

◆특집◆ NBiT 응용 잉크젯 프린팅 기술

제조 방식의 대변환에 따른 잉크젯 프린팅 기술

김석순*, 김동수**, 이원희**, 신동윤**, 김충환**

Ink-jet Printing Technology for Paradigm Shift in Mass Production

Seogsoon Kim*, Dongsoo Kim**, Wonhee Lee**, Dongyun Shin** and Chounghwan Kim**

Key Words : Ink-jet (잉크젯), Printing (프린팅), Mass Production(대량 제조)

1. 서론

LCD 제조 등 고정도 대면적의 패턴이 필요한 제품을 제조하는 공정의 기반은 photolithography 로 지금까지 성공적인 제조 방식이었다. 그러나 진공 공정과 높은 청정도가 요구되는 방식으로 태생적으로 높은 장비 투자, 공정 그리고 재료비용으로 제조 원가가 높은 공정이다. LCD, PDP, OLED 등 다양한 디스플레이 방식간의 치열한 가격 경쟁 그리고 대면적화에 따른 기존 기술의 한계 등으로 더 가격 경쟁력이 있는 새로운 제조 방식이 요구되고 있다. 이러한 디스플레이 산업의 저렴함 제조 기술의 요구로 잉크젯 프린팅 기술을 포함한 다양한 프린팅 기술이 되고 있다.

프린팅 기술은 이미 다양한 산업 분야에 적용되어 사용되고 있으며 이러한 기술을 기반으로 전자 제품에서 요구하는 전자 재료를 프린팅 할 수 있는 보다 진보된 프린팅 기술이 요구되어지고 있다. 또 전자재료를 프린팅 할 수 있는 새로운 개념

의 프린팅 기술이 개발되기도 하고 다양한 기술이 융합(fusion)되어 필요한 기술이 개발되고 있다.

잉크젯 프린팅 기술은 아래와 같은 좋은 특성으로 가장 주목 받는 대량 제조 기술로 개발이 되고 있다.

- 디지털방식의 유연 제조 방식
- 고정도 고속 프린팅
- 비접촉 Direct 프린팅 방식
- 환경 친화적인 방식
- 저렴한 재료 및 공정 비용

그러나 이러한 잉크젯 프린팅 기술도 제한이 많아서 실제 제조 공정에 적합한 제조 기술로 개발되기 위해서 계속 개발되고 있다. 또 잉크 방울의 퍼짐(spreading)을 조절하기 위한 표면처리 기술 등 다양한 전처리 기술과 융합되어 새로운 제조 방식과 응용 분야로 발전되고 있다.

잉크젯 프린팅 기술이 가장 활발하게 적용되어 개발이 되고 있는 분야는 LCD 제조 분야이다. Color Filter를 비롯하여 Alignment Layer를 위한 PI coating, Spacer 그리고 Liquid Crystal Deposition 등을 정량 토출이 필요한 부분들이다. 더욱이 10μm 이하의 선폭이 요구되는 Backplane의 Gate와 Source

* (주)유니젯

Tel. 031-777-7435, Fax. 031-777-9437

Email ssgnkim@hanmail.net

잉크젯 프린팅 장비 개발에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

** 한국기계연구원 정보장비연구센터

/Drain Line을 형성하는데도 적용이 되고 있다. 이러한 새로운 잉크젯 기술은 PLED, PDP, E-paper, PCB, RFID, 그리고 Solar Cell 등 다양한 전자 제품 제조 분야에 확산되고 있다.

잉크젯 프린팅 기술을 적용하여 전자 재료를 프린팅 하기 위해서는 기존의 잉크젯에서 요구되는 기술 보다 더 높은 사양이 요구된다. 아래 표1은 기존의 프린팅 기술과 전자재료에서 요구되는 프린팅 기술의 차이를 나타낸다. 더욱이 전자 재료 잉크젯 프린팅 기술은 단순히 프린팅을 하는 것 이외에 Deposition된 재료가 요구되는 품질 및 성능 그리고 장시간의 신뢰성이 나와야 하기 때문에 더 높은 수준의 Ink 재료 및 Formulation 기술이 요구되어 진다. 따라서 전자 재료 잉크젯 프린팅 기술은 Fig.1과 같이 다양한 기술이 필요로 하는 복합 기술이 요구된다.

