

# 인체 부착형 전자기기를 위한 에너지 융합 소자 개발 동향

김재광<sup>1</sup>, 조중상<sup>2</sup>, 강동원<sup>3</sup>, 정상문<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>청주대학교 에너지&광기술 융합부, 에너지&응용화학 전공, <sup>2</sup>충북대학교 공업화학과,

<sup>3</sup>중앙대학교 에너지 시스템공학부, <sup>4,\*</sup>충북대학교 화학공학과

\*smjeong@chungbuk.ac.kr

## 1. 서론

우리 생활 속에서 전자기기는 다양한 형태로 개발되고 사용되고 있다. 대형 전자기기는 휴대의 한계성 때문에 고정되어 있는 에너지를 통하여 전기가 공급되지만 휴대용 전자기기는 전기를 공급하기 위한 에너지원으로 휴대가 간편한 배터리를 사용하고 있다. 과거에 휴대에 중점을 두어 한번 쓰고 버리는 일차전지가 주로 사용되었다면, 현재 사용되는 대부분의 휴대용 전자기기는 반복 사용이 가능한 이차전지를 에너지원으로 채용하고 있다.

이러한 이차전지에는 니켈-카드뮴 전지, 니켈-MH 전지, 슈퍼커패시터, 리튬 이온전지 등이 있으며 가장 작은 공간에 가장 많은 에너지를 저장할 수 있는 고 에너지 밀도의 배터리는 리튬이온 전지이다. 전자기기를 장시간 사용하거나 많은 에너지를 필요로 할 때 대부분 리튬이온 전지를 사용하고 있다.

리튬이온 전지는 형태가 변형되지 않는 휴대용 전자기기에서부터 변형이 가능한 플렉서블 전자기기까지 그 사용 영역이 확대되어가고 있다. 최근 폴더블 스마트폰의 관심과 함께 리튬이온 전지 또한 플렉서블에서 폴더블 특성까지 요구된다. 여기에 아직은 연구가 활발히 이루어지지 않고 있지만 인체에 부착이 가능한 전자기기를 위한 스트레처블 리튬이온 전지에 관한 연구도 조금씩 진행되어 지고 있다.

그러나 에너지 저장 소재인 이차전지는 충전을 해야 사용할 수 있다는 한계를 지니고 있다. 수시로 충전 여부를 확인하지 않으면, 필요할 때 휴대용 전

자기기를 사용하지 못하는 상황이 발생할 수 있으며 외부 전원 연결에 의한 충전으로 친환경적인 에너지 원 이라고도 말할 수가 없다. 이와 같은 이차전지 사용 한계를 극복하기 위하여 자가 에너지 발전-저장이 가능한 에너지 융합 소자 개발의 필요성이 대두되고 있다. 압전 에너지 발전소자와 슈퍼커패시터 에너지 저장 소자가 일체화된 시스템, 태양전지 에너지 발전 소자와 리튬이온 전지 에너지 저장소자가 융합된 시스템(그림 1) 등이 그 예이다[1].

에너지 발전과 저장이 한 디바이스 내에서 일어나는 에너지 융합 소자를 휴대용 전자기기에 적용한다면, 이 휴대용 전지기는 반영구적으로 사용이 가능할 것이다. 특히 건강 진단이나 위치 확인 등

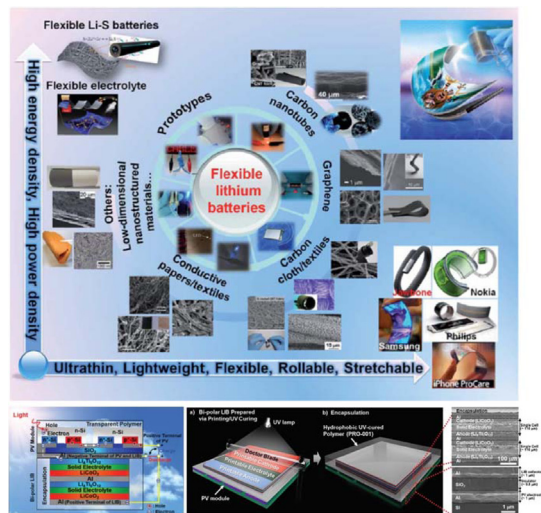


그림 1. 가변형 이차전지의 발전 경향(위)과 실리콘 태양전지와 리튬이온 전지가 일체화된 에너지 융합 소자(아래)[1].

을 위한 인체 부착형 전자기기는 무시 충전을 할 때 번거로움이 많아 에너지 융합 소자의 적용이 꼭 필요한 분야이다. 이러한 인체부착형 전자기기를 위한 에너지 융합 소자에서 에너지 발전 소자와 저장 소자는 모두 형태의 변형이 가능하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 에너지 융합 소자의 핵심 기술인 변형이 가능한 에너지 발전 소자인 태양전지와 에너지 저장 소자인 리튬이온 전지에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 가변형 태양전지

플렉서블 및 스트레처블 태양전지는 일반적으로 poly(ethylene terephthalate)(PET)나 poly(ethylene naphthalate)(PEN) 등의 기판에 제작되며, 저온 공정과 우수한 광기전력 특성에 적합한 소재가 요구된다. 염료감응형 및 유기 태양전지에 비해서 최근 급부상하는 페로브스카이트 태양전지는 앞서 언급된 조건들을 만족시키며 큰 관심과 함께 많은 연구가 이루어지고 있다. 2009년에 3.8%의 효율로 페로브스카이트 소재로의 가능성이 보고된 후 2014년에 이미 20%의 효율이 달성된 바 있으며, 최근 23.3%에 달하는 효율이 2018년에 보고되었다. 플렉서블 태양전지는 주로 효율이 rigid 기판에 비해서 떨어지는 경향이 있는데 그럼에도 불구하고 18%에 육박하는 우수한 성능이 보고된 바 있다.

