

# 인쇄전자회로 기술 및 동향

Technology Trend of Printed Electronic Circuits

IT 융합 · 부품 기술 특집

백강준 (K.J. Baeg)	인쇄전자소자연구팀 연구원
정순원 (S.W. Jung)	인쇄전자소자연구팀 선임연구원
구재본 (J.B. Koo)	인쇄전자소자연구팀 선임연구원
유인규 (I.K. You)	인쇄전자소자연구팀 팀장
유병곤 (B.G. Yu)	신소자/소재연구부 부장

## 목 차

- .....
- I. 서론
  - II. 인쇄전자회로 소재 기술
  - III. 인쇄전자회로 응용
  - IV. 시장동향 및 전망
  - V. 결론

인쇄전자회로 기술은 인쇄(graphic art printing) 공정을 활용한 다양한 광/전자 기기 개발을 위한 핵심요소 기술이다. 기능성 전자 잉크 소재와 초저가격의 프린팅 공정을 통해서 유비쿼터스 시대의 차세대 모바일 IT 기기의 생명력을 불어넣게 된다. 현재 기술 수준이 일부 요소 부품들을 제작하고 기본 단위의 정보처리를 가능케 하는 수준에 머무르고 있으나, 여러 가지 잉크 소재 및 다양한 초미세 인쇄 공정 기술의 개발이 진행됨에 따라 향후 폭넓은 분야에 적용될 것으로 기대된다. 궁극적으로 인쇄전자회로의 성능이 향상되고 고집적화 됨으로써 기존의 Si 기반 CPU나 IC 칩을 대체하는 공정으로 자리매김을 할 것으로 예상된다. 본 기고문에서는 이러한 인쇄전자회로 기술 및 동향에 대해 기술하였다. 특히, 현재 폭넓게 연구가 진행중인 차세대 디스플레이 백플레인이나 개별물품단위 트래킹을 위한 플라스틱 RFID 태그 적용을 위해 필요한 조건들을 인쇄전자회로 기술 관점에서 조망하였다.

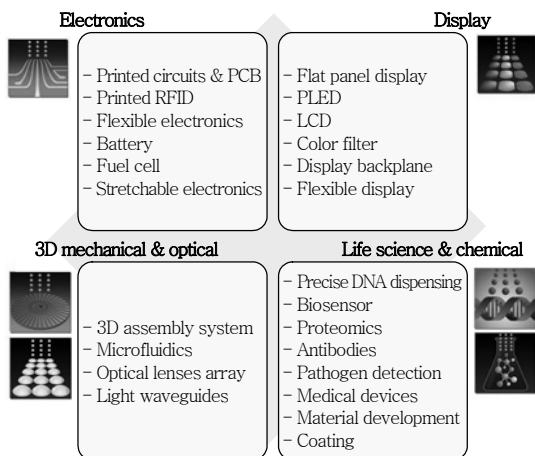
## I. 서론

인쇄(printing) 기술은 인류가 잉크를 통해 방대한 양의 정보를 종이 위에 표시하면서부터 약 천 년 동안 사용되어 왔다. 이러한 인쇄 기술은 최근에 개인용 컴퓨터 등의 IT 기술의 발달과 함께 매우 빠른 속도로 발전하여 현재 누구나 쉽게 전문적인 인쇄물을 회사나 가정에서 만드는 시대가 도래하게 되었다. 이제 인쇄기술은 단순히 문서를 출력하는 수준을 넘어서 여러 광/전기적 기능성 잉크를 통해 사용자의 욕구에 맞는 다양한 제품생산에 응용되고 있다(그림 1) 참조). 그 중 대표적인 분야가 인쇄 기술을 이용하여 다양한 전자소자를 제작하는 인쇄전자 기술이다.

인쇄전자 기술은 전통적인 전자산업의 기반이 된 실리콘 반도체를 대체해 값비싼 대규모의 진공 설비 없이 획기적인 roll-to-roll 연속공정을 통해 비용을 절감하고 생산성을 크게 증대시킬 수 있다. 또한 공정을 유지하는 데 사용되는 전기 등 각종 에너지의 소비를 줄여서 환경 친화적인 공정이 가능하며, 원하는 부분에만 선택적으로 전자소자 제작에 필요한 잉크만 소비됨으로써 불필요한 화학적인 폐기물의 배출을 최소화 할 수 있다. 이러한 많은 장점을 지니고 있

는 인쇄전자 기술은 현재 다양한 요소부품 제작 공정에 적용하는 단계에 있으며, 향후 모든 광/전자소자나 제품을 제작하는 공정에 폭넓게 적용될 것으로 예상된다. 아울러 인쇄공정 기술은 많은 잉크소재들이 저온에서 공정이 가능하여 유연한 플라스틱기판 위에 전자소자를 구현하는 플라스틱 전자공학 기술과 매우 높은 공정 적합성을 지니고 있어서 향후 플렉시블 전자소자 공정 기술로 사용될 수 있는 높은 가능성을 지니고 있다.

인쇄전자소자 및 회로 기술의 주요 시장은 디스플레이, 태양전지, logic과 메모리 분야이다. 여러 시장조사 기관들은 이들 분야에서 밝은 미래를 내다보는 자료를 발표하고 있으며, 향후 10년 내에 960억 달러의 시장이 형성될 것으로 예측하고 있다[1]. 하지만 이러한 장밋빛 전망은 현재 인쇄전자 기술이 시장에 진입하기에 걸림돌이 되는 여러 기술적 문제들이 해결된다는 가정 하에 성립된다. 따라서 앞선 예측들이 현실화 될 수 있도록 소재를 비롯한 소자 및 공정의 기술적 진보가 선행되어야 한다. 다행히 최근에 이러한 문제들이 해결되어 가고 있어 시장 진입 시기가 빨라지고, 그 규모 또한 예상보다 커질 가능성이 있으며, 전형적인 인쇄전자소자 응용산업 이외에도 바이오나 기계, 광학 같은 신규 인쇄전자 응용분야들도 시장에 조기 진입할 가능성이 많다.



(그림 1) 인쇄기술의 다양한 산업적 응용분야

## II. 인쇄전자회로 소재 기술

### 1. 개요

인쇄공정을 통한 전자회로 구현을 위해서는 회로를 구성하는 소재 및 이를 활용한 소자 제작 기술이 뒷받침되어야 한다. 고성능의 인쇄전자소자를 제작하기 위해 중요한 재료, 소자 및 회로 각각의 구성요소들의 요구사항을 <표 1>에 나타내었다.

