

웨어러블 기기용 플렉서블 PV-EES 융합모듈 원천기술팀 및 연구 소개

김제하
청주대학교

연구의 배경 및 기술 동향

최근 시간과 장소, 컴퓨터나 네트워크 여건에 구애받지 않고 자유롭게 네트워크에 접속할 수 있는 유비쿼터스 컴퓨팅(ubiquitous computing) 시대로 진입함으로써 착용형(wearable)센서 및 PC(전자기기)등의 IOT(사물인터넷; internet of things)가 미래 산업으로 발전하고 있다. 아울러 IOT 소자는 전원선(wired)으로부터 독립하는 무선 자가 에너지원(wireless self-sustaining energy source) 기술의 구현과 산업화가 필요하다. 신

기능 자가전원(예, 태양전지 및 이차전지의 결합)융합 소자는 저가이며, 경량이어야 하고, 친환경적인 데다가 플렉서블 일렉트로닉스가 적용될 수 있어야 한다. 이를 충족할 수 있는 방법으로서 전원 생성소자인 a-Si, CIGS, CZTS, III-V족 GaAs, DSSC, 및 페로브스카이트 태양전지(photovoltaic; PV) 소자 등에서 에너지 전환효율(power conversion efficiency; PCE)의 향상과 함께 플렉서블 기능성 확보 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 한편, 2014년 우리나라 미래창조과학부에서도 기술 로드맵에서 이차전지의 연구방향으로 고집적, 고

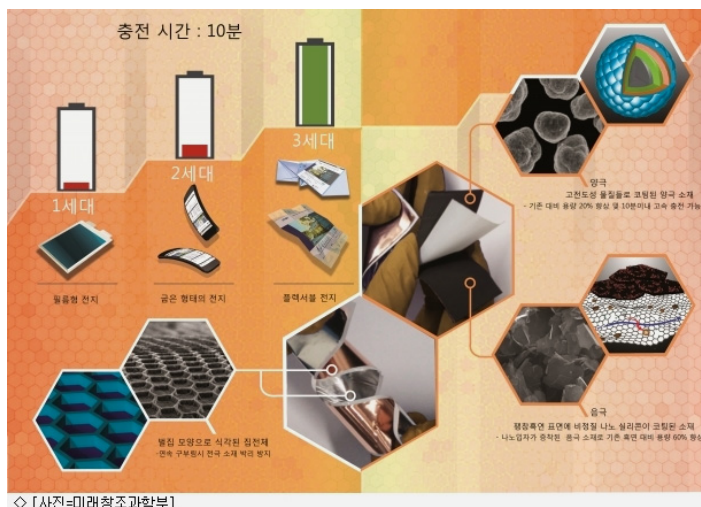


그림 1. 차세대 배터리 기술 전망(미래창조과학부)

속충전과 함께 경량의 플렉서블 기능성 확보를 차세대 기술로서 설정한 바 있다(그림 1).

본 연구는 휴대와 설치가 간편하고 구부릴 수 있도록 에너지변환 및 저장 시스템을 집적 구성함에 있어서 플렉서블 III-V족 태양전지와 플렉서블 유기 태양전지를 융합하여 웨어러블 IOT 기기 적용이 가능한 플렉서블 PV-EES(electrical energy storage) 에너지 전원 시스템 기술 개발에 관한 것이다.

다중접합 III-V족 태양전지는 고효율(PCE \geq 28%, 1 sun), 소면적 대전압(\geq 2.0 V, 25 mm²)과 유연성을 확보하고 있으며, 고집적, 고속충전이 가능한 플렉서블 이차전지 역시 많은 기술적 진보가 이루어지고 있다. 서로 다른 기반의 에너지 소자기술 간의 에너지 공정 메커니즘을 공유, 매칭하는 효율적인 설계를 통하여 집적 일체화가 가능하다. 아울러 태양전지와 이차전지를 집적하는데 있어 전력에너지 전환, 충전 및 방전 효율의 최적화를 위하여 저손실 전력 제어회로의 연구도 필요할 것으로 예상된다. 이와 같은 고효율 태양전지와 고집적 이차전지의 융합 에너지원의 출력이 200 mAh 이상을 예상하고 있는데 웨어러블 IOT 소자에 활용을 목표로 하고 있다. 2016년 IDTechEx의 정의에 의하면 웨어러블

소자의 경우 이차전지의 저장용량이 100 mAh 이상이 소요 될 것으로 예상된다(그림 2).

본 과제가 목표로 하는 소자 면적(50×100 cm²)에서 100 mAh 이상 전력 출력을 구현하기 위하여 고대전압(V_{OP} \geq 4 V), 고전류(I_{OP} \geq 250 mA) 생성이 가능한 III-V족 태양전지의 활용이 필수적이다. 이미 한국나노기술원은 III-V족 화합물 반도체 벌크형 다중접합 태양전지 기술로서 1.0 cm² 이하의 소면적 셀에서 각각 InGaP/GaAs/Ge 3중접합에서 34.06%(1 sun), InGaP/GaAs 2중접합 구조에서 28.06%(1 sun)를 개발하였다. LG전자는 벌크형 GaAs 단일접합에서 27.50%(1 sun) 및 InGaP 단일접합 태양전지에서 21.4%(1 sun)를 확보함으로써 이 분야 세계 최고 효율 기록 달성한 바 있다. 국외에서는 NREL(미)에서 inverted metamorphic(IMM) 에피 성장기술로 InGaP/GaAs/InGaAs/InGaAs 4중접합 태양전지 셀에서 45.7%(234 suns)의 높은 효율을 달성하였으며,^[1] Spectrolab(미)은 5중접합 태양전지를 wafer bonding 기술로 제작하여 38.8%(1 sun; 세계 최고 효율을 달성한 바 있다.^[2] Sharp(일)에서는 GaInP/GaAs/InGaAs 3중접합 태양전지를 IMM 에피성장기술로 37.9%(1 sun)을 확보하였다.^[3]







IoT, MEMS, CMOS memories, Medical implantable	Smart cards, Skin patch, RFID	Wearables, E-textile, Medical device	Smartphone, Tablet, Power tool, Toy	Transport	Large-scale energy storage
Capacity range					
1 mAh	10 mAh	100 mAh	1 Ah	100 Ah	> 1 kWh
Important features					
<ul style="list-style-type: none"> Rechargeable Small footprint, many micro-batteries Long life time Rapid discharge Tend to incorporate with energy harvesting 	<ul style="list-style-type: none"> Can be both disposable and rechargeable Laminar and thin, some with special form factor Relatively low power Cost sensitive 	<ul style="list-style-type: none"> High energy density for small volume Long working hours Flexible, stretchable or thin, some with special form factor 	<ul style="list-style-type: none"> Light-weight and small volume Long working hours Some with special form factors High power 	<ul style="list-style-type: none"> Safe Reliable High power High capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Cost advantage Long life time Reliable High capacity
					
Technology Status					
Small volume production	Available, mostly customized	Prototypes available	Research to prototype	Research	Very early stage

그림 2. Wearable electronics 기술동향(출처: Flexible, Printed and Thin Film Batteries 2016–2026: Technologies, Forecasts, Players; IDTechEx, Feb. 2016)

