

# 플렉서블 유기소자 기술과 프린팅 연속 공정

진병두 · 신기현

## 1. 서론

기술개발에 따른 패러다임의 변화는 디스플레이, 메모리, 논리소자와 같이 인간의 지각/기억/판단능력을 모방하는 부분에서 두드러지게 나타난다. 이중 디스플레이 산업에서는 다양한 평판디스플레이의 개발 및 공정의 단순화/효율화 노력이 현재 가장 핵심적인 요소 기술로서 관심을 모으고 있다. 차세대 박형 디스플레이로서 OLED(organic lighting emitting diode) 디스플레이의 기술개발 및 본격적인 상업화를 눈앞에 두고 있으며, 이후 평판디스플레이의 차원을 넘어 차세대 디스플레이 기술로서 추진되고 있는 플렉서블 디스플레이의 경우, 종이처럼 얇고 유연한 기판에 구현이 가능하고(thin and flexible) 휘거나 말 수 있으면서(bendable), 손상이 적고 충격에 강한(durable) 특성을 가져야 한다. 이러한 플렉서블 소자 기술은 디스플레이 뿐만 아니라 **그림 1**과 같은 다양한 응용분야에 적용이 가능하며, 여러 가지의 고해상도 프린팅 기술의 발전과 더불어 새롭게 주목받고 있다. 현재 정부/민간차원에서 연구개발 등 플렉서블 디스플레이를 중심으로 추진되고 있는 미래 유망산업 아이টে에 대한 선도 기술 개발 항목을 살펴볼 때, 경박 단소와 저원가를 달성하기 위해서는 유기 EL 등의 플렉서블 유기 전자 소자 프린팅 기술과 유기 TFT 소자기술, 그리고 이의 연속 생산기술인 Roll-to-Roll 공정기술 등에 집중적인 연구개발이 이루어져야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.<sup>1,2</sup>

## 2. 유기 박막 트랜지스터 소재 및 소자기술 연구동향

박막 트랜지스터(thin-film transistor, TFT) backplane의 활성 반도체(active semiconductor) 층 소재로 가장 널리 사용되는 진공 증착형 비정질 실리콘을 대체하기 위한 연구 중 단결정, 박막 증착된 유기반도체, 고분자 반도체소재의 경우 많은 성능의 향상이 보고되어 디스플레이 소자, 센서, 정보태그, 스마트미디어 등 다양한 응용분야에 대한 관심이 고조되고 있다.<sup>3-7</sup> 용액공정은 불가능하지만 저온에서 진공증착으로 박막을 형성할 수 있는 펜타센 등의 저

분자 유기반도체 소재 및 이를 이용한 소자는 저속 증착에 의해 큰 결정 grain size를 유지하는 경우 1~5 cm<sup>2</sup>/Vs 수준의 높은 이동도를 갖는다고 알려져 있다. Penn state Univ.의 T. N. Jackson group, Bell Lab.의 T. Siegrist 등에 의한 고이동도 펜타센 유기트랜지스터 소자 특성 발표가 대표적인 연구 결과이며, IBM의 F. J. Meyer Zu Heringdorf 등의 100 μm급 펜타센 grain size의 성장 결과를 들 수 있다.<sup>8-10</sup>

고분자형 유기반도체를 이용한 디바이스의 경우 저온성막, 용액 공정 등의 공정성과 경제성 등의 장점에도 불구하고 이를 능동층으로 사용한 소자의 실용성은 아직 충분히 검증되지는 않았다. 최근에는 비정질실리콘의 이동도값과 유사하거나 이를 능가하는 특성이 보고되었는데, 용액공정이 가능한 고분자 소재의 대표적 예는 poly-3-hexylthiophene (P3HT)로, 이동도에 밀접한 영향을 주는 인자는 미세 결정성(micro-crystallinity) 및 head-to-tail regio-regularity이며, 일반적으로 0.05~0.1 cm<sup>2</sup>/Vs 정도의 전하(hole)



**진병두**  
 1994 연세대학교 화학공학과(학사)  
 2000 한국과학기술원 화학공학과(석/박사)  
 2000~2001 University of Massachusetts at Amherst, Polymer Sci & Eng. Dept. (Post-Doc.)  
 2001~2005 삼성 SDI 중앙연구소, 책임연구원  
 2005~ 현재 한국과학기술연구원 재료연구본부, 선임연구원



**신기현**  
 1981 서울대학교 기계설계학과(학사)  
 1983 서울대학교 기계설계(유압공학)학과(석사)  
 Oklahoma State University (OSU) 기계공학(자동차어) (박사)  
 1991 Oklahoma State University (OSU), 연구교수  
 1991~1992 건국대학교 기계항공공학부, 교수  
 1992 건국대학교 유연디스플레이 연속공정연구센터, 소장  
 현재

