

유기 전자소자, OTFT

Organic Electronics, Organic Thin-Film Transistor

정보통신 미래기술 특집

목 차

- I . 서론
- II . RFID란?
- III . 유기 반도체 RFID Tag의 장점
- IV . 국내외 연구 동향
- V . 그래픽 프린팅 기법으로 RFID Tag를 연구하는 대표적 벤처 기업 현황
- VI . 플라스틱 RFID Tag의 예상 시장 규모
- VII . 결론

김성현 (S.H. Kim)	신기능정보소자팀 선임연구원
이정현 (J.H. Lee)	신기능정보소자팀 연구원
임상철 (S.C. Lim)	신기능정보소자팀 연수연구원
구재분 (J.B. Ku)	신기능정보소자팀 선임연구원
구찬희 (C.H. Ku)	신기능정보소자팀 연구원
성건용 (G.Y. Sung)	신기능정보소자팀 팀장
정태형 (T.H. Zyung)	미래기술연구본부 본부장

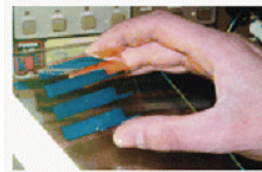
유기물이 반도체 성질을 가질 수 있다는 것이 밝혀지면서 많은 여러 가지 응용분야에 많은 연구가 진행되어 왔다. 유기 반도체는 무기 반도체와 다르게 적절한 용매에 녹는다는 장점이 있다. 이 장점을 활용해 소자 제작에 직접 인쇄법인 그래픽 인쇄 방식을 사용할 수 있다. 본 기고문에서는 유기 반도체의 여러 응용 분야 중 직접 인쇄법으로 제작한 유기 전계효과 트랜지스터(OTFT)를 중심으로 기술 발전 방향과 연구 동향, 대표적 벤처 기업 등에 관하여 기술하였다.

I. 서론

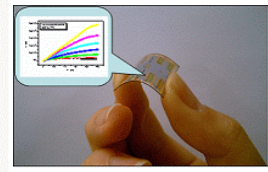
폴리머 전자 소자는 다음의 예에서 그 필요성을 생각할 수 있다. 슈퍼마켓에서 물건 값을 지불할 때 일일이 물건들을 계산대 위에 올려놓고 바코드를 읽게 하는 일련의 과정을 좀 더 편하게 고칠 순 없을까? 그냥 카트에 물건을 담은 채로 계산대 옆을 지나가면 지불해야 할 돈이 한 번에 계산되고 자신의 현금 카드에서 자동으로 지불이 된다면 얼마나 편할까? 사실 기술적으로 가능한 얘기지만, 경제적인 논리에 어긋나기 때문에 아직 시장에서 실현되지 않고 있을 뿐이다. 우리나라에서도 원격으로 교통비를 지불할 수 있는 교통 카드가 실용화 된 것을 생각해보면 쉽게 수궁이 간다. 그런데, 슈퍼마켓 물건에 일일이 그런 정보를 갖고 있는 칩을 달지 못하는 것은 결국 수치 타산이 맞질 않기 때문이다. 1998년 현재의 기술로는 칩 하나 당 가격이 500원 정도로 아직 비싸기 때문에 이런 기술이 생활 곳곳에서 쓰려면 몇 원 단위의 가격으로 칩을 심을 수 있어야 한다. 그렇게 하려면 칩의 모든 재료를 폴리머, 즉 고분자로 대체하고 제작 공정도 초저가 공정을 도입하는 작업이 필요하다.

과연 칩의 모든 요소들을 폴리머로 대체하는 것이 가능한가? 현재 다양한 종류의 유기물(고분자 포함) 반도체가 개발되어 있고, 또 지금 이 순간에도 개발되고 있다. 또한 유기물은 무기물과 달리 우리 필요에 맞는 다양한 종류의 신물질 개발이 용이하다는 장점이 있다. 또한 유기물이 전도체와 반도체 절연체의 모든 성질을 가지고 있으므로 궁극적으로는 모든 전자소자를 유기물만으로 제작하는 것이 가능한 것이다. 이러한 재료의 다양성이 이 기술의 가능성을 한층 더 넓혀 준다고 하겠다.

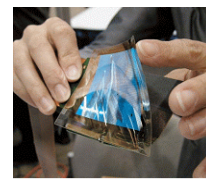
현재 응용 가능성이 점쳐지고 있는 유기 반도체 분야는(그림 1)~(그림 4)에 나타낸 것과 같이 유기 태양전지, 유기 전계효과 트랜지스터(OTFT), 유기 전기발광 소자(OLED), 유기 센서 등이 있다. 그리고 그림에는 표시하지 않았지만 최근 유기 반도체를 이용한 메모리 소자가 많이 연구되고 있다. 이 중



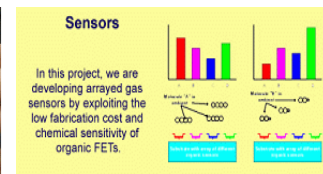
(그림 1) 유기태양 전지그림



(그림 2) OTFT



(그림 3) OLED



(그림 4) 유기 센서

OLED의 경우는 이미 시장에 진입하여 제한적이기는 하지만 제품이 출시되고 있으며, 다른 전자소자의 경우 실용화를 위한 연구 단계가 진행중이다.

고분자 전자소자의 경우, 기본적으로 어떠한 기능을 갖는 전자 소자를 구현하든지 간에 그 기능을 이룰 수 있게 하는 가장 중요한 핵심 부분은 트랜지스터인 것이 대부분이다. 트랜지스터가 개발된 이후 반도체 산업은 급속히 발전해 왔으며, 현재까지의 트랜지스터는 모두 무기물 반도체인 실리콘을 사용하였다고 하여도 무리가 없다. 그러나 반도체 성질을 가진 유기물로 트랜지스터를 제작하여 기존에 가장 많이 쓰이고 있는 비정질 실리콘 트랜지스터의 성능에 버금가는 트랜지스터가 제작될 수 있다는 것이 확인된 후 무기물 트랜지스터의 대안으로 유기 트랜지스터에 대한 관심이 한층 더 높아졌다[1]. 많은 전자소자 분야에서의 기술의 방향이 molecular electronics, plastic electronics 분야로 발전되어 가고 있어 가볍고, 얇으며, 내충격성이 좋은 플라스틱 기판 위에서의 소자 제작의 필요성이 점차 대두되고 있다. 따라서, 실리콘을 재료로 한 기존의 트랜지스터를 대체할 수 있는 플라스틱 전자 소자 기술의 확립은 매우 중요한 핵심 사항이다. 더구나 TFT-LCD, 유기 전기발광 디스플레이 등의 플라스틱을 기판으로 하는 플라스틱 디스플레이의 연구가 가속화되어 진행되고 있으며, 스마트 카드, 전자 종이, 착용 컴퓨터 등이 기본적으로 플라스틱 기판용

사용하므로 플라스틱 위에 트랜지스터를 용이하게 제작할 수 있는 모든 가능성의 핵심 중추에 플라스틱 전자 소자 기술이 자리 잡고 있으나, 개발은 상당히 미약한 실정이다. 따라서, 유기 박막 트랜지스터의 개발 기술은 위에 언급한 분야 외에 착용 컴퓨터 등 미래에 등장할 수 있는 기술 분야의 실현성을 크게 할 수 있는 매우 중요한 핵심 기술이 된다.

