

# 연속공정과 인쇄형 유기 전자소자 기술

진병두 교수 (단국대 고분자시스템공학부)

## 1. 서론

공액화합물을 비롯한 유기 전자재료는 초기 전극 대체물질, 비선형 광학소재 등의 응용에서부터 현재는 전도도가 상대적으로 낮은 공액고분자 및 저분자재료를 이용한 유기발광소자, 고분자 Memory Device, 유기박막 트랜지스터, 센서, 유기박막을 이용한 태양전지 등 다양한 분야에 응용이 전개되고 있다. 국내·외에서 추진되는 플렉시블 디스플레이를 중심으로 한 미래 유망산업 아이템에 대한 선도 기술개발을 위해서는 OLED, 유기 태양전지, 유기 고분자계센서 등 플렉시블 유기 전자소자의 Printing기술과 이에 관련된 소재의 표면/계면 특성

의 효과적인 제어기술, 유기물을 이용한 논리소자 설계기술, 그리고 이의 연속 생산기술인 Roll-to-Roll 공정기술 등에 집중적인 연구개발이 이루어져야 한다 [1-2]. 보다 고해상도의 인쇄 소자에서는 간격 50  $\mu\text{m}$ , 선폭 30  $\mu\text{m}$  이하 수준의 인쇄가 다양한 방법으로 가능할 수 있다는 초기 결과가 보이고 있다. 따라서 초박형 전자소자의 요구 특성에 맞도록 기능성 유/무기 소재 간의 계면 적합성을 만족시키기 위한 연구가 필요하다고 생각되며, 이러한 기술이 확보되어야 프린팅법에 의한 다층소자의 제작기술이 본격적으로 가능해질 것이다. 그림 1에 디스플레이를 중심으로 한 다양한 플렉시블/경량/휴대형 전자소자의 형태 및 종류 구분을 나타내었다.

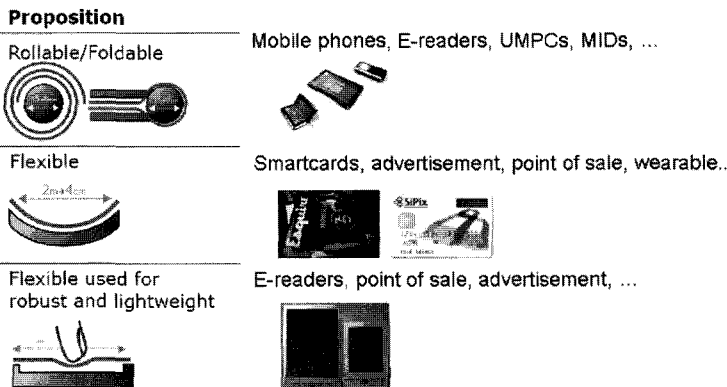


그림 1. Rollable, Flexible, Lightweight Electronic Devices and Its Competition [3].

## 2. 연속공정 장비 및 공정기술 개발동향

유기 전자소자의 Roll-to-Roll공정은 기존 인쇄매체를 대상으로 제작하던 방법을 디스플레이 제조공정에 적용한다는, Process Capability 측면에서의 혁신적 기술진보를 의미하는 것으로, 실제로 기존 디스플레이의 저가격화, 그리고 미래의 플렉시블 디스플레이를 위한 제작 공정 개발은 동 분야에서 막대한 미래지향적 부가가치를 갖는다고 할 수 있다. 아직까지는 Paper, Label, Electronic Ticket 등 종이 기반 연속생산기술로써 이들 종이매체의 디지털 전산화의 방법으로써 RFID Antenna 등을 Imbedding 시키는 공정 및 장비가 활발히 연구 개발되고 있으며 플라스틱 기판을 이용한 이들 전자 Ticket, 플렉시블 전자소자/Dynamic Signage 등은 아직 개발의 태동기 단계에 있다고 볼 수 있다. 이러한 Web-based Roll-to-Roll 생산방식은 기존의 Batch형 생산방식과 달리 공정 및 시스템에서 몇 가지 핵심적인 기술적 문제 해결이 요구된다. 첫째는 연속공정시스템(Continuous Process System)을 구성할 때 중요한 Web Handling에 대한 문제로 웹의 종류와 속도에 따른 장력조건을 결정해야 하며 정확한 이송을 위한 보다 정밀한 위치 제어가 필요하다. 둘째는 Web이 연속적으로 이동하기 때문에 코팅공정이 이러한 이

