

전자 재료용 잉크젯 프린팅 기술 개발의 어려움

다양한 응용분야에서 개발되고 있는 전자 재료용 잉크젯 프린팅 기술은 잉크 · 잉크젯 헤드 · 장비, 잉크젯 공정, 전처리 공정, 후처리 공정 등 다양한 기술을 필요로 하며, 또한 전자 재료용 잉크젯 프린팅 기술에는 기존의 데스크톱 잉크젯 프린팅보다 더 높은 수준의 기술이 요구되고 있다. 특히 프린팅 균일성의 확보, 정확한 위치에 정확한 폭과 두께의 deposition 구현, 잉크젯 공정의 신뢰성 확보, 요구되는 전자적 성능 및 품질 그리고 제품의 신뢰성을 확보할 수 있는 잉크 재료를 확보해야 하는 등 기술 개발의 어려움을 소개한다.

전자 재료 잉크젯 프린팅 기술 동향

프린팅 기술을 이용하여 FPD를 제조하려는 것은 이미 대세이다. 이러한 대변화(paradigm shift)는 이미 시작되었고 이에 따라 각 응용 분야에 필요한 전용 장비 및 공정이 개발되고 있다. 그동안 고정도 대면적의 패턴이 필요한 제품을 제조하는 기술의 기반은 photolithography로 지금까지 성공적인 제조 방식이었다. 그러나 이는 진공 공정과 높은 청정도가 요구되는 방식으로 태생적으로 높은

장비 투자, 공정 그리고 재료비용으로 제조 원가가 높은 공정이다. 또한 LCD, PDP, OLED 등 다양한 디스플레이 방식간의 치열한 가격 경쟁 그리고 대면적화에 따른 기존 기술의 한계 등으로 더 가격 경쟁력이 있는 새로운 제조 방식이 요구되고 있다. 이러한 디스플레이 산업의 저렴함 제조 기술의 요구로 잉크젯 프린팅 기술을 포함한 다양한 프린팅 기술이 디스플레이 제조에 도입되고 있다.

프린팅 기술은 이미 다양한 산업 분야에 적용되어 사용되고 있으며 이러한 기술을 기반으로 전자 제품에서 요구하는 보다 진보

된 프린팅 기술이 요구되고 있다. 또 새로운 개념의 프린팅 기술이 개발되기도 하고 다양한 기술이 융합(fusion)되어 필요한 기술이 개발되고 있다. 잉크젯 프린팅 기술은 이러한 기술의 선두주자로 적극적으로 개발되고 있다.

전자 재료 잉크젯 프린팅 기술의 요구 사항

잉크젯 프린팅 기술의 장점은 pL 단위의 정량 제어 특성, 디지털방식의 유연 제조 방식, 고정도 고속 프린팅, 비접촉 Direct 프린팅 방식, 환경 친화적인 방식, 그리고 저렴한 재료 및 공정 비

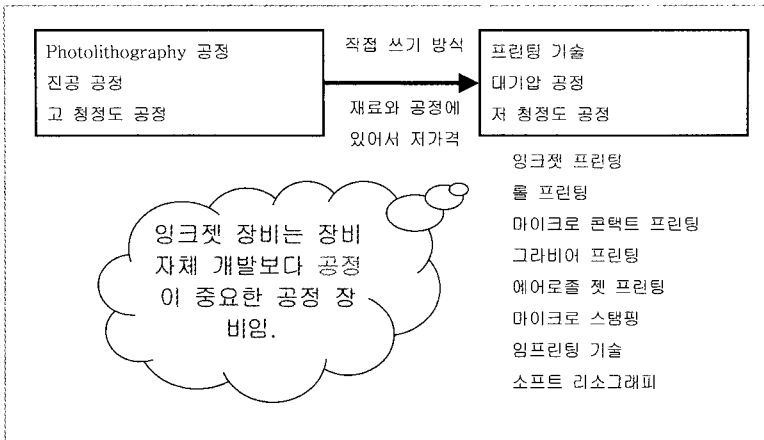


그림 1 전자 제품 제조 방식의 대변환

표 1 전자재료용과 데스크탑용 잉크젯 기술 사양 비교

항목	데스크탑 프린터	FPD용 잉크젯 장비
프린팅 정밀도	$\pm 25 \sim 35 \mu\text{m}$	$< \pm 10 \mu\text{m}$
Droplet 크기 균일성	$\pm 15\%$	$\pm 2\%$
제어 방식	전체가 하나의 Waveform	개별 Nozzle Waveform(DPN)
젯팅 헤드 수명	< 20 억 번	100억 ~ 900억 번
Droplet 분석 기능	없음	필수
헤드 회전 기능	없음	필수
Meniscus 조절 방식	대기압	진공

용 등이다. 이러한 장점 이외에 전자 재료 프린팅을 위해서는 다양한 기술적인 요구 사항이 존재한다.