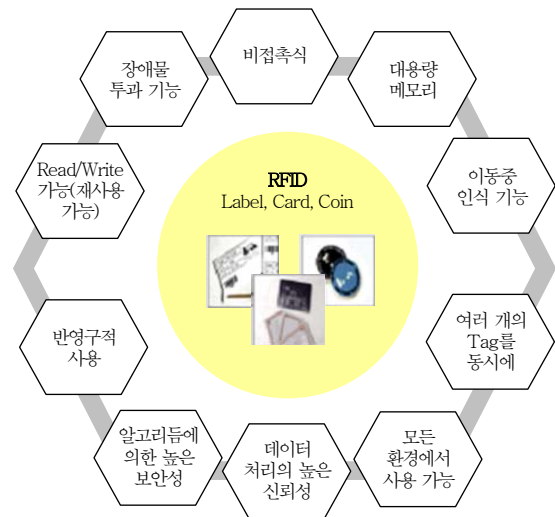
본 기고문에서는 유기 반도체 전자소자 중 전계 효과 트랜지스터를 이용한 RFID 제작 기술을 중심으로 기술하고자 한다. 전기 발광소자 이후 시장에 진입할 수 있는 차세대 전자소자로서의 가능성이 가장 강력하게 접혀지고 있으며, 미국과 유럽을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 초저가의 RFID tag 제작을 시도하는 벤처 기업들이 등장하면서 연구에 더욱 박차를 가하고 있다. 본 기고문을 계기로 국내에서도 유기 반도체 트랜지스터를 활용한 전자소자 제작에 더욱 많은 관심과 연구가 기울여지기를 바란다.

II. RFID란?

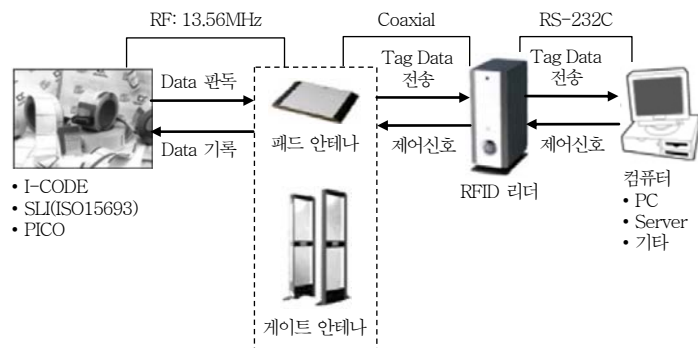
일반적으로 Radio Frequency Identification (RFID)라 함은 사람이나 물건을 일반적으로 125 kHz, 13.56MHz 또는 800~900MHz 정도의 주파수를 이용하여 특정지어 주는 것을 말한다. Tag 내에 마이크로칩이 내장되어 자기 tape 등보다 더 많은 정보를 내장하고 있다. RFID tag는 지난 20년 동안 입장료 수거, 정문 통과, 매표, 차량 제어 등에 응용되어 왔다. 최근 고도화된 사회 속에서 다양한 기능을 하는 소자의 필요성이 대두되었고, RFID tag의 필요성은 더 한층 강조되고 있다. RFID tag는 개인이 소지하면서 정보를 가지고 있는 RFID tag, 그리고 그 정보를 분석하는 RFID tag reader, 이들 둘 사이에 정보와 전원을 주고받게 하는 RFID tag antenna, 정보를 받아들이는 RFID tag station 등으

로 구성되어 있다. RFID tag의 특징은 (그림 5)에서 보는 바와 같이 우리 생활을 윤택하게 하는 다양한 기능이 포함되어 있다.

RFID tag는 우선 정보를 보유하고 있는 tag에서 정보를 안테나를 통하여 reader에게 전달하고, 전달된 정보는 컴퓨터를 통하여 분석하게 된다. 이 때 tag와 안테나 사이에 RF가 사용되어 무선으로 정보를 전달하게 된다. 또한 reader와 연결된 안테나를 통하여 tag에 RF를 이용하여 전원이 공급되므로 tag 내부에는 전원 소자를 갖추고 있을 필요가 없다 ((그림 6) 참조).



(그림 5) RFID Tag의 특징



안테나(용도에 따라 패드, 게이트 중 선택)

(그림 6) RFID Tag 시스템 구성

Ⅲ. 유기 반도체 RFID Tag의 장점

1. 기존 실리콘을 이용한 RFID Tag의 문제점

RFID tag 시스템 구축에 열을 올리고 있는 테스코 등 세계 주요 유통업체들은 영국 버밍햄에서 ‘리테일 솔루션스 2004’ 모임을 갖고 RFID tag 활성화와 관련해 기술적인 문제뿐만 아니라 RFID tag 태그가격 등 경제적인 문제도 해결해야 할 것이라고 파이낸셜타임스가 보도하였다. 현재 테스코, 월마트, 메트로 등은 RFID tag 도입에 적극 나서고 있는 상태로 내년까지 상품 공급업체들에게 박스에 태그를 붙이라고 요구하고 있다. 이들은 RFID tag의 경제적인 문제와 관련해 고가제품에 RFID tag 기술을 적용하면 별 문제가 없지만 저가의 상품에 적용하기에는 비용부담이 크다는 지적을 제기했다. 유통업체들은 RFID tag를 위한 태그를 붙이려면 5~10센트가 가장 적당하다고 분석하고 있다. 그러나 현재 태그가격은 50센트의 비용이 든다. 이에 따라 공급자들이 제품가격이 현격히 낮을 때 RFID tag를 위한 태그를 붙이려고 하지 않는다는 점이다. 게다가 현재 판매중인 제품에 RFID tag를 붙이게 되면 노동비용뿐만 아니라 애러가 많이 나올 수 있다는 위험도 있다.

이를 위하여 일본은 오는 2006년 중반까지 5엔(약 50원) 이하의 전자태그(RFID tag) 칩을 민관 공동으로 개발해 전세계 보급에 나서는 것을 골자로 한 ‘히비키 프로젝트’를 추진키로 했다. 일본 경제산업성 정보경제과 니이하라 히로아키 과장은 한국전자거래협회와 일본 전자상거래추진협의회(ECOM)가 공동 개최한 국제 e-비즈니스 포럼에서 ‘RFID tag 보급을 위한 일본의 전략’이란 주제 발표를 통해 이와 같이 밝혔다. 니이하라 과장은 “RFID tag를 보급·확산하기 위해서는 현재 개당 수십~수백 엔 하는 칩의 가격을 3~5엔으로 낮추는 것이 필요하다”며 “이렇게 개발된 칩은 국제표준으로 전세계에 보급할 계획”이라고 말했다. 5엔 이하의 RFID tag 칩

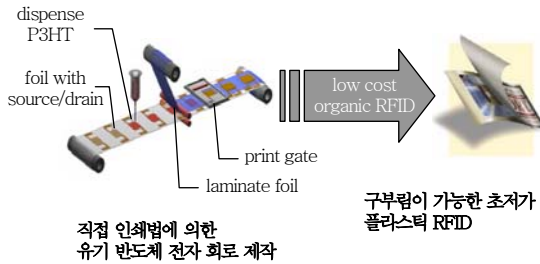
개발이 핵심인 히비키 프로젝트는 일본 경제산업성 주도로 RFID tag 기술개발업체와 의류·도서·물류 등 잠재 RFID tag 사용업체 등 100개사 가량이 컨소시엄으로 참가한다.