### Device Technology of Flexible Organic Devices and Continuous Printing Process

한국과학기술연구원 재료연구본부 에너지재료연구단 (Byung Doo Chin, Center for Advanced Energy Materials Materials Science and Technology Division, KIST, 39-1 Hawolgok-dong, Sunbuk-gu, Seoul 136-791, Korea) e-mail: bdchin@kist.re.kr  
 건국대학교 기계항공공학부 (Ki Hyun Shin, Division of Mechanical and Aerospace Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangin-gu, Seoul 143-701, Korea)

이동도 값이 보고되고 있다. Regioregularity가 높고  $\pi$ - $\pi$  stacking plane과 current flow direction 이 평행관계에 있는 경우 높은 전하 이동도를 얻을 수 있으며, 이에 따라 스핀 코팅에 의한 것에 비해 용액 casting에 의하여 제조된 P3HT 박막의 경우 높은 전하이동도가 얻어질 수 있다(그림 2).<sup>3</sup> 고분자박막의 분자구조 및 배향이 트랜지스터 특성에 크게 영향을 미치는데, 미세구조 제어방법으로 Langmuir-Blodgett법, mesogenic 말단기 도입, 주사술의 반

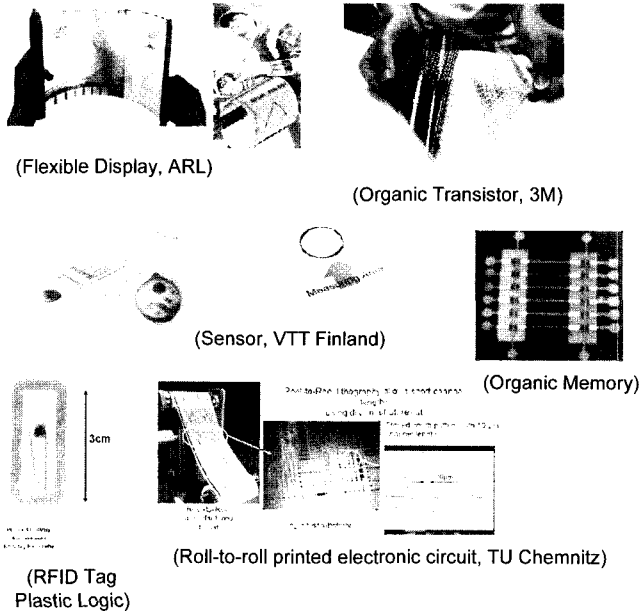


그림 1. Types of various organic electronic devices fabricated by printing technology.

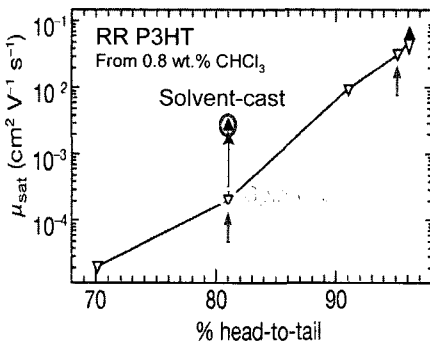
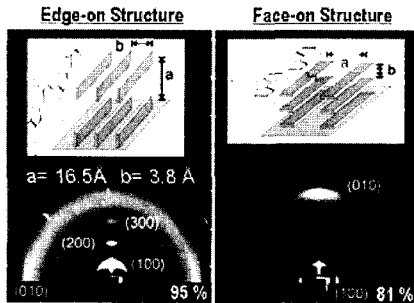


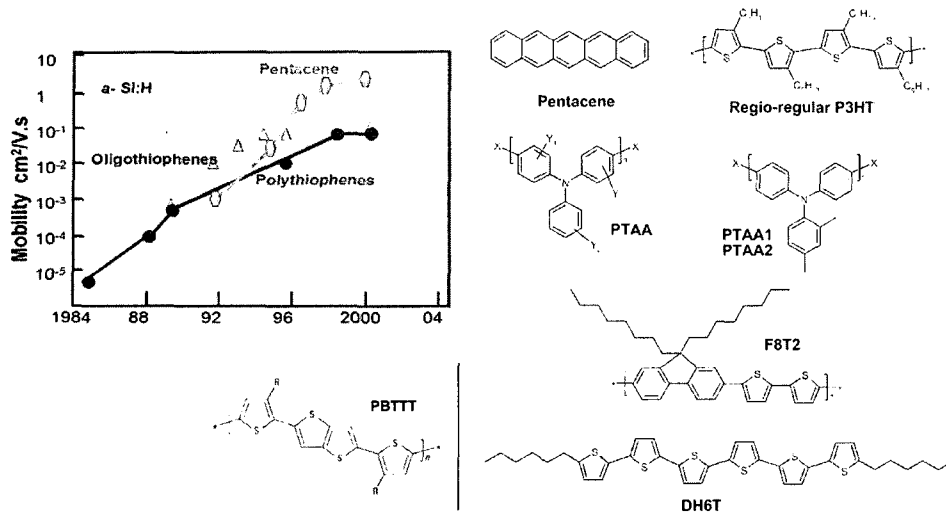
그림 2. P3HT의 배향 차이에 대한 WAXS(Wide Angle X-ray Scattering) 이미지 및 실리콘 옥사이드 게이트 절연막을 사용하였을 때의 P3HT regioregularity와 전하이동도 사이의 관계.

