

인쇄전자소자를 위한 잉크젯 프린팅 기술

변도영 | 건국대학교 항공우주정보시스템공학과, 교수 | e-mail : dybyun@konkuk.ac.kr

오늘날 인쇄기술은 문자 인쇄만이 아닌 전자소자공정, 재료공정, 바이오 분야 등에서도 핵심기술의 하나로 여겨지고 있으며 관련 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 최근 들어 잉크젯 프린팅 기술을 활용한 마이크로 패터닝 기술은 많은 분야에서 경쟁력 있는 공정으로 그 확고한 위치를 구축할 것으로 기대하고 있다. 특히 롤투롤 연속공정(roll-to-roll)에 접목되어 인쇄 속도를 증진하고 인쇄 정밀도를 개선하면 평판디스플레이뿐만 아니라 유연디스플레이 분야에 이르기까지 잉크젯 기술의 활용 가능성은 매우 높다고 판단된다.

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 무려 200여 년이나 앞서 있었다. 이러한 우리의 우수한 인쇄기술의 역사를 이어받아 나노기술이 중요하게 등장하면서 패터닝이 변화하고 있는 시점에 나노 패터닝의 원천기술 개발이 요구되고 있다. 오늘날 이용되고 있는 인쇄기술에는 5가지가 있다. 플렉소 기법과 같은 양각인쇄(relief), 그라비아 프린팅의 음각인쇄(intaglio or gravure), 리소그래피(lithography), 스크린 인쇄(screen), 잉크젯(inkjet printings) 등이 일상생활에서 다양한 인쇄작업에 이용되고 있다. 잉크젯 프린팅을 제외한 4가지 기법은 스템프와 같은 몰드의 접촉에 의하여 패턴을 전달, 형성하나 잉크젯 인쇄는 잉크 액적을 분사함으로써 패턴을 형성한다.⁽¹⁾

오늘날 인쇄기술은 문자 인쇄만이 아닌 전자소자 공정, 재료공정, 바이오 분야 등에서도 핵심기술의 하나로

여겨지고 있으며 관련 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면 수십 마이크로미터 선폭의 전극패턴을 인쇄함으로써 기존 사진(Lithography) 공정을 대체하고자 하는 노력을 수행하고 있다. 특히 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 나노 스케일의

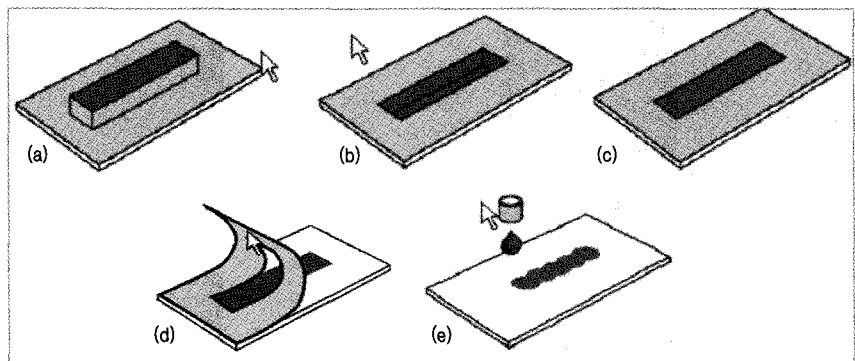


그림 1 주요 인쇄기술: (a) 양각인쇄, (b) 음각인쇄, (c) 리소그래피, (d) 스크린인쇄 (e) 잉크젯 인쇄

패터닝을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 마이크로 스케일에서 더 세밀한 나노 스케일에 이르는 패터닝 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

잉크젯 프린팅 기술

그림 2와 같이 디스플레이 공정에 잉크젯 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. 그러나 잉크젯 공정은 현재 20 μ m 이하의 미세한 패턴이 어려워 수 μ m의 미세한 패턴 공정에 한계를 갖고 있다.

