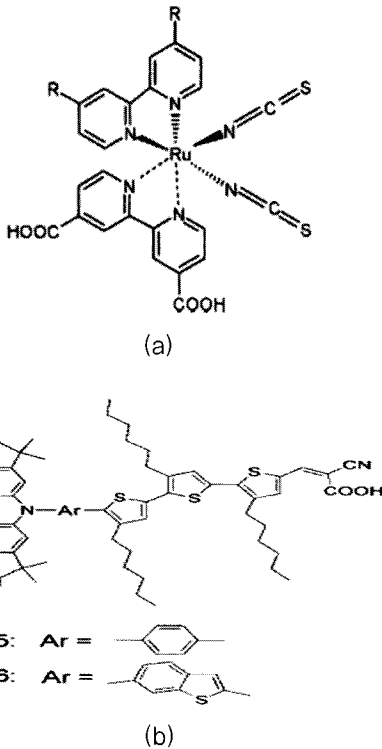


그림 2. 대표적인 N 시리즈 (a)와 K시리즈 (b) 염료 예.

양전지 국제적인 기록은 대부분 N 시리즈의 염료가 이루고 있으며, 금속을 사용하지 않는 경우 국내 연구진의 K 시리즈가 선두를 달리고 있다. N7, N719 등 N 시리즈의 대표적인 염료들은 장기 안정성을 확보한 상태이다. 2.5 sun의 조건에서 1000시간 이상 견디는 실험을 완료하였으나, 비금속 염료의 경우 최근 개발된 것들로, 이런 장기 안정성 확보에는 다소 시간이 걸릴 것으로 보인다. 비금속 염료가 장기 안정성을 확보할 경우 좀 더 다양한 색상의 효과로 인해, 염료감응 태양전지의 장점을 극대화할 수 있을 것으로 보고 있다.

2.4 반대전극 [8-10]

반대전극의 역할은 '회로에서 일을 마친 전자를 전해질로의 전달'이다. 요오드 계열의 전해질은 전자를 받는 에너지 준위가 정해져 있다. 이 에너지 준위와 효율적인 전자 이동을 위한 에너지 준위를 반

대 전극이 가지고 있지 못하면, 전자의 원위치를 제대로 맞춰주지 못하므로, 내부적인 전기장이 생겨 효율을 떨어뜨리게 된다. 가장 많이 사용되는 물질로는 단연 초창기부터 사용되는 Pt로, 특별한 대체 물질이 개발되어 있지 않다. 최근 국내 삼성종합 기술원과 전기연구원, 스위스의 Gratzel 교수팀에서는 탄소유도체를 응용하는 기술을 개발하였다. Carbon Black, 탄소나노튜브, 나노선 등을 응용하는 기술은 Pt를 사용하는 경우에 비해 약 80-90%의 효율까지 가능하다고 보고되고 있다. 그러나 Pt는 촉매로 매우 소량 사용하므로 전체 단위전지의 가격 결정에 큰 영향을 미치지 못한다는 의견이 지배적이어서, Pt를 다른 물질로 대체할 것인지에 대한 논란은 한 동안 계속 될 것으로 보인다.

Pt 외에 다른 금속을 반대전극에 사용하지 못하는 이유는 전해질 때문이다. 앞서 설명한 것처럼 전해질의 산화환원 에너지 준위도 중요하지만, 전해질에 안정한 금속을 찾는 것 역시 중요하다. 예를 들어, 금을 사용할 경우, 요오드계 전해질에 의해 에칭이 되어 금은 바로 녹아버린다.

최근에는 Pt를 다양한 방법으로 코팅하여, 효율을 높이고자 하는 시도도 있었는데, 예를 들어 국내 고려대학교의 김강진 교수 연구실에서는 전착법으로 Pt를 입히는 기술을 이용하여, 고온 열처리법에 의해 준비된 Pt 반대전극에 비해 높은 효율이 가능함을 보였다.