플렉서블 III-V족 화합물반도체 박막 태양전지 공정은 다양한 기술의 활용이 소요 된다; III-V족 화합물반도체 에피성장, 플렉서블 III-V 태양전지 모듈 제조, 박막전사 기술 및 기판 재사용 기술, 나노 구조체 형성 기술. 국내에서는 플렉서블 III-V족 태양전지 기반 기술인 기판박리(ELO; epitaxial lift-off) 기술을 이용하여 InGaP/GaAs 2중접합에서 24.52%(1 sun), GaAs 단일접합에서 21.91%(1 sun)를 달성하였으며(한국나노기술원), 플렉서블 GaAs 단일접합으로부터 22.10%(1 sun)를 달성한 바 있다(아주대). GIST/KIST에서는 ELO 기술을 이용한 6×6 mm² 크기의 플렉서블 GaAs 단일접합 태양전지에서 13.2%(1 sun)를 보고한 바 있다. Alta Devices(중국)는 ELO 및 기판 재사용 기술을 이용한 GaAs 기반의 고효율 플렉서블 태양전지는 GaAs 단일접합에서 28.8%(1 sun), InGaP/GaAs 2중접합에서 31.6%(1 sun) PCE를 보고하고 있다.^[4]

한편, 지금까지의 상용화되고 있는 대부분의 이차전지(secondary battery)는 무기물인 희소금속(리튬 등)을 포함하고 있어 가격이 높고 무게가 무거운 단점을 지니고 있다. 대표적으로 리튬 이차전지는 배터리 시장이 확대됨에 따라 리튬의 원료 가격이 급속히 상승하고 있어 경제성이 급속히 떨어지고 있을 뿐만 아니라, 폐기 및 재활용이 어려우며, 환경오염을 유발시킬 수 있다고 전망되고 있다. 또한, 지금 이차전지에서 사용하는 액체 전해질은 열적 안정성이 낮아 전지의 폭발을 유발하는 원인이 되기도 한다. 가격이 저렴하며 무게가 가볍고 친

환경적인 새로운 이차전지의 개발이 필요한 이유이다. 이와 같은 니즈를 만족할 차세대 기술로서 유기 이차전지 기술이 주목받고 있다.

세계적으로 유기 이차전지(organic secondary battery)의 연구는 아직 초기단계로서 연구결과와 발표도 제한적이다. 본 연구팀(청주대학교)에서는 유기 이차전지의 안전성을 향상하는 유기 활물질을 합성하였으며 그라파이트를 유기 전극의 집전체로 사용하여 전극의 무게를 감소 시켰으며, 바인더 없이 제조된 유기 전극을 제작하여 470 Wh/kg의 높은 에너지 밀도와 우수한 수명 특성을 갖는 플렉서블 유기 full-cell 이차전지 개발한 바 있다(그림 3).^[5] GIST(한국)에서는 기존의 PTMA 유기 활물질을 SWNT carbon nanotube에 코팅 시켜 전극을 이용하여 우수한 고율 특성 및 수명 특성을 보인 바 있다. 일본의 연구에서는 2,2,6,6-tetramethylpiperidinyloxy (TEMPO) 기반의 유기 전극 활물질을 사용하여 3.4 V의 평균 전압과 110 mAh/g의 이론 용량을 확보하였고, 전도도가 우수한 VGCF와 함께 전극을 제조하여 1 C에서 104 mAh/g 용량을 보인바 있다. 중국도 PTMA를 유기 양극 활물질로 사용하여 그라핀과 함께 전극을 제조하여 우수한 고율 특성과 수명 특성을 얻은 바 있다.

플렉서블 배터리 기술로서 UNIST(한)에서 구겨진 상태에서도 발열 및 폭발 반응 없이 안전한 성능을 보이는 고유연성, 고내열성을 동시에 확보된 박막의 플라스틱 크리스탈 고분자 전해질을 개발하였다. 이 플라스틱 크리스탈 고분자 전해질은 극박화(약 25 μm)가 가능하며,

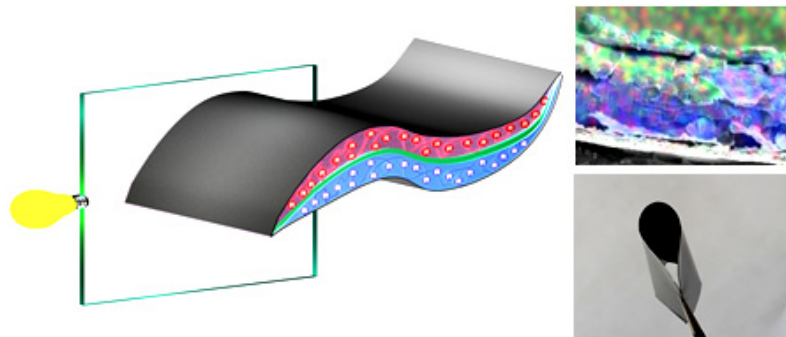


그림 3. 플렉서블 유기 이차전지 제작^[5]

구부리거나 휘는 등 자유자재로 변형이 가능한 우수한 기계적 유연성을 보였다. KAIST와 한국표준연구원에서 공동 개발한 신용카드보다 얇고 무선 충전이 가능한 플렉서블 리튬이온 배터리를 개발했으며 5,000번 이상의 연속 굽힘 실험을 통해 배터리 성능 유지와 함께 더 유연한 새로운 개념의 전극 구조가 가능하다는 사실을 확인된 바 있다.

아직 세계적으로 태양전지와 이차전지를 직접적으로 모노리식 집적한 융합형 소자 개발은 초기단계이며, 공통 플랫폼을 이용하여 융합한 하이브리드 집적화 기술이 주로 연구되고 있다. 2017년 UNIST(한)에서 c-Si 태양전지와 Li-이온 배터리의 n-전극을 공유하는 집적형 융합 모듈의 프로토타입을 개발하여 보고한바 있다.^[6] Stanford Univ.(미)에서는 Ni(0.3 μm)/Si 웨이퍼 위에 제작한 a-Si 박막 태양전지를 기판으로부터 분리한 다음 임의의 표면 위에 부착하는 lift-off 공정기술을 개발하였다.^[7] Ohio State Univ.(미)에서는 자가 충전 솔라 패널(self-storage solar panel) 기술 개발을 발표하였는데, 이 연구에서는 redox-coupled dye-sensitized photoelectrode를 광충전을 위하여 lithium-oxygen 배터리와 집적화함으로써 집적형 소자를 구현하였다.^[8] Kogakuin Univ.(일)의 연구팀은 hybrid solar cell-and-battery를 결합하는 연구 프로젝트를 수행하고 있으며, Tech. Univ. Munich(독)에서는 다공성 게르마늄의 구멍을 유기 폴리머로 채운 Ge-나노구조를 이용한 태양전지의 전극을 구성하고 하이브리드 집적화를 통한 배터리의 전자이동을 원활하게 하는 연구를 수행하고 있다.

