

나노 금속잉크의 미세 액적 토출을 이용한 마이크로 패터닝

서상훈*, 박성준, 정현철, 정재우 (삼성전기 중앙연구소 eMD Lab.)

Micro Patterning of Conductive Line by Micro Droplet Ejection of Nano Metal Ink

S. H. Seo*, S. J. Park, H. C. Jung, J. W. Joung. (Samsung Electro-Mechanics Co. LTD.)

ABSTRACT

Inkjet printing is a non-contact and direct writing associated with a computer. In the industrial field, there have been many efforts to utilize the inkjet printing as a new way of manufacturing, especially for electronic devices. For the application of inkjet printing to electronic field, one of the key factors is exact realization of designed images into printed patterns. In this work, micro patterning for conducting line has been studied using the piezoelectric print head and silver nano ink. Dimensions of printed images have been predicted in terms of print resolution and diameter of a single dot. The predicted and the measured values showed consistent results. Using the results, the design capability for industrial inkjet printing could be achieved.

Key Words : Inkjet printing (잉크젯 인쇄), Micro patterning (마이크로 패터닝), Metal line (금속배선), Micro droplet (미세 액적)

1. 서론

잉크젯 인쇄는 비 접촉 방식으로 컴퓨터 기반 시스템과 연계되어 직접 인쇄를 수행하는 기술이다. 기존의 포토공정을 위한 마스크 제작이나 스크린 프린팅과 같은 복잡한 공정 없이 원하는 형상을 직접 구현할 수 있고, 근본적으로 미세물질을 특정위치에 침적시키는 기술이며 drop on demand (DOD) 기술이라고 한다. 이러한 장점을 이용하여 잉크젯 프린팅을 산업용 기술로 활용하기 위한 많은 노력들이 행해지고 있다.[1] 잉크젯 인쇄기술을 산업용 생산기술에 적용하기 위하여는 내구성, 신뢰성이 우수한 헤드와 다양한 기능성 잉크, 기관의 표면처리, 인쇄된 이미지의 열처리공정 등의 프로세스 기술이 요구된다. 그래픽 분야의 눈부신 발전으로 1~2 피코리터(pl)의 미세 액적을 토출할 수 있는 헤드가 등장하였고, 최근 나노 기술의 비약적 발전으로 많은 기능성 잉크들이 개발되어, 산업용 잉크젯에서도 개선된 인쇄모드로 충분히 우수한 이미지 품질을 얻을 수 있게 되었다. 이를 바탕으로 flat panel display나 유기 트랜지스터, RFID, DNA chips, PCB,

micro lens array와 같은 여러 제품에 적용 가능하게 하고 있다.[2] 그래픽 분야에서의 잉크젯 기술은 색상을 띄는 염료 혹은 안료를 원하는 위치에 균일하게 인쇄하는 것이 중요하다. 그러나 산업용 분야에서는 금속, 세라믹, 폴리머(polymer) 등 기능성 물질로 이미지를 인쇄하는데 이러한 이미지들이 전기전도, 발광, 저항 등의 기능을 수행하기 때문에 정확한 액적의 제어, 인쇄 이미지의 길이, 폭, 높이 등의 치수제어가 매우 중요하다. 본 연구에서는 압전 구동방식(piezoelectric)의 잉크젯 헤드로 나노 금속잉크를 수~수십 pl의 미세 액적 형태로 토출하여 금속 마이크로 패턴을 형성하는 기술에 관한 연구를 수행하였다. 특히 인쇄해상도(dot per inch; DPI)와 액적의 크기, 인쇄이미지의 크기를 설계 하였고, 이를 실제로 인쇄하여 인쇄결과와 비교하여 원하는 크기의 마이크로 패턴을 제작 할 수 있는 설계능력을 갖출 수 있게 되었다.

