

잉크젯 프린팅 된 실버잉크의 뭉침 현상에 대한 해석

김명기*, 신권용*, 황준영*, 강경태*, 강희석*, 이상호*
한국생산기술연구원*

The analysis of bulging phenomenon for ink-jet printed silver inks

Myong-Ki Kim*, Kwon-Yong Shin*, Jun Young Hwang*, Kyungsae Kang*, Heuseok Kang*, Sang-Ho Lee*
Korean Institute of Industrial Technology*

Abstract - In this paper, we have studied the bulging phenomenon of ink-jet printed silver lines. The used silver inks are DGP-40LT-15C and DGH-55HTG of Advanced Nano Product (ANP) Company. We investigated the behavior of bulging by changing the polarity of the inks, the surface energy of substrate and droplet spacing in printing. The contact angle of the polar inks increased much more sensitively than the nonpolar ink as the surface energy of the substrate increases. In the case of the nonpolar ink, the bulging phenomenon occurred seriously as the droplet spacing decreased at the constant surface energy.

1. 서 론

잉크젯 인쇄는 액상 공정 기법중 하나로서 가장 유력한 차세대 패턴 인쇄 중의 하나일 뿐 아니라 기술의 적용 분야가 광범위하여 다양한 종류의 잉크에 대한 패턴을 형성하기 위해 분사 특성 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 잉크젯 인쇄의 장점은 기관과 직접적인 접촉을 하지 않기 때문에 다른 인쇄방식에 비해 접촉 오염의 문제가 적으로 인쇄 기술들 중에서 재료의 사용 효율이 높아 비용절감의 효과를 얻을 수 있다. 또한 컴퓨터를 통한 데이터가 직접 잉크젯 프린터로 전송되어 패턴을 구현하므로 마스터플레이트와 같은 부수요소들이 요구 되어 지지 않는다. 잉크젯 인쇄를 디바이스의 제작에 적용하는데 있어서 주로 사용되는 부분은 전도성 폴리머와 금속 나노 잉크를 통한 전도성 라인 패턴과 박막을 형성하는 것이다. 완전한 라인 패턴을 위해서는 매끄럽고, 평탄하고, 가늘고, 끝은 형태가 요구되어 진다. 그러나 잉크젯 인쇄를 통해 이와 같은 특성을 갖는 라인을 형성하기 위해서는 다양한 변수들에 대한 제어가 필요하다. 전자 분야에 적용되는 잉크젯 인쇄의 몇 가지 예를 보면 각각에 따라 중요시 되어 지는 부분이 다를 수 있다. 유기트랜지스터에서 필요한 Gate 라인은 가늘고 매끄러워야 하며 Source-Drain 전극은 좁은 간격의 제어가 필요하다. 유기 태양전지의 경우 활성층을 형성 이 얇고 균일한 정도에 따라 효율에 직접적인 영향을 미친다. 각기 다른 인쇄형태를 유발하는 라인의 특성을 이해하는 것은 잉크젯 인쇄의 적용 분야에 있어서 품질의 개선과 인쇄 조건의 최적화에 도움을 준다. 본 연구에서는 잉크젯 인쇄 시 기관의 표면처리에 따른 접촉각과 액적 간격의 변화가 라인패턴의 특성에 어떤 영향을 주는지 실험을 통해 확인하여 보았다.