우선 국내·외 잉크젯 관련 기술의 현황을 살펴보면 잉크젯 프린터는 1970년대 이후에 OA용으로 HP, Epson,

Canon 등의 회사를 중심으로 개발, 판매되어 왔다. 요구 시 토출(Drop-on-demand) 방식의 프린터에는 열기포 방식과 압전 방식이 대표적으로 개발되어 왔는데, 열기포 방식에는 HP, Canon, Xerox가 대표기업이며, 압전 방식에는 Epson, Spectra, Xaar 등이 대표기업이다.

가장 초기에 제안되어 이미 상용화되어 있는 액적 분사 시스템은 열기포(thermal bubble)를 이용하는 방법이지만 이 방법은 단순한 시스템으로 인한 공정의 용이성이라는 장점에도 불구하고 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 액적 크기의 한계(20 μ m)로 인하여 적용의 어려움이 제기되고 있다. 그러나 현재 가장 시스템이 안정되어 있어 적용성이 좋은 것으로 인식되어 국·내외 기업 및 연구기관, 대학 등에서 많은 연구를 하고 있다. 잉크젯을 이용한 산업용 패터닝 연구는 미국, 일본, 영국이 가장 활발히 연구를 진행하고 있으며, 특히 특허 등 원천 기술에 대한 확보 및 크

로스라이센싱을 통한 후발업체의 진입을 막아왔다. 이와 관련하여 미국의 Spectra 사와 Litrex 사, 영국의 CDT 사가 크로스 라이선싱을 통하여 잉크젯 프린터용 잉크, 헤드(Head), 장비 전 부분의 시스템에 대한 개발을 진행하고 있다. Dimatix 사에서는 최근 잉크젯 프린터를 이용하여 5 μ m의 정확도로 50 μ m 두께의 선을 제작하였으며 10 μ m선폭의 배선을 성공하고자 연구개발하고 있다. 국내에서는 삼성전기(주)가 독자적인 헤드를 개발하고 이를 2009년 상반기에 시판을 시작하였다.

열기포 방식 잉크젯 헤드는 사

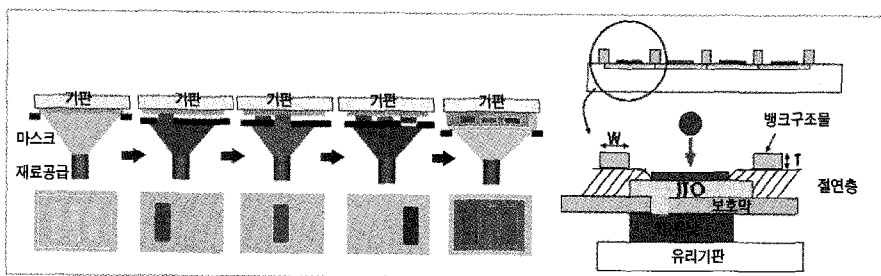


그림 2 디스플레이 제작 공정에서 기존 공정과 잉크젯 공정 개념도 비교

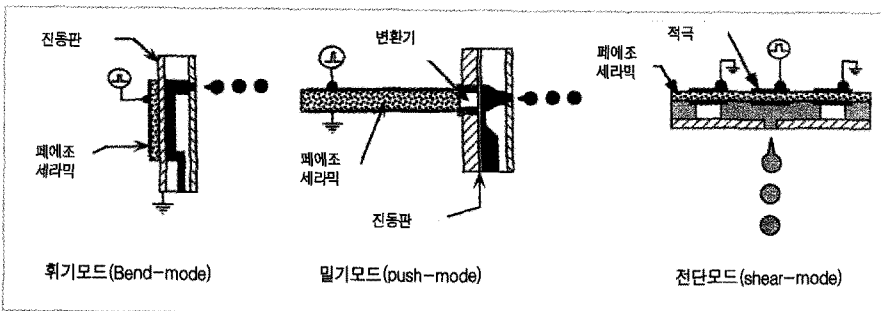


그림 3 열기포 방식 잉크젯 및 압전 방식 잉크젯 프린터

용 가능한 잉크의 제한과 열처리 문제 등으로 인하여 디스플레이 공정 적용에 어려움을 겪고 있으며, 압전 잉크젯 헤드도 단위 출력에너지, 잉크의 점성, 액적 크기 균일도, 액적 크기 등의 한계로 인하여 실제 산업용 공정에 적용하는데 현재 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