Table 1 Printing technology of desktop and electric application

항목	데스크톱용	전자재료용
프린팅정밀도	$\pm 25 \sim 35 \mu\text{m}$	$\leq \pm 7.5 \mu\text{m}$
Droplet 균일성	$\pm 15\%$	$\pm 2 \sim 4\%$
제어 방식	공동 노즐 제어	개별 노즐 제어
Head 수명	< 20억번	100 ~ 900억번
Drop 검사기능	없음	필수
Meniscus 조절	대기압	임의 조절

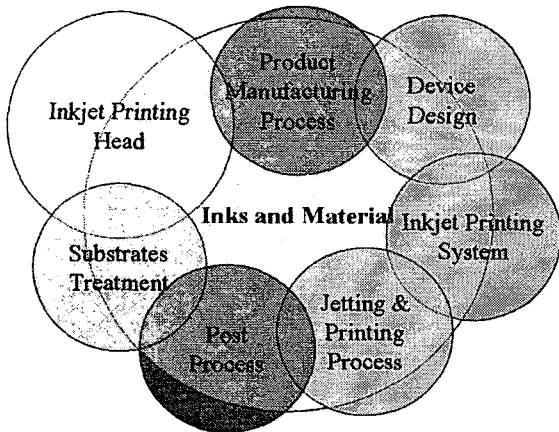


Fig.1 Various technologies required for electronic material ink-jet printing

2. 잉크젯 프린팅의 기술적인 요구 사항

전자 재료의 잉크젯 프린팅에서 요구되는 기술은 프린팅 균일성의 확보, 정확한 위치에 정확한 폭과 두께의 Deposition 구현, 잉크젯 공정의 신뢰성 확보, 요구되는 전자적 성능 및 품질 그리고 제품의 신뢰성을 확보할 수 있는 잉크 재료를 확보하는 것이다.

잉크젯 프린팅 기술을 개발하면서 해결해야 할 가장 중요한 문제는 프린팅 균일성을 확보하는 것이다. 이는 근본적으로 아래와 같이 주로 잉크젯 헤드와 잉크의 특성에 기인하여 헤드 또는 잉크의 개선이 필요하나 기술적인 어려움으로 잉크젯 공정, 잉크젯 장비, 건조 공정 등의 최적화로 균일성 문제를 보완하여 해결하고 있다.

- 잉크젯 헤드의 제조 공차
- Nozzle 간의 Crosstalk
- 잉크젯 헤드의 구조
- 잉크젯 헤드의 온도 변화
- 잉크의 특성(Wetting, Drying 등)
- 잉크젯 공정 조건

특히 잉크젯 헤드는 제작 및 조립 공차 그리고 구조 자체로 인하여 각 노즐간의 Droplet 크기의 차이가 $\pm 8 \sim 15\%$ 발생한다. 이를 보상하기 위하여 각 노즐의 Drive waveform을 개별적으로 제어할 수 있게 배선을 만들고 DPN(Drive Per Nozzle) 방식의 제어를 하여 $< \pm 2\%$ 의 균일성을 얻게 만들어 준다. 이때 DPN 조절을 하기 위해서 각 Nozzle에서 생성되는 Droplet의 크기를 Machine Vision 기술을 이용하여 측정하고 그 결과에 따라서 자동으로 원하는 크기가 균일하게 얻어질 수 있게 조절하여 준다. 그러나 이 이외도 Meniscus의 변화, 불가피한 Head의 온도 변화, 잉크 상태의 변화 등에 따라서 Droplet 크기가 바뀌게 되므로 이러한 상태를 반드시 같이 조절해 주어야만 요구되는 사양을 만족시킬 수 있다.

