Micro to Nanoscale Printing for Electronics

우리나라는 1232년에 세계 최초로 금속활자를 개발하여
이를 책의 인쇄에 적용하는 등 고도의 기술을 갖고 있었다.
이는 독일의 Johannes Gutenberg가 금속활자를
개발한 시기보다 무려 200여년이나 앞서 있었다.

■ 변도영*, 이석한**
(*건국대학교 항공우주정보시스템공학 부교수, **성균관대학교 정보통신공학부 교수)

1. 서 론

인쇄기술은 인류 역사상 가장 위대한 기술적 진보 중에 하나이다. 인쇄기술을 이용함으로서 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 200여년이나 앞서 있었다. 이러한 우리의 우수한 인쇄기술의 역사를 이어받아 나노기술이 중요하게 등장하면서 패러다임이 변화하고 있는 시점에 나노 패터닝의 원천기술 개발이 요구되고 있다. 오늘날 이용되고 있는 인쇄기술에는 5가지가 있다. 플랙소 기법과 같은 양각인쇄(relief), 그라비어 프린팅의 음각인쇄(intaglio or gravure), 리소그래피(lithography), 스크린 인쇄(screen), 잉크젯(inkjet printings) 등이 일상생활에서 다양한 인쇄작업에 이용되고 있다. 잉크젯 프린팅을 제외한 4가지 기법은 스탬프와 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 리소그래피 공정을 대체하고자 하는 노력을 수행하고 있다. 특히 잉크젯 프린팅 기술은 기존의 복잡한 포토리소그라피 공정을 거치지 않고, 저렴하고, 신속한 방식으로 원하는 패턴을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있어 1990년대 후반 이후 많은 연구가 진행되고 있다[2-7]. 그러나 여전히 디스플레이, RFID 등의 생산공정에 적용하기 위해서는 여러 가지의 문제점을 갖고 있어 연구가 지

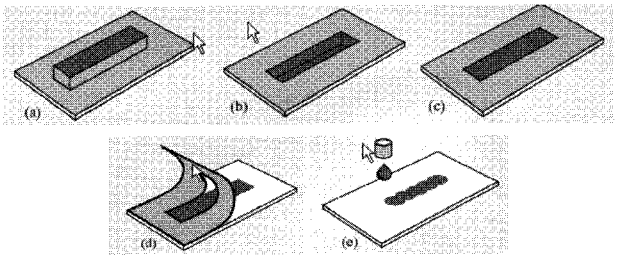

그림 1. Major print techniques: (a) Relief, (b) intaglio, (c) lithographic, (d) screen or stencil, and (e) ink-jet printings.

속되고 있다. 특히 최근에는 나노스케일의 패터닝을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 마이크로스케일에서 나노 스케일에 이르는 패터닝 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 따라서 이러한 패터닝 기술의 동향을 살펴보고 향후 연구방향을 고찰해보고자 한다.

2. 잉크젯 프린팅 기술

그림 2와 같이 디스플레이 공정에 잉크젯 기술을 이용하면, 기존 photo공정에서 mask를 사용하여 도포-노광-현상의 3공정을 각각의 R.G.B에 대해 반복함으로써 장비 투자, 공정 비용 및 mask 사용비 등의 유지보수비가 소요되는데, 이를 1공정으로 단축함으로서, 생산 라인의 수를 증가 시킬 수 있으며, 막대한 비용을 절약할 수 있다. 또한 불필요한 재료의 소모가 없으며 폐기물 발생이 작으므로 친환경적인 공정이다. 그러나 잉크젯 공정은 현재 20 ㎛ 이하의 미세한 패턴이 어려워 수 ㎛의 미세한 패턴 공정에 한계를 갖고 있다.

우선 국내 · 외 잉크젯 관련기술의 현황을 살펴보면 잉크젯 프린터는 1970년대 이후에 OA 용으로 HP, Epson, Canon 등의 회사를 중심으로 개발, 판매되어 왔다. Drop-on-demand 방식의 프린터에는 열기포 방식과 piezoelectric 방식이 대표적으로 개발되어 왔는데, 열기포 방식에는 HP, Canon, Xerox가 대표 기업이며, piezoelectric 방식은 Epson, Spectra, Xaar 등이 대표기업이다.

