

◆프린팅공정장비◆

생산시스템으로서의 잉크젯 신뢰성 및 교정의 중요성

신동윤*, 김동수*

Importance of Inkjet Reliability and Calibration toward a New De Factor Industry Standard

Dong-Youn Shin* and Dong Soo Kim*

Key Words : Inkjet (잉크젯), Reliability (신뢰성), Calibration (교정)

1. 서론

잉크젯을 기존의 인쇄산업으로부터 전자소자 및 디스플레이 소자를 제조하기 위한 생산시스템으로 전환하기 위해 학계 및 산업계의 노력이 지속되고 있다. 잉크젯을 전자산업분야에 적용하기 위한 시도는 1980 년도로 거슬러 올라갈 수 있는데, Teng 과 Vest 가 1988 년에 발표한 솔라셀 전극을 잉크젯으로 형성한 것이 저자가 알고 있는 잉크젯의 전자소자에 대한 최초의 적용이다.¹

Teng 과 Vest 의 잉크젯 솔라셀 전극형성 시도 이후에도 잉크젯을 이용한 다양한 시도가 이루어졌는데, Sirringhaus *et al.*은 디스플레이 백플레인에 적용될 박막 트랜지스터 소자의 제작을,² Chen *et al.*은 폴리머를 이용한 RC 필터를,³ Liu *et al.*은 폴리머 커패시터의 제작을,⁴ Shimoda *et al.*은 유기발광 디스플레이 소자를,⁵ Koo *et al.*은 TFT LCD 디스플레이의 컬러필터를,⁶ Smith *et al.*은 silver neodecanoate ($C_{10}H_{19}O_2Ag$)을 이용한 전극형성 잉크젯 공정을 시연하였다.⁷ 이와 같이 디스플레이와 전자제품 산업분야에 잉크젯 공정 적용을 위한 학

계의 연구개발이 유럽, 미국, 일본, 한국, 대만 등에서 전개되고 있다.

산업계의 경우에는 실험실 수준을 벗어나, 영국의 Plastic Logic 사는 1 억 달러를 투자받아 독일 드레스덴에 e-Paper 생산공장을 건설 중이며,⁸ 일본의 경우 Dai Nippon Printing 이 2850mm×3050mm 에 이르는 10 세대 기판상에 TFT LCD 컬러필터를 잉크젯으로 생산하기 위해 435 억 엔을 투자하여 2010 년 3 월 완공을 목표로 사카이에 공장을 건설 중이다.⁹

국내의 잉크젯 상업화 연구개발은 LG 디스플레이, 삼성전자, 삼성전기, 삼성 SDI 등의 대기업에서 잉크젯을 이용한 TFT LCD 컬러필터, 유기발광 디스플레이, 인쇄전자회로 등의 적용에 검토 중이며, 배향막 공정에는 잉크젯을 도입하는 단계에 이르렀다.¹⁰

중소기업에서는 2007 년 아이디에스가 초박형 발광다이오드용 도광판의 시험양산에 들어갔다고 발표하였으며,¹¹ 유니젯 외에 디지아이, 에스티아이, 탑엔지니어링 등의 회사들이 잉크젯 장비개발을 2007 년에 전자신문 등을 통해 공표하였다.

이와 같이 산업계의 제품생산 공정, 특히 디스플레이와 전자산업계에 있어 기존 노광공정을 이용한 간접 패터닝에 대한 대체안으로써 잉크젯이 주목을 받는 이유는 다음과 같이 크게 4 가지로 요약할 수 있다.

* 한국기계연구원 나노기계연구본부

Tel. 042-868-7378, Fax. 042-868-7176

Email : dongyoun.shin@gmail.com

직접패턴 시스템 특히, 잉크젯을 이용한 미세 직접패턴 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

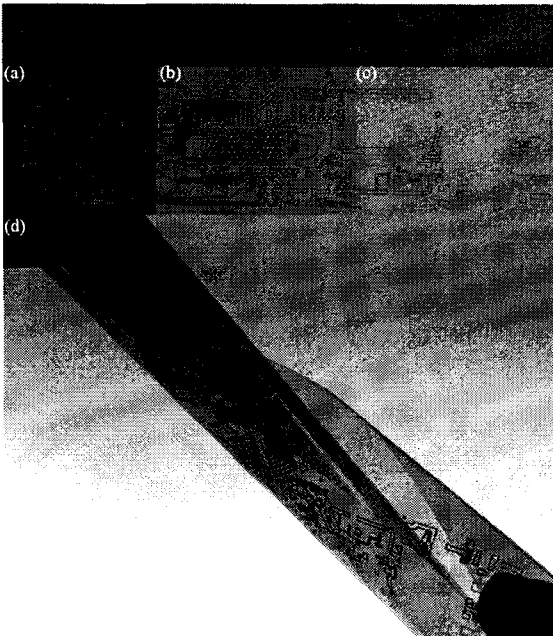


Fig. 1 Inkjet printed circuit boards on various materials: (a) CFRP, (b) Kapton, (c) GFRP and (d) twisting demonstration of an inkjet printed circuit board on Kapton⁷

(1) CAD-to-Drawing

컴퓨터에 저장된 데이터를 직접 출력을 하는 것을 특징으로 한다.