최근 많이 연구되어 온 organo-metal halide 페로브스카이트(methylammonium lead triiodide, MAPbI<sub>3</sub>)는 300~800 nm 파장 대역에서 태양광을 강하게 흡수하며 500 nm 수준의 박막 두께로도 20% 수준의 변환 효율을 낼 수 있다[2]. 이는 결정질 실리콘 보다 높은 광흡수 특성이며, 수~수십 micron에 이르는 두께를 갖는 실리콘 태양전지보다 매우 얇음에도 근접한 변환 효율을 보일 수 있는 이유가 된다. 또한 박막 페로브스카이트는 실리콘 결정질 대비 더 우수한 유연성을 가질 수 있으며, 조성 변화에 따라 밴드갭을 바꿀 수 있어서 외부로 보여지는 색을 변화시킬 수 있다는 점도 매력이다[3-5]. 이러한 페로브스카이트는 입

사광에 의해 생성된 캐리어의 긴 수명, 긴 확산 거리, 낮은 재결합률 특성으로 인해 고효율 태양전지를 위한 광흡수층으로서 적절하다[6, 7]. 게다가 100도 수준의 낮은 공정 온도로도 제작이 가능하여 낮은 가격의 플라스틱 기판에도 적용이 가능하기 때문에, 플렉서블 기판에 낮은 원가로 대면적의 모듈 제작이 가능하다는 막강한 잠재력을 갖추고 있다.

플렉서블 페로브스카이트 태양전지의 구현을 위해서는 소자 구조와 더불어 플렉서블 기판, 투명전극 및 전하 수송층에 대한 관련 기술이 최적화될 필요가 있다. 먼저, 소자 구조의 경우 기판은 플라스틱 혹은 금속 foil에 기반한다. 페로브스카이트 광흡수층은 주로 전자수송층(electron transport layer), 정공수송층(hole transport layer)이 전후로 접촉을 이루어 각 계면에서 전자 및 정공을 선택적으로 분리 및 추출하게 된다. 소자 구조는 전형적으로 염료감응형 태양전지에서 출발했던 것처럼 mesoporous 구조와 저온 공정이 손쉬운 planar 구조로 나뉠 수 있다. 사실상 플렉서블 페로브스카이트 태양전지라고 해서 rigid 형태의 소자 구조와 비교 시에 유연성을 띄는 기판을 활용하는 것이 주된 차이점이며, 낮은 공정 온도 등의 유연성 기판에 적절한 소재/공정을 고려 및 적용한다는 것이 부가적인 차이점이다.

기판의 경우에는 낮은 가격, 우수한 투과율 및 유연성 등을 감안하여 앞서 언급된 PET 및 PEN 이 널리 적용되고 있다. 단, 이들은 고온 공정에 적합하지 않으며 이 때문에 열에 더욱 안정적인 polyimide(PI) 기판 역시 많은 검토가 이루어졌으나 특유의 노란색을 띄는 특성 때문에 기판의 투명성 측면에서 불리한 모습을 보인다. 반면, 그림 2(a)와 같이 색을 띄지 않는 PI(colorless PI, CPI) 기판이 깊은 연구가 진행되었고[8, 9], ITO 투명전극을 CPI 기판에 300도의 공정에서 성공적으로 코팅한 연구결과가 발표되었다. 약 83%를 상회하는 투과율과 57.8 Ω/sq의 면저항 값은 기존에 널리 이용되어 온 PET/ITO 구조를 넘어서는 특성이며, 이 기판(60 μm의 CPI)을 활용하여 제작된 플렉서블 페로브스카이트 태양전지가 15.5%의 변환효

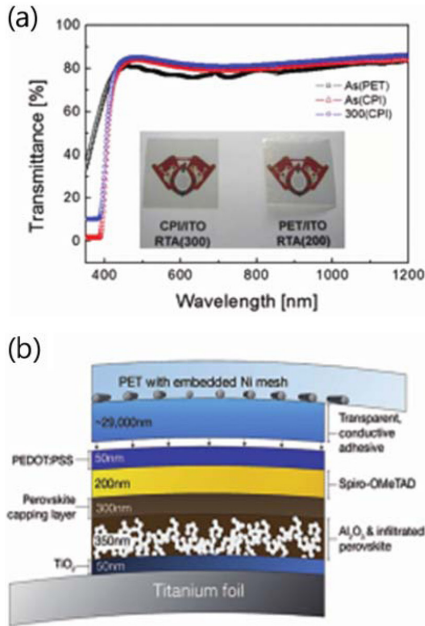


그림 2. (a) PET/ITO, CPI/ITO, 열처리한 CPI/ITO 기판들의 광학적 투과율(Inset 그림은 열처리 온도에 따른 기판 별 차이) [10], (b) 라미네이션 된 니켈 mesh를 활용하는 타이타늄 foil 기판에 제작된 페로브스카이트 태양전지 구조[11].

율을 보인 바 있다[10].

한편, 금속 기판을 적용하면 앞서 언급된 폴리머 기판에 비하여 더 낮은 면저항과 월등히 우수한 열안정성을 확보하면서도 적정 수준의 유연성을 띄기 때문에 장점이 있다. 한 예로, 그림 2 (b)에서 보는 것처럼, 타이타늄 foil 기판에 페로브스카이트 태양전지를 제작한 연구로, PEDOT:PSS가 코팅된 니켈 mesh를 전면 투명전극으로 활용하고자 라미네이션 공정을 적용하였다. 또한 정공수송층으로  $V_2O_5$  를 도핑한 spiro-OMeTAD와 PEDOT:PSS를 2중 구조로 적용하여, 타이타늄 foil 기판의 우수한 굽힘 특성을 보이는 플렉서블 소자를 제작하고 10.3%의 효율을 달성하였다[11]. 다른 연구결과에서는 Ti/TiO<sub>2</sub> 나노와이어를 활용한 음극과 PEN/ITO/PEDOT:PSS 구조의 양극을 활용하여 금속 기판 기반의 플렉서블 페로브스카이트 태양전지에서 최고 효율인 13.07%를 달성하였다[12].