최근에 전기수역학(EHD; electrohydrodynamics)을 이용한 잉크젯 헤드의 연구가 발표되고 있다. 이는 “정전기장 유도 잉크젯 헤드”로 명칭되고도 있으며 2000년 들어 일본, 한국, 미국 등의 연구진에 의하여 결과가 보고되고 있다. EHD 잉크젯 헤드는 기존의 기술과는 달리, 고점도의 잉크에 대한 제팅이 가능하고 외부의 전기력에 의하여 제팅을 하므로 대면적 공정에서의 적용이 가능하다는 장점 때문에 많은 관심이 집중되고 있다.

정전기장을 이용한 전기분무(electrospray)는 Zeleny(1914, 1917)에 의하여 매우 오래 전에 발견되었고 Taylor (1964)에 의하여 이론적으로 제시되었다. 그리고 많은 연구자들에 의하여 액체계면에서의 전하유도, 전기장에 의한 힘의 작용 등에 대한 원리의 연구가 수행되었다.

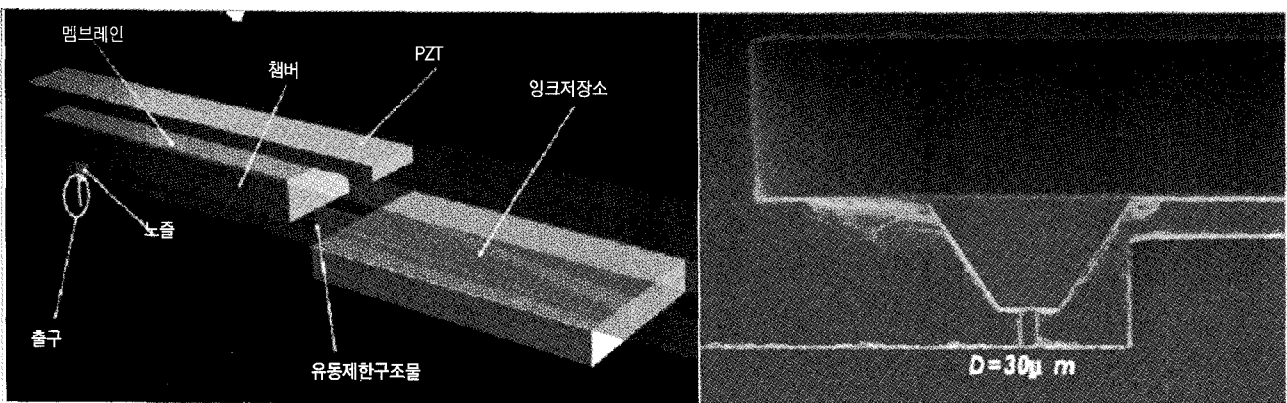
그러나 대부분의 연구들이 분무에 초점이 맞추어져 있으며 이를 패터닝 기술에 적용하고자 하는 연구는 최근에 집중적으로 수행되고 있다. 이를 이용하여 패터닝의 기초연구를 수행하였으며, 노즐의 표면 특성에 따른 연구를 수행하여 초소수성 표면을 이용한 효과적인 제팅이 가능한 노즐을 개발하여 보고된 바도 있다.