〈표 1〉 인쇄전자회로 구현을 위한 요소별 조건

반도체	Low cost & high performance - High charge carrier mobility(> 0.1Vs/cm <sup>2</sup> ) - Air-ambient & bias-stress stability - Availability in kg-quantities - Reproducible quality
기판/인크	Cost-effective - Low thermal expansion & high T <sub>g</sub> substrate - Surface wetting & low surface roughness - Cost & easy formulation inks - Low processing temperature & high electrical conductivity
공정	High speed production(> 30m/min) - High resolution & registration - High productivity & yields - Non toxic & non explosive solvents - Drying temperatures <120°C, time <1 min.
회로	Robust device & circuit design - Robust & redundant circuits - Physical models for simulation - Device architecture & materials availability
테스트	High speed R2R electrical test - Compatible to production speed - Fast parameter extraction

먼저 인쇄공정이 가능한 기능성 전자 잉크의 개발은 다양한 전자소자를 제작하기 위해서 가장 핵심적인 요소라고 할 수 있는데, 이러한 기능성 잉크소재는 전기적인 특성에 따라서 크게 도체, 반도체, 또는 절연체 잉크로 나눌 수 있다. 이들 잉크소재를 잉크젯(inkjet)이나 기타 다른 여러 직접 인쇄법을 통해서 전자회로를 기존의 광식각법(photolithography)과 같은 다른 패터닝 방법 없이 기판에 인쇄하여 복잡하고 고가인 진공공정이 없이 비교적 저렴하며 단순한 공정으로 전자소자 제작이 가능하다. 우선 잉크재료가 다양한 용매에 높은 용해도를 가지며 안정적으로 분산되어야 한다. 원하는 소자에 적용하기 위해 필요한 전기적 물성을 보유하고 있어야 하고 재료의 생산 단가가 낮아야 하며, 플렉시블한 전자소자에 적용하기 위해 공정온도도 비교적 낮아야 한다. 이러한 공통적인 요구사항 외에도 각 재료의 기능에 따른 다양한

요구사항을 만족시켜야 하는데, 이에 대해서 각 잉크소재 요소별로 구체적으로 언급하고자 한다.

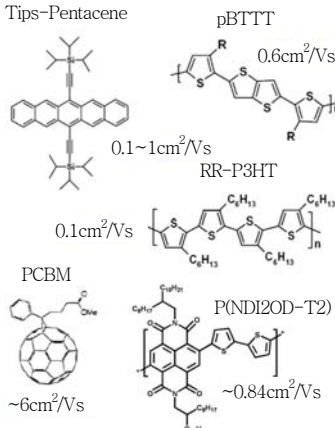
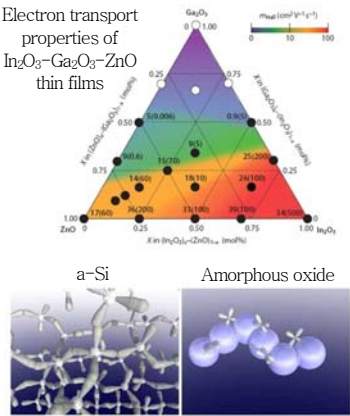
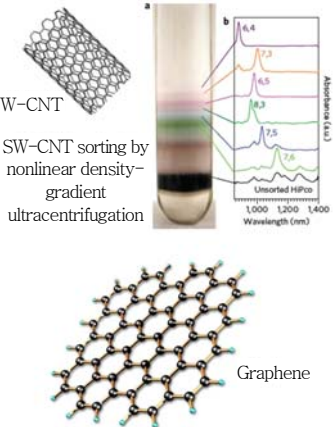
## 2. 반도체 잉크 소재 기술

반도체 잉크재료는 인쇄 기술을 통해서 제작되는 각종 전자소자의 활성층으로 주로 사용되는 핵심소재로서 소자의 성능(이동도, 문턱전압 등)에 가장 중요한 영향을 미치기 때문에 현재 가장 활발히 연구되고 있다. 반도체 잉크재료는 재료의 화학적인 성분상 유기물기반과 무기물기반 반도체 잉크재료로 나눌 수 있다. 유기물 반도체 잉크재료는 공액성 분자(conjugated molecules)나 CNT 혹은 graphene 등 탄소기반 재료를 들 수 있고, 무기물 잉크재료는 금속 산화물이나 실리콘 용액 기반 잉크를 꼽을 수 있다. 이들 각각의 반도체 잉크재료는 전하의 물리적 특성이나, 얻을 수 있는 전하의 이동도가 각각 다르며 이에 따라서 응용하고자 하는 분야도 조금씩 차이를 지니고 있다(〈표 2〉 참조).

이중 유기물 반도체 재료는 전반적으로 가장 낮은 전하의 이동도를 얻을 수 있으며, 물질의 전기적인 특성상 이론적으로 수십 cm<sup>2</sup>/Vs 이하의 전하 이동도만이 가능하며, 실제로는 인쇄공정 등 용액공정을 통해서 0.1~2cm<sup>2</sup>/Vs 정도까지의 성능만이 현재까지 보고되었다. 따라서 유기반도체 잉크의 대표적인 응용 분야는 기존의 비정질 실리콘(amorphous silicon)이 적용되던 전자종이, LCD display의 backplane-용 트랜지스터나 일부 수동형 RFID tag의 디지털 회로 내의 트랜지스터 등 비교적 제한적인 응용분야에만 적용될 것으로 인식되고 있다.

인쇄공정이 가능한 유기물 반도체 재료는 물질의 분자량에 따라서 저분자와 고분자 재료로 나눌 수 있다. 저분자 재료는 고분자에 비해서 비교적 손쉽게 결

〈표 2〉 인쇄공정이 가능한 반도체 소재

Organic Semiconductors	Amorphous Oxide Semiconductors	Carbon Nano-materials
		
<p>Good processability(easy fabrication) Low process temperature(&lt;150°C)</p>	<p>High mobility, wide processing temp window, low operation voltage(&lt;5V), large allowance in the choice of gate dielectrics</p>	<p>Very high mobility Not matured technology</p>
<p>Relative low mobility Bias &amp; air-stability</p>	<p>Still high process temperature(&gt;300°C) Bias stability problem</p>	<p>Sorting problem(semiconducting &amp; metallic) High I<sub>off</sub>, low on/off-ratio(graphene)</p>
<p>Progressive increase in mobility and stability i.e., Polyera Inc., P2100, μ<sub>h</sub> = 1.0~2.0cm²/Vs(spin-coating) N3000, μ<sub>e</sub> = 2.0~2.5cm²/Vs(inkjet-printing)</p>	<p>High electron mobility, which close to that in the crystalline phase μ<sub>e</sub> = 10~50cm²/Vs(i.e., In-Ga-Zn-O)</p>	<p>Up to 10<sup>6</sup>cm²/Vs was reported for suspended Graphene, typically obtained 10,000~15,000cm²/Vs</p>

정성을 얻을 수 있어서 보다 높은 전하 이동도를 보여주고 있다. 반면 고분자 반도체 재료는 저분자에 비해서 인쇄공정 상에서 많은 장점을 지니고 있다. 고분자 재료는 제조된 용액의 점도가 비교적 높아서 인쇄공정으로 제작된 소자의 균일성이 상대적으로 높다고 할 수 있고 이는 인쇄공정을 통해서 대면적 회로를 제작하는 데 매우 적합하다고 할 수 있으며, 상대적으로 비교적 높은 열 안정성을 보여준다. 하지만 이러한 장점들에도 불구하고, 현재까지 개발된 고분자 반도체는 기존에 보고된 저분자에 비해 그 종류가 적은 편이며 성능 면에서도 10배 정도 뒤쳐져 있는 상태이다[2]. 이는 고분자 재료가 갖는 복잡한 물리/화학적 특성들에 기인하는데, 거대한 분자 사슬들로 이루어진 소재를 분자단위에서 완벽히 컨트롤하여 최적의 박막구조를 형성하고 이를 통해서 높은 성능을

구현하기가 매우 까다롭기 때문이다. 특히 인쇄공정과 같은 용액상태로 되어 있는 재료를 통해 빠른 시간 내에 박막을 형성할 때 이러한 어려움이 증대된다. 고분자를 포함한 유기반도체가 갖는 고유한 전하 생성, 이동, 결합 메커니즘이 아직 완벽히 규명되지 못한 상황이며, 유기화학적으로 순도 높은 고분자반도체 소재를 합성하고 정제하는 데 상당한 노후유가 요구된다. 반도체는 수 ppm 이하의 낮은 농도의 불순물에 의해서도 심각한 소자성능 저하를 가져오기 때문에 순수한 재료의 합성 및 정제기술은 고성능소자를 제작하는 데 반드시 필요하다.

