

디스플레이향 프린팅 공정 기술

모연곤 (삼성모바일디스플레이)

I. 서론

최근 십 수년간 방송, 통신, 컴퓨터 등의 미디어 기술 분야에서 고품질의 영상 서비스를 위한 인프라 구축을 서두르고 있어 휴먼 인터페이스로서의 전자 디스플레이의 역할이 더욱 커지고 있다. 디스플레이 기술의 혁신이 새로운 정보 환경을 개척한다고 해도 과언이 아니다. 그러한 배경에서 해상도가 뛰어나고 가격이 저렴한 평판 디스플레이의 응용 영역은 지금까지의 휴대용 및 모니터 용도에서 현장감이 우수한 3D 및 대화면 표시가 가능한 TV 디스플레이 시장까지 주된 디스플레이로 성장하고 있다. 그리고 현재 유리 기판을 이용해 100인치 이상의 대면적의 고해상도 패널이 시험 제작되는 등 초대형 TV 구현을 위한 노력이 진행되고 있다.

TFT-LCD의 대면적화가 진행되는 가운데 향후 평판 디스플레이는 OLED(Organic Light Emitting Diode)의 시장 출시에 따라 점점 경쟁이 치열한 평판 디스플레이 시장 구도를 형성하고 있다. 자기발광형 디스플레이인 OLED는 시인성, 명암비, 색순도, 및 응답속도 등에서 LCD대비 우수한 특성으로 동영상 구현에최적의 평판 디스플레이 기술로 등장하고 있어 기존의 LCD에 커다란 위협으로 간주되고 있다. 이외에도 플렉시블, 경량화, 튼튼함 등의 장점과 자유롭게 구부릴수 있어서 수납성이나 휴대성이 우수한 대화면 디스플레이가 가능케 하는 플렉시블 디스플레이가 개발되어 시장 출시를 눈앞에 두고 있다. LCD, PDP, OLED, Flexible Display 등을 포함하는 디스플레이 메이커들은 상호 경쟁적인 위치에서 고품위 및 저가제품을 위한 개발 노력에 몰두하고 있다. 공정 단계를 줄이는 단순 공정, 재료 손실을 최소화하는 고효율 재료 공정, 대면적이 가능한 공정, 그리고 고해상도 미세 패턴닝 공정 등의 기술이 고품위와 저가격을 추구하는 기술이라고

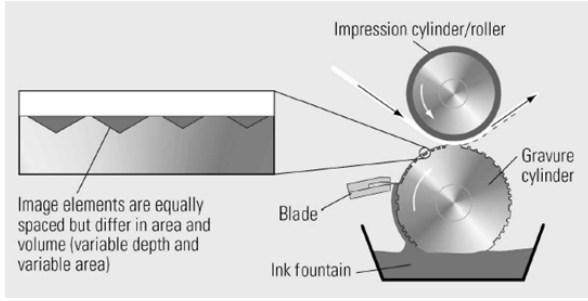
말할 수 있다. 기존 평판 디스플레이에서는 주로 photo-lithography에 의한 패턴닝 공정이 가장 널리 확보되어 사용되고 있는 기술이지만, 미세한 나노 스케일의 패턴을 형성하는데는 아직 어려움이 존재하고 있다. 또한 photo mask 및 노광 설비의 고가격에 따른 높은 공정 단가 및 공정 단계가 많음으로 인한 복잡한 공정 등의 이유로 새로운 패턴닝 공법에 대한 요구가 많아지고 있다.

이러한 추세에 따라서 최근 다양한 인쇄 공정 기술이 다양한 디스플레이에 적용되고 있으며, 특히 최근 주목을 많이 받고 있는 기술은 그라비아(Gravure), 스크린(Screen), 잉크젯 및 노즐 프린팅, 임프린트 리소그래피(Imprint Lithography) 등의 인쇄 기반 기술로 대량 생산에 적용이 되고 있다. 본고에서 다양한 디스플레이에 적용되고 있는 프린팅 공정 기술 및 연구 개발 현황에 대하여 알아본다.

II. 프린팅 공정 기술

1. Gravure Printing

Gravure Printing은 25~30 μ m 깊이의 패턴이 새겨진 구리 등의 실린더를 이용하는 롤러 방식의 프린팅 공정 기술이다. 평평한 비화선부에 묻어 있는 잉크를 닥터블레이드로 제거하고 에칭되어 오목한 화선부에 묻어있는 잉크만을 기판에 전이시키는 방식으로, 제판비용은 비교적 저렴하지만 패턴을 연속적으로 자유롭게 재현이 가능하며, 비교적 두꺼운 피막층 구현이 가능하다. Gravure 인쇄법과 blanket roll을 사용하여 인쇄하는 오프셋 방식을 결합한 방식으로 그라비아 인쇄법이 가진 낮은 해상도의 단점을 보완하는 방식이다(그림



〈그림 1〉 Gravure Printing 공정

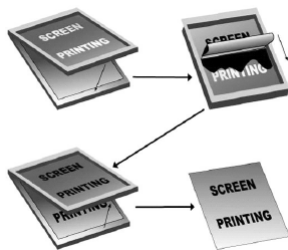
1) 참조).