위 두 기판과 별개로, 매우 얇으며 플렉서블 유리 기판을 활용하여 제작한 페로브스카이트 소자가

12.06%의 효율을 보였으며, 이 결과를 기초로 유리 기판 전면부에 nanocone 어레이 구조를 반사방지막으로 적용하여 향상된 효율인 13.14%를 달성한 연구 성과가 발표된 바 있다[13]. 또한, 반사방지막을 MgF<sub>2</sub> 소재를 활용하고, ITO 대신 indium zinc oxide(IZO)를 활용하여 18%를 넘어서는 효율이 달성되었다[14].

상기의 기판 외에도, 투명 전극 또한 플렉서블 소자 구현에 있어서 기술적 이슈가 존재한다. 대표적인 투명 전극인 ITO는 우수한 특성으로 고효율 페로브스카이트 태양전지 제작에 핵심 요소이지만 다양한 굽힘 시험에서 열화되는 모습을 보이는 문제점이 있다. PEN/ITO 기판에 제작된 소자가 1 mm 수준의 반지름으로 1회의 굽힘 시험 시에는 7%의 효율 감소를 보였다지만 10회의 굽힘 반복 후에는 심각한 열화 현상을 나타냄이 밝혀졌다. 단, 10 mm의 반지름으로 시험했을 경우에는, 1,000 회의 굽힘 사이클 후에도 단지 5% 수준의 열화를 보였으며, 열화의 중심에는 ITO 에 크랙(crack) 발생이 주요한 원인으로 꼽힌다[15, 16]. ITO 기반의 투명 전극에서 발생하는 이러한 단점을 극복하기 위하여, 그래핀 전극을 활용하여 ITO 전극 대비 큰 차이 없는 16.8%의 효율을

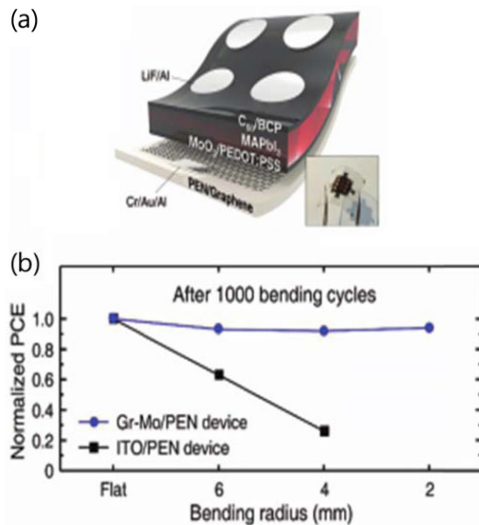


그림 3. (a) 그래핀 기반의 플렉서블 페로브스카이트 태양전지 구조, (b) 기존의 ITO 및 그래핀 전극을 활용한 플렉서블 태양전지의 1000회 굽힘 테스트 후 굽힘 반지름에 따른 효율 변화[20].

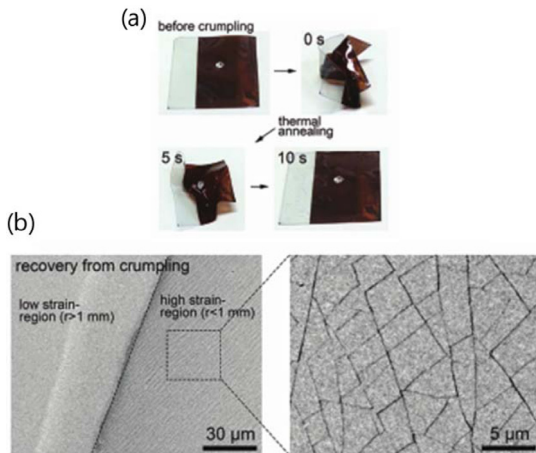


그림 4. (a) 구김 전/후의 스트레처블 페로브스카이트 태양전지 이미지 (b) 구김 후의 변형 정도에 따른 페로브스카이트 표면의 SEM 이미지[27].

달성한 결과가 발표되었다(그림 3). 더욱 주목할 것은 가혹한 굽힘 시험인 2~4 mm 의 반지름 수준에서도 1,000 회 반복 후 90% 이상의 효율 유지와 더불어 5,000 회의 반복 후에도 초기 효율 대비 85% 수준을 유지하는 결과가 발표되었다 [17]. 이러한 그래핀 소재의 활용은 기존의 투명 전극 없이도 플렉서블 태양전지 구동에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 그래핀 이외에도 전도성을 향상시킨 PEDOT:PSS 소재 또한 우수한 유연성을 가지면서 대체 전극으로도 연구되고 있다[18-20].

한편, 전자수송층도 플렉서블 기판에 널리 적용되기 위해서는 저온 공정에 적합한 형태로 최적화될 필요가 있고, 소자 구조에 따라 각각 연구가 깊게 진행되고 있다. 저온 공정이 손쉬운 p-i-n 구조의 경우 기존의 PEDOT:PSS의 흡습성과 산성을 띄는 특성 때문에 NiO<sub>x</sub>로 대체하는 연구가 많이 진행되었다. 그러나 주로 300도 이상의 고온 열처리를 필요로 하는데, 130도의 저온에서 PEN/ITO 기판에 박막을 성공적으로 형성하여 13.43%의 효율을 달성한 결과는 주목할 만하다[21]. 게다가 NiO<sub>x</sub>를 나노입자 형태로 합성 후에 도포하게 되면 사실상 상온에서도 공정이 가능한데, 이를 통해 14.53%의 결과가 발표된 것은 중요한 성과이다[22]. 또한 특유의 낮은 전도