복성, 자기조립 액정성 부여 등 다양한 방법이 꾸준히 연구되어 왔다. poly-3-hexylthiophene(P3HT)의 규칙적인 head-to-tail에 pendant alkyl groups이 치환되는 경우 높은 regioregularity를 얻을 수 있다.<sup>11,12</sup> 이러한 regioregular 구조는 고분자 주쇄에 이차원적 판상형 라멜라(two-dimensional sheet-like lamella) 구조형성을 통한 규칙성을 부여하고, 티오펜 링 평면방향으로의 배향이 기판의 적절한 표면처리에 의해 규칙적으로 이루어진다는 것이 보고된 바 있다.<sup>3</sup> 주쇄에 치환되지 않은 티오펜 반복단위를 추가하고 regioisomer를 제거함으로써 전하의 이동도와 이온화포텐셜(ionization potential, IP) 값이 높아진다는 결과도 보고된 바 있는데, P3HT와 비교하여 이러한 재료 특성은 산소에 대한 안정성 향상에 도움이 될 수 있다.<sup>13,14</sup> 인접한 알킬기 사이의 국소화된 자유부피 증가는 결정화도를 높일 수 있으나, 이러한 방법에 의한 결정화도메인의 증가는 액정상 mesophase를 이루는 온도 이상에서의 열처리 이후에도 10~15 nm 정도로 그리 크지 않으며, 이 경우 최대 전하이동도는 0.1 cm<sup>2</sup>/Vs 이내로 제한적이다. 최근 Merck사에서 발표한 poly(2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene) : PBTTT(그림 3, R=C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>, C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>, C<sub>14</sub>H<sub>29</sub>)의 경우 액정상으로부터 큰 결정화도메인의 크기를 갖도록 하여 용액 공정에 의해 제조한 디바이스의 높은 hole 전하이동도 0.2~0.6 cm<sup>2</sup>/Vs의 결과를 보였다.<sup>15</sup>

그림 3에 유기반도체 활성층의 유기막 재료의 화학구조 및 종류에 따른 성능 향상을 보고한 최근 결과를 요약하였다. 펜타센의 경우 비정질 실리콘의 이동도 이상의 값도 얻어질 수 있으나 소자의 안정성, on/off비, pixel 어레이(array)로 제작하였을 때의 소자특성의 저하 등 여러 가지 문제가 남아 있으며 유기물 자체의 미세구조 및 결정화도 제어에 의하여 얻어지는 특성 뿐만 아니라 source/drain 전극, 절연층의 유전체(dielectric material)와의 계면현상 등을 이해하고 소자 구조를 최적화하는 작업이 전하이동도, on/off비와 같은 소자특성의 수준향상 및 균일성 확보에 있어서 아직까지는 매우 중요하고, 까다로운 난제로 남아 있다.

### 3. 프린팅 방식에 따른 유기트랜지스터 및 유기전자소자 제작 공정

프린팅 기술은 크게 직접(direct) 프린팅과 간접(indirect) 프린팅 방법으로 나눌 수 있으며, 전자에는 비접촉식의 잉크 분사 방법을 이용한 inkjet printer와 접촉식의 screen, flexo, gravure 방식의 roll printer가 대표적이며, 다른 매체를 통해 기판에 인쇄하는 간접 공정인 후자에는 주로 접촉식인 imprinting 기술과 레이저 전자 패터닝(laser transfer patterning) 등을 예로 들 수 있다. 연속 공정으로서 roll/blanket을 이용하는 roll printer들은 고속 인쇄 공정으로 기술이 검증된 바 있으며 최근 LCD 제조공정을 중심으로 다양한 기술 개발이 진행되고 있다.<sup>2</sup> Roll 식의 프린팅 기술은 고속인쇄가 가능하다는 장점이 있으나 사용되는 잉크의 점도 및 해상도 등이 방식에 따라 상이하고(표 1) 유기전자 소자의 제작공정을 위한 장비연구가 아직 충분히 이루어지지 않았다. 따라서, 현재 플렉서블 디스플레이 소자의 제작공정에서 고속 printing 기술 부분이 갖는 중요성 및 핵심성은 매우 높으며, 유연기판에 구현할 수 있는



