

&lt;초청논문 &gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2017.5.1.007>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집: 대한기계학회 70 년과 기계산업】

인쇄전자 기술 및 장비개발 현황<sup>§</sup>신 동 윤<sup>\*†</sup>

\* 부경대학교 인쇄정보공학과

## Methods and Development Status of Equipment for Printed Electronics

Dong-Youn Shin <sup>\*†</sup>

\* Dept. of Graphic Arts Information Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received January 26, 2016 ; Revised March 30, 2016, Accepted March 30, 2016)

**Key Words:** Printed Electronics (인쇄전자), Printing Methods (인쇄방식), Printing Equipment (인쇄장비)

**초록:** 액상의 전자재료를 인쇄라는 저비용 패턴방식을 이용하여 전자 혹은 디스플레이 부품 및 제품을 대량 생산하는 것을 인쇄전자라고 하며, 2007 년을 전후하여 국내에서도 본격적으로 저비용 전자 및 디스플레이 부품 및 제품을 제조하기 위한 소재, 공정 및 장비에 대한 연구가 시작되었다. 본 연구에서는 수~수십 마이크로미터급의 해상도를 가지는 전자 혹은 디스플레이 부품 및 제품을 생산할 수 있는 초정밀 인쇄전자 장비들에 대해 소개하도록 한다.

**Abstract:** Printed Electronics is a relatively new subject where electronics and display appliances are mass-produced by employing low-cost printing techniques with electronic materials suspended in a liquid medium, and many efforts to develop materials, process and equipment to commercialize low-cost electronics and display parts have been made since 2007 in the Republic of Korea. In this work, the development status of printing equipment for printed electronics and display components in the size of a few micrometers and tens of micrometers is briefly introduced.

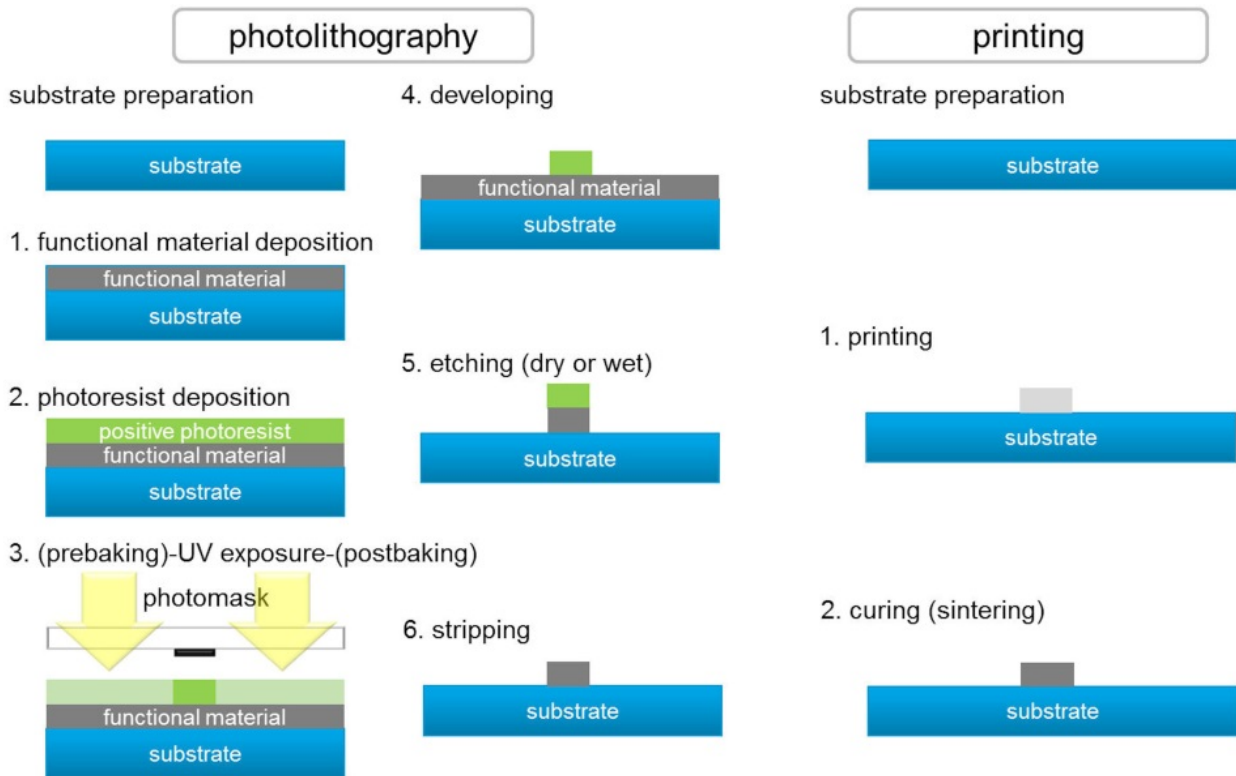
## 1. 서 론

기존 반도체 공정(photolithographic process)을 이용하여 금속전극을 형성해야 할 경우, Fig. 1(a)에 보인 바와 같이, (1) 기판 위에 금속전극의 재료를 전면 도포하고, (2) 포토레지스트(포토레지스트는 건식 혹은 습식 식각 공정에서 금속재료와 같은 기능성 재료의 식각을 방지해주기 때문에 넓은 의미에서 etch resist 라고도 칭한다.)를 전면 도포한 후 건조, (3) 포토마스크를 이용하여 노광(exposure)을 수행한 후 후열처리, (4) 현상(development)을 통해 노광이 수행된 곳을 제거(포지티브 포토레지스트 사용 시) 혹은 노광이 되지 않은 곳을 제거(네거티브 포토레지스트 사용 시), (5) 포토레지스트가 제거된 영역에 있는 금속재료를 건식 혹은 습식 공정을 통해 제거, (6) 불필요한 포토레지스트를 스트립 공정을 통해 제거하는 등 6 단계 이상의 공정을 수행하여야 한다. 반면, 인쇄공정을 이용할 경우에는 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이, (1) 금속전극을 형성하게 될 유기금속이 용해되어 있는, 혹은 금속 입자들이 분산되어 있는 저점도의 전도성 잉

§ 본 논문은 편집위원회의 초빙에 의해 대한기계학회 창립 70 주년을 기념하여 발행한 <대한기계학회 70 년과 기계산업>에 수록된 내용을 재정리한 논문임.

† Corresponding Author, dongyoun.shin@gmail.com

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers



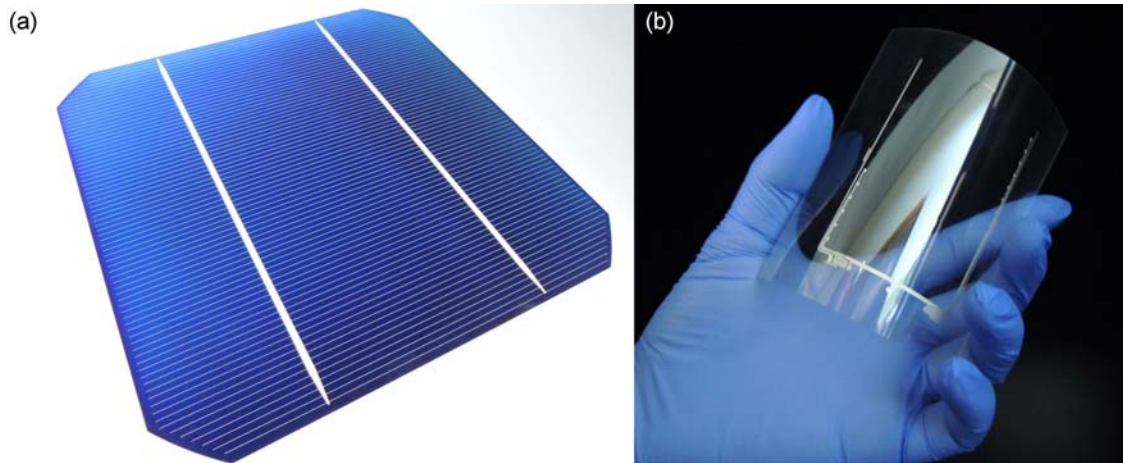
**Fig. 1** Illustration of process steps to construct conductive patterns with (a) photolithography and (b) printed electronics

크 혹은 중점도 이상의 전도성 페이스트를 인쇄한 후, (2) 소성(sintering)을 수행함으로써 최종 금속전극을 형성할 수 있다.

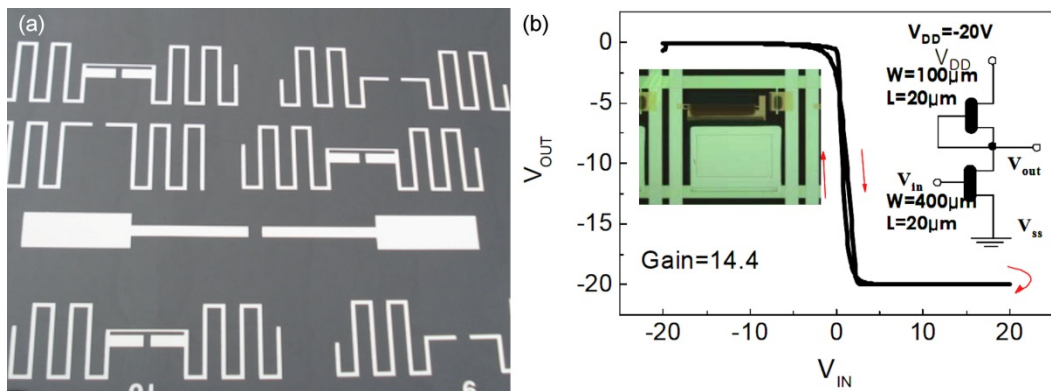
인쇄를 통해 금속전극을 형성할 경우, 기존 반도체 공정에 비해 공정 단계가 줄어들 뿐만 아니라 공정 중 버려지는 재료의 양을 획기적으로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이와 같이 인쇄를 이용하여 전자 혹은 디스플레이 부품 혹은 제품을 제조하는 것을 인쇄전자(printed electronics)라고 통칭하고 있으며, 학문의 한 영역으로서 그 입지를 다지고 있을 뿐만 아니라 인쇄전자와 관련된 소재 및 장비 산업 또한 급속히 성장하고 있다.