2.5 전해질 [11-13]

전해질 역시 개발 초창기에 비해 크게 변화되지 않았다. 기본적으로 I-/I3- 계열의 전해질을 사용한다. 용매로 가장 많이 사용되는 것은 아세트나이트라일로 끓는점이 섭씨 82도 정도이다. 여름철 뜨거운 태양 아래서, 태양전지 기판은 국부적으로 섭씨 60도 이상으로 예상되어, 80도 정도의 끓는점을 갖는 이 용매는 태양전지 사용에 적합하지 않다. 발레로나이트라일(끓는점 약 140도) 등을 혼합해서 사용한다 하더라도, 아세트나이트라일의 부분 증기압이 높아 효율적이지 못하다. 끓는점이 높은 다른 용매로 바꾸는 시도가 있었지만, 효율이 많게는 20% 이상 떨어져서 지속적인 연구가 필요하다. 최근

Gratzel 연구팀은 액체이온염을 이용하는 기술을 이용하여, 8% 이상의 효율을 기록하였다. 액체이온염의 경우 끓는점도 매우 높고, 용매를 필요로 하지 않으므로 매우 유용할 것으로 여겨지고 있다. Gratzel 그룹은 이런 전해질을 이용하여 1000시간 이상의 안정성 검사까지 마쳤으며, Kuang 등은 비휘발성 전해질로 9%의 효율을 얻은 바 있다. 그 외에도 한국 에너지연구원의 한치환 박사 연구팀을 비롯, 한양대 강용수 교수 연구실에서 고분자를 이용하는 고체 전해질 개발을 진행하고 있으나, 아직 액체 전해질에 비해 다소 많은 효율의 차이를 보이고 있다. 가장 큰 이유로는 염료와 전해질의 접촉으로 보인다. 빛에 의해 전자를 생성해서 나노입자에 넘긴 염료는 전해질로부터 최대한 빠르게 전자를 돌려받아야 한다. 그러나 다공성 나노입자 사이로 고분자가 잘 채워지기 어렵고, 채워지더라도 염료분자와 접촉을 빈틈없이 하기는 기술적으로 매우 어렵다. 따라서 젤타입과 높은 끓는점을 갖는 용매, 액체이온염이 앞으로 대체적인 주류를 이룰 것으로 보인다.

중요한 또 하나의 해결되어야 할 부분은 전해질의 색이다. 현재 요오드계열의 전해질은 갈색, 혹은 탁한 노란색이다. 이러한 이유로, 반투명한 나노전극에 다양한 색상의 염료가 입혀지더라도, 채워진 전해질과 색이 혼합되어 염료색 자체의 미적 감각을 제대로 표현하지 못하고 있다. 오렌지색, 녹색등의 염료를 코팅하여 일전극을 만들더라도, 전해질 투입 후에는 탁한 오렌지색, 탁한 녹색 등으로 변한다. 이런 현상은 얇아서 투명성이 높은 일전극을 사용할 경우 더욱 강조되는 현상으로, 더욱 맑은 전해질의 개발이 시급하다.

기본적인 전해질 재료는 초창기부터 변하지 않았지만, 다양한 성능 향상을 위한 전해질 첨가제 개발은 다소 성공적이다. 전해질은 염료와 닿아 전자를 넘겨주는 부분이기도 하지만, TiO_2 를 통해 흘러가는 전자를 잡아가는 역할을 하기도 한다. TiO_2 의 표면에 염료로 입혀지지 않은 곳은 언제나 전해질에 노출되어 전자의 손실을 유도하는 곳이라 하겠다. 따라서 염료를 최대한 많이 입혀서 빈 공간이 없게 하는 것도 중요하겠으나, 염료의 단위구조, 나노입자 표면의 결정성의 변화 등에 의해 입자의 표면을 완

벽하게 염료로 감싸는 것은 이론상으로도 불가능하다. 따라서 더 작은 분자 등으로 염료가 입혀지지 않은 TiO_2 표면을 채워주고, 이 분자들의 절연성으로 전자가 전해질로 빠져 나가는 것을 막는 효과를 낸다면 효율을 증가시킬 수 있다. Guanidine Thiocyanate (GSCN)같은 역시 이런 역할을 하는 물질로, 현재 많이 사용되고 있다.

