

플렉서블 전자소재 산업 동향

Flexible Electronic Materials Industry Trend

박종문 (J.M. Park, jmpark@etri.re.kr)

이수연 (S.Y. Lee, lsy1013@etri.re.kr)

노태문 (T.M. Roh, tmroh@etri.re.kr)

이정익 (J.I. Lee, jilee@etri.re.kr)

이진호 (J.H. Lee, leejinho@etri.re.kr)

반도체소부장기술센터 책임연구원

반도체소부장기술센터 기술실무원

반도체소부장기술센터 책임연구원/센터장

실감소자원천연구본부 책임연구원/본부장

소재부품원천연구본부 연구전문위원

ABSTRACT

In the era of the 4th industrial revolution, interest in flexible devices is increasing for information and communication technology electronic products. This is a hot technology field in which competition is intensifying to preoccupy the global market for flexible electronic devices because of the many advantages of ultra-lightweight, flexibility, design diversity, high applicability, and low cost. Some flexible electronic products have been commercialized in Korea, but they are still inadequate in terms of price versus performance, so technology development is required continuously. Particularly, the development of flexible electronic materials is emerging as a key factor for flexible electronic device applications. In this study, we will look into the flexible electronic material technology and industry trends following the trend of flexible technology changes in the display, secondary battery, and solar cell, which has emerged as national core industry and has secured global competitiveness. In addition, I want to introduce the Flexible Electronic Material Center, which was established to foster the flexible electronic material industry.

KEYWORDS 플렉서블 전자소재, 디스플레이, 이차전지, 태양전지

1. 서론

플렉서블(Flexible) 전자소재 기술은 10여 년 이
전부터 기술개발이 이루어져 왔으며, 최근에는 스
마트폰, 노트북, TV 등과 같은 IT 기기 등에 적용

되기 시작하였으며, 이러한 유연한 전자기기 제품
들의 바탕에는 다양한 플렉서블 전자소재 기술들
이 녹아 있다. 그중에 플렉서블 디스플레이(Flexible
Display) 분야는 폴더블(Foldable) 스마트폰과 롤러
블(Rollable) TV가 출시됨에 따라 비교적 성숙기에

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360307>

* 본 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임[N0001718, 플렉서블 전자소재 산
업기술 기반조성사업]



본 저작물은 공공누리 제4유형

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

©2021 한국전자통신연구원

접어들었지만, 플렉서블 전자분야(이차전지, 태양 전지)는 진입단계로, 이제 기술개발의 생태계 조성이 활발히 이루어지고 있다.

본 고에서는 플렉서블 디스플레이, 플렉서블 이차전지, 플렉서블 태양전지의 각 분야별로 부각되고 있는 기술들과 산업 동향을 알아보고 관련 산업의 발전을 도모하고자 구축된 플렉서블전자소재 센터에 대해 소개하고자 한다.

II. 본론

1. 플렉서블 디스플레이

플렉서블 디스플레이는 평판 디스플레이와 달리 접거나 휘 수 있는 등 형태를 변형시킬 수 있는 차세대 디스플레이를 지칭한다. 플렉서블 디스플레이의 경우, 유리 기판을 이용한 커브드(Curved) 디스플레이는 2010년 이후 LCD(Liquid Crystal Display, 액정 디스플레이)나 OLED(Organic Light-Emitting Diode, 유기 발광다이오드)를 이용하여 벤딩 반경이 큰 모니터, TV, 상업 광고용으로 상용화되었고, 그 후 플라스틱 기판을 이용한 OLED 패널이 양산에 성공함으로써 2013년에 벤더블(Bendable) 스마트폰, 2019년에 폴더블 스마트폰, 2020년에 롤러블 OLED TV가 각각 출시되었

다. 현재 스트레처블(Stretchable) 디스플레이에 대한 연구도 진행되고 있다(그림 1).

커브드, 벤더블 디스플레이 등은 기존의 평판 디스플레이에서 약간의 기술 개발로 구현이 가능하였지만, 폴더블, 롤러블, 스트레처블 디스플레이의 경우 폼팩터(Foam Factor) 변화에 따른 기술적 난이도가 급격히 상승된다.

그림 2는 폴더블 스마트폰 제조공정에 사용되는 플렉서블 디스플레이 구조의 예로서, 임시 지지대인 이송 기판(Carrier Glass: 캐리어 글라스) 위에 PI(폴리이미드) 기판, TFT(박막트랜지스터) 백플레인(Backplane), 유기 발광층 및 봉지층을 차례대로 형성한 후, 캐리어 글라스를 제거하는 순서로 진행되며, 이렇게 유연화 소재를 적용함에 따라 대부분의 제조공정이 변화된다. 특별히 PI 기판 및 봉지층 형성 공정은 더욱 차별화된 생산기술이 필요하게 된다. 플렉서블 디스플레이 생산기술의 핵심은 유연성을 보유하면서 고온에서 공정수행이 가능한 기판 소재를 확보하는 것이며, 플렉서블 기판으로는 무색 폴리이미드(CPI: Colorless Polyimide)와 초박형 유리(UTG: Ultra Thin Glass)가 사용된다. TFT 백플레인은 디스플레이의 각 화소를 구동하는 구동소자로 투명기판 위에 반도체 층, 금속배선, 절연막 등의 여러 층의 소재로 구성되며, 폴더