그림 4는 본 연구팀에서 개발하고자 하는 플렉서블 III-V족 화합물반도체 태양전지와 플렉서블 유기 이차전지를 집적 융합한 PV-EES 모듈의 개념도이다. 융합 기술 개발을 위한 연구팀의 업무 구성은 1) 유기 소재 플렉서블 이차전지 개발, 2) 고출력 초경량 플렉서블 III-V 태양전지 셀 개발 및 3) PV-EES 통합 초경량 플렉서블 융합전원 모듈 개발로 이루어져 있다. 그림 5는

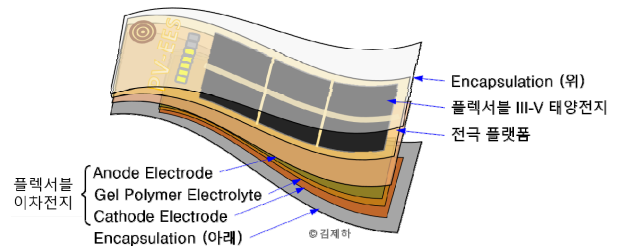


그림 4. PV-EES 융합 집적 전원 모듈의 개념도

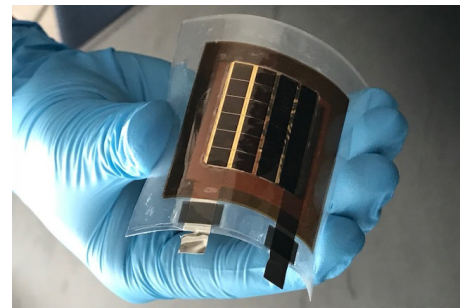


그림 5. PV-EES 융합모듈 시제품

III-V족 태양전지와 이차전지를 결합한 시제품 모습이다. 먼저, 고집적 플렉서블 이차전지 팀에서는 유기/무기 전극으로 이루어진 플렉서블 유기 full-cell 이차전지를 개발함으로써 가역용량 >200 mAh/g, 수명 특성 80% @1000cycles 인 특성을 확보하는 것이며, 고효율 III-V 태양전지 셀 팀에서는 고효율, 초경량, 대면적의 특성확보를 위하여 각각 광전변환효율 34%(3중접합), 비출력 ≤ 1.1 W/g), 셀 면적 = 3×3 cm²을 목표로 하고 있다. 마지막으로 PV-EES 융합 기술팀에서는 자가 에너지 저장 효율(PSE; power conversion/ storage efficiency) > 15%, 출력 에너지 밀도 > 250 Wh/kg의 특성과 모듈의 신뢰성 확보를 위하여 Damp Heat(DH) 시험; 85°C/85%RH, 500 hrs(IEC61646 기준) 와 굽힘 테스트를 실행할 것이다.

연구팀의 보유기술 및 역량

‘웨어러블 기기용 플렉서블 PV-EES 융합 모듈 원천

기술' 개발연구팀의 업무 구성은 1) 유기 소재 플렉서블 이차전지 개발, 2) 고출력 초경량 플렉서블 III-V 태양 전지 셀 개발 및 3) PV-EES 통합 초경량 플렉서블 융합 전원 모듈 개발로 이루어져 있다. 이 연구는 청주대학교, 충북대학교, 중앙대학교, 한국나노기술원, (주)지피, (주)세븐케이에너지 와 충북테크노파크 등 7개 기관이 3개 세부과제와 2개의 위탁과제로 참여하는 학-연-산 협동으로 수행을 하고 있다(그림 6). 각 기관의 연구 역할과 보유 기술은 다음과 같다.

1) 청주대학교(총괄책임자: 김제하 교수)는 1세부 과제 수행 및 연구총괄을 담당하고 있다. 플렉서블 박막소자를 공통 기반기술로 하는 태양전지 소자, 배터리 소자를 융합하여 외부의 전원 연결 없이도 독립적으로 구동이 가능한 태양전지 집적 자가-전원 디스플레이 시스템에 시스템 구성을 담당하고 있다. 이 기술개발과 관련하여 태양전지-배터리-디스플레이 집적소자에 관한 원천

특허를 보유하고 있다.^[9] 이 연구에서는 플렉서블 태양 전지 및 플렉서블 박막 배터리의 각각 n-전극과 애노드 전극을 공유하는 융합구도를 창출하며 이를 이용하여 고 집적, 고속충전, 플렉서블 자가-전원 시스템 개발하고, 아울러 표시소자(LED 기반)를 함께 실장한 Integrated Energy Circuit 또는 SOP(system-on-packaging) 시험시제품(prototype) 제작을 담당하고 있다. 또한, 집적 소자의 장기 신뢰성 확보를 위한 ALD(atomic layer deposition)을 위한 유기/무기 다층박막(dyads)을 이용한 수분차단층 개발 및 광 투과 최적화 폴리머 소재를 활용한 플렉서블 encapsulation 기술을 개발하고 있다.

또한, 청주대학교(김재광 교수) 연구팀은 유기 이차전지 개발의 선두 그룹으로서 Density Functional Theory (DFT)를 이용하여 분자 구조의 에너지 레벨을 계산하고 충전-방전 전압을 유추함으로써 다양한 산화-환원 전압대의 유기 분자 구조를 디자인하고 합성하여 플렉서블 이차전지를 개발한 바 있다(그림 7). 이러한 유기 이



그림 6. PV-EES 융합 모듈 연구팀

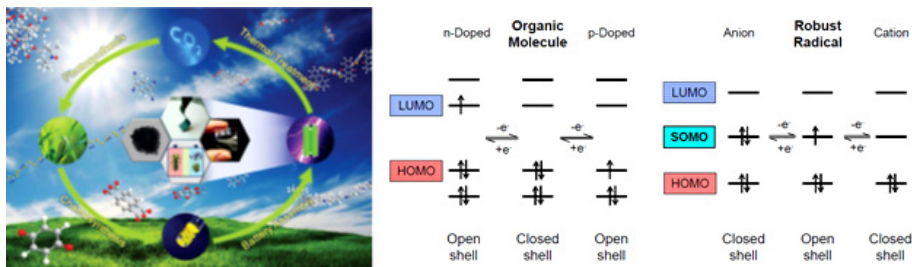


그림 7. 유기 이차전지의 자원 순환그림과 에너지 레벨에 따른 전자 이동 원리

차전지 기술은 유기물 소재들을 사용하기 때문에 필요 시 언제든지 합성할 수 있어 자원 고갈의 문제를 해결하고, 전지의 저가격화 해결책을 제시해 줄 수 있으며, 가볍고 플렉서블한 기능을 확보할 수 있게 한다. 이와 같은 유기 이차전지의 우수한 특성은 태양전지-이차전지 융합소자와 같은 미래 신기술로 매우 중요한 기술로 인식되고 있다.

세부 연구로서는 이차전지는 태양전지에서 발생하는 전압과 전기량에 맞게 분자 구조를 구성하고 단시간에 고속 충전이 가능하도록 하는 유기물 전극을 디자인하며 제작할 예정이다. 그리고 이온 전도도가 우수하면서 안전성을 확보할 수 있는 새로운 구조의 복합 겔 고분자 전해질도 함께 개발하고 있다. 겔 고분자 전해질은 고체 전해질로서 플렉서블 융합 소자에 있어 장기 신뢰성 및 안전성 확보에 반드시 필요한 소재이다. 청주대학교(김재광 교수)는 유기이차전지, 복합 고체 전해질 부분에 있어 우수한 연구 성과를 창출하고 있으며 2017년 교육부 주관 우수연구 성과로 선정되어 교육부 장관상을 수상하였다. 현재 10편/년 정도의 국제 저명학술지에 논

문을 출판하고 있으며, 에너지 분야의 TOP 저널에 표지 논문으로 선정되어 출판되기도 하였다. 플렉서블 유기 이차전지와 한 논문을 출판되었으며 태양전지, 유기이차전지 및 전고체 전지와 관련한 다수의 특허를 보유하고 있다.