2. 유기 반도체의 장점과 초저가 Chipless RFID Tag 제작 가능성

유기 반도체의 대표적 특징은 반도체적인 성질을 띄고 있지만 기본적으로 유기물이라는 것이다. 유기 반도체도 다른 유기물(고분자 포함)처럼 용제에 녹고, 온도를 높이면 증발하고(일정한 정도까지, 그러나 무기물에 비해서는 상상할 수 없을 정도로), 구부러도 전기적 성질이 변하지 않고, 가벼우면서도 충격에 강하다는 장점이 있다. 이러한 특성을 이용하면 소자 제작에 큰 장점이 있다.

첫째, 유기 반도체는 상온이나 아주 낮은 온도(100℃ 이하)의 온도에서 잘 결정화되므로 성막 시기관의 온도를 높일 필요가 없다. 따라서 플라스틱과 같은 사용 최고 온도는 낮지만 구부림이 가능하고, 얇으면서도 충격에 강한 기판을 사용할 수 있다. 이러한 특징은 휴대전화 등과 같은 이동성이 강조되는 전자소자에 큰 장점이 있다. 또한 자동차 앞 유리나 기둥같은 곡면에 디스플레이나 센서 등 전자소자를 설치할 필요가 있을 때 아주 유용하다. 평면 상태에서 제작한 후 어느 곡면이든 필요한 곳에 손쉽게 설치할 수가 있다.

둘째, 고분자나 녹을 수 있도록 설계된 단분자 유기물의 경우 적절한 솔벤트에 녹는다는 장점이 있다. 고분자의 경우 솔벤트에 녹인 후 필요한 곳에도 포하고, 다시 솔벤트를 증발시켜 고체를 만들어도 원료 물질의 전기적 특성은 변하지 않는다. 이러한 점을 이용하여 다양한 방법으로 박막을 형성할 수 있다. 우선 솔벤트에 녹은 상태의 유기 반도체는 인쇄 공정에서의 잉크와 같다. 즉 유기 반도체 잉크인 셈이다. 따라서 유기 반도체 박막은 기존의 인쇄 공정을 그대로 사용할 수 있다. 즉 회전 도포(spin coating), 담그기(dipping), ink-jet 프린팅, off-set



(그림 7) Roll-to-Roll 공정에 의한 전자회로 제작 개념도

인쇄, 그라비아 인쇄, 플렌소 인쇄, 리소그래픽 인쇄, 실크 스크린 인쇄 등 어떤 종류의 인쇄 기법도 이용할 수 있다. 이런 방법은 (청정한) 대기 중에서 상온 공정이 가능하고, roll-to-roll 공정이 가능하기 때문에 초저가의 전자소자 제작이 가능한 것이다.

셋째, 유기물은 반도체뿐 아니라 도전성 고분자, 절연체(유전체) 등도 모두 폭넓게 존재하며, 또 필요에 따라 원하는 기능을 갖는 소재의 합성이 가능하기 때문에 소자 제작의 자유도가 아주 높다. 따라서 이러한 물질들을 모두 잉크 형태로 만들어 인쇄하듯이 전자 회로를 제작한다면 모든 인쇄물을 전자 소자화 할 수 있다(그림 7) 참조).

IV. 국내외 연구 동향

세계적으로 반도체 소자를 플라스틱 기판 위에 roll-to-roll 기법으로 제작하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 플라스틱 기판 롤 위에 회로를 직접 인쇄하는 이 새로운 기술은 마치 문서를 프린터로 출력하듯 전자 기기를 대량으로 '프린트' 할 수 있다. 태양전지, 디스플레이, 센서, RFID tag를 비롯해서 다양한 유형의 전자 기기를 플라스틱 기판 위에 제작하여 구부린 상태에서도 사용이 가능한 새로운 기술들이다. 프린팅 기술은 실제 활용을 눈앞에 두고 있으며, 2004~2005년에 몇몇 양산 애플리케이션에 사용되기 시작할 것이다. 일본 후지전기(Fuji Electric Group)는 구성요소 프린팅 기술을 태양전지의 양산에, 미국의 롤트로닉스(Rolltronics)는 증

전지 양산에 각각 적용할 계획이다. 일본 다이 니폰 프린팅(Dai Nippon Printing)은 포스터를 대체할 수 있는 단일 매트릭스 유기 EL(Organic Electroluminescent) 제조에[2], 그리고 일본 ULVAC 같은 기업들은 PCB의 소량 생산에 각각 이 기술을 활용할 계획이다.

이 밖에 많은 제조업체들이 2005년 이후 활용을 목표로 프린팅 기술을 개발하고 있다. 예컨대 TRADIM은 LCD 패널용 프린팅 기술 개발을 위해 설립되었으며, 2005년 상용 제품에 기술을 적용할 예정이다. 일본 세이코 엡손의 전폭적인 지원을 받고 있는 수와-미나미 잉크젯 오픈 연구소(Suwa-Minami Ink-Jet Open Laboratory)도 유기 EL 패널의 프린팅 기술을 위한 연구를 진행하고 있다. 이들 제조업체들은 1MHz 이하의 속도로 동작하는 비교적 저속의 전자 기기를 겨냥하고 있다. 핵심 구성요소 기술이 얼마나 빠르게 발전하느냐에 달라지겠지만 약 2010년경에는 애플리케이션 영역이 메모리를 비롯한 몇몇 IC 부문으로까지 확대될 수 있을 것으로 예상된다. 이 업체들이 제조하고자 하는 전자 기기는 기존 기술로는 제작이 불가능한 것들이다. 종전의 방식을 활용하는 경우보다 얇고 가벼우며, 보다 손쉽게 구부릴 수 있는 기기 등을 예로 들 수 있다.

기존의 제조 방식이 직면하고 있는 수많은 문제점들을 프린팅 기술로 해결할 수 있는 이유는 종전과는 완전히 다른 소재의 사용 때문이다. 단위 면적당 제조원가는 기본적으로 새로운 제조 방식에 의해 낮출 수 있다. 이에 반해 재료를 변경하면 제품을 더 가볍고 얇게 만들 수 있다. 현재 제조현장에서는 기술상의 두 가지 중대한 혁명이 이뤄지고 있다. 하나는 회로 패턴의 형성에 활용되는 방법과 관련한 것인데, 반도체와 금속을 이용하여 회로 패턴을 기판에 직접 프린트한다. 다른 하나는 기판의 처리 방식이다. 기판 롤은 길이가 수백 미터에 이르며, 멀티 프로세스가 동시에 진행된다. 롤 대 롤(roll-to-roll) 방식이라 불리는 이러한 기술은 제조원가 절감에 극적인 효과를 나타낸다[3].

전자 기기 제조에서 전통적인 방식은 여러 복잡한 프로세스들을 이용하여 회로의 패턴을 형성한다. 우선 반도체나 금속 필름이 베이스로서 기판에 형성된다. 회로 영역이 결정되면 나머지 부분은 식각된다. 이때 코팅 및 에칭 프로세스는 진공상태에서 실행되어야 하는데 부피가 크고 고가인 진공 펌프는 랩의 원가를 높이는 주요인이 된다.