2. 실험재료 및 실험방법

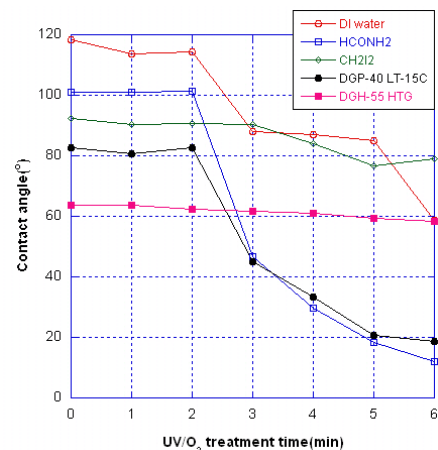
실험에 사용된 잉크젯 프린팅 장비는 Dimatix사의 DMP-2831모델로 잉크 액적은 2축 스테이지의 이동에 의한 트리거 신호에 따라 Drop-On-Demand(DOD)방식으로 분사되어 진다. 카트리지형 잉크분사 헤드는 DMP-11610모델을 사용하였으며 단일액적 분사시의 액적 부피는 약 10pl 정도이다. 잉크는 ANP사의 실버 잉크인 DGP-40LT-15C와 DGH-55HTG를 사용하였다. <표 1>에서 잉크의 물성을 보여준다. 두 잉크는 표면장력에서 약간의 차이를 보이나 잉크를 구성하는 주 용매가 극성과 무극성을 띠는 점을 더 주목하였다. 기관은 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며 표면처리는 테프론 용액을 스프레이코팅하고 UV/O₃ 처리하는 방법을 사용하였다. 테프론 코팅은 기관의 표면에너지를 변화시키기 위한 것이며 이를 통해 초기 기관의 표면 에너지를 낮추어 잉크와 기관간의 큰 접촉각을 얻을 수 있다. 이는 잉크의 퍼짐 정도를 변화시키기 위함이며 테프론 코팅 후 0, 2, 4, 6분의 UV/O₃ 처리를 통하여 서로 다른 표면 에너지를 갖는 기관을 제작하였다. 표면에너지는 Diiodomethane (CH₂I₂), Formamide(HCONH₂), DI water 세 가지 용매의 접촉각을 측정하여 알 수 있다. <그림 1>은 UV/O₃ 처리 시간에 따른 접촉각의 변화를 보여준다. 표면처리 시간이 증가함에 극성 용매는 접촉각이 작아지는 경

향을 보이나 무극성 용매인 CH₂I₂와 DGH-55HTG 잉크는 접촉각의 변화가 크지 않음으로 보아 기관의 표면 에너지 변화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. <표 2>는 각각의 기관에서 계산된 표면에너지와 실험에 사용된 두 가지 잉크가 분사 되었을 때 액적의 직경을 보여준다. 테프론 코팅 후 아무런 처리가 없을 때의 기관이 가장 낮은 표면 에너지를 보이며 UV/O₃ 처리시간이 증가할수록 표면 에너지가 높아짐을 볼 수 있다. 또한 각각의 기관에 분사된 잉크 액적 표면에너지가 높아짐에 따라 퍼짐성의 향상으로 인한 직경이 증가함을 알 수 있다. 접촉각 측정에서 알 수 있듯이 무극성 용매가 사용된 DGH-55HTG 잉크는 상대적으로 직경의 변화가 적음을 확인할 수 있다.

<표 1> 실험에 사용된 잉크의 물성

Ink	Viscosity (cP)	Density (g/ml)	Surface tension (dyne/cm)	Solvent type
DGP-40LT-15C	12.8	1.44	35.9	Polar
DGH-55HTG	9.4	1.54	28.9	Non-Polar

잉크젯 인쇄에서 라인패턴의 형성은 기관에 잉크 액적들을 일정 간격으로 겹치게 인쇄하는 방법으로 이루어진다. 분사되는 잉크액적의 간격은 라인 형성에 필요한 겹침 정도를 변화 시키며 잉크 양에 따라 패턴의 특성에 영향을 줄 수 있다. 잉크 액적의 분사 간격을 결정하기 위해 먼저 각 기관에 일정 간격으로의 점 패턴을 인쇄하고 액적의 퍼짐 정도를 직경을 측정함으로써 확인한다. 측정된 액적의 직경을 바탕으로 분사 간격을 액적 직경과 동일하게 설정하면 액적들은 각 절반씩 겹쳐져 인쇄 된다. 실험에서는 액적의 겹침 정도를 50%, 25%, 0%로 설정하여 라인 패턴을 인쇄 하였을 때의 현상을 관찰하였다.