성을 극복하기 위하여 NiO<sub>x</sub>에 Cu를 도핑하는 연구되었고 이를 통해 17.16%까지의 성능 향상이 이루어진 바 있다[23]. 한편, 유사한 구조에서 NiO<sub>x</sub> 무기 소재 대신에 PTAA 정공 수송층을 활용하여 18.1%의 우수 효율을 달성한 결과는 유기 소재의 활용 가능성에도 전망이 밝다고 볼 수 있다[24]. 반대로 n-i-p 구조에서는 SnO<sub>2</sub> 전자수송층을 활용한 결과가 단연 눈에 띄는데, 플라즈마를 활용한 원자 단위 증착법(plasma-enhanced atomic layer deposition, PEALD)을 활용하여 100 도의 저온에서 제작한 플렉서블 태양전지 효율이 16.8%에 이르렀으며[25], PEALD 공정에 수증기 처리를 추가한 SnO<sub>2</sub> 전자수송층을 활용하여 최대 18.36%에 이르는 최고 효율이 기록된 바 있다[26]. 지금까지 논의된 플렉서블 특성 이외에도, 웨어러블 기기에 응용하기 위해서는 스트레처블 특성도 중요하게 되는데, 소자가 복잡한 형태의 곡면 형상 등에도 성능을 유지할 수 있는 가변성을 가질 필요가 있다. 적절한 스트레처블 기판과 전극을 활용하면 해당 소자를 제작할 수 있게 되는데 최근 연구 결과에 의하면 NOA 63 / PEDOT:PSS의 플렉서블 기판/전극을 활용하여 제작한 태양전지가 그림 4와 같이 심각한 구김 후에도 초기 효율 대비 56%를 유지하며 6.07%의 변환 효율을 기록한 바 있다. 스트레스가 큰 부분(굽힘 반지름 < 1 mm)에서는 그림과 같이 페로브스카이트에서 크랙 현상이 발견되었다(그림 4(b))[27]. 그러나, 50 회의 구김 시험 후에도 5.88%의 효율을 유지하면서 향후 옷감과 같은 웨어러블 응용처에도 이러한 페로브스카이트 태양전지의 응용 가능성에 대한 전망이 밝다고 볼 수 있다.

### 가변형 리튬이온 전지

기존 에너지 저장 소자의 전극은 유연성(flexibility) 및 신축성(stretchability)이 결여된 딱딱한 소재가 사용되어 왔으나 에너지 저장 소자의 응용분야가 확대됨에 따라 flexible, 더 나아가 stretchable 특성을 갖는 전극 소재에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 전극 소재는 wearable 분야에만 국한되지 않고 생체

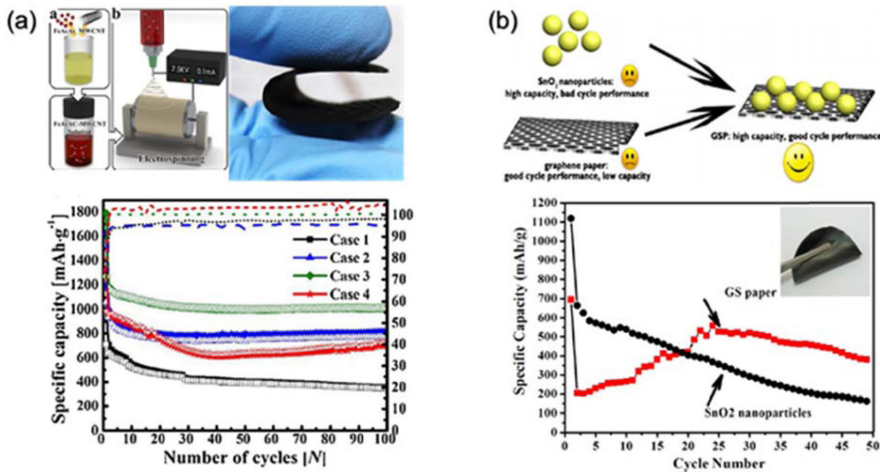


그림 5. (a) FeO<sub>x</sub>와 CNT가 포함된 탄소 복합 섬유 시트의 특성 및 서로 다른 양의 전구체를 사용한 복합섬유시트의 사이클 성능[33], (b) SnO<sub>2</sub> 나노 입자와 그래핀으로 이루어진 시트 형태 전극 및 사이클 성능[34].

내 이식 가능한 의료 기기 등 새로운 분야로 연구 확장 중이다[28-30]. 따라서 여러 연구 그룹에 의해 전극의 유연성 및 우수한 기계적 강도 확보를 위한 전극 소재 연구가 진행 중이며 이는 크게 두 가지의 전극 설계 방법으로 분류된다. 첫번째, 기존 분말 형태의 전극 활 물질을 flexible 기판 위에 코팅 또는 증착 시는 방법으로서 유연성 및 기계적 강도가 확보된 전극의 제조가 가능하다[31, 32]. 이를 위해, 전도성 및 비전도성 기판이 사용될 수 있으며 전도성 기판의 경우, 기판이 집전체 역할 또한 수행 가능하므로 전지의 집전체를 대체할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 전극 활 물질을 슬러리 화하여 flexible 기판에 코팅 시, 계면 간 접착을 위한 바인더가 사용됨으로써 전지의 에너지 밀도가 감소되며 계면 간 접착이 약한 경우 기판으로부터 박리된 전극 활 물질은 전지의 수명을 크게 감소시킬 수 있다. 이를 개선하기 위한 두번째 전극 설계 방법은 분말 형태의 전극 활 물질을 높은 전기전도도를 갖는 CNT 또는 그래핀과 복합하는 방법이다[33, 34]. 이 경우, 바인더가 불필요하며 CNT 또는 그래핀 복합체가 기판을 대체할 수 있기 때문에 전지의 에너지 밀도를 높여줄 수 있다. 그러나, 이 방법은 flexible 전극에 필요한 유연성 및 기계적 강도를 충분히 만족시키기 어려우며 제조

공정의 효율이 낮은 단점이 있다. Joshi 등은 전기방사공정과 후 열처리과정을 통해 FeO<sub>x</sub>와 CNT가 포함된 탄소 복합 섬유를 제조하여 flexible 전극에 적용했다[33]. FeO<sub>x</sub>/CNT 복합 섬유 시트는 그림 5a에서처럼 큰 각도로 구부렸을 때 파괴되지 않는 유연성을 가지며 충·방전 과정 중 FeO<sub>x</sub>의 큰 부피변화를 효과적으로 수용하고 높은 전기전도도를 제공하여 100 mA g<sup>-1</sup>의 전류밀도에서 100 회 충·방전 후 1,008 mA h g<sup>-1</sup>의 용량이 유지됨을 보고하였다(그림 5a). Liang 등은 상용의 SnO<sub>2</sub> 분말을 여과하여 SnO<sub>2</sub> 나노 입자를 선별 열처리한 후 그래핀과 복합하여 시트 형태의 flexible 전극을 제조했다[34]. SnO<sub>2</sub>/그래핀 복합 전극은 반으로 접어도 구조체의 파괴가 일어나지 않았으며, 기존의 SnO<sub>2</sub> 단일 나노 입자보다 우수한 수명 특성을 보고하였다.