직접 프린트 기술은 기존 방식의 이러한 문제점들을 해결할 수 있다. 회로 패턴이 종이에 직접 그려거나, 프린팅 플레이트에서 이미지를 가져오는 방식으로 그려지기 때문에, 기존 방식에서 요구되는 3단계 프로세스를 단일 프로세스로 끝마칠 수 있다. 또한 프로세스를 표준 대기압 내에서 실행할 수 있기 때문에 진공 펌프도 필요가 없게 된다. 또한 기존 방식은 기판(웨이퍼) 처리에 과다한 경비가 지출된다는 문제를 갖고 있다. 웨이퍼를 개별적으로 처리하기 때문에 다른 프로세스로 웨이퍼를 이송할 때에도 개별적으로 운반해 줘야 한다. 이에 따른 필수 로더(loader)와 언로더(unloader)로 인해 프로세싱 시스템의 규모도 커질 수 밖에 없다. 하지만 롤 대 롤 방식을 활용하면 기판이 프로세싱 시스템을 연속적으로 지나게 되어 프로세스 장비도 연속 라인으로 구성할 수 있기 때문에 운반에 필요한 시간과 장애, 장비를 크게 줄일 수 있다.

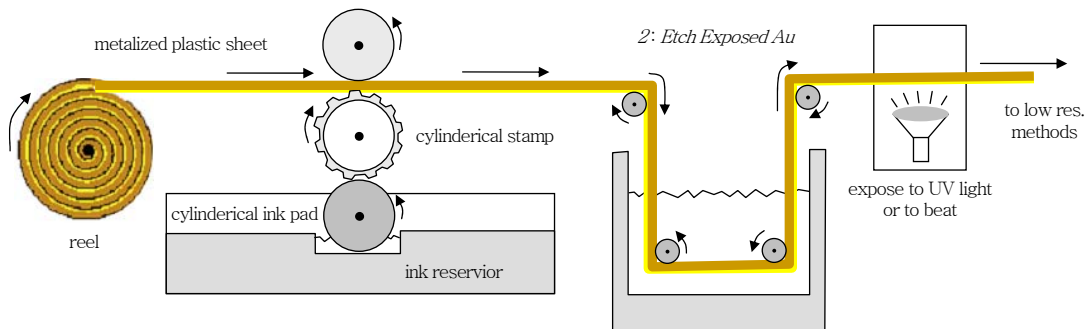
직접 프린트와 롤 대 롤 프로세싱을 결합하면 기존 방식보다 장비 투자는 현저히 절감하는 대신 생산성은 높일 수 있다. 이는 무엇보다 단위 면적 당 제조원가의 상당한 하락에 의한 것이다. 이러한 효

과는 기기의 종류와 생산 규모에 따라 다르겠지만 대체적으로 100분의 1로 원가를 낮출 수 있다. 시험 계산 결과에 따르면, 생산 규모가 동일하다고 가정할 때 프린팅 기술은 기존 기술을 활용했을 때 드는 비용의 약 3분의 1 수준으로 PCB를 제조할 수 있다. LCD 패널과 IC를 단순히 프린팅해서 생산해 낼 수 있다면, 제조원가를 100분의 1, 심지어는 1,000분의 1로 낮출 수 있을 것으로 많은 업계 분석가들은 믿고 있다. 동경 대학교는 프린트된 압력 센서를 평방미터 당 1,000원대에서 제조할 수 있을 것으로 평가했다(그림 8) 참조).

프린팅 전자 기기들은 반도체, 인터커넥트, 기판에 사용하는 것과는 완전히 다른 소재를 요구할 것이다. 기판으로는 플라스틱이 이용될 것이며, 새로운 유기 반도체나 순금속 분자는 회로 형성에 사용될 것이다. 신형 디바이스의 두께, 무게, 유연성은 주로 이러한 소재의 특성에 의한 것이다.

특히 플라스틱 기판의 효과가 크다. 실리콘 웨이퍼나 유리 기판과 비교할 때 플라스틱 기판은 두께가 10분의 1에 불과하며, 비중은 절반에 불과하다. 바로 이러한 속성들로 인해 보다 가볍고 얇은 전자 기기의 제작이 가능하다. 유기 반도체를 플라스틱 기판과 함께 활용하면, 구부릴 수 있는 전자 기기의 제조도 가능해진다. 이러한 기계적 유연성은 실리콘으로 구성된 제품에서는 찾아볼 수 없다.

새로운 기술에 희망을 걸고 있는 제조업체들은 특히 신속한 기술 개발 속도에 만족해하고 있다. 재료 기술과 제조 기술이 모두 최근 들어 중대한 발전



(그림 8) 직접 인쇄법과 Roll-to-Roll 공정에 의한 전자소자 제작 공정 개념도

을 나타내고 있는데 특히 제조 기술의 발전이 두드러진다. 디스플레이, 태양전지, RFID tag를 생산하는 데 필요한 정밀성을 지닌 직접 프린트 기술은 거의 완성 단계에 접어들었다. 이와 같은 전자 기기에서 요구되는 최소 배선폭은 트랜지스터의 경우 약 5 마이크로, 라인의 경우는 약 20마이크론이다. 유기 반도체나 금속 분자를 직접 프린트하는 데에는 대체적으로 4가지 유형이 있으며, 이들 모두 이러한 요구를 충족시키고 있다.

플라스틱 기판에 유기 트랜지스터를 형성하기 위해서는 코팅되는 기판 소재의 표면에서 스트레스가 반드시 제거되어야 한다. 이는 여러 소재가 전극이나 반도체 등에 코팅되기 때문이다. 스트레스가 존재한다면 하나의 레이어가 프린트될 때 트랜지스터 품질을 떨어뜨리게 된다. 하지만 이러한 특성을 지닌 2가지 방식, 즉 (1) 잉크젯 프린팅과 (2) 스크린 또는 그라비아(gravure) 프린팅 기술이 이미 존재하고 있다. 레이어 사이의 정렬과 관련된 문제점들이 남아 있지만 업계 대부분의 관련자들은 이를 대수롭지 않게 여기고 있다. 이 중에서 잉크젯 프린팅은 마스터를 필요로 하지 않고 CAD 데이터로부터의 패턴을 직접 프린팅 할 수 있기 때문에, 다양한 유형의 소규모 생산에 가장 적합하다. 패턴 유형이 적은 양산의 경우는 스크린 또는 그라비아 프린팅이 보다 유리하다. 마스터를 만들기 위해서는 시간이 걸리지만 모든 패턴을 배치(batch) 형식으로 프린팅 할 수 있기 때문에 생산성이 뛰어나다.

10마이크론 이하의 배선폭을 프린팅 할 수 있는 기술도 출현했다. 임프린팅(imprinting)이라 불리는 이 기술은 다이를 이용해서 패턴을 만든다. 하지만 프로세스가 기판에 스트레스를 주기 때문에 트랜지스터 형성을 위해서는 적절한 선택이 되지 않지만, PCB나 전자 기기 인터커넥트 제작에는 적합해 보인다. 임프린팅 기술은 마스터와 거의 동일한 패턴을 만들어내는데 바로 이러한 이유에서 많은 엔지니어들은 10마이크론 이하의 배선폭에 대해서도 이를 상당히 손쉽게 이용할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 제조 장비는 이미 시장에서 구매할 수 있으며, 최소 배선폭은 70nm인 것으로 알려져 있다.