잉크젯 프린팅의 오차는 크게 잉크젯 헤드에서 발생하는 오차 80% 그리고 장비의 정밀도 오차 20%로 구성된다. 즉 장비의 오차 보다는 잉크젯 헤드 자체에서 발생하는 오차가 더 커서 전체

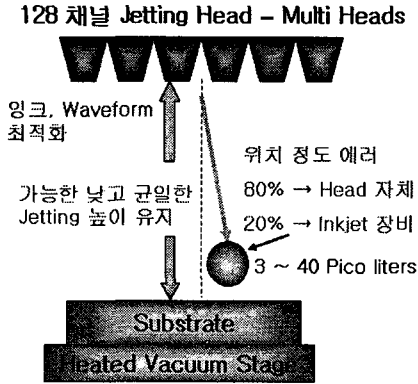


Fig. 2 Resolution of inkjet printing

프린팅 오차는 1 mm 높이에서 프린팅을 하였을 때 $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 오차를 가진다.

잉크젯 프린팅 정밀도를 개선하기 위하여 기계 가공으로 만들어지던 잉크젯 헤드를 MEMS 방식으로 제작하고 또한 가능한 1mm 이하의 낮은 높이에서 프린팅을 하기 위하여 짧은 거리에서 완전한 Droplets를 형성할 수 있는 잉크를 개발하고 있다. 이러한 큰 프린팅 오차는 실제로 전자 재료 잉크의 프린팅에 큰 문제가 될 수 있으나 프린팅 하고자 하는 면을 친수성 그리고 발수성으로 처리하여 잉크가 프린팅이 되기 원하는 친수성 표면으로 Self-Align이 되는 특성을 이용하여 프린팅 정밀도는 큰 문제가 아니다. 더욱이 표면에 특별한 Aspect 비의 Groove를 형성하여 주고 이에 상응하는 접촉각(Contact Angle)이 되게 표면 처리하여 주면 이러한 특성만으로도 Micro fluid의 Motion을 제어하여 $4\mu\text{m}$ 폭까지 균일한 Line Pattern을 정확하게 형성하는 것이 가능하다.

잉크젯 프린팅 기술이 개발의 수준을 넘어서 실제로 이 기술을 이용하여 제품을 대량 생산하려면 동일한 잉크젯 공정 상태가 꾸준히 유지되어야 한다. 가장 중요한 점은 개발된 잉크와 잉크젯 헤드가 장시간 균일한 특성을 유지하여야 한다. 또한 잉크젯 헤드의 수명이 최소 2달 이상 유지되어야 한다. 이러한 조건은 물론 잉크와 잉크젯 공정 조건과도 긴밀한 관계를 가지고 있어서 잉크젯 헤드, 잉크 그리고 공정 조건이 최적화되어야 한다. 이러한 조건에서 장시간 프린팅 실험을 수행