기존의 잉크젯 기술과는 다르게 EHD 잉크젯 기술은 나노 스케일의 노즐을 통해서도 제팅이 가능하며, 이를 이용하여 나노스케일의 패터닝이 가능하다는 장점이 부각되고 있다. 그러나 작은 노즐을 통하여 제팅을 함에 있어서 문제점은 노즐의 막힘 현상이다. 이를 극복할 수 있는 노즐의 설계 및 잉크의 개발이 요구되고 있다.

잉크젯 패터닝 응용 연구

잉크젯 기술의 응용

리소그래피를 대체하여 잉크젯을 적용할 수 있는 대표적인 분야는 디스플레이이다. 그 외에도 제안이 되고 있는



압전 방식의 잉크젯 헤드(1)

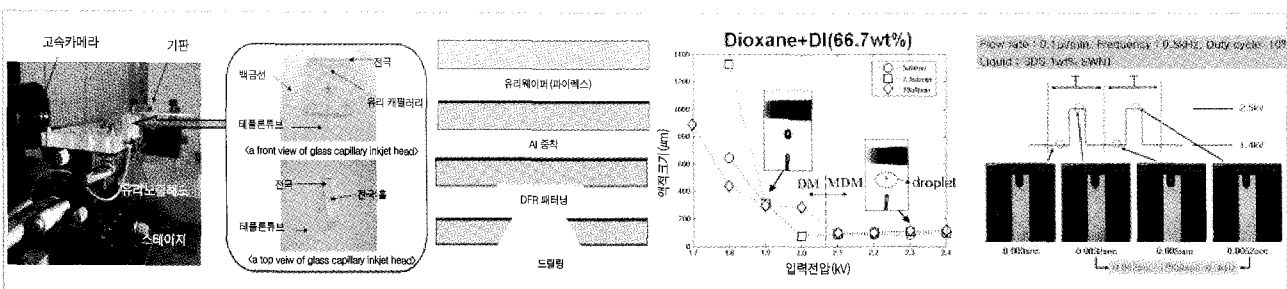


그림 5 EHD 잉크젯 기법을 이용한 토출 방식의 액적 생성(2,3)

분야는 다음과 같이 반도체, 바이오, 광전소자 등 광범위하게 분포되어 있다.

미세 패터닝 형성 기술을 디스플레이에 적용하여 LCD 컬러필터 제조, FED 에미터 제조, PDP 재료도포, 유기EL용 유기물질도포 등에 적용하고자 하고 있으며, 그 외에도 PCB, 반도체 범핑, DNA 칩 제조 및 의료 응용, 초소형 반도체 패키

징(CSP/BGA)용 범프 형성, 광전소자용 폴리머 패턴 형성, 광학 스위치 및 마이크로 렌즈 어레이 등의 MEMS 소자, 생물/세포배양 등이 대표적인 예이다. 잉크젯 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) 친환경적인 공정이기 때문에 폐기물 발생이 거의 없으므로 분리, 재처리, 폐기에 따른 비용이 절감된다. 4) 공정시간과 코스트의 대폭적인 절감이 가능하다.

디스플레이

잉크젯 기술의 산업 응용은 디스플레이 분야에서 매우 중요하게 다루어졌다. 잉크젯을 이용하면 접촉이 없이 직접 인쇄가 가능하고 다른 인쇄 기술에 비하여 균일한 코팅이 가능하며 오염물질의 배출이 최소화될 수 있어 더욱 많은 연구를 수행하고 있다. 디스플레이 분야는 반도체 분야와는 달리 수십 마이크로 크기의 비교적 큰 패턴을 형성하는 경우가 많이 있어 다른 어느 분야보다도 잉크젯공정을 적용할 수 있는 가능성이 많다.

TFT-LCD의 컬러필터와 OLED 공정에의 적용은 대표적인 응용의 사례라 할 수 있다. 그러나 현재까지 연구수준의 제품은 보고되고 있으나 실제 생산 공정에 적용하고 있다는 보고는 없다.

