

# 잉크젯 프린팅 기반의 QD디스플레이 기술

김준영  
(경상국립대학교 반도체공학과)

## 1. 서론

현재 상용화 되어 널리 사용되고 있는 디스플레이는 OLED이다. OLED는 진공 증착 방법에 의해서 유기박막을 형성시킴으로써 제품을 생산하고 있다. OLED 제조공정 중 대표적으로는 Fine Metal Mask를 활용하는 FMM-RGB패터닝 공정과, 유기 소재를 Tandem 형식으로 적층하고 Color Filter를 활용하는 W-OLED 공정이 있다. FMM-RGB 공정은, Red, Green, Blue를 패터닝 하는데 있어서 metal mask를 이용하여 진공 증착으로 패터닝 하는 공정이며, 현재 갤럭시 시리즈는 모두 FMM-RGB 공정에 의해서 만들고 있다. W-OLED 공정은 Red, Green, Blue 유기 박막을 독립적으로 형성하지 않고, Open Mask를 통해서 진공증착으로 Tandem 형태로 여러 유기물을 형성한 후, 백색광을 발광하는 공정방법이다. 그리고 Red, Green, Blue의 빛은 Color Filter를 사용하여 백색광에서 추출하게 된다. 현재 대면적 OLED TV는 모두 W-OLED 공정 방법을 사용하고 있다. 현재 시점에서는 유기물의 박막화 공정은 모두 진공 증착 공정으로 주로 사용하고 있으며 증착공정을 통해 형성된 유기박막은 특성이 매우 우수하기 때문에 제품의 성능이 우수하다는 장점이 있다. 진공 증착이라는 우수한 특성이 있어서 OLED TV, 휴대폰 등이 제품화 된 것이지만, 그 속에서 단

점도 있다. 먼저 FMM-RGB공정은 Metal Mask를 이용하여 Red, Green, Blue를 패터닝하는 방법이 단점으로 작용할 수 있다. 그 이유는 대면적 OLED의 제작을 위해서 패널의 면적을 크게 하면 Metal Mask의 면적도 커져야 하는데 이 경우 Mask의 처짐 현상, 또는 유기물질이 화소에 정확하게 형성되지 않는 지점이 발생할 수 있다. 이러한 점은 유기박막의 패턴 정밀도를 저하시키는 요인이다. 따라서 FMM-RGB방법으로는 대면적 OLED 패널을 제작할 수 없다는 한계가 있다. W-OLED방법 역시 단점이 존재하는데, Red, Green, Blue를 추출하기 위해서 Color Filter의 공정 설비가 필요하다는 점이다. 또한 소자 (또는 패널)의 구조가 복잡해질 수 있다는 것도 단점으로 작용될 수 있다. 따라서 Red, Green, Blue를 마스크 없이 직접 패터닝 하면서 대면적 디스플레이로 적용시키는 기술, 그리고 Color Filter 공정 설비가 필요 없고, 소자의 구조도 간단화 시키는 기술이 개발되어야 할 것이다. 이러한 기술에 가장 근접한 기술이 잉크젯 프린팅 기술 (Ink-Jet Printing) 이다. 잉크젯 프린팅 기술은 각각의 단위 화소에 Red, Green, Blue 잉크를 독립적으로 인쇄하며 박막을 형성시키는 공정이다. 기본적으로 잉크젯 프린팅 공정은 용액형 소재를 사용해야 한다. 용액형 소재를 사용한다는 점은, 재료 개발 측면에 있어서 진공 증착용 소재에 비해서 자유도 측면에서 유리하다. 다시 말해서 진공 증착 소재

는 저분자 유기재료를 주로 사용한다면, 용액형 소재는 저분자, 고분자 재료를 모두 활용할 수 있기 때문에 뛰어난 특성의 재료를 개발할 수 있다. 또한 Red, Green, Blue를 각각의 화소에 독립적으로 형성할 수 있기 때문에 단위 화소별로 소자를 개별 제어 (또는 최적화) 시킬 수 있는 장점도 있다. 또한 재료이용효율도 진공 증착공정에 비해서 매우 뛰어나다. 무엇보다도 최근에 양자점 (Quantum Dot, QD)을 활용한 디스플레이 개발 추진이 많이 이루어 지고 있는데, 양자점은 대부분이 용액형 소재이며, 이러한 용액 소재를 활용하여 디스플레이 소자 (또는 패널)를 개발하기 위해서는 반드시 단위 화소에 개별 패터닝이 가능한 공정이 필수적일 것이다.