Researcher	Company	Organic Semiconductor System	FE Mobility	Threshold V	Ion/off Ratio
Jin Jang	Kyung Hee Univ.	Pentacene on PES (Org. Chem. VD)	1.8	-7.5	10e8
K. S. Suh	ETRI	Pentacene on PES & PC by OVD	.05 to .25	7 to 11	10e3-10e4
M. Ando	Hitachi	Pentacene using the SALSA process	.15	-5	10e5
C.K. Song	Dong-A Univ.	Pentacene on PET by thermal evap.	.5	-4	10e6
A. Firester	Sarnoff/Lucent	Pentacene on PEN-Thermal ML Laser Print	.9	15	10e7
M.P. Hong	Samsung Elec.	Pentacene on polysilicon-acrylate (S4)	2 to 7 [Au s/d]		10e6
		with Mo or ITO s/d	.1 & .5		10e3-10e6
K. Cho	Pohang Univ.	Regioregular P3HT*-as spin cast & annealed @ 240C / 20 min	.08 to .28		
M. Ando	Hitachi	F8T2 (poly-fluorene-co-bithiophene)	.01	-10	>10e5
I. McCullough	Merck	Terthiophene	.03	-5	10e6
W. Fix	PolyIC	P3AT (poly 2-alkylthiophene)	.02	-4	10e5
S. Burns	Plastic Logic	Polyfluorine-based polymer on PET	.01	-5 to -10	10e4
R. Street	PARC	Polythiophene polymer by IJP on PEN	.1		10e7
T. McLean	Merck	PAA (polyarylamine)	.01	-2.3	10e5

\* P3HT = poly 3 - hexylthiophene

그림 3. 대표적인 p형 유기반도체의 종류와 화학구조 및 디바이스 소자특성(이동도)의 향상 추이. 아래 부분의 표는 사용된 유기반도체 및 플렉서블 기판에 따른 전하이동도, threshold voltage 및 on/off 비 등의 비교를 도식한 것이다.<sup>16</sup>

표 1. 프린팅 방식에 따른 잉크의 점도, 해상도 및 생산속도의 비교

Printing method	Viscosity (Pas)	Layer thickness (μm)	Feature size (μm)	Registration (μm)	Throughput (m²/s)
Gravure printing	0.01~0.2	<0.1~8	75	>20	3~60
Flexography printing	0.05~0.5	0.04~2.5	80	>200	3~30
Offset printing	5~100	0.5~2	10~50	>10	3~30
Screen printing	0.5~50	0.015~100	20~100	>25	2~3
Ink jet printint	0.001~0.04	0.05~20	20~50	5~20	0.01~0.5

LCD, OLED, 전자종이(electrophoretic paper) 등을 위한 다양한 소재가 개발되고 있기 때문에 상용화뿐 아니라 시장의 확대가 가능할 것으로 판단되며 특히 이를 위한 최적의 roll-to-roll 시스템/공정 인프라 확충에 의한 산업기반 조성이 달성될 경우 차세대 디스플레이 산업 전반의 경제성 향상에 크게 기여할 수 있다고 판단된다.

고해상도 inkjet printing 법에 의한 유기고분자 박막트랜지스터가 발표되었고,<sup>11</sup> 그림 4에 나타낸 바와 같이 수용성의 PEDOT :

PSS를 사용하여 source/drain의 전극패턴을 폴리이미드 절연막 상에 형성한 후 이러한 source/drain 층에 용매간섭이 없는 유기 용제를 사용하여 poly(9,9-dioctyltrifluorene-co-bithiophene, F8T2)의 활성 유기반도체 층과 passivation(PMMA/PVP)의 박막을 형성시켰다. 일반적으로 잉크젯을 이용한 미세패턴은 20~25 μm 정도가 얻어질 수 있으며 그 이하의 패턴을 얻기 위해서는 별도의 표면처리 방법이 필요하다.<sup>17</sup> 장비개발 관점에서는 미국, 일본, 영국이 가장 활발히 연구를 진행하고 있으며, 특히 특허 등 원천 기술에

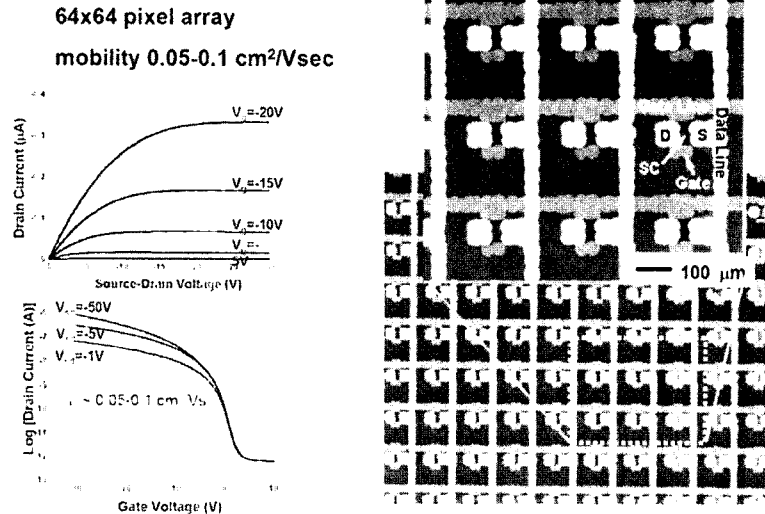


그림 4. 잉크젯 프린팅에 의한 OTFT printed array of 300 μm polythiophene(Xerox/PARC).<sup>18</sup>