2. 잉크젯 프린팅의 원리

2.1 압전 소자를 이용한 잉크젯 헤드

압전 소자(piezoelectric)는 압전 현상을 나타내는 소자인데, 압전 현상이란 어떤 종류의 결정판에 일정한 방향에서 압력을 가하면 판의 양면에 외력에 비례하는 양·음의 전하가 나타나는 현상이다. 이러한 압전 소자 원리를 이용한 잉크젯 헤드의 작동원리에 관한 모식도를 그림1에 나타내었다. 잉크젯 헤드는 압전 소자, 멤브레인(membrane), 잉크를 저장하는 챔버(chamber), 잉크를 토출하는 오리피스(orifice) 혹은 노즐(nozzle)로 구성되어 있다. 전압 인가에 따라 압전 소자가 수축 혹은 팽창되며 이에 의해 챔버 내의 잉크가 오리피스 혹은 노즐을 통하여 토출된다.

잉크젯 헤드의 액적토출 원리는 그림1과 같이 전기장을 인가함에 따라 압전 소자가 확장되어 챔버 내 잉크가 충전되는 단계와 압전 소자가 유지되어 초기 토출 단계, 노즐에서 미세 액적이 토출되는 단계로 이루어진다.

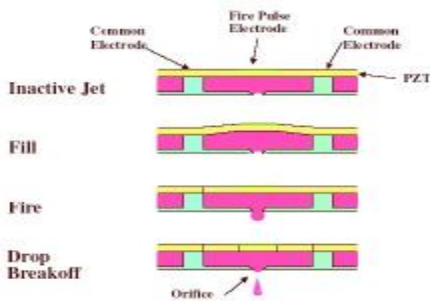


Fig. 1. Principles of micro droplet ejection

제어 인자로는 전압, 전압 인가 시간, 구동 파형, 토출 주파수, 매니스커스(meniscus)압력 등이 있다. 토출 주파수는 이송 스테이지 이송속도와 연관되어 결정되며, 이송속도는 0.1 내지 1m/sec의 범위로 작동한다.

2.2 액적 토출

그림2는 압전 소자의 구동에 의하여 액적으로 토출되는 형상을 나타내었다. 압전 소자의 구동력에 의하여 노즐로부터 토출된 잉크는 그림2의 상단부와 같이 막대형으로 신장되었다가 구 형태로 액적을 형성한다. 신장된 액적은 경우에 따라 하나의 구를 형성하기도 하고 한 개의 주 액적(main drop)과 이어지는 위성 액적(satellite)을 형성하기도 한다. 액적의 형태나 크기는 잉크의 점도와 표면장력에 크게 영향을 받으며 일반적으로 토출 가능한 점도

는 1-20cPs이고, 표면장력은 10-50dyne/cm이다. 토출 후 액적의 관찰을 통해 액적 크기, 부피, 속도, 직진성, 위성 액적의 끊어지는 시간(break-off time)등 여러 가지 정보를 얻을 수 있다. 헤드 구동 파형은 헤드 구동 모듈에 의해 생성하며, LED 스트로보(strobe)와 트리거(trigger) 신호로 연동시킨다. CCD 카메라를 통해 액적을 촬영하고, 촬영된 액적이미지를 비전 측정 소프트웨어를 이용하여 측정한다

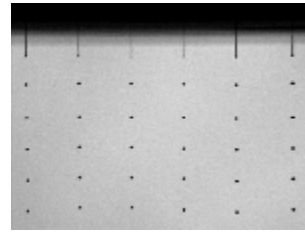


Fig. 2. Ejected droplet

2.3 토출 직진성

헤드의 노즐을 통해 토출된 액적의 직진성이 인쇄 품질에 중요한 영향을 미친다.

액적 속도가 높을수록 직진성이 좋아지는 경향을 보이지만, 기관에 따라서 기관에 탄착 시 액적이 형성되지 못하고, 튀는 문제가 발생할 수도 있다. 100pl의 액적에서는 20m/sec 이상의 조건에서 튀는 현상이 발견되었다. 또한 노즐 끝에서의 잉크의 젖음성에 의해 잘못된 방향으로 토출되는 경우도 많이 발견된다. 노즐에서 기관까지 거리가 짧으면 짧을수록 직진성은 높아진다. 적용되는 기관에 따라 다를 수 있겠지만, 잉크젯 시스템에서 노즐과 기관 간 거리는 1mm 이하로 권장되며, 보다 정밀한 탄착을 형성하기 위해서는 off-axis 속도 성분 또한 액적의 $\pm 0.7\%$ 이내로 유지되어야 한다.