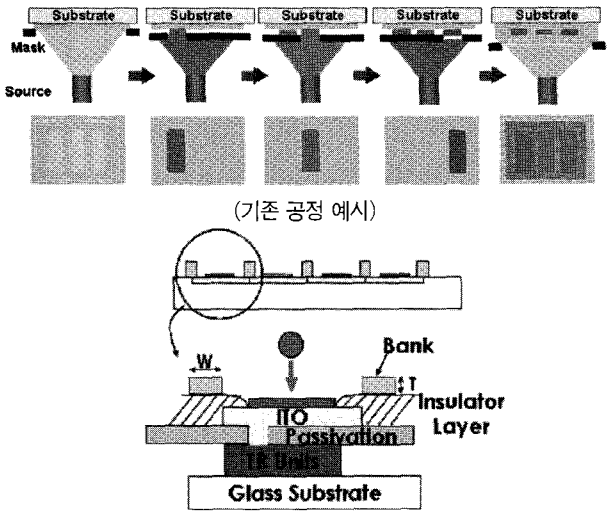

그림 2. 디스플레이 제작 공정에서 기존 공정과 잉크젯 공정 개념도 비교

가장 초기에 제안되어 이미 상용화되어 있는 액적 분사시스템은 열기포(thermal bubble)를 이용하는 방법이지만 이 방법은 단순한 시스템으로 인한 공정의 용이성이라는 장점에도 불구하고 열적 문제로 인하여 산업용에 적용하기에는 한계가 있는 것으로 알려지고 있다. Piezoelectric 방법을 이용한 metal colloid를 printing하는 연구도 진행되고 있으나 reliability의 문제와 edge resolution, thickness homogeneity, overlay, 토출되는 액적의 크기의 한계(20 ㎛)로 인하여 적용의 어려움이 제기되고 있다. 그러나 현재 가장 적용성이 좋은 것으로 인식되어 국내외 기업 및 연구기관, 대학들에서 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 크로스라이센싱을 통한 후발업체의 진입을 막아왔다. 관련하여 미국의 Spectra 사와 Litrex 사, 영국의 CDT 사가 크로스 라이센싱을 통하여 inkjet printer용 잉크, head, 장비 전 부분의 system에 대한 개발을 진행하고 있다. Dimatix사에서는 최근 잉크젯 프린터를 이용하여 5㎛의 정확도로 50 ㎛ 두께의 선을 제작하였으며 10 ㎛ 선폭의 배선을 성공하고자 연구개발하고 있다.

하지만 thermal bubble 잉크젯 헤드는 사용가능한 잉크의 제한과 열처리 문제 등으로 인하여 디스플레이 공정 적용에 어려움을 겪고 있으며, piezoelectric 잉크젯 헤드도 단위 출력에너지, 잉크의 점성, 액적 uniformity, 액적 크기 등의 한계로 인하여 실제 산업용 공정에 적용하는데 현재 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

요약하면 piezoelectric 잉크젯 헤드의 문제점을 해결하기 위한 MEMS 기술을 적용한 새로운 잉크젯 헤드 개발 및 이를 적용한

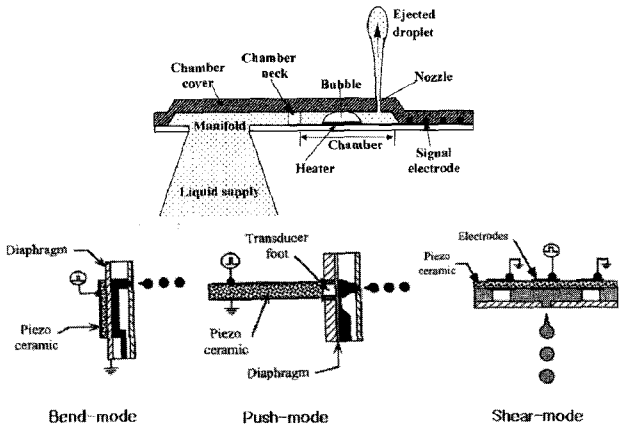

그림 3. 열기포 방식 잉크젯 및 Piezoelectric 방식 잉크젯 프린터

잉크젯 프린팅 공정 개발이 차세대 디스플레이 분야에서 활발히 진행 중이다. 국내에서도 삼성전자, LG전자 등에서 잉크젯 헤드의 중요성을 인식하고 많은 연구를 하고 있으나 원천기술의 한계로 인하여 많은 어려움을 겪고 있다.

3. 나노스케일 패터닝 기술

3.1 나노공정 기술

나노공정기술은 나노기술의 산업화에 있어 근간이 되는 핵심기술이며, 극미세 공정기술 측면에서 MEMS기술과 Milli기술과의 차별성과 연관성을 도시하면 그림 4와 같다.

MEMS기술은 광 리소그라피공정에 바탕을 두고 있어 마이크로미터급 이하의 소자를 제작하는 데는 한계가 있다. 따라서, 나노미터 크기를 갖는 소자의 가공을 위한 나노공정이 필요하다. 그러나 현재까지 제안되고 있는 나노구조물 제작 기술의 경우 공정단가나 공정속도 등에 한계가 존재하며 MEMS 구조물과의 결합 등을 통한 소자개발이 요구되므로 저가의 직접 프린팅 기술 개발이 요구된다. 특히 기존의 MEMS 공정 기술의 한계를 극복하며 나노스케일 구조까지 공정할 수 있는 기술이 요구된다.

최근에 패터닝 또는 인쇄 관련 연구로써 나노 스케일의 구조물 제작이 중요하게 대두되고 있다. 디바이스의 크기가 마이크로 수준에서 나노 수준으로 축소됨에 따라 나노구조의 제작이 더욱 중요해지고 있는 것이다. 나노 구조물을 패터닝 할수 있는 인쇄 기술연구로서 Atomic-Force Microscope(AFM) 기반 기법, Nanopipet 증착법, Beam 기반 기법, Contact printing 기법, 전기방사법으로 구분하여 간략할 수 있다.