동에 대응할 수 있어야 한다. 플라스틱 Substrate가 길이 방향으로 이동하면서 연속적으로 유기물질을 도포해야 하기 때문에 Gravure, Offset, Inkjet Coater 등이 이러한 제한조건에 맞게 설계되어야 한다. 셋째는 모든 공정에서 Substrate가 연속적으로 이동하기 때문에 공정장비의 기밀이 확보되지 못한다. 따라서 진공이 필요한 공정에서는 진공 확보가 매우 중요하여 각종 Seal에 대한 연구가 필요하고, 또한 Chemical을 사용하는 공정장비에서는 공정 Chemical이 외부로 누출되지 않아야 한다. 최근의 전자회로 패턴 Printing 공정 및 장비연구의 Resolution 향상 및 두께정밀도 개선방안은 위의 주요 기술적 이슈해결을 목표로 진행되고 있다. 그림 2에 Roll-to-Roll공정에 의해 연속적으로 진공증착이 가능한 제작 장비의 예를 보였다.

프린팅 공정기술과 플렉시블 유기 전자소자에 대해서는 현재 일본, 핀란드, 스웨덴 등의 국가에서 활발히 연구가 진행 중인데 (잉크젯, 레이저프린팅, 나노 임프린팅 등), AIST (일본 산업기술종합연구소)에서 Imprint방식의 전자인쇄 등의 연구가 진행 중이며, 미쯔비시 (Mitsubishi) 중공업, 미추무라 (Mitsumura)社가 전자회로 인쇄용 롤 인쇄장비개발을 연구하고 있고, EU는 국가별 프로그램, 유럽 협력 네트워크 등의 다양한 방법으로 연구를 진행하고 있다. 독일의 Chemnitz 대학의 Institute for Print and Media Technology에서는 Mass Printing 연속공정에 의하여 유기 반도체소자 및 Ring Oscillator와 같은 수십 마이크로미터 선폭을 갖는 유기전자 논리소자를 프린팅 가능한 장비 Setup을 갖추고 소자제작 및 공정연구를 수행하고 있다. 그림 3에 보인 것처럼 각각의 Flexo, Offset 등의 Printing Unit에서 Source/Drain 전극, 유기반도체, 보호층, Gate 전극을 차례로 프린팅하여 논리소자를 완성하는 형태로 공정이 구성되어 있다 [4].

핀란드의 국영기술개발센터 (VTT)에서는 Printable Organic Transistor, Solar Cell, OLED, Organic Memory, RFID, Photonic Microsystem, Sensor 및 Indicator 등의 다양한 소자를 대상으로 Roll Printing 기반의 소자 제작 예를 발표하고 있으며, 관련 Manufacturing 공정기술을 개발 중이며, 이

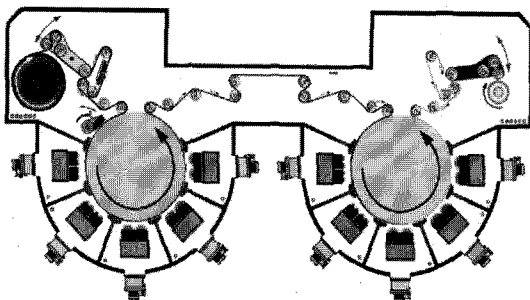


그림 2. Applied Film社의 Roll-to-Roll Vacuum Deposition System.

