



## 인쇄전자소자를 위한 정전기젯 프린팅 기술

글 \_ 변도영  
성균관대학교

오늘날 인쇄기술은 문자 인쇄만이 아닌 전자소자 공정, 재료공정, 바이오 분야 등에서도 핵심기술의 하나로 여겨지고 있으며 관련 연구가 대학 및 기업에서 매우 활발히 이루어지고 있다. 그중 최근 들어 기존 사진(Lithography) 공정을 대체하는 친환경적이며 높은 균일도 및 해상도의 패턴 구현이 가능한 전기수력학 바탕의 프린팅 방식이 대두되고 있으며 이를 이용해 많은 공정에 적용하고자 노력하고 있다. 특히 롤투롤 연속공정(Roll-to-roll)에 접목되어 인쇄속도를 증진하고 인쇄 정밀도를 개선하여 디스플레이, 유연디스플레이, 태양전지 분야에 이르기까지 정전기젯 프린팅 기술의 활용 가능성은 매우 높다고 판단된다. 정전기 젯 프린팅은 1에서 20,000 cP 이상의 광범위한 점도의 잉크를 토출하여 패턴링 할 수 있고, 노즐의 선택에 따라서 마이크로스케일에서 나노스케일까지 패턴링을 수행할 수 있다. 따라서 본 원고에서는 정전기젯 프린팅의 원리 및 개발 동향, 그리고 몇 가지 가능한 응용 공정에 대해서 소개하였다.

### 1. 서론

인쇄기술은 인류 역사상 가장 위대한 기술적 진보 중에 하나이다. 인쇄기술을 이용함으로써 역사를 기록하고 각 시대의 사상을 전파할 수 있었다. 우리나라는 1232년에 세계 최초로 금속활자를 개발하여 이를 책의 인쇄에 적용하는 등 고도의 기술을 갖고 있었다. 이는 독일의 Johannes Gutenberg가 금속활자를 개발한 시기보다 무

려 200여년이나 앞서 있었다. 이러한 우리의 우수한 인쇄기술의 역사를 이어받아 나노기술이 중요하게 등장하면서 패러다임이 변화하고 있는 시점에 나노 패턴링의 원천기술 개발이 요구되고 있다. 오늘날 이용되고 있는 인쇄기술에는 5가지가 있다 (Fig. 1). 플렉소 기법과 같은 양각인쇄(relief), 그라비아 프린팅의 음각인쇄(intaglio or gravure), 리소그래피(lithography), 스크린 인쇄(screen), 잉크젯(inkjet printings) 등이 일상생활에서 다양한 인쇄 작업에 이용되고 있다. 잉크젯 프린팅을 제외한 4가지 기법은 스탬프와 같은 몰드의 접촉에 의하여 패턴을 전달, 형성하나 잉크젯 인쇄는 잉크 액적을 분사함으로써 패턴을 형성한다.<sup>1)</sup> 접촉에 의하여 패턴링이 전사되는 프린팅 기법은 대량생산에 유리한 롤투롤 공정에 적용되어 광범위하게 사용되고 있으며, 몰드의 공정기술과 잉크전사기술에 패턴의 정교성과 미세패터닝의 가능성이 의존한다. 특히 최근의 디스플레이, 태양전지, 2차전지의 공정 등에 이와 같은 기술들의 적용가능성이 검토되고 있다. 접촉프린팅 기술이기 때문에 기판과 몰드 사이의 잉크 전사 메커니즘이 복잡하고, 나노스케일의 패턴링이 어려운 단점이 있다. 또한 적용할 수 있는 잉크의 점도 등의 관점에서 선택의 폭이 제한적이다. 반면에 비접촉 인쇄기술인 잉크젯 프린팅, 에어로졸젯 프린팅, 정전기젯 프린팅 등은 기판과의 접촉과 관계없이 잉크를 토출하고 패턴링을 수행함으로써 공정의 적용 확대가 용이하다. 그러나 프린팅 기술에 따라서 잉크의 선택의 폭에 제한이 있다는 한계가 있다.

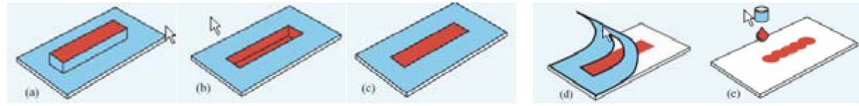


Fig. 1. 주요 인쇄기술 (a) 양각인쇄, (b) 음각인쇄, (c) 리소그래피, (d) 스크린인쇄 (e) 잉크젯 인쇄.

오늘날 인쇄기술은 문자 인쇄만이 아닌 전자소자 공정, 재료공정, 바이오 분야 등에서도 핵심기술의 하나로 여겨지고 있으며 관련 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면 종래의 수 마이크로의 미세 패턴 구현 방식은 수동적인 방식으로서 미세전자소자시스템(MEMS)에 쓰이는 감광제를 이용한 사진 및 현상, 식각 및 도포 기법들을 이용하여 대부분 반도체와 PCB(printed circuit board)와 같은 영역에 널리 쓰이고 있지만 부품들의 집적도가 향상될수록 비례적으로 감소해야 하는 패턴의 해상도는 UV 파장을 이용한 노광의 한계, 마스크의 크기 제약, 지나치게 높은 공정 단가, 낮은 수율 등의 문제점으로 인하여 수동적 방식에서는 적용하기 힘든 추세이며, 수십 마이크로미터 선폭의 전극패턴을 인쇄함으로써 기존 사진(Lithography) 공정을 대체하고자 하는 노력을 수행하고 있다. 특히 압전(Piezoelectric)을 이용한 잉크젯 프린팅 기술은 기존의 복잡한 사진공정을 거치지 않고, 저렴하고, 신속한 방식으로 원하는 패턴을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있어 1990년대 후반 이후 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 여전히 디스플레이, RFID 등의 복잡하고 다양한 패턴을 필요로 하는 생산 공정에 적용하기 위해서는 여러 가지의 문제점을 갖고 있어 연구가 지속되고 있다. 패턴은 빠른 구현이 가능해야 하며, 표면의 균일도는 편차가 적어야 하며, 적재적소에 높은 정확도로 사용이 가능해야 한다. 특히 최근에는 이러한