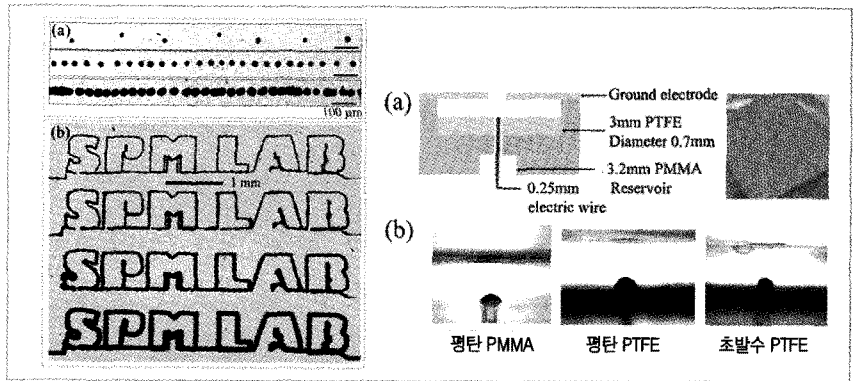


그림 6 초소수성 노즐을 이용한 잉크젯 헤드 및 패터닝(4,5)

광전소자

차세대 광전소자(photovoltaic device)로서의 유기태양전지는 변환 효율이 중요하다. 비유기박막이 매우 높은 에너지 변환효율을 내는 데 비해서 유기박막은 1~2% 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 받고 있다.

일반적으로, 대면적의 태양전지를 빠르고, 균일한 박막 두께 유지, 자동화 공정시스템으로 만들기 위해서는 프린팅 기법이 적합하다. Vak 등(2007)은 잉크젯 프린팅을 이용하여 폴리머:풀러렌(fullerene)으로 만든 활성(active)층을 만드는 데 성공하였다. 이들은 상용 잉크젯 헤드(Fujifilm Dimatix DMP-2831)를 이용, 연속적으로 액적을 분리시켜 도포, 잉크의 점도와 표면 젖음 간의 관계에서 생기는 유기층상의 핀홀 제거에 관하여 실험적인 연구를 하였다. 이 기법을 통해서 제작된 태양전지는 에너지 변환 효율이 1.4%에 달했다. Rivkin 등(2002)은 태양전지에서 사용되는 TCO(Transparent Conducting Oxides)를 잉크젯 프린팅을 이용하여 제작을 하여 성능평가를 하였으며, 100 μ m급의 해상도를 가지는 태양전지의 제작도 가능함을 보여주었다.

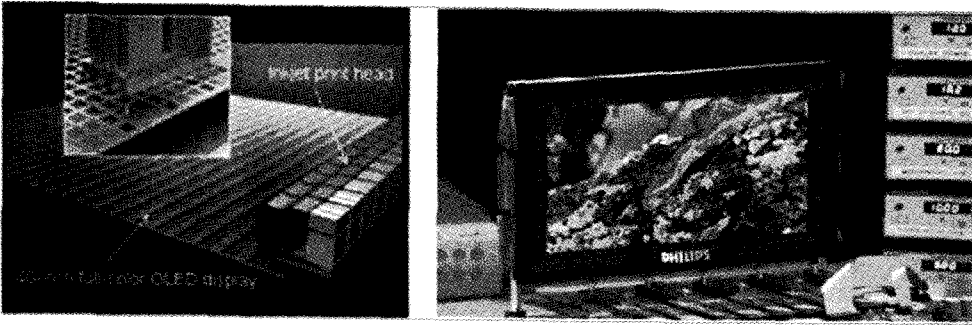


그림 7 잉크젯을 이용한 OLED 공정(Seiko Epson) 및 13" OLED TV(Philips)

잉크젯 패터닝 기술의 한계

기존의 잉크젯 기술의 한계는 에지 정밀도, 두께 균일도, 토출되는 액적의 크기의 한계($20\mu\text{m}$) 등을 들 수 있으며 이로 인하여 현재까지도 실제 공정라인에 잉크젯 기술이 적용되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 이슈들을 해결하여 실제 공정에 적용하기 위하여 많은 연구자들과 기업들이 노력하고 있음도 사실이다.