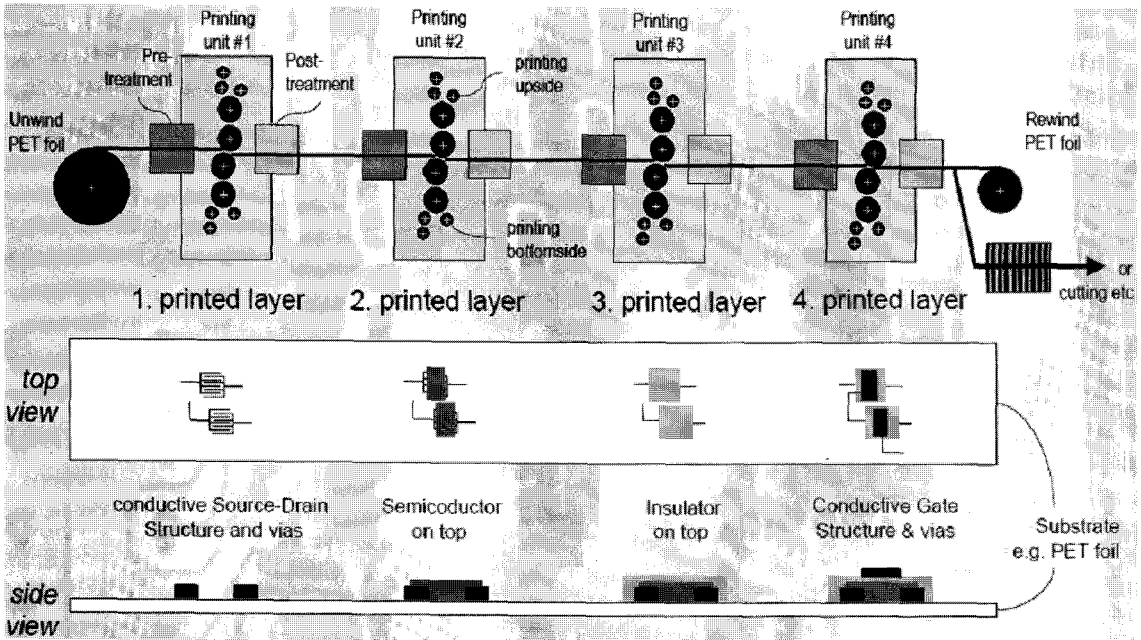
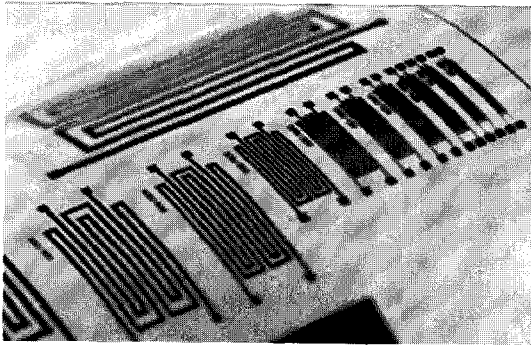


그림 3. Mass Printing 연속공정에 의한 유기 트랜지스터소자 제작공정도.

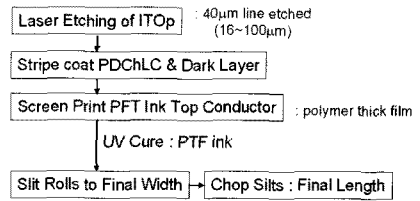
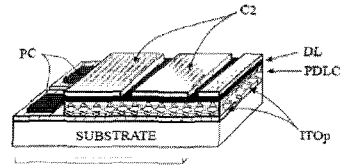
에 따른 소재/디바이스 기술은 미국의 Arizona State Univ./Army Flexible Research Center 등과 공동연구를 진행하고 있다. 현재의 기술수준에서는 선간격  $20\ \mu\text{m}$ , 선폭  $20\ \mu\text{m}$  이하(전자회로로써의 전기적 특성 등 기능성을 보이려면 최소선폭  $75\ \mu\text{m}$ ) 수준의 해상도를 갖는 전도성 나노 Silver Ink의 패턴이 Gravure Printing법에 의해 구현가능하다고 보고하고 있다. Gravure방식에 의해 OLED소자를 제작하는 연구도 수행되고 있으며, 여기서 Gravure Roll의 Cell Depth는  $3.0\text{-}4.5\ \mu\text{m}$ 정도로써 깊이에 따라 코팅되는 유기막의 두께를 조절할 수 있고 이에 따른 소자의 특성을 보고하였다. 그림 4에 전자재료 잉크의 전기적 특성 평가를 위한 패턴형태와 Gravure 프린팅에 사용되는 실린더 표면 형태에 따른 코팅막 두께의 변화 경향을 나타내었다. 전극의 경우에도 Aluminum Particle을 사용한 잉크 Printing을 시도

하여  $1.0\ \text{Ohm/cm}$  정도의 특성을 보고하였다 [5].