인쇄전자의 시초를 논하기 위해서는 인쇄가 전자제품의 제작에 적용되는 범주에 대해 재고되어야 한다. 예를 들어, Mr. Sprague 가 흑연 페이스트를 이용한 인쇄전자회로(printed circuit board) 제작의 개념을 제시한 것을 인쇄전자의 시초로 본다면, 인쇄전자의 역사는 1904 년까지 거슬러 올라갈 수 있다.<sup>(1)</sup> 또한, 지속 가능한 에너지원으로 지난 수 년간 많은 주목을 받아왔던 결정질 실리콘 태양전지(Fig. 2(a))는 전면과 후면에 전극을 가진 형태가 가장 일반적이며, 이러한 전극들은 스크린 인쇄를 통해 형성되는데, 그 역사가 1970 년대 초반까지 거슬러 올라 간다.<sup>(2)</sup> 야간에 조명이 들어오는 자동차용 속도 계기판, 풀 터치 스크린 스마트폰이 대세인 지금은 찾아보기 힘들지만 한때 야간에 조명이 들어오던 자판을 가진 휴대폰이나 PDP TV<sup>(3)</sup> 등, 우리 주변의 생활 속 상당 수의 전자제품들에 이미 인쇄전자가 적용되어 왔다.

그럼에도 불구하고, ‘인쇄전자’가 한국에서 새롭게 제조명된 것은 2000 년대 초반, 일본의 샤프(Sharp)와 대일본인쇄(Dai Nippon Printing) 등에서 압전 잉크젯 인쇄방식(piezo Drop-On-Demand inkjet printing)을 이용하여 TFT LCD TV 에 사용되는 RGB 컬러 필터(color filter)의 제작을 성공한 시점이었다. 일본과 치열한 TFT LCD TV 시장경쟁을 벌이고 있던 국내 대기업들은, 만약 샤프와 대일본인쇄가 반도체 공정 대신 압전 잉크젯 인쇄방식을 이용하여 TFT LCD TV 의 컬러필터 제조비용을 낮출 경우, 시장 경쟁력이 약화될 것을 우려하였다. 따라서, 2004 년 즈음부터 압전 잉크젯 인쇄방식을 이용한 TFT LCD TV 의 컬러 필터 제작을 위한 소재, 장비 및 공정에 대한 연구개발을 시작하였다.



**Fig. 2** Embodied examples of printed electronics, (a) a crystalline silicon solar cell and (b) bezel electrodes printed on a flexible film for touch screen panels



**Fig. 3** (a) Ultra-low cost RFID antennas formed by screen printing and (b) organic thin film transistors formed on a flexible substrate<sup>(4)</sup>

RFID (Radio-Frequency Identification) (Fig. 3(a))와 전자종이(e-Paper)와 같이, 유연한 기관 상에 박막 트랜지스터(Fig. 3(b))를 저비용으로 대량 생산하기 위한 연구개발이 중대형 정부 국책과제의 형태로 2007 년 을 전후하여 지원됨으로써,<sup>(4)</sup> 인쇄전자에 대한 연구개발이 국내에서 본격적으로 시작되었으며, 2007 년 Printed Electronics Symposium 의 개최를 시발로 인쇄전자 전문 국제학회들이 개최되기 시작하였다. 2008 년 한국인쇄전자산업협회(Korea Printed Electronics Association)가 창립되어 한국 인쇄전자 학계 및 산업계의 중추역할을 맡기 시작하였으며, Printed Electronics Symposium 은 Printed Electronics Korea 가 승계하여 매년 개최되고 있다. 2009 년부터 한국, 대만, 일본, 중국을 번갈아 가며 개최되는 국제학회인 International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE) 및 전라북도에서 개최되는 International Workshop on Flexible and Printable Electronics (IWFPE)가 시작되었다. 산업계에서도 리버스 오프셋(reverse offset) 인쇄방식을 이용하여 TFT LCD 의 백플레인(backplane)까지 제작한 TFT LCD TV 를 2010 년에 시연하는데 성공하는 등, 인쇄전자 학계 및 산업계에서 괄목할만한 성과들이 나오기 시작하였다.<sup>(5-7)</sup>

거기서 한걸음 더 나아가 인쇄공정을 이용한 OLED TV 제조관련 연구개발도 본격적으로 시작되었는데, 2011 년 삼성 디스플레이는 레이저 열전사 방식(Laser Induced Thermal Imaging)을 이용한 OLED 디스플레이를,<sup>(8,9)</sup> 2013 년 일본 파나소닉(Panasonic)사는 압전 잉크젯 인쇄방식을 이용한 56 인치 UHD OLED TV 를 시연하였다.<sup>(10)</sup>

최근에는 Fig. 4 에 보인 바와 같이, 고가의 투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide, TCO)인 ITO(indium tin oxide)를 사용한 투명 전도성 필름(transparent conductive film, TCF)을 대체하기 위해, 수 마이크로미터 선폭의 그리드 패턴 혹은 실버 나노선(nanowire)을 이용한 투명 전도성 필름의 제작과 관련된 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

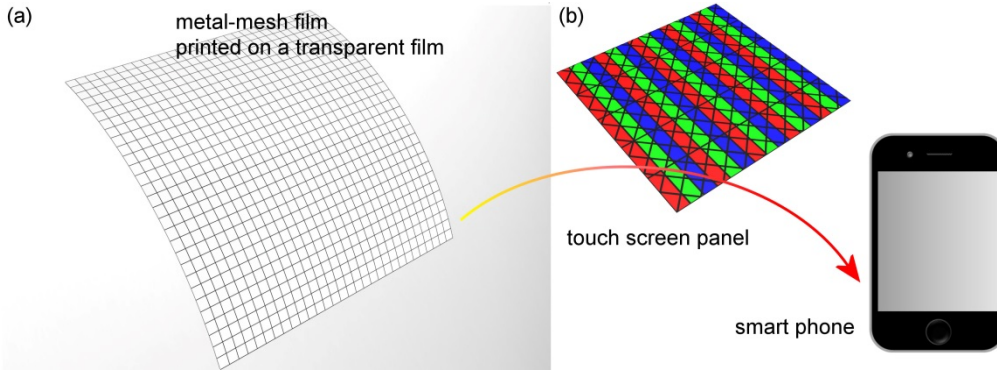


Fig. 4 Transparent conductive film with printed metal mesh patterns in (a) and an illustration of a smart phone in (b), where a printed transparent conductive film is used

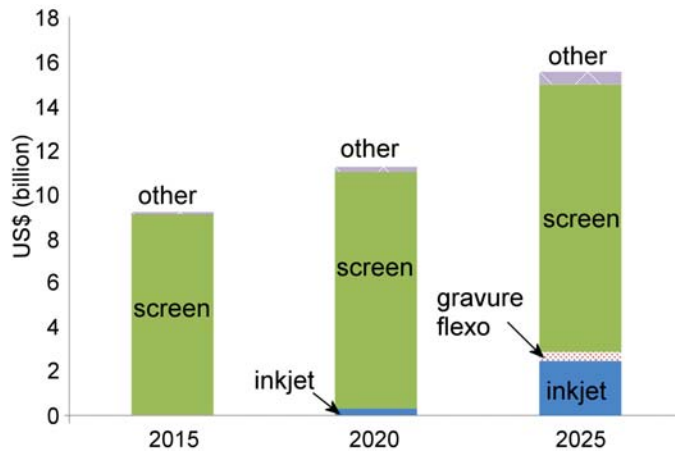


Fig. 5 Market opportunities for printing, curing and integration equipment<sup>(11)</sup>