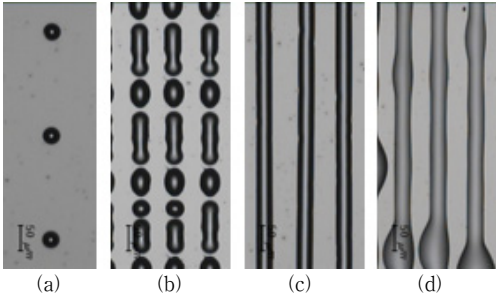
<그림 1> UV/O₃ 처리에 따른 접촉각 변화

<표 2> 표면에너지에 따른 액적 직경 변화

UV/O ₃ treatment time	표면에너지	Ink Name	
		DGP-40LT-15C	DGH-55HTG
0 min	11.92	27.2	30.8
2 min	12.35	32.4	32.4
4 min	15.54	42.1	34.0
6 min	41.76	46.2	38.0

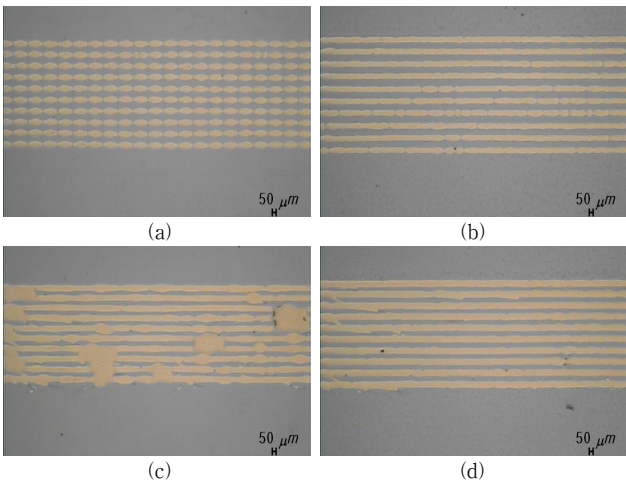
3. 실험 결과

일반적으로 잉크젯 인쇄를 통한 라인 패턴의 형태는 분사되는 액적의 간격에 따라 <그림 2>와 같이 구분될 수 있다. 각각의 액적이 충분한 거리를 두고 분사된 독립된 형태의 패턴에서 분사 간격이 가까워짐에 따라 인접한 액적끼리 서로 겹치기 시작하고 균일한 라인이 형성된다 [1]. 또한 경우에 따라 라인패턴의 일부에는 불룩하게 잉크가 묻히는 벌지 현상을 발생시킬 수 있다. 라인에서의 벌지 현상이 심해질 경우 인접한 라인과 연결 될 수 있으며 고품질의 라인 패턴을 위해 벌지 현상은 반드시 해결해야할 점이다.



<그림 2> 액적 분사간격에 따른 라인 패턴의 변화: (a): 독립된 액적; (b): 불연속 라인; (c): 연속 라인; (d): 벌지 라인.