## 2. 본론

### 2.1. 잉크젯 프린팅 기반의 디스플레이 개발 현황

잉크젯 프린팅 공정으로 유기물 또는 QD를 발광층에 직접 패터닝하는 방식으로 개발된 디스플레이 제품은 상용화된 제품이 많지 않으며, 또는 개발중인 상황이다. 이를 위해서, 국내외 많은 산업체/연구기관에서 개발 진행 중에 있으며, 최근 JOLED는 모니터용 21.6인치 4K 잉크젯 프린팅 OLED 디스플레이를 선보이기도 하였다. 하지만 잉크젯 인쇄로 어느 부분까지 공정이 진행되었는지는 아직 공개되지 않았다. 대만의 AUO는 OLED의 생산을 위해서 JOLED의 잉크젯 인쇄 기술을 채택한 것으로 알려지고 있다. 이는 차세대 공정 방식인 잉크젯 인쇄를 빠르게 도입하기 위해 JOLED 기술 기반으로 생산을 준비하는 전략이다. 하지만 AUO는 JOLED 기술을 그대로 수용하되 파나소닉이 아닌 일본 도쿄일렉트론 (TEL)의 잉크젯 인쇄 장비를 채택하는 것으로 알려지고 있다. 중국의 China Star Optoelectronics Technology (CSOT)는 중국 내 11세대 신규 공장 건설을 위해 큰 투자를 진행 중이며, 특히 잉크젯 인쇄 공정을 도입해 T7 공장에서는 65인치 이상 대형 OLED 양산을 시작할 계획으로 전해지고 있다. 또한 TCL와 CSOT는 향후 11세대 공장에서 잉크젯 인쇄 공정을 활용한 65인치 이상의 OLED 양산 계획 발표하였으며, OLED와

자발광 양자점 디스플레이 기술인 EL-QD기술을 함께 개발하는 연구 플랫폼을 구축하였고, 31인치 자발광 EL-QD를 시연하기도 하였다. 중국의 BOE는 잉크젯 인쇄 기술로 55인치 OLED 개발 성공했다고 발표하였으며, 잉크젯 인쇄로 Red, Green, Blue를 단위 화소에 직접 패터닝 하며 상부층은 진공 증착 공정으로 진행되는 하이브리드 형식의 구조이다. 하지만 아직 개발 제품이 상용화 되진 않았다. 국내 산업체에서도 잉크젯 인쇄기술로 발광층의 직접 패터닝 방식으로 개발이 이루어지고 있으며, 선두 회사로는 LG 디스플레이와 삼성 디스플레이가 잉크젯 인쇄 기술로 OLED 및 EL-QD 디스플레이 개발에 앞장서고 있다. 특히 삼성디스플레이는 양자점을 색변환층으로 활용하는 QD-OLED 디스플레이에 QD의 배열을 위해서 잉크젯 인쇄 기술을 활용하고 있다. 이때에 단위 화소의 구조는 청색 OLED에서 나온 청색광을 그대로 통과시키는 단위 화소와, Red, Green 양자점 색변환층이 배열된 단위화소로 구성된다. 또한 수백 nm 크기의 무기물 나노로드 (Nanorod)를 발광층으로 적용하고, QD 색변환층을 단위화소에 적용한 쿼텀닷 나노 발광다이오드 (QNED: Quantum Dot Nano Emitting Diode)도, 잉크젯 인쇄를 활용하여 QD를 색변환층으로 적용하는 방법으로 개발이 이루어지고 있으며, 이를 위한 잉크젯 인쇄 장비도 함께 개발 진행 중이다. 잉크젯 프린팅을 위한 장비 개발도 국/내외에서 개발이 이루어 지고 있다. 국내의 세메스는 잉크젯 인쇄 장비의 상용화를 위한 장비 개발을 진행 중이며, 연구용 잉크젯 인쇄 장비로는 유니젯, 고산테크 등이 개발 및 상용제품을 출시하고 있다. 또한 미국의Kateeva는 인쇄 공정에서 발생하는 얼룩문제를 자사 노즐 관리 기술로 극복할 수 있다고 발표하기도 하였다.

### 2.2. QD 디스플레이의 기술적 이슈

OLED의 상용화와 함께 디스플레이 기술의 발전은 용액형 소재를 활용하는 양자점 디스플레이로 발전하고 있고, 최근에 많은 연구 기술들이 발표되고 있다. 특히 소재 합성 연구/소자 구조 최적화 연구 위주로 발표되고 있고, 삼성전자 종합기술원은 외부양자 효율 20 % 이상의 EL-QD 소자를 개발하였다.<sup>[1]</sup> 하