기판에 코팅되는 유기 반도체와 각종 금속을 포함하는 재료 기술도 빠르게 진보하고 있지만 아직 제조 기술의 발전 수준만큼은 아니다. 궁극적으로 프린팅 기술을 통한 전자 기기 생산이 가능한지 여부를 결정하는 것은 재료 기술의 발전이다.

재료와 관련하여 눈에 띄는 사항은 고주파 트랜지스터 구현에 이용할 수 있는 유기 반도체를 개발하는 것이다. 유기 반도체는 다이오드, 저항, 커패시터, 그리고 플라스틱 기판에 디스크리트 컴포넌트를 형성하는 데 이미 사용되고 있다. 하지만 이러한 유기 반도체의 낮은 작동 주파수 때문에 제작된 회로가 작동하지 않는 경우가 종종 발생하기도 한다(그림 2) 참조. 최근의 직접 프린트 기술은 유기 반도체를 이용해서 약 100kHz의 작동 주파수를 구현할 수 있다. 애플리케이션이 무엇이냐에 따라 달라지기가 하겠지만 이러한 결과는 최소 10배 이상 빨라져야 할 것이다.

2000년도에 Bell Lab에서 CMOS를 기반으로 한 유기 반도체 전자회로를 발표하였다[4],[5]. 기존의 실리콘 전자소자는 n-형 트랜지스터와 p-형 트랜지스터를 모두 사용하여 회로를 제작하는 complementary integrated circuit을 이용하여 회로를 제작하고 있다. 이는 p-형이나 n-형만 사용하는 전자 회로보다 속도도 빠르고 회로도 간단하여 더 효율적이기 때문이다. 그러나 유기 반도체의 경우 n-형 유기 반도체는 공기 중에 안정하지 않고 전하 이동도가 p-형에 비해 많이 낮아 CMOS 기반의 전자 회로 제작에 어려움이 많았다. 그러나 공기 중에 안정한 n-형 유기 반도체의 등장으로 이러한 일이 가능해졌다. Bell Lab.의 A. Dodabalapur Group은 p-형 반도체로 *a*-sexithipene(*a*-6T)을, n-형 반도체로 공기 중에 안정한 hexadecafluorocopperphthalocyanine(F-CuPc)를 사용하여 CMOS 기반의 48-stage shift register를 제작하였다. 864개의 트랜지스터를 사용하여 약 1kHz에서 작동하는 소자를 훌륭히 구현하였다. 아직 n-형 반도체의 전하 이동도가 p-형에 많이 미치지 못하고, 또 F-CuPc의 경우 증착 온도가 150~250°C로 높아 개선

이 필요하지만 기존의 방법을 뛰어넘는 새로운 지평을 연 기술이라 할 수 있다.

2002년 독일 Siemens의 W. Fix는 P3HT를 이용하여 아주 빠른 ring-oscillator를 제작하였다[6]. 100kHz의 속도에 propagation delay가 0.7 μ s에 불과한 소자를 제작하였다. 고분자 소자를 이용한 소자라는 것을 감안하면 대단한 속도라 할 것이다. 단위 소자의 성능은 0.02cm²/Vs이고, L=5 μ m, W=2mm의 크기를 갖는 소자를 이용하였다.

2003년 독일 Infineon Technology의 Halik은 p-MOS 소자를 선보였다[7],[8]. 단위 소자의 성능은 0.5cm²/Vs이고, 유리 기판 위에 inverter와 ring-oscillator를 제작하였다. α,α' -didecylsexti-thiophene을 유기 반도체로 사용하고 cross-linked PVP를 유전체로 사용하여 propagation delay 30 μ s 성능을 구현하였다. 이는 Bell Lab.에서 제작한 CMOS에 비해 3배 정도 느린 성능이나 p-MOS란 점을 감안하면 대단한 결과라는 것을 알 수 있다. 현실적으로 유기 반도체는 p-형이 안정하고 성능도 우수하므로 주로 p-MOS를 사용하게 된다.

미국의 3M은 약 1MHz로 운용되는 유기 트랜지스터를 지난 2003년 12월에 발표했다[9]. 만약 이러한 성과가 합리적으로 성취된다면 비정질 실리콘 기반 능동형 매트릭스 LCD 패널, 유기 EL 패널, 전자 종이 그리고 125~530kHz 주파수 대역에서 운영되는 실리콘 기판에 RFID 태그의 활용에 이르기까지 애플리케이션의 범위는 크게 확장될 것이다. 문제는 이러한 유기 트랜지스터들이 진공 상태에서 형성된 유기 반도체로 제조되고 있으며, 직접 프린팅을 이용할 수 없다는 점이다. 유기 반도체가 직접 프린팅 기술로 이러한 성능을 구현하는 것이 불가능한 것은 아니다. 트랜지스터 작동 주파수의 지표인 유기 반도체의 캐리어 이동성은 지난 5년 동안 100팩터까지 늘어났으며, 이러한 속도가 지속된다면 직접 프린트는 약 2005년경 실험실에서 1MHz 한계를 뛰어넘을 수 있을 것이다.

2004년 미국 UC Berkeley의 Steven은 RFID tag를 위한 유기 반도체 트랜지스터 연구 결과를 MRS 봄 학회에서 발표하였다[10]. 가장 널리 알려

진 P3HT나 F8T2의 경우 전하이동도가 0.01cm²/Vs 정도로 낮고 교류장 속에서의 특성 연구도 되어 있지 않다. 본 연구팀이 이전에 개발한 solution processable pentacene을 이용하여 전하이동도 0.02cm²/Vs를 만들었고, RFID tag에 적합한 성능을 발현하였다. 소자 제작 방법으로는 ink-jet 프린팅법을 이용하였다. 최적의 조건으로부터 1MHz의 속도를 구현하였다.

2005년 미국 San Diego에서 열린 SPIE 2005에서 독일의 벤처 회사인 PolyIC에서 135kHz에서 동작하는 직접 인쇄법으로 제작된 RFID tag를 시연하였다[11]. 이 회사는 인쇄전문회사인 Kulz와 전자회사인 Siemens가 합작하여 설립한 회사로 두 회사의 성격상 직접 인쇄를 기반으로 한 전자 소자 제작을 목표로 한다. 여기서 전원 회로의 경우 13.56MHz급 소자까지 제작했다고 발표하였다.

이러한 활발한 국외의 연구 결과와는 달리 국내에서는 다소 떨어지는 연구 결과를 보이고 있다. 2005년 동아대학교에서는 OLED 어레이를 OTFT를 이용하여 구동에 관하여 발표하였다[12]. 기본적으로 OLED를 능동구동하기 위해서는 최소 두 개의 트랜지스터와 하나의 커패시터가 필요한데, 여기서는 하나의 트랜지스터만을 이용하여 수동구동에 해당하지만, OTFT로 OLED 어레이를 구현한 예는 종전에 없었으므로 하나의 이정표가 된다고 할 수 있다. 이외 inverter나 ring-oscillator 등의 구현도 연구가 진행중이다. 2005년 ETRI에서는 유기 반도체로는 최고 gain을 보이는 inverter를 제작하였다. 이를 기반으로 ring-oscillator를 포함하는 기타 전자회로를 제작하기 위한 노력이 진행중이며, RFID tag를 목표로 연구를 진행중이나 국내 전체로는 연구 정도가 미약한 형편이다.