그리고 노즐에서의 속도 균일성 또한 인쇄품질에 큰 영향을 주는 인자이다. 예를 들면, 속도가 $10\text{m/sec} \pm 1\text{m/sec}$ 이고, 기관 이송속도가 20ips(inch per second), 노즐-기관거리가 1.1mm 일 때, 탄착오차는 $\sim 10\mu\text{m}$ 가량 발생한다.

3. 실험

본 연구에서는 압전 소자를 이용한 헤드와 이송 스테이지로 구성된 토출 시스템을 사용하였다.

압전 구동 헤드는 128개의 노즐로 구성되어 있으며 노즐간 간격과 노즐지름은 각각 $508\mu\text{m}$ 와 $35\mu\text{m}$ 이다. 토출 가능한 잉크 점도 범위는 8-20cPs이다. 헤드는 고정된 상태에서 토출을 실시한다.

이송스테이지는 헤드의 토출 주파수와 연계하여 XY 방향으로 이동하면서 인쇄를 실시한다. 사용된

이송스테이지의 반복정밀도는 $\pm 1\mu\text{m}$ 이며, $0.5\mu\text{m}$ 해상도의 리니어스케일(linear scale)을 장착하고 있다.

잉크는 상업용 은 나노 잉크(silver nano ink)를 사용하였으며, 평균 30-50nm 크기의 입자로 되어있다. 잉크의 금속함유량은 무게비로 20%, 부피비로 2.2%로 되어 있다. 점도, 표면장력은 각각 14.4cPs, 31dyne/cm이며, 에틸렌 글리콜(Ethylene glycol)이 솔벤트(solvents)로 사용되었다.

기판으로는 사진인화지, PI(polyimide)가 사용되었다.

PI에 인쇄된 패턴은 250°C 에서 20분간 소성하였고, 사진인화지에 인쇄된 패턴은 추가의 열처리 없이 관찰하였다. 측정 시 광학현미경과 3차원 표면 측정기를 사용하였으며, 광학현미경은 Optiphot 150(Nikon Co.) 모델을, 표면 측정기는 Wyko NT1100(Veeco Co.) 모델을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 단일 액적 인쇄.

압전 구동방식의 헤드를 사용하여 나노 금속잉크를 토출하는데, 노즐에서 토출된 액적은 기판에 도달하여 일정크기로 퍼져서 점을 형성한다. 이러한 퍼짐 성은 기판과 잉크의 표면에너지 차이에 의해 발생한다. 실제로 노즐을 통해 노출된 30pl의 액적이 공기 중에서 $39\mu\text{m}$ 의 크기이지만, 기판에 탄착 시에는 표면상태에 따라 $70\text{-}120\mu\text{m}$ 까지 퍼지게 된다. 잉크와 기판의 표면에너지를 매칭시키는 것이 중요하며 잉크의 조성변화, 기판표면처리에 의해 가능하다. 그림 3에서는 기판과 잉크의 표면에너지에 따른 인쇄 점의 퍼짐 성 변화를 나타낸다.

그림3 (a)에서 P위에 비수 계 잉크 토출 시 $39\mu\text{m}$ 의 액적이 직경 $130\mu\text{m}$ 의 점으로 퍼지는 것을 볼 수 있었다. (b)에서는 PI위에 수계 잉크 토출 시 $39\mu\text{m}$ 의 액적이 직경 $100\mu\text{m}$ 의 점이 되어 (a)의 비수계 잉크에 비하여 퍼짐 성이 작아서 미세배선 형성에 유리하다. 비수계 잉크도 불소계 계면활성제나 플라즈마(plasma)처리를 통하여 표면 개질을 할 경우 인쇄된 점의 반경이 $100\mu\text{m}$ 로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. (c)에서는 (b)의 표면 profile을 나타내었다. 인쇄된 점의 폭은 $100\mu\text{m}$ 이었으며, 높이는 평균 $0.3\mu\text{m}$ 이었다. PCB(printed circuit board)배선 등에는 전기 전도도를 위하여 $10\mu\text{m}$ 이상의 배선 높이가 필요하다. 이를 위하여는 잉크 내 금속함량을 높이거나 반복인쇄방법이 있는데, 현재 사용하는 잉크는 금속함량은 22wt%로 직경 $100\mu\text{m}$ 의 인쇄 점에서 평균 높이 $0.3\mu\text{m}$ 이었으나, 금속함량

을 55wt%인 잉크를 사용할 때는 동일 직경에서 평균 높이가 $3\mu\text{m}$ 로 증가함을 확인하였다.