(2) Direct Write

포토리소그래피의 포토마스크, 롤 프린팅의 제판, 스크린 프린팅의 스크린 마스크와 같은 간접적인 매개체 없이 직접 패턴을 수행하는 것을 특징으로 한다.

(3) Additive process

포토리소그래피에서와 같이 적층된 재료를 부식시켜 제거하는 방식으로 패턴작업을 수행하지 않고, 원하는 패턴영역에만 선택적으로 재료를 적층시키는 것을 특징으로 한다.

(4) Noncontact printing

잉크젯은 기타 패턴방식과는 달리 기판과 직접 접촉하지 않고 패턴을 수행하는 것을 특징으로 한다.

이와 같은 특징을 이용하여 다양한 기판상에 용액형태의 유기 은 잉크를 이용하여 전자회로 패

턴을 수행한 예들을 Fig. 1에 보였다.

그러나, 잉크젯을 디스플레이 및 인쇄전자 산업에 조기에 성공적으로 정착시키기 위해서는 인쇄용에서 요구되는 신뢰성보다 더욱 높은 신뢰성을 획득하여야 한다. 예를 들어, 인쇄분야에서 요구되는 젯팅 실패율은 0.5~1% 정도임에 비해, 디스플레이 분야에서의 젯팅 실패율은 0.001~0.005%, 즉 100~1000 배 정도 더 높은 신뢰성을 요구하고 있다.¹² 따라서, 본 논문에서는 이러한 고신뢰성 획득과 관련된 이슈들을 소개하도록 하겠다.

2. 신뢰성

잉크젯에서 요구되는 신뢰성에는 (1) 젯팅 시작성, (2) 젯팅 지속성, (3) 젯팅 편차성, (4) 헤드 수명의 네 가지를 기본으로 꼽을 수 있으며, 이들에 대해서 하나씩 소개하도록 하겠다.

2.1 젯팅 시작성

젯팅 시작성의 경우에는 잉크젯 프린트 헤드에 잉크를 공급한 후 젯팅을 시작하였을 때, 젯팅이 얼마나 빠른 시간 내에 안정화를 이룰 수 있는가를 의미한다. 즉, 잉크가 잉크젯 프린트 헤드 내부의 재질과 일정 접촉각 이상이 되면 공급이 원활히 되지 않으며, 잉크젯 프린트 헤드 내부 채널에 기포가 트랩되어서 잉크액적 토출을 방해할 수도 있으므로 가능한 한 빠른 시간 내에 이러한 불안정 요인이 제거되어 요구되는 젯팅 안정성을 달성할 수 있어야 한다.

젯팅 시작성을 높이기 위해 잉크와 비슷한 조성의 용액을 주입하여 잉크젯 프린트 헤드의 채널을 프라이밍하는 작업을 할 수도 있는데, 예를 들어, 은나노 잉크의 경우 고가의 재료이므로 은나노 잉크로 직접 프라이밍 작업을 수행하는 것보다는 은나노 잉크에서 은나노 입자들을 제거한 순수 용액상태의, 즉, 염가의 프라이밍 용액을 이용하여 프라이밍 작업을 수행하는 것이 좀더 효과적인 방법이다.

그러나, 이러한 프라이밍 용액과 은나노 잉크가 접촉하였을 때 조성차이로 인해 은나노 잉크의 은입자들이 뭉치게 되는 현상이 나타나서는 안되므로 잉크 개발자는 미리 프라이밍 용액과 은나노 잉크와의 적합성을 사전에 세심히 테스트해보아야 한다.