요구조건에 맞추어 나노스케일의 패턴을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 마이크로스케일에서 더 세밀한 나노스케일에 이르는 패턴링 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

본 원고에서는 마이크로스케일에서 나노스케일까지 패턴링 할 수 있는 기술로서 정전기젯 프린팅 기술을 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. 비접촉 프린팅 기술

Fig. 2와 같이 디스플레이 공정에 프린팅 기술을 이용하면, 기존 사진공정에서 마스크를 사용하여 도포-노광-현상의 3공정을 각각의 R.G.B에 대해 반복함으로써 장비 투자, 공정 비용 및 마스크 사용비 등의 유지보수비가 소요되는데, 이를 1공정으로 단축함으로써, 생산 라인의 수를 증가시킬 수 있으며, 막대한 비용을 절약할 수 있다. 또한 불필요한 재료의 소모가 없으며 폐기물 발생이 적으므로 친환경적인 공정이다. 가장 대표적인 비접촉 프린팅 기술인 잉크젯 공정은 열기포(thermal bubble) 방법과 압전방식으로 구분할 수 있다. 열기포 방법은 단순한 시스템으로 인한 공정의 용이성이라는 장점에도 불구하고 사용가능한 잉크의 제한, 열을 가함으로써 기포를 발생시켜 토출하는 방식이므로 노즐 내에서 잉크가 굳어

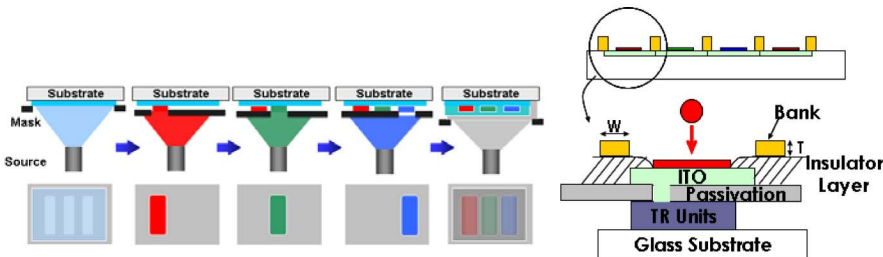


Fig. 2. 디스플레이 제작 공정에서 기존 공정과 잉크젯 공정 개념도 비교.

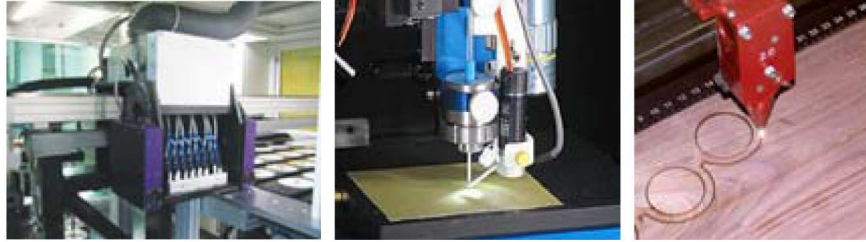


Fig. 3. 잉크젯, 에어로졸젯, 레이저 패터닝 기술(Hanky and Partner, Optomec, Majenta).

버리는 열적 문제로 인하여 산업용에 적용하기에는 한계가 있다. 많은 연구기관에서 압전(Piezoelectric) 방법을 이용하여 산업용 잉크를 인쇄하는 연구가 진행되고 있으나 에지 정밀성(edge resolution), 인쇄두께 균일성(thickness homogeneity), 토출되는 액적의 크기의 한계(20  $\mu\text{m}$ )로 인하여 적용의 어려움이 제기되고 있다. 이러한 한계에도 불구하고 다양한 응용분야에서 실제 적용되고 있다. 대표적인 사례가 LCD 공정에서의 코팅장비로 활용되고 있으며 태양전지 등에서의 확장도 연구개발되고 있다.

Fig. 3에는 잉크젯 외에 에어로졸젯 프린팅 및 레이저 프린팅 기술을 보여주고 있다. 이들 기술들은 모두 원하는 패턴을 직접 형성할 수 있어 잉크젯과 같이 다양한 응용에 적용되고 있다. 특히 에어로졸젯 프린팅 기술은 고점도의 잉크를 이용하여 패터닝이 가능하고 기존의 잉크젯 대비 미세한 패터닝이 가능하여 관심을 받고 있다. 그러나 에어로졸 젯 프린팅 기술은 10  $\mu\text{m}$  이하의 패턴 형성이 어려운 것으로 알려지고 있으며 패턴 주위로 입자 오염이 해결되어야 하는 문제점으로 제시되고 있다. 레이저 패터닝은 대면적 기판에 대한 대응에 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. 이와 같이 각 기술들은 장단점을 갖고 있어 응용 분야의 요구사항에 따라 기술을 선택하

여야 한다. 상기의 기술들은 이미 성공적으로 상용화되어 여러 회사들이 관련 제품을 판매하고 있으며, 여러 응용에 적용하고자 검토하고 있다. 최근에 관심이 집중되고 있는 비접촉식 프린팅 기술로서 정전기젯 프린팅이 최근 개발되어 상용화되었으며 많은 부문에서 관심이 대두되고 있다. 정전기젯 프린팅 기술은 기존 기술들의 한계가 존재하는 부분에서 부족한 성능을 채워줄 수 있다. 세부적인 사항은 다음의 절에서 제시하고자 한다.

