

인쇄형 유기태양전지 기술

진 병 두 | 단국대학교 고분자시스템공학과, 교수 | e-mail : bdchin@dankook.ac.kr

최근에 인쇄전자 분야의 중요성이 매우 강조되면서 직접 인쇄기술에 대한 중요성이 커지고 있다. 최적화된 유기/나노 계면구조재료와 이의 가능성을 최대화할 수 있도록 고안된 소자 구조의 디자인에 의하여 안정적인 효율을 보이는 유기태양전지를 인쇄공정에 의해 제작하는 것은 저가격, 경량의 새로운 에너지원을 목표로 하는 유기태양전지 개발에 매우 중요한 핵심 요소이다. 관련 내용의 기술동향에 대하여 이 글에서 간략히 소개하였다.

유기전자소자의 응용분야

공액화합물을 비롯한 유기 전자재료는 역사적으로 금속 전극의 대체물질, 비선형광학소재 등의 응용에서부터 현재는 공액고분자 및 저분자재료를 이용한 유기발광소자(OLED), 고분자 memory device, 유기 박막 트랜지스터, 센서, 유기박막을 이용한 태양전지 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 현재 국내외에서 추진되는 플렉시블 디스플레이를 중심으로 한 미래 유망산업 아이템에 대한 선도 기술 개발을 위해서는 OLED, 유기태양전지, 유기고분자계 센서 등 플렉시블 유기 전자 소자의 프린팅 기술과 이에 관련된 소재의 표면/계면 특성의 효과적인 제어기술, 유기물을 이용한 논리소자 설계 기술, 그리고 이의 연속 생산기술인 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정기술 등에 집중적인 관심이 계속되고 있다. 보다 고해상도의 인쇄소자에서는 간격 20 μ m, 선폭 20 μ m 이하 수준의 인쇄가 다양한 방법으로 가능할 수 있다는 초기 결과가 보이고 있는데, 초박형/집적형의 유기 전자소자(그림 1 참조)의 요구 특성에 맞도록 가능성 유/무기 소재 간의 계면 적합성을 만족시키기 위한 연구가 필요하다고 생각되며, 이러한 기술이 확보되어야 프린팅 기술에 의한 다층소자의 제작기술이 본격적으로 가능해질 것이다.

유기태양전지에서 인쇄공정의 역할과 전망

산업적으로 중요한 신재생에너지 중 유기 및 나노융합 태양전지용 소재기술은 유기반도체 기반의 인쇄형 고분자, 고효율 태양전지용 화합물반도체 기반소재 등을 대표적으로 들 수 있는데, 이중 유기 및 유-무기 하이브리드형 태양전지 기술개발이 의미를 갖기 위해서는 생산에서의 경제성확보가 가능한 효율적 인쇄방식의 제작기술이 매우 중요하다. 이러한 프린팅 공정기술은 유리 및 플렉시블 필름기반의 태양전지 제작에 있어서 웹기반 롤투롤 생산 방식과 융합될 경우 프로세스 효율 측면에서의 혁신적 기술 진보와 미래지향적 부가가치 창출이 가능하다. 유기, 나노기반 태양전지용 재료는 직접 프린팅 기술로서 그라비아, 오프셋인쇄 등에 의해 박막형성이 가능하지만 이를 위해서는 재료 자체의 설계단계에서부터 시작하여 용액 및 분산액의 물리화학적 특성, 표면특성/점도 등의 잉크물성 제어가 필수적이며 적층구조 형성을 위한 경화 및 평탄화 표면처리 등이 수반되어야 한다.