2.6 밀폐제 [14, 15]

앞서 언급한 재료들이 효율의 높고 낮음을 결정한다고 한다면, 밀폐제는 안정성과 직접적인 연관이 있다고 하겠다. 밀폐가 제대로 이루어지지 않으면, 액체전해질의 경우 단기간 내에 모두 증발해 버려, 태양전지로서 작동을 할 수 없으며, 산소와 수분의 침투에 의해서도 전해질과 염료의 산화 등에 의해 효율이 매우 빠르게 떨어진다. 실험실 수준의 소형 Cell에서는 Surlyn이나 Bynel 등의 열가소성수지 Film을 이용한, 간편한 방법이 많이 쓰여 왔다. 내구성면에서도, 섭씨 80도에서 1000시간, 또는 60도, AM 1.5 광원 하에서 1000시간 동안 성능의 저하가 거의 없는 것이 입증되었다. 일반적인 열가소성수지 필름의 경우, 대형 모듈의 제작공정 적용하기에는 어렵다는 단점도 있었으나, Solaronix에서는 열가소성수지도 Screen Printing 형식으로 가열/봉입하는 방식으로 적용이 가능함을 보였다. 그러나 이 경우도 겨울과 여름을 번갈아 지낼 경우, 혹은 밤낮의 기온차가 심할 경우 부분적으로 변성이 일어나는 현상이 있어, 당분간 더 연구가 진행되어야 할 것이다.

가장 안정적인 방법으로 거론되는 것은 Glass Frit이다. 통상적인 Glass Frit은 소성 온도를 낮추기 위해 납성분을 포함하는데, 소성 시에 백금 전극을 오염시켜 효율저하가 일어날 수 있다. 최근에는 납이 포함되지 않은 Glass Frit을 사용하는 방법도 연구되고 있다.

일본의 Aisin Seiki의 경우 Ionomer를 이용한 밀폐로 현재 3년 이상의 실외 테스트를 실시중이며, 초기 성능의 30% 이내의 성능저하를 보고하고 있다.

2.7 나노전극 [16,17]

가장 많은 연구가 이루어지고 있는 부분이 바로



나노전극 부분이다. 그러나 이 부분 역시 연구 초창기의 재료에서 크게 벗어나고 있지 않다. 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 것은 TiO_2 나노입자로, 18-22 nm의 입자를 사용하고 있다. 나노입자를 이용하는 가장 큰 이유는, 표면적을 증가 시키는 것이다. 나노입자의 연결 부분을 통해 전자는 FTO까지 이르고, 결국은 회로를 돌게 되는데, 나노입자의 연결 부위 등에서 전자의 흐름이 원활하지 않고, FTO까지 최단거리를 유도하지 않아 전자의 손실이 일어나고 있다. 이런 단점을 극복하기 위해, 다양한 방법으로 나노튜브, 나노로드 등을 성장시키고 전극으로 활용하였으나, 향상된 효율이 보고되고 있지 않다. 가장 큰 이유로는 나노로드와 튜브 등이 증가된 면적을 보여주고 있지 않으며, 기관과 수직인 상태로 정렬하기 어려울 뿐 아니라, 염료의 입사된 빛의 비효율적인 사용 등이 있다. 뿐만 아니라, 이런 구조의 전극은 대면적화도 어렵고, 나노튜브의 경우 전극 제조 시 염료코팅과 전해질 투입에 장기간이 소요되는 등, 기술적 한계를 또 극복해야 하는 단점을 야기시켜 비효율적이다.

TiO_2 대신 상대적으로 전도성이 좋은 ZnO로 대체하려는 움직임도 있었지만, 현재로서는 크게 진보된 기술을 보여주지는 못하고 있다. 그 외에도, TiO_2 가 재료적 한계로 보여주는 전압도 극복하려는 목소리도 나오고 있다. 다양한 표면 코팅과 첨가제를 통하여 전압을 0.9 V 이상까지 상승시켜 보고자하는 시도가 있지만, 아직 성공하지는 못하고 있다.