충북대학교(조중상 교수)에서는 플렉서블 무기물 기반 이차전지 연구를 담당하고 있다. 연구 내용은 1) 플렉서블 1차원 구조의 음극 및 양극 소재 합성을 위한 탄소/금속화합물 구조체 개발 2) 1차원 구조체 합성을 위한 전기방사 공정기술 개발, 3) 그래핀, CNT 기반의 장주기 및 고율 특성을 갖는 1차원 구조의 플렉서블 전극소재 개발을 목표로 하고 있다. 그래핀, CNT/나노금속 화합물로 구성된 1차원 복합구조체의 sheet형 전극소재 개발 및 전극소재의 flexibility 물성 확보하며, 그래핀/CNT 구조체 내 중공구조 금속산화물을 도입하여 충방전시 발생한 내부응력을 효과적으로 상쇄, 장주기 특성을 갖는 flexible 전극재료 개발하고, 중공구조 금속화합물 표면의 결정성 탄소 코팅을 통한 효율적 전자 흐름 유도기술 개발한다(그림 8). 금속 산화물, 황화물로 구

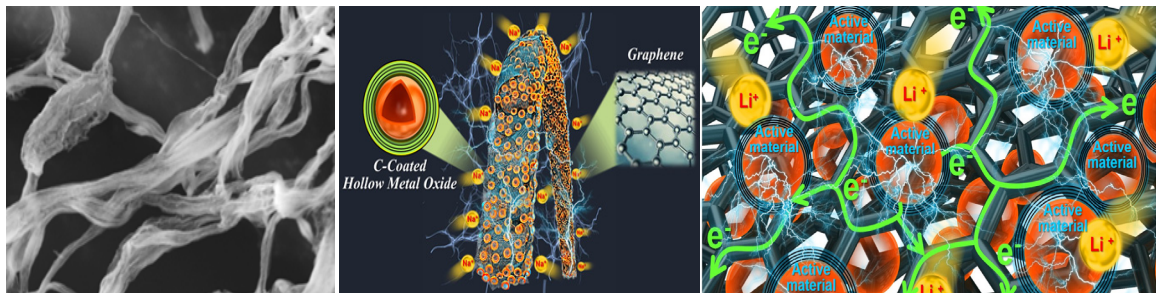


그림 8. 그래핀 복합 구조체 및 그래핀 네트워크를 통한 1차원 음극구조 내 전자의 이동거동 모식도

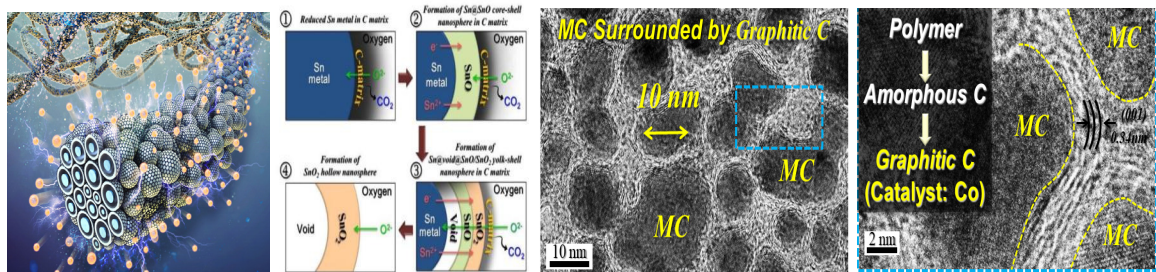


그림 9. 1차원의 그래핀/CNT 구조체 내 Kirkendall diffusion effect 기전 적용에 의한 중공구조 금속화합물의 복합화를 통한 이차전지 전극소재 기술

성된 1차원 탄소복합 구조체 합성기술과 1차원의 그래핀/ CNT 구조체 내 Kirkendall diffusion effect 기전 적용에 의한 중공구조 금속화합물의 생성기전 규명 및 복합화 기술을 개발하며, 금속촉매의 graphitization 기전적용에 의한 1차원 구조체 내 결정형 탄소를 연속상으로 갖는 탄소 복합구조체 합성기술 개발 할 예정이다 (그림 9).

충북대학교의 이차전지팀은 현재, 리튬, 소듐, 황 이차전지 관련 연구 진행 중이며, 세계적 수준의 이차전지 소재합성 성공, SCI 상위 10% 이상의 논문에 발표 중 (ACS Nano, Nano Energy, Small, Journal of Materials Chemistry A, Nanoscale, ACS Applied Materials & Interfaces, Nanoresearch 등)이다. 이 연구실에서 확보하고 있는 기술은 나노구조체 합성 기술 및 상업화 가능기술 보유 전기방사 시스템을 이용한 bubble-nanorod 구조(속이 빈 구형의 금속산화물로 구성된 1차원 구조) 세계최초 합성 및 우수한 이차전지 특성 도출, 최적화된 분말 합성공정(고상, 액상 및 전기 방사, 화염 분무 열분해, 전기분무 열분해, 분무 건조공정 등) 적용 및 복합화, 분무건조공정(Spray drying)을 이용한 전극 활물질 대량합성 기술개발-상업화 가능, 금속화합물/ 그래핀 복합화의 선행연구를 통한 flexible, stretchable

battery 원천기술 보유하고 있으며, 센서, 촉매, 바이오 등 다양한 응용분야에 활용 가능한 신규 나노 구조체 설계, 합성 가능하다.

중앙대학교(강동원 교수) 연구팀은 PV-EES 융합소자의 신뢰성 제고를 위한 PV encapsulation 연구를 맡고 있다. 태양전지-이차전지 융합모듈에서 발전을 담당하는 태양전지의 장기신뢰성(85°C/85% R.H. test 진행)을 확보하기 위하여, 태양전지 encapsulation 공정이 필요한데 본 과제에서는 고성능의 수분차단 소재를 활용하기 위하여 ALD(Atomic Layer Deposition) 공정을 통하여 inorganic/organic 소재가 교차하도록 다층 차단구조(multi-barrier)로 dyads를 형성하여, 소자의 안정성 향상에 기여하도록 소자를 구성한다(그림 10). 이러한 multi-barrier는 상기 그림과 같이 dyads 수를 증가시키면, WVTR(Water-Vapor-Transmission-Rate)을 더 감소시킬 수 있다.^[10] 반면, 광학적 측면에서는 태양전지로 입사하는 태양광의 투과율을 감소시킬 수 있어서 encapsulation 특성(WVTR)과 multi-barrier의 투과율을 동시에 고려하여 종합적인 설계가 필요하다. 또한, dyads 수분차단층을 위한 ALD 공정 전에, III-V 태양전지의 두께가 20 μm 이상으로 기존의 박막태양전지와 비교하여 매우 두꺼운 편이며, 수십-수백 nm의