이처럼 웹기반 롤투롤 생산 방식에 의하여 유기전자소자, 태양전지 등을 만들기 위해서는 장비기술과 인프라 확충뿐만 아니라 기존의 배치(batch) 공정(증착 및 프린팅)에 최적화된 소재 개발이 아닌, 연속공정용 광변환층 형성, 배선/패턴전사, 특화된 필름, 고체형 전해질 등에 필요한

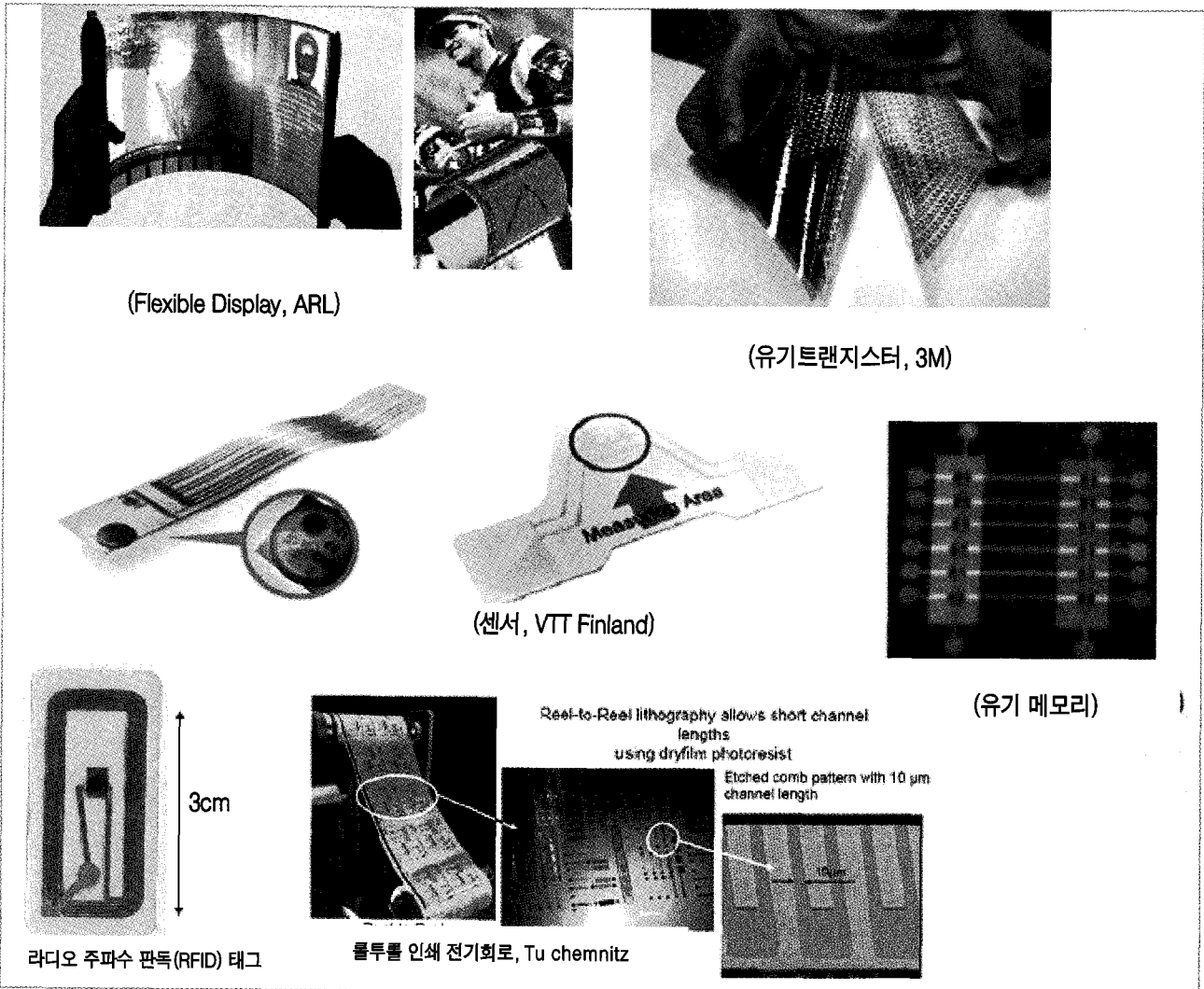


그림 1 인쇄공정에 의해 제작 가능한 다양한 유기전자소자의 종류; 플렉서블 디스플레이

핵심소재 기술이 필요하다. 국내 산업에서는 반도체/LCD 디스플레이 장비 및 부품소재의 해외 의존도가 매우 높으며, 차세대 디스플레이로서 활발하게 사업화가 진행되는 OLED의 경우에도 초기에 장비 및 부품, 유기소재 등의 해외 의존율이 높았지만 사업화가 진행되면서 국산화율이 점진적으로 증가하고 있는 예를 볼 때 차세대 태양전지용 소재, 특히 연성소재/필름과 광변환소재에 대해서도 핵심 원천소재와 부품, 이를 적용하는 핵심 공정기술이 같이 개발되어야 한다.