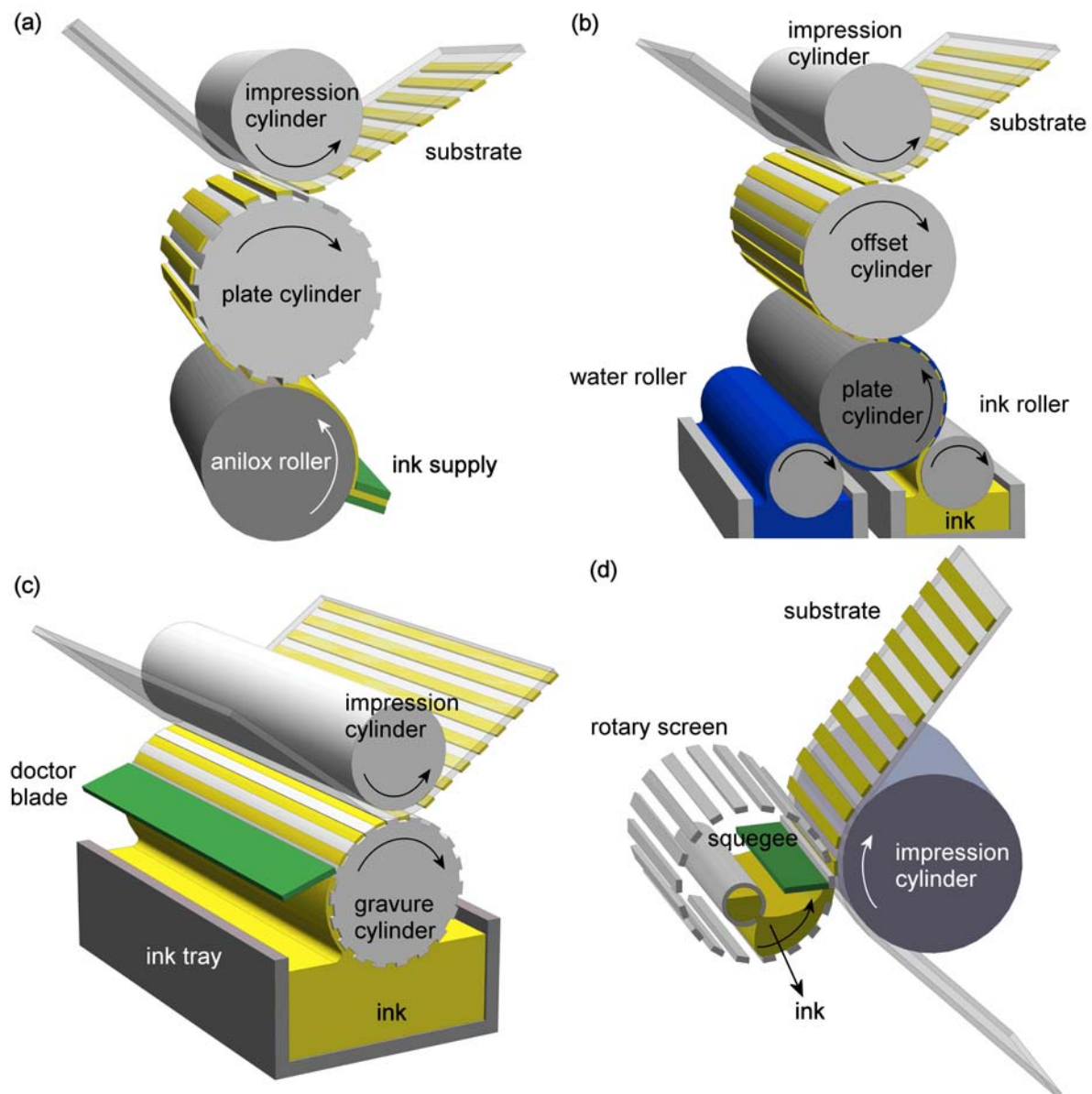
성공적인 인쇄전자 제품생산을 위해서는 수십 마이크로미터에서 서브 마이크로미터의 해상도를 구현할 수 있는 특별한 인쇄장비가 개발되어야 한다. Fig. 5 에 보인 바와 같이, IDTechEx Research 의 시장조사 결과에 따르면 초정밀 인쇄장비들에 대한 시장규모는 2015 년 91.5 억 달러에서 2025 년까지 155.7 억 달러까지 성장할 것으로 예상된다.<sup>(11)</sup> 스크린 및 스텐실 인쇄장비는 태양전지(Fig. 2(a)), 인쇄전자회로, 터치스크린의 베젤 전극(Fig. 2(b)) 등에 광범위하게 사용되어 왔으며, 향후 10 년 뒤에도 확고한 지위를 유지할 것으로 예측된다. 또한, 잉크젯 인쇄방식의 경우에도 현재 TFT LCD TV 의 배향막(alignment layer) 공정과 액정 도포 공정 외에도 OLED TV 와 같은 차세대 디스플레이 산업 등에 적용이 확대되면서 매우 큰 성장을 할 것으로 예측된다.

광의의 의미에서 인쇄전자용 초정밀 장비들은 기존 반도체 공정의 핵심인 노광 공정을 사용하지 않는 모든 공정 장비들을 포함할 수 있다. 예를 들어, (1) 마이크로컨택 인쇄(microcontact printing), 모세관 마이크로몰딩(micromolding in capillaries, MIMIC), 마이크로- 혹은 나노트랜스퍼 인쇄(micro- or nanotransfer printing)와 같이 연성 재료의 탄성 중합체를 이용하는 소프트 리소그래피(soft lithography)용 초정밀 장비들, (2) 나노임프린팅(nanoimprint lithography)을 위한 초정밀 장비들, (3) 레이저 전사법(laser direct write)을 위한 초정밀 장비들을 인쇄전자용 장비로 분류할 수 있다.<sup>(12)</sup> 더 나아가 서브 마이크로미터급의 얇은 박막을 코팅하기 위한 슬롯 다이 코팅과 같은 초정밀 코팅 장비들도 인쇄전자용 장비들로 분류할 수 있다.<sup>(13)</sup> 그러나, 본 글에서는 액상의 기능성 잉크 혹은 페이스트를 사용하여 직접 전자 혹은 디스플레이 부품 및 제품을 제조하는 초정밀 장비들 및 그 주변 기기들로 범위를 국한하여 개발현황을 소개하도록 한다.

## 2. 인쇄전자용 인쇄장비

## 2.1 접촉식 인쇄전자용 인쇄장비

인쇄기술의 한계 때문에 인쇄전자가 목표로 하는 제품들은 수십 나노미터의 초고해상도를 요구하는 메모리 반도체와 같은 고부가가치 제품들은 아니다. 서브 마이크로미터급의 초고해상도를 구현하기 위한 연구개발이 지속되고는 있으나, 저점도의 잉크 혹은 중점도 이상의 페이스트화가 가능한 기능성 소재를 기판에 직접 전이할 때의 해상도는 아직까지 수 마이크로미터 이상으로 제한되고 있다. 그러나, 저비용으로 대면적의 기판 상에 고속으로 대량 인쇄가 가능하다는 점이 기존 반도체 공정과 인쇄전자와의 주요 차별화 요소이므로, 이러한 장점들이 충분히 발휘되는 중·고해상도 전자제품들(예: RFID 안테나, 결정질 실리콘 태양전지, 자동차 속도 계기판), 그리고 나노선(nanowire)과 같은 소재의 특성을 이용한 제품들(예: 실버 나노선을 이용한 투명 전도성 필름 등)에 인쇄전자가 활발히 적용되고 있다. 특히, 고속으로 대량 인쇄가 가능한 롤 인쇄방식이 주로 고려되고 있다.



**Fig. 6** Various contact printing techniques, (a) flexography, (b) gravure, (c) offset and (d) rotary screen

대표적인 롤 인쇄방식으로는 (1) 볼록한 부분에 기능성 소재를 묻힌 후 기관으로 전사하는 플렉소 인쇄 (flexographic printing, 볼록 인쇄), (2) 평판에 소유성(oleophobic)과 친유성(oleophilic) 영역을 패터닝한 후, 친유성 잉크를 친유성 영역으로 1 차 전사 후, 기관으로 2 차 전사를 수행하는 오프셋 인쇄(offset printing, 평판인쇄), (3) 오목한 부분에 기능성 소재를 채운 후 후 기관으로 전사하는 그라비어 인쇄 (gravure printing, 오목인쇄), (4) 오목한 부분에 기능성 소재를 채운 후 중간 매개체인 블랭킷으로 1 차 전사 후, 기관으로 2 차 전사를 수행하는 그라비어 오프셋 인쇄 (gravure offset printing), (5) 개구부를 통해 페이스트를 기관으로 전사하는 로타리 스크린 인쇄(rotary screen printing) 등이 있다.

### 2.1.1 플렉소 및 오프셋 인쇄

Fig. 6(a)에 보인 플렉소 인쇄의 볼록 제판은 고무도장과 같이 주로 연성 재질의 탄성 중합체(elastomer)로 만들어진다. 전이된 잉크의 두께가 얇을 뿐만 아니라, 잉크가 기관에 전사될 때의 높은 압력에 의해 볼록 제판의 변형이 일어나기 때문에 높은 정밀도를 요구하는 인쇄전자용 인쇄방식으로는 적합하지 않아서 실제 적용 사례가 많지는 않은 편이다.<sup>(14)</sup> Fig. 6(b)에 보인 오프셋 인쇄의 경우 일반적으로 20  $\mu\text{m}$  급의 정밀한 인쇄를 수행할 수 있다고 알려져 있으나, 잉크의 전사가 오목 혹은 볼록 제판과 같은 물리적 제판이 아닌 소유성 및 친유성과 같은 표면 에너지의 차이로 구성된 평판에만 의존해야 하며, 잉크가 평판의 소유성과 친유성 뿐만 아니라 기관으로의 전사 적합성 또한 만족시켜야 하기 때문에 잉크 개발에 어려움이 있다.<sup>(15,16)</sup> 그 결과, 플렉소 인쇄와 마찬가지로 오프셋 인쇄가 인쇄전자에 적용된 사례는 많지 않은 실정이다.<sup>(17,18)</sup>

