

직조 기술의 에너지 활용: 고전 기술과 첨단 기술의 융합

차승일 · 윤민주 · 권태희 · 이동윤

한국전기연구원 창의원천연구본부

Textile Technologies for Photovoltaics

Seung I. Cha, Minju Yun, Taehee Gueon, Dong Yun Lee

Creative and Fundamental Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서론

직조 기술, 염색 기술, 인쇄 기술, 제지 기술은 인류와 짝게는 수백년 길게는 수천년 이상 역사를 함께한 기술들이지만 우리에게 너무나 익숙하기 때문에 그 중요성을 인식하지 못하는 경우가 많다. 이러한 기술들은 오랜 시간 실생활에서 활용되어 왔기 때문에, 원래의 목적에 요구되는 성능뿐만 아니라 그 기술에서 파생되는 부가적인 특성들이 다른 기술이 동일한 응용영역에 적용되는 것을 막는 역할을 하기도 한다. 예를 들어 종이의 경우, 정보를 기록하기 위한 기술로 얇고 튼튼하며 여러 방법을 이용하여 정보를 기록할 수 있는 특징을 가지고 있다. 동시에 종이는 접을 수 있다는 특성을 가지고 있는데, 이는 실질적으로 정보를 기록하는 원래의 목적과는 관계없는 특성이다. 그러나 오랜 시간동안 종이를 정보 기록의 매체로 활용하면서 정보 기록 매체는 당연히 접을 수 있어야 한다는 개념이 발생하게 되었다. 따라서 종이의 역할을 대신하고자 하는 디스플레이 기술의 개발에 있어서, 종이와 같이 접을 수 있거나 최소한 유연한 디스플레이를 개발하고자 하는 동력이 계속 유지된다.

이와 같은 현상은 첨단 기술이 첨단 기술로 인식되는 것이 아니라 일반 생활에서 인식할 필요도 없는 ‘당연한 기술’로 진화하는 경우, 직조, 염색, 제지, 인쇄 기술처럼 대체 불가능한 기술로 발전할 수 있다는

가능성을 내포하고 있다. 특히, 의식주 및 에너지 기술과 같이 생존에 필수적인 기술인 경우, ‘당연한 기술’이란 기술 그 자체가 생명력을 갖는다고 생각할 수 있다.

향후 미래 에너지원으로써 가장 주목 받고 있는 것은 태양전지다. 태양전지는 비교적 최근까지 인공위성이나 낙도의 전력원으로 사용되어 왔으며, 실생활 깊숙이 사용되어온 기술은 아니다. 그러나 최근 신재생에너지의 필요성이 증가함에 따라 점차 생활 속으로 응용 범위를 넓히고 있다. 따라서 기존 태양전지의 구조를 생활속에서 활용이 가능하도록 개선해야 하는 숙제가 남아 있다. 특히, 태양전지의 경량화와 유연화는 향후 태양전지가 도시의 건물 혹은 가옥에서 활용하기 위해서 최우선으로 해결해야 하는 과제로 떠올랐다. 또한, 향후 스마트시대를 선도할 웨어러블 기기 전력원으로 활용 가능성이 증대되면서 고유연성 경량 태양전지는 태양전지 응용 확대에 중요한 기술적 요소로 자리 잡았다. 이러한 과정에서 고전 기술 중 직조물과 종이의 특성이 재조명되고 있다.