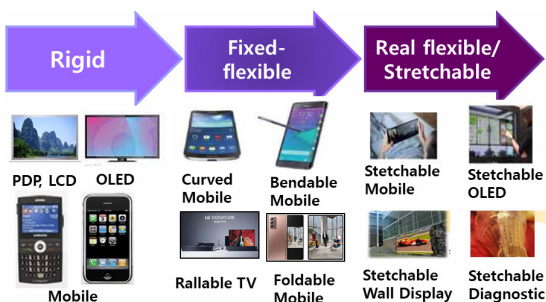


그림 1 플렉서블 디스플레이 기술 발전 단계

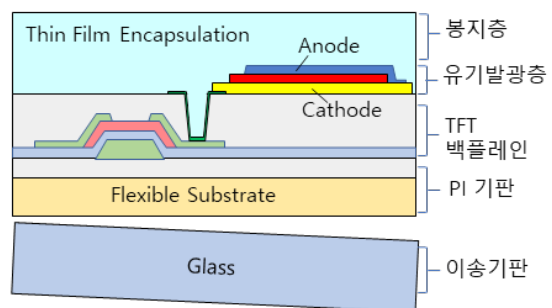


그림 2 플렉서블 디스플레이의 구조

블 폰과 같은 중소형의 모바일 디스플레이에는 저온폴리실리콘(LTPS: Low Temperature Poly-Silicon) TFT가 적용된다. 유기 발광층은 자기발광형 RGB 색상이 구현되는 표시소자로 현재 상용화된 플렉서블 디스플레이의 대부분이 OLED 방식을 채택하고 있다. 구동소자 위에 형성된 양극 위에 정공주입층, 정공 수송층, 발광층, 전자 수송층, 전자 주입층, 음극을 순차적으로 형성하여 만든다. 봉지층은 유기 발광층 및 TFT 백플레인에 수분이 침투되는 것을 막는 역할을 한다. 유연성을 확보하면서 수분 침투방지 성능을 향상시키기 위해 유기물과 무기물을 교대로 적층하는 박막봉지(TFE: Thin Film Encapsulation) 기술이 적용된다[1].

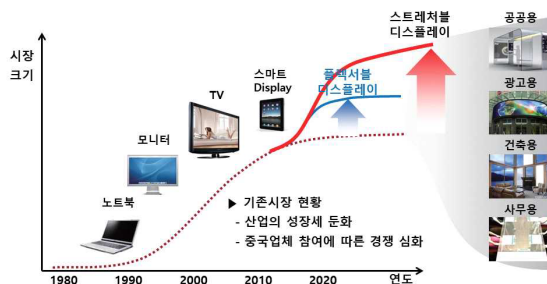
폴더블 스마트폰의 플렉서블 OLED 패널은 전력소비, 해상도 등 기술적인 측면에서 유리하고 5G 환경에서 요구되는 고용량, 고화질 콘텐츠 소비를 지원하기에 적합하다. 폴더블 스마트폰의 시장은 당분간 삼성전자가 독주할 가능성이 높으며, 출하량은 2020년도 300만~350만 대, 2021년도 700만~800만 대, 2022년도 2,000만 대 이상을 예상하고 있다[2].

플렉서블 디스플레이 기술발전의 마지막 단계인 스트레처블 디스플레이 기술은 4차 산업혁명

을 선도하는 자율주행 자동차, 웨어러블 기기, 증강현실 기기 등에 활용되며, 공공용, 광고용, 건축용, 사무용 등 다양한 응용 분야를 가진다(그림 3). 스트레처블 디스플레이는 외형의 크기가 수~수십% 이상 연신 또는 수축 변형되는 상태에서도 화질이 유지되어야 하므로, 현재의 플라스틱 OLED로 대표되는 폴더블이나 롤러블 디스플레이 기술과는 다른 차원의 기술이며, 기술 선점을 위한 연구개발 및 제품화 노력이 치열한 경쟁 속에서 이루어지고 있다.

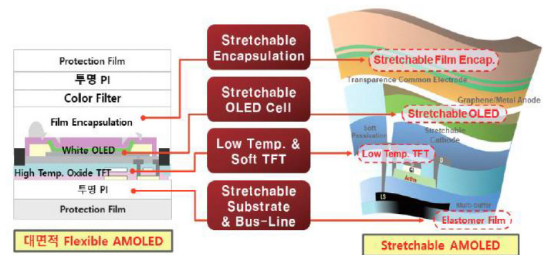
스트레처블 디스플레이 기술은 기존의 플렉서블 AMOLED(Active-Matrix OLED: 능동구동형 OLED) 생산라인을 활용하면서 스트레처블 디스플레이로 전환하는 데 필요한 핵심 공정들을 개발하는 형태로 시작될 것으로 예상된다. 즉, 유연 신축이 가능한 기판과 이를 기반으로 하는 백플레인 및 발광화소의 핵심소재와 공정의 원천기술들이 개발되어야 한다. 그림 4에는 기존의 플렉서블 AMOLED와 스트레처블 AMOLED 구조와 이때 핵심적으로 개발되어야 할 4종류의 기술을 나타내고 있다.

스트레처블 디스플레이 기술을 구현하기 위해 다양한 분야에서 기술 선점을 위한 연구개발 및 제



출처 KEIT, 스트레처블 디스플레이를 위한 20% 연신 가능한 백플레인 및 발광화소 개발, PD Issue Report, 제19권 9호, 2019. 9, 공공누리 4유형.

그림 3 새로운 성장 동력으로서의 스트레처블 디스플레이



출처 KEIT, 스트레처블 디스플레이를 위한 20% 연신 가능한 백플레인 및 발광화소 개발, PD Issue Report, 제19권 9호, 2019. 9, 공공누리 4유형.