### 2.1.2 그라비어 및 그라비어 오프셋 인쇄

롤 인쇄 방식 중 가장 많은 연구개발이 이루어지고 있는 것은 Fig. 6(c)에 보인 그라비어 인쇄 및 그라비어와 오프셋 인쇄방식이 병합된 그라비어 오프셋 인쇄방식이다. 그라비어 인쇄는 금속과 같은 경성 재질의 오목 제판에 잉크를 채운 후 닥터 블레이드로 오목한 셀 외에 묻어 있는 잉크를 제거(doctoring)하며, 셀 내부에 남아 있는 잉크를 기관으로 전사하는 방식이다. 플렉소나 오프셋 인쇄에 비해 패터닝의 윤곽이 뚜렷하다는 장점이 있으나 오목 제판이 경성 재질로 제작되기 때문에 기관은 종이나 폴리머 필름과 같은 연성 재질로 제한된다. 반면, 그라비어 오프셋은 닥터링 후 오목 제판의 셀 내부에 남아 있는 잉크를 탄성 중합체 재질의 블랭킷으로 1 차 전사한 후, 다시 기관으로 2 차 전사하는 방식이다. 블랭킷의 재질이 연성 재질이므로 기관의 재질은 경성 혹은 연성 재질을 모두 사용할 수 있다. 이러한 장점 때문에 그라비어 오프셋 인쇄가 인쇄전자에 애용되어 왔다.<sup>(19,20)</sup> 그러나, 오목 제판으로부터 잉크가 전이된다는 특성 상 인쇄된 패턴의 두께가 오목 제판의 선폭, 인쇄되는 방향과의 각도, 그리고 인쇄 공정 조건 등에 영향을 받는다는 문제점이 있다.<sup>(21-24)</sup>

### 2.1.3 로타리 스크린 인쇄

로타리 스크린 인쇄는 평판 스크린 인쇄의 변형으로서, Fig. 6(d)에 보인 바와 같이, 메쉬에 감광성 에멀션을 이용하여 개구부를 형성한 롤 형태의 스크린 제판 내부에 중점도 이상의 페이스트를 넣고, 롤 형태의 스크린이 회전함에 따라 스퀴지에 의해 개구부로 페이스트가 기관으로 전사되는 인쇄방식이다.<sup>(25)</sup> 평판 스크린 인쇄에 비해 연속생산이 가능하다는 장점뿐만 아니라 스퀴지가 스크린에 가하는 인압에 의해 발생하는 이미지 왜곡이 적다는 장점이 있다. 스크린 인쇄의 특성 상 항복응력을 가지는 중점도 이상의 페이스트를 사용하기 때문에 박막이 요구되는 제품보다는 RFID 안테나와 같이 중해상도 이하에서 후막이 요구되는 제품에 적합하다.<sup>(26)</sup>

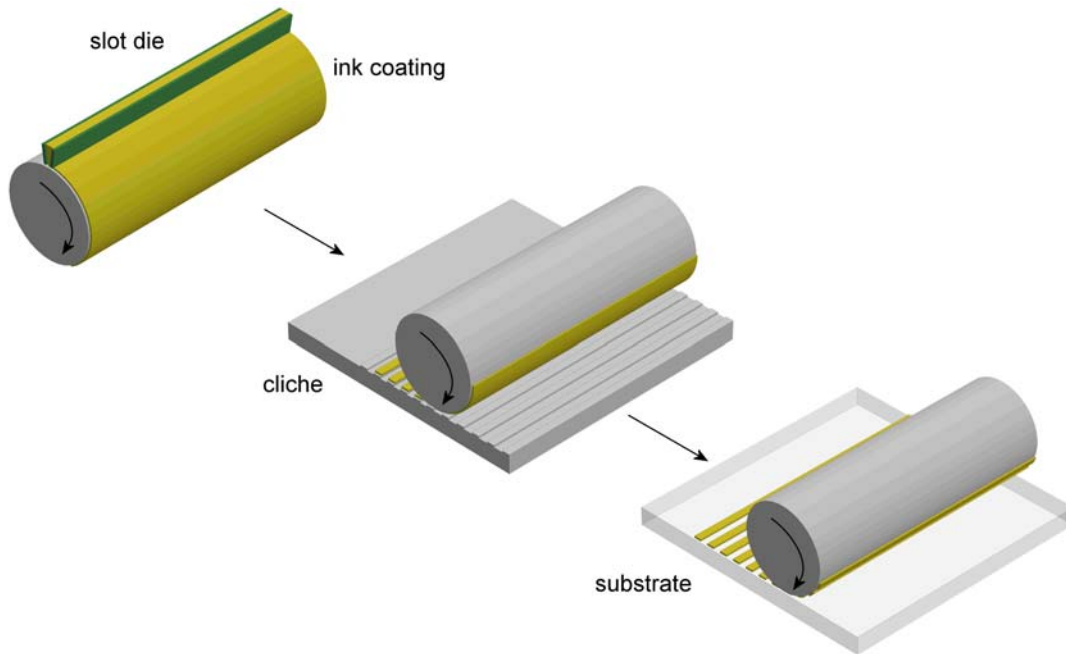


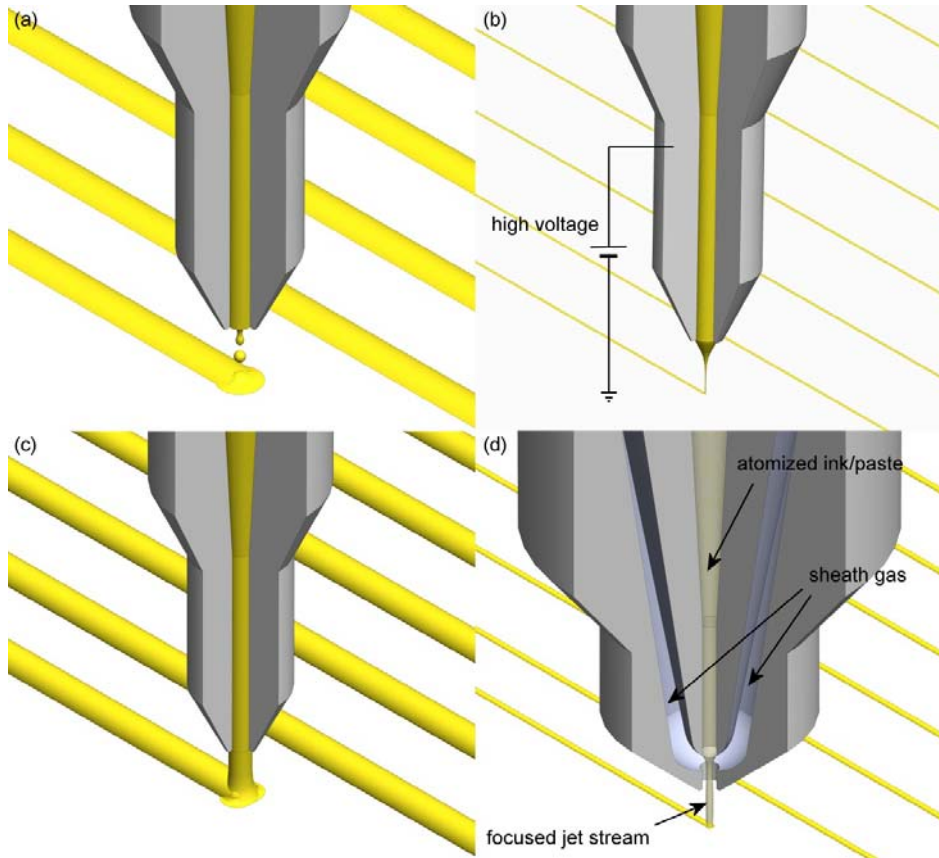
Fig. 7 Schematic of reverse offset printing

#### 2.1.4 리버스 오프셋 인쇄

기존 롤 인쇄방식의 다양한 문제점들, 즉 불균일한 선폭 및 도막 두께, 충분하지 않은 해상도 등을 해결하기 위해 리버스 오프셋(reverse offset) 인쇄방식이 제안되었다.<sup>(27)</sup> Fig. 7에 보인 바와 같이, 블랭킷에 기능성 잉크를 전면 코팅하여 균일한 도막을 형성한 후, 패턴을 형성하지 않을 영역에 해당하는 블랭킷의 기능성 잉크를 클리셰(cliché)라고 불리는 제판에 1차 전사를 한다. 이후, 블랭킷에 남은 기능성 잉크를 기판에 2차 전사함으로써 패턴공정을 완료하게 된다.

블랭킷에 기능성 잉크를 균일하게 도포한 후 1차와 2차 전사를 수행하기 때문에 기존 롤 인쇄방식보다 인쇄된 패턴의 도막이 훨씬 균일하다는 장점이 있다. 또한, 일반적으로 인쇄전자에서 패턴이 형성되지 않는 영역(비화상부)이 미세패턴 영역(화상부)보다 상대적으로 크기 때문에, 기존 롤 인쇄방식처럼 작은 영역의 화상부를 정밀하게 전사하는 것보다는 넓은 영역의 비화상부를 정밀하게 전사하는 것이 훨씬 용이하다. 상대적으로 넓은 비화상부 영역을 클리셰로 1차 전사 후, 블랭킷에 잔류하는 미세 화상부 영역을 기판으로 2차 전사함으로써 수 마이크로미터급의 고해상도 인쇄가 가능하다는 것이 리버스 오프셋 인쇄방식의 가장 큰 장점이며, 이러한 장점을 이용하여 고해상도가 요구되는 TFT LCD TV의 컬러 필터와 백 플레인,<sup>(7)</sup> 유기박막 트랜지스터,<sup>(28,29)</sup> 터치 스크린용 메탈 메쉬 필름<sup>(30,31)</sup> 등에 성공적으로 응용되었다.