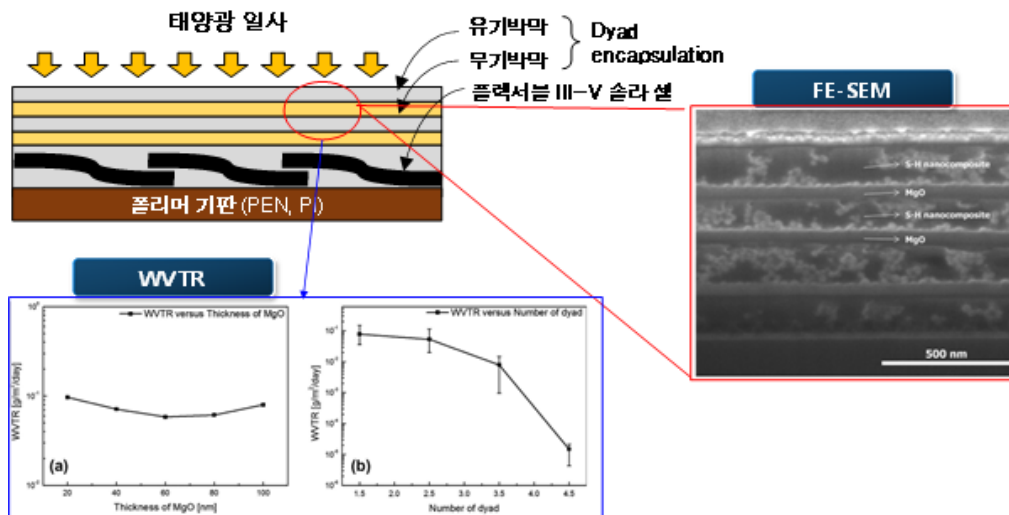


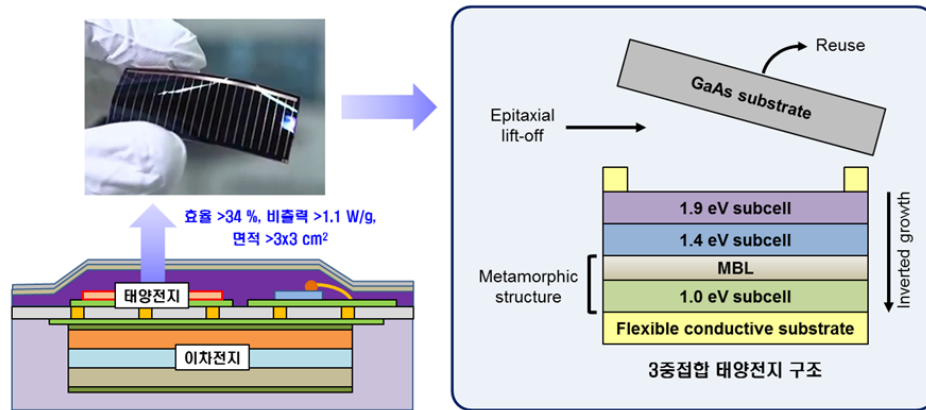
그림 10. PV-EES 융합소자의 신뢰성 제고를 dyads형성 및 PV-Encapsulation 구조

dyads로는 encapsulation의 edge 부분에서 신뢰성 저하 문제(barrier 파손으로 인한 투습)가 야기될 가능성이 있다. 이를 보완하기 위하여 태양전지 위에 hydrophobic 한 유기 소재 등을 통해 평탄화 작업(planarization)을 통해서 encapsulation 역할을 일정 부분 담당하면서도, multi-layer dyads가 smooth한 표면에 적용되어 장기 안정성을 확보할 수 있도록 연구개발을 수행한다. 다양한 encapsulation 소재 선정 및 평탄화 공정과 수분차 단층 공정을 진행하고, WVTR 시험과 투과율 값의 모니터링을 통해, 최적의 소재 및 구조를 찾는 연구를 수행한다. 수분 및 산소 침투 등의 취약점을 찾는 오류분석(failure analysis)를 통해 feedback 및 개선점을 확보할 예정이다.

2) 한국나노기술원(연구책임자: 강호관 박사) 연구팀은 태양전지-전기저장(PV-EES) 융합소자의 핵심 소자인 고효율 초경량 플렉서블 III-V 태양전지 개발을 맡고 있다. 배터리와의 일체형 결합을 위해서는 높은 광전 변환 효율뿐만 아니라 태양전지의 두께와 무게를 최소화하는 경량화 기술이 필수적이다. 이와 같은 초경량 플렉서블 태양전지 개발을 위한 기술개발 내용은 크게 세 가지 방향으로 추진 중에 있다(그림 11).

첫째, III-V 화합물반도체 기반의 에피성장 기술과

소자제작 기술 개발이다. 3중 접합 구조의 적층형 태양전지 셀을 개발하여 34 % 이상의 광전변환 효율 달성을 목표로 하고 있다. 최적의 밴드갭 조합 구현을 목표로 Ge 하부셀을 1.0 eV 밴드갭 태양전지 셀로 대체하여 1.9/1.4/1.0 eV의 3중접합 구조 제작 기술을 개발 중에 있다. 이와 같은 최적의 3중접합 구조는 태양광을 보다 효과적으로 활용하고 높은 개방전압을 얻을 수 있어, AM1.5G, 1 sun 조건에서 40 % 이상의 광전변환 효율 달성이 가능하다. 밴드갭 1.0 eV의 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ 태양전지 에피성장 기술과 기판 박리를 위한 epitaxial lift-off(ELO) 기술을 개발하여 InGaP/GaAs/InGaAs 3중접합 태양전지 구조를 유연 기판 위에 구현하고 광전 변환효율 34% 이상의 고효율 플렉서블 III-V 태양전지 셀을 개발하고자 한다. 1.0 eV 밴드갭의 $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ 와 에피성장용 GaAs 기판의 큰 격자상수 부정합(lattice mismatch; 2.1%)의 문제 해결을 위해 InGaAs 층의 In:Ga 조성비를 제어하여 격자상수를 단계적으로 변화시키는 Metamorphic Buffer Layers(MBL) 층을 삽입하여 결함을 최소화하는 기술 개발을 수행할 예정이다. N-층과 P-층의 태양전지 구조를 역순하는 inverted 에피 성장기술을 연구하여, 격자 부정합 에피결합 최소화하는 역변성(inverted metamorphic, IMM) 구조의 3중 접합 태양전지 에피성장 기술 개발을 진행 중에 있다.



태양전지-전기저장 융합 플렉서블 자가전원 모듈

고출력 초경량 플렉서블 III-V 태양전지 셀

그림 11. 태양전지-전기저장 융합소자용 플렉서블 III-V족 태양전지 기술 개념도

현재까지 개발된 IMM 3중접합 태양전지는 수광부가 n-type(-), 후면부가 p-type(+)인 N-on-P 구조로 제작하는 것이 일반적인 에피 성장 순서인데 이러한 경우 후면부가 전자를 흡수하는(+) 극이 되어 이차전지 집적 시 충전이 불가능하다는 단점이 있다. 이차전지와 모노리식 집적화를 위하여 그림과 같이 에피층 전체의 도핑 type을 반전시킨 P-on-N 구조의 InGaP/GaAs/InGaAs 태양전지 에피를 구현하는 기술을 개발 중이다(그림 12). 이는 EES 융합소자용으로 처음 시도하는 에피구조로써, 후면부에 집적되는 이차전지의 효과적인 충전이 가능할 것으로 예상하고 있다.