그림 4 스트레처블 디스플레이의 구조 및 핵심 기술

품화 노력이 지속적으로 이루어지고 있는 상황이다. 정부(산업통상자원부)에서는 2019년부터 “디스플레이 혁신공정플랫폼구축사업”의 주요 과제 중 하나로 ‘스트레처블 디스플레이 개발’ 과제(총괄 주관 기관: LG디스플레이)를 추진하여, 핵심 원천 기술 개발과 제품화 기술 개발의 2단계로 진행하며, 2024년까지 연신율 20%의 기술이 적용된 스트레처블 디스플레이 제품을 개발할 예정이다. 특히 최근에 스트레처블 디스플레이의 치열한 경쟁 속에서 기술 개발이 활발히 이루어지고 있는 가운데, 다양한 소재를 기반으로 유연 소자제작, 유연 신축성 기판개발, 유연 OLED 개발 등에 있어 의미 있는 연구결과들이 보고되고 있다[3-5].

2. 플렉서블 이차전지

2019년 노벨 화학상은 리튬이온 이차전지(Lithium-ion Battery)를 발명한 공적을 인정받아, 일본의 요시노 아키라 등 3명이 수상하였다. 리튬이온 이차전지가 노벨상을 받을 정도로 우리의 생활, 직업, 사회 활동을 변화시킬 만큼 전자기기를 진화시킬 수 있는 막대한 임팩트를 가진 기술로 평가되었기 때문이다. 현대인의 생활에서 빼놓을 수 없는 스마트폰이나 노트북 등 휴대용 전자기기는 리튬이온전지에 의해 가능하게 되었다. 현재 리튬이온전지는 다른 이차전지에 비해 가볍고 높은 에너지 밀도로 고용량, 고효율 구현이 가능해 소형 가전이나 IT 디바이스부터 전동공구, 에너지 저장 시스템(ESS: Energy Storage System), 전기차까지 다양하게 사용되고 있다. 그렇지만 이차전지 시장은 아직까지 납축전지가 리튬이온전지를 앞서고 있으며, 2024년도에 이르러 리튬이온전지가 추월할 것으로 전망하고 있다[7]. 한편, 현재 모바일 기기용 소형 리튬이온전지에 대한 시장 전망으로 국내 시

장은 2017년도에 약 12.9억 원에서 2023년도에 약 15.7억 원 규모로 연평균 3.3%씩 성장하며, 세계 시장은 2017년에 약 16,659백만 달러에서 2023년에 약 21,669백만 달러로 연평균 4.5%씩 성장할 것으로 전망하고 있다[6].

주로 사용되는 리튬 전지(Lithium Battery)는 기존 배터리에 비해 부피와 무게가 작고, 고용량, 친환경이라는 장점이 있으며, 양극, 음극, 전해질, 분리막으로 구성된다. 전해질의 종류에 따라 리튬이온전지(LiB, 액상형 전해질)와 리튬 폴리머 전지(LiPB, 고체 고분자 전해질)로 구분된다. 리튬이온전지는 성능은 우수하지만 액체 전해질을 사용함에 따라 충격을 받으면 발화·폭발을 일으킬 수 있어 안전에 문제가 있다. 반면 리튬 폴리머 전지는 폭발 위험을 줄여 안정성을 개선하고, 가볍고, 다양한 형상으로 제작할 수 있는 장점은 있지만 부품이 추가되어 가격이 더 고가이며, 저온에서 성능이 저하되는 단점이 있다. 근래에 리튬이온전지의 취약점인 안전성 문제를 해결하고 대용량, 대출력 특성으로 인해 전기자동차에 적합한 배터리로 부각되고 있는 것이 바로 전고체 전지(All-solid-state Battery)이다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 전고체 전지는 리튬전지에 있던 분리막은 없어지고 전해질도 액체에서

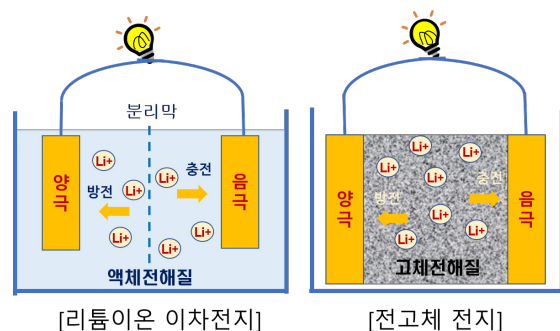


그림 5 리튬이온 이차전지와 전고체 전지의 구조

고체로 변경되어 구조가 간단해진다. 또한 전고체 전지는 플렉서블한 이차전지를 제조하기가 용이하다.