최근 인체 부착 가능한 전자기기에 대한 관심이 증가하면서 flexible 특성뿐 아니라 인장 및 수축에 따른 자유 변형이 가능하며 평면의 형태에 국한되지 않는 stretchable 전극 개발이 진행 중이다[35-37]. Stretchable 전극 소자 설계는 크게 두가지 방법으로 분류된다. 첫번째, 기존의 신축성이 없는 전극을 사용하여 전체 소자의 구조를 구부리거나 접어서 신축성을 부여하는 방법이다 [38-40]. 즉, 개별 전극은 신

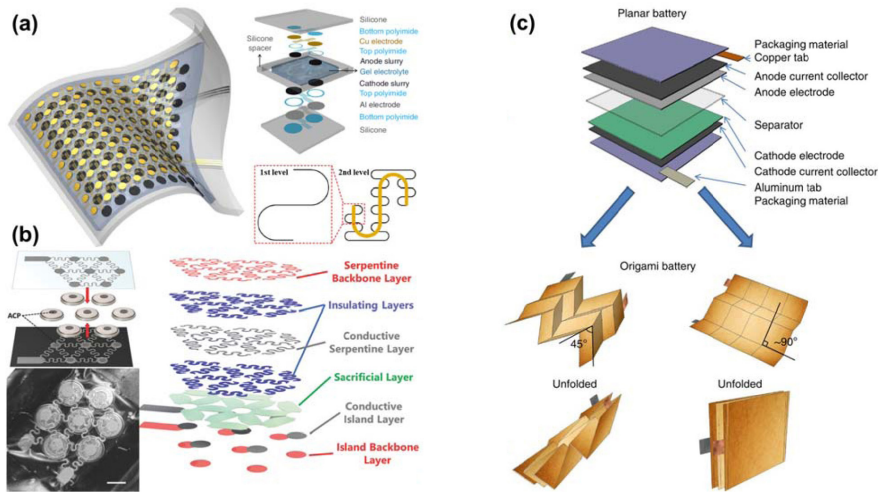


그림 6. (a) 자기유사성을 갖는 S자형 곡선 회로를 병렬로 연결한 stretchable 리튬 이온배터리(왼쪽), 배터리 내부 구조(오른쪽 위)와 '자기유사성' S자형의 회로(오른쪽 아래)[38]. (b) 'island-bridge' 형태의 회로로 연결된 배터리 팩 삽화(왼쪽 위), 사진(왼쪽 아래)과 'island-bridge' 형태의 회로구성 설명 삽화(오른쪽)[39]. (c) 기존 리튬 이온배터리 구조(위)와 종이접기 방식을 통한 리튬 이온배터리 구조(아래)[40].

축성이 없으나 전극들 간 회로를 연결한 후 전체 소자의 구조를 stretchable하게 설계할 수 있다. Xu 등은 그림 6a와 같이 100개의 개별 전극을 자기유사성을 갖는 S자형 곡선 회로로 병렬 연결 후 stretchable polyimide 및 실리콘으로 회로, 집전체, 및 셀 등을 패키징하여 인장 및 수축이 가능한 리튬 이온배터리로 제작했다[38]. 제작된 stretchable 리튬 이온배터리는 약  $1.1 \text{ mA h cm}^{-2}$ 의 용량을 나타냈으며, 300% 변형 후에도 성능을 유지했다. Yin 등은 그림 6b와 같이 스크린 프린팅 기법을 이용해 'island-bridge' 형태의 전도성 회로를 제작 후 island 위치에 코인 셀을 연결하여 stretchable 배터리 팩을 구성했다[39]. 제작된 소자는 100% 인장된 상태에서도  $5 \Omega$  이하의 낮은 셀 저항을 보고했다. Song 등은 그림 6c와 같이 종이접기 방식을 통해 stretchable 리튬 이온배터리를 제작하여 큰 각도로 접고 구부릴 수 있을 뿐 아니라 꺾을 수도 있으며 1,300% 배터리의 변형 후에도 출력 전압에 큰 변화가 없음을 보고했다[40].

두번째 stretchable 전극 소자의 설계 방법은 본질적으로 인장/수축이 가능한 전극 소자를 제조하는 방법으로서 구조적으로 신축성을 부여하는 첫 번째 전극 소자 설계 방법에 비해 보다 우수한 신축성

을 갖는다[41-43]. 이 때, 유기물 기반의 재료는 뛰어난 신축성을 가지나 기존 전극 재료로 사용되는 탄소 및 무기 재료에 비해 매우 열악한 전기화학적 성능을 나타내기 때문에 신축성이 없는 전극 재료를 물결 및 코일 등의 구조로 제작하는 방법이 널리 사용되고 있다. 물결 구조로 전극을 제작하는 방법은 신축성을 갖는 기판을 인장한 상태에서 전극 활물질, 전해질 코팅 공정 후, 인장력을 제거하는 방식이 대표적이다. 이 밖에도 3차원의 스펀지 구조로 전극을 제조하는 방법이 보고되었다. Lui 등은 각설탕을 템플릿으로 신축성을 갖는 polydimethylsiloxane (PDMS) 스펀지를 제작한 후,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 와  $\text{LiFePO}_4$ 를 drop-cast 방법으로 코팅하여 각각 stretchable 리튬 이온배터리의 음극과 양극으로 사용했다[41]. 3차원의 스펀지 구조 전극은 제한된 표면적을 갖는 기존의 금속 전극과는 달리 유기적으로 연결되어 있기 때문에 뛰어난 신축성과 전기전도성을 가지며, 원하는 전극 물질을 쉽게 코팅하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 그림 7a에 나타난 바와 같이, 기존의 금속 전극은 인장시켰을 때 전극 활물질에 균열이 발생하는 것과 달리 3차원의 스펀지 구조 전극은 인장 후에도 전극 활물질에 균열이 발생하지 않기 때