더불어 기존 잉크젯 기술의 패턴 한계로 알려지고 있는 $20\mu\text{m}$ 이하의 패턴을 형성하기 위하여 EHD 잉크젯 등의 새로운 기술이 보고되고 있는 것은 고무적인 사실이라 할 수 있다.

그러나 보다 중요한 이슈는 잉크젯 자체의 기술만이 아니라 응용분야에 따른 잉크, 기판, 시스템의 개발이 동시에 진행되어야 한다는 사실이다. 도포물질의 입자 크기, 용제, 분산제 등의 첨가물이 잉크젯의 성능에 영향을 주며 잉크의 점도, 표면장력, 전기전도도 등의 물리화학적 물성에 따라 제팅 및 도포 양상이 크게 변화하게 된다. 따라서 이러한 잉크와의 적합성이 검증될 수 있도록 동시에 헤드 개발이 병행되어야 한다.

또 한 가지의 잉크젯 패터닝 기술의 한계는 낮은 인쇄속도이다. 롤투롤(roll-to-roll) 인쇄기법에 비하여 잉크젯 기술은 기판의 정지 상태에서 인쇄공정을 수행하여야 하므로 잉크젯을 롤투롤 공정에 접목한 하이브리드 기술의 개발이 요구되고 있다. 이를 위해서는 새로운 메커니즘의 헤드의 설계와 개발이 요구되며, 그라비아 등의 연속공정 기술과의 역할 구분 등도 요구된다.

마지막으로 언급하고자 하는 한계점은 비단 잉크젯에만

적용되는 한계점은 아니다. 거의 모든 직접인쇄 패터닝 기술에 적용되는 한계로서 'coffee stain' 효과라고 일컫는 현상에 기인한다. 콜로이드(colloid) 상태의 액적을 이용해서 미세 패턴을 만드는 경우에 그 액적

의 용매를 건조하는 과정에서 내부에 포함된 입자들이 기판 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 미소한 입자들을 액적의 가장자리로 이동시켜, 결국에는 건조 후에 가장자리 부근에서 입자들을 진하게 남기게 된다.

이 현상은 균일한 패터닝 구조물의 생성을 어렵게 하여 디스플레이의 잉크젯 적용 시에 색체의 선명도를 떨어뜨리는 등 문제점을 발생시킨다. 이를 극복하기 위하여 기판의 표면을 소수성을 처리하는 등의 연구들이 수행되고 있다.

맺음말

최근 들어 잉크젯을 이용한 산업공정에서의 적용과 나노스케일의 패터닝을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 프린팅 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 잉크젯 프린팅 기술을 활용한 마이크로 패터닝 기술은 많은 분야에서 경쟁력 있는 공정으로 그 확고한 위치를 구축할 것으로 기대하고 있다. 특히 롤투롤 공정에 접목되어 인쇄속도를 증진하고 여러 기술적 진보를 바탕으로 인쇄 정밀도를 개선하면 평판디스플레이뿐만 아니라 유연디스플레이 분야에 이르기까지 잉크젯 기술의 활용 가능성은 매우 높다고 판단된다.