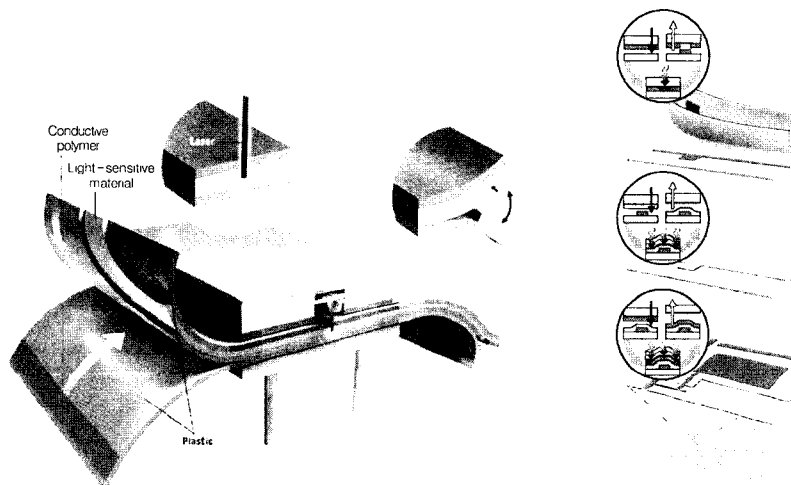


그림 5. Laser thermal patterning/printing 장비 및 소자제작 공정.<sup>20</sup>

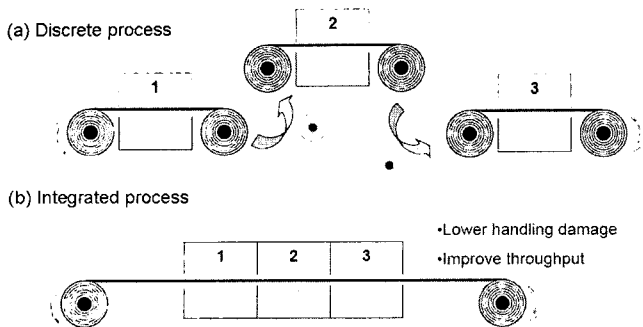
대한 확보 및 크로스 라이선싱이 이루어지고 있다. Seiko Epson의 경우는 자체 기술력으로 시제품을 생산하고 있으며, 영국의 CDT, 미국의 Litrex, Spectra의 전략적 제휴, 국내의 경우 삼성전사에서 MEMS Based Piezo Inkjet Print Head 소자 개발이 진행되고 있다.

Laser transfer patterning 방법은<sup>19</sup> 3M과 삼성SDI에 의하여 LCD의 칼라 필터 전사법으로 개발되었으나, 현재 OLED의 대면적(4세대 이상)의 저분자 유기EL 소자의 개발을 목적으로 칼라패턴 방법에 적용하기 위한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다 유기반도체 소자의 패턴공정에는 Du Pont, Sarnoff, Creo 등의 미국/캐나다 업체의 연구소를 중심으로 유기반도체소자의 활성층 물질과 gate, source, drain 전극용 conducting polymer를 laser pattern법으로 전사/프린팅하는 연구가 진행되고 있다(그림 5). Donor 필름으로부터 기판의 픽셀 상으로 전사가 이루어지며, 5 μm의 픽셀 해상도 및 250 픽셀 에 해당되는 폭의 패턴 전사 구현이 발표되었는데<sup>20</sup> 이러한 고해상도, 다층박막의 패턴이 가능하다는 장점이 있다. 고해상도의 전사 품질을 위해서는 전사물질의 기판, 필름, 물질간의 접착

력 및 cohesion의 조절이 필요하다.

#### 4. Roll-to-Roll 연속 공정에 의한 유기전자소자 제작

유기 전자 소자의 roll-to-roll 공정은 기존 인쇄 매체를 대량으로 제작하던 방법을 디스플레이 제조 공정에 적용한다는, process capability 측면에서의 혁신적 기술 진보를 의미하는 것으로, 실제로 기존 디스플레이의 저가격화, 그리고 미래의 플렉서블 디스플레이를 위한 제작 공정 개발은 동 분야에서 막대한 미래지향적 부가가치를 갖는다고 할 수 있다. 아직까지는 paper, label, electronic ticket 등 종이 기반 연속 생산기술로서 이들 종이 매체의 디지털 전산화의 방법으로서 RFID antenna 등을 imbedding 시키는 공정 및 장비가 활발히 연구 개발되고 있으며 플라스틱 기판을 이용한 이들 전자 ticket, 플렉서블 전자소자/dynamic signage 등은 아직 개발의 태동기 단계에 있다고 볼 수 있다. 이러한 web-based roll-to-roll 생산 방식은 기존의 batch 형 생산 방식과 달리 공정 및 시스템에