전고체 전지는 1970년대부터 연구가 시작되었으나, 최근에 이르러 액체 리튬이온전지보다 출력을 높일 수 있는 가능성이 현실화되면서 부각되고 있다. 전고체 전지의 작동원리는 기존 리튬이차전지의 작동원리와 거의 동일하나, 전지의 구성요소 중 가연성 액체로 되어 있는 전해질을 고체 전해질로 바꾸어 온도 변화와 외부 충격에 따른 화재·폭발 위험이 현저히 감소되는 장점이 있다. 한편, 전고체 전지는 적용되는 고체 전해질에 따라 황화물계, 산화물계, 고분자계로 구분된다. 황화물계는 이온전도도 및 전극과의 계면특성이 우수하고 플렉서블화가 가능하나, 공기 중에서 불안정성(H_2S 발생)이 있고 제조공정비용이 고가인 단점이 있지만, 앞으로 가장 유력하게 적용될 물질로 간주되고 있다. 산화물계는 공기 중 안정성 및 전기화학적 안정성 등은 우수하나, 낮은 이온전도도 및 전극과의 계면특성이 불량하고, 고분자계는 공기 중 안정성 및 전극과의 계면특성이 우수하고 플렉서블화가 가능하나, 낮은 이온전도도 및 낮은 특성이 불량하다. 고분자계와 산화물계(나노입자)를 결합한 복합 고체 전해질에 대한 연구도 이루어지고 있다. 한편 전고체 전지의 에너지 밀도를 높이기 위해 리튬금속(Li-metal) 음극 소재를 적용할 것으로 예견되고 있는데, 여기에는 전고체 전지의 수명과 안정성을 낮추는 ‘덴드라이트(Dendrite)’ 현상이 발생하는 문제점이 있다. 근래에 이를 개선한 전고체 전지에 대한 연구결과가 국내 S사에서 의해 보고되었다[8]. 현재 LG화학, 삼성SDI, SK이노베이션 등 국내 전지 3사를 비롯한 학계와 연구계에서는 전고체 전지에 대한 다양한 연구개발이 이루어지고 있으며, 그림 6은 ETRI에서 개발한 복합 고체 전해

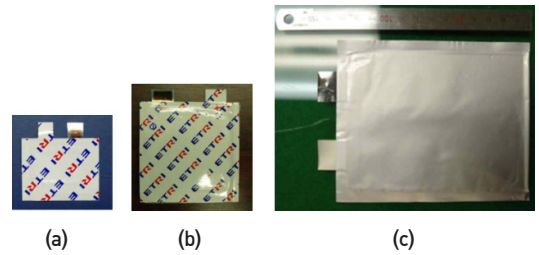


그림 6 ETRI 플렉서블 전고체 리튬이온 이차전지 개발 시제품.

(a) 시제품1 $2.5 \sim 3.0 \text{mAh/cm}^2$ ($3.5 \times 3.3 \text{cm}$)

(b) 시제품2 $3.0 \sim 3.5 \text{mAh/cm}^2$ ($5.5 \times 5.5 \text{cm}$)

(c) 시제품3 $3.5 \sim 4.0 \text{mAh/cm}^2$ ($13.0 \times 5.5 \text{cm}$)

질을 적용한 플렉서블 전고체 전지 시제품이다.

전고체 전지의 세계시장은 주로 인체에 위험성, 안정성과 더불어 장기간 전원 공급이 요구되는 의료기기나 무선센서에서 사용되던 전고체 전지의 수요가 전기자동차나 에너지 하베스팅 분야에서 증가하면서 연평균 34.2%의 성장률을 보이며, 2019년에 6,420만 달러에서 2027년에 4억 8,250만 달러까지 성장될 것으로 예측하고 있다(표 1).

최근에 독일의 폭스바겐과 일본의 도요다, 미국

표 1 분야별 전고체 전지 시장

(단위: 백만 달러)

구분	2019	2020	2021	2022	2023	2025	2026	2027
Consumer Electronics						4.1	6.3	9.7
Electric Vehicles	10	9.6	9.9	11	13	25.7	60.7	158
Medical Devices	22.5	22.3	23.7	26.7	28.8	59	66	73.6
Energy Harvesting	4.2	4.3	4.8	5.6	7.1	16.1	43.4	106.2
Wireless Sensors	16.1	15.2	15.5	16.8	19.6	37.4	60.9	86.9
Packaging	11.6	10.2	9.6	9.7	10.5	17.2	26	45.4
Others					0.8	1.2	1.8	2.9

출처 MarketsandMarkets, "Solid State Battery Market," 2020. 4. Reprinted with permission from MarketsandMarkets.

테슬라, 한국 현대자동차 등 글로벌 전기차 완성차 업체에서 전기자동차용 전고체 전지를 직접 개발하여 적용하겠다는 신문보도가 잇따르고 있다[9-12]. 이는 전기차 완성차 업체에서 기술 및 가격 경쟁력 확보에 있어 핵심 부품으로 전지의 비중(전기차 생산단가의 40% 점유)이 커짐에 따라 자사 브랜드 전기차에 최적화된 차세대 전지 확보를 위한 내재화 전략으로 풀이된다.

최근에는 유연성을 가진 얇은 플렉서블 의료기가 개발되고 있으며, 유연성과 안전성면에서 우수한 특성을 갖고 있는 전고체 소재를 활용한 이차전지가 채택되어 사용되고 있다. 또한 향후 플렉서블 이차전지는 웨어러블 디바이스에서 초박막·초경량의 플렉서블 에너지원의 필요성 대두, 스마트폰과 TV 등의 폼팩터 변화에 높은 기여도, 전기차의 공간 활용도 향상 등에 의해 그 수요가 증가되어 점점 그 시장이 더 확대될 것으로 예상되고 있다.

한편, 세계 플렉서블 전지 시장은 2018년도 약 3,106억 원에서 2023년도에는 약 2조 185억 원으로 증가를 전망하고 있다[13].

3. 플렉서블 태양전지

금세기 들어 지구환경·온난화 문제가 가시화되면서 신재생에너지로 태양전지에 대한 관심이 증가되고 있다. 태양전지는 태양의 빛 에너지를 직접 전기로 변환하는 반도체소자의 일종이다.

태양전지를 기술 수준으로 구분하면 1세대 실리콘 태양전지(결정질 실리콘)와 2세대 박막형 태양전지(실리콘 박막, CIGS 및 CdTe 박막), 3세대 차세대 박막형 태양전지(염료감응, 유기, 페로브스카이트)로 분류된다. 현재 실리콘 태양전지의 효율은 26.7% 정도이며, 이론적인 광전변환 효율은 33%로 보고되고 있다[14].