특히 잉크젯 프린팅 기술을 적용하여 전자 재료를 프린팅하기 위해서는 기존의 잉크젯에서 요구되는 기술보다 더 높은 사양이

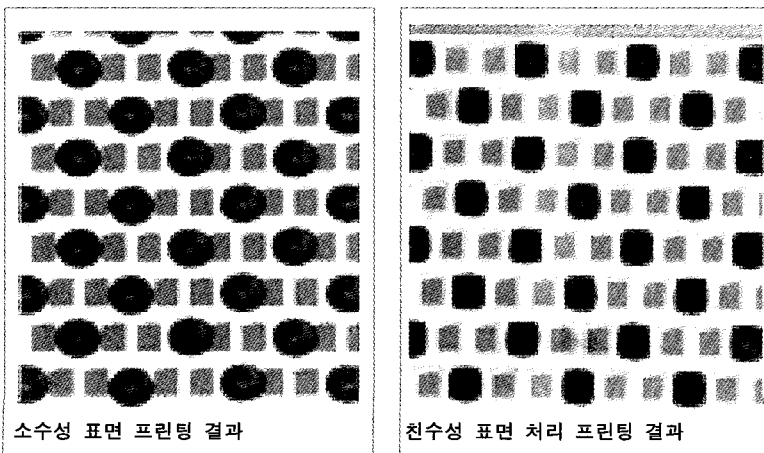


그림 2 표면 상태에 따른 프린팅 결과 사진

요구된다. 표 1은 기존의 프린팅 기술과 전자재료에서 요구되는 프린팅 기술의 차이를 나타낸다. 더욱이 전자 재료 잉크젯 프린팅 기술은 단순히 프린팅을 하는 것 이외에 deposition된 재료가 요구되는 품질 및 성능 그리고 장시간의 신뢰성이 나와야 하기 때문에 더 높은 수준의 ink 재료 및 formulation 기술이 요구된다.

전자 재료의 잉크젯 프린팅에서 요구되는 기술은 프린팅 균일성의 확보, 정확한 위치에 정확한 폭과 두께의 deposition 구현, 잉크젯 공정의 신뢰성 확보, 요구되는 전자적 성능 및 품질 그리고 제품의 신뢰성을 확보할 수 있는 잉크 재료를 확보하는 것이다.

잉크젯 프린팅 기술을 개발하면서 가장 중요한 문제는 전자 제품에서 요구되는 프린팅의 균일성을 확보하는 것이다. 이는 근본적으로 잉크젯 헤드와 잉크의 물리적 특성 즉 잉크젯 헤드의 제조 공차, nozzle 간의 crosstalk, 잉크젯 헤드의 구조, 잉크젯 헤드의 온도 변화, 잉크의 특성(wetting, drying 등), 잉크젯 공정 조건 등에 기인하여 근본적으로 헤드 또는 잉크의 개선이 필요하나 기술적인 어려움으로 잉크, 잉크젯 공정, 잉크젯 장비, 건조 공정 등의 최적화로 균일성 문제를 보완하여 해결하고 있다. 특히 잉크는 잉크젯 프린팅 기술에서 가장 중요한 요소로 drying 공정과 더불어 전 면적

에서 균일한 두께를 유지하는 데 중요한 역할을 한다.

표 1에서 보듯이 잉크젯 프린팅 자체는 큰 프린팅 오차를 가지고 있다. 이러한 프린팅 오차는 실제로 전자 재료 잉크의 프린팅에 큰 문제가 될 수 있으나, 프린팅하고자 하는 면을 친수성 그리고 발수성으로 처리하여 잉크가 프린팅되기 원하는 친수성 표면으로 self-align되는 특성을 이용하므로 프린팅 정밀도는 큰 문제가 아니다. 더욱이 표면에 특별한 aspect 비의 groove를 형성하여 주고 이에 상응하는 접촉각(contact angle)이 되도록 표면 처리하여 주면 이러한 특성만으로도 micro fluid의 motion을 제어하여 4 μ m 폭까지 균일한 line pattern을 정확하게 형성하는 것이 가능하다.