무기반도체를 이용한 잉크소재는 유기반도체 소재에 비해서 비교적 높은 환경 안정성 및 이동도를 보여주고 있으며, 크게 나노입자 형태로 되어 있는 잉크와 전구체(precursor) 형태로 되어 있는 졸-겔 재

료로 나뉠 수 있다. 나노 입자 형태로 되어 있는 무기 반도체 잉크는 CdSe 등 화합물 반도체 나노 입자나 ZnO 등 금속 산화물 나노 입자 혹은 실리콘 나노 입자 등이 보고되었다. 이와 같은 무기물 반도체 나노 입자는 우선 무기반도체 재료를 전구체 등을 통해서 나노 입자형태로 만들고 그들의 표면을 용매에 잘 분산되도록 하기 위해서 다양한 분산제를 화학적으로 부착하여 잉크화하고 있다. 하지만 현재 기술수준에서 이들 잉크의 분산도나 장기간의 분산 안정성 등은 유기물 반도체 잉크재료에 비해서 상대적으로 낮다.

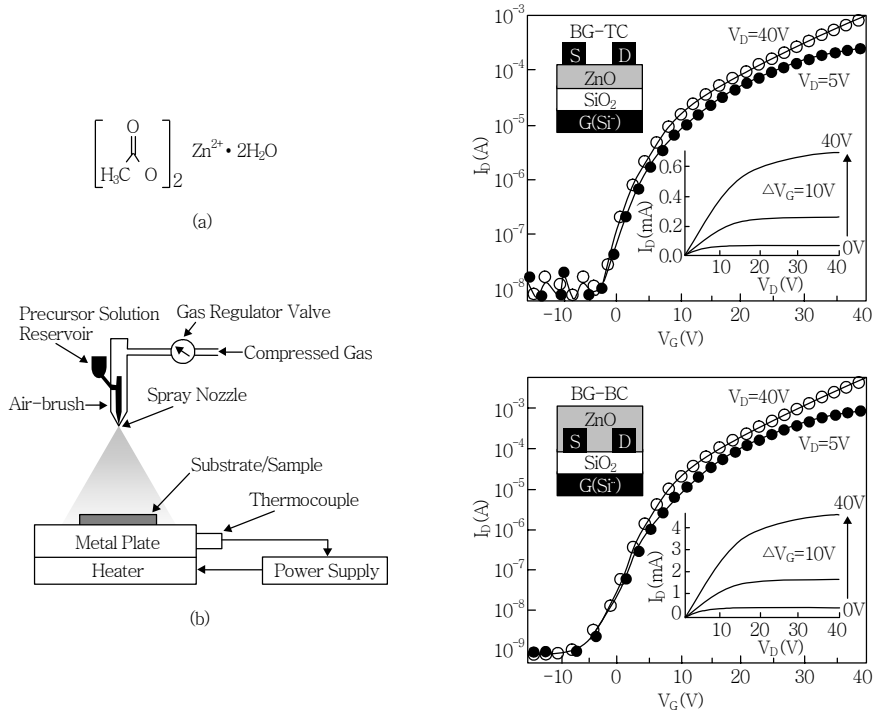
이러한 무기 나노입자 잉크로 제조된 트랜지스터가 주로 보여주는 전하의 이동도는 현재 수  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  정도로 기존의 진공공정을 통해서 얻을 수 있는 이동도에 비해서 상대적으로 매우 낮은 실정이다. 이는 나노입자가 인쇄공정을 통해서 박막을 형성할 때 단결정상이 아닌 다결정상의 박막을 형성하게 되기 때문이다. 따라서 향후 공정 최적화 등을 통해서 이러한 무기 나노입자 박막의 결정성이나 전하 이동도를 더욱 향상시켜야 한다. 무기 나노입자 잉크의 또 다른 단점은 비교적 높은 공정온도에 있다. 무기 나노입자 잉크의 경우 이를 용액에 분산시키기 위해서 다양한 분산제를 나노입자 표면에 부착하여야 하며 인쇄공정 후에 이러한 분산제를 제거하고 원하는 재료로만 이루어진 박막을 형성하기 위해서 300℃ 이상의 비교적 높은 온도의 열처리 공정이 뒤따라야 한다.

금속 산화물 무기반도체의 잉크소재로 고려되고 있는 또 다른 형태는 졸-겔법을 이용하기 위한 전구체이다. 최근 용액 공정을 통한 TCO 소재로도 각광받고 있는 metal halide 전구체는 용액상에 다양한 metal halide 전구체를 적절한 비율로 혼합하여 잉크로 제조한 후, 이를 여러 가지 인쇄법을 통해서 박막을 형성한 후 공기 중에 수분이 존재하는 상태에서 고온 열처리 과정을 통한 졸-겔 과정으로 metal oxide로

변형시켜서 원하는 반도체의 물성을 얻게 된다. 이러한 방법을 통해 제작된 금속산화물 박막은 앞서 소개한 무기 나노입자를 이용한 박막에 비해서 보다 우수한 전하 이동도인 수십  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 보여주고 있다. 최근 미국의 오레곤 주립대와 HP가 공동연구로 metal halide precursor를 잉크젯 프린팅하여 박막을 제작하고 이를 통해서 7.4 $\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 보고하였다[3]. 또한 영국의 Imperial College 연구팀의 경우 기존의 성막 후 열처리 공정이 아닌, air-brush를 통해 분사된 ZnO 전구체가 공기 중 고온의 기관 위에서 열분해되는 원리를 이용해 15 $\text{cm}^2/\text{Vs}$  이상의 높은 이동도를 갖는 박막트랜지스터를 보고한 바가 있다(그림 2) 참조[4].

하지만 이러한 제조 방법들 역시 금속산화물 박막의 결정화를 위해서 400℃ 이상의 높은 공정온도를 요구하고 있으며, 매우 빠른 반응 속도로 인해 인쇄공정을 통해서 완성된 박막의 각 성분의 조성이나 defect state의 조절 등을 균일하게 제어하기 어려워져 제작된 박막의 전기적 물성에 대한 재현성을 확보하기 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 이 부분에 대한 연구를 통해서 공정온도도 낮추고 전기적 물성의 균일도를 높여야 향후 상업적인 소자에 적용이 가능할 것으로 사료된다. 최근 ETRI 본 연구그룹은 KRICT과의 공동 연구를 통해 ZnO 전구체를 이용해 150℃의 낮은 공정온도를 갖는 인쇄형 TFT를 구현하였으며, 250℃ 이하에서 2.5 $\text{cm}^2/\text{Vs}$  이상의 높은 이동도를 얻었다. 이러한 공정온도와 이동도는 플렉시블 AMOLED 등 플라스틱 기판에 제조되는 다양한 플렉시블 디스플레이에 폭넓게 응용 가능할 것으로 예상된다.