V. 그래픽 프린팅 기법으로 RFID Tag를 연구하는 대표적 벤처 기업 현황

유기 반도체를 이용하여 RFID tag를 연구하고

있는 대표적 벤처 기업으로는 Plastic Logic, OrganicID, Precisia LLC(Flint Ink, Corp.), PolyIC 등이 있다. 이들은 모두 그래픽 프린팅 기법에 의한 초저가 RFID tag 개발에 회사의 사활을 걸고 있다. 각 기업에서 연구하는 내용과 기업에 관한 개요는 다음과 같다.

1. Plastic Logic 사

• 설립

2000년도에 Cavendish Lab.에서 spin off 한 기업으로 전자소자와 프린팅 기법을 통합하는 것을 기술적 목표로 설립되었다. 10년 이상의 기술력을 바탕으로 설립되었으며, 대표적 실험실은 Cambridge Science Park 내에 위치하고, 회사는 여러 벤처 캐피탈이나 투자자로부터 1700만 달러 이상을 투자 받았다. 최근 €24 Mn NAIMO Project(EU에서 주로 자금을 대어 구부림이 가능한 전자 종이에서 RFID tag, 센서까지 연구를 수행하는 연구 과제)의 대표 연구 기관이 되었다.

• 대표적 연구자

- Professor Sir Richard Friend FRS(Chief Scientist)

Friend 교수는 University of Cambridge의 물리과 교수로 Optoelectronics Group in the Cavendish Laboratory의 leader로 재직하고 있다. 그는 organic polymers and electronic properties of molecular semiconductors에 관하여 선구적인 연구를 수행하였다. Cambridge-based Interdisciplinary Research Collaboration(IRC) on Nanotechnology의 설립자 중 한 명이며, Cambridge Display Technology(CDT)의 공동 설립자이다.

- Dr Henning Sirringhaus(VP Research)

Dr Sirringhaus는 Cambridge University's Cavendish Laboratory의 leader 중 한 명이며, Professor Friend와는 1997년부터 일해오고 있다. 그는 Institute of Solid State Physics of ETH

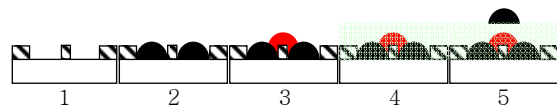
Zurich에서 박사 학위를 받고 Princeton에서 Post. Doc.을 하였다. 70여 편의 논문과 20여 편의 특허를 보유하고 있다.

• 대표적 공동 연구 기관

University of Cambridge, The Dow Chemical Company, Seiko Epson Corporation, Cambridge Display Technology 외 20여 곳

• 연구 내용

주로 ink-jet을 이용한 유기 반도체 트랜지스터 소자 및 이를 이용한 전자 회로를 제작하며, 연구는 주로 디스플레이의 하판제조와 RFID tag의 전자회로 방향으로 진행되고 있다. RFID tag는 10억 달러 시장이 현재 형성되어 있으며, 2015년에는 240억 달러 시장이 예측되고 있다(자료: IdTechEx). 이런 잠재력이 큰 시장의 선두 진입을 위해 적극적 노력을 경주하고 있다(그림 9) 참조.



1. 격벽 형성
2. Source Drain 전극 형성
3. 유기 반도체 형성
4. 유전체 형성
5. 게이트 전극 형성

(그림 9) Ink-jet을 이용하여 유기 반도체 트랜지스터를 제작하는 공정 개략도

• 연구 성과

안정적 소자 성능은 $10^{-2} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 을 얻고 있으며, 최고치는 $10^{-1} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 정도 관찰되고 있다.

2. OrganicID 사

• 설립

OrganicID는 2003년 12월에 설립되었으며, 유기 전자소자 연구/제작 분야에 빠르게 진입하고 있는 회사이다. 이 회사는 유기 전자소자, 직접 인쇄 공정 개발, RFID tag circuit design 등을 연구하고 있으며, 산업화를 위한 연구를 진행하고 있다.

• 대표적 연구자

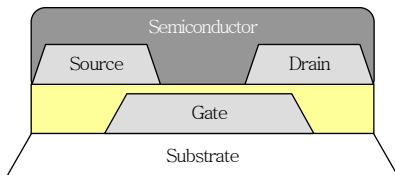
- Chief Scientist - Ananth Dodabalapur, Ph. D
 Dr. Dodabalapur는 OrganicID의 공동 창업자이며, 2001년부터 University of Texas at Austin의 전자 및 컴퓨터 공학과 교수로 재직하고 있다. 이 대학교에서 유기 반도체 물질, 공정, 센서 등에 관심을 가지고 연구하고 있다. 이전에 Bell Lab.에 근무하였으며, 90여 편이 넘는 논문과 30여 개의 특허를 보유하고 있다. 그의 유기 전자소자에 관한 연구는 2001년 Science 잡지에 의해 10대 혁신적 연구 성과로 선정되기도 하였다.

• 대표적 공동 연구 기관

University of Texas at Austin

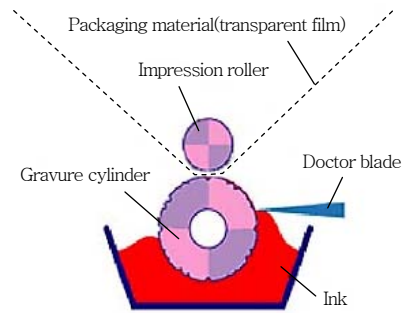
• 연구 내용

유기 반도체 트랜지스터를 플라스틱 기판 위에 제작하고, 이를 통하여 RFID tag를 제작하는 것을 목표로 한다. 전도체, 반도체, 유전체 모두 직접 인쇄방법을 통해 제작하여 초저가의 플라스틱 전자 소자를 제작하는 것을 목표로 한다. 소자 구조는 (그림 10)에 제시하였다.

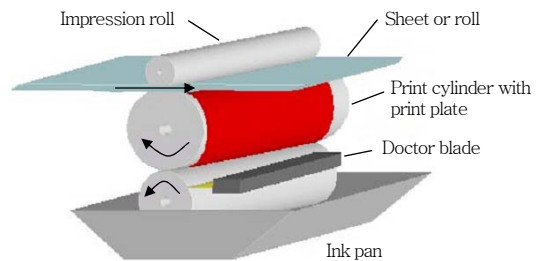


(그림 10) OrganicID에서 제작하는 유기 트랜지스터의 개략도

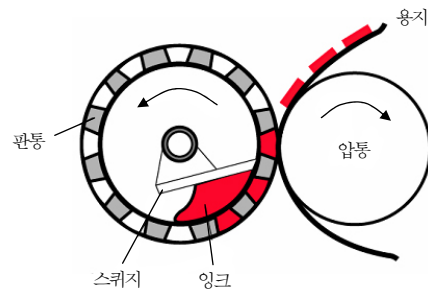
인쇄 방법으로는 gravure printing, flexo printing, screen printing 등의 방법을 사용한다. Gravure 인쇄는 실린더의 오목 들어간 부분에 잉크를 채우고 여분의 잉크는 Dr. blade로 제거하여 원하는 기판을 다른 앞착 실린더 사이에 끼워 전사하는 방법이고, flexo 인쇄는 반대로 볼록 튀어 나온 곳에 잉크를 묻혀 전사하는 방법이다. Screen 프린트는 이와는 다르게 구멍이 뚫린 스크린 사이로 잉크를 흘려 원하는 패턴을 얻는 방법이다. 이들 방법은 모



(그림 11) Gravure Printing



(그림 12) Flexo Printing



(그림 13) Screen Printing

두 그림을 인쇄하는 방법으로 찍혀지고 있으며, 이때 쓰이는 잉크의 특징이 유기 반도체의 특징과 유사해 유기 반도체 소자도 이런 방법을 사용하여 초저가로 제작할 수 있는 것이다. 각 방법에 관하여 개략도로 설명하였다(그림 11)~(그림 13) 참조.