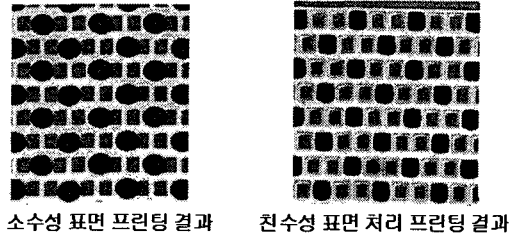


Fig. 3 Printing result according to surface treatment

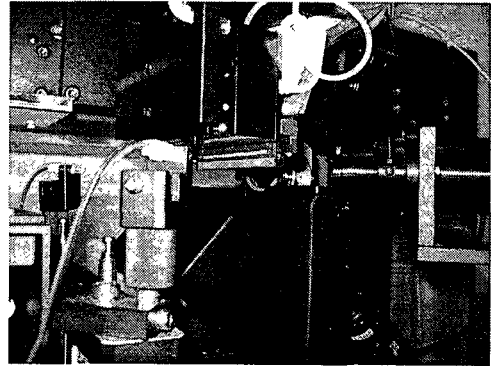


Fig. 4 Inkjet printhead and droplet analyzing system

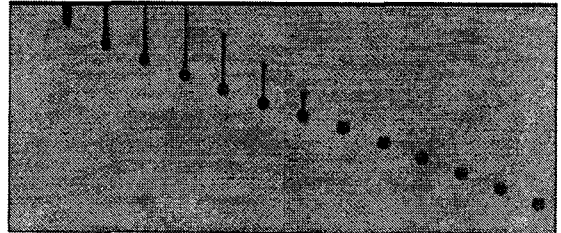


Fig. 5 Inkjet droplet formation

하여 공정의 신뢰성을 평가하여야 한다. 잉크젯 프린팅 장비는 이러한 잉크젯 공정의 신뢰성을 유지하기 위하여 다양한 방법으로 지속적인 검사 및 조정을 수행하고 최적의 상태가 유지되게 별도의 Droplet 분석 장치와 Maintenance Station을 가지고 적용하는 공정에 필요한 정해진 Maintenance Schedule에 따라서 이를 정기적으로 수행한다. 결국 잉크젯 장비의 개발은 얼마나 이러한 잉크젯 공정이 계속 유지되게 하느냐에 달려 있다.

전자 재료의 잉크젯 프린팅 기술 개발에서 가장 어려움이 많은 분야는 바로 가장 중요한 잉크

기술이다. 잉크를 Formulation하여 잉크 젯팅이 되게 하는 것은 대학교 Lab에서 할 수 있는 정도의 수준으로 어려운 기술이 아니다. 그러나 잉크 젯팅이 균일한 상태에서 장시간 수행되고, 높은 Frequency에서 젯팅이 되게 하고, 젯팅이 된 Droplet이 원하는 형태로 Spreading 되고, 젯팅이 된 결과가 균일하게 형성되고, 이러한 결과로 만들어진 제품이 요구되는 성능 및 품질이 나오고, 제품의 신뢰성이 나오게 잉크를 개발하는 것은 재료 및 잉크에 대한 높은 기술적인 수준과 많은 Know how와 경험이 필요한 어려운 일이다. 특히 가장 어려운 분야는 제품에서 요구되는 성능과 신뢰성을 갖는 잉크를 만드는 것이 가장 어려운 부분이다. 현재까지 다양한 응용분야에서 요구하는 잉크의 특성을 만족하는 잉크의 개발이 진행 중이며 이러한 잉크가 개발되면 잉크젯 기술을 적용한 제품의 양산이 시작될 것이며 아직 이러한 기술을 다양한 분야에서 개발 중에 있다.

3. 잉크젯 프린팅 시스템

3.1 시스템의 구성

잉크젯 프린팅 시스템 특히 대량 생산에 적용될 장비는 적용 Application, 제작할 제품 특성, 요구되는 공정, 사용되는 잉크, 그리고 생산성 등에 따라서 이에 맞게 설계가 되어야 한다. 즉 Color Filter 또는 PLED가 같은 Pixel Pattern을 수행하지만 제작할 제품이 24" Monitor나 37" TV나, 사용할 잉크가 Solvent Base나 UV Base나, Rigid Substrate나 Flexible Substrate나 또는 잉크의 최대 Frequency와 생산성의 목표에 따라서 최적화되고 전용화 하기 때문에 장비의 개념이 전혀 달라진다. 아래 Fig. 6은 일반적인 전자 재료용 잉크젯 프린팅 장비의 구성이다.

3.2 잉크젯 장비의 생산성

Pixel Pattern용 잉크젯 장비의 생산성은 아래와 같이 잉크, 공정, 자재 그리고 제품의 조건에 따라서 달라지므로 이에 맞는 장비를 설계 제작하여야 한다. 아래의 변수들이 결정이 되면 이에 맞는 생산성을 결정하고 이에 따라 장비를 설계하여 요구되는 생산성을 갖는 장비를 개발할 수 있다.