대체적으로 받아들여진 나노전극 표면 코팅방법으로는 $TiCl_4$ 처리와 Nb_2Cl_5 처리이다. 그 외에도 MgO 등의 처리도 하지만, 큰 효과를 보지는 못하고 있다.

염료감응 태양전지의 가장 큰 장점으로 꼽았던 반투명성은 사실 낮은 효율을 유도하는 중요 요소이다. 반투명하다는 것은 빛을 효율적으로 다 사용하지 못한다는 것으로, 흡수되지 못하고 전극을 지나가는 빛을 재활용하려는 시도가 있어왔다. 전극의 뒷면에 Pt를 거울면처럼 준비하거나, 반대쪽 유리면에 거울을 만드는 것도 방법이라고 하겠다. 현재 가장 일반적으로 사용되는 방법은 Scattering Layer라고 하는 층을 일반 나노입자 층 위에 첨가하는 방법

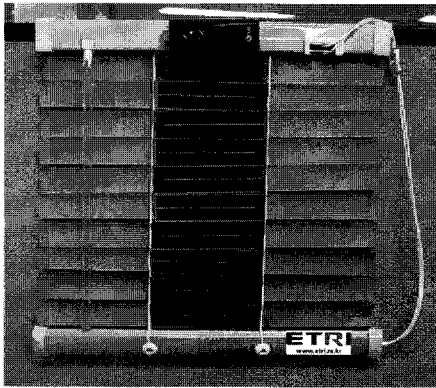
이다. 200-400 nm의 TiO_2 입자 혹은 실리카 입자를 사용하는데, 이 입자들은 흡수되지 않은 빛을 산란시켜서 염료가 있는 주층으로 빛을 되돌려 보내는 역할을 한다. 이런 Scattering Layer는 3-4 microns 두께로 입히는데, 이렇게 준비한 태양전지는 더 이상 투명하지 않고, 효율은 5-10 % 증가시킨다. 5-10 %의 증가를 통해 더 많은 발전을 할 수는 있지만, 염료감응 태양전지의 가장 큰 장점인 반투명성을 포기하는 것으로 앞으로 상용화 과정에서 이에 대한 중요도가 재평가 될 것이다.

그 외에도 투명성을 높이기 위한 방법으로 TiO_2 입자의 분쇄법에 대한 연구도 계속되고 있다. Dyesol에서 판매하는 TiO_2 페이스트는 투명도가 매우 높다. 일반적으로 졸겔법에 의해 제조된 TiO_2 를 이용하여 페이스트를 만들면, 나노입자들의 집체화 현상으로 투명성이 없다. 나노입자들이 어우러져, 큰 마이크로 형태의 입자상태로 존재하기 때문이다. 이에, TiO_2 입자를 페이스트 만들기 전에 단단한 다른 입자로 갈아주는 방법을 많이 이용한다. 대표적으로 사용되는 재료는 ZrO로 50-500 microns 크기의 입자를 사용하여, 초음파 혹은 기계적인 분쇄를 시도한다.

좋은 나노전극의 필수요소는 표면의 결정성으로 보고 있다. 표면에 너무 많은 결정면이 노출되면, 염료입자들이 규칙적인 배열을 통해 많이 흡착될 수 없다. 뿐만 아니라, 입자들 사이가 소결 후에도 다양한 결정성의 접합으로 전자의 흐름이 원활하지 못할 수 있다.

2.8 기타 [18,19]

앞서 간단히 설명한 것처럼 고효율 염료감응 태양전지를 만들기 위해서는 섭씨 500도 정도에서의 열처리가 필수적이다. 유연성을 갖는 플라스틱 기관의 경우 이런 온도까지 올릴 수 없기 때문에, 저온처리 가능한 TiO_2 페이스트, TiO_2 저온 소결법 등의 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 저온 페이스트와 저온 소결법은 제약이 많고, 플라스틱 기관 역시 전도성이 떨어져, 매우 제한적인 효율만을 기록하고 있다. 한국전자통신연구원의 강만구 박사팀은 유연성이 있는 금속 박막을 전극으로 활용하여, 유연성



(a)



(b)

그림 3. 유연성 염료감응 태양전지 블라인드 적용 예 (a)와, 반투명성 태양전지 창호 적용 예 (b).