3. Precisia LLC 사

• 설립

Precisia LLC는 세계에서 가장 큰 개인 소유의

잉크 생산업체인 Flint Ink Corporation의 종속기관이다. Flint Ink는 세계적으로 100개 이상의 시설이 있고, 약 4,600명 이상의 직원이 있으며, 한 해 판매량은 14억 달러 정도이다. Precisia는 low-cost printed electronics(RFID tag)와 그에 필요한 잉크를 연구/생산하는 기업이다. Precisia는 주로 RFID tag에 사용되는 안테나를 전도성 잉크를 사용하여 기존의 인쇄 방식으로 값싸게 제작하는 것을 목적으로 설립되었다. 생산하는 제품은 fully-enabled RFID tag devices, essential materials for RFID tag, 그리고 smart/active packaging, printed electronics, lighting and displays를 포함한 다른 printed electronics applications 등이다.

• 연구 내용

주로 전도성 잉크를 중심으로 RFID tag를 위한 인쇄 기법, 잉크 개발, 또한 이를 바탕으로 다른 전자회로 기판 제작을 연구 내용으로 한다.

4. PolyIC 사

• 설립

PolyIC는 2003년 11월 인쇄 가능한 전자소자를 통한 전자 혁명을 이루기 위하여 프린팅 전문 기업

인 KURZ와 전산업의 선두 주자인 Siemens가 합작하여 설립하였다. PolyIC는 다양한 응용성을 위하여 초저가의 전자 소자 개발을 설립 목적으로 한다. PolyIC는 (그림 14)처럼 프린트를 통한 전자소자 제작과 이를 통한 “electronics everywhere” 구현을 목적으로 한다.

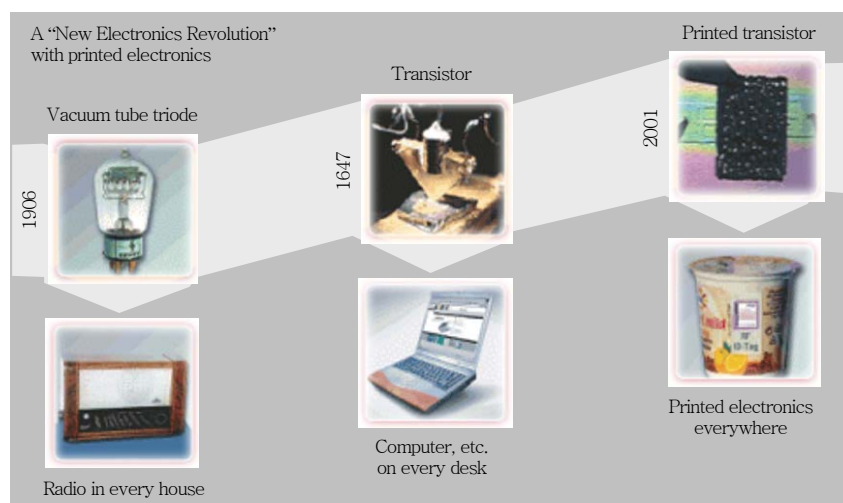
• 연구 목표

목표 달성을 위하여 폴리머 전자 소자는 전통적인 clean room에서 제작한다. 그러나 고분자 전자 소자의 장점을 살리려면 새롭고, 빠르고, 값싼 제작 방법을 찾아야 한다. 따라서 이 회사의 연구 목표는 전자소자를 현재의 신문 가격 정도에 만드는 것이다.

VI. 플라스틱 RFID Tag의 예상 시장 규모

• OrganicID(www.organicID.com)의 예측

현재 주요 RFID tag 회사들이 연간 판매하는 RFID tag의 경우 수천억 개 이상이다. 이들은 모두 전통적인 실리콘 기술에 의해 만들어진다. 이들의 단가는 0.3~1달러 정도이다. 따라서 시장 규모는 현재 연간 약 천억 달러 정도이다. 현재 시장에서는



(그림 14) 전자 소자의 발전 개념도

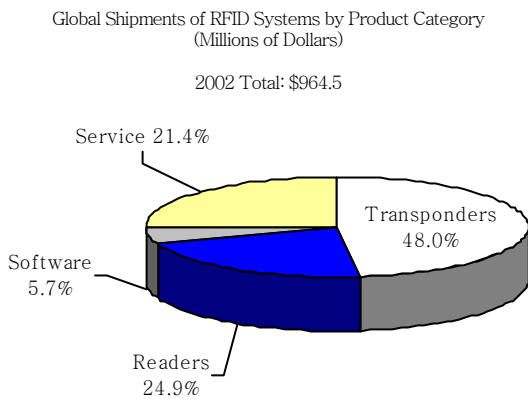
바코드를 대체할 RFID tag를 원하고 있으며, 단가는 수 센트 정도를 요구하고 있다. 그러나 이런 기술이 실현될 경우 제품 포장지의 바코드가 모두 organic RFID tag로 바뀔 것이 예상되므로, 이런 경우 시장 규모는 오히려 늘어날 것으로 예상된다.

• Computerworld 잡지의 예측

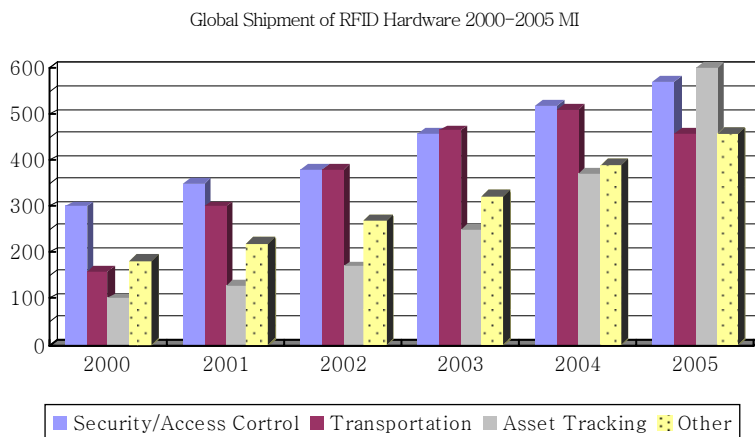
현재 RFID tag 시장 규모는 약 10억 달러 정도이다. 2008년에는 30억 달러 정도로 시장이 확대될 전망이다(2004년 5월 10일).

• Global Information, Inc.의 예측

2002년 시장규모 약 10억 달러 정도이다(www.



(그림 15) RFID Tag 시장의 구조



<자료>: Venture Development Corporation

(그림 16) 용도별 RFID Tag 시장 규모

the-inforshop.com). RFID tag 시장 구조는 (그림 15)에 나타내었다.

• Venture Development Cor.의 예측

2006년 시장 규모는 약 36억 달러이고, 연평균 성장률 약 33%이다(그림 16) 참조).

