

메니스커스 제어를 위한 정전기력 헤드용 공압 잉크공급장치 개발

Development of Pneumatic Ink Supply System for Electrostatic head on Meniscus control

양영진¹, 고정범², 당현우², 김형찬², 최경현^{1,✉}, 조경호¹
Young Jin Yang¹, Jeong Beom Ko², Hyun Woo Dang², Hyung Chan Kim², Kyung Hyun Choi^{1,✉}
and Kyung Ho Cho¹

¹ 제주대학교 메카트로닉스공학과 (School of Mechatronics Engineering, Jeju National Univ.)

² 제주대학교 전자공학과 (School of Electronics Engineering, Jeju National Univ.)

✉ Corresponding author: khchoi@jeju.ac.kr, Tel: 064-754-3713

Manuscript received: 2011.10.4 / Revised: 2011.12.21 / Accepted: 2011.12.28

The Electrostatic Inkjet system has many applications in cost and time effective manufacturing of printed electronics like RFIDs, OLEDs and flexible displays etc. This paper presents pneumatic ink supply system for an electrohydrodynamic deposition (EHD) setup for the precise pressure control to produce a small amount of discharge at the end of the capillary. The meniscus shape depends upon the applied pneumatic pressure to the ink supply system. Furthermore, this paper also compares meniscus shapes at different applied pneumatic pressures. It is concluded that patterning of constant line-width can be achieved better by controlling the meniscus shape using this technique.

Key Words: Meniscus Control (메니스커스 제어), Electrostatic Inkjet Head (정전기력 잉크젯 헤드), Pneumatic (공압), Ink Supply (잉크 공급장치), Electrohydrodynamics (EHD, 전기수력학적 잉크젯 시스템)

1. 서론

최근 디스플레이 산업에서 잉크젯 프린팅 기술이 크게 주목을 받고 있다. 잉크젯 프린팅 기술은 기존의 사진식각 공정을 대체할 수 있어 재료비 절감, 공정 수 감소 등이 가능하며, 저온에서 직접적인 미세패턴 형성이 가능하다.¹ 주로 직접 분사 패터닝 방식을 이용한 공정 방식을 적용하고, OPV(Organic photovoltaics), RFID(radio frequency identification)태그, OLED(Organic light-emitting diode), 플렉시블 센서, 플렉시블 디스플레이, E-paper(전자종이) 등과 같은 응용 매체를 저가·대량 생산 기술

로 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.²

직접 분사 프린팅 분야 중 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템은 현재 큰 시장이 형성되어 있지 않으나, 친환경적인 공정과 재료의 다양성, 고집적도 프린팅 등 다양한 장점을 갖는 잠재력이 큰 분야이다.

특히, 정전기력 기반의 잉크젯 헤드는 프린팅 기술의 핵심적인 부분으로 EHD(Electrohydrodynamic), ESD (Electrostaticdynamic), DOD(Drop-on-demand), Continuous Spray 등으로 분류되어 유럽국가나 일본 등에서 선행하여 기술 개발을 주도하고 있다.³ 국내에서도 잉크, 장비, 헤드, 기관 등 세부

분야로 나누어 많은 연구가 진행 중이나, 상용화 단계의 기술로 발전하기 위하여 해결해야 할 문제점이 산적한 실정이며, 최근 헤드의 안정성과 재현성 등의 문제를 토출 현상인 메니스커스(Meniscus) 제어를 통하여 해결하기 위한 연구가 이슈가 되고 있다.

메니스커스는 헤드에 잉크가 공급되어 토출되기 직전 노즐 끝단 잉크의 형성 모양을 일컫는데, 메니스커스 형성 모양에 따라 토출의 안정, 패터닝의 안정성이 영향을 받는다.⁴ 이러한 메니스커스 제어를 통한 프린팅 안정성 확보를 위한 연구가 기본적인 연구로 진행되고 있으며, 그 중요성도 부각되고 있다.

2. 정전기력 잉크젯

2.1 정전기력 잉크젯 헤드

정전기력 잉크젯은 기존의 잉크젯과는 달리 잉크에 주입된 전하에 의해 유발되는 정전기적 상호인력을 바탕으로 기관상에 패턴을 행하는 장치이다. 잉크 내에 정전기 반발력을 이용하여 분산되어 있는 입자들과 동일한 전하를 주입함과 동시에 기관상에 반대 전극을 설치하여, 이젝터와 기관상에 형성된 고전압에 의해 유도된 잉크 내 분산 미립자들에 의해 기관상에 패턴을 형성할 수 있다.⁵

정전기력 잉크젯 헤드의 구조는 Fig. 1 과 같이 잉크 공급 채널과 잉크 챔버의 헤드 몸체부와 노즐 오리피스, 음전극으로 구성된다. 잉크는 외부의 잉크 공급 펌프에서 헤드의 잉크 공급 채널을 통해 공급된다.