염료감응 태양전지를 완성하였다. 최근에는 국제적으로도 가장 높은 효율을 기록하는 등, 응용성을 높이고 있다.

2.9 기업동향

국제적으로 염료감응 태양전지의 재료를 가장 크게 제공하고 있는 곳은 호주의 Dyesol이다. Dyesol은 최근 티모와 함께 합작회사를 국내에 설립한다고 발표하기도 하였다. 실제로 염료감응 태양전지를 제조해서 판매하고 있는 곳은 현재 영국의 G24i가 유일하다. G24i는 휴대폰을 비롯 개인 휴대기기의 전원 공급 장치를 제조해서 판매하고 있다. 인도, 유럽

을 비롯하여, 북아프리카 일대의 시장에 공급하고 있다. 시장 규모는 아직 제공하고 있지 않다. 일본의 경우 Sharp, Sony, Fujikura 등이 오랫동안 준비를 해 오고 있지만, 아직 상용화 제품을 내놓지는 않고 있다.

국내에서도 움직임이 발 빠르다. 우리솔라, 선테크 및 동진세미켄이 최근 사업을 시작하였으며, Acrosol도 설립되었다. 이견창호 역시 국내 최대 BIPV 시공업체로 염료감응 태양전지 사업을 위한 연구진을 완성하고, 대면적 시제품 제작과 창호제품 적용을 위한 규격 검사 중에 있다. 그 외에도 삼성 SDI를 비롯 대기업에서 창호 제품 위주로 제품 생산을 준비 중이다.

염료감응 태양전지의 최대 응용 처는 BIPV일 것으로 여겨지지만, 유연성을 갖는 태양전지를 이용하는 유비쿼터스 에너지 공급원으로 사용하려는 시도 역시 매우 빠르게 증가하고 있다. 상보 역시 최근 한국전자통신연구원으로부터 기술이전을 받아 사업에 진출한다. 이와는 독자적으로 한국전자통신연구원은 연구소기업 설립을 추진하고 있고, 이에 유연성 염료감응 태양전지를 응용한 블라인드 외 다양한 적용 모델을 선보이고 있다.

3. 결론

최근에 이르러, 화석에너지의 고갈과 온실가스로 인한 지구 온난화로 인해, 신재생에너지의 중요성이 그 어느 때보다도 강조되고 있다. 그 중에서도 특히 태양광 발전 분야는, 그 막대한 잠재력으로 인해, 미래의 에너지 문제를 해결할 기술로 인식되어 상대적으로 낮은 현재의 경제성에도 불구하고, 앞으로 많은 투자와 발전이 기대된다.

염료감응 태양전지는 기존의 실리콘 태양전지에 비해 짧은 역사를 갖고 있어, 앞으로 연구/개발해야 할 주제가 다양하다는 면에서, 연구 개발자에게 매력적인 연구 분야이다. 또한, 비교적 간단한 제작 방법과, 낮은 초기 시설비용으로, 타 태양전지에 비해 연구자의 진입장벽이 낮다는 장점도 있으나, 염료, 전해질, 기판, 나노입자 전극, 모듈 구조 등, 광범위한 관련 분야의 연구가 함께 수반되어야 전체적인



기술이 완성된다는 어려운 점도 있다. 이처럼 광범위한 주제에 대한 연구 방향을, 이 짧은 글에서 모두 정리해보는 것은 어려운 일이다. 다만, 과거의 실리콘 태양전지의 사례에서 볼 수 있듯이, 염료감응 태양전지 기술 개발도, 에너지 확보라는 시장의 요구에 따라 그 큰 방향이 결정될 가능성이 높을 것으로 예측한다.