Gravure Roll에서 피인쇄 기판에 패턴을 직접적으로 전달할 경우 패턴의 불완전한 전이 및 해상도의 변형 등의 문제가 생길 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 제안된 방식이 그라비아 offset 인쇄법인데 이 방법은 Gravure roll과 피인쇄 기판 사이에 패턴을 전달해 줄 수 있는 blanket roll을 삽입하여 인쇄품질을 향상시키는 방법이다. Gravure Offset 인쇄법을 사용할 경우 비교적 높은 해상도(~ 수십 μ m)와 빠른 인쇄 속도의 장점을 가지지만, blanket roll의 잦은 교체와 Gravure roll의 높은 제작 가격의 단점을 가지고 있다. 한편 패턴 제작은 기계적인 방식이 주종을 이루지만 최근에는 레이저를 이용하는 방식이 소개되어 보다 유연하고 간편한 패턴닝 기술로 자리 잡아 가고 있다.

2. Screen Printing

Screen 프린팅은 스텐실을 이용한 비가압식 프린팅 공정으로 상대적으로 낮은 공정 속도를 보이는 대신 잉크와 기판에 영향을 받지 않는 장점이 있어 대면적 기판위에 두꺼운 잉크 증착에 적합한 기술이다. 대기 중에서 박막 형성과 패턴닝 과정까지 한 번에 진행할 수 있고, 부가 설비면에서 타 장비들에 비하여 저렴하고 간단한 공정으로 진행할 수 있어서 시간과 비용면에서 큰 이점을 갖고 있다.

스크린 프린팅을 좀 더 자세하게 설명한다면 다음과 같다. 폴리에스터(Polyester) 또는 스테인레스 스틸 등으로 짜여진 스크린 망사(메쉬, mesh)를 나무나 알루미늄 등의 틀에 고정시켜 그 위에 수공적 또는 광화학적 방법으로 판막을 만들어

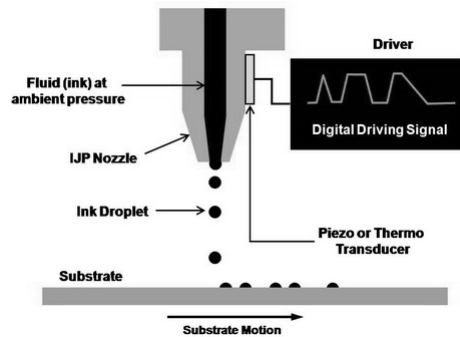


〈그림 2〉 Screen Printing 공정

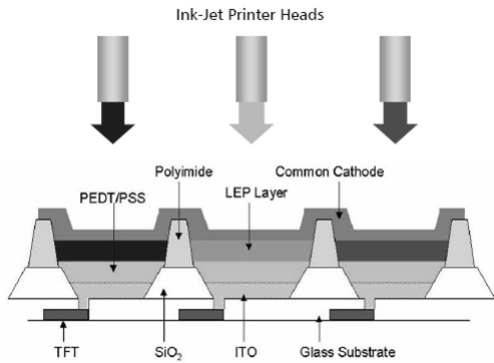
필요한 화상 이외의 부분을 막고 그 안에 잉크를 부어 스퀴지(Squeegee)라 불리는 주걱으로 스크린 내면을 가압하면서 움직이면 잉크는 판막이 없는 부분을 통과하여 판 밑에 놓여 있는 종이나 기타 피인쇄 기판 등에 찍혀 나와서 인쇄가 되는 기법이다(〈그림 2〉 참조).

