

잉크젯 프린팅 기술을 이용한 플렉서블 디스플레이

호남석유화학(주) 대덕연구소
책임연구원 김 창 현

1. 서론

평판 디스플레이는 전 세계적으로 약 600억불에 달하는 산업으로 매년 매우 빠르게 성장하는 산업이다. 최근 기판 substrate의 크기는 약 2m x 2m 정도를 생산할 수 있는 정도로 설비들이 개발되었을 정도로, substrate 크기는 1990년대 이후 거의 매년 2배씩 커지고 있다. 디스플레이 제조 방법으로는 일반적으로 photolithography 기술을 사용했지만, substrate의 크기가 커짐에 따라 deposition 및 lithography를 위한 장비들이 이에 따라 함께 커지게 되었다. 따라서 이러한 설비들의 가격부담과 공정에의 어려움이 대두되게 되었고, 기존과는 다른 방식의 제조방법이 필요하게 되었다. 이러한 관점에서 잉크젯 프린팅 기술이 관심의 대상이 되고 있다.

인쇄산업 역시 그 규모가 매우 크고 오랫동안 기술발전을 이룩해 왔으며, 인쇄기술 또한 잉크를 이용하여 종이라고 하는 substrate에 패턴을 형성하는 기술로서 이러한 인쇄기술을 electronic device 제조에 이용해 보겠다는 생각에서 디스플레이 기술과의 접목이 시도되었다. 잉크젯 프린팅 기술을 디스플레이에 처음 시도한 사례는 polymer light-emitting diodes(PLEDs)를 제조함에 있어 기존 photolithography로는 재료가 빛에 민감하여 어려움이 있어 잉크젯 프린팅 기술을 시도하였고, 또 다른 예로는 LCD(liquid crystal display)에 사용되는 컬러필터 조조시 공정비용을 줄이기 위해 시도되었다. 잉크젯 프린팅 기술은 LCD 컬러필터 제조에 현재 응용되어 산업현장에 사용되고 있을 정도로 상당한 기술발전이 이루어진 상태다. 본 논고에서는 이러한 잉크젯 프린팅 방식에 대해 소개하고자 한다.

2. 본론

1) Multi-jet printing systems

잉크젯 프린팅을 이용하여 디스플레이를 제조하기 위해서는 인쇄속도를 빠르게 하는 것이 중요하다. 인쇄속도는 식(1)과 같은 방식으로 표현될 수 있는데,

$$t_p = A / [d^2 f N_j N_H] \quad \text{----- (1)}$$

substrate 면적 A를 인쇄하는데 걸리는 시간 t_p 는 잉크 drop 사이의 거리 d와 잉크를 ejecting하는 주기(frequency) f, 프린터 헤드에 있는 ejector의 개수 N_j , 프린터 헤드의 수 N_H 와 상관관계를 갖는다. 현재 디스플레이에 사용되고 있는 프린터 헤드

의 ejector의 개수는 100에서 1000개이며, 여러 프린터 제조회사에서 다수의 프린터 헤드를 가지는 프린터를 개발하여 공급하고 있다.

그림 1에는 ejector에서 잉크가 분사되는 모양을 시간에 따라 보여주고 있는데, 잉크가 분사될 때 길다란 tail을 형성하다가 다시 main drop과 합쳐짐을 확인할 수 있다. 잉크 분사속도의 변화는 곧 인쇄의 정밀도와 큰 관계를 가지고 있다. 따라서 이러한 인쇄에 있어 정밀도를 올리기 위해 프린터 헤드에서 분사 속도를 보정하는 작업이 꼭 필요하다.

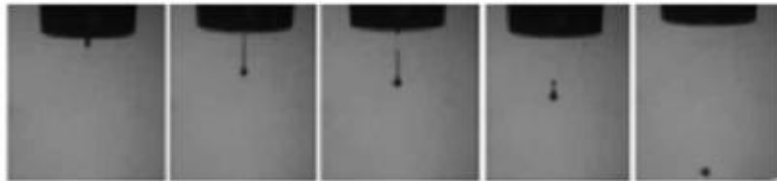


그림 1. 60 μm 의 잉크방울이 노즐로부터 분사되는 모습을 시간에 따라 촬영한 사진

현재 사용되어 지고 있는 잉크젯 프린터의 정밀도는 그림2에서 알 수 있는 바와 같이 원하는 위치에서 약 5 μm 정도의 오차범위안에서 조절되며, 아마도 향후에는 여러가지 parameter의 조절을 통해 이 보다 더 정밀하게 제어할 수 있을 것으로 생각된다.