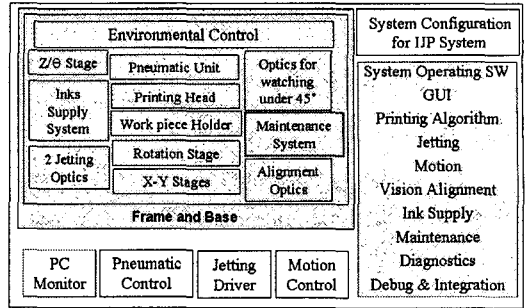


Fig. 6 Consist of inkjet printing system

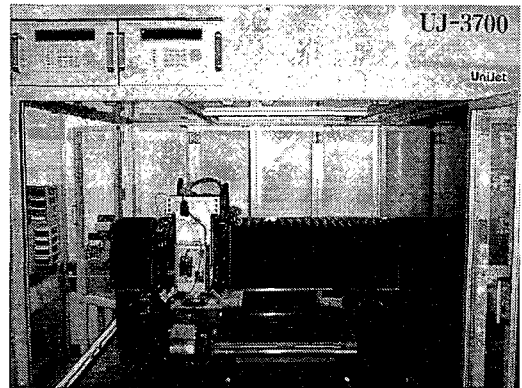


Fig. 7 Picture of inkjet system

- ① Pixel Pitch & Size → Required Pixel Volume
- ② Solid Content of Ink, Deposition Thickness → Required Ink Volume
- ③ Droplet Size → No. of Droplets per pixel
- ④ Printing Frequency, Pass → Printing Velocity
- ⑤ No of Nozzles per head and No of Pixels in X and Y → Printing Time per One Pass
- ⑥ No. of Head, Feeding & Alignment Time → Printing Time per Panel
- ⑦ Machine Utilization (Operation Ratio) → Production per day
- ⑧ Operation Days → Production per month
- ⑨ Yield → Real Production Capacity

특히 잉크의 특성인 Solid Contents 그리고 Printing Frequency는 장비의 성능을 결정하는 결정적인 요소이다. 따라서 가능한 많은 Solid Contents를 넣고 가능한 높은 Frequency로 빠르게 프린팅을 하는 것을 요구하지만 이러한 잉크를 개발하는

것은 어려움이 많아서 생산성이 제한적일 수밖에 없다. 이러한 제한은 잉크젯 헤드를 다수 붙여서 동시에 프린팅을 수행하게 하여 요구되는 생산성을 얼마든지 높은 장비를 개발할 수 있다.

4. 전자 재료 잉크젯 장비 핵심 기술

잉크 그리고 잉크젯 헤드가 잉크젯 프린팅 기술의 가장 핵심적인 기술이지만 이 기술을 이용하여 제품을 만드는 것은 결국 잉크젯 프린팅 장비이다. 또한 잉크와 잉크젯 헤드가 가지고 있는 문제를 장비와 공정으로 보완하여 장비의 성능 및 신뢰성을 높여 제품의 신뢰성을 높일 수 있다. 이에 필요한 잉크젯 장비의 핵심 기술은 Head Cartridge, Waveform 조절 기술, Droplet 분석 기술, Ink Supply 기술, Maintenance 기술, Nozzle Position 제어 기술, 잉크젯 공정 기술 등이 있다.

4.1 Head Cartridge

잉크젯 프린팅 기술로 제품을 양산을 하는데 잉크젯 헤드의 수명 그리고 잉크젯 헤드의 문제 발생 등으로 헤드를 교체하여야 한다. 제품을 양산하는 동안에 이러한 문제가 있으면 양산을 위하여 가능한 빨리 교체를 수행하여야 한다. 그렇게 하기 위해서는 이를 빨리 수행할 수 있는 Head Cartridge를 제작하여 한 번에 교체를 하여 10분 이내로 다시 작업이 가능하게 만들어 주어야 한다. 따라서 Head Cartridge는 아래와 같이 다양한 역할을 가진 Head Cartridge의 개발이 필요하다.