유기태양전지 재료/소자 개발 동향

국외에서는 유기태양전지 분야의 경우 Plextronics사에서 polythiophene계에 기반한 광활성 물질로 다양한 donor 물질을 개발하고 흡 전도 특성 향상에 대한 연구개발을 수행하고 있다. Konarka 사 및 UC 산타바바라 대학 연구팀은 후공정 열처리 기술 개발로 효율 4% 이상의 유기태양전지를 2005년 개발하였고 적층형(tandem) 유기박막 태양전지로 최고 효율(6.4%)의 특성을 보고하였으며, 낮은 밴드갭을 갖는 고분자 합성기술을 보유하고 있

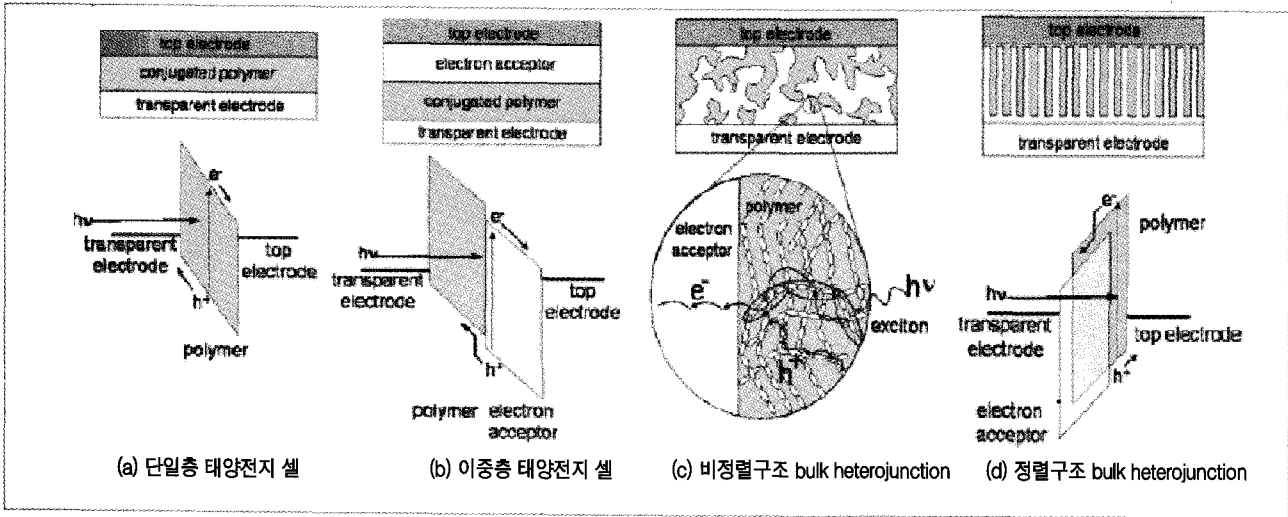


그림 2 Heterojunction 구조의 유기/고분자 태양전지 디바이스 형태

다. ITO-free 전극을 사용한 flexible 유기박막 태양전지 기술(Fraunhofer ISE 독일, 자기 조립 나노 구조를 이용한 유기박막 태양전지 제작 및 분석기술과 bulk heterojunction(BHJ) 구조에 대한 깊이있는 연구로 유기 박막 태양전지의 작동메커니즘을 해석하는 연구 등이 Imperial College London 등에서 수행되고 있다. 영국에서는 최근 분사식(spray)방법으로도 제작 가능한 유기 및 혼성 엑시톤 태양전지 제작 프로젝트가 8대학의 컨소시엄에 의해 진행되고 있는데, 빛의 흡수, 엑시톤 이동 및 전류 발생 과정들을 이용하여 새로운 태양전지를 마련하고 특성을 조사하는 연구, 염료감응형 태양전지와 나노입자감응형 태양전지에의 적용, 폴리머 혼합물, 분자 이중접합 및 혼성 유/무기 시스템을 포함하는 유기태양전지 제반에 대한 연구개발 범위를 모두 포함한다.