전자 재료 잉크젯 공정 개발의 어려움

잉크젯 공정 기술의 개발은 단지 잉크젯 기술 자체로만 제한되지 않는다. 즉 잉크젯 공정 기술 이외에 잉크젯 프린팅 결과를 향상시켜주기 위한 전처리 기술 그리고 잉크젯 프린팅 후 요구되는 후처리 공정까지 같이 개발되어야 한다. 이러한 공정 기술이 모두 개발되지 않으면 잉크젯 프린팅 기술이 FPD 제조에 적용될 수 없다. 이러한 기술의 개발은 많은 시간과 노력이 요구되는 것

으로서 장기간의 개발 투자와 노력이 없이는 불가능한 어려운 과제이다.

가장 쉬운 전처리 공정 기술은 잉크 방울의 퍼짐을 조절하기 위하여 substrate 표면의 에너지를 조절하여 주는 것이다. 일반적으로 플라즈마 처리하여 친수성 또는 발수성 특성을 향상시킨다. 잉크젯 기술로 30 μ m line을 형성하기 위해서는 3 μ l(17.8 μ m) 방울로 프린팅을 하여도 최대한 퍼짐을 방지하여야만 가능하다. 따라서 자재 표면을 잉크 방울이 퍼지지 않게 coating하여 주거나 플라즈마로 처리하여 발수성을 만들어주면 30 μ m line을 얻을 수 있다. Color filter같이 요구되는 pixel면에만 잉크가 들어

가도록 친수성 처리를 하여 줄 수 있다. 이때 패턴을 형성하여 주는 BM(Black Material) 또는 BR(Black Resin)은 기본적으로 발수성 특성을 가진 재료로 만들어주면 잉크가 떨어져서 표면 에너지 차이에 의하여 모두 친수성의 pixel 내부로 들어가게 된다. 일부 개발자들은 더 큰 표면 에너지 차이를 주기 위하여 친수성 그리고 발수성 처리를 하여 주기도 한다. 더 중요한 것은 BM 또는 BR 측면을 친수성으로 처리하여 잉크가 pixel의 구석까지 채워지게 하여야 한다.

표면 처리 방법 이외에 groove의 morphology를 제어하여 아래와 같이 원하는 패턴을 얻는 방법도 개발되어 있다. 즉 요구되

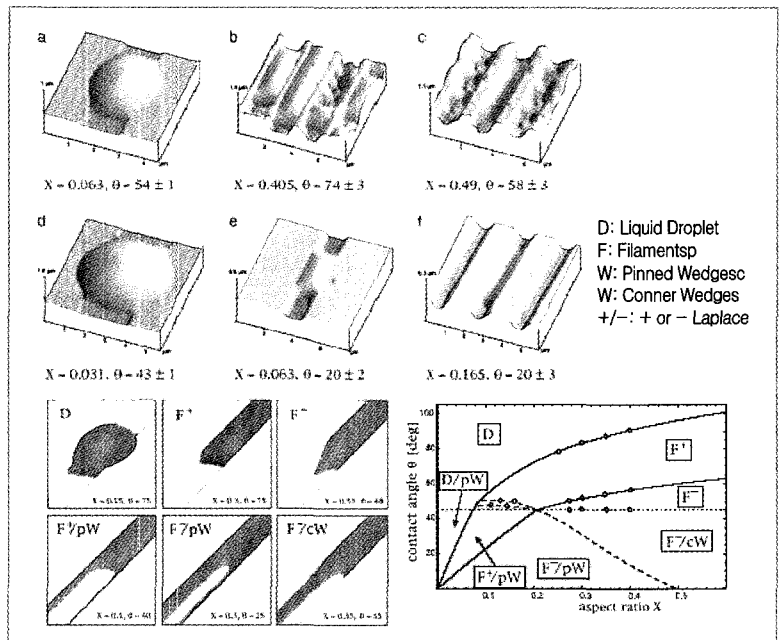


그림 3 형태학과 접촉각에 따른 잉크 퍼짐 변화 (1848-1852, PNAS, Vol. 102, No. 6, 2005)

는 패턴을 얻기 위하여 요구되는 groove의 aspect ratio와 이에 상응하는 표면 에너지를 만들어 주면 방울이 떨어진 후에 groove의 모세관 힘에 의하여 잉크 방울이 자동으로 요구되는 패턴을 형성하는 방법도 개발되어 있다. 이러한 기술을 이용하여 4 μ m line을 쉽게 형성할 수 있다. 그러나 이러한 기술이 상용화하기에는 아직 groove를 형성하는 데 소요되는 비용이 커서 어려움이 있다.