그러나, 디스플레이와 같이 패턴이 될 화상부 영역보다 비화상부 영역이 절대적으로 높은 비율을 차지하고 있는 제품 생산에 리버스 오프셋 인쇄를 적용할 경우 기판에 2차 전사되는 잉크보다 클리셰로 1차 전사되어 사용되지 못하는 잉크의 양이 절대적으로 많아지게 되므로 생산비용이 급격히 상승한다는 문제점이 있다.<sup>(32)</sup> 또한, 매 인쇄마다 클리셰를 세척해야 하며, 클리셰의 오목 제판 구석부분에 잉크 잔류물이나 환경 이물질이 침착될 경우 제거하기가 힘들다는 문제점이 있다. 덧붙여, 탄성 중합체 재질의 블랭킷을 사용하여 잉크를 기판으로 전사하는 그라비아 오프셋이나 리버스 오프셋 인쇄방식들의 공통적인 문제점은 잉크의 용매가 블랭킷에 흡수되면서 블랭킷에 경시 변화가 나타나며, 이러한 블랭킷 물성의 변화는 인쇄된 패턴의 선폭에 악영향을 미친다는 것이다.<sup>(33-36)</sup> 따라서, 블랭킷의 용매를 제거해주기 위해 인쇄 중 블랭킷 건조공정을 적용하기도 하지만 블랭킷의 경시 변화를 지연시켜줄 뿐 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다.



**Fig. 8** Various non-contact printing techniques, (a) piezo Drop-On-Demand inkjet, (b) electrohydrodynamic jet, (c) dispensing, and (d) aerosol jet

## 2.2 비접촉식 인쇄전자용 인쇄장비

슬롯 다이 코팅과 같이 필름 형태의 코팅을 수행하는 인쇄방식을 제외한 모든 롤 인쇄방식들이 잉크나 페이스트를 기판으로 전사하기 위해 제판이라는 매개체를 필요로 한다. 대부분의 대량 생산 제품들은 시장의 수요에 맞추어 하루에도 수 차례 생산라인의 제품 모델과 스케줄을 바꿀 필요성이 있는데, 제품 모델이나 스케줄을 변경할 때마다 제판도 함께 변경해야 하므로 생산지연이 발생하며, 제품의 설계를 변경할 경우 제판을 다시 제작해야 한다. 이러한 불편함을 개선하기 위해 제판이 필요 없는 인쇄방식이 대안으로 제시되었는데, 이러한 인쇄방식을 디지털 인쇄방식이라고 한다. 레이저 전사법을 제외한 대부분의 디지털 인쇄방식이 기판과 접촉을 하지 않기 때문에 비접촉 인쇄방식으로도 분류된다. 대표적인 비접촉 인쇄방식으로는 압전 잉크젯(piezo Drop-On-Demand inkjet), 정전기력 잉크젯(electrohydrodynamic jet 혹은 EHD jet), 디스펜싱(dispensing), 그리고 에어로졸 젯(aerosol jet) 인쇄방식들이 있다.

### 2.2.1 압전 잉크젯 인쇄

Fig. 8(a)의 압전 잉크젯 인쇄방식은 압전소자에 전압을 가하여 변위를 발생시키고, 이때 발생한 압력과 및 압력파들의 중첩현상을 이용하여 노즐을 통해 잉크액적을 토출시킨다.<sup>(37,38)</sup> 젯팅을 수행하는 온도에서 잉크의 적정 점도는 일반적으로 20 cPs 이하이다. 인쇄전자에서 요구하는 고해상도 정밀 중첩 인쇄 시 롤 인쇄의 실용 속도는 초속 수 미터 이하에 불과함에도 불구하고 일반 그래픽 인쇄업계에서 분당 수백 미터급으로 인쇄하는 것을 언급하며 고속 대량 생산이 가능하다고 과대평가하고 있는 것에 반해, 압전 잉크젯 인쇄의 인쇄속도는 과소평가되어 있다. 예를 들어, 일본 미야코시(Miyakoshi)의 MJP20MX-7000 잉크젯 프린터의 경우 분당 200 미터급의 고속 인쇄가 가능하다.

압전 잉크젯의 장점은 (1) 잉크액적의 초당 토출 횟수를 나타내는 주파수가 수십에서 최대 백 kHz 에



이르며(미국 Fujifilm Dimatix, SAMBA™), (2) 헤드 당 노즐의 개수가 2000 개가 넘으며(일본 Kyocera KJ4B-0300 잉크젯 프린트헤드의 경우 2656 개) (3) 기능성 재료의 낭비가 극히 적고, (4) 잉크가 노즐에서 토출되기 이전에는 밀폐된 환경에 있기 때문에 오염의 가능성이 적으며, (5) 박막 필름을 형성하기 위한 저점도 잉크를 다루는데 가장 적합하다는 것이다. 따라서, TFT LCD TV의 컬러 필터, OLED TV와 같이 구조 상 잉크의 퍼짐성을 제어할 수 있는 표면 에너지 패터닝을 적용하기 용이한 제품들이 압전 잉크젯의 주요 적용분야로 거론된다.

반면, 잉크가 건조하면서 발생하는 ‘커피 링 효과’<sup>(39)</sup> 때문에 균일한 도막을 얻기 위해서는 잉크에 대한 상당한 기술적 노하우가 필요하다. 또한, 압전 잉크젯용 잉크의 경우 점도의 제약이 있으므로 기능성 재료의 고형분을 높이기 힘들며, 잉크 자체에 항복응력이 없기 때문에 기판에서 퍼짐성을 제어하기 힘들다는 단점이 있다. 따라서, 중급 해상도의 박막을 형성하는데 적합하며, 만약 20  $\mu\text{m}$  급 이하의 고해상도 구현이 필요한 경우에는 기판에 미리 소수성 및 친수성 처리와 같은 표면 에너지 패터닝을 부가적으로 수행하는 것이 패턴 불량률을 낮춤에 있어 바람직하다.<sup>(40,41)</sup> 현재 압전 잉크젯 인쇄방식은 인쇄전자회로의 레전드 마킹, TFT LCD TV의 배향막 및 액정 도포공정에 도입되어 사용되고 있다.

### 2.2.2 정전기력 잉크젯 인쇄

다른 모든 인쇄방식의 해상도를 훨씬 뛰어넘을 수 있는 가능성을 가졌다는 점에서 정전기력 잉크젯 인쇄방식이 많은 관심을 받아 왔다.<sup>(42,43)</sup> Fig. 8(b)의 정전기력 잉크젯 인쇄방식은 노즐과 기판 사이에 고전압을 가하였을 때 노즐 끝단의 잉크 표면과 기판이 각각 반대의 정전하로 대전되며, 이때 발생하는 정전기력을 이용하여 노즐 끝단의 잉크를 기판으로 당겨오는 방식이다. 노즐 끝단으로부터 기판 간의 거리, 가해주는 전압의 방향 및 세기, 그리고 잉크를 펌핑하는 유량을 제어하면 노즐 끝단의 잉크 표면이 뾰족한 원추형(Taylor cone)을 띄게 되는데, 이것을 콘 젯 모드(cone-jet mode)라고 한다.<sup>(44)</sup> 이 원추 형태의 잉크 점단에서 가늘게 토출되는 잉크의 흐름(jet stream)을 마치 펜처럼 이용하면 노즐의 직경보다 훨씬 미세한 수 마이크로미터급의 박막을 패터닝할 수 있다.

그러나, 현실적으로 안정적인 콘 젯 모드가 가능한 잉크의 점도 및 유량, 전압에는 제약이 있다.<sup>(45)</sup> 150  $\mu\text{m}$ 의 노즐을 이용하여 10  $\mu\text{m}$  이하 선폭을 얻은 결과도 발표되었으나<sup>(46)</sup> 수 마이크로미터급의 복잡한 패턴을 안정적으로 수행하기 위해서는 결국 수 마이크로미터급의 노즐을 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.<sup>(42,43,47)</sup> 이와 같은 초소형 노즐의 사용은 정전기력 잉크젯 헤드의 제작비용 상승과 더불어 정전기력 잉크젯 인쇄장비의 유지보수에 어려움을 야기할 수 있다. 또한, 정전기력 잉크젯의 콘 젯 모드 온-오프 제어가 빠르지 않으며, 멀티 노즐화를 시켰을 때 인접한 노즐 간에 전기장 간섭이 발생하여 콘 젯에서 토출되는 잉크 스트림의 직진성이 저해되는 문제가 있다.<sup>(48)</sup>

콘 젯 모드 외에 정전기력 잉크젯 인쇄방식에서 패턴 형성에 사용할 수 있는 모드로는 압전 잉크젯의 토출과 비슷한 마이크로드립핑 모드(microdripping mode 혹은 pulsation mode)가 있으며, 이를 이용하여 3 차원 배터리가 제작되기도 하였다.<sup>(49)</sup> 압전 잉크젯 프린트헤드에 버금가는 토출 주파수의 정전기력 잉크젯 프린트헤드(영국 TTP의 Delta 2 모델의 경우 2560 개의 이젝터에서 24 kHz의 토출 주파수로 잉크 토출이 가능함)가 개발되기도 하였으나, 압전 잉크젯 프린트헤드 제조사들에 비해 상용 정전기력 잉크젯 프린트헤드 제조사가 절대적으로 부족하다는 점에서 상업화에 어려움이 뒤따른다.