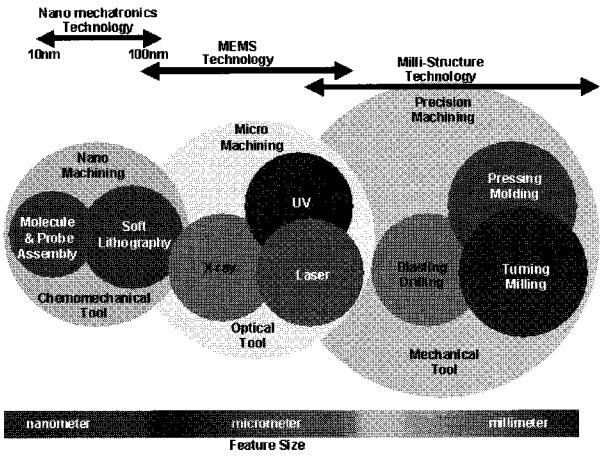

그림 4. 나노, MEMS 및 Milli 기술의 연계성

3.2 Atomic-Force Microscope (AFM) 기반 기법

Atomic-Force Microscope(AFM) 기반 기법은 DPN(dip Pen Lithography)이라고 불리며, AFM의 탐침에 '분자 Ink'를 묻혀서 직접 기판표면에 pattering을 하는 방법이다. DPN법을 사용하여, 50nm정도의 pattern을 직접 묘사하는 것이 가능해졌다. AFM은 대기 중에서 표면을 측정할 때 tip과 표면 사이에 아주 작은 모세관 현상이 관찰되는데 이를 이용하여 기판에 self-assembly하는 기술이 Mirkin 박사에 의해 발표되었다[8-18]. 그는 DPN 기술을 이용하여 단분자막을 나노 차원에서 패턴닝한 결과를 발표하였으며 이 기술을 바탕으로 폴리머에서부터 DNA에 이르는 패터닝 결과를 제시하였다. DPN 기술의 장점은 다음과 같다. 첫째, positive patterning이다. 둘째, 원하는 위치에 서로 다른 분자들을 패턴닝 할 수 있다. 셋째, 다른 나노 리소그래피에서 필요로 하는 resist, stamp, complicated processing 등이 필요하지 않고 장치가 간단하다.

딥펜 나노 식각공정은 다양한 응용분야에 적용될 수 있는 고해상도 패턴을 제조하고 물질을 감지할 수 있는 기술이다. 그러

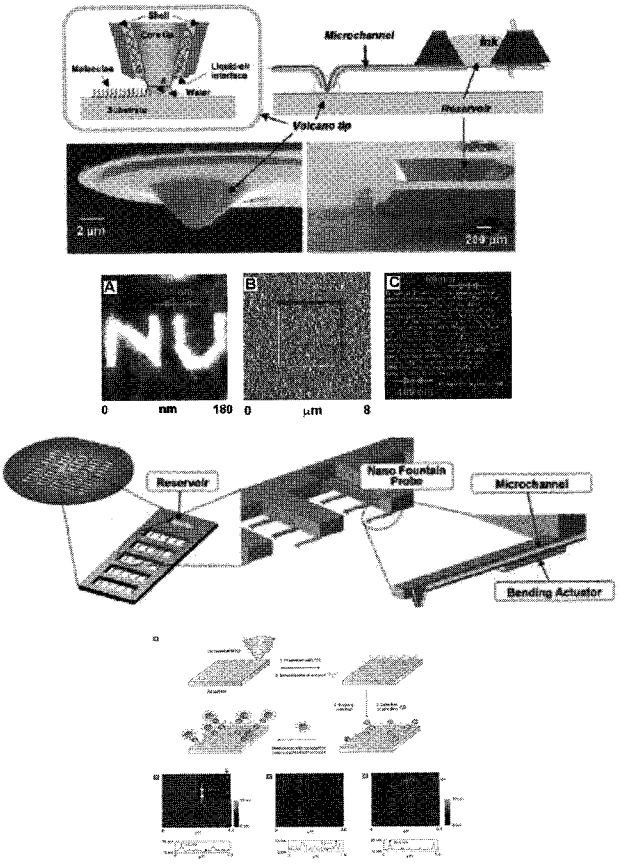

그림 5. Dip-pen Lithography (Northwestern Uni.)[3-18]

나 이 기술을 이용하여 50 nm 이하의 패터닝도 가능하나 diffusion에 기반한 패터닝 과정이므로 인쇄속도의 한계를 내재적으로 갖고 있다.

3.2 Nanopipet 증착법

Nanopipet 증착법은 electrolyte 액체를 채우고 있는 나노크기의 피펫을 프로브로 해서 비전도 물질을 스캔하는 scanning ion-conductance microscope(SCIM)[19] 기술에 기반하고 있다. 100 nm 정도의 질므을 갖는 피펫을 이용하여 작은 입자들을 기판위로 전달할 수 있다. 피펫의 팁을 통하여 전달되는 분자의 양은 전류, electro-osmotic flow, electrophoresis, dielectrophoresis, 입자의 크기, 전하 등의 영향에 따라 다르다[20].

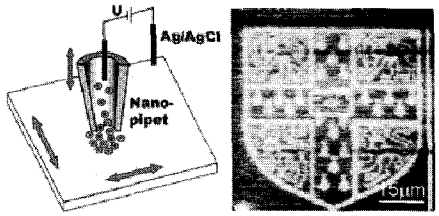

그림 6. Nanopipet 증착[20]