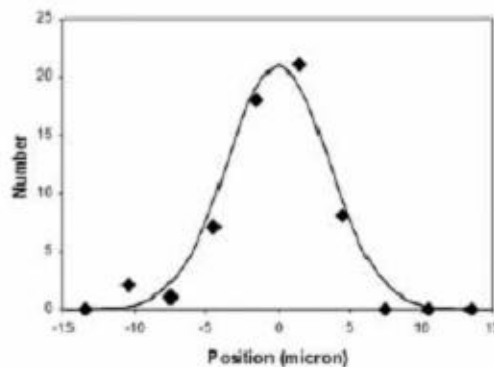


그림 2. Multiejector 프린터 헤드를 이용하여 잉크를 약 50방울 분사하였을 때 정확한 위치와의 차이(deviation)를 표시한 Histogram(표준편차=3.5 μm)

2) Printing Process

잉크젯 프린팅에 사용되는 잉크의 특성을 나타내는 가장 기본적인 변수는 잉크의 점도와 표면 에너지(surface energy)이다. 특히 프린터 헤드에서 분사된 잉크가 패턴 형성을 위해 substrate 표면에 떨어졌을 때는 substrate 표면과 잉크 표면사이의 상호작용이 패턴 형성에 매우 중요하다. Substrate 표면에서의 접촉각이 잉크 액적의 퍼짐(spread) 정도를 결정하는데, 이것은 substrate표면에서 생기는

solid-liquid, solid-vapor, liquid-vapor 계면의 상호간 표면에너지에 매우 의존하게 된다.

잉크젯 프린팅을 통해 평평한 표면에 정밀한 패턴을 형성하기 위해서는 substrate 표면에서 잉크의 퍼짐현상을 얼마나 잘 조절할 수 있는가에 달려있다. 그림 3에서는 접촉각 변화에 따라 형성된 패턴의 line-width 변화를 나타내고 있는데, 접촉각이 클수록 line-width가 줄어드는 것을 나타내고 있다.

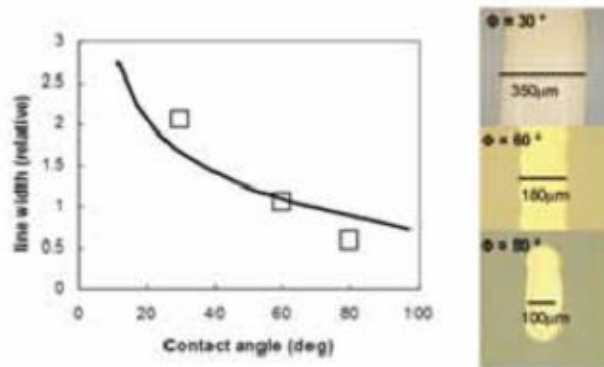


그림 3. 접촉각에 따른 line-width의 변화

또한 잉크젯 프린팅에서는 substrate 표면의 표면특성에 따라 분사된 후 건조되는 특성이 다르게 나타나 패턴 형성에 차이를 나타낸다. 그림 4에 친수성 표면과 소수성 표면에 분사된 잉크의 사진과 vertical profile을 나타내고 있다. 잘 알려진 바와 같이 substrate 표면의 표면에너지가 큰 경우에는 coffee stain 현상에 의해서 액적 표면에서 용매의 증발이 매우 빨리 일어나고, 따라서 잉크속의 금속 물질이 표면쪽으로 이동하게 되면서 그림 4와 같은 profile을 형성하게 된다.

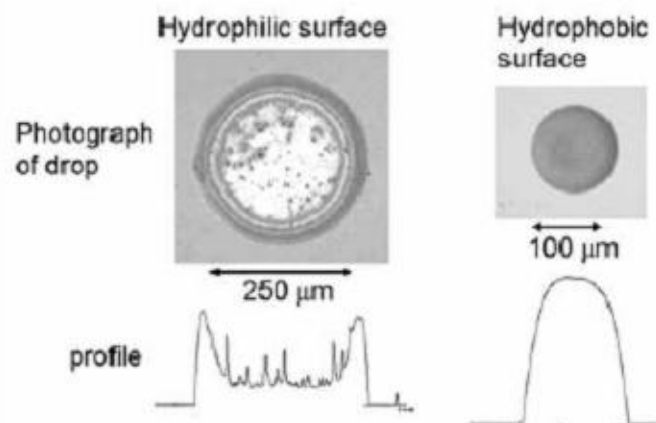


그림 4. 친수성 표면과 소수성 표면에 분사된 잉크의 용매가 증발한 후 substrate 표면에 형성된 잉크방울 사진 및 vertical profile

이러한 substrate 표면에서의 잉크의 퍼짐현상을 조절하기 위해 그림 5에서

처럼 미리 일정한 패턴을 가지는 우물(well)을 만들어준 후 잉크젯 프린팅을 시도하는 기술이 개발되었다. 분사된 잉크는 우물의 벽(well wall)까지 퍼져 흘러가고 더 이상 퍼지는 현상이 없다. 이렇게 함으로써 잉크가 정확히 어떤 특정한 곳에 분사되지 않아서 미리 형성된 well에 의해 그 안에 채워짐으로써 프린터의 정밀도가 매우 크지 않아도 되는 장점이 있다. 이러한 기술은 PLED나 LCD 컬러필터 제조에 사용되고 있으며, 잉크젯 프린팅 기술의 첫 응용사례로 볼 수 있다.