3. Inkjet Printing

잉크젯 기술은 노즐을 통해 미세한 잉크 방울을 만들어 이를 기판 위의 원하는 위치에 분사하여 패턴을 형성하는 비접촉식 인쇄 기법으로 작은 체적에 복잡한 형상을 구현하는데 적합한 공정 기술이다(〈그림 3〉 참조). 잉크젯 프린팅 기술은 공정의 특서에 따라 연속 공정(Continuous Process)과 DoD(Drop-on Demand) 공정으로 구분된다. 연속 공정 방식은 일반적으로 장치가 대형이고, 인쇄 품위가 낮아 컬러화에 적절하지 않기 때문에, 주로 저해상도의 marking에 사용되고 있다. 고해상도의 패턴닝 목적으로는 on demand 방식이 대상이 된다. On demand 방식 잉크젯 인쇄로는 현재 piezo 방식과 버블젯 방식(Thermal 방식)이 많이 이용되고 있다. Piezo 방식은 잉크 실을 압전소재(전압을 인가하면 변형하는 소자)로 바꿔 제 체적을 변화시켜, 잉크 실 안의 잉크에 압력을 주면 노즐을 통해 토출되는 것이고, 버블젯 방식은 잉크에 압력을 주면 노즐을 통해 토출되는 것이며, 버블젯 방식은 잉크에 열을 가해 순간적으로 기포를 발생시켜 그 압력으로 잉크가 토출되는 것이다. 버블 방식은 소형화, 고밀도화하기 쉽고, 헤드의 비용도 저렴하기 때문에 오피스용으로 가장 적합한 방식이다. 다만, 열이 가해지기 때문에 헤드의 내구 수명이 짧고, 용매의 비등점의 영향이나 잉크 재료로의 열 손상을 피할 수 없기 때문에 사용할 수 있는 잉크가 한정된다는 문제점이 있다. 이에 비해 piezo 방식은 고밀도화와 헤드 비용의 측면에서는 버블방식보다 떨어지지만, 잉크에 열을 가하지 않기 때문에 헤드의 수명, 잉크의 유연성 측면에서는 뛰어난 오피스용 이외의 상업 인쇄나 공업 인쇄, 디바이스 제작에는 더 적합한 방식이라고 할 수 있다.



〈그림 3〉 Inkjet Printing 공정



〈그림 4〉 Inkjet Printing 공정 적용 예 - 프린팅 기반 고분자 OLED 증착 공정

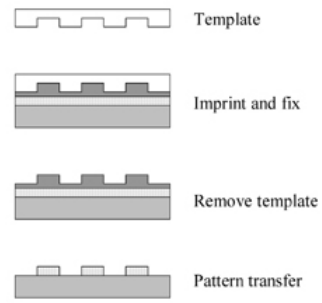
잉크젯 기술을 전자소자 제작에 사용하기 위해서는 프린팅된 패턴의 균일도 확보, 잉크방울의 탄착 위치 정밀도, 잉크젯 헤드의 신뢰성, 잉크젯 공정의 신뢰성 확보 등이 필요하다. 이 중 가장 중요한 기술요소는 프린팅의 균일도 및 잉크방울의 탄착 위치 정밀도를 확보하는 것이다. 이를 해결하기 위해서는 잉크젯 장비의 개발과 잉크 및 공정 개발을 통하여 해결하여야 한다.

잉크젯 프린팅 기술은 주로 디스플레이 장치를 만드는 대기업을 중심으로 연구개발이 진행되고 있으며, 특히 8세대 LCD용 컬러필터 제작과 배향막 형성분야, 그리고 전도성 잉크를 이용한 PCB 배선 공정, 고분자 OLED 공정(〈그림 4〉 참조) 등에 주로 많이 적용되고 있다.

원천기술을 확보하고 있는 미국과 유럽의 Xerox, HP, Philips, Dimatix, Xaar 등이 잉크젯 장비를 생산하고 있으며, Dupont, BASF, Bayer, Cabot 등의 재료 업체와 더불어 잉크젯 프린팅 기술을 개발, 양산 적용을 위한 연구를 진행하고 있다. 일본에서는 Seiko Epson, Konica Minolta, Mitsubishi 등이 장비를, Fuji Film이 재료를 개발하여 디스플레이를 포함한 다양한 잉크젯 응용 제품을 개발 중이다. 다양한 디스플레이 공정에서 공통적으로 필요로 하는 전극의 제조 공정을 photolithography 공정 대신 잉크젯 프린팅 기술로 적용하기 위하여 금속 나노입자를 유기 용제에 분산시킨 전극용 도전성 잉크의 개발 및 공정 기술 개발도 활발히 진행되고 있다.

4. Imprint Lithography

Imprint Lithography는 구조물이 패턴된 stamp를 이용하여 피인쇄 기판 위에 나노 사이즈의 구조물을 복제하여 패턴하는 전사 기술로 종이 위에 도장을 찍는 것과 유사한 방법이다. Imprint Lithography 기술은 1994년 Princeton 대학의 S. Y. Chou 교수 그룹에 의하여 제안되어 지금까지 여러 분야에 적용되고 있다. Imprint 기술은 열 또는 광에 의한 방법과 Soft