둘째, 태양전지 에피층을 모 기판으로부터 분리하고 유연기판으로 전사하는 기판박리 기술을 개발 중이다(그림 13). 기판과 분리된 고효율 III-V 태양전지는 유연성과 경량화를 동시에 만족시킬 수 있을 뿐만 아니라, 분리된 기판을 에피 성장에 재사용함으로써 태양전지 제조단가를 획기적으로 낮출 수 있다. 본 연구에서는 기판, 에피층 및 금속 전극층의 인위적인 스트레스 조절을 통해 대면적 태양전지 에피층을 단시간 내에 손상 없이 유연기판으로 전사할 수 있는 stress assisted ELO 기술 개발을 목표로 한다. 이와 같은 방법으로 기판에서

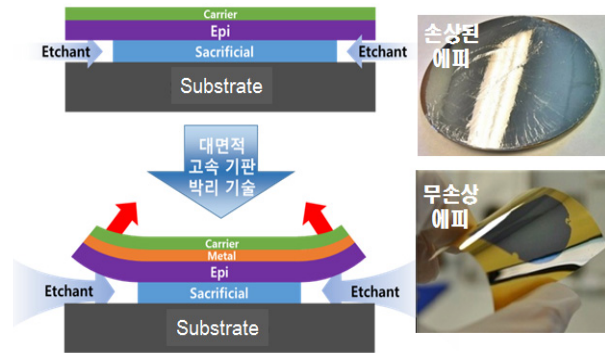


그림 13. 무손상 고속 기판 박리 기술 개발

분리된 3중접합 태양전지는 각 셀들의 성장두께 및 유연 기판의 두께를 조절하여 1.1 W/g 이상의 비출력을 달성할 수 있을 것으로 기대되며, 이차전지 융합소자를 제작에도 적용이 용이할 것으로 예상된다.

셋째, 이차전지의 충전특성(전압 5 V, 전류 250 mA)과 모듈 패키징 공정을 고려한 3×3 cm² 이상의 대면적 III-V 태양전지 제작 기술 개발이다(그림 14). 태양전지 모듈은 응용 제품에 따른 정격 전압 및 정격 전류를 충족시키기 위해 직렬 및 병렬 구조의 적절한 셀 배치 설계가 요구된다. 대부분의 III-V 태양전지는 작은 면적(0.5×0.5 cm²)의 단일 셀 형태로 개발되고 있기 때문에, 250 mA의 충전 전류를 충족시키기 위해서는 수백

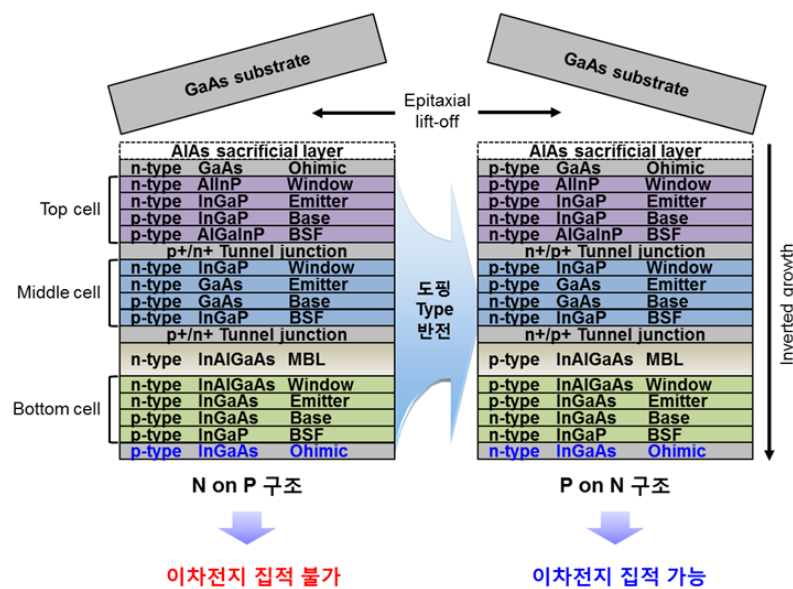


그림 12. P-on-N 구조의 InGaP/GaAs/InGaAs 태양전지 에피성장 기술 개발

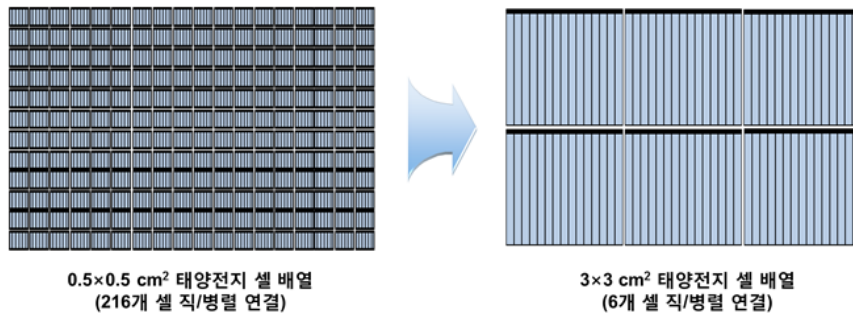


그림 14. 태양전지 셀 면적에 따른 250 mA 전류 공급 모듈 배열 구조 비교

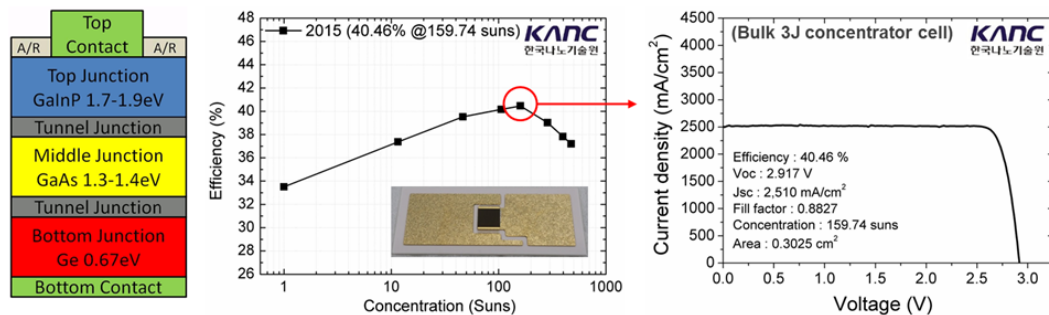


그림 15. 한국나노기술원 집광형 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지 연구 결과

개의 태양전지 셀을 병렬로 연결해야 한다. 이 경우 모듈 제조 과정이 복잡해지고 공정비용이 증가하며, 셀 효율 대비 모듈 효율 저하 문제 발생 가능성이 높아진다. 본 연구에서는 4인치 웨이퍼를 이용한 대면적 태양전지 에피성장 기술과 소자 제작 공정기술을 개발하여 3×3 cm² 이상의 대면적 플렉서블 III-V 태양전지 셀을 제작할 예정이다. 대면적 태양전지 셀 제작을 위해 두께, 조성, 도핑 등 에피 특성이 균일한 대면적 에피성장 기술 확보가 필수적이다. 또한 대전류 특성을 고려한 전면의 전극 구조 최적화 설계를 통하여 저항손실을 최소화하고자 한다. 이와 같은 대면적의 III-V 태양전지 단위 셀 제작 기술 및 모듈 제조 공정 기술 개발을 통하여 태양전지 셀 배열 구조 및 모듈 제조 공정 단순화가 가능하며, 공정비용 절감은 물론 모듈 제조 공정에서의 효율 저하 문제를 최소화할 수 있는 장점이 있다.