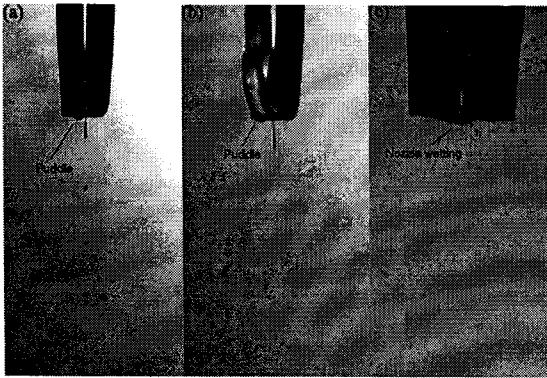


Fig. 2 Progress of nozzle wetting: (a) puddle formation, (b) puddle growth and (c) jetting cease due to nozzle wetting

잉크 개발자가 잉크를 개발할 시에는 잉크젯 프린트 헤드 내부의 재질과 잉크와의 젖음성, 잉크젯 프린트 헤드 노즐 표면에서의 잉크 젖음성, 그리고, 잉크와 패턴을 수행하게 될 기관 표면에서의 젖음성 등을 염두에 두고 개발을 진행하여야 하지만, 기관재질은 최종 사용자에게 따라 가변하므로 세가지 젖음성을 모두 염두에 두고 잉크를 최적화하는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서, 잉크와 잉크젯 프린트 헤드 내부의 젖음성과 잉크와 잉크젯 프린트 헤드 노즐 표면에서의 젖음성을 우선적으로 고려하도록 한다.

2.2 젯팅 지속성

잉크와 잉크젯 프린트 헤드 내부의 젖음성은 접촉각으로 표현할 시에 낮을수록 바람직하며, 잉크와 잉크젯 프린트 헤드 노즐 표면간의 젖음성은 가능한 한 높은 접촉각을 가지는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 그러나, 노즐 표면 잉크 젖음에 의한 젯팅 실패는 잉크와 노즐간의 접촉각이 높다고 해서 반드시 피할 수 있는 것은 아니다. 예를 들어 Fig. 2 에 보인 바와 같이, 일단 잉크의 일부가 노즐 표면에 간헐적으로 적층되기 시작하면 puddle 을 형성하게 되고, puddle 은 점차 자라서 결국 노즐과 접촉하게 된다. puddle 이 노즐로부터 토출되는 잉크와 접촉하게 되면 잉크는 puddle 의 표면장력의 영향으로 직진성을 잃게 되고, 점차 더 많은 잉크가 puddle 에 유입되어 종국적으로는 Fig. 2(c)에 보인 바와 같이 노즐면을 완전히 젖게 하여 젯팅을 멈추게 할 수 있다.

잉크가 어떠한 메커니즘으로 인해 노즐면에 puddle 을 형성하게 하는가에 대한 이해와 예측은 불완전하며, 같은 잉크더라도 젯팅 조건에 따라서 puddle 형성이 지연되거나 방지될 수도 있으므로 통계 모델링이 요구될 수도 있을 것이다.

젯팅 지속성은 잉크젯 노즐내부로 유입된 공기방울에 의해 영향을 받을 수도 있으며, 공기방울 유입에 대한 메커니즘과 센싱에 대한 흥미로운 연구결과들도 발표되고 있다.¹³⁻¹⁵

젯팅 지속성은 공정과도 밀접한 연관이 있다. 예를 들어, Fig. 3 과 같이 기관이 연속적으로 공급될 경우 잉크젯 프린팅은 중단 없이 지속될 수 있는 것이 가장 바람직하다. 따라서, 잉크를 공급하고 젯팅이 안정화된 후에 젯팅이 얼마나 오랫동안 지속될 수 있는가에 따라서 연속공정에 잉크젯을 도입할 수 있는가의 여부가 결정된다.

만약 어떤 잉크에 있어서 젯팅 지속시간이 15 분이라고 가정한다면, 15 분마다 프린팅을 정지시키고 잉크 퍼징과 잉크젯 프린트 헤드 노즐면 클리닝 등의 유지보수를 수행해줘야 하므로 생산성에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 우회적으로 극복하기 위하여 최대 젯팅 지속시간 도달 이전에 두 번째 백업용 잉크젯 프린트 헤드가 프린팅을 시작하고, 첫 번째 잉크젯 프린트 헤드는 유지보수를 수행하는 것과 같은 교차 프린팅 시스템 구성을 생각해 볼 수 있을 것이다.

반면 디스플레이나 인쇄전자회로와 같이 연속공정이 아닌 경우에는 공정시간 동안만 젯팅 지속성이 보장되면 된다.