염료감응 태양전지는 고공하는 에너지 가격에 맞물려, 매우 뜨겁게 달궈지고 있다. 이에 최근에는 분야별로 업무를 나누어, 재료부터 BIPV 시공업체까지 유기적인 클러스터를 만들어 사업에 진출하는 모델을 국가에 제시하는 등, 2-3년 내에 경쟁력있는 첫 제품을 선보이기 위한 노력이 진행 중이다. 염료감응 태양전지의, 나열된 기술적 문제가 극복되어, 본격적인 시장이 열릴 수 있다면, 국가적으로도 중요한 산업으로 자리매김 될 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

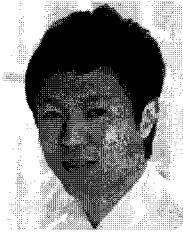
- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power." *J. Appl. Phys.*, Vol. 25(5), p. 676, 1954.
- [2] N. S. Lewis, "Powering the planet." *MRS Bulletin*, Vol. 32(10), p. 808, 2007.
- [3] H. Bisht, H. T. Eun, A. Mehrtens, and M. A. Aegerter, "Comparison of spray pyrolyzed FTO, ATO and ITO coatings for flat and bent glass substrates." *Thin Solid Films*, Vol. 351(1-2), p. 109, 1999.
- [4] T. Kawashima, T. Ezure, K. Okada, H. Matsui, K. Goto, and N. Tanabe, "FTO/ITO double-layered transparent conductive oxide for dye-sensitized solar cells." *J. Photochem. Photobiol., A*, Vol. 164(1), p. 199, 2004.
- [5] B. Yoo, K. Kim, S. H. Lee, W. M. Kim, and N. G. Park, "ITO/ATO/TiO₂ triple-layered transparent conducting substrates for dye-sensitized solar cells." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 92(8), p. 873, 2008.
- [6] H. Choi, C. Baik, S. O. Kang, J. Ko, M. S. Kang, M. K. Nazeeruddin, and M. Gratzel, "Highly efficient and thermally stable organic sensitizers for solvent-free dye-sensitized solar cells." *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 47(2), p. 327, 2008.
- [7] S. Kim, J. K. Lee, S. O. Kang, J. Ko, J. H. Yum, S. Fantacci, F. De Angelis, D. Di Censo, K. Nazeeruddin, and M. Graetzel, "Molecular engineering of organic sensitizers for solar cell applications." *J. Amer. Chem. Soc.*, Vol. 128(51), p. 16701, 2006.
- [8] T. N. Murakami and M. Gratzel, "Counter electrodes for DSC: Application of functional materials as catalysts." *Inorg. Chim. Acta*, Vol. 361(3), p. 572, 2008.
- [9] T. N. Murakami, S. Ito, Q. Wang, M. K. Nazeeruddin, T. Bessho, I. Cesar, P. Liska, R. Humphry-Baker, P. Comte, P. Pechy, and M. Gratzel, "Highly efficient dye-sensitized solar cells based on carbon black counter electrodes." *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 153(12), p. A2255, 2006.
- [10] C. H. Yoon, R. Vittal, J. Lee, W. S. Chae, and K. J. Kim, "Enhanced performance of a dye-sensitized solar cell with an electrodeposited-platinum counter electrode." *Electrochim. Acta*, Vol. 53(6), p. 2890, 2008.
- [11] Y. Bai, Y. Cao, J. Zhang, M. Wang, R. Li, P. Wang, S. M. Zakeeruddin, and M. Gratzel, "High-performance dye-sensitized solar cells based on solvent-free electrolytes produced from eutectic melts." *Nat. Mater.*, Vol. 7(8), p. 626, 2008.
- [12] M. Berginc, U. Opara Krasovec, M. Hocevar, and M. Topic, "Performance of dye-sensitized solar cells based on Ionic liquids: Effect of temperature and iodine concentration." *Thin Solid Films*, Vol. 516(20), p. 7155, 2008.
- [13] J. N. d. Freitas, A. d. S. Goncalves, M. A. De Paoli, J. R. Durrant, and A. F. Nogueira, "The role of gel electrolyte composition in the kinetics and performance of dye-sensitized solar cells." *Electrochim. Acta*, Vol. 53(24), p. 7166, 2008.
- [14] M. Gratzel, "Photovoltaic performance and long-term stability of dye-sensitized mesoscopic solar cells." *C.R. Chim.*, Vol. 9(5-6), p. 578, 2006.
- [15] T. Meyer, D. Martineau, A. Azam, and A. Meyer, *All screen printed dye solar cell*. in Proc. of SPIE. 2007. San Diego, CA.
- [16] M. Gratzel, "The advent of mesoscopic injection solar cells." *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, Vol. 14(5), p. 429, 2006.
- [17] J. M. Kroon, N. J. Bakker, H. J. P. Smit, P. Liska, K.