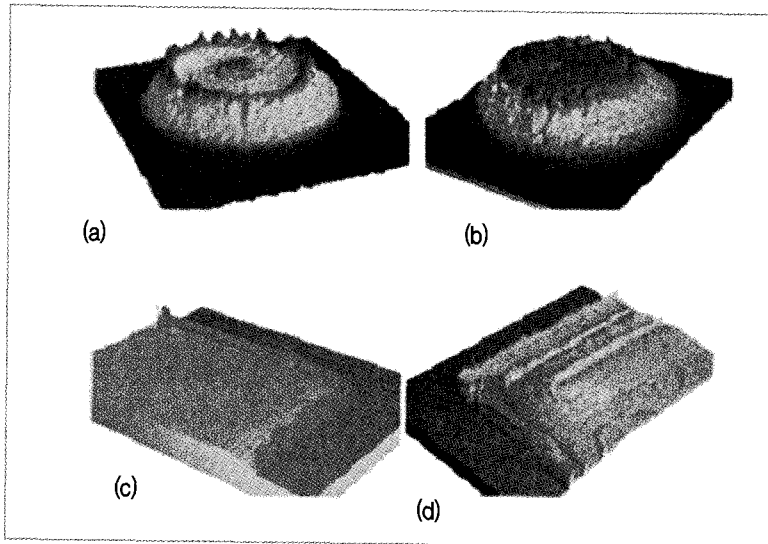


그림 8 잉크젯 프린팅 기법으로 패턴된 P3HT:PCBM 유기층⁽⁶⁾

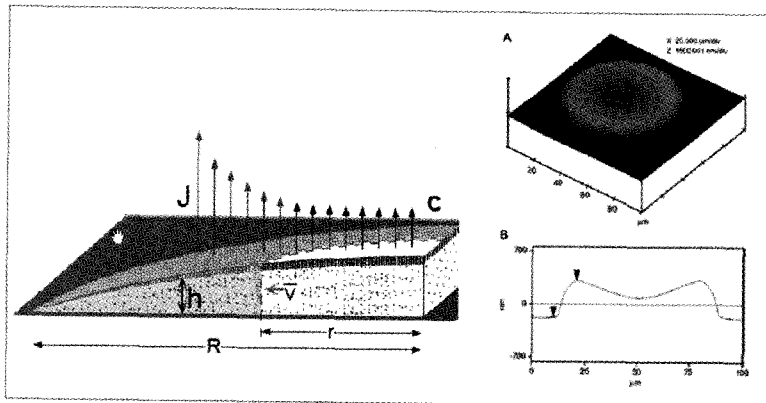


그림 9 Coffee stain⁽⁷⁾ 및 AFM을 이용한 패턴 프로파일⁽⁸⁾

참고문헌

(1) C. S. Kim, S.J. Park, W. Sim, Y.J. Kim, Y. Yoo, Modeling and characterization of an industrial inkjet head for micro-patterning on printed circuit boards, *Computers & Fluids* 38, 602-612, 2009.

(2) Sukhan Lee, Doyoung Byun, Daewon Jung, Jae Yong Choi, Yongjae Kim, Ji Hye Yang, Sang Uk Son, Bui Quang Tran Si, Han Seo Ko, Pole-

Type Ground Electrode in Nozzle for Electrostatic Field Induced Drop-on-Demand Inkjet Head, *Sensors and Actuators, A* 141, 506-514, 2007.

(3) Jaeyong Choi, Yong-Jae Kim, Sukhan Lee, Sang Uk Son, Han Seo Ko, Vu Dat Nguyen, Doyoung Byun, Drop-On-Demand Printing of Conductive Ink by Electrostatic Field Induced Inkjet Head, *Applied Physics Letter* 93, 193508, 2008.

(4) Doyoung Byun, Youngjong Lee, Si Bui Quang Tran, Vu Dat Nguyen, Sanghoon Kim, Baeho Park, Sukhan Lee, Niraj Inamdar, Haim H. Bau, Electro spray on super-hydrophobic nozzle treated by Ar and oxygen plasma, *Applied Physics Letter* 92, 093507, 2008.

(5) Vu Dat Nguyen, Doyoung Byun, Mechanism of Electrohydrodynamic (EHD) Printing Based on ac Voltage Without an Electrode on the Nozzle, *Applied Physics Letter* 94, 173509, 2009.

(6) Aernouts T. et al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, 2008, 033306.

(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) Alison J. Lennon et al., *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2008).