유기물 반도체의 낮은 성능 및 안정성, 무기물 잉크재료의 낮은 분산성과 높은 공정 온도 등 기존 재료의 단점을 극복하기 위해서 새로운 반도체 잉크 재료의 개발에 대한 요구가 꾸준히 제기되어 왔고 이에



(그림 2) Air-brush 방법으로 제조된 ZnO 트랜지스터 [4]

대응하는 대표적인 재료가 바로 CNT와 graphene 등 탄소를 기반으로 하는 반도체 잉크재료이다. 두 재료는 모두 탄소와 수소만으로 이루어져 있어서 앞선 분류를 기준으로 유기물 재료에 속하지만, 공액 분자 구조를 기본으로 하는 유기반도체 재료와는 전혀 다른 전기적인 특성을 보유하고 있다. 이러한 탄소 기반 잉크의 가장 큰 장점은 이들 잉크가 비교적 낮은 온도(<100℃)에서 공정이 가능하며 매우 높은 전하의 이동도를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 이들 잉크 재료를 이용하면 유기물재료의 낮은 성능과 무기물재료의 높은 공정온도에 대한 문제점을 동시에 해결할 수 있다.

탄소 나노 재료를 이용한 전자소자를 제작하기 위해서는 다양한 기술적 문제들이 선행되어야 한다. CNT는 내부적으로 매우 높은 전하 이동도(>1000cm<sup>2</sup>/Vs)를 보유하고 있지만 CNT를 생산할 때 전도성 특성과

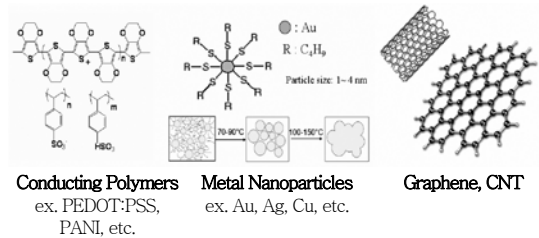
반도체 특성을 보유하는 CNT가 일정비율로 동시에 제조되어서 이를 간편하게 대규모로 분리할 수 있는 기술이 필요하다. 현재 CNT를 반도체 잉크재료로 이용하기 위해서 대표적으로 사용되고 있는 기술이 전도성 CNT의 표면을 화학적으로 처리하여 전도성 특성을 없애는 기술이다. 이는 전도성 CNT와 반도체 특성 CNT가 표면화학적으로 다른 성질을 지니고 있고 이를 이용하여 전도성 CNT의 표면에만 화학적인 반응이 가능한 분자를 부착시켜서 전도성 특성을 잃게 하고, 이로 인해서 CNT 박막에서 반도체 특성만을 얻고자 하는 것이다. 이 방법은 사실 수 년 전부터 알려져 왔으나 전도성 CNT의 전기적 특성이 완벽하게 제거되기 어려워서 이렇게 제조된 반도체 CNT 박막이 비교적 높은 off-전류를 보여주었다. 최근에 Dupont에서 이러한 단점을 개선하여 polyolefin의 cycloaddition reaction을 통하여 금속성 CNT의 전

도성 특성을 보다 효과적으로 제거하였으며, 이를 통해  $10^5$  이상의 비교적 높은 전류 점멸비와  $10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전하이동도를 보유한 CNT 잉크를 보고하였다[5].

Large-area의 graphene 재료의 경우 콘 모양의 conduction band와 valance band가 Brillouin zone의 K점에서 만나는 밴드갭(band gap)이 없는 반금속 성 특성을 보인다. Graphene이 연구자들의 큰 이목을 집중시키는 이유는 그 자체가 갖는 고유한 전하이동 메커니즘과 매우 빠른 이동도에 있다. Graphene 단일 시트 내에서 이론적으로  $10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 까지 굉장히 빠른 이동도를 보일 수 있으며, 보통 실험적으로  $10,000 \sim 15,000 \text{cm}^2/\text{Vs}$  정도의 값이 일반적으로 얻어진다고 알려져 있다. 하지만, graphene sheet는 너비가 10nm 이하로 좁아지면서 graphene nanoribbon 형태가 되어야 비로소 반도체 특성을 보이는 것을 최근에 발견하였다[6]. 하지만 현재까지 너비가 10nm 이하로 작은 graphene을 인쇄 공정에 적합하도록 대량 생산하거나 분리해내는 공정은 보고된 바가 없다. 따라서 높은 이동도에도 불구하고 대면적 graphene sheet는 전자회로 구현시 off가 되지 않는 문제가 있으며, 이점이 해결되어야만 graphene이 인쇄공정용 반도체 잉크로 본격적으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 CNT와 graphene 트랜지스터의 낮은 전류 점멸비로 인해 낮은 off-전류가 요구되는 디지털 논리회로 구현보다는 100GHz 이상의 높은 cut-off 주파수를 갖는 RF 소자 응용에 적합할 것으로 사료된다.

### 3. 전도성 잉크재료 기술

전도성 잉크재료는 각종 전자소자의 전극과 배선 등에 주로 사용되며 이때 형성되는 전도성 라인에 필



(그림 3) 인쇄공정용 전도성 배선 재료

요한 가장 중요한 물성이 바로 전기 전도도이다. 예를 들어 전도성 잉크재료의 인쇄공정을 통해서 LCD 디스플레이의 백플레인의 배선을 형성한다고 하였을 때 형성된 배선의 전기전도도가 높을 시에는 저항에 의한 RC 시간상수 delay를 최소화 할 수 있어서 빠른 응답속도의 영상 구현이 가능하다. 그 다음으로 중요한 요구사항은 낮은 공정온도, 낮은 제조단가 및 잉크의 안정성 등을 들 수 있다. 현재 주로 사용되고 있거나 활발히 연구되고 있는 인쇄공정용 전도성 잉크 재료는 (그림 3)과 같이 전도성 고분자 용액, 금속 나노 입자가 분산된 용액, CNT나 graphene 분산 용액 및 이에 대한 복합체 재료를 들 수 있다.

이들 재료는 각각의 장점과 단점을 동시에 보유하고 있어서 현재 모든 요구사항을 완벽히 만족시키는 전도성 잉크는 없는 실정이다. 현재 가장 활발히 연구되고 있는 금속 나노입자의 경우 인쇄전자회로에 응용되기 위해 충분한 만큼 높은 전기전도도를 보유하고 있으나, 이들을 분산시키기 위해 사용되는 분산제를 제거하기 위해서 비교적 높은 소성온도(>150°C)를 요구하며 제조 단가도 비싼 편이다. Au 잉크와 같은 경우 제조 단가가 매우 비싸고, Al이나 Cu 잉크와 같은 재료는 산화안정성 등의 문제로 인해 개발에 어려움을 겪고 있다. 현재 Ag 잉크를 주로 사용하는데 높은 접착저항, 소성온도, 제조단가 등으로 인해 새로운 전극 재료에 대한 개발이 요구되고 있다. 따라서 좀 더 낮은 단가에 제조가 가능한 공정의 개발과 소성

온도를 낮출 수 있는 분산제를 개발하는 것이 필요하다. 전도성 고분자의 경우 높은 분산 특성과 낮은 공정 온도 때문에 공정성이 가장 용이하나, 전도도가 금속 나노입자에 비해 낮은 편이다(현재 PEDOT:PSS의 경우 1000S/cm까지 보고됨). 따라서 전도성이 높은 전도성 고분자 재료에 대한 연구가 필요하다. CNT나 graphene 분산 용액은 탄소 나노재료 자체로는 일반적인 용매에 분산이 어려워 표면이 개질된 CNT를 물 등의 용매에 분산해서 잉크로 사용하고 있다. 금속 나노입자 보다는 낮으나 비교적 높은 전도도(100~1000S/cm)와 낮은 공정 온도(100℃) 때문에 최근에 활발히 연구되고 있다. 하지만 CNT나 graphene의 장기간 안정적인 분산을 얻기 어려워서 이에 대한 연구가 더욱 필요하다. 현재 모든 재료가 가지고 있는 장단점으로 인해서 한 가지 재료를 통해서 전기전도성 잉크가 필요한 모든 공정을 만족스럽게 수행하는 것은 어렵다고 할 수 있다.