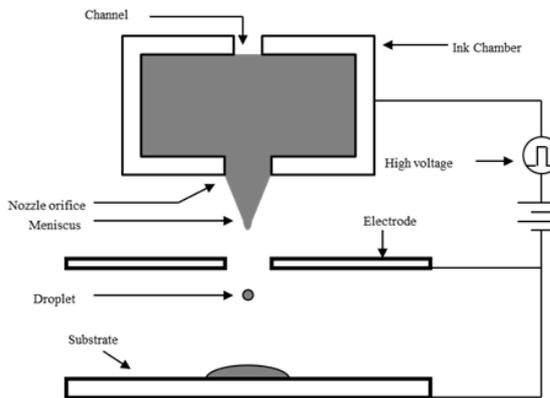


Fig. 1 Structure of Electrostatic Inkjet head

노즐 오리피스에 형성된 메니스커스에서 미세 액적을 토출하기 위한 조건은 Fig. 2 와 같이 3 가지 힘이 작용한다. 메니스커스를 기관 방향으로 끌어당기는 힘은 메니스커스의 작용하는 중력과 정전기력이다. 잉크의 표면장력에 의해 반대 방향으로 힘이 함께 작용하는데, 중력과 정전기력의 합이 표면장력보다 크게 될 때 액적이 떨어지게 된다.

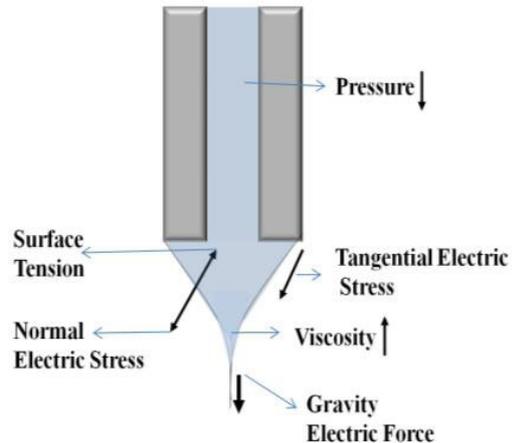


Fig. 2 The effect of forces in the nozzle for electrostatic inkjet system

2.2 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템

정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 다양한 기능성 재료를 정전기력 잉크젯 헤드를 통해 기관 위로 패터닝하기 위한 시스템이다. 일반적인 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 정전기력 잉크젯 헤드와 고전압 발생장치, 마이크로 용액 공급 장치, 정밀 이송장치, 이를 제어하는 통합공정 제어시스템이 Fig. 3 과 같이 구성된다.⁶

잉크젯 헤드 내부로 공급된 전도성 잉크가 직류 바이어스 전압에 의하여 노즐 오리피스 상에 잉크의 메니스커스를 형성되고, 여기에 고전압을 인가하여 메니스커스 끝단에서 잉크의 미세 액적을 분리시켜 기관 위에 패터닝한다.³

2.3 메니스커스

헤드와 음전극 사이에 고전압이 인가되면 정전기력으로 노즐 오리피스 밖으로 잉크의 메니스커스가 형성된다. 고전압, 노즐의 형상과 잉크의 특성을 조절하여 메니스커스 끝단에서 수 피코리터(pl, 10⁻¹²liter)의 액적을 토출하여 기관 상에 패터닝

한다. 메니스커스는 전하를 인가의 유무에 따라 또는 인가량에 따라 모양이 달라진다.⁶

선행된 여러 연구 결과에서 cone jet 모양의 메니스커스가 안정화 되었다고 한다. Fig. 4 와 같이 인가한 전압량에 따라 메니스커스 모양을 볼 수 있다. 전하 인가량에 따라 메니스커스가 안정화가 되었다는 것은 토출시키기 가장 좋은 상태라 할 수 있으며, 안정화로 인해 토출하는 에너지가 일정해지고 토출 시간 까지 감소시킬 수 있으며 재현성과 좋은 균일도를 가져 갈 수 있다. 이는 결국 패턴의 직진도, 패턴의 효율을 좋게 한다. 그래서 잉크젯 프린팅 기술에서 메니스커스 제어가 절대적으로 중요하다.