Ⅶ. 결론

반도체 성질을 띠는 유기물을 이용한 소자들이 개발되면서 유기 반도체를 이용한 박막 트랜지스터의 응용 분야는 그 사용 가능 범위를 한층 더 넓혀가고 있다. RFID tag는 개인신분증, 전자 지갑이나 은행업무 등의 금융업무, 전자주민카드 등의 종합 정보 저장기능, 건강관리, 전화카드, 소매상들의 고객관리, 많은 물동량을 취급해야 하는 곳에서의 정보처리 등 무궁무진한 용도가 있는 것으로 현재 매년 10억 개 이상이 생산되고 있을 정도로 폭발적인 수요를 보이고 있으며 앞으로 모든 컴퓨터에는 스마트카드 판독기(reader)가 장착될 것이라는 예측도 나오고 있다.

현재 사용중인 스마트 카드는 플라스틱 카드 위에 따로 제작된 컴퓨터 칩을 붙여 사용하도록 되어 있어, 컴퓨터 칩과 플라스틱 카드와의 접합에 많은 비용이 소용되고 있다. 게다가 컴퓨터 칩의 경직성 때문에 구부림이 불가능해 소지 시 부주의에 의해 파손의 우려가 있다. 현재 착용 컴퓨터는 head mount, 전자 수첩, 전자 펜, 손목형 소형 컴퓨터 등 고정형의 형태로 되어 있지만, 초경량의 플라스틱 트랜지스터가 개발된다면 언제 어디서 누구에게나 대량의 정보통신을 가능하게 할 수 있는 무정형의 입는 형태의 컴퓨터 개발에 한 발짝 더 가까이 갈 수 있게 될 것이다. 이러

한 목적을 위해서 유기 반도체를 이용한 트랜지스터 개발이 가장 가능성 있는 접근 방법이며 다양한 범위에 새로운 응용 분야로 한층 더 확대될 수 있다.

또한 그래픽 인쇄 기법의 사용이 가능해지면 초대면적 트랜지스터 어레이 제작이 가능해지고, 이를 비슷한 성질의 유기 반도체를 사용하는 센서 어레이와 결합하여 사용한다면 기능성 스마트 벽지 등도 구현할 수 있다. 이 벽지는 각종 센서 어레이로 구성되어 있어 생활환경을 모든 공간에서 실시간으로 감지하여 인간 삶의 질을 향상시키는 데 도움을 줄 것이다. 다소 먼 이야기일지 모르지만 본 기술이 향후 미래 인간의 삶을 바꾸어주는 열쇠가 되는 기술임에는 틀림이 없다. 그리고 그러한 응용을 위하여 선진 각국의 유수의 연구 기관에서 사활을 걸고 연구에 매진하고 있는 것이다. 또한, 본 기술은 여타 전자소자를 제작하는 기초 원천 연구가 되므로 구부림이 가능한 전자소자, 일회용 전자소자, 유기 반도체 센서 어레이, 유기 반도체 태양 전지 등에 응용될 수 있다.

유기 반도체와 직접 인쇄법의 만남은 이전 전통적 방법이 되어버린 실리콘을 기반으로 한 전자소자 제작에서 벗어나 대면적, 초저가 반도체 소자 제작의 신기원을 열고 있다. 우리 앞에 펼쳐진 새로운 기술 세계와 이가 넓혀줄 광대한 시장을 우리가 우리 기술로 선점하려면 많은 연구자들의 네트워크를 형성한 연구와 정부의 적극적인 지원이 필수적이라 하겠다.

약어 정리

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
ECOM	Electronic Commerce Promotion Council of Japan
EL	Electroluminescence
F8T2	Poly(9,9-dioctylfluorene-co-bithiophene)
IC	Integrated Circuit
LCD	Liquid Crystal Display
NAIMO	Nanoscale integrated processing of self-

	organising multifunctional organic materials
OLED	Organic Light Emitting Diode
OTFT	Organic Thin-Film Transistor
P3HT	Poly(3-hexylthiophene)
PCB	Printed Circuit Boards
PVP	Poly-4-vinylphenol
RFID	Radio Frequency Identification
SPIE	Society of Photo-optical Instrumentation Engineers
TFT	Thin-Film Transistor
TRADIM	Technology Research Association for Advanced Display Materials

참고 문헌

- [1] Y.Y. Lin, D.J. Gundlach, S.F. Nelson, and T.N. Jacson, "Pentacene-Based Organic Thin-Film Transistor," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.44, No.8, 1997, pp.1325-1331.
- [2] M. Kadowaki, "Flexible OLED: Share the Future, Design Your Business," Dai Nippon Printing Co., Ltd., *Flexible Display & Electron. Conf.*, 2004, San Francisco, Ca., USA.
- [3] J.N. Bradley, USDC, USDC Flexible Display Report, Chapter 4, "Roll to Roll Processing," 2004.
- [4] Y.Y. Lin, A. Dodabalapur, R. Sapeshkar, Z. Bao, W. Li, K. Badwin, V.R. Raju, and H.E. Katz, "Organic Complementary Ring Oscillators," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, No.18, 1999, pp.2714-2716.
- [5] B.K. Crone, A. Dodabalapur, R. Sapeshkar, R.W. Filas, Y.Y. Lin, Z. Bao, J.H. O'Neill, W. Li, and H.E. Katz, "Design and Fabrication of Organic Complementary Circuits," *J. Appl. Phys.*, Vol.89, No.9, 2001, pp.5125-5132.
- [6] W. Fix, A. Vllmann, J. Ficker, and W. Demens, "Fast Polymer Integrated Circuits," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.81, No.9, 2002, pp.1735-1737.
- [7] M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik, and W. Beber, "Polymer Gate Dielectrics and Conducting-Polymer Contacts for High-Performance Organic Thin Film Transistor," *Adv. Mat.*, Vol.14, No.23, 2002, pp.1717-1722.
- [8] M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik, S. Ponomarenko, S. Kirchmeyer, and W.

- Weber, "High-mobility Organic Thin Film Transistor Based on α,α' -didecyloligothiophenes," *J. Appl. Phys.*, Vol.93, No.5, 2003, pp.2777-2981.
- [9] T.W. Kelly, P.F. Baude, C. Gerlach, P.E. Ender, D. Muyres, M.A. Haase, D.E. Vogel, and S.D. Thesis, "Recent Progress in Organic Electronics: Materials, Devices, and Progresses," *Chem. Mater.*, Vol.16, 2004, pp.4413-4422.
- [10] S. Molesa, S.K. Volkman, M Chew, D. Redinger, B. Mattis, P. Chang, A. Niknejad, and V. Subramanian, "High-performance Inkjet-printed Pentacene Transistors for Ultra-low-cost RFID Applications," *2004 MRS Spring Meeting*, San Francisco, Ca., USA, April 12-16, 2004.
- [11] W. Fix, "Integrated Circuits Based on Polymer Transistors," *2005 SPIE Annual Meeting*, San Diego, Ca. USA, July 31-Aug. 4, 2005.
- [12] C.K. Song, G.S. Ryu, K.B. Choe, and H. Jung, "Application of Organic TFTs to Flexible AMOLED Display Panel," *Proc. of the 5th Int'l Meeting on Inform. Display*, Vol.1, 2005, pp.64-67.