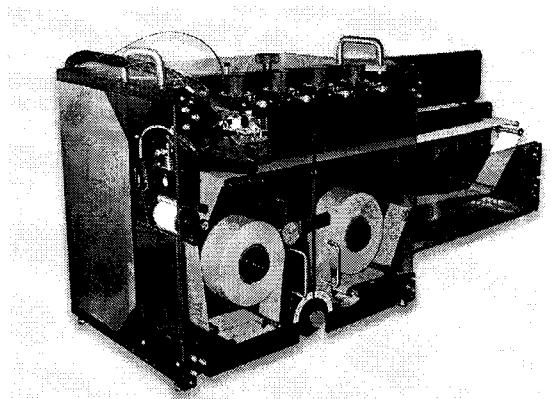


Fig. 3 Inkjet web press developed by iTi (imaging Technology international, Corp., CO, USA)¹⁶

대략 1 분 안팎에 패턴이 완료되어야 하는 디스플레이 공정의 경우 젯팅 지속성은 최소 1 분 이상만 유지되면 된다. 이와 같이 젯팅 지속성에 따라 시스템 구성이 가변적일 수 있으므로, 생산 시스템 설계시 재료적합성에 대한 이슈들도 고려되어야 한다.

2.3 젯팅 편차성

잉크젯 프린트 헤드는 Fig. 4 에 보인 바와 같이 완벽하지 않으며 제품간, 그리고 한 제품 내에서도 노즐간의 편차를 내재하고 있다. 이러한 불완전성은 Fig. 5 에 보인 바와 같이 노즐간 잉크액적 토출량의 편차를 야기하며, 패턴을 할 제품의 성능에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

TFT LCD 컬러필터 혹은 PLED 와 같은 디스플레이 응용제품의 경우 잉크액적 토출량의 불균일성은 제품의 색특성과 화질에 영향을 주게되며, 인쇄전자회로의 경우에는 각 전극패턴의 신호지연값에 영향을 주게 된다.

그러나, 최근 주목을 받고 있는 e-Paper 의 경우에는 스위칭 속도 자체가 260 ms 에 불과하며, 액티브 매트릭스 백플레인의 편차사양도 이에 준하여 결정될 것이므로 잉크액적 편차가 다른 응용분야에 비해 느슨해질 가능성이 있다. 이와 같이, 잉크액적의 토출량 편차 허용범위는 일률적으로 결정된다기 보다, 잉크젯이 응용될 제품의 요구사양에 의해 결정되며, 그에 맞추어 편차를 교정해주는 것이 바람직하다.



Fig. 4 Imperfections of a piezo Drop-On-Demand inkjet print head in the 90's by Spectra, Co.¹⁷

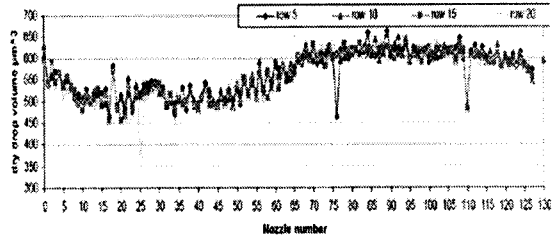


Fig. 5 Ink drop volume variation across nozzles through a typical SE head by Spectra, Co.¹⁸

2.4 헤드 수명

잉크젯 프린트 헤드의 수명은 제조사에 따라 다르지만, 노즐 당 80 억 액적의 수명을 가지고 있다고 보고되고 있다.¹⁹ 10 세대 기관의 경우 Fig. 6 에서 볼 수 있는 바와 같이 65 인치 패널 6 장이 생산될 수 있다. Full HDTV 사양에 따른 65 인치 서브픽셀의 가로×세로×높이는 각각 220 μm×720 μm×1 μm 정도이며, 하나의 서브픽셀 당 158400 μm³의 색필름이 형성되어야 한다. 한 장의 10 세대 기관 당 하나의 노즐이 패턴해야 할 서브픽셀의 개수는 3240 개이므로, 기관당 513216000 μm³에 해당하는 색필름이 형성되어야 한다.

만약 잉크의 고형분 함유량이 부피분율로 10% 일 경우, 10 세대 기관 한 장당 노즐이 토출해야 할 잉크의 부피는 513216000 μm³에 이르며, 노즐에서 토출되는 잉크액적의 직경이 대략 40 μm 라고 가정할 경우, 대략 기관 당 153152 액적을 토출해야 한다.

따라서, 이론적으로는 노즐 당 52235 장의 10 세대 기관을 패턴할 수 있으며, 월 36000 장의 생산능력을 가지는 2010 년 3 월 완공예정인 DNP 의 10 세대 컬러필터 공장의 경우 잉크젯 프린트 헤드는 대략 44 일 정도의 최대 이론수명을 가질 것으로 예측된다.

10 세대 기관의 컬러필터 생산을 위해 각 색상 당 대략 30 개의 잉크젯 프린트 헤드가 사용될 것으로 보이며, 개당 가격이 US\$600 일 경우, 각 색상당 44 일마다 US\$18000 의 헤드 교체비용, R, G, B 의 삼색이 고려되었을 경우에는 44 일마다 총 US\$54000 의 교체비용이 발생할 것으로 예측된다.