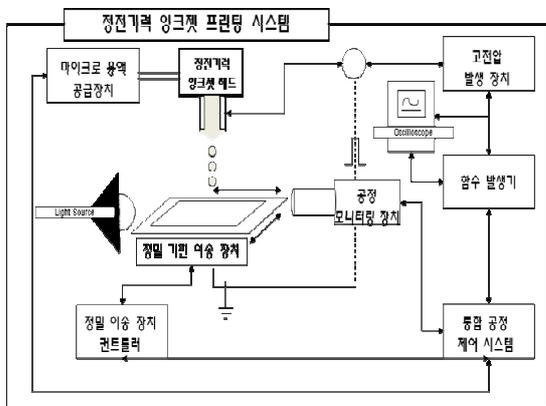


Fig. 3 Structure of electrostatic inkjet printing system

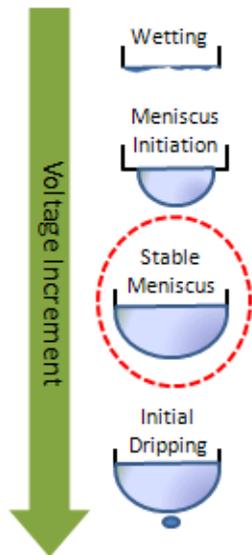


Fig. 4 Effects of DC bias voltage on meniscus height

2.4 공압에 의한 메니스커스 제어

기존의 syringe 펌프를 이용한 잉크 공급 장치를 통해 노즐에 잉크가 공급되고 안정적인 메니스커스의 모양의 전하를 걸어 패터닝 하는 것이 일반적이었다. 일반적으로 사용되는 syringe 펌프는 0.5~500 $\mu\text{l/hr}$ 정도며 우리는 20 $\mu\text{l/hr}$ 로 실험을 했다. 하지만 한번 패터닝 한 뒤, 다시 패터닝을 할 때 기존의 syringe 펌프만으로는 잉크공급의 정확한 제어가 힘들고 Fig. 5 처럼 메니스커스 형성의 균일도가 떨어지는 문제점이 있다.

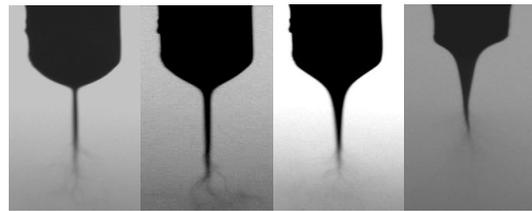


Fig. 5 Unstable meniscus shape

하지만, 개발한 공압 잉크공급장치는 패터닝 공정 중 소모된 잉크 양만큼 바로 채워줘서 안정적인 메니스커스 형성에 도움을 준다.

Jaideep⁷ 는 Young-Laplace equation 을 통해 계산된 캐필러리 압력으로 메니스커스의 형상을 추정해 내는 연구를 하였다. 본 시스템을 Young-Laplace equation 에 적용하였을 때, -1.5kPa~2kPa 범위의 압력 제어를 통하여 안정적인 메니스커스를 형성 할 수 있다. 기존 시스템의 syringe 펌프를 이용한 잉크공급장치는 미세 압력 제어와 선형적인 제어가 불가능하여 Fig. 5 처럼 불안정한 메니스커스를 형성하게 된다. 특히, 이와 같은 공정은 재현성이 떨어져 반복 패터닝 공정 시 균일도가 떨어지는 문제가 있다.

그래서 선형적인 제어와 미세 압력 제어를 위해서 소모된 양을 압력의 차를 이용하여 바로 공급해주는 공압 잉크공급 장치가 반드시 필요하다.

3. 공압 잉크공급장치의 개발 및 실험

3.1 공압 잉크공급장치 설계 및 제작

정전기력 잉크젯 프린팅 시스템에서 잉크를 헤드의 오리피스(orifice)까지 공급한 후 DC 전압을 헤드에 인가한다. 여기서 메니스커스 형성 조건을 조정하기 위하여 잉크 공급 유량을 재설정 하거나 중단을 하고 기존 DC 전압을 증가 또는 감소시키

면서 잉크 토출 직전 상태의 메니스커스를 형성시킨다. 이 메니스커스 제어는 액적의 토출량과 패터닝에 영향을 미친다. 기존의 syringe 펌프를 통해 잉크를 공급하는 방법은 syringe 펌프가 일정한 압력으로 밀어 준다고 하여도 유량이 일정하지 않게 된다. 그래서 적절한 메니스커스를 형성 및 제어하고 공급되는 유량을 일정하게 하기 위해서 공압 잉크공급장치를 설계하였다.