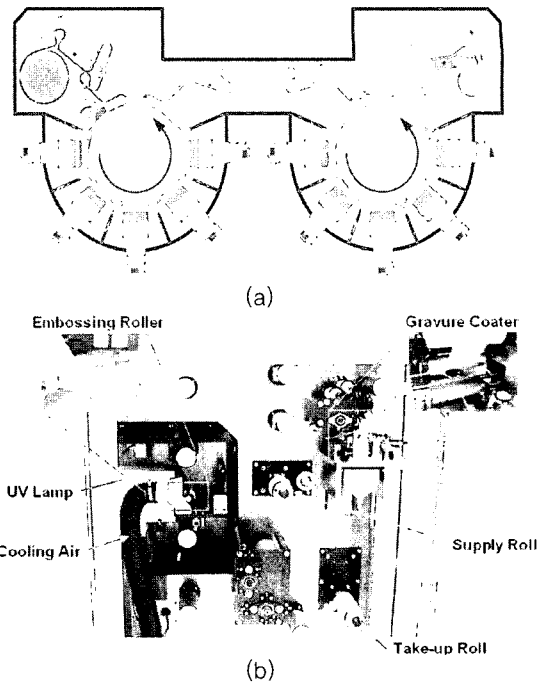
**그림 6.** Roll-to-roll 공정의 단순화된 schematic diagram[1. Treatment & coating process 2. Pattern print (organic/metallic, etc.) 3. Inspection & monitoring]. (a) Discrete process : 각각의 공정이 보조 roll에 의해 전체적으로 연결, (b) Integrated process : 개별 process가 연속적으로 전체 공정 내에 존재함.<sup>21</sup>

서 몇가지 핵심적인 기술적 문제 해결이 요구된다. 첫째는 연속공정 시스템(continuous process system)을 구성할 때 중요한 web handling에 대한 문제로 웹의 종류와 속도에 따른 장력 조건을 결정해야 하며 정확한 이송을 위한 보다 정밀한 위치 제어가 필요하다. 둘째는 web이 연속적으로 이동하기 때문에 코팅 공정이 이러한 이동에 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 공정 장비에서는 공정 chemical이 외부로 누출되지 않아야 한다. 최근의 전자회로 패턴 printing 공정 및 장비 연구의 resolution 향상 및 두께정밀도 개선 방안은 위의 주요 기술적 이슈 해결을 목표로 진행되고 있다.

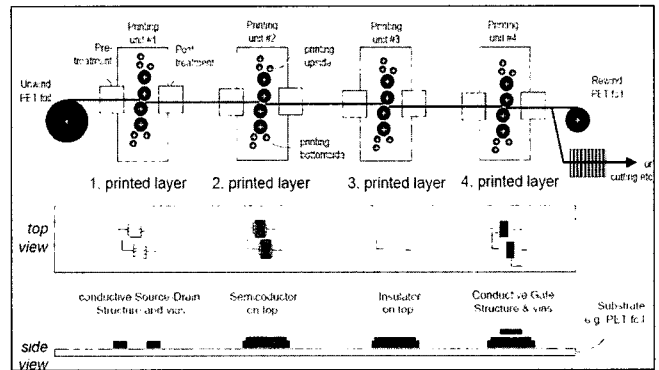
**그림 6**에 roll-to-roll 공정의 간략화된 개념도를 보였다.<sup>21</sup> **그림 7**에는 roll-to-roll 공정에 의해 연속적으로 imprint lithography 및 진공 증착이 가능한 시제작 장비의 예를 보였다.

해외의 연구 사례를 보면, 독일의 Chemnitz 대학의 Institute for Print and Media Technology에서는 mass printing 연속공정에 의하여 유기반도체 소자 및 ring oscillator와 같은 수십 마이크로미터 선폭을 갖는 유기전자 논리소자를 프린팅 가능한 장비 setup을 갖추고 소자 제작 및 공정 연구를 수행하고 있다. **그림 8**에 보인 것처럼 각각의 flexo, offset 등의 printing unit에서 Source/Drain 전극, 유기반도체, 보호층, Gate 전극을 차례로 프린팅하여 논리소자를 완성하는 형태로 공정이 구성되어 있다.<sup>22</sup>

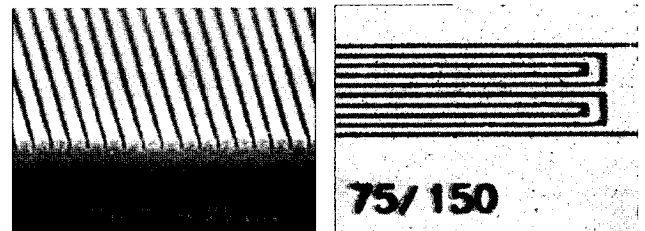
핀란드의 국영기술개발센터(VTT)에서는 printable organic transistor, solar cell, OLED, organic memory, RFID, photonic microsystem, sensor 및 indicator 등의 다양한 소자를 대상으로 Roll printing 기반의 소자 제작 예를 발표하고 있으며, 관련 manufacturing 공정기술 개발 중이며, 이에 따른 소재/디바이스 기술은 미국의 Arizona State Univ./Army Flexible Research Center 등과 공동연구를 진행하고 있다. 현재의 기술 수준에서는 선 간격 20  $\mu\text{m}$ , 선폭 20  $\mu\text{m}$  이하(전자회로 기능성 최소 선폭 75  $\mu\text{m}$ ) 수준의 해상도를 갖는 전도성 나노 silver ink의 패턴이 gravure printing법에