지만 대부분의 연구들은 모두 스핀코팅 기반의 공정으로 진행된 연구이다.<sup>[2-3]</sup> 스핀코팅은 용액형 소재를 활용하여 진행할 수 있는 간단한 공정이지만, 패터닝이 불가능 하며, 대면적 기판에 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 현재 스핀코팅 기반의 연구들은 소재의 성능을 검증하기엔 최적화된 공정이지만, 대면적 Red, Green, Blue 디스플레이로 상용화 될 수 없다. 따라서, 양자점 디스플레이 (더 나아가 양자점 자발광 EL-QD 디스플레이)가 상용화되기 위해서는, 단위 화소에 선택적 Red, Green, Blue 패터닝이 가능한 잉크젯 프린팅 기반의 인쇄 공정 기술의 도입이 매우 필수적이다. 하지만 QD 소재를 잉크젯 프린팅 공정으로 적용한 기술은 많이 보고되고 있지 않다. 그나마 전하전달층 또는 발광층 역할을 하는 소재의 단층 프린팅 또는 droplet 프린팅 수준에 머물고 있다.<sup>[4-6]</sup> 그 이유는, 각각의 단위 화소의 유체를 제어하여 박막을 균일하게 형성하는 기술 및 화소 박막의 안정화 기술이 확보되지 않았기 때문이다. 화소 박막의 불균일성은 소자 성능 (휘도, 효율, 수명)의 저하를 초래하며, 또한 디스플레이의 위치에 따라 불균일한 색 특성이 나타남을 초래할 수 있다. 또한 2종 이상의 적층 프린팅 공정 기술의 난이도가 높다는 것도 기술적 이슈로 작용하고 있다. 현재 개발 수준에서 디스플레이 발광을 위한 모든 층을 프린팅 공정으로 수행하는 연구는, 적층 화소 박막의 불균일성<sup>[4-5]</sup> 상/하부층의 intermixing,<sup>[7]</sup> 소재 선택의 적합성 등의 기술적 이슈가 존재하고 있다.

## 2.3. 잉크젯 프린팅 기술 적용을 위한 QD 디스플레이의 도전 과제

### 2.3.1. 재료의 잉크화

용액형 재료는 인쇄 공정에 모두 적용할 수 있다. 하지만 잉크젯 인쇄 공정을 위한 잉크의 요구 조건은 매우 까다롭다. 그 이유는 잉크젯 장비와의 호환성이 중요하기 때문이다. 단지 용액이라는 재료만으로 잉크젯 인쇄 장비에 적용할 수 없는 이유가 이 때문이다. 즉, 잉크 자체의 전기/광학 물성이 요구되면서, 동시에 장비에서의 노즐 막힘 방지, 안정적 잉크 토출 등이 가능할 수 있는 잉크화가 요구된다. 게다가 디스플레이 패널에 적용하기 위한 잉크는 잘 마르지 않는

특성의 비 휘발 용매를 활용해야 하는 특징이 있다. 그 이유는 잉크젯 프린팅 공정으로 디스플레이 패널을 개발하기 위해서는, 인쇄 및 건조 공정이 필수적인데, 패널 한 장에 하나의 소재를 인쇄할 때의 속도가 2~3분 소요된다고 가정한다면, 초기에 인쇄되는 화소와 마지막에 인쇄되는 화소의 균일화를 위해서 인쇄되는 동안에 화소 내에 토출된 잉크는 마르지 않거나 화소 내에서 액적이 유동이 없어야 하기 때문이다. 하지만 현재 개발되는 QD소재 또는 전하전달층 소재들은 잘 마르거나, 1분 이내에 액적의 유동이 발생하는 용매를 기반으로 개발이 이루어 지기 때문에, 이들을 잉크젯 프린팅 공정의 잉크로 적용할 수 없을 것이다. 강조하자면 스핀코팅이 가능한 용액소재는, 잉크젯 인쇄 공정에 적용할 수 없을 확률이 높을 것이다. 따라서 디스플레이 패널에 적용할 수 있는 잉크젯 프린팅 용 잉크의 개발은 매우 한정적인 조건을 가지고 있지만, 반드시 별도로 개발이 이루어 져야 한다.

### 2.3.2. 안정적 잉크 토출

현재 개발되고 있는 용액형 잉크 소재들의 점도, 표면장력, 밀도 등이 모두 다르기 때문에 잉크젯 토출을 위한 인가전압의 형태도 매우 다양하다. 하지만 아직까지 재료 사용에 따라 인가 전압파형의 정량화된 표준은 존재하지 않으며, 실험적으로 안정적으로 잉크가 토출 될 때까지 인가 전압파형을 맞추어야 하는 번거로움이 있다. 또한 사용되는 잉크젯 프린팅 장비와 노즐헤드에 따라서도 토출의 경향성이 매우 다를 것이다. 실제 산업계에서는 개발된 잉크 소재가 있다고 하더라도 안정적인 잉크 토출을 위해서 인가전압을 제어하기 위해 많은 시간이 소요되기도 한다. 불 안정적인 잉크 토출은 같은 단위화소 내에 형성되는 박막의 두께를 변화시킬 수 있고, 인접 화소에 영향을 줄 수 있기 때문에, 소재별로 모두 안정적인 잉크 토출을 맞추어 놓고 잉크젯 프린팅 공정이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 잉크 소재 물성과 인쇄 노즐 스펙에 따라 안정적인 토출의 경향을 예측할 수 있는 연구 개발이 필요할 것이다.