표 2 태양전지 종류 및 특징

종류	특징	변환 효율	단계
실리 콘 계	결 정 계 • 단결정 Si 기판 • 장점: 성능, 내구성, 신뢰성 • 단점: 고가격	~26% (단결정) ~15% (다결정)	실용화
	박 막 계 • PECVD 적용 Si막 증착(수μm) • 장점: 대면적, 양산화, 효율변화 적음, 유연화 • 단점: 저효율	~9% (일반형) ~12% (다접합)	실용화
화 합 물 계	CI GS 계 • Cu, In, Ga, Se 적용 박막형 • 장점: 양산화, 저가격, 내방사선, 유연화 • 단점: In, Ga 재료공급 한계	~20% (셀효율)	실용화
	Cd Te 계 • Cd, Te 원료적용 박막형 • 장점: 소재절약, 양산화, 저가격, 유연화 • 단점: 독성재료 사용 (Cd)	~20% (셀효율)	실용화
	집 광 계 • 3족, 5족 화합물 다접합 집광 • 장점: 고효율, 내방사선, 유연화 • 단점: 고가격	~40% (셀효율)	실용화
유 기 계	염 료 감 응 • TiO₂에 흡착된 특수염료를 흡수층으로 활용 • 장점: 저가격화, 유연화 • 단점: 저효율, 내구성 취약	~13% (셀효율)	연구 단계
	유 기 박 막 • 유기반도체 적용하는 박막형 • 장점: 소재절약, 양산, 저가격, 색 구현, 유연화 • 단점: 내구성 취약	~13% (셀효율)	연구 단계
	페 로 브 스 카 이 트 • Pb, I 결합된 유기 하이브리드 박막형 • 장점: 고효율화, 응용성, 유연화 • 단점: 안전성 미확보, 규제물질 사용(Pb)	~25% (셀효율)	연구 단계

현재 개발되고 있는 태양전지의 종류 및 특징은 표 2와 같다. 이 중 실리콘계와 화합물계 태양전지는 실용화 단계에 있지만 유기계 태양전지는 연구 개발 단계에 있다.

기존의 결정질 실리콘 태양전지나 유리 기판 기반의 박막 태양전지는 무겁고, 충격에 취약하여 응용에 제약이 많았으나, 유연성과 경량성을 갖는 기판에서 제작된 플렉서블 태양전지는 상황에 따라

형태를 변형시킬 수 있으며, 가볍고 휴대성이 매우 우수하다. 이러한 장점을 바탕으로 굴곡이 있는 건물집적형 태양전지(BIPV: Building Integrated Photovoltaic System), 장비일체형 태양광발전시스템(DIPV: Device Integrated Photovoltaic System), 웨어러블 기기, 전기자동차, 우주 항공 등의 산업 분야에서 새로운 가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

실리콘계 결정질 태양전지가 태양전지 시장의 약 80~90%를 점유하고 있으며, 이 중 단결정 실리콘 태양전지가 고가이므로 다결정 실리콘 태양전지가 저렴한 가격으로 실리콘 결정질 태양전지의 약 80%를 차지하고 있다. 실용화 단계에 있는 화합물계 태양전지 중 갈륨비소(GaAs) 기반 집광형 태양전지에 대한 관심이 쏠리고 있다. 이는 실리콘 태양전지보다 두 배 이상의 높은 광변환효율을 갖고 있어 태양전지 소량화에 의한 저비용화 가능성 때문이다. 기판의 유연화가 어려운 결정질 실리콘 태양전지 외 대부분의 태양전지들은 플렉서블 태양전지로 구현이 가능하다. 그러나 플렉서블 태양전지 응용기술의 생태계가 아직은 조성이 이루어지지 않아 특정한 분야에 사용되고 있고, 고효율과 저가격화에 의한 실용화를 위한 연구개발이 이루어지고 있다. 그림 7은 ETRI에서 개발한 플렉서블 태양전지 시제품이다.

한편, 하이브리드형 페로브스카이트(Perovskite) 태양전지는 높은 광전변환효율, 저렴한 제조비용, 유연한 형태로의 제조가 가능하기 때문에 큰 관심을 갖고 경쟁적으로 치열한 연구개발이 이루어지고 있다.

실리콘 태양전지가 약 26%의 효율을 달성하는데 60년이 걸렸는데, 페로브스카이트는 10년 사이에 실리콘 태양전지의 효율을 거의 따라잡았다는 연구결과(0.1cm² 면적 기준 25.2% 효율)가 국내 연

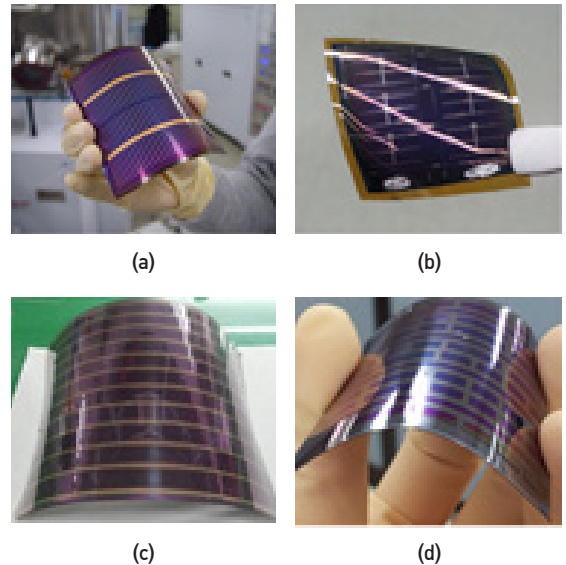


그림 7 ETRI의 플렉서블 박막 태양전지 개발 시제품.