단일층, 이중층 접합구조, disordered 및 ordered 도너-억셉터 (donor-acceptor) heterojunction 등으로 유기 고분자형의 태양전지 hetero 구조를 구분할 수 있다(그림 2). 고분자가 아닌 유기반도체 화합물인 경우에는 도너-억셉터 두 소재의 공증착(co-evaporation)을 통한 혼합물 형성은 charge trap과 분자레벨에서의 packing구조에 영향을 주게 되어 전하 이동도를 떨어뜨리는 경우가 있다. 이러한 경우 구조/공정상으로는 다소 복잡하지만 도너

/도너-억셉터 혼합층/억셉터의 p-i-n구조(hybrid planar-mixed molecular heterojunction)를 형성함으로써 전하전도 특성과 여기자 (exciton) 분리의 효율을 모두 높이고자 하는 방법이 시도되었다. 이에 의하면 나노사이즈의 균일한 이중접합 중간층이 광전효율 증가의 핵심임을 알 수 있다.

유기태양전지의 최적계면구조와 인쇄 품질의 향상

유무기 나노계면을 갖는 인쇄형 태양전지소자 등에 사용되는 유기전자재료와 나노재료, 박막전극과 절연체의 계면특성은 비정질 유기박막으로 구성된 OLED와 달리 유기재료의 부분적 결정성(semi-crystallinity)으로 인하여 매우 복잡하며, 이러한 계면특성의 물리·화학적 해석 및 전기적 특성분석에 대하여 아직까지 발표된 연구결과는 다소 미흡한 수준이다. 뿐만 아니라 진공증착/spu-ttering 등의 공정을 제외한 프린팅 기술이 접목되는 유기 나노소자에 대하여 대면적에서의 마이크로 패턴형성을 원활하게 하기 위해서는 유기/나노소재와 인접한 박막구조간, 혹은 유기소재 각각의 인터페이스에서의 특성제어가 필요한데 각각의 패터닝 기술에 따라 필요한 제어/매칭기