### III. 인쇄전자회로 응용

#### 1. 개요

인쇄전자회로 기술은 트랜지스터 및 전자회로 제작, 센서 및 메모리 제작, PCB 제작 등에 적용되고 있다. 인쇄 기술을 통한 트랜지스터 및 회로는 디스플레이를 구동하기 위한 구동소자, RFID 태그의 디지털회로, 광/화학 센서 등에 응용될 것으로 예상된다. 현재는 인쇄전자 기술을 통해 제작된 트랜지스터와 전자회로 등은 주로 유기반도체를 이용하여 제작되어 왔으나, 앞으로는 앞서 설명한 무기반도체 잉크나 탄소기반 반도체 잉크의 개발을 통해서 다른 잉크로 그 영역이 확장될 것으로 예상된다.

현재까지 인쇄전자의 주 관심사인 유기박막트랜

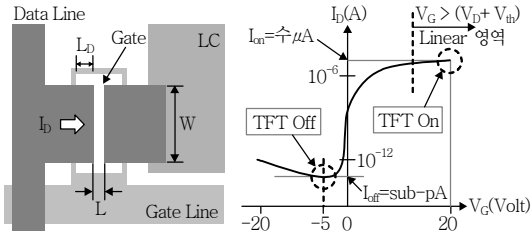
지스터(OTFT)를 제작하는 직접 인쇄 기술에는 잉크젯, reverse-offset, gravure, flexography, 스크린프린팅, 스프레이 등을 꼽을 수 있다. 이러한 직접 인쇄법이 적용 가능한 인쇄전자회로 제작공정은 크게 소스/드레인 전극의 형성, 유기물 반도체 층의 형성 및 패터닝, 게이트 절연체 박막의 형성, 그리고 게이트 전극의 형성 등을 들 수 있다. 이들 요소들을 형성하기 위한 방법의 요구사항이 서로 다르다. 따라서 전공정을 한 가지 직접 인쇄법을 통해서 제작하기보다는 여러 가지 직접 인쇄법을 적절하게 혼합하여 사용하는 것이 보다 바람직하다고 여겨지고 있다.

본 장에서는 인쇄전자회로가 응용 가능한 평판디스플레이의 구동회로, RFID 태그의 디지털 및 아날로그 프로세서에 초점을 맞춰 고성능 전자회로 구현에 필요한 사항들과 응용사례를 살펴보고자 한다.

#### 2. 인쇄공정을 이용한 평판디스플레이 구동회로

인쇄 기술이 가장 활발하게 응용되고 있는 분야 중 하나가 디스플레이 제조공정이다. Seiko-Epson은 이미 LCD용 컬러필터의 제조공정을 인쇄 기술을 통해서 대체하는 공정의 개발을 완료하여 실제 공정에 적용하였다. 또한 최근에는 전자종이(e-paper), AMOLED나 AMOLED 등의 화소(pixel)에 트랜지스터를 하나씩 포함하는 능동형(active matrix) 평판 디스플레이의 TFT를 인쇄공정을 통해서 제작하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 플렉시블 전자종이의 구동소자를 인쇄공정으로 제작하는 기술은 이미 많은 부분이 완료되어, 영국의 Plastic Logics나 네덜란드의 Polymer Vision은 이에 대한 시제품 출시를 앞두고 있다. 국내에서는 ETRI를 비롯하여, 삼성전자, LG디스플레이, LG화학, 생산기술연구원, KIMM, 경희대, 동아대 등에서 활발히 연구하고 있다.





(그림 4) 디스플레이 백플레인용 TFT 레이아웃 및 On/Off 특성 곡선

인쇄 기술을 능동형 디스플레이의 백플레인 제조에 응용하기 위해서는, 우선 직접 인쇄법을 통해 제작된 TFT의 on/off 특성이 (그림 4)와 같은 필요조건을 충족시켜야 한다. 일례로, 240~480Hz 이상의 빠른 응답속도를 갖는 대면적 LCD의 구현을 위해서는  $3.0\text{cm}^2/\text{Vs}$  이상의 높은 전하 이동도, 5V 이하의 낮은 문턱전압,  $10^7$  이상의 높은 전류 점별비, 1pA 이하의 낮은 누설전류 등이 필요하다. 또한 이러한 특성의 TFT는 300°C 이하의 낮은 공정온도에서 높은 균일도와 신뢰성, 안정성을 갖도록 구현되어야 한다. 현재 AMOLED의 백플레인에 적용가능하기 위해 필요한 반도체의 이동도는 대략  $5.0\text{cm}^2/\text{Vs}$  이상으로 여겨지며, 따라서 상대적으로 낮은 이동도를 갖는 유기 반도체 재료는 고성능 평판디스플레이에 적용되기 어려울 것으로 보인다. 대신 전자종이나 실내외 광고판 등과 같은 낮은 이동도 하에서도 요건을 충족시켜 줄 수 있는 응용분야에 한해 적용될 수 있을 것으로 내다보고 있다. 따라서 앞서 언급한 무기반도체 잉크나 탄소기반 반도체 잉크의 개발을 통해서 가능할 것으로 예상되나, 현재 기술 수준으로는 잉크의 안정성 등 여러 특성 등을 개선하여야 한다.

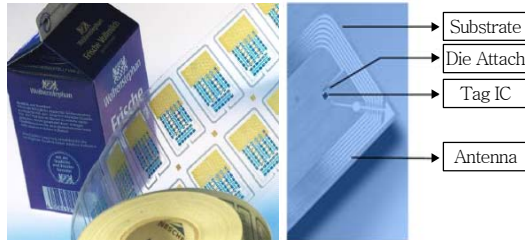
인쇄전자회로를 디스플레이 구동소자에 응용하기 위해서는 앞서 설명한 TFT 성능을 기반으로 한 회로 구성과 레이아웃 등에 대한 심층적 고려가 필요하다. 가령 (그림 4)와 같이 인쇄기법의 낮은 해상도 문제로 인해 상대적으로 넓은 영역에서 소스/드레인 전극과

게이트 전극 사이의 겹침 영역이 발생하는데, 이러한 넓은 겹침 영역에 의한 큰 overlap capacitance가 발생한다. 따라서 전자회로의 RC 시상수를 증가시켜 결론적으로 디스플레이의 응답속도를 저하시키는 역할을 하게 된다. 특히 화면 크기가 크고 빠른 응답속도를 요구하는 차세대 디스플레이의 경우 큰 문제로 작용하게 된다. 따라서 켜진 상태에서 낮은 저항을 갖기 위한 큰 W/L과 낮은 overlap capacitance, 오프상태에서의 누설전류 최소화화 화소의 개구율을 크게 갖도록 하는 디스플레이 백플레인 설계가 필요하다.