## 2.2. 비접촉식 정전기젯 프린팅 메커니즘

앞서 언급한 바와 같이 기존 프린팅 기술의 한계의 대안으로 최근에 전기수력학(electrohydrodynamics; EHD)을 이용한 정전기젯과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 환경친화적인 청정공정기술로서, 반도체 공정의 복잡한 광학 사진(lithography) 방식과 달리 비 접촉식 3D 프린팅 기반 패터닝 방식으로 LCD, OLED, PDP 등의 디스플레이 분야, PCB, RFID, micro lens 등의 전자재료 프린팅 분야와 각종 micro/nano sensor, bio chip, 생물 세포 배양 등의 분야에서 공정기술로 적용되고자 연구개발되고 있다.

Fig. 4와 같이 정전기젯 프린팅 기술은 노즐에 맺혀있

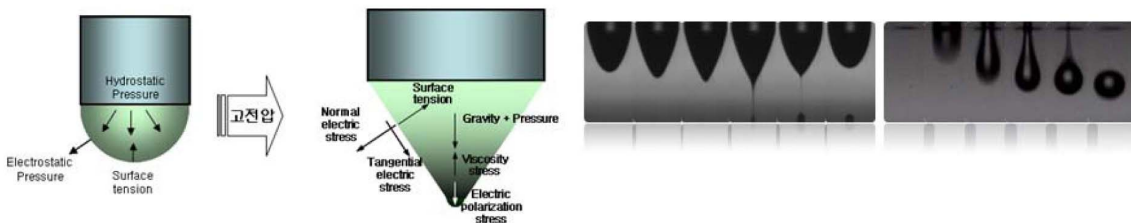


Fig. 4. 정전기력 프린팅 기술의 개략도 및 정전기젯 기법(좌)과 기존 잉크젯 기법(우)의 제팅 이미지.



는 액체는 액면(meniscus)이 갖는 표면에너지가 전기력의 외력에 의한 에너지보다 적을 경우, cone 형태(Taylor cone)의 젯을 통해 토출된다. 정전기젯 프린팅 기술은 기존의 기술과는 달리, 최대 50,000 cPs의 고점도의 잉크에 대한 제팅이 가능하여 고중량비의 패턴 형성이 가능하다는 점이 두드러진다. 또한 외부의 전기력에 의하여 제팅을 하므로 재료에 따라 노즐 구경의 1/10~1/1000의 젯을 형성 할 수 있다. 또한 저점도 잉크의 경우에는 잉크젯과 같이 drop-on-demand 방식으로의 토출도 가능하다. 더불어 기존의 잉크젯 기술과는 다르게 정전기젯 기술은 나노 스케일의 노즐을 통해서도 제팅이 가능하며, 이를 이용하여 나노스케일의 패턴링이 가능하다는 장점이 부각되고 있다. Fig. 4의 제팅 이미지는 정전기젯 프린팅을 이용한 프린팅과 압전방식의 잉크젯 프린팅의 차이점을 보여주고 있다. 정전기젯 프린팅의 경우에는 노즐보다 작은 패턴이 가능하여 노즐의 막힘 문제가 상대적으로 작을 수 있음을 알 수 있으며, 점 프린팅과 선 프린팅이 다양한 점도의 잉크를 이용하여 구현할 수 있다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 노즐상에 존재하는 메니스커스에 작용하는 힘을 중심으로 간단히 모델링을 하면, 표면장력, 중력, 정전기력으로 나눌 수 있다. 액체의 거동을 나타내는 Navier-Stokes 방정식은 식 (1)과 같다. 여기에서  $\rho$ 는 액체의 밀도,  $u$ 는 속도,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,  $\eta$ 는 점성도,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 위 식의 물리적

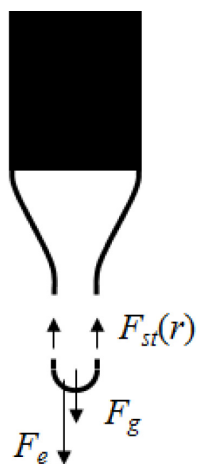


Fig. 5. 정전기 젯 프린팅 기술의 간단한 모델링.

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_e + \rho \vec{g} \quad (1)$$

$$\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} - \frac{1}{2} \nabla |E|^2 + \nabla \left( \frac{1}{2} (\epsilon - \epsilon_0) |E|^2 \right) \quad (2)$$

의미는 액체의 흐름을 표현함에 있어 좌변은 관성력을 의미하며, 우변의 첫 항은 압력에 의한 힘, 둘째 항은 점성력, 셋째 항은 정전기력, 넷째 항은 중력을 의미한다. 여기에서 인가되는 전압에 의한 정전기력은 식(2)와 같이 세가지 항으로 나눌 수 있다. 식(2)에서  $\rho_e$ 는 전하밀도,  $\epsilon$ 은 유전율,  $E$ 는 전기장을 의미한다. 정전기력에서 첫항은 쿨롱힘을 나타내며, 둘째 항과 셋째 항은 유전율과 전기장의 변화에 의한 dielectrophoretic force를 의미한다.