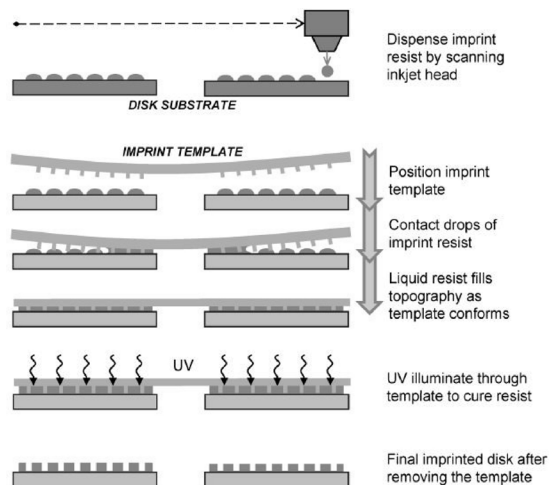


〈그림 5〉 Imprint Lithography 공정

Lithography 등으로 지속적으로 연구 개발이 되고 있다.

가. 열 또는 광 Imprint Lithography

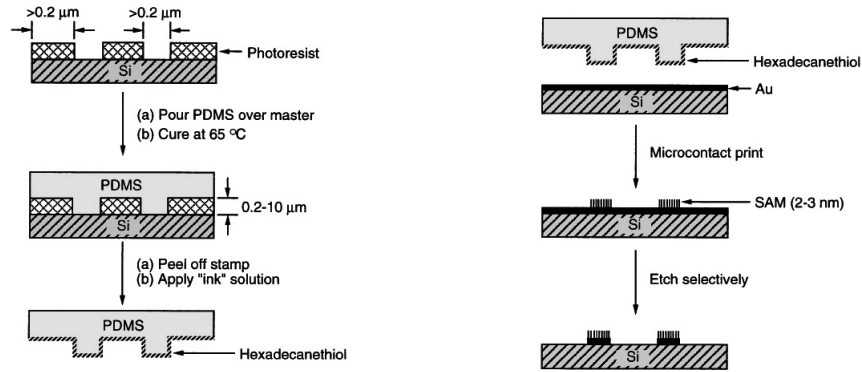
열 또는 광 경화성 수지를 이용한 Imprinting 공정 기술은 현재까지 주로 많이 사용되고 있는 방법으로 열(광) 가소성 폴리머를 기판위에 얇게 코팅하고, 유리 전이 온도 이상의 온도와 일정 압력에서 stamp를 가압하여 패턴을 만드는 방법이다. 전사 재료는 열가소성 재료의 경우에도 적용이 가능하며, 금형 재료로서는 실리콘, 니켈 및 석영 등의 재료 등이 쓰이며, 금형을 압착하여 리소그래피로 이용하는 경우에는 금형의 돌출 부분에 의해 압축된 기저 층을 반응성 이온 에칭공정 등으로 제거한다. 그리고, 광경화성 수지를 이용하는 방식은 열대신 자외선 경화방식을 사용하며 투명한 stamp가 사용되며, 작은 면적의 stamp를 이용하여 반복적으로 패턴을 제작할 수 있다는 장점을 가진다(〈그림 6〉 참조).



〈그림 6〉 광 Imprint Lithography 공정

나. Soft Lithography

Soft Lithography는 일반적으로 유연한 특성을 갖는 stamp를 이용하여 패턴을 형성하는 방법으로 미세 접촉 인쇄 방식(Micro-Contact Printing)을 기반으로 모세관내 미세



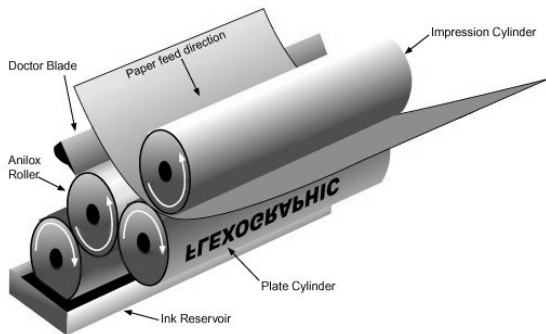
〈그림 7〉 Soft Lithography 공정

몰딩(Micro-Molding in Capillary), 미세전달몰딩(Micro-Transfer Molding), 용매원용 미세몰딩(Solvent assisted Micro-Molding) 등의 방법으로 발전되어 왔다.

접촉 인쇄 방식은 stamp와 기판 표면 사이의 접촉 특성이 핵심이며, 패턴을 옮기는데 매우 효율적인 방법으로서, 제작된 마스터를 이용하여 반복적으로 패턴을 복제할 수 있다는 장점을 가지고 있다(그림 7) 참조). 이 방법은 2차원의 형상을 만드는데 적합하지만, 금속 박막 도금과 같은 다른 공정과 결합하여 3차원 형상을 만드는 데에도 사용되고 있다.