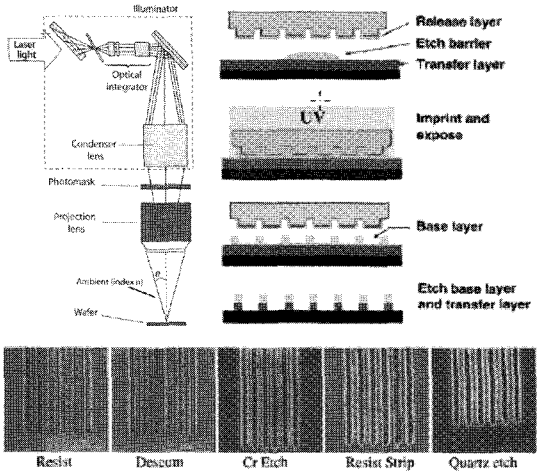

그림 7. e-Beam Lithography 및 nanoimprint lithography

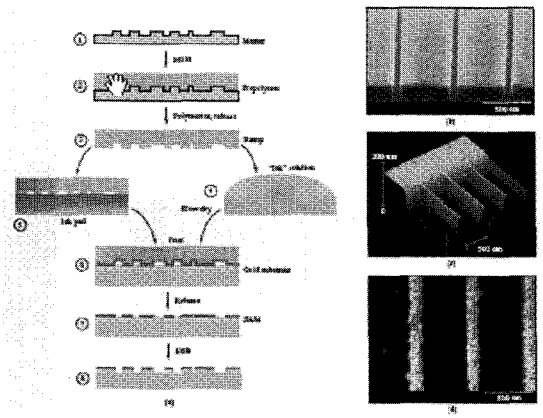

그림 8. Contact lithography

3.3 Beam 기반 기법

반도체 공정 기술에서 수십 나노미터까지 패터닝을 가능하게 하는 e-beam lithography(EBL)를 이용하는 것으로써, 먼저 금속이나 다른 재료의 박막을 웨이퍼 위에 올린 다음에 원하는 모양의 마스크를 통하여 집속되는 광을 photoresist가 올려진 웨이퍼 위에 조사하여 마스크의 축소된 형태를 각인시키는 방법이다[21-22]. 그러나 이 기법은 throughput에 매우 큰 한계를 갖고 있고 고가의 장비 사용이 요구된다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 제안되고 있는 방법이 Nano Imprinting Lithography (NIL)이다[23-25]. NIL은 EBL로 구현된 나노구조물을 폴리머 필름위에 반복적으로 복사하는 방법이다. 원래 imprint 기술은 이미 음악용 CD(Compact Disk)의 생산 등에 오래 전부터 사용되어 왔지만 nm 수준까지도 적용가능하다는 것이 알려진 후 최근 많은 발전이 이루어졌다. 이 방법은 웨이퍼 전체를 한 번에 처리할 수 있는 병렬처리 능력이 있어서 만약 대량의 생산기술에 맞게 개발된다면 매우 빠른 패턴 가공능력이 있다. 또 최근에는 동일한 웨이퍼에 다중의 패턴을 가공하는 multi-layer의 가능성도 보여주고 있다. 다만 PMMA 등의 유기물을 가열하여 거의 액체가 된 상태에 마스크를 눌러 패턴을 만드는데 이를 위해 약 150-200도의 온도변화가 필요하다. 이렇게 큰 온도 변화에서는 반도체 웨이퍼나 주위 물질들의 열팽창에 의해 정밀한 위치 제어가 어려워지며 또 가열하고 식히는 과정에서 오랜 시간이 필요하므로 공정속도가 너무 느려진다. 또 마스크와 시료를 직접 접착하는 방식이므로 마스크의 크기는 가공하려는 패턴과 같은 크기로 마스크의 미세한 패턴을 관리하거나 잘못된 패턴의 수정시 어려움이 따르게 된다.

3.4 Contact printing 기법

최근에는 마스크의 패턴에 유기물을 묻혀서 웨이퍼 위에 직접 도장을 찍는 방식으로 유기물의 패턴을 만드는 방법 등도 연구되고 있다[23,26]. 이 경우도 nm 수준의 패턴 형성이 가능한데 이 경우는 패턴을 만드는 유기물의 두께를 두껍게 할 수 없다는 단점이 있다.

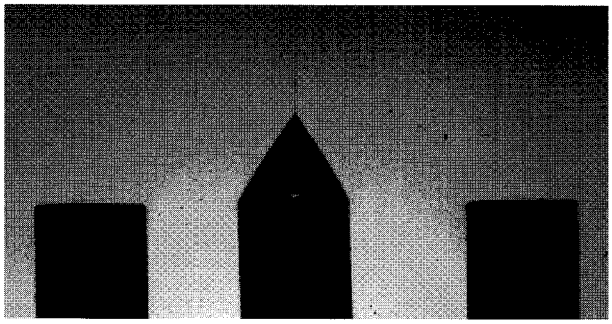

그림 9. 전기분무

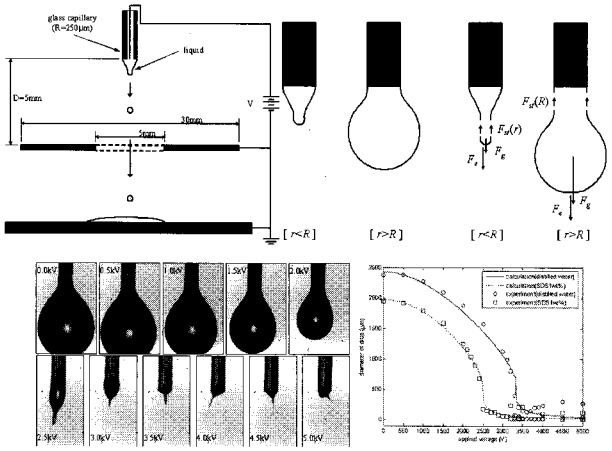

그림 10. 정전기 유도 액적 생성 모델 연구[37]