기존의 비접촉 프린팅 기술들이 대부분 기계적 힘을 이용하고 있다. 예를 들어 잉크젯의 경우에는 압전작동기에 의한 압력파에 의한 액적을 토출하고 있으며 에어로졸젯의 경우에는 sheath gas에 의한 에어로졸의 집중을 만들어 패턴링하고 있다. 이와는 달리 정전기젯의 경우에는 노즐 또는 챔버 내부의 힘을 이용하지 않고 외부에 작용하는 정전기력으로 당기는 인력을 활용하고 있다. 따라서 노즐의 크기가 작아도 액적을 토출하는 한계가 존재하지 않으며, 점성이 큰 액체의 경우에도 노즐의 막힘이 존재하지 않는 한 젯 형성이 가능하다. 다만 식(2)에서 보는 바와 같이 액체의 전기전도도, 유전율이 제팅 특성에 미치는 영향이 매우 크다. 액체를 전도성 액체 (fully conductive), 비전도성 액체 (fully dielectric), 약 절연성 액체 (leaky dielectric)로 구분할 수 있으며 이에 따라 작용하는 힘이 다르다. 전도성 액체의 경우에는 메니스커스의 밑단(노즐 팁)과 꼭지점 사이에 전위의 차이가 존재하지 않기 때문에 액면을 따라 작용하는 접선방향의 힘이 작용할 수 없다. 따라서 액면에 직교하여 형성되는 전기장에 의한 정전기력만 존재하며, 이는 압력과 표면장력과 평형을 이루게 된다.

$$p + \frac{\gamma}{2r_i} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_n^2 \quad (3)$$

여기에서  $\gamma$ 는 표면장력,  $r$ 은 접선방향의 곡률반경,  $E_n$



은 직교방향의 전기장 세기를 의미한다. 식 (3)에서 나타내고 있는 바와 같이 전도성 액체의 경우에는 액면에 직교방향의 힘만 존재하며, 따라서 메니스커스의 중심 꼭지점에서 젯이 형성되기가 매우 어렵다. 다만 액면 전체적으로 불안정해짐에 따라 스프레이를 형성할 수는 있다.

대부분의 액체들이 포함되는 약 절연성 액체(leaky dielectric)의 경우에는 전술한 식 (2)의 모든 힘이 액면에 작용하기 때문에 접선방향의 강한 정전기력이 메니스커스를 큰 형태를 띄게 하며, 정전기 젯을 형성할 수 있다. 이 정전기 젯은 인가되는 전압에 의한 정전기력과 액체의 특성(점도, 표면장력)에 따라 Fig. 6과 같이 4가지 모드로 액체의 거동이 나타날 수 있다. 전통적으로 많은 연구가 진행되어온 전기분무와 전기방사의 경우에는 질량 분석기 및 코팅의 분야에서 전기분무가 광범위하게 연구 개발 되었으며, 섬유 나노파이버 등의 분야에서 전기방사의 연구개발이 활발하게 진행되어 왔다.

본 고에서는 액체의 점도와 인가되는 전기적 신호의 적절한 제어를 통하여 Fig. 6의 상단에 있는 2가지 모드가 가능하며 이를 마이크로 및 나노 패터닝에 적용하고 있는 최근의 동향을 소개하고 있다. 이를 통상 정전기젯 프린팅으로 명칭하고 있다. 2가지의 패터닝 모드는 연속선 프린팅, Drop-on-demand 프린팅을 의미한다.

일본과 국내에서 지난 10여년 동안 기초적인 연구를 진행하였으며 최근에 기업에서도 관련 기술을 상용화 하고 다양한 산업 분야에 적용하고자 연구개발하고 있다.

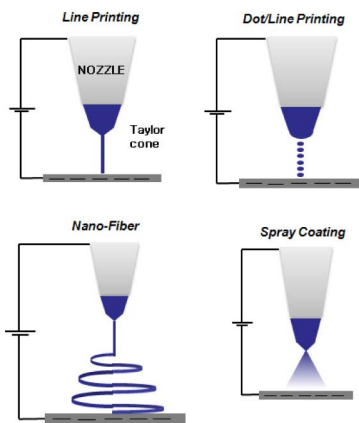


Fig. 6. 정전기력에 의한 젯의 여러 가지 모드.



Fig. 7. 엔젯(주)(www.enjet.co.kr)에서 상용화된 정전기력 프린팅 장비(eNano Printer-Expert).

국내에서는 엔젯(주)가 정전기젯 프린팅 시스템을 상용화하는데 성공하였으며 프린팅 장비를 소개하고 있다 (Fig. 7).

### 2.3. Drop on Demand (요구 시 패턴) 토출 방식과 그 응용

Drop-on-demand 프린팅은 원하는 시점에 원하는 지점에 액적을 토출하여 패터닝하는 기술을 일컫는다. 잉크젯 기술의 액적 분사 방식이 가장 대표적이다. 정전기젯 프린팅에서는 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 고전압의 펄스의 폭, 크기 등을 제어하여 펄스 당 액적 1개를 토출하게 함으로써 프린팅이 가능하게 구현되었다. 특히 노

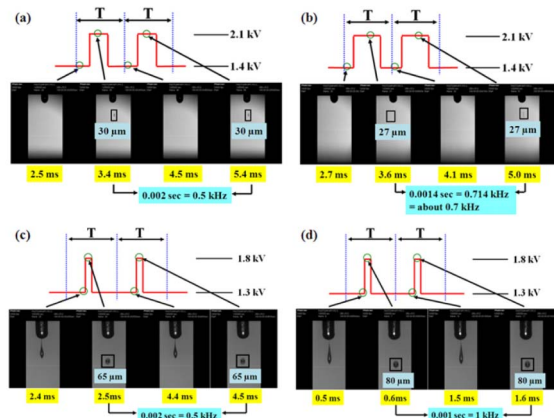


Fig. 8. Drop-on-demand 프린팅 제어.