2. 종이 및 직조 기술을 이용한 염료감응형 태양전지의 개발

2-1. 염료 감응형 태양전지의 종이 및 직조 기술 응용 여러 종류의 태양전지 중에서 현재 가장 널리 사용

되는 것은 단결정 혹은 다결정 실리콘을 이용하여 제조된 실리콘 태양전지이다. 그러나 실리콘 태양전지는 고효율에도 불구하고 기계적 취성이 강해 유연 경량 태양전지로 활용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 실리콘 태양전지를 대체하기 위한 연구는 현재까지도 계속되고 있으며, 박막태양전지, 유기태양전지, 염료감응형 태양전지 등이 차례로 개발되었다. 그중 염료감응형 태양전지는 비교적 최근에 개발된 태양전지 기술로 다른 태양전지와는 다르게 전지의 구조를 가지고 있다. 또한 광량이 적은 상태에서도 상대적으로 고효율로 전력을 생산하며, 인쇄 공정을 이용하여 제조할 수 있는 공정의 장점을 가지고 있어, 미래 도시형 태양전지로 가능성을 인정받고 있다. 염료감응형 태양전지는 <그림 1>과 같은 구조로 구성되어 있다. 일반적으로 2매의 전도성 투명산화물(Transparent Conductive Oxide, TCO)이 코팅된 유리판을 활용하는 샌드위치 구조가 활용된다. 1매의 기판에는 TiO_2 나노입자를 인쇄하고, 나노입자의 표면에 빛을 받으면 전자가 여기(excitement)되는 염료 분자를 흡착시키고, 다른 기판에는 상대전극 역할을 수행하는 백금 혹은 탄소를 도포한다. 2매의 기판을 서로 마주보게 배치한 후 전기적 단락이 발생하지 않도록 gasket을 삽입하고 그 사이에 전해질을 주입하는 공정을 거치면 샌드위치 구조의 염료감응형 태양전지가 구성된다.

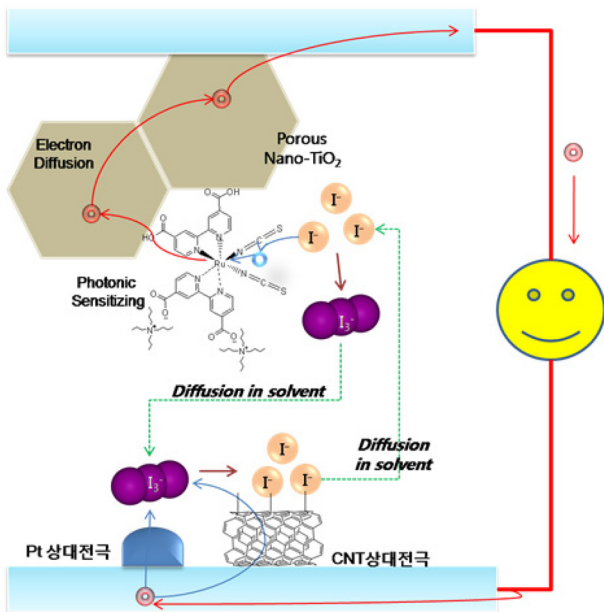


그림 1. 염료감응형 태양전지 작동원리 및 구조.

외부에서 빛이 공급되면, TiO_2 표면의 염료에서 전자가 여기되고 여기된 전자는 바로 TiO_2 의 conduction band에 주입되어 기판을 거쳐 외부 회로로 전달된다. 전달된 전자는 회로에서 에너지를 소모한 후 상대전극에 도착하고 상대전극의 전기화학 촉매인 백금 혹은 탄소에 의해 전해질의 이온으로 전달된다. 전달된 전자는 다시 염료 표면으로 전해질 내 확산을 통해 이동한 후 염료로 전달되어 전체 회로를 완성한다. 이와 같은 전력 생산의 원리는 빛에 의해 전자가 여기하는 과정을 제외하면 전지와 유사하며, 태양전지의 구조도 투명한 기판을 활용하는 점을 제외하면 전지의 구조와 유사하다.

염료감응형 태양전지의 활용에 있어서 종이와 직조물이 조명을 받기 시작하는 것은 염료감응형 태양전지의 주요 부분이 인쇄 공정을 통해 제조될 수 있으며 제조 공정 중 고온 공정이 상대적으로 적기 때문이다. <그림 2>에서와 같이 종이와 직조물은 기본적으로 섬유를 기반으로 한다. 이와 같은 배경에서 기존의