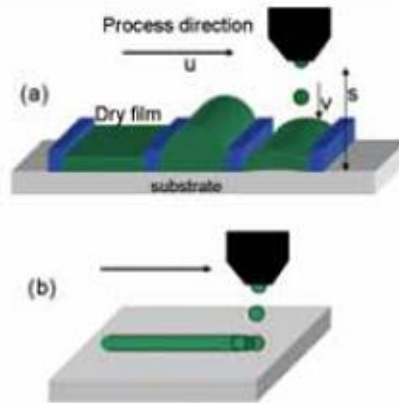


그림 5. (a)well이 형성된 후 잉크젯 프린팅하는 모식도, (b)well이 없는 free surface에 잉크젯 프린팅하는 모식도
 [u:프린팅 헤드 속도, v:잉크 분사속도, s: 표면과 헤드사이 거리]

3) Digital lithography

Digital lithography는 잉크젯 프린팅을 이용하여 마스크(etch mask)를 제작하는 공정이다. 이 공정을 이용함으로써 기존의 photolithography를 통해 제작할 때보다 공정 단계를 줄일 수 있고(그림 6) 다양한 재료를 이용하여 패턴을 형성할 수 있다.

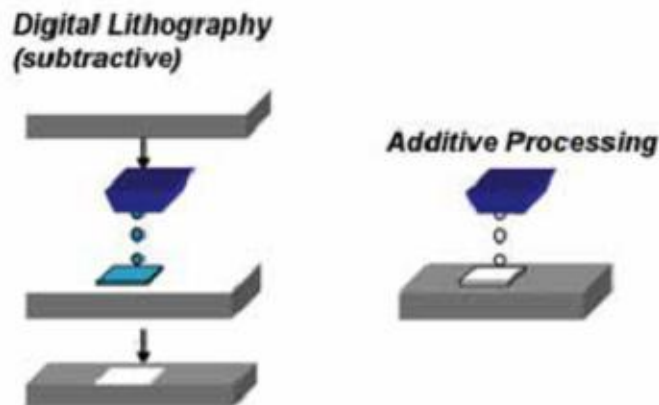


그림 6. Additive & subtractive(digital lithography) 잉크젯 프린팅 공정의 모식도

먼저 substrate 표면에 thin film을 도포한 후 잉크젯 프린팅 공정을 통해 마스크 패턴을 인쇄한다. 그 후에 에칭공정을 통해 thin film을 먼저 제거하고, 차례

로 잉크 물질을 제거함으로써 원하는 패턴이 형성된 마스크를 제작할 수 있다. 그림 7에 이러한 digital lithography를 통해 제작한 TFT 패턴을 나타내었다.

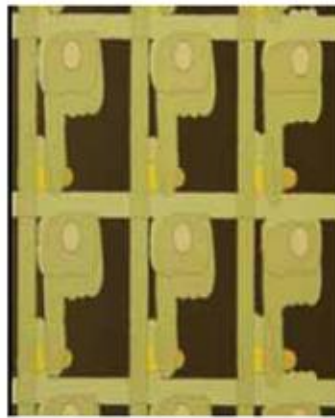


그림 7. Digital lithography 공정을 통해 제조한 amorphous Si TFT 패턴 사진

Digital lithography 공정에서는 프린팅 공정을 위해 사전에 인쇄된 제한된 구조(confining structure)가 없기 때문에 분사된 잉크의 퍼짐 문제가 발생할 수 있다. 이러한 퍼짐 문제는 왁스(wax)를 프린팅함으로써 해결할 수 있다. 프린트 헤드의 온도를 약 120°C까지 올려 왁스를 분사하고, 분사된 왁스는 substrate 표면에서 굳게되어 패턴을 형성하게 된다. 따라서 substrate의 표면에너지와 크게 무관하며, 단지 substrate의 온도를 조절함으로써(30~50°C) 패턴의 정밀도를 조절할 수 있다. 왁스는 금속이나 다른 무기물의 에칭액에 insensitive하고 일반적인 용매에 잘 녹기 때문에 아주 좋은 resist 물질로 사용가능하다.