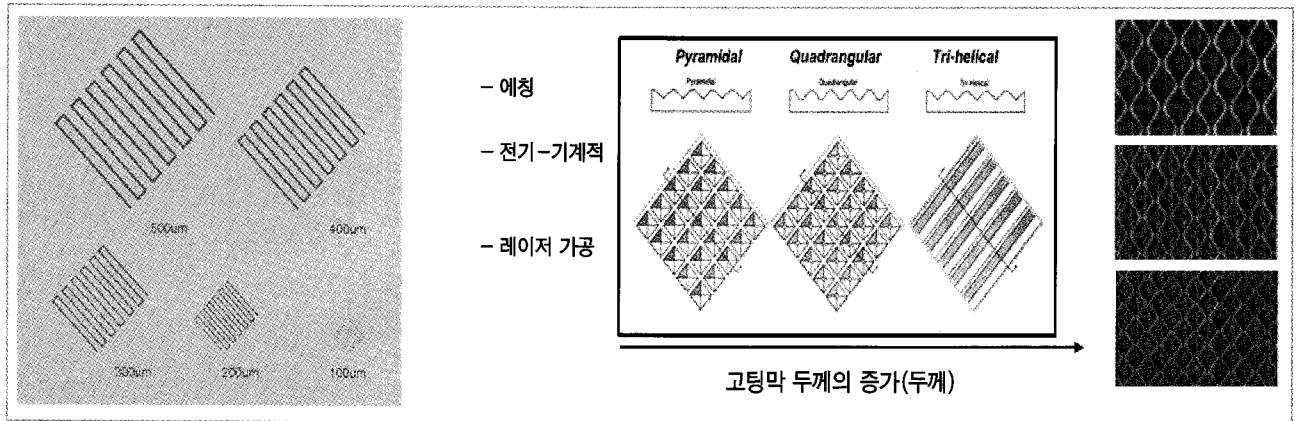


그림 3 (좌측) 금속 배선라인(폭 100~500µm)의 패턴 예, (우측) 그래비어 실린더 가공형상에 따른 코팅막 두께 변화 경향성

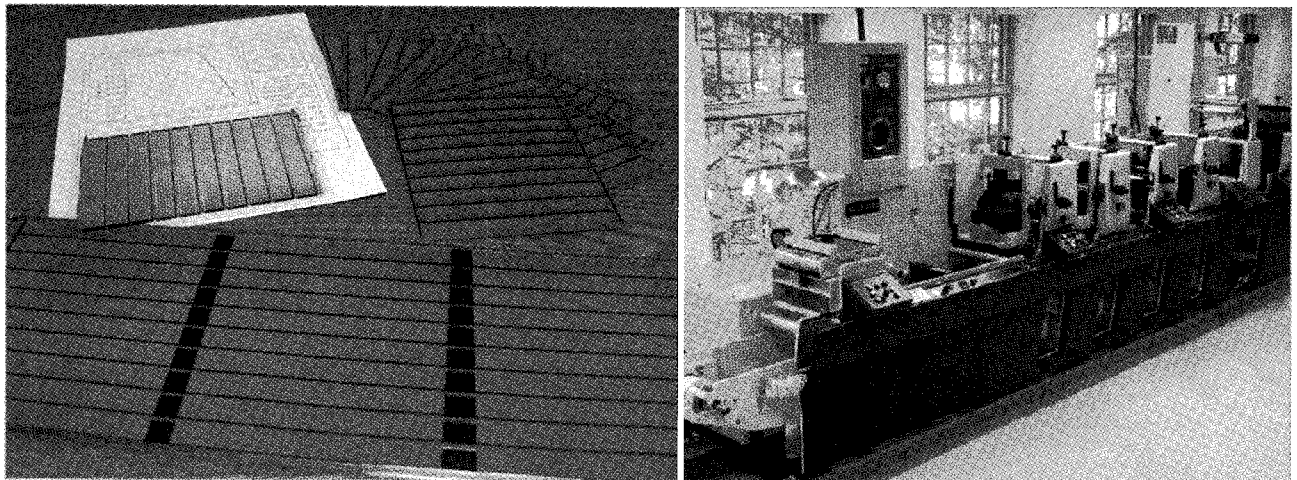


그림 4 롤투롤 프린팅 공정 장비에 의해 제작된 유연기판 유기 태양 전지의 시제품(Konarka, Lowell, MA)

술이 상이하다는 어려움이 있다.

따라서 유기/나노태양전지와 같은 혼합박막 계면구조를 효율적으로 제어하는 방법에 대한 기초적인 연구개발, 특히 고분자/유기소재와 인접하는 전극 및 무기박막의 다양한 나노-계면구조에 대한 특성화/분석연구에 대한 기초 연구가 필요하다. 이러한 나노 scale 계면특성 제어는 이들 소자의 효율을 향상시킬 수 있는 기초적 지식을 제공할 뿐 아니라, 쉽고 빠르게 소자를 형성할 수 있는 프린팅 법에 의한 박막형성을 균일하게 할 수 있고, 이러한 전자소자의 모듈화에 필요한 패턴공정을 더욱 정밀하게 할 수 있는 원천기술이 되므로 유기소자의 낮은 특성과 공정기술

부재에 머무르고 있는 한계를 뛰어넘을 수 있다.

유기전자소자의 유기/고분자박막 자체에 대한 내용은 아니지만 금속 배선구조, 패턴 등의 최적화는 단위소자의 고효율화 못지 않게 중요한 효율적인 모듈의 제조를 위해 꼭 필요하다. Inkjet 및 Gravure printing 법에 의해 쉽게 이러한 패턴의 형성이 가능하며, Ag 혹은 Cu입자-고분자 복합체 잉크를 사용할 수 있다. 향후 단계에서는 카본 나노튜브, 무기 나노와이어, 유기물 전도체 등의 재료를 사용한 보조배선 등이 플렉서블소자의 성능 향상을 위해 필요한 연구라고 할 수 있다. Gravure 프린팅으로 형성한 전도체 패턴, 그리고 공정의 최적화를 위한 조절변수로서

gravure 프린팅 roll의 실린더에 새겨진 음각면 패턴의 형상 종류에 따른 박막의 두께 등 품질에 미치는 일반적 경향을 그림 3에 나타내었다.