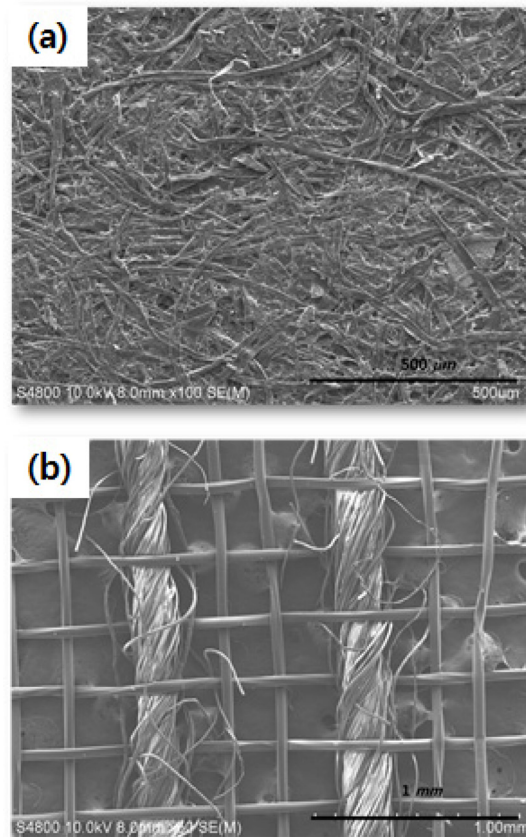


그림 2. 종이(a) 및 직조물(b)의 주사전자현미경 사진.

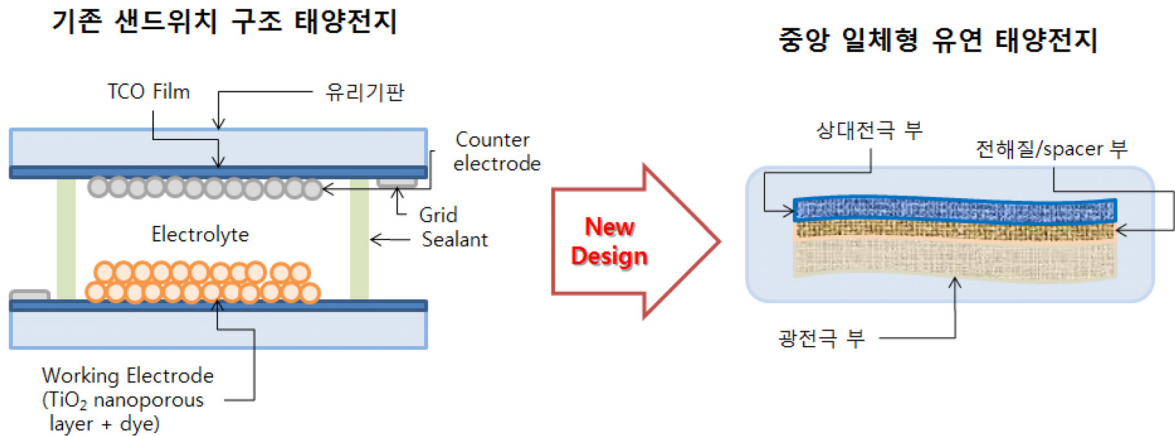


그림 3. 기존 샌드위치 구조 염료감응형 태양전지(좌)와 중앙 일체형 염료감응형 태양전지(우)구조의 개략도.

직조 태양전지의 연구는 주로 섬유형태의 염료감응형 태양전지를 제조하는 것에 집중되어 있었다. 그러나 제조된 섬유형태의 태양전지를 종이 혹은 직조물로 제조하는 과정에서 높은 수준의 마찰력과 장력이 적용되기 때문에 섬유형 태양전지의 구성요소가 파손될 가능성이 매우 높다. 또한 현재의 기술력으로는 실제 직조물로 제조할 수 있을 만큼의 연속공정으로 섬유형 태양전지 제조가 불가능하다. 따라서 종이 혹은 직조형 태양전지를 개발하기 위해서는 기존의 방식을 개선한 새로운 개념의 제조공정 개발이 필요하다.