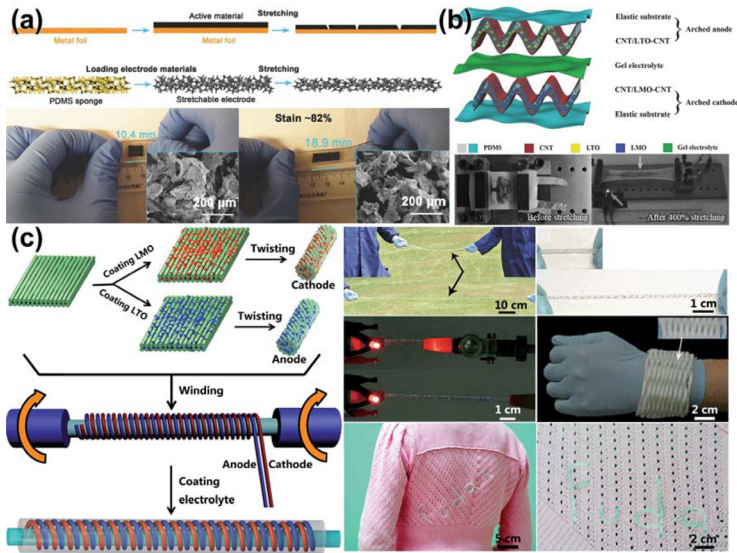


그림 7. (a) 기존 전극과 3차원 스펀지 구조 전극의 비교 삽화(위), 변형을 가하기 전(왼쪽 아래)과 후(오른쪽 아래) 사진[41]. (b) 물결 구조로 제작된 전극의 구성 삽화(위), 변형을 가하기 전(왼쪽 아래)과 후(오른쪽 아래) 사진[42]. (c) 코일 구조로 제작된 전극을 사용한 1차원 형태의 리튬 이온전지의 제작 및 구성 삽화(왼쪽)와 제작된 리튬이온 전지의 신축성 및 활용 사진[43].

문에 안정적인 전극 설계가 가능하다. 제조된 3차원 스펀지 전극은 82~91%의 변형을 500회 반복한 후에도 구조를 유지했으며 적은 용량감소만이 보고되었다. 또한 3차원 스펀지 LTO전극은 33%, 80% 변형시킨 상태에서도 큰 성능 차이를 보이지 않았다. Weng 등은 물결 형태를 갖는 샌드위치 구조의 CNT/LTO-CNT/CNT와 CNT/LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-CNT/CNT 전극을 제조하고 각각 stretchable 리튬 이온전지의 음극과 양극으로 사용했다[42]. 물결 형태로 전극을 제작하기 위해 PDMS를 인장한 후 CNT와 LTO, LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(LMO)을 코팅한 다음 인장력을 제거하여 물결 형태를 갖는 샌드위치 구조의 stretchable 전극을 제조했다. 제작한 리튬 이온전지는 400%로 100회 인장 후에도 안정적인 전기화학 성능을 나타냈다. Zhang 등은 CNT, LMO, 그리고 LTO를 코일 형태의 전극으로 제조 후 리튬 이온전지의 음극과 양극으로 사용하였다[43]. 제작된 리튬 이온배터리는 장 축 방향으로 600%까지 인장되며 우수한 전기화학 성능을 보고하였다. 현재 stretchable 전극에 대한 연구는 태동기이며 구조적으로 신축성이 부여된 전극 소자는 본질적으로 신축성을 갖는 전극에 비해 제작이 용이하지만 신축성에

한계가 있기 때문에 상용화에 제약이 있다. 따라서 앞으로 신축성을 갖는 소자에 대한 심층적이고 다양한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

리튬이온 전지의 특성을 결정하는 중요한 요소 중 하나는 전해질이라고 할 수 있다. 전지의 전기화학 반응 동안 이온의 운반 매개체 역할을 하는 전해질은 이온을 부 반응 없이 빠르게 전달하여야 하며 가변형 전지에서는 형태의 변형이 가능하며 동시에 기계적 강도를 지니고 있어야 한다. 이러한 요구 조건을 만족시키기 위하여 나노 또는 마이크로 파이버 형태의 고분자들이 그물 구조를 이루고 있는 겔 고분자 전해질이 많이 적용되고 있으며 전극과 함께 웨이비 구조로 제작되기도 한다. 겔 고분자 전해질의 고분자 소재로는 Polyvinylidene fluoride(PVdF) 계열의 고분자가 가장 많이 사용되며 신축성을 고려하여 고무계의 Styrene Butadiene Rubber(SBR)을 사용하기도 한다[44].

이러한 겔 고분자 전해질은 이온의 이동 특성을 향상 시키기에는 적합하나 가변형 전지에서 형태의 변형과 함께 고분자 파이버 사이의 공극에 채워져 있던 액체상 전해질이 누액되어 전지의 전기화학적

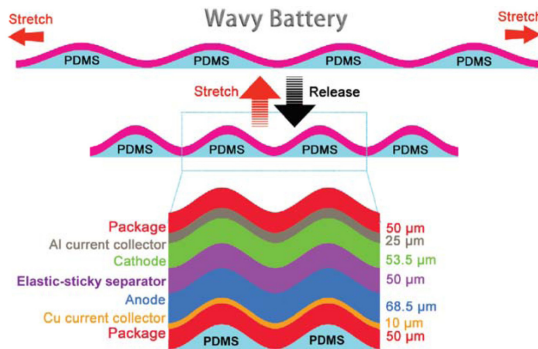


그림 8. PVdF 계 겔 고분자를 이용한 웨이비 구조의 가변형 전지[44].