즐의 크기와 관계없이 토출을 할 수 있기 때문에 잉크젯의 크기 한계와는 달리 나노스케일의 패터닝이 가능하다. Fig. 9는 Ag 잉크를 이용하여 토출하고 있는 사진을 보여주고 있다. 제팅하는 주파수는 약 1 kHz까지 구현함을 보여주고 있으나 액체의 액면 거동에 의존하며 통상 약 5 kHz까지 가능한 것으로 판단된다. 이와 같은 요구 시 패터닝 모드를 이용하면 Fig. 9와 같은 점 형상의 마이크로 스케일 패터닝이 가능하다. 좌측 그림은 펄스의 폭에 따라 패터닝 된 점의 지름이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이는 복수의 액적이 축적되었거나 많은 양의 액체가 토출되어 액적의 크기가 증가되었음을 의미한다. 우측의 결과는 투명한 고분자 물질을 이용하여 마이크로렌즈어레이를 패터닝한 결과를 보여주고 있다. 기존의 잉크젯을 이용한 방법보다 더 작은 렌즈가 구현될 수 있으며, 또한 렌즈의 높이가 더 증가할 수 있어 초점거리가 단축된 렌즈의 제작이 가능하다.

이와 같은 요구 시 패터닝 방식은 리소그래피를 대체하여 전극 패터닝, 반도체 물질 코팅, 절연체 코팅 등에 응용할 수 있다. 미세 패터닝 형성 기술을 디스플레이에 적용하여 LCD 컬러필터 제조, FED 에미터 제조, PDP 재료도포, 유기EL용 유기물질도포 등에 적용가능한 것으로 판단되며, OLED의 유기물 패터닝 등에도 적용할 수 있다. 그 외에도 PCB, 반도체 범프, DNA 칩 제조 및 의료 응용, 초소형 반도체 패키징(CSP/BGA)용 범프 형성, 광전소자용 폴리머 패턴 형성, 광학 스위치 및 마이

크로 렌즈 어레이 등의 MEMS 소자, 생물/세포배양 등이 대표적인 예이다. 직접인쇄 기술을 이용하면 전술한 바와 같이, 1) 공정수가 대폭 줄어들어, 2) 재료의 소모가 없으며 폐기물 발생이 적다. 원하는 곳에만 패턴을 만들 수 있기 때문에 90% 이상의 재료를 버리는 포토공정과 비교할 때 재료의 소모와 폐기물 발생을 대폭 줄일 수 있다. 또한 3) 친 환경적인 공정이기 때문에 폐기물발생이 거의 없으므로 분리, 재처리, 폐기에 따른 비용이 절감된다. 4) 공정시간과 코스트의 대폭적인 절감이 가능하다.

### 2.4. 연속적인 젯을 이용한 프린팅과 그 응용

Fig. 10은 정전기젯 프린팅의 모드 중에서 연속젯을 이용한 프린팅을 보여주고 있다. 우측 사진과 같이 매우 작은 지름의 젯이 형성될 수 있으며 다양한 고점도의 물질을 패터닝이 가능하다. 이는 좌측의 전기방사와 유사한 개념이며 Ohmic 유동인 연속구간에 초점을 두어 패터닝이 가능한 원리이다. 다만, 적용되는 액체가 반드시 전기방사되는 고분자 물질일 필요는 없다. 이와 같은 연속젯 프린팅을 원리를 이용하면 센서, 전자소자 등 다양한 영역에서 패터닝을 할 수 있으며, 아래에는 본 연구팀의 최근 결과인 태양전지 전면전극 형성 예를 보여주고 있다. 태양전지의 상용화를 성공하기 위해서는 단가를 낮추어야 한다는 요구가 필수적이다. 가장 큰 비중을 차지하고 있는 결정질 실리콘 웨이퍼의 생산단가를 더욱 낮추기 위해서 실리콘 웨이퍼의 두께를 200  $\mu\text{m}$  이하로

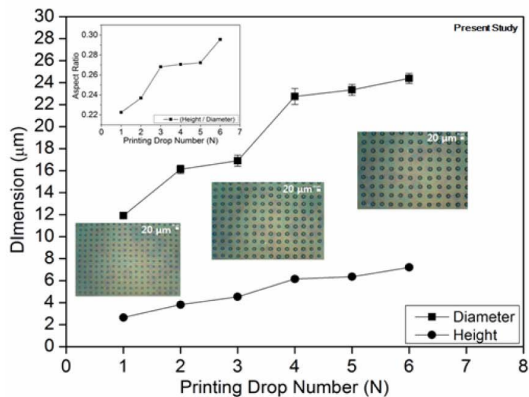
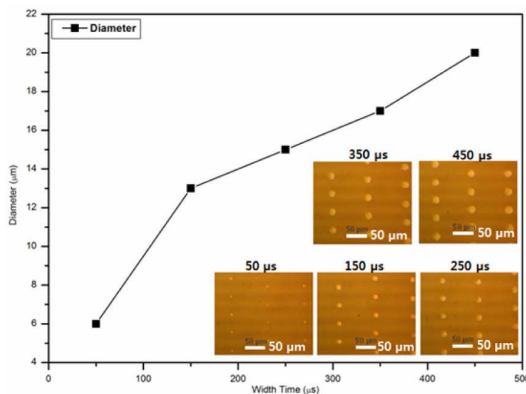


Fig. 9. 인가전압의 펄스에 따른 Dot 직경의 크기(좌) 및 마이크로 렌즈(우).