### 2.3.3. 화소 박막의 균일성

현재 상용화된 진공 증착 공정의 가장 큰 장점은 단

위 화소에 소재를 균일하게 형성할 수 있다는 것이다. 하지만 잉크젯 프린팅 공정은 단위 화소에 잉크 토출 후 건조 과정을 통해서 박막이 형성되기 때문에 이 과정 속에서 불 균일한 박막이 형성될 수 있다. 잉크의 종류마다 건조되는 경향은 모두 다르기 때문에 정량적인 건조 공정이 확립되지 못하는 것도 불 균일한 박막 특성이 관찰되는 이유이기도 하다. 균일하지 않는 박막은 디스플레이 성능의 수명, 효율 및 색 표현에 문제가 될 수 있기 때문에 반드시 화소 박막의 균일화 이슈는 해결되어야 할 도전적인 과제이다.

### 2.3.4. 고 해상도

현재의 진공 증착 공정은 ~1000 ppi 급의 고해상도를 구현할 수 있다. 하지만 잉크젯 프린팅은 인쇄 장비의 한계로 인해서 현재까지 가능한 수준은 200~300 ppi 수준이다. 한 예로, 10 pL의 노즐 헤드를 사용하여 토출 되는 액적의 지름은 약 ~50 um이다. 이는 약 75 ppi 수준의 55인치 UHD 패널 디스플레이에는 대응이 가능하지만, 그 이상의 해상도에는 대응이 불가능하다. 또 다른 예시로 2.4 pL의 노즐헤드를 사용하여 토출 되는 액적의 지름은 약 ~20 um이다. 이는 약 220 ppi 수준의 20인치 UHD 패널 디스플레이에는 대응이 가능할 것이다. 잉크젯 프린팅 공정으로 개발할 수 있는 디스플레이의 해상도는 사용되는 장비 및 노즐헤드의 스펙에 따라 변화되겠지만, 현재까지는 IT 용 디스플레이 패널의 응용을 위한 해상도 급으로 적용이 가능할 것이다. 잉크젯 프린팅 공정으로 고 해상도 디스플레이를 위해서는, 더 작은 화소에 잉크 액적을 넣을 수 있는, 선택적 화소 표면처리 기술의 개발, 또는 근본적인 성능이 뛰어난 인쇄 장비/노즐의 개발이 이루어 져야 할 것이다.

### 참고문헌

[1] Y.-H. Won, O. Cho, T. Kim, D.-Y. Chung, T. Kim, H. Chung, H. Jang, J. Lee, D. Kim, E. Jang, *Nature* **575**, 634 (2019).  
 [2] Y. Yu, Y. Liang, J. Yong, T. Li, M. S. Hossain, Y. Liu, Y. Hu, K. Ganesan, E. Skafidas, *Advanced*

*Functional Materials*, **32**, 2106387 (2022).

[3] N. N. Mude, S. J. Kim, R. Lampandea, J. H. Kwon, *Nanoscale Advances*, **4**, 904 (2022).  
 [4] H. Roh, D. Ko, D. Y. Shin, J. H. Chang, D. Hahm, W. K. Bae, C. Lee, J. Y. Kim, J. Kwak, *Advanced Optical Materials*, **9**, 2002129 (2021).  
 [5] C. Wei, W. Su, J. Li, B. Xu, Q. Shan, Y. Wu, F. Zhang, M. Luo, H. Xiang, Z. Cui, H. Zeng, *Advanced Materials*, **34**, 2107798 (2022).  
 [6] S.-J. Ho, H.-C. Hsu, C.-W. Yeh, H.-S. Chen, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 3334 (2020).  
 [7] W. Sun, L. Xie, X. Guo, W. Su, Q. Zhang, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 58369 (2020).

### 저자약력

#### 김준영



- 2014년 8월 ~ 2018년 8월 : LG Display 선임연구원
- 2016년 11월 ~ 2018년 8월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2018년 9월 ~ 2022년 8월 : 경상국립대 반도체공학과 조교수
- 2022년 9월 ~ 현재 : 경상국립대 반도체 공학과 부교수

• 관심분야 : 잉크젯 프린팅 공정 기반의 디스플레이 제조 기술