피에조 프린팅 공정은 공압 잉크공급장치가 개발되어 적용하고 있으나, 많은 양을 토출하는 피에조 헤드의 특성상 설정 압력이 범위가 크다. 하지만 정전기력 기반의 프린팅 공정은 피에조 프린팅 공정보다 토출되는 양이 미세하기 때문에 정밀한 설정 압력 제어가 필요하다. 특히 ESD, EHD 에 적용 가능한 잉크공급 장치는 현재 개발된 부분이 없고, 각 연구팀이 보유하고 있는 공정 특성을 만족하는 잉크공급 장치를 개발하여 사용하여야 한다.

Fig. 6 은 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 적용을 위한 공압 잉크공급장치의 설계 개념도이다. 압축기의 압력이 1MPa 정도의 공기가 필터를 거쳐 증압밸브에서 압력을 절반 정도 강하시켜 솔레노이드밸브를 통해 한쪽 레귤레이터에는 정압을 걸고, 다른 한쪽 레귤레이터에는 진공압을 걸어준다. 처음에 1~10kPa 인 정압으로 잉크를 노즐로 밀어서 떨어뜨리고 0.2~0.7kPa 인 진공압으로 잡아줘서 안정적인 메니스커스가 되도록 한다. 개발하는 공압 잉크공급장치는 레귤레이터를 통해 일정하게 압력을 유지시켜 잉크가 소모됨에 압력의 차로 인해 소모된 잉크량 만큼 유량이 공급되며, 인가된 전하와 압력 등 실험조건을 바꿔가면서 실험을 진행할 수 있도록 공압 잉크공급장치 박스 전면부의 버튼을 조절하면 압력을 선형적으로 변화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

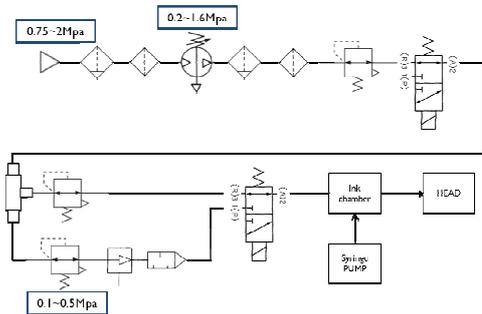


Fig. 6 Design for pneumatic ink supply system

3.2 잉크 헤드 설계

공압 잉크공급장치로부터 일정한 공기압을 받고, 잉크 펌프로부터 일정하게 잉크를 공급받을 수 있는 잉크챔버를 설계하였다. 이 잉크챔버는 피에조에서 사용되는 잉크챔버를 수정 및 보완을 하였다. 피에조에서 사용하는 잉크챔버는 챔버의 깊이가 깊어 수위를 측정하면서 소모된 만큼 잉크를 주입한다. 하지만 항상 잉크에 일정한 압력을 가지고 주입이 되고, 그 잉크를 안정적인 메니스커스 형성이 되도록 공압으로 제어한다. 잉크챔버가 커질경우 많은 양의 잉크가 주입되어야 하며, 챔버 속 압력의 변화가 생길 수 있어 실험 시 잉크의 양을 10ml 로 선정하고 챔버의 체적을 설계하였다. Fig. 7 은 실제 제작한 공압 잉크공급장치의 사진이다. 왼쪽은 공압 제어부이고, 오른쪽은 잉크 헤드이다. 잉크 헤드는 챔버의 상부에서 일정한 압력의 공기가 들어올 수 있도록 피팅을 체결, 측면에는 일정한 압력으로 잉크가 들어올 수 있도록 튜브를 체결하고, 밑에는 노즐이 체결될 수 있도록 설계하였다.