2-2. 중앙 일체형 염료감응형 태양전지

직조 혹은 종이 구조의 염료감응형 태양전지 제조를 위한 신개념의 제조공정 개발을 위해서 샌드위치 구조의 염료감응형 태양전지 구조를 개선할 발상의 전환이 필요하다. <그림 2>의 종이와 직조물의 구조를 단순히 제조해야 할 목표가 아닌 활용의 관점에서 본다면, 종이와 직조물은 공통적으로 많은 양의 빈 공간을 포함하고 있다. 따라서 <그림 3>과 같이 종이 혹은 직조물의 양면에 전력을 전달해 줄 수 있는 전도체와 광전극(TiO_2 나노입자와 염료), 상대전극을 구축하고, 종이 혹은 직조물 내의 빈 공간에 전해질을 충전시키면 샌드위치 구조와 동일한 원리의 염료감응형 태양전지 제조가 가능하다. 특히 제조공정의 측면에서 보면, 종이 혹은 직조물의 양면에 인쇄를 통하여 전극을 제조하고 염색(염료를 흡착시키는 공정) 공정을 거쳐 태양전지를 완성하기 때문에 원리적으로 종이나 직조물에 인쇄하고 염색하는 고전 기술을 제조공정 상으로도 구현했다고 볼 수 있다.

이와 같은 제조공정과 소자의 구성을 기존의 염료감응형 태양전지와 구별하여 중앙일체형 염료감응형 태양전지(Core-integrated Dye Sensitized Solar Cell)라 하며, glass paper, 스테인레스 스틸 메쉬(mesh)를 이용하여 실제 소자로 구현되었다. 구현 과정은 glass paper에 스테인레스 스틸 메쉬를 TiO_2 페이스트를 이용하여 접착시킨 후, 반대면에는 상대전극의 전도체와 상대전극 촉매 역할을 수행할 백금 박막을 스퍼터링(sputtering) 공정을 이용하여 도포한다. 이후 TiO_2 나노입자 페이스트를 스테인레스 스틸 메쉬가 있는 면에 스크린 프린팅 공정으로 인쇄하고 열처리를 통해 고착시킨 후, 염료의 염색공정을 통해 염료감응형 태양전지를 구축한다. 최종적으로 glass paper에 전해

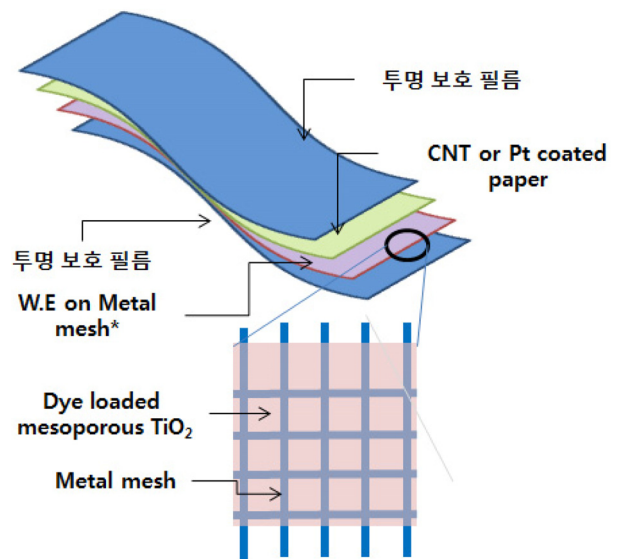


그림 4. 종이형 염료감응형 태양전지의 구조.

질을 침투시킨 후, 전체를 투명한 필름으로 밀봉함으로써 염료감응형 태양전지를 구축할 수 있다. 제조된 태양전지는 <그림 4>와 같이 스테인레스 스틸 메쉬가 문살, glass paper가 문종이 역할을 하는 우리나라 고유의 창호문 구조와 유사하다. 또한 소재와 구조의 특성상 고도의 유연성을 보이며 2-3% 수준의 광전변환 효율을 구현하여, 향후 제조 공정의 개선과 관련 소재의 개선을 통해 활용이 가능하다고 기대하고 있다. 또한 종이형 태양전지의 구현은 중앙일체형 염료감응형 태양전지가 실제로 적용 가능한 개념이며 직조 구조 태양전지에도 활용될 수 있음을 증명하였다.