**그림 7.** (a) Applied Film사의 roll-to-roll vacuum deposition system, (b) Hewlett-Packard사의 roll-to-roll imprint lithography 설비.<sup>18</sup>



**그림 8.** Mass printing 연속공정에 의한 유기트랜지스터 소자 제작 공정도 (pmTUC).



**그림 9.** 선 간격 20  $\mu\text{m}$  및 전자회로의 기능성선폭 75  $\mu\text{m}$ 를 구현한 gravure 인쇄 패턴(VTT).

의해 구현될 수 있다(**그림 9**). Gravure 방식에 의해 OLED 소자를 제작하는 연구도 수행되고 있으며, 여기서 gravure roll의 cell depth는 3.0~4.5  $\mu\text{m}$  정도로서 깊이에 따라 코팅되는 유기막의 두께를 조절할 수 있고 이에 따른 소자의 특성을 보고하였다. 전극의 경우에도 aluminum particle를 사용한 잉크 printing을 시도하여

## 5. 결론

플렉서블 디스플레이 및 전자소자 연구 영역에서 특별히 유기박막트랜지스터의 소자기술 개발 동향과 연속공정 및 프린팅 기술의 기술개발 사례를 살펴보았다. 고분자 및 유기반도체를 이용한 TFT 디바이스의 높은 전하이동도와 on/off비 등 우수한 특성을 확보하기 위해서는 유기물질의 분자수준에서의 정렬, 배향기술 뿐만 아니라 박막 uniformity 확보에 관련된 소재 기술이 뒷받침되어야 하고, 실제 소자화를 위해서는 적절한 micro-patterning 방법을 적용시켜 저온공정으로 플렉서블 어레이 상에 형성할 수 있는 공정 개발이 효과적으로 추진되어야 한다. 현재까지 보고되고 있는 많은 유기전자소자들이 진공증착 및 반도체 식각 공정을 일부 사용하고 있으나 향후 이들 신규 소자의 근본적인 장점을 부각시키기 위해서는 효율적인 프린팅 기반 패터닝 공정 개발이 필요하다. 최근 용액공정이 가능한 신소재, 고해상도 프린팅 공정의 발전 및 정밀한 위치 제어 기법과 다층 박막의 도포가 가능한 roll-to-roll 연속공정에 대한 연구개발이 활발히 추진되고 있어 유기박막 트랜지스터를 비롯한 다양한 프린팅 기반 유기 전자소자의 향후 기술 및 시장 진입 전망은 매우 밝을 것으로 예상된다.

감사의 글 : 본 특집 원고는 서울시 산학연협력사업(전략산업 혁신클러스터 육성지원사업)의 지원에 의해 작성되었습니다.

## 참고문헌

1. 홍성화, 노현숙, 구영덕, "플렉서블 디스플레이 시장 진입을 위한 응용 분야별 기술적 이슈", *KISTI 미래유망 사업화아이템 이슈분석*, 2005.
2. 강성룡, *부품 소재 로드맵 반도체 디스플레이장비부품*, 한국산업기술재단, 2005.
3. H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig, and D. M. De Leeuw, *Nature*, **401**, 685 (1999).
4. H. E. Katz, *Chem. Mater.*, **16**, 4748 (2004).
5. M. L. Chabinye and A. Salleo, *Chem. Mater.*, **16**, 4509 (2004).
6. V. Podzorov, S. E. Sysoev, E. Loginova, V. M. Pudalov, and M. E. Gershenson, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3504 (2003).
7. P. F. Baude, D. A. Ender, M. A. Haase, T. W. Kelley, D. V. Muyres, and S. D. Theiss, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3964 (2003).
8. D. J. Gundlach, T. N. Jackson, D. G. Schlom, and S. F. Nelson, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3302 (1999).
9. R. C. Haddon, X. Chi, M. E. Itkis, J. E. Anthony, D. L. Eaton, T. Siegrist, C. C. Mattheus, and T. T. M. Palstra, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 8288 (2002).
10. FJMZ Heringdorf, M. C. Reuter, and R. M. Tromp, *Nature*, **412**, 517 (2001).
11. H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, *Science*, **280**, 1741 (1998).
12. Z. Bao, A. Dobabalapur, and A. J. Lovinger, *Appl. Phys. Lett.*,