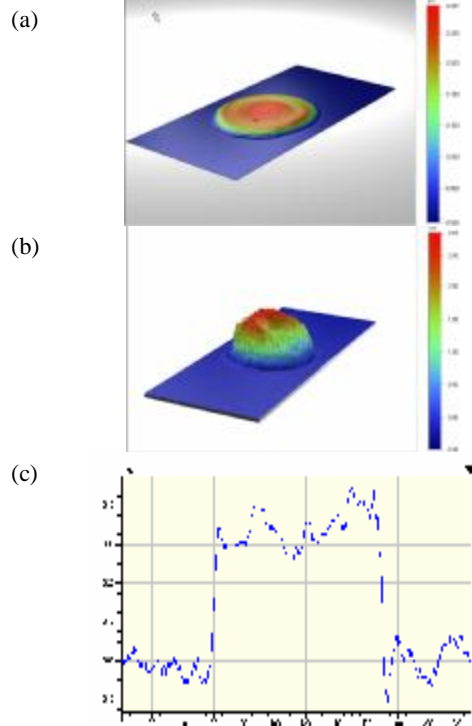


Fig.3. Three and Two dimensional surface profiles of printed single drop: (a)solvent-base ink printing on polyimide; (b)water-base ink printing on polyimide; (c)2-dimensional image of (b)

조건에 따라서 탄착된 점의 폭, 높이, 형상이 틀려짐을 알 수 있다. 이와 같이 기판 표면처리에 의한 젖음성 및 접착성 제어가 매우 중요하다. 잉크와 기판의 표면 에너지에 따라 잉크의 젖음성이 결정되는데 적절한 표면처리는 미세배선 및 인쇄배선과 기판 사이의 계면 접착력에 큰 영향을 미친다. 기판표면을 처리하는 방법에는 corona-discharge, plasma treatment, chemical coating & modification 등 물리적, 화학적 개질법이 있다.

4.2 선 인쇄.

선 인쇄는 점들의 중첩에 의하여 형성 되는데, 선의 길이 폭에 영향을 미치는 인자는 선을 구성하는 단일 점의 크기, 인쇄해상도 등이다.

그림4에서는 단일 점의 크기에 따른 선의 형상변화를 보여준다. 액적의 크기가 변화되거나 혹은 퍼짐성의 변화로 인쇄된 단일 점의 크기가 작아질 경우 동일 해상도에서 서로 인쇄되는 형상이 틀려진다. (a)의 경우 선을 형성할 때 단일

점들의 중첩이 많이 일어나서 매끈한 선을 형성하고 있지만, 선 폭이 커지는 경우이며, (b)는 선은 형성되지만 중첩이 작아져서 매끄럽지 못한 배선형태가 된다. (c)는 중첩이 되지 못해서 선을 형성 못한 경우이다. (a)와 (b) 조건 사이에서 최적화의 필요성이 있다.

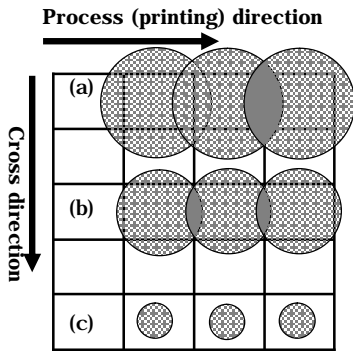


Fig.4. Drop size and line pattern

선 인쇄의 경우 해상도에 관한 개념이 중요하며, 이는 배선의 크기 및 형태에 중요한 영향을 미친다. 해상도는 1 인치 당 단일 점의 수를 나타내며, 점과 점 사이의 거리와 단일 점의 크기로 정의할 수 있다. 2 DPI(dot per inch)라 함은, 1인치 거리에 두 개의 단일 점을 형성할 때이므로 점과 점 사이의 거리는 $12700\mu\text{m}$ 가 된다. 그리고 그림 5 는 액적의 퍼짐성이 같을 때 인쇄해상도에 따른 선의 형상변화를 보여준다.