5. Flexography

고무 또는 photo-polymer로 제작된 plate 에 음각 또는 양각 패턴을 제작하고 이를 프린팅 매체로 사용하는 인쇄법으로 도포된 잉크를 균일한 grating을 갖는 아니록스 롤러(Anilox roller) 위에 도포하고, 닥터 블레이드를 이용해 롤 표면에 균일하게 펼친 다음 인쇄롤의 유연성 수지판 위에 양각된 패턴으로 전사한 후, 기판 표면에 프린팅 된다(그림 8) 참조). 이러한 방법은 기판 위에 인쇄되는 잉크의 두께를 아니록스 롤러의 기공 크기와 밀도에 의해 조절할 수 있어 균일한 박막의 형성이 가능한 장점이 있다. 또한 패턴닝된 형상을 바꾸면 도포되는 위치나 범위를 정밀하게 조절할 수 있어 플렉



〈그림 8〉 Flexographic Printing 공정

시블 기판을 이용한 인쇄에도 적용이 가능한 장점이 있다.

이 인쇄법은 LCD의 배향막을 도포하는 수단으로 이용되는데, Flexographic printing을 통해 균일한 두께의 폴리이미드 배향막을 형성하고 rubbing하는 방법을 이용하고 있다. 또한 기판 크기가 대형화됨으로써 제 6세대 이후의 기판에서는 인쇄롤이 이동하는 형태로 변경되어 이용되고 있다.

III. 프린팅 공정 기술 응용

앞에서 소개한 다양한 프린팅 공정 기술은 디스플레이 분야에서 실제 양산에 적용되고 있으며, 기술의 빠른 발전과 더불어 보다 많은 영역에서 사용될 것으로 보인다. 프린팅 공정은 우수한 재료 개발과 및 공정 기술이 개선되면서 PDP, LCD, OLED, Flexible Display등에 단위 박막 공정 및 구동용 TFT 소자 공정 등에서 지속적으로 적용이 늘어가고 있는 상황이다.

PDP의 경우, 격벽을 만드는 공정이나 두꺼운 전극 구조를 구성함에 있어서 스크린 프린팅 방법으로 공정을 진행하고 있으며, 두꺼운 유기막이 적용되는 디스플레이 단위 공정에도 스크린 프린팅 기술이 빈번하게 사용되고 있다. LCD의 경우에도 이미 잉크젯 프린팅 기술이 생산 공정의 간소화 및 재료 사용량 절감 측면에서 장점을 가지고 있어서 컬러 필터 양산 공정에 적용되고 있다. 또한 LCD에서는 디스플레이 특성 향상을 위한 편광판, 나노 렌즈 어레이, 광분산 필름 등과 같은 기능성 필름을 사용하고 있는데, 이러한 광학 필름들은 주기적인 패턴을 요구되기 때문에 스템프나 몰드를 통하여 패턴을 만드는 임프린트 공정이 필요하게 된다. 실제 양산에 일부 적용되기 시작하고 있고 향후 대형 공정 기술이 개발됨에 따라 응용 영역은 더욱 넓어질 것으로 보인다.

인쇄공정으로 제조된 유기박막트랜지스터(Organic Thin Film Transistor)는 반도체 특성을 지닌 공액분자(Conjugated Molecule)를 트랜지스터의 반도체 층으로 사용한다. 이러한

공액분자는 분자 량의 크기에 따라서 단분자 유기반도체와 고분자 유기반도체로 구분한다. Pentacene으로 대표되는 단분자 유기반도체는 유기용매에 녹지않아서 주로 진공챔버 내에서 열증착 공정을 통해서 박막을 형성하였으나 최근에는 물질의 화학적인 변화를 통해서 다양한 유기용매에 용해될 수 있는 물질들이 개발되고 있다. 대표적인 재료로 p-type의 TIPS Pentacene과 n-type의 PTCDI8-CN2 등이 있다. 이러한 용해 가능한 단분자 유기반도체는 최근 용액공정을 통해서 $1 \sim 5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도의 이동도를 보고하고 있으며 이는 고분자 유기반도체에 비해서 약간 높은 수준이라 할 수 있다. 다만 단분자 잉크의 낮은 점도에 의해서 인쇄공정 시에 coffee-ring effect등에 의해서 소자 간 성능의 균일성이 비교적 낮은 단점을 지니고 있다. 반면에 고분자 반도체 잉크는 비교적 높은 점도로 인해서 소자 간 성능 균일성이 보다 높은 것으로 알려져 있다. 최근 Polyera사 등에서 보고한 최신의 고성능 고분자 반도체재료가 $1 \sim 2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 달성하여서 이러한 재료의 응용가능성을 보다 높이고 있다. 하지만 유기반도체 재료는 산화물 반도체나 다결정 실리콘 반도체에 비해서 낮은 전하 이동도와 신뢰성으로 인해서 디스플레이용 구동 TFT 소자로 적용이 미흡한 수준이다.