2-3. 직조 구조 활용 염료감응형 태양전지

직조형 태양전지는 기본적으로 종이형 태양전지에서 구축된 중앙일체형 태양전지의 구조와 공정을 활용하고 있다. 즉, 양면을 활용할 수 있는 core를 제조하고 인쇄 공정과 염색 공정을 통해 태양전지의 소자 구성물을 도포한 후, core에 전해질을 함침시켜 염료감응형 태양전지를 구현한다. 다만, 직조물의 특성상 종이형 태양전지보다 다양한 구조의 태양전지의 개발이 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 아울러 직조기를 활용하여 연속 공정으로 제조할 수 있는 특징을 가지고 있다.

직조형 태양전지는 현재까지 그림 5와 같은 3가지 형태로 개발되었다. 부착형 직조 태양전지는 염료감응형 태양전지의 광전극과 상대전극을 금속 섬유를 이용한 직조물로 제조한 후, 이를 sewing 공정으로 기존의 직조물에 부착하는 과정으로 제조된 직조 태양전지다. 기존의 직조물에 부착하는 형태이기 때문에 일반적인 면직, 실크, 합성섬유 직물 등에 태양전지의 기능을 부여하고자 하는 경우 활용 가치가 높다고 판단된다.

삽입형 직조 태양전지는 직조 과정 중, 전체 직조물의 일부분에만 광전극과 상대전극을 삽입하여 결과적으로 전체 직조물의 일부에 태양전지가 삽입된 형태로 제조하는 것이다. 삽입형 직조 태양전지는 센서 등 전력 소모가 크지 않은 응용처에 소규모의 전력을 공급함과 동시에, 나머지 부분은 직조물 자체의 활용을 극대화하기 위하여 개발되었다.

일체형 직조 태양전지는 3중직 구조의 3차원 직조물로 종이형 태양전지의 구조가 직조물로 대체된 것이다. 광전극, 전해질, 상대전극 부분이 각각의 층을

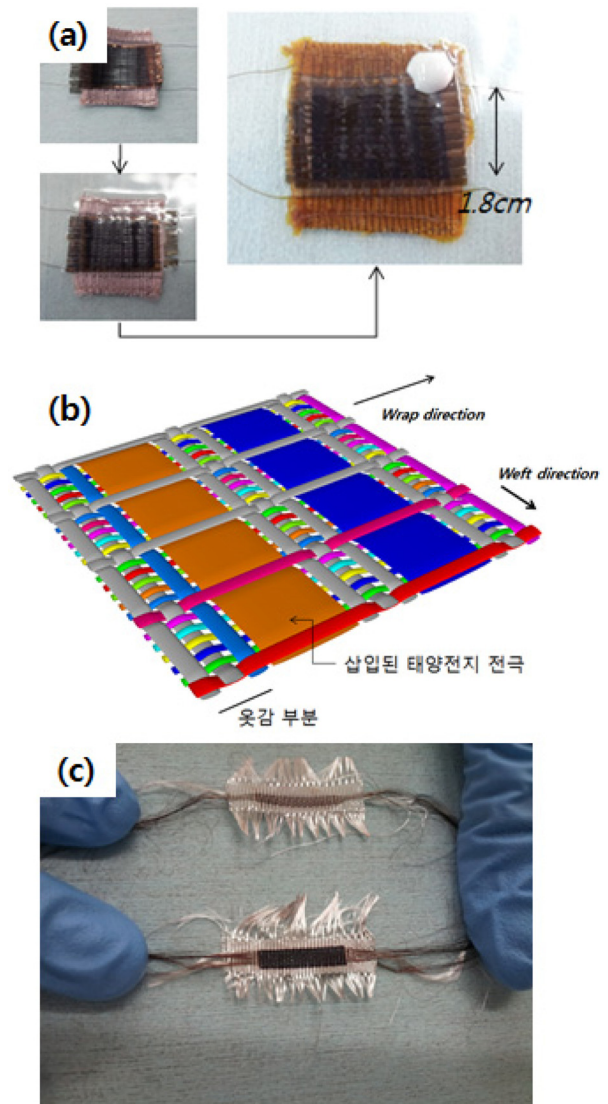


그림 5. 부착형 직조 염료감응형 태양전지 (a), 삽입형 직조 염료감응형 태양전지(b)의 개념도 및 일체형 직조 염료감응형 태양전지(c).