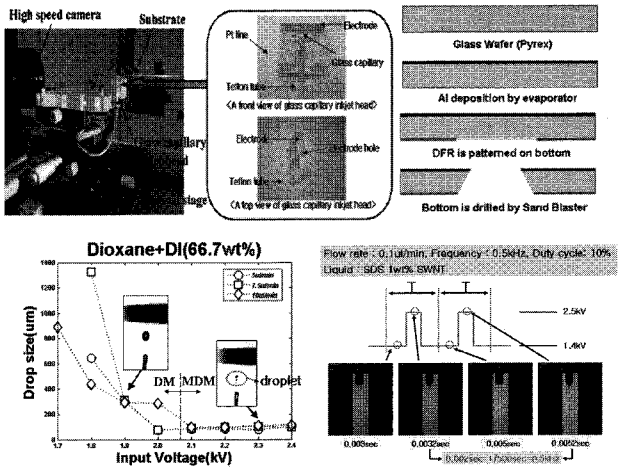

그림 11. 노즐 형상에 따른 제팅의 효과분석 및 액체의 물성치에 따른 영향 분석[38-46]

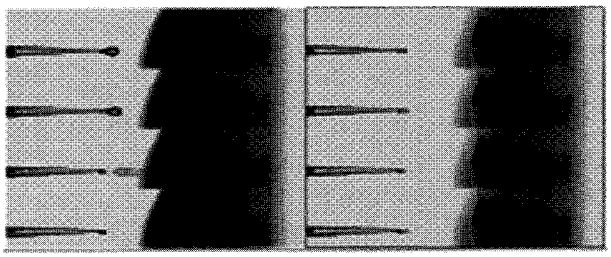

그림 12. 나노 스케일 노즐을 이용한 제팅

4. 마이크로/나노스케일 동시 가능 패터닝기술

앞에서 살펴본 바와 같이 마이크로 스케일의 패터닝과 나노 스케일의 패터닝은 각기 다른 방식으로 연구가 수행되고 있다. 그러나 각 기술들은 각자의 장점 외에 단점도 갖고 있기 때문에 가능하다면 두 스케일의 패터닝을 동시에 수행할 수 있는 고속 프린팅 기술이 요구되고 있다. 최근에 전기수력학(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.

정전기장을 이용한 전기분무(electrospray)는 Zeleny (1914, 1917)에 의하여 매우 오래전에 발견되었고 Taylor (1964)에 의하여 이론적으로 제시되었다[27-29]. 그리고 많은 연구자들에 의하여 액체계면에의 전하유도, 전기장에 의한 힘의 작용 등에 대한 원리의 연구가 수행되었다[30-34]. 그러나 대부분의 연구들이 분무에 초점이 맞추어져 있었으며 이를 패터닝 기술에 적용하고자 하는 연구는 매우 드물다. 전기분무를 mass spectrometry에 적용하여 단백질이나 다른 biological molecules의 분석에 적용하는 연구를 최초로 발표한 Fenn은 노벨상을 수상하기도 하였다[35, 36].

그림 10은 단일 노즐을 통한 액체 계면으로부터 인가된 정전기력에 의한 액적의 형성과 제팅을 실험적으로 관찰하고 이를 간단한 힘의 균형 모델을 정립하여 인가전압과 액적의 크기에 대한 이론결과 및 실험결과를 비교한 결과를 보여주고 있다[37].

또한 정전기 유도 제팅 현상에 대한 이해를 높이기 위하여 다양한 액체의 제팅 현상을 관찰함으로써 전압과 공급 유량에 따른 제팅의 모드 변화를 관찰하였고 액체의 점성도, 전기전도도, 표면장력의 영향을 연구하였다[38-47]. 더불어 펄스의 크기에 따른 drop-on-demand 제팅의 변화를 연구하였으며, 이를 이용하여 패터닝의 기초연구를 수행하였다.

나노 노즐 공정 또는 나노 스케일의 패터닝에 대한 연구로는, 노즐의 크기가 줄어들면 전기분무에 요구되는 전압이 감소하

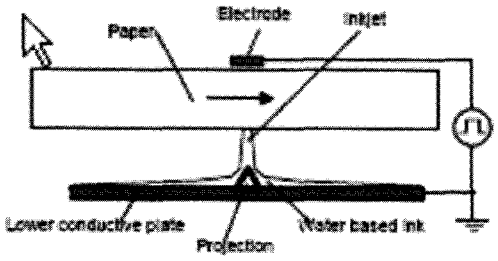

그림 13. 정전기장 유도 제팅[49]

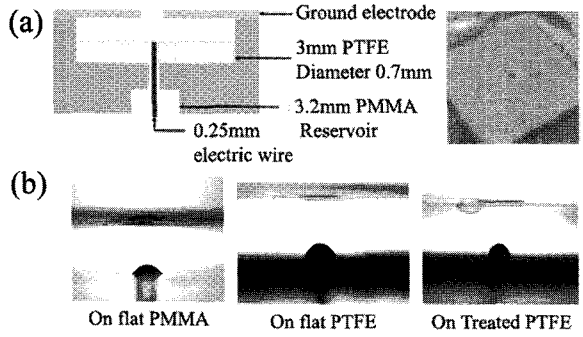

그림 14. 초소수성 잉크젯헤드 연구[47]

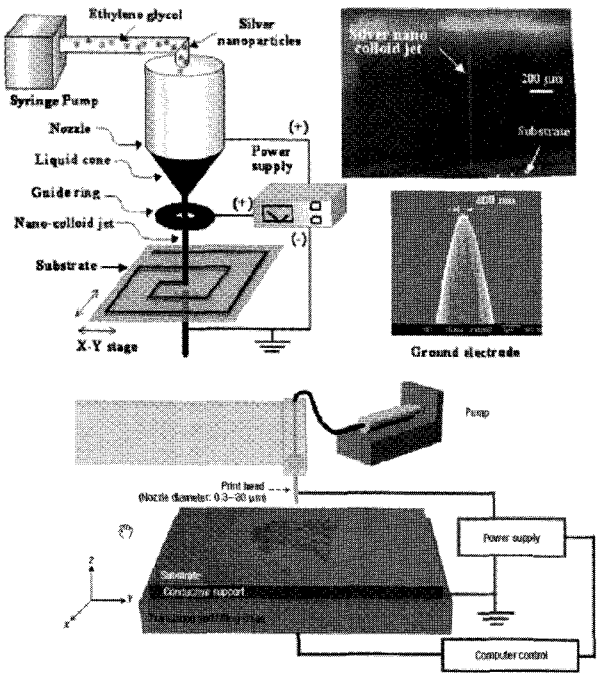

그림 15. EHD printing을 이용한 나노패터닝[51]

여 보다 효과적인 제팅이 가능함을 확인하였다[48].