R. Thampi, P. Wang, S. M. Zakeeruddin, M. Gratzel, A. Hinsch, S. Hore, U. Wurfe, R. Sastrawan, J. R. Durrant, E. Palomares, H. Pettersson, T. Gruszecki, J. Walter, K. Skupien, and G. E. Tulloch, "Nanocrystalline dye-sensitized solar cells having maximum performance." Prog. Photovoltaics Res. Appl., Vol. 15(1), p. 1, 2007.

[18] Y. Jun and M. G. Kang, "The characterization of nanocrystalline dye-sensitized solar cells with flexible metal substrates by electrochemical impedance spectroscopy." J. Electrochem. Soc., Vol. 154(1)2007.

[19] Y. Jun, J. Kim, and M. G. Kang, "A study of stainless steel-based dye-sensitized solar cells and modules." Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 91(9), p. 779, 2007.

저|자|약|력



성 명 : 박헌균

◆ 학 력
 · 1998년 서울대 화학과 이학사
 · 2004년 Univ. of Wisconsin - Madison 화학과 이학박사

◆ 경 력
 · 2004년 Univ. of Wisconsin - Madison 화학과 Post Doc.
 · 2005년 - 2006년 삼성정밀화학 광학소재1팀 책임 연구원
 · 2007년 - 2008년 한국전자통신연구원 태양광 전환 기술연구팀 선임연구원



성 명 : 전웅석

◆ 학 력
 · 1996년 고려대 화학과 이학사
 · 1998년 고려대 대학원 화학과 이학석사
 · 2004년 미네소타 주립대학교 화학과 이학박사

◆ 경 력
 · 2004년 - 2005년 미네소타 주립대학교 및 Sandia 국립연구원 연수과정
 · 2006년 - 현재 한국전자통신연구원 태양광 전환 기술연구팀 선임연구원/팀장



성 명 : 윤호경

◆ 학 력
 · 1998년 고려대 재료공학과 공학사
 · 2000년 고려대 대학원 재료공학과 공학석사

◆ 경 력
 · 2000년 - 2000년 LG전자 디스플레이연구소
 · 2000년 - 현재 한국전자통신연구원 태양광 전환 기술연구팀 선임연구원



성 명 : 강만구

◆ 학 력
 · 1988년 고려대 화학과 이학사
 · 1990년 고려대 대학원 화학과 이학석사
 · 2000년 고려대 대학원 화학과 이학박사

◆ 경 력
 · 2000년 - 현재 한국전자통신연구원 태양광 전환 기술연구팀 책임연구원



성 명 : 오수영

◆ 학 력
 · 1972년 서울대 전자공학과 공학사
 · 1977년 미국 스탠포드대학교 Electrical Engineering 공학석사
 · 1981년 미국 스탠포드대학교 Electrical Engineering 공학박사

◆ 경 력
 · 1990년 - 1998년 Hewlett Packard Project Manager
 · 1998년 - 1999년 Verilux Vice President
 · 1999년 - 2001년 Aspec Vice President
 · 2001년 - 2005년 UbiTech President
 · 2006년 - 현재 ETRI 융합부품 소재연구부문 소장 / 차세대태양광사업본부 본부장 겸직