### 3. 인쇄 기술을 이용한 RFID Tag

기존의 Si 기반 RFID에 비해서 인쇄공정을 통한 RFID는 태그 제조단가를 획기적으로 낮출 수 있을 것으로 기대되기 때문에 많은 사람들이 활발히 연구를 진행하고 있다. 현재 시장에서 가장 값싼 Si 기반 RFID 태그는 약 20센트 정도인데, 5센트 이하로는 개발이 불가능하다고 여겨진다. 하지만 개별물품 단위에 폭넓게 RFID가 적용되어 물류혁명을 가져오기 위해서는 태그 하나 당 단가가 1센트 혹은 더 낮은 가격으로 달성되어야만 한다. Roll-to-roll 연속공정을 통한 fully printable RFID만이 1센트의 가격을 만족시킬 수 있다고 생각된다.

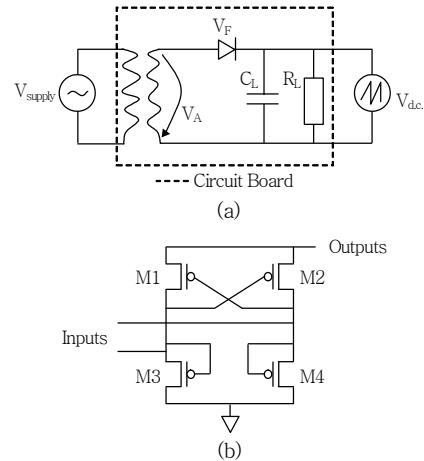
프린티드 RFID는 가격 경쟁력에 대한 장점이 있지만 기술 개발 속도나 현재의 기술 수준을 고려하면 부정적인 측면도 많이 있다. 우선 프린티드 RFID의 긍정적인 측면을 살펴보면 안테나와 IC가 동시에 제작된다는 사실, 제품 패키징에 대한 직접 인쇄 가능성, 싼 가격과 다양한 기판 사용 가능성 등을 들 수 있다. 한편 부정적인 측면으로는 현재의 기술 개발 속도와 수준을 들 수 있다. 동시에 많은 라벨들을 읽어 들일 수 없다는 사실, 수명이 한 달도 안 된다는 사실, 최대 인식 속도가 10/sec 정도라는 사실, 최대 인식



(그림 5) Printed RFID Tag 및 구성요소

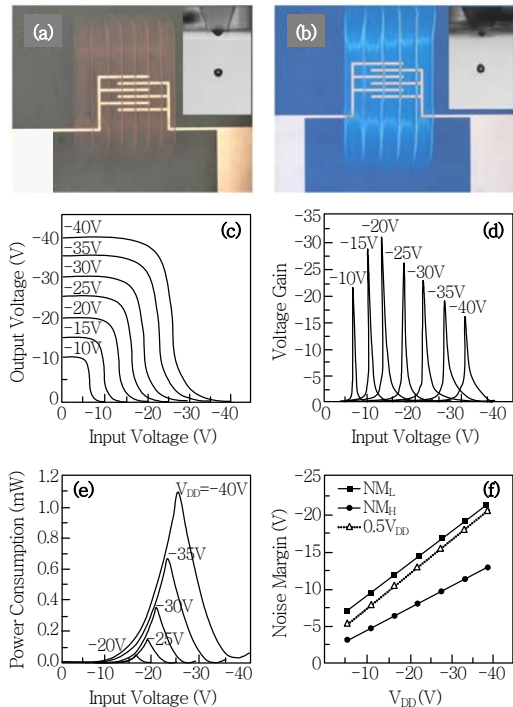
거리가 수 cm라는 사실 등이 큰 문제점으로 지적될 수 있다. 즉 다시 말해 아직도 여전히 연구 수준에 지나지 않고 있다. 아마도 상용화 및 시장 진입을 위해서는 당초보다 2~3년 지연된 2018년 이후로 연기될 수도 있다는 주장이 제기되고 있다. Philips는 6년 전에 polymer electronics를 이용한 RFID IC를 만드는 반도체 회사를 설립하였으나 아직 연구 개발 활동이 진행중에 있다(그림 5) 참조).

인식 거리나 환경에 대한 민감도 측면에서 개별 물품단위 트래킹에 가장 장점을 보이는 것은 13.56MHz 대역이다. 세계 선진 연구기관에서 13.56MHz 플라스틱 RFID 기술 개발에 매진하고 있는 이유가 바로 여기에 있다. 13.56MHz 프린티드 RFID 태그 구현을 위해서는 태그를 구성하는 안테나, 정류기, 메모리, 디지털 혹은 아날로그 전자회로 등이 13.56MHz 대역에서 구동되어야 한다. 135kHz 혹은 13.56MHz의 저주파 영역 대에서는 유도결합(inductive coupling) 방식에 의해 전원을 공급받는다. 안테나를 통해 RFID 태그에 유도되는 기전력은 리더기와 태그 안테나 사이의 거리, 코일의 모양이나 전기전도도 등에 의한 상호 인덕턴스 등에 의해 결정된다. 현재 13.56MHz에서 안테나를 통한 충분한 유도 기전력 확보는 기술적인 큰 어려움은 없는 상태이다. 다만, 리더기와 태그 간의 높은 상호 인덕턴스를 갖기 위한 안테나 설계나 높은 전도도를 갖는 배선을 150°C 이하의 낮은 공정 온도에서 제작하여야 한다.



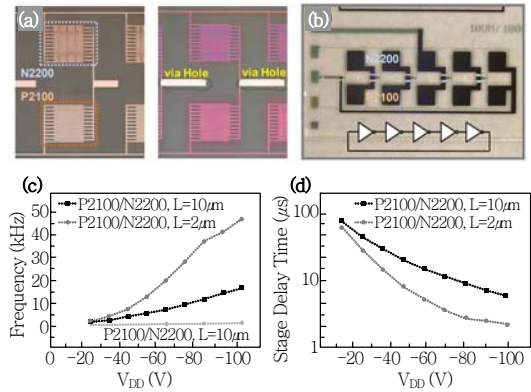
(그림 6) (a) Organic Schottky Diode[IMEC, Nat. Mater. 2005] and (b) TFT-based Rectifiers[MRS Spmp. Proc. 2005]

안테나를 통해 공급된 AC는 13.56MHz에서 정류기(rectifier)를 통해 DC로 변환되어 디지털 회로가 동작하기 위한 충분한 전력을 공급한다. 정류기는 크게 Schottky 다이오드를 기반으로 한 것과 TFT를 기반으로 한 것으로 구분된다(그림 6) 참조). 다이오드 기반은 TFT 기반 정류기에 비해 높은 주파수를 갖는 반면 낮은 파괴전압을 갖는다. 반면 TFT 기반 정류기의 경우, 인쇄 공정을 통해 제작된 유/무기 트랜지스터의 낮은 이동도, 넓은 채널 길이 등으로 인해 13.56MHz 이상의 고주파수를 달성하는 데 어려움이 따른다. 현재 기존의 광식각 공정 없이 완전한 인쇄형 정류기를 13.56MHz 이상의 높은 주파수 영역대에서 10V 이상의 전원을 공급하도록 개발하여야 한다. PolyIC의 경우, Schottky 타입의 정류기를 사용하여 13.56MHz 이상에서 AC가 DC로 변환되는 것을 확인하였고, RFID의 전원부는 13.56MHz 이상으로 동작하는 특성을 확보하였다. Input이 ±15V AC 13.56MHz 일 때 output은 DC 6V 이상이었다. 하지만 이와 같은 특성을 확보하기 위해 저가 인쇄공정 이외에 광식각 공정이 추가된 것으로 판단된다.