미국 Xerox PARC는 수년전부터 Flexible e-paper용 TFT backplane용 유기박막트랜지스터를 Inkjet Printing을 통해서 제작하는 연구를 하고 있으며, 자체 개발한 Thiophene 계열의 고분자를 사용하여 $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도의 이동도를 구현하였다. 특히 2009년 SID 국제 학회에서 유기박막트랜지스터 구동되는 2~3인치 수준의 e-paper 디스플레이를 전시하였다. PARC가 주된 보유 기술은 "Digital Lithography"라는 잉크젯 인쇄법과 여러 종류의 유기반도체용 공액고분자에 대한 물질 특허 및 공정 기술 등이다.

오랫동안 유기박막트랜지스터를 연구하고 있는 Sony는 2010년 5월 SID에서 $80 \mu\text{m}$ 두께로 얇은 실린더에 감쌀 수 있는 4.1인치의 full color flexible OLED 디스플레이를 전시하였다(그림 9) 참조). Sony가 개발한 유기반도체 물질은 PXX (peri-Xanthenoxanthene) derivative로 산소, 습기, 빛, 열에 노출되어도 안정한 것으로 보고되었다. 제작된 유기박막트랜지스터는 전하 이동도 $0.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 보고되었고, $20 \mu\text{m}$ 두께의 유연한 초박막 기판과 모든 통합회로의 절연체로 유기절연막이 사용하였다고 발표하였다.

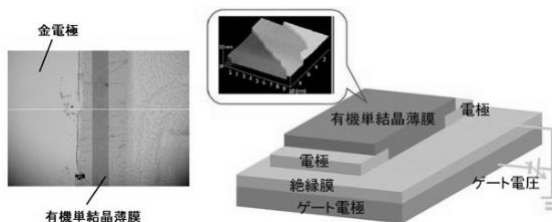
Polyera사는 미국 노스웨스턴대의 Antonio Facchetti 교수가 spin-off한 회사로써 n-type 단분자 혹은 고분자 유기반도체 잉크에 많은 특허 및 기술을 보유하고 있다. 특히 지난 2009년 Nature에 보고된 n-type 고분자 반도체 재료는 $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도의 높은 전하 이동도를 보고 하였으며 소자 안정성도 비교적 우수한 것으로 알려져 있다.



〈그림 9〉 4.1인치 Flexible OLED (Sony)

2011년 3월 오사카대 산업과학연구소는 패터닝할 수 있는 도포 프로세스를 이용, 캐리어 이동도 $5 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 인 유기박막트랜지스터를 제작하였다(〈그림 10〉 참조). 유기반도체 잉크를 싹기 모양의 틈새에 흘려 넣듯이 떨어뜨려 결정성장 방향을 정비하는 기술인 "갭 캐스트" 라는 스템프 인쇄 공정을 적용하여 TFT array를 제작하였다. 잉크는 5~10분만에 건조되어 높은 결정성을 보이며, 건조 온도는 약 100°C 정도로 낮아 플라스틱 기판에도 적용이 가능하다고 발표하였다. Channel 길이가 $50 \mu\text{m}$ 크기인 TFT array(5x5)에 사용된 유기 반도체는 C10-DNTT가 사용되었다.

최근 비정질 과 다결정 실리콘 TFT의 장점을 가지고 있는 ZnO 기반의 산화물 TFT의 연구 개발이 관심을 끌면서 증착 방식이 아닌 용액 및 인쇄 공정에 의한 방식도 점차 확대되어 가고 있다. 인쇄 산화물 TFT는 금속 산화물 잉크를 반도체 층으로 사용하여 제작된 TFT로써 precursor 물질을 Sol-Gel 공정에 따라 금속 산화물 박막을 형성하거나 금속산화물 나노 입자를 용매에 분산한 잉크를 이용하여 박막을 프린팅 하는 방법으로 TFT를 제작할 수 있다. 금속 산화물의 종류에 따라서 2성분계인 ZnO (Zinc Oxide), SnO₂ (Tin Oxide)를 사용하거나 3성분계인 TZO (Titanium Zinc Oxide), ZTO (Zinc Tin Oxide) 4성분계 GIZO (Gallium Indium Zinc Oxide), HIZO (Hafnium Indium Zinc Oxide), ZIZO (Zirconium Indium Zinc Oxide) 등의 산화물을 트랜지스터의 반도체 층으로 사용하고 있다. 금속산화물의 원소성분이 늘어날수록 보다 낮은 온도에서 비정질 상태로 높은 이동도를 얻을 수 있는 반면에 용액공정으로 정확한 화학적 조성을 재현성 있게 만드는



〈그림 10〉 유기 반도체 TFT(오사카대학)