본 연구진은 다년간 III-V 화합물 반도체 기반의 다중접합 태양전지 에피 설계, 성장 및 소자 제작 기술을 연구하여 왔으며, 160배 집광 시 40.46%의 광전변환효

율 특성을 갖는 집광형 3중접합 태양전지 제작에 성공하였다(그림 15). 이는 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지 세계 최고효율(41.6%)에 근접하는 기록으로 III-V 태양전지 에피성장 및 소자제작 분야에서 세계 수준의 원천기술을 확보했다는 점에서 큰 의미를 갖는 연구 성과이다. 이를 바탕으로 태양전지-전기저장(PV-EES) 융합소자의 핵심 소자인 고풍력 초경량 플렉서블 III-V 다중접합 태양전지 연구 개발에 매진할 예정이다.

3) (주)지피(연구책임자: 김형석 차장)는 3세부 공동 기관으로 참여하고 있다. 본 과제의 업무내용은 III-V 족 화합물 태양전지 셀과 플렉서블 이차전지를 공통기판(플랫폼)에 동일한 전극(n-전극 및 애노드 전극)을 공유하는 모듈 집적화 기술 분야를 담당하고 있다. 그림 16은 이 패키징의 한 실례를 보이고 있다.

참여기업인 (주)지피는 광전소자 및 박막기반의 패키징 전문기업이다. 현재, LED 산업 중 융합(응용) 산업을 사업화 분야를 선정하여 제품의 개발 및 제조를 진행 중

이며, LED 의료기기 과제를 통해 LED 응용분야 내에서 역량을 확장하고 있다. LED 패키지는 사용되는 LED 칩의 출력, 패키지 형상, 응용분야, 패키지 몸체의 소재, 패키징 레벨 등 다양한 방법에 의해 분류가 되며, 소재의 경우 플라스틱, 세라믹, 금속 패키지로 분류된다. 주식회사 지피는 2009년 광통신 모듈 분야로 설립하여 현재는 RF 전력 증폭기 모듈, LED 응용 제품 분야로 확장하여 사업을 진행 중이다. class 10,000의 클린룸 및 생산 장비, 측정 장비 등의 보유 인프라를 적극 활용하여 광통신 모듈 생산 및 개발을 진행할 뿐만 아니라, LED 응용제품 개발, 제조를 수행할 수 있는 능력을 보유하고

있다(그림 17). 다수의 지원과제를 수행하며 확보한 기술력을 상용화하기 위해 기술 이전 및 출원을 통한 약 40여건 이상의 지식재산권을 확보하여 IP 스타기업 선정, 기술혁신 기업 선정, 2017년에는 유망중소기업으로 선정되기도 하였다. 주식회사 지피의 LED 사업분야는 LED 응용 제품 분야로 플렉시블 PCB 제품, 투명 PCB 제품, 웨어러블 및 실시간 통신 제품 등을 개발하여 일본에 수출을 진행 중이다. LED 관련 보유 기술로는 플렉시블 및 투명 기판의 회로설계, 회로제작, 공정기술과 통신 제어기술, 어플리케이션 제어기술 등 LED 응용 제품의 개발 및 제조에 필요한 핵심 기술을 확보하고 있다.

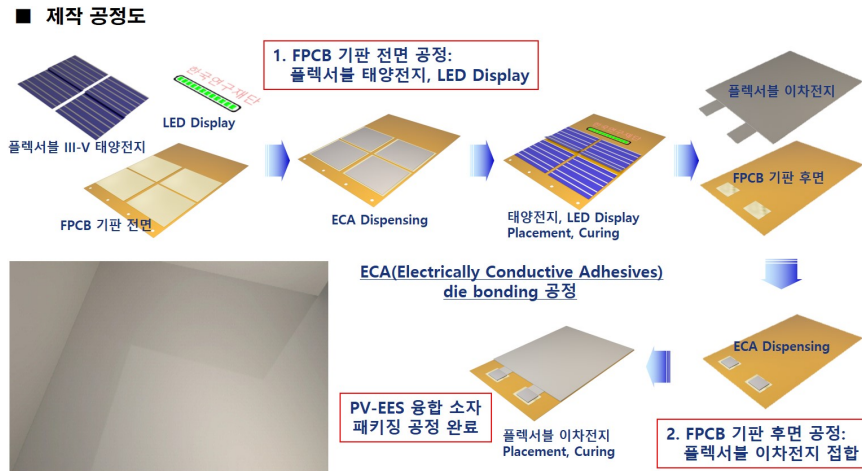


그림 16. 태양전지 셀 및 이차전지 융합 패키징 순서도



그림 17. (주)지피의 PV-EES 집적화를 위한 제조 설비 연구 및 생산 인프라

또한 정부과제를 수행하며 광의료 관련 LED 기술분야에 대한 경험을 바탕으로 의료용 LED 패키징 기술, 회로 설계, 공정 기술 등을 확보하여 최근 성장하고 있는 LED 응용 제품 기술도 보유 중이다.

4) 충북테크노파크(연구책임자: 박강희 팀장) 연구팀은 이차전지 소재 분석 및 신뢰성 평가 시제품 또는 소재의 구조 분석을 위한 비파괴 분석을 담당하고 있다. 충북테크노파크는 이차전지 뿐만 아니라 박막 태양광 분야에 있어서 중부권 최대의 시험 분석기관이다. 본 연구에서는 주로 이차전지 소재의 결합 강도, 내구성, 단면 분석, 치수 측정과 소재 및 기술 요소의 특성 불량원인 및 솔루션을 제공 서비스 지원하며, 소재의 미세구조 및 성분 분석과 물질의 조성 농도 측정에 참여하고 있다(그림 18). 지난 2015년부터 산업통상자원부의 국책사업으로 추진 중인 플렉서블 전자소재 산업기술기반 조성사

업(산업통상자원부; 2015 ~ 2019; 총괄기관: 한국전자통신연구원)을 통하여 플렉서블 이차전지, 태양전지 및 디스플레이의 신뢰성 계측장비 구축을 통한 종합적인 시험평가가 가능할 것으로 예상하고 있다. 본 연구에서는 소재나 부품, 시스템 등이 주어진 사용 및 환경조건 하에서 고장 없이 일정기간(시간, 거리, 사이클 등) 동안 품질 및 성능 유지 가능한지 전기적 화학적 신뢰성 시험 지원할 예정이다.