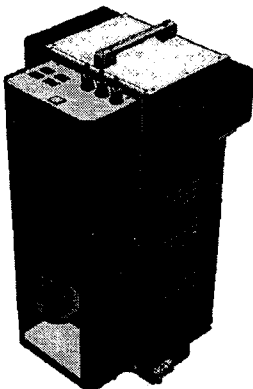


Fig. 8 Head cartridge with DPN driver

- DPN Jetting Driver
- Heat Dissipation
- Head Reservoir & Heating
- Lung
- Ink Supplying Tubing
- Head Pneumatic Control Tubing
- Holding Fixture
- Various Jetting heads
- Multi Nozzle Module
 - Individual Rotation Capability
 - Position Adjustment

4.2 DPN Driver와 Waveform

잉크젯 헤드를 구동하는 Driver 성능은 잉크젯 성능뿐 아니라 장비 전체의 성능까지 좌우할 수 있는 중요한 기술이다. 전자 재료 잉크 프린팅에 요구되는 잉크젯 헤드 Driver는 Multi Channel, 각 Nozzle을 독립적으로 제어할 수 있는 기능, 다양한 형태의 제어 Waveform을 형성할 수 있는 기능이 필요하다. 각 Nozzle을 독립적으로 제어할 수 있는 기능은 3가지로 각 Nozzle에 개별적인 Waveform을 줄 수 있고, 각 Nozzle이 독립적인 Trigger 신호를

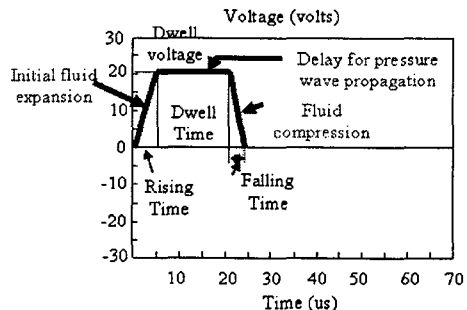


Fig. 9 Normal drive waveform

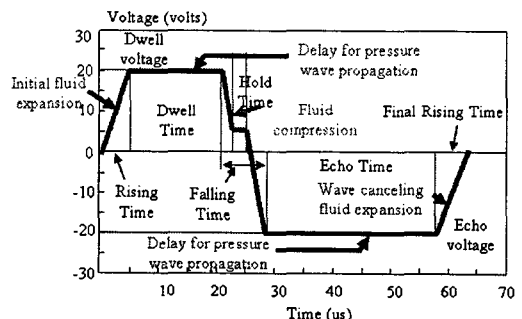


Fig. 10 Drive waveform with echo pulse

가지며 또한 각 Nozzle이 다른 Nozzle과 관계없이 언제나 Trigger를 할 수 있어야 한다. 이러한 특성의 Driver는 각 Nozzle의 Droplet 크기와 속도를 개별적으로 더 정확하게 제어하여 균일한 프린팅을 가능하게 하고 요구되는 시간에 언제든지 더 정확한 위치에 프린팅을 수행할 수 있어서 프린팅 정도 및 속도를 향상시킬 수 있다.

또 다양한 제어 Waveform을 형성할 수 있는 기능을 가지면 Echo Pulse에 의한 Meniscus 조절 Grey Scale 등의 다양한 특성을 갖게 하여 잉크에 대한 잉크젯 헤드의 Compatibility를 확대할 수 있다.