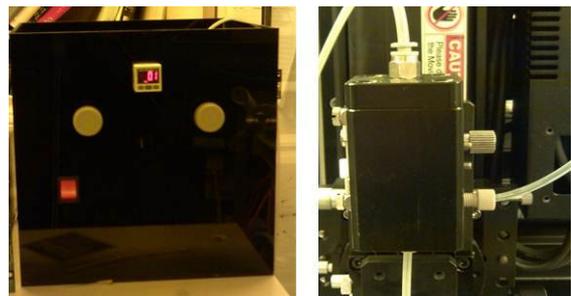


Fig. 7 Developed inkjet supply system (left : pneumatic system, right : inkjet head)

제작된 공압 잉크공급장치의 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of pneumatic ink supply system

Pressure range	Ink capacity	Resolution
-1.5~10kPa	10ml	0.1kPa

3.3 실험

정전기력 잉크젯 헤드의 실험에서 고려해야 할 요소들은 잉크의 종류에 따른 점도, 표면장력, 건조특성 등이 있다. 그래서 실험에 사용한 잉크의 특성은 Table 2 와 같다.

Table 2 Properties of the ink used in experiments

Type of Metal	Particle size	Metal contents	Viscosity	Sintering conditions
Silver	5~12nm	52~57wt%	8~15mPa·s	120~150 °C

실험에 사용된 노즐은 30 μm의 내경을 가지며, 액적 토출 현상에 대한 실험을 위하여 일정한 유량 공급이 되도록 공압 잉크공급장치를 통해 잉크를 헤드의 오리피스까지 공급한 뒤 DC0~4kV 전압을 헤드에 인가하여 액적 토출현상을 제어한다

액적 토출의 특성은 고전압 조건에 많은 영향을 받기 때문에, 액적 토출 현상을 관찰하고 제어하기 위해 5,000~10,000FPS 의 초고속 카메라를 설치하였다.

3.4 결과 및 고찰

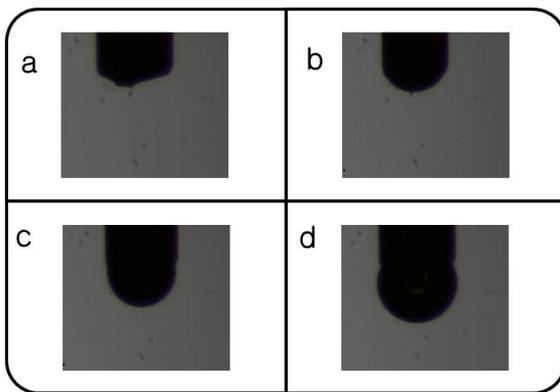


Fig. 8 Meniscus shape by Pressure (a:-0.4kPa, b:-0.2kPa, c:0.9kPa, d:1.0kPa)

잉크헤드에 정압을 가하여 노즐 끝단에 액적을 형성시킨 뒤 공압으로 노즐 내부의 압력을 변화시킴에 따른 메니스커스의 형상이 Fig. 8 과 같다. a 는 잉크의 공급량이 적고, c 와 d 는 공급량이 많은 형상이다. 잉크 공급량이 적거나, 많은 경우 cone jet 을 형성할 수 없다. cone jet 을 형성할 수 없으면 안정적인 토출 공정을 진행할 수 없다. b 는 안정적인 메니스커스를 형성하여 cone jet 을 형성할 수 있다. 안정적인 메니스커스를 형성하는 압력을 설정해두면 일정한 메니스커스를 형성할 수 있다.

Table 3 Parameter of the process

Section	Ink flow	Nozzle diameter	Voltage
Syringe pump	20 μl/hr	30 μm	1.6kV DC
pneumatic	0.2kPa		

Table 3 과 같이 공정 조건을 설정하여 공압 잉크공급장치를 통하여 안정적인 메니스커스를 형성한 뒤 패터닝 한 결과는 Fig. 9 와 같다. 오른쪽 사진은 syringe 펌프를 이용하여 패터닝한 결과이고, 왼쪽 사진은 개발한 장치로 안정적인 메니스커스를 형성하여 패터닝한 결과이다.

syringe 펌프를 이용하여 패터닝한 결과는 선폭의 균일성과 직진도가 떨어지지만, 개발한 공압 잉크공급 장치를 이용하여 패터닝하면 일정한 선폭의 패터닝 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

정전기력 잉크젯 프린팅에서 메니스커스는 패턴의 균일도의 향상, 패턴의 효율 등을 높여주는 중요한 인자이다. 그래서 안정적인 메니스커서의 형성이 필요하다. 기존의 정전기력 잉크젯 프린팅 기술에서는 syringe 펌프만을 통한 유량을 제어하기 때문에 패터닝 한 뒤 다시 안정적인 메니스커스를 형성하는데 어려움을 겪는다.