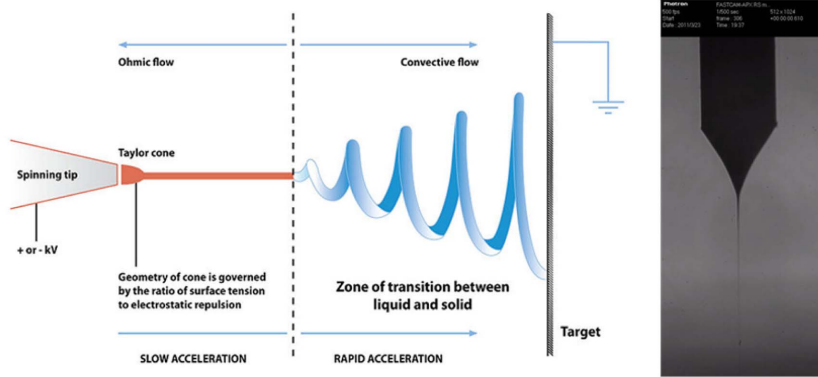


Fig. 10. 연속젯을 이용한 프린팅.

낮춤으로써 단위 무게 당 웨이퍼 생산량의 증대를 도모하고 있다 (Table 1). 이 경우에 태양전지 생산에 있어서 필수적인 공정인 결정질 실리콘 태양전지 웨이퍼 상에 전도성 패턴을 수행하는 공정은 기존에는 접촉 프린팅 방식인 스크린 프린팅을 통해 수행되었으나 Fig. 11과 같이 파손의 가능성 때문에 향후에는 적용될 수 없다. 따라서 많은 기술과 장비들이 비접촉식으로 제안되고 있으나 가장 가능성이 있는 기술들은 잉크젯, 에어로졸젯, 정전기젯 프린팅 기술들이라고 할 수 있다.

정전기젯은 높은 전기장을 인가하였을 때 노즐 구경보다 작은 젯 스트림이 발생하는 현상을 이용하여 미세한 패턴을 수행하기 때문에, 수 마이크로미터급의 입자들을 사용할 수 있으며, 노즐구경이 패턴선폭보다 일반적으로



Fig. 11. 기존 스크린 프린팅 전도성 패턴 형성 시 스쿠지 압력에 의해 파손된 결정질 실리콘 웨이퍼.

Table 1. 결정질 실리콘 웨이퍼 박형화 경향

년도	웨이퍼 두께 ( $\mu\text{m}$ )	와이어 소잉 두께 ( $\mu\text{m}$ )
2005	230~270	200~220
2010	180	160
2020	100	100

더 크기 때문에 노즐 막힘 현상을 완화할 수 있으며, 압전 잉크젯보다 더 높은 점도의 잉크를 젯팅할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 12는 약 30000 cP의 은 페이스트를 정전기젯 프린팅으로 인쇄하여 공정한 태양전지의 사진을 보여주고 있다. 전면전극의 패턴 폭은 약 80  $\mu\text{m}$ 였으며 높이는 약 18  $\mu\text{m}$ 였다. 이와 같이 패턴의 폭이 좁은 전극을 형성함으로써 수광면적을 넓힐 수 있으며 높이를 증가시킴으로써 전기저항을 낮추어 전체적으로 태양전지의 효율을 증진시킬 수 있다. 하지만 스크린 프린팅을 대체할 수 있는 비접촉 프린팅 기술은 연구개발의 단계이다. 최근의 태양전지 시장의 침체와 관련하여 태양전지

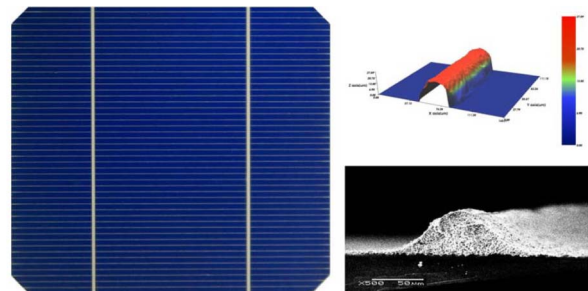


Fig. 12. 태양전지 전면전극 패턴(Width: 80 $\mu\text{m}$  / Height: 18 $\mu\text{m}$ ).



Fig. 13. LCD 컬러필터, 유연디스플레이, 리페어, PCB 응용.

비용 저감 요구에 따라 기본적인 추세는 웨이퍼를 얇게 하고 있으며 이에 따라 비접촉식 프린팅 기술이 요구된다.