(a) CIGS 박막태양전지(스테인리스 기판)

(b) CIGS 박막태양전지(폴리이미드 기판) (c) 열요감응 박막태양전지(폴리이미드 기판) (d) a-Si 박막태양전지

구진에 의해 보고되었다[15]. 단 상용화를 위해 성능 개선이 요구되는 안전성과 독성이 있는 납을 대체하는 물질이 개발되어야 하며, 이에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다[16-18].

플렉서블 태양전지 업체들은 극히 일부를 제외하고는 파일럿라인 개념의 소량만을 생산하고 있고 저마다 제조기술이 다르기 때문에 차별화된 제품을 제조하게 될 것으로 예상되며, 다양한 용도 및 목적에 적합한 플렉서블 박막 태양전지 제품들의 시장 출시가 점차 증가할 것으로 전망된다.

4. 플렉서블전자소재센터

플렉서블 전자소자는 대기업 중심의 전방산업으로 지속적인 성장이 이루어지면서 관련 소재 부품에 대한 관심이 높아지게 되었다. 반면 플렉서블 전자소재는 후방산업 분야로 주로 중견·중소기업

이 담당하고 있으나 기술력과 인프라가 취약한 부분이 계속 문제점으로 부각되었다. 특히 플렉서블 전자소재(디스플레이, 이차전지, 태양전지) 분야의 국내기업에서는 소재 공정 및 성능 평가에 요구되는 인프라를 거의 보유하고 있지 않아 소재 설계에서부터 평가에 이르는 전주기적 기술 지원을 위한 국가적 차원의 인프라 구축이 요구되었다. 이에 따라 2015년도에 산업통상자원부(한국산업기술진흥원)의 지원으로 플렉서블전자소재센터(FEMC: Flexible Electronics Materials Center)가 설립되었다.

이 센터는 한국전자통신연구원(주관기관), 한국화학연구원(참여기관), 충북테크노파크(참여기관) 3개의 기관으로 구성된 국내 유일의 플렉서블 전자소재 관련 전문센터로서, 플렉서블 디스플레이 트랙, 플렉서블 태양전지 트랙, 플렉서블 이차전지 트랙 등 3종류의 기술분야에 대해 각 기관이 보유한 인프라와 기술역량을 연계하여 플렉서블 전자소재 관련 시제품 제작, 애로기술 지원, 시험분



그림 8 FEMC 기술지원 체계도

석 평가, 예비인증 실장평가에 이르는 지원체계를 구축하고 국내 관련 기업(산·학·연)에 기술지원을 수행하고 있다(그림 8).

플렉서블전자소재센터에서는 각 기관이 보유한 인프라와 기술 역량을 고려하여 역할을 분담하고 세부지원 내용을 구체화하였다(표 3). 한국전자통신연구원에서는 플렉서블 전자소재 디스플레이 시제품제작, 화학연구원은 디스플레이와 이차전지 전자소재의 물성분석 및 평가, 충북테크노파크는 플렉서블 이차전지와 태양전지의 시험 및 신뢰

표 3 주관·참여기관별 역할 분담

	기관별 주요역량	기관별 역할분담	세부지원 내용
한국전자통신연구원 (주관)	• 플렉서블 전자소재(디스플레이/이차전지/태양전지) 기술보유 • 플렉서블 전자소재 R&D 인력보유 • 플렉서블 전자소재 연구장비 보유	• 플렉서블 전자소재 시제품(시생산)제작 • 플렉서블 전자소재 설계 환경/테스트 배드 제공 • 파운드리 서비스 제공 • 네트워크 지원	• 플렉서블 디스플레이 -OLED시제품제작 -유연기판 공정 • 플렉서블 태양전지 -유연기판 박막 공정 -투명전극 형성 공정
한국화학연구원 (참여)	• 플렉서블 전자소재 분석장비 및 기술 보유 • 플렉서블 전자소재 전문인력 보유(디스플레이/태양전지/이차전지 소재 개발)	• 플렉서블 전자소재 물성분석 • 플렉서블 전자소재 평가인증서/성적서 발급	• 플렉서블 디스플레이/태양전지/이차전지 -OLED/OPV/이차전지 소재 및 소재 특성 평가 -유연 기판 소재 평가 • 플렉서블 이차전지 제조 -파우치 셀 제조 및 특성 평가
충북테크노파크 (참여)	• IT/이차전지/태양광 시험평가 인프라 보유 • 전자 부품 신뢰성 시험 및 소재 및 기술 인력 보유 • 국제공인시험기관(KOLAS)	• 플렉서블 이차전지 및 태양전지 시험 장비 기반구축 • 환경/신뢰성평가 및 규격시험 지원 • 플렉서블 전자소재 전기적특성 및 안전성시험 • 인증기준 설정 및 예비인증 지원	• 플렉서블 이차전지 -유연 이차전지 안전성 평가 -전기적 특성 평가 • 플렉서블 태양전지 -유연 태양전지 옥외 수명시험 -굴곡 환경 테스트

표 4 EMC 구축 장비 현황(34종)