그러나, 이러한 예측은 가장 긍정적인 가정들을 도입하였을 때의 결과이며, 실재는 이보다 더 높은 운용비용이 발생할 것이다.

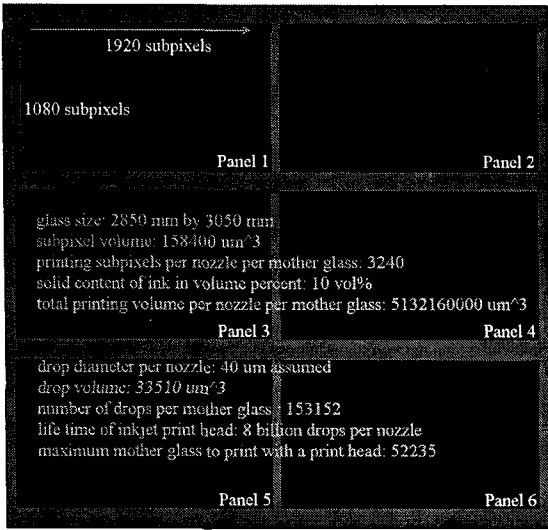


Fig. 6 65 inch panel layout on a 10th generation glass substrate

이와 같이, 더 높은 운용비용이 발생하는 이유는 디스플레이와 인쇄전자 분야에서의 헤드 성능과 신뢰성에 대한 요구조건이 기존 인쇄분야에서의 성능과 신뢰성 요구조건보다 월등히 높은 관계로 인해, 젯팅 특성이 미세하게 허용오차를 벗어나더라도 잉크젯 프린트 헤드들을 전량 교체하여야 하며, 이에 따라서 유효 헤드수명이 훨씬 짧을 것으로 예측되기 때문이다.

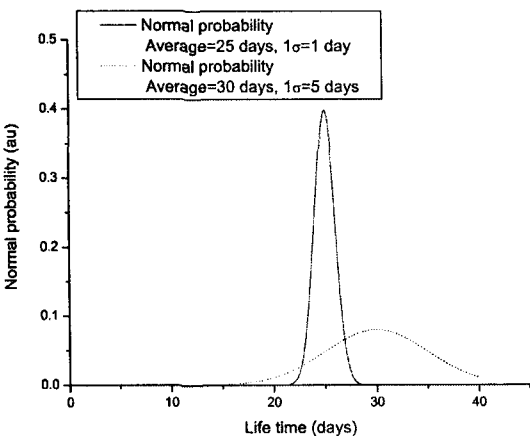


Fig. 7 Normal probability of the life time of inkjet print heads: (a) average life time=25 days with $1\sigma=1$ day and (b) average life time=30 days with $1\sigma=5$ days

따라서, 잉크젯 프린트 헤드의 수명연장에 대한 문제가 대두되게 될 것이며, 특히 수명의 표준편차에 대한 관리가 요구될 것으로 예측된다. 예를 들어, Fig. 7 에 보인 바와 같이, 잉크젯 프린트 헤드의 수명이 평균 25 일이지만 표준편차가 1 일인 경우와, 수명이 평균 30 일로써 전자보다 5 일이나 길지만 표준편차가 5 일인 경우, 전자가 후자보다 평균수명은 5 일이나 짧지만 수명관리차원에서 관리하기가 훨씬 쉽다는 장점이 있다. 따라서, 디스플레이와 인쇄전자 산업에서 성공적인 잉크젯 공정적용을 위해서는 잉크젯 프린트 헤드의 유지보수에 대한 프로토콜의 표준화와 테스트 장비, 유지보수 장비 등의 개발이 요구될 것이다.

3. 교정성

잉크젯의 잉크액적 토출량은 Fig. 5 에 보인 바와 같이 노즐별로 편차가 있다. 일반적으로 노즐별로 구동전압의 파형을 조절하여 이러한 노즐별 잉크액적 토출량의 편차를 최소화할 수 있으나, 문제는 어떻게 토출량의 편차를 측정하는가에 대한 것이다. 다음은 현재까지 일반적으로 알려진 토출량 교정방법과 각 방법의 장점과 단점을 간략히 소개하도록 한다.

3.1 비전인식법

비전인식법은 비전카메라로 획득한 2 차원 잉크액적의 이미지를 소프트웨어적으로 처리하여 3 차원으로 환산하여 그 부피를 계산하는 방식을 의미한다. 잉크액적의 형상이 축대칭성을 가진다고 가정하였을 때 화면상에 나타난 2 차원 상의 이미지에서 가상축을 설정한 다음 치수정보를 획득하도록 하며, 획득한 치수정보를 가상축을 중심으로 360도 회전시켜서 3 차원으로 환산한 부피를 계산할 수 있다.