유사한 연구로는 일본의 Sou 등은[49] 정전기장을 이용하여 바닥면에 있는 탐침으로부터 액체를 끌어당겨 액적을 토출할 수 있음을 보였다(그림 17). 그러나 이 개념은 헤드 중앙에 탐침이 존재하여야 하고, 노즐의 전면부에 존재하는 전극이 substrate 밑면에 존재하여 매우 높은 전압을 걸어야 하고 장치의 구성이 복잡하다는 단점을 갖고 있다.

노즐의 표면 특성에 따른 연구를 수행하여 초소수성 표면을 이용한 효과적인 제팅이 가능한 노즐을 개발하여 보고된 바도 있다[47].

전기분무의 모드 중에서 연속젯(cone-jet)을 이용한 연구결과도 보고된 바 있다[50]. 그리고 최근에 J. Rogers 그룹이 발표한 나노스케일 패터닝 연구[51]는 정전기 기법으로도 나노 패터닝이 가능함을 보여주었다. 그러나 전극의 배치가 기판의 하단에 위치하여 제어의 어려움이 있는 구조이다.

7. 결 언

최근들어 잉크젯을 이용한 산업공정에의 적용과 나노스케일의 패터닝을 이용한 나노소자 및 바이오 소자의 개발이 활발히 진행되고 있어 프린팅 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 그러나 마이크로 스케일의 프린팅 기술은 패턴의 두께 한계성, 패턴 형상의 균일도 등의 여러 한계가 존재하고 있고 나노 패터닝 기술의 경우, 인쇄속도, 균일도 등의 한계를 극복해야 하는 과제들이 있다.

때문에 이러한 한계를 극복하면서 마이크로스케일에서 나노스케일을 동시에 패터닝할 수 있는 기술이 개발될 경우 그 파급효과는 매우 클 것으로 판단된다. 그 후보기술 중의 하나로서 정전기장 유도 잉크젯 기술의 최근 연구동향을 살펴보았다. 현재까지의 연구는 단일노즐을 이용한 가능성 탐색 연구들이었으며 이를 다수 노즐로 확장하고 다양한 응용분야에 맞는 시스템으로 확장하여 기술을 검증하는 것이 중요한 과제이다.

참고문헌

[1] B. Michel, A. Bernard, A. Bietsch, E. Delamarche, M. Geissler, D. Juncker, H. Kind, J.-P. Renault, H. Rothuizen, H. Schmid, P. Schmidt-Winkel, R. Stutz, H. Wolf, "Printing meets lithography: Soft approaches to high-resolution Patterning", IBM J. RES. & DEV. VOL. 45 NO. 5, 697-719, september 2001

[2] T. R. Hebner, C. C. Wu, D. Marcy, M. H. Lu, and J. C. Sturm, "Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting

devices", APPLIED PHYSICS LETTERS, VOLUME 72, NUMBER 5, 519-521, 2 february 1998

[3] B. J. de Gans, P. C. Duineveld, U. S. Schubert, "Inkjet Printing of Polymers: State of Art and Future Developments", Advanced Materials, 16, 3, 203-213, 2004

[4] Y. Yoshioka and G. E. Jabbour, "Inkjet Printing of Oxidants for patterning of Nanometer-Thick Conducting Polymer Electrodes", Advanced Materials, 18, 1307-.1312, 2006

[5] H.-S. Koo,aPo-Chuan Pan, and T. Kawai, M. Chen, F.-M. Wu, Y.-T. Liu, and S.-J. Chang, "Physical chromaticity of colorant resist of color filter prepared by inkjet printing technology", APPLIED PHYSICS LETTERS 88, 111908 2006

[6] B. R. Ringeisenl, C. M. Othonl, J. A. Barronl, D. Young2 and Barry J. Spargol, "Jet-based methods to print living cells", Biotechnol. J. 2006, 1, 930-.948

[7] R. A. Street, W. S. Wong, S. E. Ready, M. L. Chabinyc, A. C. Arias, S. Limb, A. Salleo, and R. Lujan, "Jet printing flexible displays", Materials Today, 9, 4, 32-37, 2006

[8] S. Hong, J. Zhu, C. A. Mirkin, "Multiple Ink Nanolithography: Towards a Multiple-Pen Nanoplotter," Science, 1999, 286, 523-525.

[9] R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. H. Hong & C. A. Mirkin, "Dip-pen" nanolithography. Science 283, 661-663 (1999).

[10] D. S. Ginger, H. Zhang & C. A. Mirkin, The evolution of dip-pen nanolithography. Angew. Chem. Int. Edn 43, 30-45 (2004).

[11] R. A. Vega, C. K.-F. Shen, D. Maspoch, J. G. Robach, R. A. Lamb, C. A. Mirkin, "Monitoring Single Cell Infectivity from Virus Particle Nanoarrays Fabricated by Parallel Dip-Pen Nanolithography", Small 2007, 3, 1482-1485.