### 2.2.3 디스펜싱 인쇄

Fig. 8(c)에 보인 디스펜싱 인쇄방식은 전자침용 접착제 도포, TFT LCD TV의 액정도포(one drop filling), 부품 봉입을 위한 실런트 도포 등에 광범위하게 사용되어 왔다. 일반적으로 공압을 이용하여 중점도 이상의 페이스트를 노즐을 통해 압출하지만, 고가형 디스펜싱 인쇄장비의 경우 스크류 펌프를 이용하여 고점도의 페이스트를 노즐을 통해 압출하는 방식을 사용하기도 한다. 디스펜싱 인쇄방식이 구현할 수 있는 패턴의 해상도는 노즐의 직경에 비례하며, 수 마이크로미터급의 패턴을 수행한 경우도 있으나<sup>(50)</sup> 일반적으로 중해상도 후막 패턴형성에 적합하다.

디스펜싱 인쇄방식의 가장 큰 장점은 스크린 인쇄방식과 마찬가지로 원리가 매우 간단하여 현장

작업자들을 위한 교육 시 전문적인 지식의 전달이 요구되지 않으며, 항복응력을 가진 고점도의 페이스트를 사용함으로써 매우 높은 종횡비(두께/선폭)를 가지는 중해상도의 패턴이 가능하다는 것이다. 최근에는 스크린 인쇄를 대체할 결정질 실리콘 태양전지의 차세대 전극형성 인쇄공정으로서 연구개발이 활발하다.<sup>(51,52)</sup> 또한, 항복응력을 가진 고점도 페이스트를 사용할 수 있다는 점은 추후 디스펜싱 인쇄방식이 3 차원 인쇄전자에 접목될 수 있는 가능성을 열어줄 것으로 기대된다.<sup>(53)</sup> 그러나, 정전기력 잉크젯 인쇄방식과 마찬가지로 온-오프 제어가 용이하지 않다는 점 때문에 멀티 노즐화 하여 복잡한 패턴을 고속 대량으로 형성하는 용도에는 적합하지 않다.

#### 2.2.4 에어로졸 젯 인쇄

에어로졸 젯 인쇄방식은 안개화된 잉크 혹은 페이스트를 노즐을 통해 토출시켜 기관으로 비접촉 전사하는 방식이다.<sup>(54)</sup> 이때 안개화된 잉크가 노즐 외부에서 확산되는 것을 방지하기 위해, Fig. 8(d)에서 보인 바와 같이 노즐 주변부로 또 다른 가스 흐름(sheath gas flow)을 만들어준다. 이 가스의 흐름이 중앙부의 노즐에서 안개화된 형태로 토출되는 잉크가 퍼지지 않고 기관까지 집중된 상태로 도달할 수 있도록 한다. 이와 같은 방법으로 10  $\mu\text{m}$  급의 미세선폭을 패턴할 수 있으나,<sup>(55)</sup> 안개화된 잉크가 노즐로부터 연속된 스트림으로 토출되기 때문에 온-오프 제어를 할 수가 없으며, 노즐 외부에 기계적 셔터를 설치하여 온-오프 제어를 해야 한다. 또한, 안개화된 잉크가 공급되는 중앙 노즐과 주변부 가스를 공급해주기 위한 외부 노즐로 구성되어야 한다는 특성 상 노즐이 고집적화된 프린트헤드를 제작하기 어렵기 때문에 복잡한 패턴을 고속 대량으로 형성하는 용도에는 적합하지 않다.

### 3. 기타 인쇄전자 관련 장비들

지금까지 인쇄전자 제품을 구현하기 위한 접착 및 비접착식 인쇄방식에 대해 소개하였다. 수 십 마이크로미터 이하의 고해상도를 구현하기 위해서는 기존 그래픽 인쇄를 훨씬 상회하는 고정밀도, 고신뢰성을 구현해야 한다. 이러한 의미에서 인쇄장비 못지않게 중요한 요소들이 검사 및 모니터링 관련 장비들이다.

롤 형태의 기관이 이송되면서 좌우로 흔들리게 되는데, 기존 그래픽 인쇄용으로 개발된 웹 장력 조절 및 제어기(web tension control), 모서리 검출 및 제어기(web edge control)로는 인쇄전자에서 요구하는 중첩 정밀도를 충족시킬 수 없다. 특히, 습도와 열에 의한 기관의 변형까지 감안한 정밀한 중첩 정밀도 제어를 수행하기 위해서는 Fig. 9 에 보인 바와 같이 정밀한 레지스트레이션 마크를 형성하기 위한 방법과 레지스트레이션 마크를 고속으로 인식하기 위한 장비, 그리고 위치 보정을 위한 고속 프로세싱 알고리즘에 대한 추가적인 연구개발이 필요하다.<sup>(56,57)</sup>

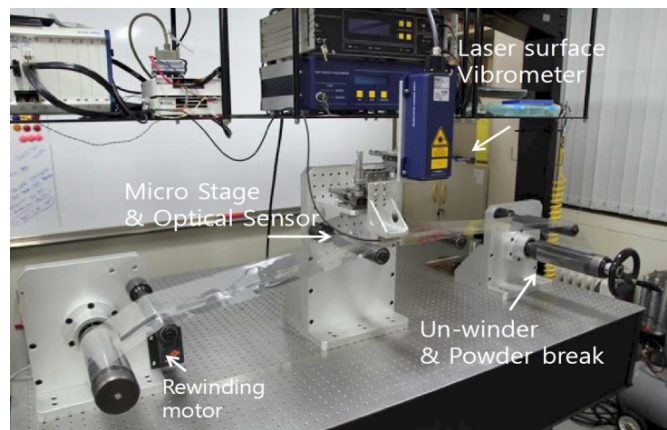
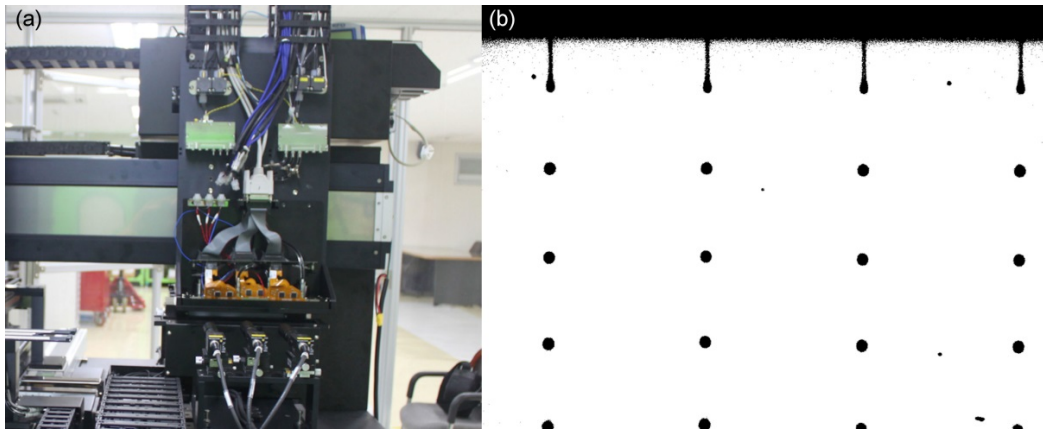


Fig. 9 Web position measurement system for roll-to-roll printing<sup>(57)</sup>



**Fig. 10** Inkjet drop monitoring system in (a) and a digitized image of in-flight droplets in (b)

압전 잉크젯 인쇄방식의 경우에도 Fig. 10에 보인 바와 같이 노즐에서 잉크액적이 정상적으로 토출되는가의 여부를 최대한 짧은 시간 안에 확인할 수 있어야 하며, 균일한 도막형성을 위해 각 노즐에서 균일한 부피의 잉크액적이 토출되도록 교정을 할 방안이 마련되어야 한다. 초기에는 카메라로 촬영한 잉크액적 이미지를 이용하여 속도를 동기화하거나 부피를 계산하는 방식을 취하였으나, 광학계 분해능의 한계 때문에 산업계에서 요구하는 오차 범위 내로 부피를 교정하는 것을 달성하지 못하였다. 이후 백색광 간섭계 혹은 레이저 스캐닝 현미경 등을 이용하여 잉크액적의 부피를 정밀하게 측정하고 교정하려는 시도도 있었으나, 결국 도막의 두께에 따른 색 편차를 측정함으로써 잉크액적의 부피를 교정하는 방식을 개발하게 되었다. 이러한 사례와 같이, 다른 비접촉 인쇄방식들에도 각각의 인쇄방식에 적합한 초정밀 측정 및 교정방식들이 개발될 필요성이 있다.

또한, 기능성 잉크를 기판에 인쇄한 후 요구되는 기능을 구현하는데 있어 반드시 필요한 것이 열처리이다. 기존의 적외선 건조기로는 유연한 기판을 손상시키지 않고 최대한 짧은 시간 내에 열처리를 수행하기에 적합하지 않기 때문에 레이저,<sup>(58)</sup> 플라즈마<sup>(59,60)</sup> 혹은 가정에서 사용하는 전자레인지처럼 마이크로웨이브를<sup>(61,62)</sup> 이용하여 열처리를 수행하는 방법에 대해 연구가 수행되었다. 레이저 방식의 경우 장비 자체의 가격과 시간당 처리면적, 플라즈마 방식의 경우에는 제품 단가 대비 공정비용(불활성 가스비용 등) 측면 등이 면밀히 검토되어야 할 필요성이 있으며, 마이크로웨이브 방식의 경우에는 연속 인쇄방식에 적용할 수 있는가의 여부와 인쇄된 패턴의 길이에 따라 소결 특성이 변화할 수 있다는 측면이 고려되어야 한다.