그러나, 만약 잉크액적의 직경이 $30 \mu\text{m}$ 인 경우 $\pm 2\%$ 내에서 부피편차를 인식하기 위해서는 100 nm 급에 해당하는 광학적 분해능이 요구된다. 잉크액적 측정장비를 생산하는 업체에서 100 nm 급에 해당하는 광학적 분해능을 제품사양으로 제시하기도 하지만, 이는 어디까지나 소프트웨어적으로 처리했을 시에 제시되는 가상적 수치일 뿐, 가시광선의 회절한계와 적용 렌즈의 광학 분해능 한계상 물리적으로 불가능하다고 보여진다.

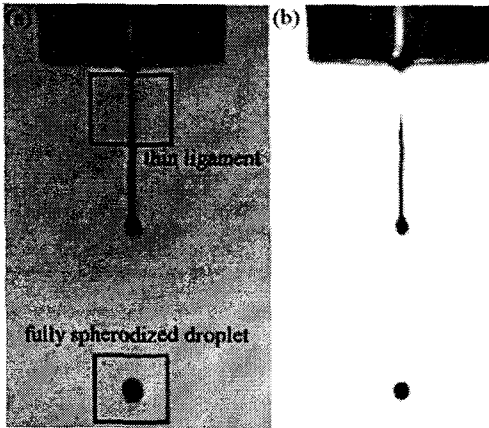


Fig. 8 Uncertainties of a captured droplet image

또한, 잉크액적이 5 m/s 의 속도로 낙하할 때 LED 스트로브 시스템에서 1 μ s 의 노출을 이용하여 이미지를 획득할 경우, 노출시간동안 5 μ m 를 이동하게 되므로 이미지 블러 현상을 초래하게 되며, 이는 획득하여야 할 영상 분해능인 100 nm 의 50 배에 해당하므로 측정의 불확실성에 기여한다.

마찬가지로, Fig. 8 에 보인 바와 같이, LED 조명의 밝기에 따라, 또 LED 조명들간의 밝기편차에 따라 획득되는 잉크액적 이미지가 가변하므로 비전을 통한 잉크액적의 정밀 부피측정은 힘들다고 본다.

3.2 속도측정법

이 방법은 Fig. 9 에 보인 바와 같이, 잉크액적의 낙하속도를 측정한 후, 노즐간의 잉크액적 낙하속도를 일치시킴으로써 잉크액적 부피편차를 교정하는 방법이다. LED 스트로브 시스템으로 t_1 과 t_2 의 시간에 찍힌 잉크액적의 서로 다른 낙하위치를 측정하여 속도를 구하게 되므로, 비전인식법에 비해 유효 광학분해능과 LED 조명의 광량편차에 의한 간섭을 덜 받는 장점이 있다.

그러나, 이 방법은 노즐구경이 모두 정확하게 일치하였을 경우에만 신뢰할 수 있는 정보를 획득할 수 있다. 만약 노즐들간의 구경편차가 클 경우, 잉크액적의 낙하속도를 일치시키더라도 잉크액적의 부피는 일치하지 않기 때문에 본 방법을 사용할 수 없다. 참고로, 실리콘 뎀스를 통해 제작되지 않은 기존 노즐들의 경우 대략 1 μ m 에 해당하는 노즐구경 오차를 가질 수 있다.

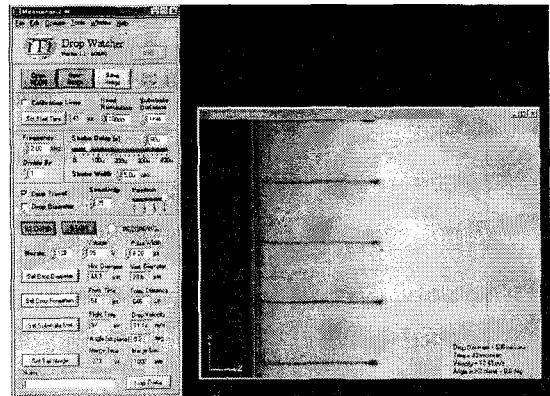


Fig. 9 A screen shot of droplet velocity measurement with Model III drop watcher by iTi, Corp.²⁰

3.3 직접부피측정법

이 방법은 Fig. 10 에 보인 바와 같이, 잉크액적을 기관상에 프린팅한 후, 공초점 레이저 현미경, 백색광 간섭계 등의 3 차원 표면형상 측정장비를 이용하여 직접 잉크액적의 부피를 측정하는 방식이다.