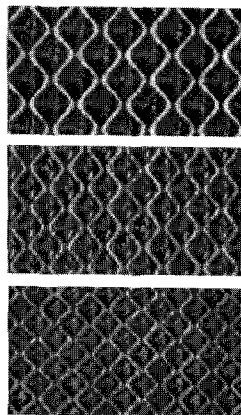
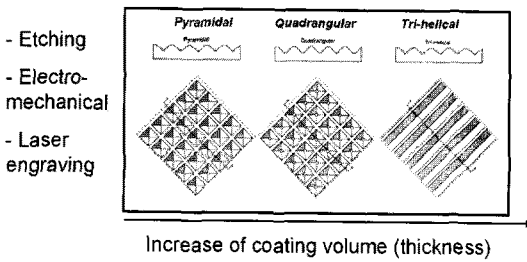
이처럼 연속프린팅기술에 의한 유기 전자소자의 제작과 정밀한 패턴구현이 가능하다는 초기결과는 발표되고 있으나 이를 적절한 디바이스의 요구 특성에 맞도록 기능성 유기/무기 소재 사이의 Interface 적합성을 만족시키는 연구결과로는 다소 부족하다. 예를 들면 OLED의 발광화소 패턴이나 유기 반도체 소자의 활성반도체, Source/Drain패턴으로 수십 마이크로 선폭의 구현은 가능하지만 여러 유기재료 층의 적층이 필요한 상황에서 Multi-layer Printing 기술 등은 아직 완벽히 개발되어지지 않았다. 좀 더 상업화 공정개발에 가까운 Roll-to-Roll 공정기술은 주로 미국 디스플레이연구조합 (USDC)의 지원으로 벤처기업과 대학들에 의해 이루어지고 있으며, Kodak의 플렉시블 Cholesteric Liquid Crystal Display 제조공정 [6], Sipix社에서 개발한 전기영동



(a)

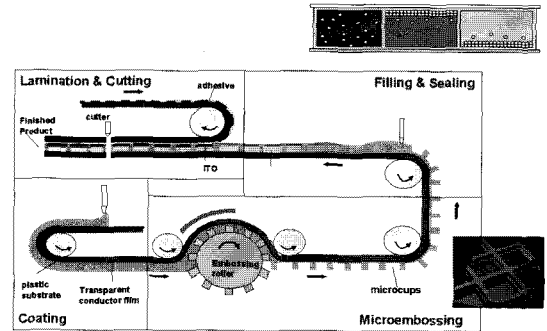


(a)



(b)

그림 4. (a) Example of the Printed Patterns of Organic Electronic Materials, (b) Gravure 프린팅장비에 사용되는 실린더의 다양한 Pattern형상과 Coating Thickness 등의 영향.



(b)

그림 5. (a) Eastman Kodak社에서 발표한 Cholesteric Liquid Crystal Display의 Roll-to-Roll 제조공정, (b) SiPix社의 전기영동필름의 Roll-to-Roll 제조공정.

매체의 필름 (전자종이 디스플레이에 사용)을 Roll-to-Roll공정에 의해 제조하는 예 [7]와 같은 연속 생산공정설계를 추진하고 있다(그림 5).

국내에서도 유기/나노 재료를 대상으로 한 Printed Electronics 분야의 공정기술연구는 최근 들어 활발히 추진되어지고 있다. 순천대를 중심으로 한 13.56 MHz Printed RFID, 서울대/한양대/광주과학기술원 등을 주축으로 한 1 GHz Printed 소자/공정 기술, 화학연구원을 주축으로 한 Printing 지향 유기 재료 개발과제 등이 있다. 유/무기 나노 복합체는 최



근 플렉시블 디스플레이, 나노 전자소자, 나노 태양 전지에 관한 관심이 집중되면서 각광을 받기 시작하였으며, 원천기술 선점을 위해 산/학/연 연계를 통한 정부차원의 연구지원이 필요한 분야라고 보인다. 유/무기 복합체와 용매/안정제 간의 상호작용 연구, 자기조립형 나노 구조가 형성된 기판을 이용하여, 나노 파티클, 나노 와이어 등의 기능성물질을 선택적으로 고정화하는 방법, 일함수가 다른 금속 나노입자의 표면전하밀도를 제어하여 크기를 조절하는 기법, 분산용액의 pH, 이온염, 적층 수에 따른 다층박막의 전기적 현상분석, 금속 일함수에 따른 금속 나노 입자/절연체 다층박막의 전기적 현상을 분석하는 연구 등이 서울대, 한양대, 국민대 등의 연구진에 의해 수행되고 있다. 나노 와이어의 용액을 이용한 기능성 박막 혹은 나노 복합구조체 형성 분야는 국내에서도 최근 비교적 연구가 많이 진행되고 있는 분야이다. 이들의 패턴을 위해 잉크젯프린팅기법을 통해 기판에 라인패턴을 형성함에 있어서 기판의 표면처리를 통해 구현해 놓은 화학적 패턴에 의해 유기재료의 패턴해상도를 증가시키는 방법 등이 향후 적용 가능한 기술이라고 할 수 있다.