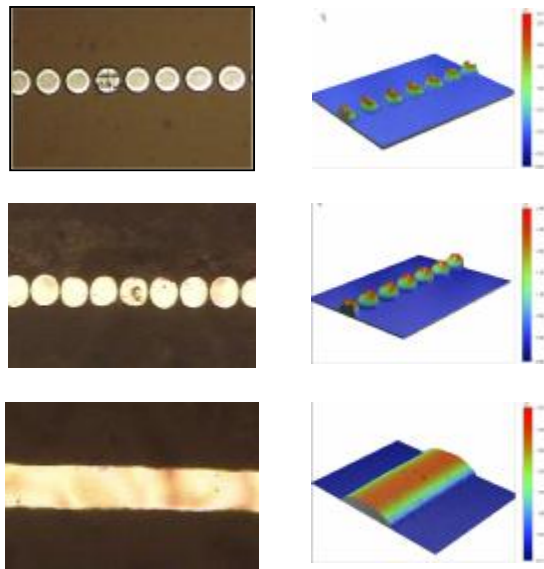


Fig.5. Line pattern with resolution:(a)300DPI; (b)350DPI; (c)500DPI

그림 5(a)에서 단일 점의 크기가 $70\mu\text{m}$ 이고, 인쇄 DPI 가 300 일 때 선을 형성하지 못한다. 이는 DPI300 에서 점과 점 사이의 거리가 $85\mu\text{m}(25400\mu\text{m per DPI})$ 로 점과 점이 중첩이 되지 않아서 선을 형성 하지 못하고 있다. 그림 5(b)에서는 DPI 가 350 으로 증가함에 따라 점과 점 사이가 $72\mu\text{m}$ 로 가까워 지지만 중첩이 되지 않아 선을 형성하지 못하는 형태이다. 그림 5(c)에서는 DPI500 일 때 점과 점 사이가 $50\mu\text{m}$ 이고 단일 점의 크기가 $70\mu\text{m}$ 이기 때문에 중첩되어 매끈한 선을 형성함을 알 수 있다. 그러나 이 경우 중첩이 과다할 경우 선 폭이 증가하고 금속입자의 과대 적층에 의한 배선 높이 및 기능성의 문제가 있을 수 있으므로 여러 상황들을 종합적으로 고려하여 인쇄 해상도를 결정해야 한다.

선을 인쇄할 때는 액적의 크기, 기관의 퍼짐성을 고려한 단일 점의 크기와 인쇄해상도에 따른 점과 점 사이의 거리를 고려하여 점들간에 충분한 중첩이 있도록 설계해야 매끈한 선을 형성 할 수 있다. 이처럼 배선을 제대로 형성하기 위해서는 액적의 크기를 감안하여 인쇄방향의 해상도를 제어해야 한다

4.3 면 인쇄.

단일 점의 중첩에 의하여 선이 형성되듯이 선들의 중첩에 의하여 면이 형성된다. 인쇄방향의 DPI 가 선의 형성에 영향을 미치고, 단면방향의 DPI가 면의 폭에 영향을 미친다.

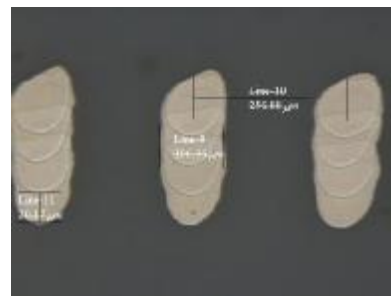


Fig.6. Patterns with 100 DPI in process direction and 500 DPI in cross direction.

그림6은 단면방향으로 해상도에 따른 배선의 결과를 확인하기 위해 액적 수를 늘려서 배선을 형성하여 보았다. process direction으로 100 DPI를 단면방향으로 500DPI로 배선을 형성하여 인쇄된 결과를 보여주고 있다. 인쇄방향으로 단일 점의 크기가 $100\mu\text{m}$ 임에 비하여 100DPI에서의 점과 점 거리는 $250\mu\text{m}$ 로 중첩이 되지 않아 선을 형성하지 못한다. 반면 단면방향으로 500DPI로 점과 점

사이의 $50\mu\text{m}$ 로 단일 점들간의 충분한 중첩이 발생하는 것을 확인하였다.