4.3 Droplet 분석 기술

양산을 수행하는 동안에 정해진 Schedule에 따라서 모든 헤드의 모든 Nozzle의 Droplet 크기와 속도를 검사하고 이에 따라서 미세 조절을 자동으로 하여야 한다. 이러한 것은 고배율 Optic와 CCD 그리고 이를 Vision Software에 의하여 자동으로 수행하게 된다. Droplet의 크기를 0.1 μm 까지 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 이러한 Vision 기술과 DPN Driver 기술을 같이 적용하여 모든 Nozzle의 Droplet 크기를 균일하게 맞추어 주는 자동 Algorithm을 구현하여 장비의 사용 편리성을 향상시켜야 한다.

4.4 Ink 공급 장치 및 Maintenance 장치

Ink 공급 장치 및 Maintenance 장치는 Ink의 종류 및 특성 그리고 적용할 Head에 따라서 달라진다. 가장 좋은 예는 LCD에서 Spacer를 형성하는데 쓰이는 Ink는 Bead가 3.5 ~ 4 μm 의 크기로 잉크를 아무리 잘 만들어도 Bead가 가라앉게 될 수밖에 없다. 이러한 잉크를 가지고 신뢰성 있게 균일한 프린팅을 하기 위해서는 잉크 Reservoir를 계속 흔들어 주어야 하는 장치 등 이에 적합한 잉크 공급 장치를 구성하는 것은 필수적인 기술이다. Maintenance 장치는 기본적인 기능인 Spitting, Purging 그리고 Filling 이외에 잉크의 특성에 따라서 Capping, Wiping, Blotting, Vacuum Purging 등을 수행하는 하계 하는 장치가 필요하다. Maintenance Schedule도 작업 방식과 공정에 따라서 달라진다. 특히 양산용 잉크젯 프린팅 장비는 한 응용 분야와 잉크에 전용화 된 장비이므로 이에 맞는 최적화된 Ink 공급 장치와 Maintenance 장치가 요구된다.

4.5 잉크젯 공정 기술과 Software

양산이 가능할 정도의 잉크젯 프린팅 기술을 확보하여 제품을 양산하려면 이에 따르는 수없이 많은 문제를 만나고 또 이를 해결해야 한다. 그러한 문제를 해결하는 방법은 단지 장비의 공정으로만 되는 것이 아니라 잉크를 개선해야 하는 경우가 가장 많다. 그리고 이러한 공정적인 방법은 많은 실험과 분석을 통하여 개선되어 장비의 운영 Software에 적용되어 있다. 이러한 공정적인 Know how를 가지고 있는 Software는 장비의 핵심 기술이다.

이외에도 잉크젯 프린팅 장비는 고정도 Nozzle Addressing 기술, Patterning Strategy 등 다양한 기술이 요구된다.

5. 결론

잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 FPD 또는 PCB 제조에 적용하는 것은 이미 대세이다. 또한 이러한 대변화는 이미 시작되었고 이에 따라 각 응용 분야에 필요한 전용 장비는 이에 맞는 개념과 설계가 필요하고 공정적인 Know how를 가진 Software에 의하여 운영되어야 한다. 이에 필요한 핵심 기술에 대하여 설명이 되었고 이러한 잉크젯 프린팅 기술의 개발 방향을 제시하였다.

참고문헌

1. Halls, J., "Polymer OLED," Printed Electronics Europe 2006, Cambridge, April 2006.
2. Street, R. A., Apte, R. B., Arias, A. C., "Jet-printed Polymer and a-Si TFT backplanes for flexible displays," 4th annual Printable Electronics and Display conference, IMI, Las Vegas, Oct. 2005.
3. Fuller, S. B., Wilhelm, J. E. and Jacobson, J. M. "Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 54-60, 2002.
4. Ueda, M., Oguchi, T. Y., "Precise Positioning of Spacers for LCD using Ink-jet Method," SID 2006

DIGEST, pp. 444-447, 2006.

5. Shioya, E., Kamakura, K. T., "LTPS TFTs with Metal Electrodes Formed by Inkjet Printing Technology," SID 2006 DIGEST, pp.1575-1578, 2006.