데 어려움이 있다. 2성분 계 Sol-Gel 공정의 경우 precursor를 고체 박막으로 변환하는 데는 200°C 정도의 비교적 낮은 온도가 요구되지만, 보다 높은 이동도를 얻기 위해서는 400°C 이상의 고온 열처리 공정이 필요하게 된다. 현재 3성분 계 이상의 다성분계 산화물 용액공정의 경우 500°C의 공정 온도가 필요하며, 다양한 플라스틱 기판위에 적용되기 위해서는 200°C 이하의 공정 기술이 개발되어야 한다. 금속 산화물 나노입자 잉크의 경우 금속 산화물이 높은 결정성을 지닌 나노입자 형태로 이미 존재하여 결정성 제어를 위해서 높은 공정 온도가 필요치 않으나 인쇄 공정을 통한 박막 도포 후에도 나노입자가 박막상에 존재하여 항상 multi grain을 지닌 박막의 형성만이 가능하다. 이로 인해서 금속 산화물 나노입자 잉크의 경우, 달성 가능한 전하 이동도가 Sol-Gel공정에 의한 소자에 비하여 상대적으로 낮아서 통상적으로 5 cm²/Vs 이하의 이동도를 보이고 있다. 금속 산화물 TFT는 현재 기술로 유연한 플라스틱위에 공정이 가능한 낮은 온도(200°C)의 공정이 어렵다고 할 수 있다. 따라서 향후 지속적인 연구개발을 통해서 보다 낮은 온도에서 공정이 가능한 금속 산화물 잉크의 개발이 필요하다.

2007년에 미국 Oregon대학 C. H. Chang 그룹에서는 잉크젯 프린팅을 이용하여 SnO₂를 반도체 층으로 사용하는 금속 산화물 TFT를 발표하였다. precursor로 SnCl₄를 사용하였고 BGTC (Bottom Gate Top Contact) 구조의 금속 산화물 TFT를 구현하였다. SiO₂/Si/Au의 기판(10x15mm) 위에 잉크젯 프린팅을 이용하여 250nm 두께의 SnO₂를 적층하였으며, S/D 전극은 Al 300nm를 증착하였다. 제작된 TFT의 소자 특성은 이동도 3.6cm²/Vs, turn-on 전압 -39V, on/off ratio 10³ 이었지만, 공정온도가 450°C 이상 요구되는 단점이 있었다.

같은 해에 Cambridge대학 Cavendish 연구소의 Noh 등은 TG(Top Gate)구조의 ZnO NW-FETs의 제작을 용액공정 및 잉크젯 프린팅 공정을 사용하였으며, S/D(Source/Drain) 전극은 SAP(Self-Aligned-inkjet Printing) 기술을 이용하여 Au nanoparticle ink로 50~400nm의 채널을 형성하고, 반도체 층은 ZnO nanowire와 solvent(IPA 또는 ethylene glycol)를 혼합한 용액을 사용하여 잉크젯 프린팅 방법으로 선택적으로 형성하였다. 게이트 절연막은 PMMA를 스핀 코팅으로 형성하였고, 게이트 전극은 PEDOT:PSS의 유기재료를 잉크젯 프린팅 공정으로 제작하였다. 잉크젯 프린팅으로 제작된 ZnO 나노와이어 TFT는 ~ 4 cm²/Vs 이동도와 10⁴의 on/off ratio를 보여주었다. 또한 동일한 방법을 플라스틱 기판 위에 적용하여 유사한 성능의 TFT를 구현하였다.

2010년에는 미국 Rice 대학의 기계공학과 Robert Vajtai 교수팀은 미세 잉크젯 프린팅 기술을 사용해 박막 nanotube

필름 형태의 FET(Field Effect Transistor)를 제조하는데 성공하였다. 이 연구팀은 single-walled CNT로 인쇄한 샘플 회로들이 molecule 형태, 제작 온도 등에 따라 nanotube의 속성이 변한다는 실험 사실을 토대로 인쇄하는 layer의 수를 조절하는 방법으로 원하는 수준의 금속성/반도체 속성을 조절할 수가 있었다. 이들의 연구에 따르면, 상온에선 금속성/반도체성 nanotube network을 따라 전류 이동이 생기고 저온에선 반도체성 nanotube가 insulator 역할을 수행함으로써 FET 소자에 두 종류의 nanotube가 선택되어 소자 제작에 적용되었다.