잉크젯 공정 기술 자체도 개발이 쉽지 않다. 잉크젯 기술 개발을 하려면 표 2와 같이 다양한 분야에 많은 요소들이 관련되어 있고 또 이 모든 요소들이 서로 내부적으로 긴밀하게 관련이 되어 있다는 것이다. 따라서 하나의 요소만 변경하여도 이에 따라서 다른 분야의 요소들에도 영향을 주기 때문에 거의 모든 부분을

새롭게 개발 또는 조절하여 주어야 하고 또 그 결과를 모두 검증하여야 한다. 예를 들면 모든 검증이 완료된 잉크와 공정 그리고 제품이 있는데 요구되는 line 폭을 단지 100 μ m에서 50 μ m로 더 작게 하려면 단지 잉크 방울을 작게 하여 프린팅하는 것으로 성취될 수 없다. 잉크 방울이 줄어든 만큼 line의 두께가 줄어 들고 또 drying되는 상태가 달라져서 fine line edge definition을 얻으려면 Ink formulation을 조절하여야 한다. 또한 프린팅을 위한 방울의 간격을 조절하여야 하고 이에 따른 퍼짐을 조절하기 위하여 전처리 공정도 다시 조절하여야 한다. 물론 이 모든 요소들이 조절되어야 하고 최적화를 위한 반복 실험도 다시 수행하여야 한다. 최소한 수개월의 시간이 소요되는 일이고 만일 선 폭을 30 μ m로 줄이려면 이에 맞는

nozzle 크기의 head를 써야 하므로 장비를 새로 개발하여야 할 수도 있고 더 많은 시간이 소요될 것이다.

잉크젯 공정이 성공적으로 개발되어도 요구되는 특성을 얻기 위해서는 후처리 공정도 개발되어야 한다. 후처리 공정은 그림 4와 같이 요구되는 형상을 만들고 특성을 얻기 위한 후속 공정으로 일반적으로 drying 공정을 의미한다. Drying 공정을 개발하는 것은 잉크의 drying 특성과 drying 조건을 최적화하여 주는 것이다. 때로는 특별한 drying 방법의 개발이 필요하다. 가장 중요한 점은 잉크의 drying 특성을 조절하여야 하기 때문에 잉크 formulation을 최적화하여야 한다. 일반적으로 잉크의 drying 특성은 다양한 solvent를 합성하여 요구되는 drying 특성의 ink를 만들어내고 또 특별한

표 2 잉크젯 기술 변수들

잉크 특성	젯팅 특성	잉크-자재 상호 작용	결과 사양
점도 표면장력 채널에서의 흐름성 파티클 크기 분산 전도성 폐하 지수, 무게 고형분 포함량 음속도 콜로이드 안정성 건조 특성 캐리어 종류	주파수 젯팅 속도 Droplet 균일성 Droplet 크기 조절 No Satellite 꼬리 절단 길이 직진성 노즐과 젖음 특성 잉크와 적합성 노즐 막힘 젯팅 신뢰성 젯팅 조건	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 자재와 젖음 온도 퍼짐 특성 건조 시간 및 온도 표면 극성 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> 젯팅 헤드 헤드 형태 / 재료 노즐 크기 Waveform 조절 음파 간섭 채널 젖음 특성 </div>	선 두께와 폭 선 가장자리 균일성 접착성 소결 방법 소결 온도 소결 시간 전도성 장시간 열적 신뢰성 고온 저항 특성 마도 특성 기포 또는 균열 없음 내화학적
장비	프린팅 속도, 잉크젯 드라이브 방법, 젯팅 높이, 유지보수, 진동, 패턴링 순서, 자동 정렬, 반복성, 잉크 공급		