형성하며 직조되며, 동시에 서로 interlocking되어 있는 3차원 구조의 3중직 구조로 대면적의 직조 태양전지를 제조하여 커튼, 블라인드, 천막 등에 활용하여 많은 전력을 태양전지를 통해 획득하기 위하여 개발되었다.

직조형 태양전지는 일반 직조물의 무한한 종류의 패턴과 weaving, knitting, braiding 등의 다양한 직조 기법을 활용하여, 구조와 응용범위가 계속 확대될 가능성이 높은 기술로 판단된다. 또한, 최근 복합재료 분야에서 새롭게 개발된 여러 3차원 직조 공정을 활용할 경우, 다양한 구조물에 응용이 가능할 것으로 기

대된다.

3. 결론

태양전지는 미래에 가장 기대되는 신재생에너지원으로 기존의 인공위성, 낙도, 대규모 발전소에서 활용되던 것이 점차 생활 밀착형으로 발전하여 건물일체형, 기기일체형 태양전지로 발전하고 있다. 이 과정에서 직조형 태양전지는 직조물이 갖는 유연성과 기계적 내구성을 태양전지에 부여함으로써 향후 태양전지가 생활 밀착형으로 정착하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 염료감응형 직조 태양전지는 저광량 환경에서 고효율로 전력을 생산할 수 있으며 직조, 인쇄, 염색 공정을 활용하여 대량생산이 가능하기 때문에 향후 미래형 태양전지로서 전망이 밝을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Bach, U., Lupo, D., Comte, P., Moser, J., Weissörtel, F., Salbeck, J., Spreitzer, H., and Grätzel, M. (1998), Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon- to-electron conversion efficiencies, *Nature*. 395 583-585.
- Cha, S.I., Kim, Y., Hwang, K.H., Shin, Y., Seo, S.H., and Lee, D.Y. (2012), Dye-sensitized solar cells on glass paper: TCO-free highly bendable dye-sensitized solar cells inspired by the traditional Korean door structure, *Energy & Environmental Science*. 5, 6071-6075.
- Chen, T., Qiu, L., Cai, Z., Gong, F., Yang, Z., Wang, Z., and Peng, H. (2012), Intertwined aligned carbon nanotube fiber based dye-sensitized solar cells, *Nano Letters*. 12, 2568-2572.
- Dye-Sensitized Solar Cells (2009), *Angewandte Chemie*. 121, 9143-9147.
- Fan, X., Chu, Z., Wang, F., Zhang, C., Chen, L., Tang, Y., and Zou, D. (2008), Wire-Shaped Flexible Dye-sensitized Solar Cells, *Adv Mater*. 20, 592-595.
- Lenzmann, F., and Kroon, J. (2007), Recent advances in dye-sensitized solar cells, *Advances in OptoElectronics*. 2007.
- Lv, Z., Yu, J., Wu, H., Shang, J., Wang, D., Hou, S., Fu, Y., Wu, K., and Zou, D. (2012), Highly efficient and completely flexible fiber-shaped dye-sensitized solar cell based on TiO₂ nanotube array, *Nanoscale*. 4, 1248-1253.
- Pan, S., Yang, Z., Chen, P., Deng, J., Li, H., and Peng, H. (2014), Wearable Solar Cells by Stacking Textile Electrodes, *Angewandte Chemie*.
- Snaith, H. J., and Schmidt-Mende, L. (2007), Advances in liquid-electrolyte and solid-state dye-sensitized solar cells, *Adv Mater*. 19, 3187-3200.
- Weintraub, B., Wei, Y., and Wang, Z.L., Optical Fiber/ Nanowire Hybrid Structures for Efficient Three-Dimensional
- Zou, D., Wang, D., Chu, Z., Lv, Z., and Fan, X. (2010), Fiber-shaped flexible solar cells, *Coord. Chem. Rev.* 254 1169-1178.