[12] K. S. Salaita, Y. Wang, C. A. Mirkin, "Applications of Dip-Pen Nanolithography", Nature Nanotech. 2007, 2, 145-155.

[13] K. S. Salaita, Y. Wang, J. Fragala, C. Liu, C. A. Mirkin, "Massively Parallel Dip-Pen Nanolithography With 55,000-Pen Two-Dimensional", Angew. Chem. Int. Ed., 2006, 45, 7220-7223.

[14] K.S. Salaita, S.W. Lee, X. Wang, L. Huang, T.M. Dellinger, C. Liu, C.A. Mirkin, "Sub-100nm, Centimeter Scale, Parallel Dip-Pen Nanolithography" Small 2005, 1, 940-945.

[15] H. Zhang, S.-W. Chung, C. A. Mirkin, "Fabrication of Sub-50-nm Solid-State Nanostructures on the Basis of Dip-Pen Nanolithography", Nano. Lett.,2003, 3, 43-45.

[16] J.-H. Lim, C. A. Mirkin, "Electrostatically Driven Dip-PenNanolithography of Conducting Polymers", Adv. Mat., 2002, 14, 1474-1477.

[17] K.-B. Lee, S.-J. Park, C. A. Mirkin, J. C. Smith, M. Mrksich, "Protein Nanoarrays Generated by Dip-Pen Nanolithography", Science, 2002,295, 1702-1705.

[18] A. Ivanisevic, C. A. Mirkin, "Dip-Pen' Nanolithography on Semiconductor Surfaces", J. Am. Chem. Soc., 2001, 123, 7887-7889.

[19] P. K. Hasnma, B. Drake, O. Marti, S.A. Gould, C.B. Prater, "The scanning ion-conductance microscope", Science, 243, 641-643, 1989

[20] A. Bruckbauer, L.M. Ying, A.M. Rothery, D. J. Zhou, A. I. Schevchuk, C. Abell, Y.E. Korchev, D. Klenerman, "Writing with DNA and protein using a nanopipet for controlled delievery". J. Am. Chem. Soc., 124, 8810-8811, 2002

[21] A.A. Tseng, K. Chen, C.D. Chen, K.J. Ma, "Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development, - Electronics Packaging Manufacturing", IEEE Transactions on, Volume 26, Issue 2, 141-49, 2003

[22] M. Rothschild, "Projection optical lithography", materialstoday, 2/2005

[23] J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, "Recent progress in soft lithography", Materials Today, 2, 2005

[24] R. Menon, A. Patel, D. Gil, and H. I. Smith, Maskless lithography, materialstoday, 2/2005

[25] D. J. Resnick, S.V Screenivasan, and C. G. Willson, Step & flash imprint lithography, materialstoday, 2/2005

[26] B. D. Gate, "Nanofabrication with molds & stamps", materialstoday, 2/2005

[27] J. Zeleny(1914), "The electrical discharge from liquid points and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surface". Physical Review, 3, 69-91.

[28] J. Zeleny(1917), Instability of electrified liquid surfaces. Physical Review, 10, 1-6.

[29] G. I. Taylor(1964), "Disintegration of water drops in an electric field". Proceedings of the Royal Society of London,

Series A, 280, 383-397.

[30] M. Cloupeau, & B. Prunet-Foch(1989), "Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode". Journal of Electrostatics, 22, 135-159.

[31] M. Cloupeau, & B. Prunet-Foch(1994), "Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review". Journal of Aerosol Science, 25, 1021-1036.

[32] J. Fernandez de la Mora(1992), "The effect of charge emission from electrified liquid cones". Journal of Fluid Mechanics, 243, 561-574.

[33] J. Fernandez de la Mora, & I. G. Loscertales(1994), "The current emitted by highly conducting Taylor cones". Journal of Fluid Mechanics, 260, 155-184.

[34] A. Gomez, & K. Tang(1994), "Charge and fission of droplets in electrostatic sprays". Physics of Fluids, 6, 404-414.

[35] J. B. Fenn, M. Mann, C. K. Meng, S. K. Wong, & C. Whitehouse(1989), "Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules". Science, 246, 64-71.

[36] R. T. Kelly, J. S. Page, Q. Luo, R. J. Moore, D. J. Orton, K. Tang, & R. D. Smith(2006), "Chemically etched open tubular and monolithic emitters for nanoelectrospray ionization mass spectrometry". Analytical Chemistry, 78, 7796-7801.

[37] Y.-J. Kim, H. S. Ko, S. H. Lee, S. U. Son, D. W. Jung, and D. Y. Byun, "Numerical and experimental analysis of electrostatic ejection of liquid droplets", Journal of Korean Physics Society, 51, July 2007, 42-46.

[38] B. Q. Tran Si, D. Y. Byun, S. H. Lee, "Experimental and Theoretical Study of Cone-jet for Electrospray Micro-Thruster Considering Interference Effect in Array of Nozzles", Journal of Aerosol Science , 38, 9, 924-934, 2007.

[39] S. H. Lee, D. Y. Byun, D. W. Jung, J. Y. Choi, Y. J. Kim, J. H. Yang, S. U. Son, B. Q. Tran Si, H. S. Ko, "Pole-Type Ground Electrode in Nozzle for Electrostatic Field Induced Drop-on-Demand Inkjet Head", Sensors and Actuators, A 141, 506-514, 2007.