5) (주)세븐킹에너지(연구책임자: 손지원 대표이사)는 본 연구과제의 담당 연구업무는 겔 고분자 전해질 개발 및 이차전지 패키징 기술 개발이다. 앞에서 설명하였듯이 플렉서블 이차전지의 내구성과 유연성 기능을 확보하기 위하여 액체 전해질이 아닌 고체 전해질 개발이 필수적이다. 이를 만족하기 위하여 본 기업에서는 전기 방사와 *in-situ* 이미드화 공정에 의한 폴리이미드 겔 고



그림 18. 충북테크노파크의 이차전지 소재 분석 및 신뢰성 평가 시스템

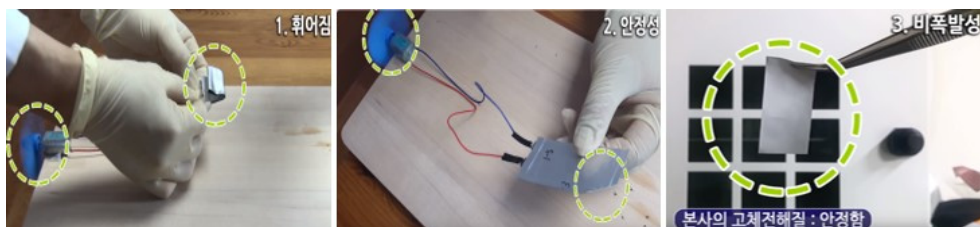


그림 19. (주)세븐킹에너지의 플렉서블 이차전지 기술 및 시제품

분자 전해질 제조하여 이차전지에 적용함으로써 여러 번 구김에도 항상 일정한 겔 고분자 전해질 개발하고 있다(그림 19). 이 전해질이 갖추어야 하는 특징은 고속 충전 모드 동작을 위해 이온전도도가 우수, 인장 강도와 열적 안정성이 우수해야 하는데, 외부 수분 침입방지, 내수성, 방수성, 내열성, 내후성, 작업성 등 Seal 재료의 요구 성능에 적합한 소재 확보하는 것이 중요하다. 한편, 이차전지 패키징 기술에 있어서는 알루미늄 적층막 형태로, 이중 알루미늄 호일층은 수증기를 포함하는 가스에 대한 높은 배리어성을 부여하기 위해 사용되며, 외층필름 및 내층필름은 각각 기계적 안정성과 화학적 안정성을 부여해야 한다. 이차전지의 양극과 음극이 셀 외부로 노출된 단자의 접합 부위인 리드 탭과 봉지재 간의 우수한 실링 특성 확보 기술 개발을 통해 고성능, 고신뢰성 봉지기술 확보하는 것이 중요하다.

이차전지 관련 연구개발 및 제조 기업인 (주)세븐킹에 너지는 양산제품을 출시한 적은 없지만 이차전지 제작 및 시제품 개발 기술 보유하고 있는 이 분야의 기술집약적 스타트업(start-up) 기업이다. 핵심 기술로는 복합 고체 전해질, 유기전지 등 차세대 전지 관련 공정 기술이 있다; 고안정성 플렉서블 배터리 소재 개발 및 합성 기술, 겔고분자 전해질을 위한 부직포 고분자 합성 및 대면적화 기술. 차세대 전지 관련 특허 4 건을 보유하고 있고, 2018년 4월 양산 설비를 완료할 예정이다.

맺음말

이 기고문에서는 본 연구팀(청주대학교, 총괄책임자: 김제하)에서 2017년 12월 연구수행을 시작한 웨어러블 기기용 플렉서블 III-V족 화합물반도체 태양전지와 플렉서블 유기 이차전지를 집적 PV-EES 융합 모듈의 기술의 세부기술과 수행연구팀을 소개하였다. 최종결과 는 실험 시제품의 제작이며, 그 구체적인 계량 목표는

다음과 같다. 1) 전월 소자로서 고효율 III-V 태양전지 PV 소자에서는 고효율, 초경량, 대면적의 특성확보를 위하여 각각 광전변환효율 34%(3중접합), 비출력 ≤ 1.1 W/g, 셀 면적 = $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 을 목표로 하고 있으며, 3) 저장소자로서 고집적 플렉서블 이차전지 기술에서는 유기/무기 전극으로 이루어진 플렉서블 유기 full-cell 이차전지를 개발함으로써 가역용량 $>200 \text{ mAh/g}$, 수명 특성 $80\% @ 1000 \text{ cycles}$ 인 특성을 확보하는 것이며, 3) PV-EES 융합 모듈화 기술은 자가 에너지 저장 효율 (PSE) $>15\%$, 출력 에너지 밀도 $> 250 \text{ Wh/kg}$ 의 특성과 모듈의 신뢰성 확보를 위하여 Damp Heat(DH) 시험; $85^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$, 500 hrs(IEC61646 기준) 와 굽힘 테스트를 실행할 것이다. 웨어러블 모듈의 구현은 표시소자(LED 기반)를 함께 실장한 Integratged Energy Circuit 또는 SOP(system-on-packaging) 시험시제품(prototype)을 시연을 통하여 완성하고자 한다.

이 연구 업무 구성과 수행 연구팀 및 그 역량을 다음과 같이 소개하였다;

- 1) 유기/무기 소재 플렉서블 이차전지:
 - 청주대학교(사업총괄 및 1세부 연구책임)과 충북대학교(공동기관), 충북테크노파크와(주)세븐킹에너지(이상 위탁연구기관)이 참여하고 있으며,
- 2) 고효율 초경량 플렉서블 III-V족 태양전지:
 - 한국나노기술원(2세부 연구책임)이 참여하고,
- 3) PV-EES 통합 초경량 플렉서블 융합전원 모듈 및 평가: (주)지피(3세부 연구책임), 모듈 신뢰성 기술 연구의 청주대학교와 중앙대학교.

이 연구를 통하여 본 연구팀은 태양전지와 이차전지를 직접적으로 모노리식 집적한 융합형 소자 연구에 Flexible Electronics와 함께 Flexible Energy Integrated Circuit 기술 분야를 개척하고 발전에 기여하고자 한다.

참고문헌

- [1] R. M. France et al., "Design Flexibility of Ultra-High Efficiency 4-Junction Inverted Metamorphic Solar Cells," IEEE 41th Photovoltaic Specialist Conference (2015).
- [2] P. T. Chiu et al., "35.8% space and 38.8% terrestrial 5-J direct bonded cells," IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (2014).
- [3] K. Sasaki et al., "Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells," AIP Conference Proceedings 1556, 22 (2013).
- [4] B. M. Kayes et al., "Flexible Thin-Film Tandem Solar Cells With >30% Efficiency," IEEE Journal of Photovoltaics 4, 2, 729-733 (2014).
- [5] T. S. Kim, et al., Journal of Power Sources 361 (2017) 15-20.
- [6] H. -D Um, et al., Energy Environ. Sci., (2017) 10, 931-940
- [7] Scientific Reports doi:10.1038/srep01000 2012
- [8] Wu et al., Nature Commun, 2014: DOI: 10.1038/ncomms6111
- [9] 대한민국 특허 등록 (10-1708177) "태양전지 집적 자가전원 디스플레이 시스템"
- [10] Thin film encapsulation for organic light emitting diodes using a multi-barrier composed of MgO prepared by atomic layer deposition and hybrid materials, Organic Electronics, Volume 14, Issue 7, July 2013, Pages 1737-1743.