인쇄형 유연기관 유기태양전지의 제작

Konarka 사(Lowell, Massachusetts)는 최근 유연하고 프린트 방법으로 만들 수 있는 태양 전지의 시생산이 가능함을 발표하였는데, 값싼 유기재료 및 폴리머를 사용하여 태양전지의 제조단가를 낮추고 대면적/경량의 설치가 가능한 틈새시장에 적용할 수 있는 것으로 평가할 수 있다. 노트북을 충전할 수 있는 서류 가방, 우산과 식당의 야외 테이블 전력 생산 등이 그 예로 생각된다. 공정특면에서는 잉크젯이나 gravure 프린터를 사용하여 기능성 고분자 필름상에 형성할 수 있으므로 자본과 제조 단가를 상당히 낮출 수 있는 이점이 있다. Konarka 사의 공장과 장비는 이전에 플라로이드 사가 소유하던 것으로 필름과 의료용 이미징 장비를 만들던 것을 개조하였다고 보고하였다. 그림 4에 Konarka 사의 유기태양전지 prototype 모듈과 연속 공정으로 필름코팅에 의한 생산이 가능한 연구장비를 나타내었다.

향후 전망 및 결론

유기박막 태양전지의 재료기술 분야의 경우 현재까지는 고분자/저분자 유기EL용 소재 등이 그대로 사용되면서 일부 풀러렌(Fullerene) 및 그 유도체 등과 같은 알려진 전자역셉터가 적용되었는데, 향후 관련 소재기술에 대한 needs가 증가하는 추세이며 이는 소자기술의 발전, 효율 증가 등으로 이어질 것으로 예상된다. 보다 고효율과 안정

성을 겸비한 유기박막 태양전지의 개발을 위해서는 사용되는 재료의 분자구조와 소자 특성, 그리고 나노스케일의 Morphology의 연관성에 대한 기초연구를 충실하게 수행하여 molecular energetics, absorption, 전하 분리 및 수송(charge separation/transport), 자기조립(self-organization) 등의 각 분야에서 최적화를 이루는 것이 중요하다. 향후 이 방식으로 이론치의 광전변환 효율에 근접하는 값을 달성하고 이를 적용한 모듈 생산기술이 개발될 경우 실리콘 태양전지나 최근에 주목받고 있는 염료 감응형 태양전지보다 더 싼 가격으로 태양광 발전이 가능할 수 있을 것이다.

유기 전자소자 기술은 향후 LCD를 대체하여 광범위한 산업에 적용될 수 있는 핵심 기반 기술이므로 기술적 확산과 파급효과를 크게 가질 수 있을 것으로 예상된다. 특히 우리나라 경제를 이끌고 있는 반도체 및 디스플레이 산업에는 초저가 생산 기술을 제공하여 국제적인 경쟁력을 높일 수 있고 새롭게 대두되고 있는 유해가스 등 화학/생물학적 센서 개발 등에 적용이 가능하며, 향후 급속하게 발전할 것으로 예상되는 플렉서블 전자소자 및 디스플레이(Flexible electronics & Flexible display), 유기태양전지 등 분야에서 국내 기업의 기술적 우위를 가져옴으로써 미래 시장 선점과 신규 고용 창출, 새로운 산업화의 원동력 등의 기여효과를 얻을 수 있다. 본 연구 분야에 대하여 미국, 일본, 유럽에서는 대학, 연구소를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 기술적인 가능성을 보여주고 있는 벤처 기업들도 많아지고 있는 추세이므로, 서둘러서 기술 개발을 한다면 우리나라의 강점인 반도체/디스플레이 공정 기술 및 IT인프라를 바탕으로 선진국과의 기술 격차를 극복하고, 새로운 산업을 선도할 수 있을 것으로 생각된다.