4) Additive printing

Additive printing 방법은 한번의 공정으로 원하는 물질을 원하는 위치에 deposition할 수 있기 때문에 매우 이상적인 cost-effective한 device 제조 방법이다. Additive printing을 수행하기 위해서는 deposition하고자 하는 물질이 용매에 녹아 용액상으로 존재해야하고 충분한 인쇄 정밀도를 갖추고 있어야 한다. 이러한 additive printing을 이용하여 PLED나 LCD 컬러필터를 제조하는데, 이 방법을 이용함으로써 가격이 매우 비싼 PLED 물질이나 컬러필터에 사용되는 재료를 낭비없이 사용함으로써 원가를 크게 절감할 수 있게 된다.

TFT를 형성하기 위해 고분자 반도체 물질을 잉크젯 프린팅하는 것은 디스플레이나 RFID(radio-frequency identification tags) 등 여러 용도에 매우 매력적인 방법이다. 그림 8에 고분자 반도체 물질을 프린팅하여 TFT를 제조한 모식도를 나타내었다. 일반적으로 사용되는 고분자 반도체 물질은 polyfluorene, polythiophene(PQT12), pentacene 등이 쓰인다. 그림 10에는 PQT12를 이용하여 TFT를 제조한 후 이의 특성을 나타내고 있는데, 반도체 물질로서 매우 우수한 특성

을 나타냄을 확인할 수 있다.

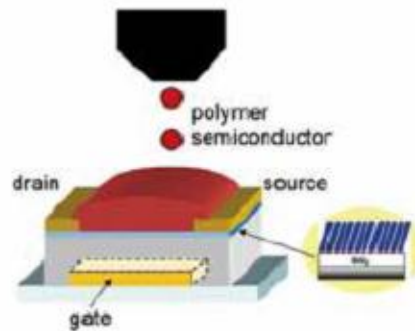


그림 8. 고분자 반도체 물질을 프린팅하여 TFT를 제조하는 공정 모식도

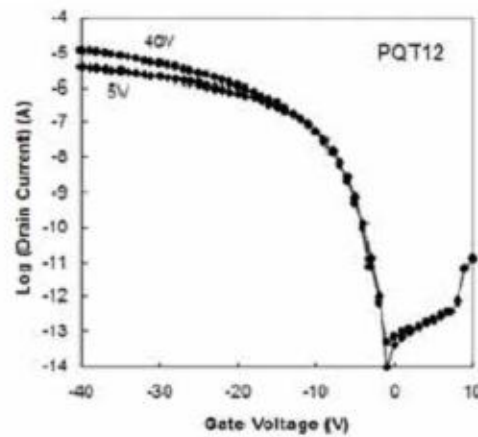


그림 9. PQT12고분자를 이용한 TFT의 전기적 특성
(source: R. A. Street et al., materialstoday, 9(4), 2006)

이러한 방법으로 TFT array를 plastic substrate 위에 제조함으로써 그림 10과 같은 flexible display 기판을 제조할 수 있다. 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 제조한 TFT의 성능은 기존 방법과 비교하여도 전혀 성능에 있어 떨어짐이 없다.

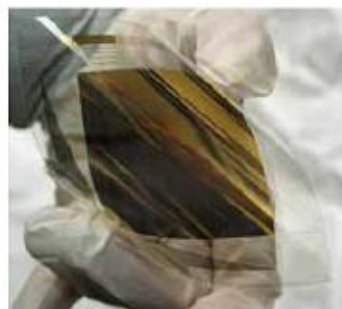


그림 10. Flexible plastic substrate에 제조한 TFT array

3. 결론

Multiejector 프린트 헤드를 이용한 잉크젯 프린팅 방식은 전자 기기 패턴 형성에 매우 빠르고 유용한 방법으로 제시되고 있다. 또한 Digital lithography와 additive printing 방식의 조합은 TFT array 제조를 위한 active material의 deposition 및 패턴 형성에 매우 유용한 방법으로 제시되고 있다. 그러나 잉크젯 프린팅 방식은 프린터 헤드의 막힘문제를 얼마나 안정적으로 해결할 수 있는가, array 제조를 위해 align의 정밀도를 어디까지 올릴 수 있는가, 인쇄 속도를 얼마나 빠르게 할 수 있는가 등 여러가지 상업화를 위해 해결해야 할 과제들을 아직 안고 있다. 그럼에도 불구하고, 공정 단순화 및 원가절감, 그리고 flexible display 제조에 매우 매력적인 방법으로 현재까지 연구되고 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

참고문헌

1. R.A. Street, et al., *materialstoday*, **9**(4), 32, 2006
2. C.J. Chang, et al., *J. Appl. Phys.*, **43**, 8227, 2004