기관	장비명	활용 용도	비고
ETRI (시생산 지원)	레이저 제거/탈착 공정 장비	플렉서블 디스플레이 캐리어 필름 탈착/제거	장비구축 (8종)
	R2R 다층투명전극 증착장비	플렉서블 투명전극 및 금속전극의 증착	
	플렉서블 디스플레이 방지막 장비	디스플레이용 투습/투산소 방지용 박막용	
	가속 환경 신뢰성 평가 장비	플렉서블 디스플레이 반복 굽힘 신뢰성평가	
	플렉서블 디스플레이 소자 전사장비	플렉서블 디스플레이 모듈 전사 및 필름 라미네이션	
	플렉서블 Laser 패턴형성장치	플렉서블 태양전지 투명전극의 패터닝	
	플렉서블 건식식각 공정장비	플렉서블 PI 박막 건식식각	
	플렉서블 Sawing 장비	플렉서블 기판 Sawing	
KRICT (분석/ 시험/ 인증)	산소투과도시험기	플렉서블 디스플레이/태양전지 봉지 소재 평가	장비구축 (9종)
	플렉서블 파우치 셀 제조 장비	배치형 이차전지 특성 평가를 위한 파우치 전지 제조	
	온도 가변 전기비저항 측정기	플렉서블 전자소재의 온도에 따른 전기적 특성 평가	
	박막형 열전도도 측정기	플렉서블 전자소재의 열전도 특성 평가	
	플렉서블 소재 장기안정성 평가시스템	플렉서블 태양전지 소재 및 소자의 장기안정성 평가	
	라만 분광기	플렉서블 투명전극/배리어 소재 측정	
	유연소자 다목적 변형시험기	유연소자 변형에 따른 소재 특성 변화 측정	
	엑스레이 단층 촬영장비	유연소재의 비파괴적인 내부 결함 분석	
CBTP (시험/ 평가/ 인증)	유연이차전지 안전성시험 방폭챔버	평가 환경(온도/습도) 가변 반복적인 시험 지원	장비구축 (17종)
	플렉서블 소자특성 및 전력분석기	플렉서블 디바이스 전력 측정 및 분석	
	굽힘시험기	플렉서블 소자에 대한 다양한 굽힘 시험	
	유연전지 전자소재 내구성 4ch 챔버	다양한 온/습도 조건 동시 환경신뢰성 평가	
	플렉서블 PV & 배터리 시뮬레이터	유연이차전지, 태양전지 전기적 특성 및 성능 평가	
	유연태양전지 다이오드시험기	유연태양전지에 대한 다이오드 특성평가	
	유연태양전지 자외선시험기	유연태양전지 필름에 대한 자외선 특성열화시험	
	고효율 유연전지 수명평가시험기	유연전지 충방전 시험 및 전지 수명 안전성 평가	
	교류 임피던스측정기	유연전자소자 전극저항, 내부단락 등 평가	
	유연전지 크랙분석 고배율 현미경	유연전자소재 크랙, 표면분석 고배율 관찰	
	유연태양전지 굴곡효율측정장비	굴곡기능 유연태양전지 광변환효율(LID) 및 출력 측정	
	유연전자소재 물성평가장비	투명성 플렉서블 소재 빛 투과율, 반사율 측정평가	
	유연소재 환경내수성평가장비	플렉서블 소재의 내수성 및 절연저항 환경평가	
	이차전지 외부 단락 시험기	안전성 규격 시험 평가용(장비 이월)	
	이차전지 내부 단락 시험기	플렉서블 이차전지의 폭발 및 발화 안전성 평가	
	유연 전지 수명평가 시스템	가속 충방전 플렉서블 이차전지 품질 및 안전성 평가	
	배터리 모듈 전원 공급장치	플렉서블 이차전지 압력 평가 시험	

출처 FEMC 홈페이지, <https://etri.re.kr/femc>

성 평가 관련 기술지원을 각각 담당하고 있다.

표 4는 플렉서블전자소재센터의 3개 기관에서 도입한 장비 34종의 장비명과 용도를 정리하여 나타내고 있다. 플렉서블 전자소재 기반의 디스플레이

이, 이차전지, 태양전지 분야에 시제품제작 및 시험분석 평가 인증지원에 활용되고 있다. 각 장비들은 관련 산·학·연을 대상으로 장비 수요 설문조사를 실시하여 장비용도, 규격, 기능을 고려한 적

합한 장비들이 선정되어 도입되도록 하였다.

앞으로도 플렉서블전자소재센터에서는 보유한 인프라 및 역량을 적극 활용하여 국내기업에 기술 지원을 지속적으로 제공할 것이다. 최근에는 소부장(소재·부품·장비) 및 N-Lab과 연계한 공유·협업 플랫폼을 구성하여 기업 기술지원 방안을 더욱 확대하여 효율적이고 양질의 기술지원이 되도록 추진하고 있다. 이를 통하여 본래의 본 사업의 취지대로 열악한 국내 중소기업의 기술력 향상을 지원함으로써, 플렉서블 전자소재 산업의 활성화와 생태계 조성에 기여하고자 한다.

III. 결론

4차 산업혁명을 맞이하여 플렉서블 전자소재·소자 산업의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 플렉서블 AMOLED의 채택이 점차 보편화되고, 폴더블/롤러블 스마트폰, 롤러블 TV와 같이 새로운 폼팩터를 적용한 제품 개발이 가속화되면서 플렉서블 디스플레이의 중요성은 더욱 커질 전망이다. 추후 플렉서블 디스플레이 산업에서 글로벌 경쟁력 우위를 지속하기 위해 독점적 수익이 확보되는 새로운 시장 창출을 가능케 하는 스트레처블 디스플레이 기술의 선점이 중요하며, 이 분야에 대한 집중적인 연구개발 및 제품화 노력이 요구된다.