### 3. 유기소자용 인쇄/연속공정의 요구사항

중장기적으로 직접 (Direct) 인쇄기술을 이용한 다양한 소자공정이 개발 및 상용화 단계에 있다. 그라비아, 플렉소 등의 직접 인쇄기법을 통한 Solar Cell, 디스플레이, 센서, RFID Tag 등의 전자인쇄 소자가 우선 그 대상이 되며, 대략 2010년에는 메모리를 비롯한 IC 부문으로까지 확대될 것으로 예상되고 있다. 직접인쇄 및 Roll을 거치는 간접인쇄를 결합하면 장비투자가 더욱 절감될 수 있고 생산성의 향상이 가능하다. 기기의 종류와 생산량에 따라 100분의 1까지 원가절감이 가능하다고 예측된다. 이상의 직접인쇄기술 및 간접방식이라도 저온에서 가능한 패터닝기술을 포함하는 복합프린팅의 원천기술개발에 성공할 경우 고성능의 유기소재, 금속, 세라믹 소재를 모두 대상으로 한 연속공정의 디자인 및 응용이 가능하다.

Printable Transistor, Solar Cell, OLED, Nanostructured Memory, RFID, Photonic Microsystem, Sensor/Indicator 등의 다양한 소자를 대상으로 현재 존재하는 여러 가지의 인쇄기술을 적절히 조합하거나 각 부분의 특성을 향상시켜 전체적인 연속공정을 구성하는 것이 인쇄전자 분야의 재료 및 공정기술 확보의 완성 단계로 볼 수 있다. 이를 위해서는

- (1) 우수한 전하 이동도를 갖는 유기반도체 잉크 및 태양전지용 Active Layer용 잉크제조기술
- (2) 연속공정에 적합하게 디자인된 필름 및 재료 기술
  - ① 필름 상에 안정성이 뛰어난 연성 박막 및 광변환물질 제조기술
  - ② 전사방식을 사용해서 효과적으로 배선/패턴을 형성할 수 있는 소재기술
  - ③ 낮은 열팽창계수를 갖는 고온공정용 광학 필름
  - ④ 우수한 고체전해질 소재개발 및 Lamination 공정에 의한 적층필름용 복합체
- (3) 여러 가지 잉크재료 및 기판, 봉지재 사이의 표면/계면 개질기술
 

: Printed Line-width Uniformity 향상을 위한 표면처리 방법의 개발

  - ① 기판의 표면에너지와 잉크의 표면에너지 Matching을 적절하게 유지하도록 하는 기술
  - ② Solvent의 Evaporation이 균일하게 되도록 잉크의 Formulation

등의 소재/공정 분야 기술이 장비개발 못지않게 중요하다고 할 수 있다.

### 4. 연속공정과 유기태양전지 기술

최근 신재생에너지 분야의 산업 및 기술적 필요성이 점차 증대되면서 유기 태양전지의 개발 및 효율적인 생산공정기술에 많은 관심이 모아지고 있다. 플렉시블 디스플레이 및 개인휴대용 전자소자 제작 기술과 마찬가지로 유기 태양전지는 연속공정에 의



(a)



(b)

그림 6. Prototype of Flexible Organic Solar Cell by the Roll-to-Roll Printing Process and Equipment (Konarka, Lowell, MA).

해 저렴한 공정비용으로 생산되어야 시장경쟁력을 갖출 수 있을 것이다 [8]. Konarka社 (Lowell, Massachusetts)에서는 Siemens의 Brabec팀이 합류하여 오스트리아의 Linz와 독일의 Nuremburg에서 유기 태양전지연구를 수행하고 있으며 2005년 플라스틱 태양전지의 대면적화 방법으로 Doctor Blade 법을 채택, 5%의 효율을 달성. 잉크젯 등 다른 방법으로도 우수한 논문을 발표하였으며 2007년 새로운 Low Band Gap 고분자를 이용하여 3.5% 효율을 보였는데, 이는 기존의 PPV계와 P3HT가 아닌 새로운 물질 중 최고 효율을 나타내고 있다. 유럽연합은 낮