성능을 저하시킬 수 있다.

가변형 전지에서 안정성에 중점을 두어 적용되는 전해질은 Poly(ethylene oxide)(PEO) 계열의 고체상 전해질이다. 이 고체상 고분자 전해질은 고분자 사슬에 달려 있는 극성 원자의 이온 호핑 원리에 의하여 이온이 이동하기 때문에 겔 고분자 전해질 보다 이온 이동 활성 에너지가 높아 이온전도도가 낮다. 하지만 전지의 변형에도 특성을 안정적으로 유지할 수 있다는 장점을 지나고 있다. 따라서 우수한 가변형 전지를 개발하기 위해서는 고 용량, 고 에너지 밀도의 가변형 전극과 고 이온전도도, 고 안정성의 전해질이 지속적으로 개발되어야 한다.

### 3. 결론

인체 부착형 전자기기의 에너지 공급 장치로서 가변형 에너지 융합 소자는 친환경적으로 기기의 반영구적인 사용을 가능하게 할 수 있는 유망한 미래 기술이다. 하지만 아직, 기술 개발이 기초 단계에 머무르고 있다. 앞으로 해결해 나가야 할 많은 문제들이 있다. 우선 에너지 융합 소자의 핵심 기술인 에너지 발전과 저장 소자가 우수한 성능을 구현 할 수가 있어야 한다. 에너지 발전 소자인 태양전지에서 플렉서블 및 스트레처블 특성을 구현하기 위해서 페로브스카이트 태양전지가 기관, 투명 전극, 전하수송층 등의 다방면에서 연구가 진행되고 있으며, 특히 플렉서블 분야에서는 18% 이상의 효율이 보고되면서 응용 가능성에 대한 향후 전망을 밝게 하고 있다. 스

트레처블 분야도 연구가 활발히 진행되고 있지만, 변형/구김 등의 스트레스가 누적되면서 페로브스카이트 광흡수층의 열화가 가속화되는 것이 밝혀진 바 있어서 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 실질적인 상용화를 위해서는 소자의 대면적화 기술이 필수적이면서도 매우 도전적인데, 앞서 언급된 것처럼 현재까지 개발된 성능은 소면적(<1 cm<sup>2</sup>)에 주로 유효하기 때문이다. 게다가 플렉서블/스트레처블 태양전지의 구동 수명을 유의미하게 가져가기 위해서는 소자의 보호층 개발이 이루어질 필요가 있다. 외부 환경에서의 수분이 소자 내부로 침투할 때 수명 감소에 큰 영향을 주기 때문에 플렉서블/스트레처블 소자 구조에 적합한 수분차단 및 소자 보호층 설계 기술 또한 중점적으로 개발되어야 한다. 가변형 리튬이온 전지에서 전극의 가변형과 함께 충분한 에너지 밀도를 공급할 수 있게 설계가 필요하며 고 용량을 확보와 기계적 강도 향상을 위한 새로운 소재의 개발과 공정도 필요하다. 전해질 부분에서는 이온전도도와 기계적 특성을 동시에 향상 시키기 위한 연구가 필요하며 가변형 전지의 안전성과 안정성을 확보하여야 한다. 이러한 고 성능의 에너지 발전 소자인 플렉서블 태양전지와 에너지 저장 소자인 리튬이온 전지가 일체화 되었을 때 융합 소자 내에서 높은 자가 에너지 저장 효율과 고 출력 에너지, 고 안정성을 얻을 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 교육부의 기초연구실 지원사업에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: 2018R1A4A1024691).

### 참고문헌

1. H.D. Um, K.H. Choi, I. Hwang, S.H. Kim, K. Seo, S.Y. Lee, Energy Environ. Sci., **10**, 931- 940 (2017).
2. M. A. Green, A. Ho-Baillie, H. J. Snaith, Nat. Photonics, **8**, 506 (2014).
3. G. E. Eperon, S. D. Stranks, C. Menelaou, M. B. Johnston, L. M. Herz, H. J. Snaith, Energy Environ. Sci., **7**, 982 (2014).