(그림 7) 잉크젯 방법으로 제작된 고분자 CMOS 인버터[7]

2004년에 처음으로 제작된 full printed ring oscillator는 1Hz 정도의 주파수가 얻어졌으나 최근에는 600kHz 이상의 ring oscillator도 보고된 바 있다. 하지만 앞서 보고된 수백 kHz 이상의 동작속도를 보이는 유기물 반도체 기반 전자회로는 현재 신뢰도가 부족한 것으로 판단되는 상황이다. ETRI 본 연구팀에서는 미국 Northwestern 대학 A. Faccetti 연구진과의 공동연구를 통하여  $0.2\sim 0.5\text{cm}^2/\text{Vs}$  이상의 높은 이동도를 갖는 P형(Polyera P2100) 및 N형(Polyera N2200) 고분자 반도체 TFT를 잉크젯 공정을 통해 제작하였다[7]. 이를 통해 CMOS 인버터(그림 7) 참조)와 complementary ring oscillator(그림 8) 참조)를 고분자 반도체와 잉크젯 프린팅을 통해 세계 최초로 보고하였으며, 인쇄전자회로의 동작 속도 역시 50kHz 정도로 세계 최고 수준으로 확보하였다. 이는 새로 개발된 P형 및 N형 고분자 반도체의 높은



(그림 8) 잉크젯 프린팅을 통해 제작된 고분자 Ring Oscillator 및 특성[7]

이동도, 절연체 선택, 채널 길이 및 인가된 전압 등에 크게 의존하며, P3HT:N2200 회로에 비해 10배 이상 높은 성능을 보여주었다.

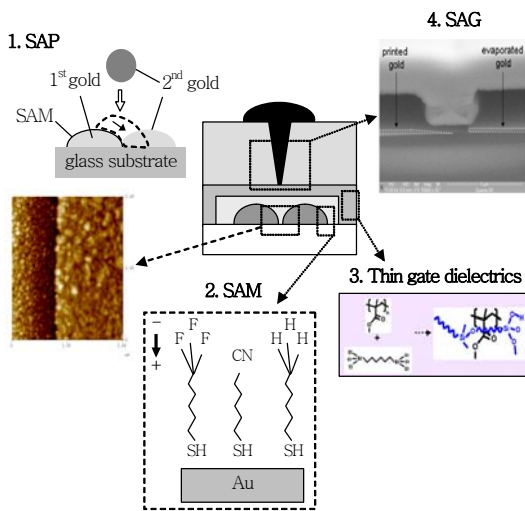
인쇄법을 활용한 RFID 분야에서 현재 가장 앞선 기술력을 보유한 곳은 독일의 PolyIC이며 현재 세계에서 가장 활발하게 유기물 플라스틱 RFID를 연구 개발중에 있다. 그들은 2005년에 13.56MHz를 시연하고 이를 바탕으로 2008년에는 간단한 메모리를 부착하여 ID tag로 응용된 PolyID 등의 간단한 응용제품을 발표하였다. 2010년부터는 EPC를 제품화한다고 발표하고 있다. 그 외에도 Organic ID, IMEC, Holst center 등에서 관련분야를 연구하고 있으며, 국내에서는 ETRI 본 연구팀을 비롯해서 광주과학기술원, 한밭대, 순천대와 파루 등에서 Printed RFID 관련 연구를 수행하고 있다.

#### 4. 고성능 인쇄전자회로 구현

인쇄전자회로의 동작속도( $f_T$ )는 아래 식에 나타난 바와 같이 전하이동도( $\mu_{FEF}$ ), 인가되는 전압( $V_{GS} - V_{TH}$ ), 채널 길이( $L$ ) 등에 의해 좌우된다. 따라서 13.56MHz 이상의 높은 주파수에서 구동하는 인쇄전자회로를 얻기 위해서는 고이동도의 인쇄공정용 반도체 재료

개발, 인쇄공정을 통한 sub-micron 사이즈의 짧은 채널 길이 구현이 우선적으로 필요하다. 또한 overlap capacitance를 최소화시키기 위한 self-align printing 방법 등이 요구된다.

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi C_G} = \frac{W\mu_{FET}C_{ox}(V_{GS} - V_{Th})}{2\pi(C_{ox}WL)} = \frac{\mu_{FET}(V_{GS} - V_{Th})}{2\pi L^2}$$

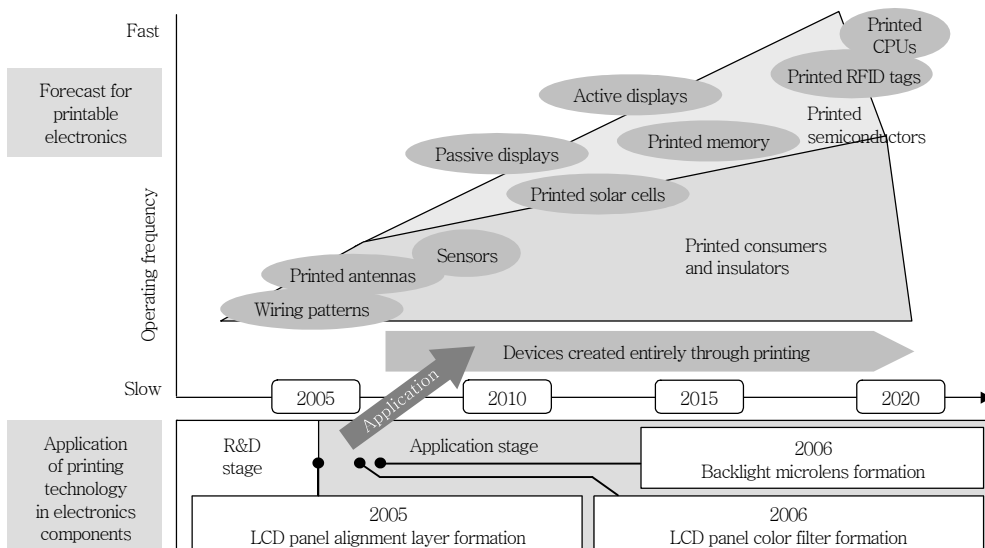


(그림 9) Self-Align Printing 방법을 이용한 소자 Down-scaling[8]

(그림 9)에 나타난 바와 같이, 잉크젯과 자기배열 방법을 통한 SAP을 이용해 소스/드레인 전극을 sub-micron 크기로 제작하는 방법, 가교 결합된 박막 고분자 절연체를 통해 short channel 효과를 제거하고 저전압 회로를 구현하는 방법, 짧은 채널 길이에서 접촉저항 증가에 따른 소자 성능 감퇴를 방지하기 위한 자기조립 박막도입, overlap capacitance를 최소화하기 위한 self-aligned gate 방법 등을 총체적으로 적용한 고성능 인쇄전자회로가 영국 캠브리지 대학교 H. Siringhaus 교수, 한발대 노용영 교수 연구팀에 의해 고안된 바 있다[8]. 이 경우, p-only 인버터로 제작되었음에도 불구하고 1.6MHz 정도의 높은 cut-off 주파수를 구현하였다.

#### IV. 시장동향 및 전망

니케이 일렉트로닉스에서 2007년 보고한 플라스틱 전자소자의 기술 개발 로드맵을(그림 10)에 나타내었다. 이동도 및 주파수 특성이 크게 향상되는 2020년



<자료>: Nikkei Electronics, 2007.