### 2.5. 프린팅 기술의 응용연구

프린팅 기술의 산업 응용은 디스플레이 분야에서 매우 중요하게 다루어졌다. 기존의 프린팅 기술들이 적용되어 왔으나 정전기 젯 프린팅의 초미세 패터닝 가능성 및 고 점도 잉크의 프린팅 가능성 등으로 인하여 응용 측면에서 매우 중요한 분야라 할 수 있다. 전술한 바와 같이 잉크젯을 이용하면 접착이 없는 직접인쇄가 가능하고 다른 인쇄기술에 비하여 균일한 코팅이 가능하며 오염물질의 배출이 최소화될 수 있어 많은 연구를 수행하고 있다. 디스플레이 분야는 반도체분야와는 달리 수십 마이크로 크기의 비교적 큰 패턴을 형성하는 경우가 많이 있어 다른 어느 분야보다도 프린팅 공정을 적용할 수 있는 가능성이 많다. TFT-LCD의 컬러필터와 OLED 공정에의 적용은 대표적인 응용의 사례라 할 수 있다 (Fig. 13). 현재까지 연구수준의 제품은 보고되고 있으나 실제 생산 공정에 적용하고 있다는 보고는 없다. 그러나 2013년

CES(Lasvegas, US)에서 일본의 Panasonic은 전체적으로 인쇄공정을 적용한 OLED 디스플레이를 주체발표로 소개함으로써 다시 한번 세계 주요 기업들의 인쇄기술에 대한 주목을 환기시켰다 (Fig. 14). 다양한 인쇄기술들 중에서 구체적으로 사용한 기술과 적용된 물질들에 대한 정보는 아직 공개되지 않고 있으나 성공적인 공정이 가능하다는 사실 자체로 매우 획기적인 뉴스라 할 수 있다.

한편 차세대광전소자로서의 유기태양전지는 기본적으로 인쇄공정을 이용하여 연구개발되고 있다. 가장 대표적인 기술이 슬롯다이 코팅 기술 또는 스프레이 코팅 기술 등이며 최근에는 잉크젯 기술 등을 이용하고 있다 (Fig. 15). 유기태양전지의 핵심 이슈는 변환 효율이다. 비유기 박막이 매우 높은 에너지 변환효율을 내는데 비해서 유기박막은 3~6% 수준을 넘기기 힘든 실정이다. 그러나 유기태양전지는 유연(flexible) 태양전지의 구현이 용이하고 대량생산 측면에서 장점이 있어 창호, 휴대용 기기 (랩탑, 가방 등) 등에 쉽게 응용할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 인쇄기법을 적용한 공정 연구가 효율 증진을 위한 신소재 개발 연구와 함께 많은 주목을

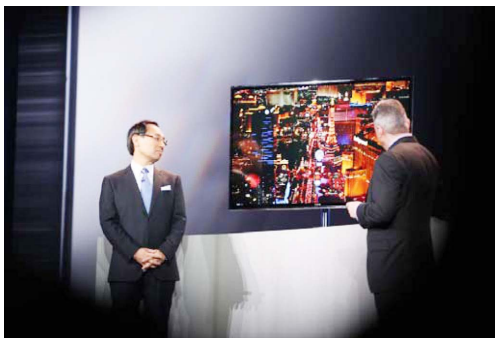


Fig. 14. 인쇄기술을 이용한 OLED 디스플레이 (2013 CES).

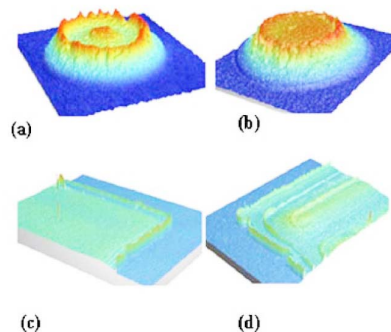


Fig. 15. 잉크젯 프린팅 기법으로 패터닝된 P3HT:PCBM 유기층.<sup>6)</sup>





받고 있다.

일반적으로, 대면적의 태양전지를 (1) 빠르고, (2) 균일한 박막 두께 유지, (3) 자동화 공정시스템으로 만들기 위해서는 프린팅 기법이 적합하다. 잉크젯 프린팅을 이용하여 폴리머:풀러렌(fullerene)으로 만든 활성(active)층을 만드는데 성공한 결과가 보고되었다. 상용 잉크젯 헤드(Fujifilm Dimatix DMP-2831)을 이용, 연속적으로 액적을 분리시켜 도포, 잉크의 점도와 표면 젖음 간의 관계에서 생기는 유기층 상의 핀홀 제거에 관하여 실험적인 연구를 하였다. 이 기법을 통해서 제작된 태양전지는 에너지 변환 효율이 1.4%에 달했다.

앞에서 많은 기술적 가능성과 응용의 다양성을 기술하였으나 잉크가 액상을 띄고 있기 때문에 에지 정밀도, 두께 균일도, 토출되는 액적의 크기의 한계 등이 존재할 수 있으며, 이러한 이슈들을 해결하여 실제 공정에 적용하기 위하여 많은 연구자들과 기업들이 노력하고 있다. 더불어 고려되어야 하는 것은 응용분야에 따른 잉크, 기관, 시스템의 개발이 동시에 진행되어야 한다는 사실이다. 도포물질의 입자 크기, 용제, 분산제 등의 첨가물이 젯의 성능에 영향을 주며 잉크의 점도, 표면장력, 전기전도도 등의 물리화학적 물성에 따라 제팅 및 도포 양상이 크게 변화하게 된다. 이와 관련하여 “coffee stain” 효과라고 일컬어지고 있는 현상이 패터닝에서 세심하게 고려되어야 한다 (Fig. 16). 콜로이드(colloid) 상태의 액적을 이용해서 미세 패턴을 만드는 경우에 그 액적의 용매를 건조

하는 과정에서 내부에 포함된 입자들이 기관 위에 골고루 도포되도록 제어하는 것이 주요한 관건이다. 그러나 일반적으로 콜로이드 액적의 용매가 증발하는 과정에 그 내부에서 유동이 중심에서 가장자리로 발생하고 이러한 내부 유동에 의한 운동량은 내부에 부유하고 있는 미세한 입자들을 액적의 가장자리로 이동시켜, 결국에는 건조 후에 가장자리 부근에서 입자들을 진하게 남기게 된다. 이 현상은 균일한 패터닝 구조물의 생성을 어렵게 하여 디스플레이의 색체의 선명도를 떨어뜨리는 등 문제점을 발생시킨다. 이를 극복하기 위하여 기관의 표면을 소수성을 처리하는 등의 연구들이 수행되고 있다.