상기의 열처리 방식의 결점들을 보완한 광소결(photonic sintering) 방식이 최근 수년 사이에 새롭게 대두되고 있다.<sup>(63-65)</sup> 카메라의 플래쉬 램프와 같이 강한 조명을 순간적으로 소결할 패턴에 조사해줄 경우 소결될 물질이 광을 흡수하여 열로 변환시키며, 이때 발생한 열에너지에 의해 순식간에 소결이 수행되는 것이 광소결의 기본 원리이다. 레이저 방식보다 넓은 조사범위를 가지고 소결에 필요한 시간이 극히 짧기 때문에 롤 인쇄방식에 적용하기가 용이하다는 장점이 있다. 그러나, 소재의 광흡수도에 따라 광소결 효과가 다르게 나타나므로 최근 많은 관심을 끌고 있는 산화금속과 같은 투명한 소재에는 적용하기가 힘들다는 단점이 있다.

#### 4. 결론

인쇄전자의 성공적인 산업화를 위해서는 우선 혁신적인 아이디어를 바탕으로 한 제품이 기획되어야 하며, 이러한 제품에 요구되는 소재가 개발되어야 한다. 그리고, 소재의 특성에 적합한 인쇄방식을 이용하여 수십 마이크로미터 이하의 선폭, 혹은 수십 나노미터의 초박막을 신뢰성 있게 구현해낼 수 있는 초정밀 인쇄장비가 존재하여야 한다. 초정밀 인쇄장비 외에도 균일한 도포량을 구현하기 위해, 혹은 중첩 정밀도를 정밀하게 제어하기 위한 주변 모듈 혹은 장비들도 함께 개발되어야 한다. 잉크

혹은 페이스트 상태의 기능성 소재를 고해상도로 인쇄를 한 후, 불필요한 용매와 첨가제들을 제거함으로써 소재 본연의 기능을 구현할 수 있는 (열처리기와 같은) 후속 공정장비들 또한 개발되어야 한다.

인쇄전자 산업은 이와 같이 소재와 장비 전후방 산업을 모두 아우르는 융합기술이며, 막대한 경제적 파급효과 때문에 2011년 한국의 6대 미래산업으로 선정되기도 하였다.<sup>(66)</sup> 그러나, RFID와 같이 대량 수요가 있을 것으로 기대되었던 제품들이 시장에 정착하는데 실패하거나, 전자종이(e-Paper)의 경우처럼 새로운 경쟁 제품의 대두(태블릿 PC)에 의해 시장에서 도태되거나, 메탈 메쉬를 이용한 투명 전도성 필름과 같은 신규 인쇄전자 제품이 기존 ITO 기반의 투명 전도성 필름의 가격 인하 때문에 제품의 채용이 지연되는 등, 시장환경이 급격히 변화함으로 인해 인쇄전자의 실제 성장이 시장조사기관의 예측에 못 미치는 실정이다.

비단 인쇄전자 산업뿐만 아니라 기존의 한국의 성장동력이었던 조선, 자동차, 반도체 및 디스플레이용 장비산업에도 위기감이 광범위하게 퍼져있기는 마찬가지인 상황이다. 앞으로 인쇄전자의 새로운 응용분야를 탐색하고, 이에 요구되는 소재와 장비들을 개발함에 있어 인쇄전자 산업계와 학계, 연구소의 좀더 뚜렷한 역할분담과 책임감 있는 연구개발, 그리고 상호 긴밀한 협력이 더욱 요구된다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. 2015R1D1A3A01016204)과 및 한국에너지기술연구원의 연구개발 프로그램(B5-2420)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Khandpur, R. S., 2006, "Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing," New York, McGraw-Hill.
- (2) McEvoy, A. J., Markvart, T. and Castañer, L., 2012, "Practical Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications," Waltham, MA, Academic Press.
- (3) Lee, J.-H., Liu, D. N. and Wu, S.-T., 2008, "Introduction to Flat Panel Displays," John Wiley and Sons.
- (4) 김강대, 허영현, 이명원, 류기성, 송정근, 2007, "플렉시블 디스플레이와 집적회로에의 OTFT 응용," 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 1920~1924.
- (5) "LG 화학, 컬러필터 신공정 개발," 연합뉴스, 2005.08.31
- (6) "삼성, 내년 6월 LCD 컬러필터 공정에 업계 첫 잉크젯 프린터 적용," 디지털타임스, 2005.11.07.
- (7) Yoo, S.-S., 2010, "Development of the Printing Technology for the CF arrays of TFT-LCDs," Printed Electronics & Photovoltaics Europe.
- (8) Suh, M. C., Chin, B. D., Kim, M.-H., Kang, T. M. and Lee, S. T., 2003, "Enhanced Luminance of Blue Light-Emitting Polymers by Blending with Hole-Transporting Materials," Adv. Mater., Vol. 15, No. 15, pp. 1254~1258.
- (9) "LITI Laser-induced thermal imaging process," OLED-Display.net, 2011.11.19,
- (10) "Panasonic' s printed 56" 4K OLED TV prototype uses Sumitomo' s PLED materials," OLED-Info, 2013.03.19.
- (11) Printing Equipment for Printed Electronics 2015-2025: Market opportunities for printing, curing and integration equipment, IDTechEx Research, 2014.
- (12) Moonen, P. F. Yakimets, I and Huskens, J., 2012, "Fabrication of Transistors on Flexible Substrates: from Mass-Printing to High-Resolution alternative Lithography Strategies," Adv., Mater., Vol. 24, No. 41, pp. 5526~5541.
- (13) Krebs, F. C., Fyenbo, J. and Jørgensen, M., 2010, "Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: methods and manufacture using flexographic printing, slot-die coating and rotary screen printing," J. Mater. Chem., Vol. 20, No. 41, pp. 8994~9001.
- (14) Kwan, M. K., Shin, K. H., Yoon, E. Y. and Suh, K. Y., 2010, "Fabrication of conductive metal lines by plate-to-roll pattern transfer utilizing edge dewetting and flexographic printing," J. Colloid Interface Sci., Vol. 343, No. 1,

- pp. 301~305.
- (15) Järn, M., Täg, C.-M., Järnström, J., Granqvist, B. and Rosenholm, J. B., 2006, "Alternative models for determining the surface energy components in offset printing," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 301, No. 2, pp. 668~676.
  - (16) Shen, W., Mao, M., Murray, G. and Tian, J., 2008, "Adhesion and anti-adhesion of viscous fluids on solid surfaces-A study of ink transfer mechanism in waterless offset printing," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 318, No. 2, pp. 348~357.
  - (17) Harrey, P. M., Ramsey, B. J., Evans, P. S. A. and Harrison, D. J., 2002, "Capacitive-type humidity sensors fabricated using the offset lithographic printing process," *Sens. Actuators, B*, Vol. 87, No. 2, pp. 226~232.
  - (18) Zielke, D., Hübler, A. C., Hahn, U., Brandt, N., Bartzsch, M., Fügmann, U., Fischer, T., Veres, J. and Ogier, S., 2005, "Polymer-based organic field-effect transistor using offset printed source/drain structures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, No. 12, 123508.
  - (19) Leppävuori, S., Väänänen, J., Lahti, M., Remes, J. and Uusimäki, A., 1994, "A novel thick-film technique, gravure offset printing, for the realization of fine-line sensor structures," *Sens. Actuators, A*, Vol. 42, No. 1, pp. 593~596.
  - (20) Lahti, M., Leppävuori, S. and Lantto, V., 1999, "Gravure-offset-printing technique for the fabrication of solid films," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 142, No. 1, pp. 367~370.
  - (21) Pudas, M., Hagberg, J. and Leppävuori, S., 2004, "Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 24, No. 10, pp. 2943~2950.
  - (22) Lee, T.-M., Lee, S.-H., Noh, J.-H., Kim, D.-S. and Chun, S., 2010, "The effect of shear force on ink transfer in gravure offset printing," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 20, No. 12, 125026.
  - (23) Lee, C. W., Kim, N. S. and Kim, C. W., 2013, "Statistical Analysis for Thickness and Surface Roughness of Printed Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 3, pp. 286~294.
  - (24) Ahn, B. J., Han, Y., J. and Ko, S. L., 2010, "Influence of Micro Pattern Geometry and Printing and Curing Conditions in Gravure Printing on Printing Performance When Using Conductive Ink," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 3, pp. 263~271.
  - (25) Søndergaard, R., Hösel, M., Angmo, D., Larsen-Olsen, T. T. and Krebs, F. C., 2012, "Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells," *Mater. Today*, Vol. 15, No. 1, pp. 36~49.
  - (26) Shin, D.-Y., Lee, Y. and Kim, C. H., 2009, "Performance characterization of screen printed radio frequency identification antennas with silver nanopaste," *Thin Solid Films*, Vol. 517, No. 21, pp. 6112~6118.
  - (27) Yoshida, K., 2006, "Printing Technology for Electronic Devices Manufacturing," *Journal of Printing Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 2~6.
  - (28) Kim, M., You, I.-K., Han, H., Jung, S.-W., Kim, T.-Y., Ju, B.-K. and Koo, J. B., 2011, "Organic Thin-Film Transistors with Short Channel Length Fabricated by Reverse Offset Printing," *Electrochem. Solid-State Lett.*, Vol. 14, No. 8, pp. H333~H336.
  - (29) Kim, M., Koo, J. B., Baeg, K.-J., Jung, S.-W., Ju, B.-K. and You, I.-K., 2012, "Top-gate staggered poly(3,3'-dialkyl-quartherthiophene) organic thin-film transistors with reverse-offset-printed silver source/drain electrodes" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 101, No. 13, 133306.
  - (30) Choi, Y. M., Kim, K. Y., Lee, E., Jo, J. and Lee, T. M., 2015, "Fabrication of a single-layer metal-mesh touchscreen sensor using reverse-offset printing," *J. Inf. Disp.*, Vol. 16, No. 1, pp. 37~41.
  - (31) Choi, Y.-M., Lee, E.-S., Lee, T.-M. and Kim, K.-Y., 2015, "Optimization of a reverse-offset printing process and its application to a metal mesh touch screen sensor," *Microelectron. Eng.*, Vol. 134, pp. 1~6.
  - (32) Shin, D.-Y., 2011, "Fabrication of Metal Electrodes Based on the Self-Differentiation Technique Using the Novel High-and-Low Strategy," *J. Imaging Sci. Technol.*, Vol. 55, No. 4, 40303-1.
  - (33) Pudas, M., Hagberg, J. and Leppävuori, S., 2004, "Gravure offset printing of polymer inks for conductors," *Prog. Org. Coat.*, Vol. 49, No. 4, pp. 324~335.
  - (34) Lee, T.-M., Noh, J.-H., Kim, C. H., Jo, J. and Kim, D.-S., 2010, "Development of a gravure offset printing system for the printing electrodes of flat panel display," *Thin Solid Films*, Vol. 518, No. 12, pp. 3355~3359.