(그림 10) 플라스틱 전자소자 기술의 개발 로드맵

이후에는 인쇄전자회로를 바탕으로 한 플라스틱 CPU가 대부분의 a-Si 기반 소자를 대체할 것으로 예측하고 있다. 이 시점에서는 웨어러블 컴퓨터나 두루마리 컴퓨터의 실제 구현이 가능할 것으로 예상된다. 플라스틱 전자 산업 분야는 2007년부터 시장이 형성되어 점진적인 성장을 이루다가 기술이 성숙될 2013년에는 170억 달러, 2025년에는 2,759억 달러로 급격한 시장 성장이 예측되고 있다. 또한 iSuppli사의 2006년 예측 자료와 Nanomarkets사의 2007년 예측 자료에 의하면 플라스틱 디스플레이의 시장 규모는 2012년 약 300억 달러에 달하고 플라스틱 RFID가 45억 달러, 플라스틱 전원 장치가 17억 달러, 플라스틱 센서가 12억 달러, 조명 분야 6억 달러, 기타가 10억 달러로 예측되고 있다[9].

## V. 결론

인쇄전자 분야는 향후 15년 후에 Si 전자 산업 분야를 대체할 차세대 소재/소자 기술로 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다. 첫번째 상용화는 LCD 컬러 필터 공정 등 여러 산업분야에서 이미 일어나고 있으며, 조만간 OTFT 구동 소자를 채택한 플렉시블 전자 종이 시장이 선보일 것으로 예측되고, 향후 수 년 내에 인쇄 기술을 통해 제조된 플렉시블 디스플레이의 출현도 예상된다. 프린티드 RFID의 경우 유기반도체를 이용하여 PolyIC에서 간단한 형태의 RFID를 이미 시현하였으며 향후 생산가격의 저하를 좌우할 roll-to-roll 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 선진국들은 인쇄전자분야에 대한 원천 기술 확보를 위해 정부 주도 연구 개발을 현재 활발히 수행 중이다. 미국의 경우 인쇄 기술을 이용한 플렉시블 디스플레이가 2000년대 초 MIT 공대 10대 유망 기술로

선정된 이후 국방성의 지원 하에 플라스틱 전자 소자 상용화 센터를 운영하며 체계적으로 플렉시블 디스플레이 및 인쇄 전자소자 원천 기술 확보에 주력하고 있다. EU의 경우 인쇄전자소자 클러스터를 형성하여 유기 전자 소재/소자 관련 원천 기술을 확보중이며, 일본의 경우 2005년 유기반도체 소자의 기술적 발전 방안을 제안하고 NEDO 프로젝트 수행을 통해 유기 반도체 전자 소자 상용화 전략을 수립한 바 있다.

특히 인쇄전자회로 기술은 플렉시블한 광/전자기기를 구동시키기 위한 핵심 요소기술로서 인쇄전자 소자의 단부품 연구를 벗어나 이들 기술을 융합한 IT 부품에 대한 연구가 태동되고 있다. 플라스틱 유비쿼터스-IT 융합 부품 기술로는 초기 단계의 스마트카드가 1998년 Siemens와 Covion사에 의해 시연된 이래로, 2005년 Philips에 의하여 디스플레이, 메모리/logic, 전지가 집적된 visual smart card가 시연되었다. 그리고 최근 일본에서는 플라스틱 IT 융합 부품에 대한 concept generation을 시도하고 있다. 플라스틱 전자 소자 기반으로 차세대 플렉시블 스마트 IOP를 개발하고자 하는 준비가 ETRI에서 현재 진행중이고 이 기술은 DMB, WiBro 등 모바일 단말기에 초경량, 초박형의 큰 화면과 신기능 서비스를 가능하게 할 것이며, 이 밖에 wearable IT 기술 등 미래 IT 기술을 선도할 기술이다.

플라스틱 일렉트로닉스 기술은 전기, 전자, 반도체, 자동차, 항공 우주, 기계(정밀 부품) 등 다양한 산업에 혁신적 변화를 초래하여 국가 산업 발전 및 고부가가치화의 열쇠가 될 미래 유망 기술이다. 향후 고도 산업화될 미래 사회에서 인간 친화적인 특성을 바탕으로 사회적, 문화적 패러다임의 변화가 기대된다. 플라스틱 일렉트로닉스 관련 원천 기술 확보 및 핵심 부품 소재의 상용화에 대한 정부 주도의 체계적인 지원과 관심이 절실히 필요하다.

● 용어해설 ●

Self-Align Printing(SAP): 자기정렬(Self-Align) 방법에 의해 소재를 형성해야 하는 위치에만 정확히 인쇄되도록 하는 기술로서, 인쇄전자회로의 기생 정전용량을 줄이기 위한 게이트 전극 형성이나 마이크로미터 이하의 채널 길이를 인쇄 공정을 통해 제작하기 위해 사용됨

Cycloaddition Reaction: 대표적으로 butadiene(diene)의  $4\pi$  electron과 ethylene(dienophile)의  $2\pi$  electron이 4개의  $\sigma$  electron과 2개의  $\pi$  electron으로 바뀌는 유기합성 방법

약어 정리

AC	Alternating Current
AMLCD	Active Matrix Liquid Crystal Display
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
CNT	Carbon nanotube
DC	Direct Current
EPC	Electronic Product Code
IOP	Input Output Platform
OTFT	Organic Thin-Film Transistor
P3HT	Poly(3-hexylthiophene)
PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate)
ppm	parts per million
RC Delay	Resistance-Capacitance Time Delay
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
SAP	Self-align Printing
TCO	Transparent Conducting Oxide

참고 문헌

- [1] M.A.M. Leenen, V. Arning, H. Thiem, J. Steiger, and R. Anselmann, "Printable Electronics: Flexibility for the Future," *Phys. Status Solidi A*, 2009.
- [2] H. Sirringhaus et al., "Two-dimensional Charge Transport in Self-organized, High-mobility Conjugated Polymers," *Nature*, Vol.401, 1999, pp.685-688.
- [3] D.H. Lee et al., "A General Route to Printable High-Mobility Transparent Amorphous Oxide Semiconductors," *Adv. Mater.*, Vol.19, 2007, pp. 843-847.
- [4] A. Bashir et al., "High-Performance Zinc Oxide Transistors and Circuits Fabricated by Spray Pyrolysis in Ambient Atmosphere," *Adv. Mater.*, Vol.21, 2009, pp.2226-2231.
- [5] M. Kung'u, H. Lu, G. Malliaras, G.B. Blanchet, "Suppression of Metallic Conductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes by Cycloaddition Reactions," *Science*, Vol.323, 2009, pp.234-237.
- [6] X. Li, X. Wang, L. Zhang, S. Lee, and H. Dai, "Chemically Derived, Ultrasoft Graphene Nanoribbon Semiconductors," *Science*, Vol.319, 2008, pp.1229-1232.
- [7] K.-J. Baeg, D. Khim, D.-Y. Kim, S.-W. Jung, J. B. Koo, I.-K. You, H. Yan, A. Facchetti, and Y.-Y. Noh, "High Performance Inkjet-printed Top-gate Polymer Transistors and Complementary," *J. Poly. Sci.: Poly. Phys.*, 2010.
- [8] Y.-Y. Noh, "High Performance Inkjet Printed Polymer Transistors and Circuits," Plastic Electronics Asia, Taipei, Taiwan, June 9-11, 2009.
- [9] Lawrence Gasman, "The Other Flexibility: Flexible Electronics Markets Outside of the Display Industry," Flexible Displays & Microelectronics Conference & Exhibit, Phoenix, Arizona, USA, Feb. 5-8, 2007.