### 3. 결론

최근 들어 잉크젯을 이용한 산업공정의 적용과 나노 스케일의 패터닝을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 프린팅 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 정전기력프린팅 기술을 활용한 나노/마이크로 패터닝 기술은 위에서 언급한바와 같이 기술적 접근성이 매우 좋다고 판단되며, 현재 여러 분야에서 적용하기 위한 재현성이 입증되어가고 있는 단계이기 때문에 경쟁력 있는 공정으로 그 확고한 위치를 구축할 것으로 기대하고 있다. 특히 롤투를 공정에 접목되어 인쇄속도를 증진하고 여러 기술적 진보를 바탕으로 인쇄 정밀도를 개선하면 평판디스플레이 뿐만 아니라 유연디

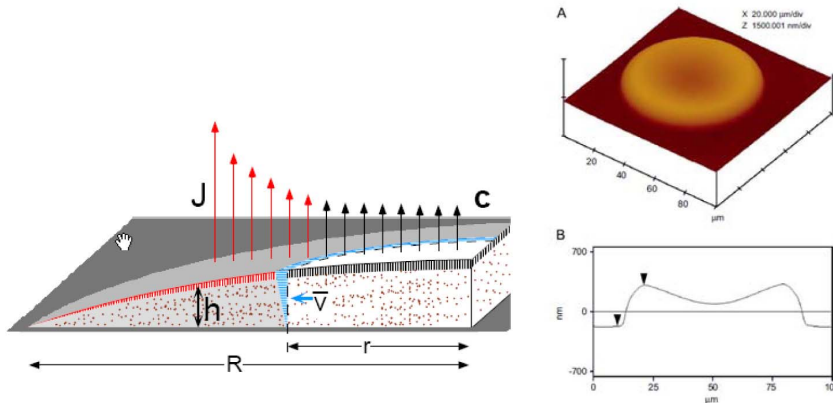


Fig. 16. Coffee stain<sup>7)</sup> 및 AFM을 이용한 패턴 프로파일.<sup>8)</sup>



스플레이 분야에 이르기까지 잉크젯 기술의 활용 가능성은 매우 높다고 판단된다.

## 참고문헌

1. C. S. Kim, S. J. Park, W. Sim, Y. J. Kim, and Y. Yoo, "Modeling and Characterization of an Industrial Inkjet Head for Micro-Patterning on Printed Circuit Boards," *Computers & Fluids*, **38** 602-12 (2009).
2. S. Lee, D. Byun, D. Jung, J. Y. Choi, Y. Kim, J. H. Yang, S. U. Son, B. Q. Tran Si, and H. S. Ko, "Pole-Type Ground Electrode in Nozzle for Electrostatic Field Induced Drop-on-Demand Inkjet Head," *Sensors and Actuators*, **A 141** 506-14 (2007).
3. J. Choi, Y.J. Kim, S. Lee, S. U. Son, H. S. Ko, V. D. Nguyen, and D. Byun, "Drop-On-Demand Printing of Conductive Ink by Electrostatic Field Induced Inkjet Head," *Appl. Phys. Lett.*, **93** 193508 (2008).
4. D. Byun, Y. Lee, S. B. Q. Tran, V. D. Nugyen, S. Kim, B. Park, S. Lee, N. Inamdar, and H. H. Bau, "Electrospray on Super-Hydrophobic Nozzle Treated by Ar and Oxygen Plasma," *Appl. Phys. Lett.*, **92** 093507 (2008).
5. V. D. Nguyen and D. Byun, "Mechanism of Electrohydrodynamic (EHD) Printing Based on ac Voltage Without an Electrode on the Nozzle," *Appl. Phys. Lett.*, **94** 173509 (2009).
6. T. Aernouts, T. Aleksandrov, C. Giroto, J. Genoe, and J. Poortmans, "Polymer Based Organic Solar Cells Using Ink-Jet Printed Active Layers," *Appl. Phys. Lett.*, **92** 033306 (2008).
7. R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, and T. A. Witten, "Capillary Flow as the Cause of Ring Stains from Dried Liquid Drops," *Nature*, **389** 827 (1997).
8. A. J. Lennon, R. Y. Utama, M. A.T. Lenio, A.W.Y. Ho-Baillie, N. B. Kuepper, and S. R. Wenham, "Forming Openings to Semiconductor Layers of Silicon Solar Cells by Inkjet Printing," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **92** [11] 1410-15 (2008).

## ◎◎ 변도영



- 2000년 한국과학기술원 기계공학과 박사
- 2000년 한국과학기술기획평가원 연구위원
- 2003년 건국대학교 기계항공공학부 조교수, 부교수
- 2012년 성균관대학교 기계공학과 교수