영국 Cambridge Display Technology 사의 측정결과에 따르면 높이방향과 수평방향 분해능은 각각 0.1 nm 와 0.5 μ m, 그리고 측정속도는 1 초를 구현할 수 있었다고 발표하였다.¹⁸ 그러나, 공초점 레이저 현미경의 경우 스캐닝 속도는 사용모델에 의해 좌우되며, 일반적으로 백색광 간섭계가 더 빠르고 높은 사용자 편의성을 제공할 수 있다.

그러나, 서브 나노미터 수준의 높이방향 분해능을 제공함에도 불구하고 수평방향 분해능은 수백 나노미터급에 불과하고, 특히 대물렌즈의 배율이 낮을수록 수평방향 분해능은 수 마이크로 이상으로 증가하는 문제점이 있다. 또한, 측정방법의 한계상 높은 각도를 이루는 지점, 즉 기관상에 패턴된 잉크액적의 가장자리 부근에서는 간섭광을 제대로 획득하지 못하여 측정오차가 생길 수 있으며, 사용되는 파장대에 따라 잉크액적 측정능력이 영향을 받을 수도 있다는 문제점이 있다.

비록 측정속도가 1 초 정도에 불과하다지만, 수십 개의 잉크젯 프린트 헤드, 즉 수천 개에 달하는 노즐들로부터 토출된 잉크액적들을 한 대의 측정장비로 전부 측정하는 것은 시간관계상 양산 장비에서 허용하기 힘들며, 복수 대의 측정장비를 이용하여 측정시간을 단축하기에는 구매 및

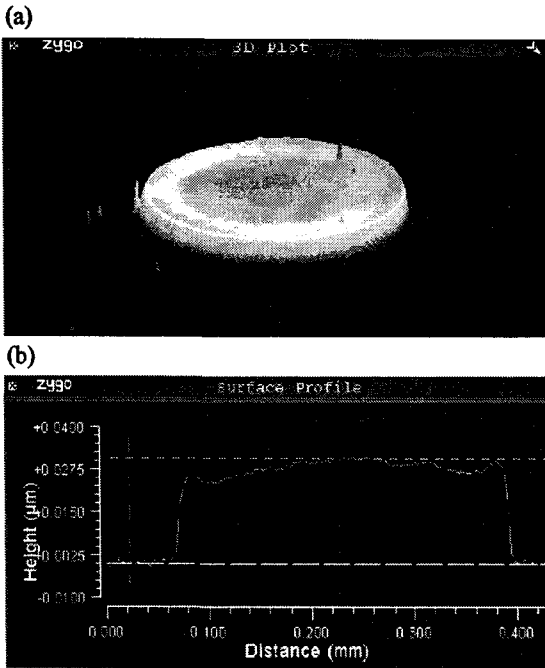


Fig. 10 Ink droplet surface profile: (a) 3D information and (b) cross sectional information of a measured ink droplet¹⁸

운용비용이 높다는 문제점이 있다.

따라서, 오프사이트에서 측정을 수행할 수 있는 별도의 장비로 개발되는 것이 바람직하다고 본다.

3.4 직접무게측정법

가장 적은 비용으로 측정을 수행할 수 있는 방법으로써 단일 혹은 복수노즐로부터 잉크액적을 일정시간 동안 토출받은 후, 그 무게를 측정, 비교하여 노즐별 잉크액적 토출량 교정을 실시하거나, 필요에 따라 잉크의 기측정된 밀도를 이용하여 부피로 환산하여 잉크액적 토출부피를 교정하는 방식이다.

그러나, 전자저울의 측정값이 정밀할수록 공기 유동에 의한 교란에도 측정값이 영향을 받으므로, 무게측정을 위해 잉크액적을 토출받는 시간을 줄이는데 한계가 있으며, 이로 인해 양산장비 상에서 직접 교정검사를 하기에는 적합하지 않다. 따라서, 직접부피측정법과 마찬가지로 잉크액적 교정을 위한 전용 측정장비로 개발되어야 할 것으로 예측되며, 양산장비상에서 잉크액적 토출상태를

간략히 검증하기 위한 비전검사법 혹은 속도측정법과 병행하여 사용되어야 할 것으로 예측된다.

4. 결론

지금까지 잉크젯을 성공적으로 디스플레이와 인쇄전자와 같은 하이테크 산업에 적용하기 위해 요구되는 필수요소들인 신뢰성과 교정성에 대하여 소개하였다.