다양한 트랜지스터 제작에 프린팅 공정이 적용되는 것과 같이 OLED 증착 공정에서도 잉크젯 또는 노즐 프린팅 공법이 적용되고 있다. 잉크젯 프린팅 방식은 고분자 OLED를 만드는 가장 일반적인 방식으로 알려져 있으며, 2000년 초부터 CDT(Cambridge Display Technology)는 고분자 화소 제작 방법으로 Litrex와 공동으로 잉크젯 프린팅 기술 개발 및 설비를 개발하여 라이선스 업체와 협력 업체에게 total solution을 제공하여 왔다. 2006년에는 잉크젯 방식으로 자체 개발한 5.5인치와 14인치 OLED 패널을 발표한 바 있다. 2007년 TMD(Toshiba Matsushita Display) 사는 20.8인치의 full color 고분자 OLED TV를 발표하였는데, 이는 저온폴리실리콘(LTPS) 기술과 고분자발광재료를 기반으로 한 잉크젯 프린팅 공정을 사용하여 제작된 것이다. 또한 SID 2007에서는 Casio가 자사의 아몰퍼스 실리콘 backplane 위에 Litrex사의 2세대 잉크젯 프린팅기술로 CDT의 RGB재료를 사용하여 고해상도(QVGA, 160ppi) 3인치 풀칼라 고분자 OLED를 선보였다. 2007년 이후에 보다 더 큰 사이즈의 잉크젯 프린팅 기반의 고분자 OLED 패널에 대한 기대가 커져서 30인치 또는 그 이상의 패널을 기대하였지만 재료 수명 및 설비의 불안정성 등의 이유로 인하여 대형 OLED 패널의 개발이 지연되고 있다. 향후 스미토모, 듀폰 등의 재료 회사에서 장 수명의 재료 개발에 따라 급격하게 고분자 OLED 패널이 등장할 수도 있을 것으로 예측해 본다.

IV. 향후 전망

IDTechEx의 전망 자료에 의하면, 전 세계 인쇄전자소자 시장은 2010년 3억 7천만 달러에서 2020년 370억 달러, 그리고 2030년 3,360억 달러로 연평균 40% 이상의 높은 성장이 예측된다고 한다. 한국은 유기박막트랜지스터, OLED 기술 등 디스플레이 분야를 중심으로 연구가 주로 진행되고 있지만, 짧은 역사와 주변 인프라 부족으로 기술 확보 측면에서 일본이나 유럽에 비해 늦은 편이다. 인쇄공정기술은 새로운 응용분야의 개척이 가능하고, 전 세계적으로 본격적인 시장

형성은 아직 형성되지 않았지만 빠른 속도로 디스플레이를 포함한 다양한 분야에 응용되기 시작하고 있다. 미래에 선두의 자리를 확보하기 위해서 우리에게 부족한 재료 및 부품 분야에 국가적인 차원의 적극적인 육성 방안이 필요하다. 특히, 재료/부품분야의 경쟁력이 취약한 현 국내 전자산업의 경쟁력을 유지하기 위해서는 인쇄전자 기술 개발을 위한 산학 협력 및 실질적인 중장기 국책과제 도출도 필요하다. 가격 경쟁력이 갈수록 절실한 디스플레이 업계에도 재료 절감 및 공정 단순화 측면에서 지속적으로 프린팅 공정 기술은 산업에 접목될 수 밖에 없는 상황이기 때문에 고성능의 재료 및 Printing 설비, 공정 기술의 확보가 매우 중요하다. 제조 기술에만 국한되지 않은 폭 넓은 핵심 프린팅 재료 및 설비 개발에 투자가 필요하며, 창의적인 두뇌를 가진 인력을 양성하는 것도 백년대계를 꿈꾸는 우리의 목표가 되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 김재훈, 이유진, 인포메이션 디스플레이, 12(1) 12 (2011).
- [2] 송정근, 인포메이션 디스플레이, 11(2) 7 (2010).
- [3] 백만인외 6인, 인포메이션 디스플레이, 10(5) 14 (2009).
- [4] 진병두, 인포메이션 디스플레이, 10(4) 22 (2009).
- [5] 노용여 외 4인, 인포메이션 디스플레이, 11(6) 2 (2011).
- [6] Nikkei Electronics(11년 3월7일자).
- [7] IDTechEx, "Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2010-2020," 2010.
- [8] George Whitesides, J. Mater. Chem., 7(7), 1069-1074 (1997).



모연곤

1999년 8월 University of Nebraska-Lincoln 박사 (전자공학).
 1999년 9월~2000년 10월 NASA Langley Research Center ICASE 연구원.
 2000년 12월~2008년 8월 Samsung SDI 중앙연구소 책임/수석연구원.
 2008년 9월~현재 Samsung Mobile Display 연구소 수석연구원.
 2006년~현재 정보디스플레이학회 OLED 연구회 위원
 2006년~현재 IMID(정보디스플레이국제학회) Flexible Displays & Electronic Paper 분과 위원
 <관심분야> Flexible Display, Oxide TFT, 차세대 TFT 기술, AMOLED, Electronic Paper Display