- (35) Lee, T.-M., Noh, J.-H., Kim, I., Kim, D.-S. and Chun, S., 2010, "Reliability of gravure offset printing under various printing conditions," *J. Appl. Phys.*, Vol. 108, No. 10, 102802.
- (36) Choi, Y.-M., Kim, K.-Y., Jo, J. and Lee, T.-M., 2014, "Effect of PDMS Blanket Deformation on Printability in Reverse-Offset Printing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 8, pp. 709~714.
- (37) Shin, D.-Y., Grassia, P. and Derby, B., 2004, "Numerical and experimental comparison of mass transport rate in a piezoelectric drop-on-demand inkjet print head," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, No. 2, pp. 181~199.
- (38) Shin, D.-Y., Grassia, P. and Derby, B., 2005, "Oscillatory incompressible fluid flow in a tapered tube with a free surface in an inkjet print head," *J. Fluids Eng.*, Vol. 127, No. 1, pp. 98~109.
- (39) Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R. and Witten, T. A., 1997, "Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops," *Nature*, Vol. 389, No. 6653, pp. 827~829.
- (40) Siringhaus, H., Kawase, T., Friend, R. H., Shimoda, T., Inbasekaran, M., Wu, W. and Woo, E. P., 2000, "High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits," *Science*, Vol. 290, No. 5499, pp. 2123~2126.
- (41) Wang, J. Z., Zheng, Z. H., Li, H. W., Huck, W. T. S. and Siringhaus, H., 2004, "Dewetting of conducting polymer inkjet droplets on patterned surfaces," *Nat. Mater.*, Vol. 3, No. 3, pp. 171~176.
- (42) Park, J. U., Hardy, M., Kang, S. J., Barton, K., Adair, K., Mukhopadhyay, D. K., Lee, C. Y., Strano, M. S., Alleyne, A. G., Geordiadis, J. G., Ferreira, P. M. and Rogers, J. A., 2007, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing," *Nat. Mater.*, Vol. 6, No. 10, pp. 782~789.
- (43) Sekitani, T., Noguchi, Y., Zschieschang, U., Klauk, H. and Someya, T., 2008, "Organic transistors manufactured using inkjet technology with subfemtoliter accuracy," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 105, No. 13, pp. 4976~4980.
- (44) Jaworek, A. and Krupa, A., 1999, "Classification of the modes of EHD spraying," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, No. 7, pp. 873~893.
- (45) Shin, D.-Y., Seo, J. Y., Tak, H. and Byun, D., 2015, "Bimodally dispersed silver paste for the metallization of a crystalline silicon solar cell using electrohydrodynamic jet printing," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 136, pp. 148~156.
- (46) Jeong, J. A., Kim, H. K. and Kim, J., 2014, "Invisible Ag grid embedded with ITO nanoparticle layer as a transparent hybrid electrode," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 125, pp. 113~119.
- (47) Roh, H.-R., Go, J.-K. and Kwon, K.-S., 2013, "Electrohydrodynamic Inkjet Printing System for Ultrafine Patterning," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 873~877.
- (48) Choi, K.-H., Khan, A., Rahman, K., Doh, Y.-H., Kim, D.-S. and Kwan, K.-R., 2011, "Effects of nozzles array configuration on cross-talk in multi-nozzle electrohydrodynamic inkjet printing head," *J. Electrostat.*, Vol. 69, No. 4, pp. 380~387.
- (49) Ho, C. C., Murata, K., Steingart, D. A., Evans, J. W. and Wright, P. K., 2009, "A super ink jet printed zinc-silver 3D microbattery," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 19, No. 9, 094013.
- (50) Gratson, G. M., Xu, M. and Lewis, J. A., 2004, "Microperiodic structures: direct writing of three-dimensional webs," *Nature*, Vol. 428, No. 6981, pp. 386~386.
- (51) Pospischil, M., Fellmeth, T., Brand, A., Nold, S., Kuchler, M., Klawitter, M., Gentischer, H., König, M., Hörteis, M., Wende, L., Doll, O., Zengerle, R., Clement, F. and Biro, D., 2014, "Optimizing fine line dispensed contact grids," *Energy Procedia*, Vol. 55, pp. 693~701.
- (52) Beutel, M., Lewis, A., Prondzinski, M., Selbmann, F., Richter, P., Bamberg, F., Raschtschepkin, P., Krause, A., Koch, C., Hentsche, M., Stegemann, K.-H., Schneiderlöchner, E. and Neuhaus, H., 2014, "Fine line metallization by coextrusion technology for next generation solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 131, pp. 64~71.
- (53) MacDonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D. and Wicker, R. B., 2014, "3D printing for the rapid prototyping of structural electronics," *IEEE Access*, Vol. 2, pp. 234~242.
- (54) Mahajan, A., Frisbie, C. D. and Francis, L. F., 2013, "Optimization of aerosol jet printing for high-resolution, high-aspect ratio silver lines," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 5, No. 11, pp. 4856~4864.
- (55) Zhao, D., Liu, T., Zhang, M., Liang, R. and Wang, B., 2012, "Fabrication and characterization of aerosol-jet printed strain sensors for multifunctional composite structures," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 21, No. 11, 115008.

- (56) Hösel, M., Søndergaard, R. R., Jørgensen, M. and Krebs, F. C. 2013, "Fast Inline Roll-to-Roll Printing for Indium-Tin-Oxide-Free Polymer Solar Cells Using Automatic Registration," *Energy Technol.*, Vol. 1, No. 1, pp. 102~107.
- (57) Seo, Y., Yim, S. and Oh, D., 2012, "Alignment Patterns and Position Measurement System for Precision Alignment of Roll-to-Roll Printing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1563~1568.
- (58) Ko, S. H., Pan, H., Grigoropoulos, C. P., Luscombe, C. K., Fréchet, J. M. and Poulidakos, D., 2007, "Air stable high resolution organic transistors by selective laser sintering of ink-jet printed metal nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 14, 141103.
- (59) Reinhold, I., Hendriks, C. E., Eckardt, R., Kranenburg, J. M., Perelaer, J., Baumann, R. R. and Schubert, U. S., 2009, "Argon plasma sintering of inkjet printed silver tracks on polymer substrates," *J. Mater. Chem.*, Vol. 19, No. 21, pp. 3384~3388.
- (60) Kim, K. S., Bang, J. O., Choa, Y. H. and Jung, S. B., 2013, "The characteristics of Cu nanopaste sintered by atmospheric-pressure plasma," *Microelectron. Eng.*, Vol. 107, pp. 121~124.
- (61) Perelaer, J., Klokkenburg, M., Hendriks, C. E. and Schubert, U. S., 2009, "Microwave flash sintering of inkjet-printed silver tracks on polymer substrates," *Adv. Mater.*, Vol. 11, No. 47, 4830.
- (62) Perelaer, J., Abbel, R., Wünscher, S., Jani, R., van Lammeren, T. and Schubert, U. S., 2012, "Roll-to-roll compatible sintering of inkjet printed features by photonic and microwave exposure: from non-conductive ink to 40% bulk silver conductivity in less than 15 seconds," *Adv. Mater.*, Vol. 24, No. 19, pp. 2620~2625.
- (63) Kim, H. S., Dhage, S. R., Shim, D. E. and Hahn, H. T., 2009, "Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics," *Appl. Phys. A*, Vol. 97, No. 4, pp. 791~798.
- (64) Hwang, H. J., Chung, W. H. and Kim, H. S., 2012, "In situ monitoring of flash-light sintering of copper nanoparticle ink for printed electronics," *Nanotechnology*, Vol. 23, No. 48, 485205.
- (65) Niittynen, J., Sowade, E., Kang, H., Baumann, R. R. and Mäntysalo, M., 2015, "Comparison of laser and intense pulsed light sintering (IPL) for inkjet-printed copper nanoparticle layers," *Sci. Rep.*, 5.
- (66) "정부 6대 미래산업 선도기술 선정," *연합뉴스*, 2011.03.21.