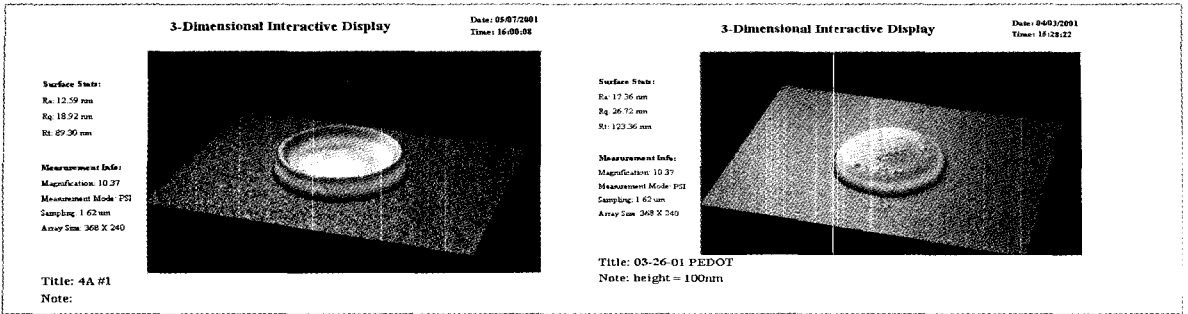


그림 4 잉크와 건조 조건에 따른 프린팅 결과

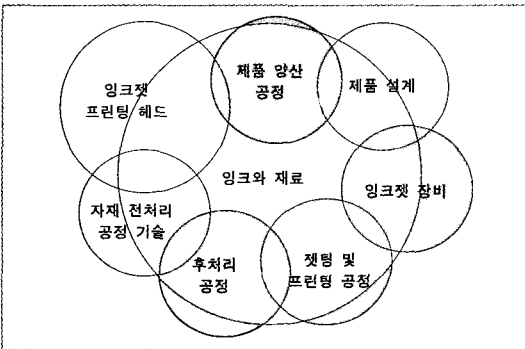


그림 5 잉크젯 기술의 구성

polymer를 적용하여 drying 특성을 향상시키기도 한다. Ink가 다시 formulation이 되면 최종 검증을 위해서 모든 항목이 다시 평가되어 검증되어야만 한다. 이는 반복적인 ink formulation과 이를 검증하는 것으로 많은 시간과 노력이 요구된다. 이를 효율적으로 수행하기 위해서는 잉크 개발 그리고 결과 평가 및 검증에 대한 많은 경험과 know how를 필요로 한다.

전자 재료 잉크젯 공정 개발의 해결책

잉크젯 기술을 적용하여

application을 개발하려면 잉크, 잉크젯 헤드, 잉크젯 프린팅 장비 및 공정, 전처리 장비 및 공정, 후처리 장비 및 공정 그리고 자재 설계 및 개발 등 모든 부분의 개발이 같이 수행되어야 한다. 프

린팅된 결과를 종합 분석하고 이에 따라 각 분야에서 이를 해결할 수 있는 방안을 마련해 주어야 한다. 특히 잉크업체와의 긴밀한 공조가 필수적이다. 프린팅 결과를 평가 분석할 수 있는 다양한 장비 및 이에 대한 know how도 중요한 도구이다. 특히 평가하여야 할 결과물의 수가 많을 때 자동화된 측정 및 평가 장비의 개발이 필요하다. 또한 가장 많은 시간이 요구되는 잉크 개발의 시간을 단축시키기 위하여 combinatorial 방식에 의한 개발 방법을 적용하는 것이 중요하다. 즉 combinatorial 방식에 의하여 다양한 ink formulation

을 만들어주고 이를 자동으로 평가하여 database를 만들어서 이를 평가하게 해 주는 system적인 방법의 적용은 공정 개발에 소요되는 많은 시간의 단축해 줄 것이다.

맺음말

전자 재료 잉크젯 프린팅 기술이 많은 이점이 있고 이를 개발하려고 하지만 단지 전자 재료 잉크젯 프린팅 기술은 단순히 프린팅만 하면 되는 것이 아니다. 요구되는 사양을 만족하기 위해서 전처리 공정을 수행하고, 복잡한 상호관계를 가지고 있는 요소들을 최적화시켜야 하고, 또한 후처리 공정도 수행하여야 한다. 이러한 개발은 최소 수년이 걸리고 있다. 이러한 개발의 어려움을 극복하고 빠른 시간 내에 최적을 결과를 얻기 위하여 combinatorial 방식의 개발이 필요하다. 이를 위한 체계적인 개발이 잉크젯 프린팅 기술을 적용하는 데 많은 도움을 줄 것이다.