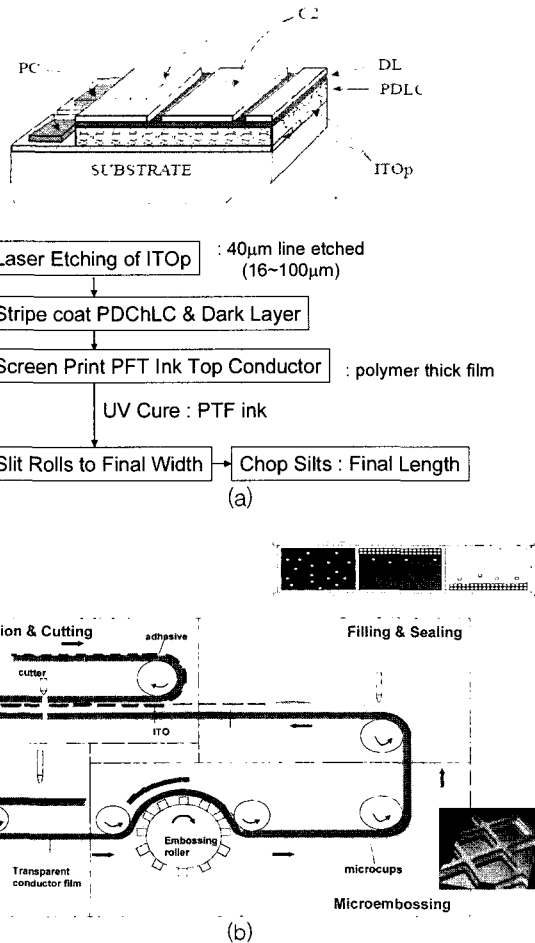


그림 10. (a) Eastman Kodak사에서 발표한 cholesteric liquid crystal display의 roll-to-roll 제조공정, (b) SiPix사의 전기영동필름의 roll-to-roll 제조 공정.

1.0 Ohm/cm 정도의 특성을 보고하였다.<sup>23</sup>

이처럼 연속 프린팅 기술에 의한 유기 전자 소자의 제작과 정밀한 패터 구현이 가능하다는 초기 결과는 발표되고 있으나 이를 적절한 디바이스의 요구 특성에 맞도록 기능성 유기/무기 소재 사이의 interface 적합성을 만족시키는 연구 결과로는 다소 부족하다. 예를 들면 OLED의 발광 화소 패턴이나 유기반도체 소자의 활성반도체, source/drain 패턴으로 수십 마이크로 선폭의 구현은 가능하지만 여러 유기재료 층의 적층이 필요한 상황에서 multi-layer printing 기술 등은 아직 완벽히 개발되어지지 않았다. 국내의 경우 건국대 등의 학계와 KIST, 한국기계연구원 등의 출연연구소에서 유기 전자 소자 제작을 위한 기초 연구를 시작하였으며, 산업계의 경우 필요성을 인정하고 있으나 접근방법을 학계 및 연구소와 협의하려고 준비 중인 단계이다.

좀더 상업화 공정 개발에 가까운 roll-to-roll 공정기술은 주로 미국 디스플레이 연구조합(USDC)의 지원으로 벤처기업과 대학들에 의해 이루어지고 있으며, Kodak의 플렉서블 cholesteric liquid crystal display 제조공정,<sup>24</sup> Sipix사에서 개발한 전기영동 매체의 필름(전자종이 디스플레이에 사용)을 roll-to-roll 공정에 의해 제조하는 예와<sup>25</sup> 같은 연속 생산 공정 설계를 추진하고 있다(그림 10).

- 69, 4108 (1996).
13. B. S. Ong, Y. Wu, P. Liu, and S. Gardner, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 3378 (2004).
  14. I. McCulloch, C. Bailey, M. Giles, M. Heeney, I. Love, M. Shkunov, D. Sparrowe, and S. Tierney, *Chem. Mater.*, **17**, 1381 (2005).
  15. I. McCulloch, M. Heeney, C. Bailey, K. Genevicius, I. MacDonald, M. Shkunov, D. Sparrowe, S. Tierney, R. Wagner, W. Zhang, M. L. Chabinyc, R. J. Kline, M. D. McGehee, and M. F. Toney, *Nat. Mater.*, **5**, 328 (2006).
  16. M. R. Pinnel, *presented at U. S. Display Consortium Plastic Electronics -Frankfurt*, Germany, October, 2005.
  17. J. Z. Wang, Z. H. Zheng, H. W. Li, W. T. S. Huck, and H. Sirringhaus, *Nat. Mater.*, **3**, 171 (2004).
  18. "USDC flexible display report", *US Display Consortium*, November, 2004.
  19. M. C. Suh, B. D. Chin, M.-H. Kim, T. M. Kang, and S. T. Lee, *Adv. Mater.*, **15**, 1254 (2003).
  20. S. B. Blanchet, Y. L. Loo, J. A. Rogers, F. Gao, and C. R. Fincher, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 463 (2003).
  21. M. R. Pinnel, "Overview of Flexible Display Technology : Why, What and When?" *presented at U. S. Display Consortium Plastic Electronics, Frankfurt*, Germany, October, 2005.
  22. A. C. Huebler, "Printing processes for plastic electronics", *presented at Plastic Electronics International Conference on Plastic Electronics. Frankfurt*, Germany, October, 2005.
  23. [www.vtt.fi/flexdisplay.asu.edu](http://www.vtt.fi/flexdisplay.asu.edu).
  24. G. T. McCollough, C. M. Rankin, and M. L. Weiner, *Soc. for Information Display (SID) Int Symp. Digest*, **36**, 64 (2005).
  25. X. Wang, H. Zang, and P. Li, *Soc. for Information Display (SID) Int Symp. Digest*, **37**, 1587 (2006).