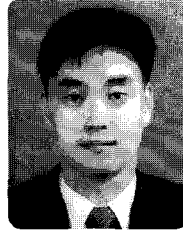
은 가격과 플렉시블하게 만들 수 있는 장점을 가진 플라스틱 태양전지 분야의 기술개발과 투자에 대한 공동된 이해를 얻기 위해 아래의 구성원들이 주축이 된 국제컨소시엄인 "OrgaPVNet"을 2006년 11월 형성하여 서로 정보를 공유하고 연구개발을 수행하고 있다. 최근에는 유연하고 프린트방법으로 만들 수 있는 태양전지의 시생산이 가능함을 발표하였는데, 값싼 유기재료 및 폴리머를 사용하여 태양전지의 제조단가를 낮추고 대면적/경량의 설치가 가능한 틈새시장에 적용할 수 있는 것으로 평가할 수 있다. 노트북을 충전할 수 있는 서류 가방, 우산과 식당의 야외 테이블전력생산 등이 그 예로 생각되어진다. 공정특면에서는 잉크젯이나 Gravure프린터를 사용하여 기능성 고분자 필름 상에 형성할 수 있으므로 자본과 제조단가를 상당히 낮출 수 있는 잇점이 있다. Konarka社의 공장과 장비는 이전에 플라로이드社가 소유하던 것으로 필름과 의료용 이미징장비를 만들던 것을 개조하였다고 보고하였다. 그림6에 Konarka社의 유기태양전지 Prototype Module과 연속공정으로 필름코팅에 의한 생산이 가능한 연구장비를 보였다.

## 5. 결론

연속공정을 이용한 플렉시블 디스플레이, 전자소자, 유기 태양전지 등의 연구영역에서 공정, 장비 및 인접소재기술의 기술개발사례와 Need를 살펴보았다. 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 생산기술을 제공하여 국제적인 경쟁력을 높일 수 있고 새롭게 대두되고 있는 유해가스 등 화학/생물학적 센서 개발 등에 적용이 가능하며, 향후 급속하게 발전할 것으로 예상되는 Flexible Electronics/Display 분야에서 국내 기업의 기술적 우위를 가져옴으로써 미래 시장 선점과 신규 고용 창출, 새로운 산업화의 원동력 등의 기여효과를 얻을 수 있다. 본 연구분야에 대

하여 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. 산업적으로 중요한 신재생에너지 중 유기 및 나노융합 태양전지용 소재기술은 유기반도체 기반의 인쇄형 고분자, 고효율 태양전지용 화합물반도체 기반소재의 발전에 힘입어 많은 주목을 받고 있는데, 이 중 유기 및 유-무기 하이브리드형 태양전지 기술개발이 의미를 갖기 위해서는 생산에서의 경제성을 확보할 수 있도록 Roll-to-Roll Printing 공정이 가능한 핵심 소재 및 소자구조를 누가 먼저 개발하고 실용화 가능하도록 투자하는가의 문제가 가장 중요한 기술적 이슈라고 할 수 있을 것이다.

저자약력



성 명 : 진병두

◆ 학 력

- 1994년 연세대 화학공학과 공학사
- 1996년 한국과학기술원 화학공학과 공학석사
- 2000년 한국과학기술원 화학공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2001년 - 2005년 삼성SDI 중앙연구소 책임연구원
- 2005년 - 2009년 한국과학기술연구원 선임연구원
- 2009년 - 현재 단국대 고분자시스템공학부 조교수

참고 문헌

- [1] 홍성화, 노현숙, 구영덕, "플렉시블 디스플레이 시장 진입을 위한 응용 분야별 기술적 이슈", KISTII 미래유망 사업화아이템 이슈분석 (2005)
- [2] 강성룡, 부품 소재 로드맵 (반도체, 디스플레이 장비 부품), 한국산업기술재단 (2005)
- [3] Edzer Huitema, "The first rollable display product", Flexible Electronics & Display Conference, Phoenix, Feb. 5 (2009)
- [4] A. C. Huebler, "Printing processes for plastic electronics", Plastic Electronics International Conference on Plastic Electronics. Frankfurt, Germany (2005)
- [5] www.vtt.fi; flexdisplay.asu.edu
- [6] G. T. McCollough, C. M. Rankin, M. L. Weiner, Soc. for Information Display (SID) Int Symp. Digest 36, 64 (2005)
- [7] X. Wang, H. Zang, P. Li, Soc. for Information Display (SID) Int Symp. Digest 37, 1587 (2006)
- [8] 진병두, "유기태양전지와 인쇄공정기술", 화학공학 기술정보지 (NICE), 2009년 6월