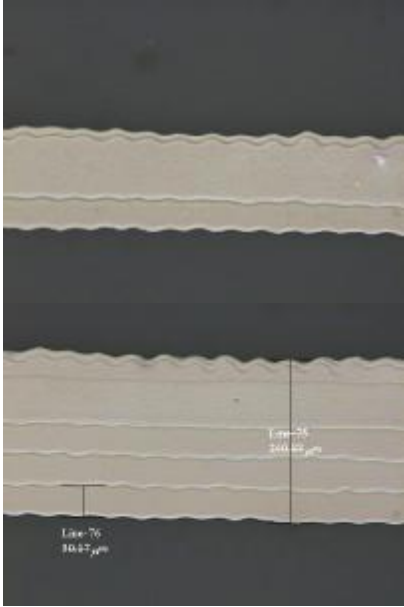


Fig.7. Patterns: (a)500 DPI in process direction and 500 DPI in cross direction (2 pixel-widths); (b)500 DPI in process direction and 500 DPI in cross direction (4 pixel-widths);

그림7에서는 인쇄방향으로 500DPI, 단면방향으로 500DPI의 인쇄이미지를 나타낸다. (a)에서는 2개의 선의 중첩으로 정의된 면은 폭이 $150\mu\text{m}$ 로 예상(단일 선폭 $100\mu\text{m}$ 과 선간 거리 $50\mu\text{m}$)되며, 실제 측정치는 $155\mu\text{m}$ 이다. (b)에서는 4개선의 중첩으로 정의된 면은 폭이 $250\mu\text{m}$ 로 예상(단일선 폭 $100\mu\text{m}$ 과 3개의 선간 거리 $50\mu\text{m}$)되며, 실제 측정된 폭은 $260\mu\text{m}$ 로서 거의 유사하다.

이상의 결과로부터 단일 점(선)의 폭과 DPI로부터 구해지는 점(선)간 거리로부터 인쇄이미지의 치수를 예측할 수 있으며, 나아가 배선이미지를 설계할 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 산업용 잉크젯의 경우 기능성 입자를 인쇄, 기능성 입자의 양에 따라 인쇄된 이미지의 기능이 결정되기 때문에 인쇄이미지의 정확한 설계 및 구현이 매우 중요하다.

5. 결론

본 연구에서는 압전 구동방식의 잉크젯 헤드로 나노 금속잉크를 수~수십 pL의 미세 액적 형태로 토출하여 금속 마이크로 패터를 구현하였다. 단일 점 인쇄결과 노즐에서 토출된 액적은 기판에 도달하여 일정크기로 퍼져서 점을 형성하는데, 이 때 퍼짐 성은 기판과 잉크의 표면에

너지 차이에 의해서 발생한다는 사실을 알 수 있었다. 선 인쇄는 단일 점들의 중첩에 의하여 형성 되는데, 단일 점의 크기, 인쇄해상도에 의하여 선의 길이 폭이 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 단일 점의 중첩에 의하여 선이 형성되듯이 선들의 중첩에 의하여 면이 형성되며단면방향의 DPI가 면의 폭에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 인쇄 이미지의 치수를 예측할 수 있었고, 배선 이미지의 설계 능력을 확보하였다.

참고문헌

1. Stephen F. Pond, Inkjet Technology and Product Development Strategies, Torrey Pines Research, Carlsbad, 2000.
2. Henning Sirringhaus and Tatsuya Shimoda, MRS Bulletin 28, 802 (2003).
3. Sang-Wook Lee, Hyeon-Cheol Kim, Ken Kuk and Yong-Soo Oh, "A Monolithic Inkjet Print Head: Domjet,"
4. Henning Sirringhaus and Tatsuya Shimoda, MRS Bulletin 28, 802 (2003).
5. Tatsuya Shimoda, Kastsuyuki Morii, Shunichi Seki, and Hirosh Kiguchi, MRS Bulletin 28, 821 (2003)
6. Max Shtein, Peter Peumans, Jay B. Benziger, and Stephen R. Forrest, Adv. Mater. 16, 1615 (2004).
7. Takeo Kawase, Tatsuya Shimoda, Christopher Newsome, Henning Sirringhaus, and Richard H. Friend, Thin Solid Films 438, 279 (2003).