플렉서블 이차전지 산업은 플렉서블 이차전지의 성능이 아직 미흡하고 안정성 문제가 대두되고 있지만, 유연 특성을 갖는 전고체전지에 대한 성능 향상을 위한 기술 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 추후, 웨어러블 의료기기, 스마트폰과 TV 등의 폼팩터 변화 IoT 기기, 전기차 등에서 수요 요구가 증대될 것으로 예상됨에 따라 지속적인 성장이 전망된다.

플렉서블 태양전지 산업은 제품의 유연화가 요

구되는 건물집적형 태양전지 및 웨어러블 기기, 그리고 전기자동차에 대한 수요가 예상되어 지속적인 성장이 예상된다. 현재 시장 점유율 80~90%의 실리콘 태양전지가 여전히 주로 사용되고 있지만 마음대로 구부리기가 어려워 플렉서블 태양전지로 적용에 한계가 있다. 근래에 플렉서블화가 가능한 페로브스카이트 태양전지의 광전효율이 실리콘 태양전지와 견줄 만큼 향상된 연구결과들이 보고되어 많은 관심을 모으고 있으며, 이를 제품화하는 데는 아직 미흡한 안전성과 내구성의 개선을 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다.

플렉서블전자소재센터에서는 기 구축된 인프라를 활용하여 플렉서블 전자소재·소자 분야에 취약한 중소기업의 기술 경쟁력 향상을 도모하여 대·중소기업 간 연계 협력을 통한 동반성장 기반을 마련하고, 연구계(학계)에서 연구개발이 효율적으로 수행될 수 있도록 지속적인 기술지원을 제공할 것이다.

용어해설

Flexible Display 유연한 재료를 사용하여 손상 없이 휘거나 구부리거나 말 수 있는 디스플레이 장치를 말하며, 그 종류로는 벤더블, 폴더블, 롤러블, 스트레처블 디스플레이가 있다.

Foam Factor 주로 컴퓨터 하드웨어(HW) 규격을 지칭하는 용어로 쓰였지만 모바일 기기 발전과 더불어 휴대폰 외형을 가리키는 용어로 활용되고 있다.

약어 정리

BIPV	Building Integrated Photovoltaic System
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
CPI	Colorless Polyimide
DIPV	Device Integrated Photovoltaic System
ESS	Energy Storage System

FEMC	Flexible Electronics Materials Center
LCD	Liquid Crystal Display
LiB	Lithium Battery
LIPB	Lithium Polymer Battery
OLED	Organic Light Emitting Diode
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PI	Polyimide
TFT	Thin Film Transistor
UTG	Ultra Thin Glass

참고문헌

- [1] 산업경제리서치, “국내의 디스플레이 산업 및 소재·부품 산업의 시장분석과 비즈니스 전략,” 2020. 5. 12.
- [2] 김소원, “2021년 디스플레이 산업전망: 발광의 시대,” 키움증권 리서치센터, 2020. 11. 20.
- [3] W. Wang et al., “Strain-insensitive intrinsically stretchable transistors and circuits,” *Nat. Electron.*, vol. 4, 2021, pp. 143-150.
- [4] M.S. Lim et al., “Two-dimensionally stretchable organic light-emitting diode with elastic pillar arrays for stress relief,” *Nano Lett.*, vol. 20, no. 3, 2020, pp. 1526-1535.
- [5] J.-H. Kim and J.-W. Park, “Intrinsically stretchable organic light-emitting diodes,” *Sci. Adv.*, vol. 7, no. 9, 24. Feb. 2021.
- [6] IRS Global, “2021 차세대 전지[(전고체)이차전지. 연료전지, 태양전지]의 기술개발. 사업화 동향과 향후전망,” *MARKET REPORT 2020-17*, pp. 43-45.
- [7] 중소벤처기업부, “중소기업 전략기술로드맵 2021-2023 이차전지,” *SMTECH*, 2021. 2. p. 9.
- [8] Y.-G. Lee et al., “High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver-carbon composite anodes,” *Nat. Energy*, vol. 5, Mar. 2020, pp. 299-308.
- [9] 조선비즈, ““이젠 초격차 전력뿐,” ‘폭스바겐 쇼크’에 주목받는 전고체 배터리,” 2021. 3. 19.
- [10] 매일경제, “전고체 배터리, 시장 판도 흔드는 ‘게임 체인저’ 될까[science],” 2021. 3. 26.
- [11] 조선비즈, “테슬라, 자체 개발한 신형 ‘4680 배터리셀’ 생산라인 첫 공개,” 2021. 1. 19.
- [12] 전자신문, “현대차, 배터리 R&D 강화,” 2021. 3. 8.
- [13] IPDaily, 기술& 시장분석 “플렉서블 배터리(Flexible Battery),” 2020. 6. 7.
- [14] M.A. Green et al., “Solar cell efficiency tables, J. H. (Version 53),” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 27, 2019, pp. 3-12.
- [15] J.J. Yoo et al., “Efficient perovskite solar cells via improved carrier management,” *Nature*, vol. 590, 2021, pp. 587-593.
- [16] F. Xia et al., “Efficiency Enhancement of Inverted Structure Perovskite Solar Cells via Oleamide Doping of PCBM Electron Transport Layer,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, 2015, pp. 13659-13665.
- [17] M.A. Green, A. Ho-Baillie, and H.J. Snaith, “The emergence of perovskite solar cells,” *Nat. Photonics*, vol. 8, 2014, pp. 506-514.
- [18] R. Singh et al., “Perovskite solar cells with an MoS₂ electron transport layer,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 7, 2019, pp. 7151-7158.