신뢰성은 제품수율에 가장 직접적으로 영향을 미치게 되므로, 신뢰성의 확보를 위한 방안이 우선적으로 고려되었어야 함에도 불구하고, 현재까지의 잉크젯 개발 로드맵에서는 패턴작업을 위한 잉크젯 프린터의 개발 외에는 크게 주목을 받지 못해왔다. 예를 들어, 잉크젯 프린트 헤드의 입고 후 세척 및 어셈블리 장비와 같은 주변장비들이 잉크젯 프린터의 개발과 비슷한 시기에 개발되었어야 함에도 불구하고 이러한 장비들이 공식적으로 개발이 이루어지지 않았다는 점, 본 논문에서 언급된 4 가지 측정방법 이외에 측정정밀성과 시간을 대폭적으로 향상시킬 수 있는 새로운 측정방법에 대한 연구개발이 이루어지지 않았다는 점은 주변 인프라가 성숙되지 않은 채 잉크젯 프린터 하나만으로 포토리소그래피를 대체하기 위한 노력이 집중되어 왔다는 것으로 해석될 수 있다.

포토리소그래피만 하더라도 주변 인프라로써 다양한 파생공정과 공정장비들이 개발되었음을 보았을 때, 잉크젯도 하이테크 산업의 공정에 성공적으로 적용되기 위해서는 디바이스의 패턴공정을 위한 잉크젯 프린터 이외에도, 신뢰성과 교정성과 같은 주변 인프라 기술 및 장비에 대한 연구개발과 구축, 그리고 인력양성에 더 많은 노력이 집중되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Teng, K. F. and Vest, R. W., "Metallization of Solar Cells with Ink Jet Printing and Silver Metallo-Organic Inks," IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 291-297, 1988.
2. Siringhaus, H., Kawase, T., Friend, R. H. and Shimoda, M., "High-Resolution Ink-Jet Printing of All-Polymer Transistor Circuits," MRS Bulletin, Vol.

- 26, No. 7, pp. 539-543, 2001.
3. Chen, B., Cui, T., Varahramyan, K., "All-polymer RC filter circuits fabricated with inkjet printing technology," *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 5, pp. 841-847, 2003.
 4. Liu, Y., Cui, T. and Varahramyan, K., "All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique," *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 9, pp. 1543-1548, 2003.
 5. Shimoda, T., Morii, K., Seki, S. and Kiguchi, H., "Inkjet Printing of Light-Emitting Polymer Displays," *MRS Bulletin*, Vol. 28, No. 11, pp. 821-827, 2003.
 6. Koo, H. S., Chen, M., Pan, P. C., "LCD-based color filter films fabricated by a pigment-based colorant photo resist inks and printing technology," *Thin Solid Films*, Vol. 515, No. 3, pp. 896-901, 2006.
 7. Smith, P. J., Shin, D. Y., Stringer, J. E. and Derby, B., "Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns," *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 13, pp. 4153-4158, 2006.
 8. <http://www.plasticlogic.com/news-detail.php?id=300>
 9. <http://www.dnp.co.jp/eng/news/2007/071019.html>
 10. <http://www.etnews.co.kr/news/detail.html?id=200803140161>
 11. <http://www.etnews.co.kr/news/detail.html?id=200706110052>
 12. Albertalli, D., "Gen 7 FPD Inkjet Equipment-Development Status," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 36, No. 1, pp. 1200-1203, 2005.
 13. Eggers, J., "Air Entrainment through Free-Surface Cusps," *Physical Review Letters*, Vol. 86, No. 19, pp. 4290-4293, 2001.
 14. de Jong, J., de Bruin, G., Reinten, H., van den Berg, M., Wijshoff, H., Versluis, M. and Lohse, D., "Air entrapment in piezo-driven inkjet printheads," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 3, pp. 1257-1265, 2006.
 15. Kwon, K. S. and Kim, W., "A waveform design method for high-speed inkjet printing based on self-sensing measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 140, No. 1, pp. 75-83, 2007.
 16. <http://www.iticorp.com/pdf/iTi-IWP2-0407.pdf>
 17. Le, H. P., "Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology," *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 42, No. 1, pp. 49-62, 1998.
 18. Gregory, H., "Ink Jet Printing Light Emitting Polymer Displays," *TAGA MicroTech*, 2003.
 19. Voit, W., Zapka, W., Belova, L. and Rao, K. V., "Application of inkjet technology for the deposition of magnetic nanoparticles to form micron-scale structures," *IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology*, Vol. 150, No. 5, pp. 252-256, 2003.
 20. Mills, R. N., "The Integration Process," *IMI's 1st Ink Jet Technology Integration Symposium*, 2005.