본 논문에서는 안정적인 메니스커스 형성 및 제어를 위해 공압으로 잉크를 공급하는 공압 잉크공급장치를 설계하였다. 이 공압 잉크공급장치는 정압과 차압을 각각 걸 수 있으며, 디스플레이를 통해 반복적이고, 손쉽게 압력 값을 설정할 수 있다. 또한, 기존의 syringe 펌프 방식의 잉크 공급장치는 스크류의 회전으로 잉크가 공급되는 방식으로 잉크젯 시스템과 같이 소량의 잉크를 사용하는 공정에 적용하면, 잉크 공급이 일시적으로 끊어졌다 다시 공급되어 연속적인 잉크공급에 문제가 있다. 반면, 공압으로 일정한 압력을 설정하면 토출한 뒤에도 압력 차로 인해 일정하게 잉크를 공급할 수 있다.

개발된 공압 잉크공급장치를 적용하여 균일한 선폭의 패턴을 구현하였다.

본 연구를 기반으로 30 μm 노즐 대비 최소 20 μm의선폭을 균일성 있는 패턴을 형성할 수 있었다. 기존연구에서는 동일 선폭을 형성할 수 있으나 패턴의 균일성과 재현성을 확보할 수 없었으나, 본 연구를 통하여 패턴의 균일성과 재현성 확보하여, 안정적인 잉크젯 시스템을 구현할 수 있다.

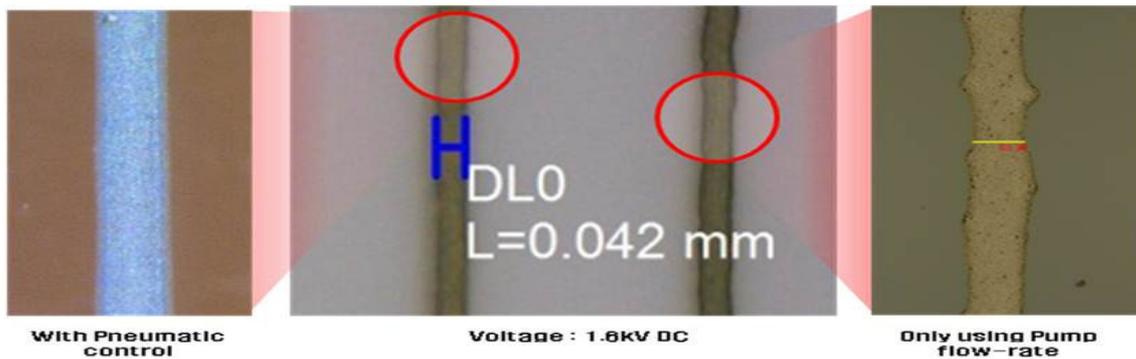


Fig. 9 Comparison of printed line uniformity (right-using syringe pump only, left-using developed ink supply system)

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(2010-0026163).

참고문헌

1. Choi, K. H., Khan, S., Dang, H. W., Doh, Y. H. and Hong, S. J., "Electrohydrodynamic Spray Deposition of ZnO Nanoparticles," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 5, Paper No. 05EC08, 2010.
2. Choi, K.-H., Rahman, A., Ko, J.-B., Rehmani, A., Ali, A., Doh, Y.-H. and Kim, D.-S., "Development and ejection behavior of different material-based electrostatic ink-jet heads," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 48, No. 1-4, pp. 165-173, 2010.
3. Kim, H. C., Ko, J. B., Kim, D. S., Doh, Y. H. and Choi, K. H., "Study of High aspect ratio pattern development use the Electrostatic Inkjet," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 751-752, 2009.
4. Joffre, C., Prunet-Foch, B., Berthomme, S. and Cloupeau, M., "Deformation of Liquid Meniscus Under the Action of an Electric Field," J. Electrostatics, Vol. 13, No. 2, pp. 151-165, 1982.
5. Kim, J.-W., Choi, K.-H. and Kim, D.-S., "A Study for Micro-patterning using an Electrostatic Inkjet," Proc. of KSME Autumn Conference, pp. 1103-1106, 2008.
6. Ko, J.-B., "Development of Electrostatic Inkjet Head for Printed Electronics," Faculty of Applied Energy System Major of Electronic Engineering, Master of Science, Jeju National University, pp. 11-13, 2010.
7. Chatterjee, J., "Prediction of coupled menisci shapes by Young-Laplace equation and the resultant variability in capillary retention," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 314, No. 1, pp. 199-206, 2007.