4. J. H. Noh, S. H. Im, J. H. Heo, T. N. Mandal, S. I. Seok, *Nano Lett.*, **13**, 1764 (2013).
5. Y. Ogomi, A. Morita, S. Tsukamoto, T. Saito, N. Fujikawa, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, S. S. Pandey, T. Ma, S. Hayase, *J. Phys. Chem. Lett.*, **5**, 1004 (2014).
6. S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, H. J. Snaith, *Science*, **342**, 341 (2013).
7. G. Xing, N. Mathews, S. Sun, S. S. Lim, Y. M. Lam, M. Grätzel, S. Mhaisalkar, T. C. Sum, *Science*, **342**, 344 (2013).
8. H.-j. Ni, J.-g. Liu, Z.-h. Wang, S.-y. Yang, *J. Ind. Eng. Chem.*, **28**, 16 (2015).
9. S.-B. Kang, H.-J. Kim, Y.-J. Noh, S.-I. Na, H.-K. Kim, *Nano Energy*, **11**, 179 (2015).
10. J.-I. Park, J. H. Heo, S.-H. Park, K. I. Hong, H. G. Jeong, S. H. Im, H.-K. Kim, *J. Power Sources*, **341**, 340 (2017).
11. J. Troughton, D. Bryant, K. Wojciechowski, M. J. Carnie, H. Snaith, D. A. Worsley, T. M. Watson, *J. Mater. Chem. A*, **3**, 9141 (2015).
12. Y. Xiao, G. Han, H. Zhou, J. Wu, *RSC Adv.*, **6**, 2778 (2016).
13. M. M. Tavakoli, K.-H. Tsui, Q. Zhang, J. He, Y. Yao, D. Li, Z. Fan, *ACS Nano*, **9**, 10287 (2015).
14. B. Dou, E. M. Miller, J. A. Christians, E. M. Sanehira, T. R. Klein, F. S. Barnes, S. E. Shaheen, S. M. Garner, S. Ghosh, A. Mallick, D. Basak, M. F. A. M. van Hest, *J. Phys. Chem. Lett.*, **8**, 4960 (2017).
15. J. H. Heo, M. H. Lee, H. J. Han, B. R. Patil, J. S. Yu, S. H. Im, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 1572 (2016).
16. J. H. Heo, M. Jahandar, S.-J. Moon, C. E. Song, S. H. Im, *J. Mater. Chem. C*, **5**, 2883 (2017).
17. J. Yoon, H. Sung, G. Lee, W. Cho, N. Ahn, H. S. Jung, M. Choi, *Energy Environ. Sci.*, **10**, 337 (2017).
18. D. Angmo, F. C. Krebs, *J. Appl. Polym. Sci.*, **129**, 1 (2013).
19. M. Dianetti, F. Di Giacomo, G. Polino, C. Ciceroni, A. Liscio, A. D'Epifanio, S. Licocchia, T. M. Brown, A. Di Carlo, F. Brunetti, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **140**, 150 (2015).
20. F. Qin, J. Tong, R. Ge, B. Luo, F. Jiang, T. Liu, Y. Jiang, Z. Xu, L. Mao, W. Meng, S. Xiong, Z. Li, L. Li, Y. Zhou, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 14017 (2016).
21. X. Yin, P. Chen, M. Que, Y. Xing, W. Que, C. Niu, J. Shao, *ACS Nano*, **10**, 3630 (2016).
22. H. Zhang, J. Cheng, F. Lin, H. He, J. Mao, K. S. Wong, A. K. Y. Jen, W. C. H. Choy, *ACS Nano*, **10**, 1503 (2016).
23. Q. He, K. Yao, X. Wang, X. Xia, S. Leng, F. Li, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 41887 (2017).
24. C. Bi, B. Chen, H. Wei, S. DeLuca, J. Huang, *Adv. Mater.*, **29**, 1605900 (2017).
25. C. Wang, D. Zhao, Y. Yu, N. Shrestha, C. R. Grice, W. Liao, A. J. Cimaroli, J. Chen, R. J. Ellingson, X. Zhao, Y. Yan, *Nano Energy*, **35**, 223 (2017).
26. C. Wang, L. Guan, D. Zhao, Y. Yu, C. R. Grice, Z. Song, R. A. Awni, J. Chen, J. Wang, X. Zhao, Y. Yan, *ACS Energy Lett.*, **2**, 2118 (2017).
27. M. Park, H. J. Kim, I. Jeong, J. Lee, H. Lee, H. J. Son, D.-E. Kim, M. J. Ko, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1501406 (2015).
28. J. A. Rogers, T. Someya and Y. G. Huang, *Science*, **327**, 1603 (2010).
29. H. Nishide and K. Oyaizu, *Science*, **319**, 737 (2008).
30. H. Gwon, J. Hong, H. Kim, D.-H. Seo, S. Jeon and K. Kang, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 538-551 (2014).
31. Y. Yan, C. Li, C. Liu, Z. Mutlu, B. Dong, J. Liu, C. S. Ozkan and M. Ozkan, *Carbon*, **142**, 238-244 (2019).
32. Y. Zhang, W. Bai, X. Cheng, J. Ren, W. Weng, P. Chen, X. Fang, Z. Zhang and H. Peng, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 14564-14568 (2014).
33. B. Joshi, E. Samuel, H. S. Jo, Y. I. Kim, S. Park, M. T. Swihart, W. Y. Yoon and S. S. Yoon, *Electrochim. Acta*, **253**, 479-488 (2017).
34. J. Liang, Y. Zhao, L. Guo and L. Li, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 5742-5748 (2012).
35. A. J. Bandodkar, J. Wang, *Trends Biotechnol.*, **32**, 363-371 (2014).
36. S. Choi, H. Lee, R. Ghaffari, T. Hyeon and D.-H. Kim, *Adv. Mater.*, **28**, 4203-4218 (2016).
37. D. Chen, Z. Lou, K. Jiang and G. Shen, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1800596 (2018).
38. S. Xu, Y. Zhang, J. Cho, J. Lee, X. Huang, L. Jia, J. A. Fan, Y. Su, J. Su, H. Zhang, H. Cheng, B. Lu, C. Yu, C. Chuang, T. Kim, T. Song, K. Shigetani, S. Kang, C. Dagdeviren, I. Petrov, P. V. Braun, Y. Huang, U. Paik and J. A. Rogers, *Nat. Commun.*, **4**, 1543 (2013).
39. L. Yin, J. K. Seo, J. Kurniawan, R. Kumar, J. Lv, L. Xie, X. Liu, S. Xu, Y. S. Meng and J. Wang, *Small*, **14**, 1800938 (2018).
40. Z. Song, T. Ma, R. Tang, Q. Cheng, X. Wang, D. Krishnaraju, R. Panat, C. K. Chan, H. Yu and H. Jiang, *Nat. Commun.*, **5**, 3140 (2014).
41. W. Liu, Z. Chen, G. Zhou, Y. Sun, H. R. Lee, C. Liu, H. Yao, Z. Bao and Y. Cui, *Adv. Mater.*, **28**, 3578-3583 (2016).
42. W. Weng, Q. Sun, Y. Zhang, S. He, Q. Wu, J. Deng, X. Fang, G. Guan, J. Ren and H. Peng, *Adv. Mater.*, **27**, 1363-1369 (2015).
43. Y. Zhang, W. Bai, J. Ren, W. Weng, H. Lin, Z. Zhang and H. Peng, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 11054-11059 (2014).
44. W. Liu, J. Chen, Z. Chen, K. Liu, G. Zhou, Y. Sun, M. S. Song, Z. Bao, Y. Cui, *Adv. Energy Mater.*, 1701076 (2017).