[40] S. H. Lee, D. Y. Byun, S. J. Han, S. U. Son, Y. J. Kim, H. S. Koh, "Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid", 2004 International Syposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya University, Japan, October 31-3 November, 2004

[41] S. H. Lee, H. S. Ko, D. Y. Byun, S. J. Han, J. H. Yang, Y. J. Kim, and S. H. Baek, "Manipulation of Single Walled Carbon Nanotube Droplets", IEEE International Conference on Mechatronics(ICM2005), 10-12 July, 2005, Taipei, Taiwan

[42] S. U. Son, J. T. Oh, S. H. Lee, D. Y. Byun, H. S. Ko, Y. J. Kim, J. H. Yang, and H. C. Kim, "Fabrication and Performance Analysis of Electrostatic Micro-droplet Ejector", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2005), 10-12 July, 2005, Taipei, Taiwan

[43] S. H. Lee, D. Y. Byun, H. S. Ko, Y. Kim, J. H. Yang, S. J. Han, S. U. Son and J. T. Oh, "Electrostatic Droplet Ejector with Monolithic Fabrication of nozzle", Nanotech 2005, May 8-12, 2005, Anaheim CA USA

[44] D. W. Jung, Y. J. Kim, D. Y. Byun, H. S. Ko, S. H. Lee, "Investigations of the Mechanisms of the Electrostatic Droplet Ejections", IEEE-NEMS 2006 Zhuhai, China January 18-21

[45] S. H. Lee, J. T. Oh, J. H. Yang, D. Y. Byun, "An Electrostatic Drop-On-Demand Micro Droplet Ejector with a Pole Type Nozzle", IEEE-NEMS 2006 Zhuhai, China January 18-21

[46] S.U.Son, J.Y.Choi, S.h.Lee, Y.J.K im., H.S.Ko, H.C.Kim, D.Y.Byun, "Development of an Electrostatic Drop-On-Demand inkjet Device for Display Fabrication Process", International Meeting on Information Display and International Display Manufacturing Conference (IMID/IDMC 2006), August 22-25, Daegu, Korea

[47] D. Y. Byun, Y. J Lee, Si Bui Quang Tran, V. D. Nugyen, S. H. Kim, B. H. Park, S. H. Lee, Niraj Inamdar, Haim H. Bau, "Electrospray on super-hydrophobic nozzle treated by Ar and oxygen plasma", Applied Physics Letter 92, 093507, 2008.

[48] 양지혜, 변도영, 정전기장 콜로이드 마이크로 추진기관의 크기에 따른 영향에 대한 연구, 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, pp.278-281

[49] A. Sou, K. Sasai, T. Nakajima, "CONTROL OF INK TRANSPORTATION IN ELECTROSTATIC INKJET PRINTER", Proceedings of ASME FEDSM'02, 2002 ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, 2002

[50] D. Y. Lee, Y. S. Shin, S. E. Park, T. U. Yu, and J. H. Hwang, "Applied Physics Letters 90", 081905 (2007).

[51] J.U. Park, M. Hardy, S.J. Kang, K. Barton, K. Adair, D.K.

Mukhopadhyay, C.Y. Lee, M.S. Strano, A.G. Alleyne, J.G. Georgiadis, P.M. Ferreira, and J.A. Rogers, Nature Materials 6, 782-789 (2007).

◎ 저 자 약 력

변 도 영

· 1994년 한국과학기술원 항공공학 학사
· 1996년 동대학원 항공공학 석사
· 2000년 동대학원 기계공학 박사
· 2007년~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학 부교수
· 2003년~2006년 건국대학교 항공우주정보시스템공학 조교수
· 2000년~2002년 한국과학기술기획평가원 연구위원
· 관심분야 : 마이크로, 나노스케일의 패터닝이 가능한 잉크젯 연구를 수행하고 있고 정전기장을 이용한 유체제어에 대한 연구를 수행하고 있으며, MEMS/NEMS 개발을 위한 microfluidics/nanofluidics 관련 연구를 수행중임. 더불어 자연계의 현상을 모방하여 공학적으로 구현하는 Biomimetics 관련 연구도 수행하고 있으며 세부적으로는 곤충의 비행원리를 규명하고 이를 비행로봇시스템으로 구현하는 연구과제 수행중임.

이 석 한

· 1972년 서울대학교 전기공학 학사
· 1974년 동대학원 전기공학 석사
· 1982년 Purdue University, West Lafayette, Electrical Engineering 박사
· 2003년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수, 성균관대학교 지능시스템연구센터 센터장
· 1998년~2003년 삼성종합기술원, Chief Research Officer-Microsystems 총괄(전무), 특별연구팀 팀장(겸), System & Control Sector 연구소장(전무) MEMS, Nano, and Mobile Systems Laboratories 연구소장
· 1990년~1997년 Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology(NASA), Senior Member of Technical Staff
· 1983년~1997년 Univ. of Southern California 조교수, 부교수(겸직), 정교수(겸직)
· 1982년~1983년 Rensselaer Polytechnic Institute, Post Doctoral Fellow
· 관심분야 : 나노 시스템 분야에서는 Ubiquitous Computing에 필요한 MEMS/NEMS, 광 결정을 포함한 광 집적소자, 생물체의 감지(가운데 점)구동 및 에너지 시스템을 모체로 하는 Nano-Bio Robotics에 관한 연구를 하고 있음. 지능 시스템 분야는 시각/청각 정보에 의한 실시간 인지 및 이해, 지능구현을 위한 정보처리 엔진, 이동 및 조작을 위한 Sensory-Motor Coordination에 관한 연구를 수행하고 있음.