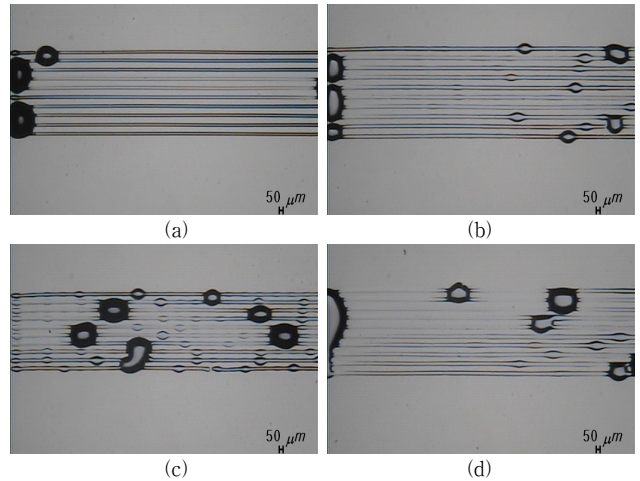
<그림 2>의 (d)와 같이 라인에서의 벌지 현상이 발생하는 요인을 UV/O₃ 처리 시간에 따른 표면처리와 액적간격에 따른 잉크의 양에 대해 알아보았다. 표면에너지가 낮은 조건에서는 잉크의 접촉각이 커서 잉크 액적이 라인을 형성하지 못하므로 비교대상에서 제외하였다. <그림 3>은 DGH-40LT-14C 잉크에 대한 결과이다. 극성 용매로 제작된 잉크로 표면 에너지의 변화에 따라 접촉각이 크게 변하여 라인 폭의 변화도 크다. UV/O₃ 처리를 4분 이상 해준 시점에서부터 라인을 형성하기 시작한다. 접촉각의 변화에 따라 액적의 퍼짐도 증가하기 때문에 동일한 25%의 겹침이 이루어진 (a)와 (b)에서는 UV/O₃ 처리 시간이 4분에서 6분으로 증가함에 따라 라인형성에 효과적임을 알 수 있다. 또한 UV/O₃ 4분 처리된 기판에 50%의 액적 겹침으로 라인 패턴을 형성할 경우 벌지 현상이 발생했던 (c)에 비해 UV/O₃ 처리 시간이 6분으로 증가하여 퍼짐이 증가한 (d)의 경우는 벌지 현상이 감소했음을 볼 수 있다. 이는 라인 폭의 증가로 라인을 형성하는 잉크의 높이가 줄어들어 안정적인 상태를 갖는 것으로 생각된다.



<그림 3> UV/O₃ 처리시간과 액적 간격에 따른 DGH-40LT-15C 잉크의 라인 패턴 변화: (a): UV/O₃ 4분/ 25% 액적 겹침; (b) UV/O₃ 6분/ 25% 액적 겹침; (c): UV/O₃ 4분/ 50% 액적 겹침; (d) UV/O₃ 6분/ 50% 액적 겹침

무극성 용매를 사용하여 UV/O₃ 처리시간의 증가에 따라 접촉각의 변화가 상대적으로 크지 않았던 DGH-55HTG 잉크도 4분의 UV/O₃ 처리 시간이 경과함에 따라 라인 패턴이 형성되기 시작했다. <그림 4>는 DGH-55HTG의 라인 패턴 형태를 보여준다. 접촉각이 크기 때문에 퍼짐성이 적어 액적들이 겹치기 시작하면서 곧바로 라인의 벌지 현상이 발생하였다[2]. 4분의 UV/O₃ 처리와 25%의 액적 겹침을 통해 형성된 라

인 패턴에서는 라인 시작점에서 잉크들이 묻쳐있음을 볼 수 있다. 잉크가 분사되어 라인을 형성하는 동안 앞쪽의 액적으로 잉크의 흐름이 발생하여 처음 부분에서 라인들이 묻치는 현상이 발생한 것으로 생각된다. 라인이 서로 붙는 현상은 작은 벌지 부분이 증가하여 인접한 라인에 닿았기 때문이다[3]. 시작점에서의 잉크 물림은 라인을 형성하는 잉크의 양을 줄여 벌지 현상의 발생을 줄이는 효과도 있었을 것으로 생각된다. 동일 UV/O₃ 처리 시간에 대하여 50% 겹침으로 라인을 인쇄한 (c)의 경우 잉크의 양이 많아짐에 따라 초기 잉크 물림은 작아졌지만 다른 부분에서 라인들이 서로 붙었으며 벌지 현상도 다수 발생하였다. UV/O₃ 처리 시간을 6분으로 증가한 (b)와 (d)의 경우 액적의 퍼짐에 큰 변화가 있진 않지만 약간의 증가로도 패턴의 변화는 발생하였다. 인접한 라인의 물림은 약간 줄어든 반면 다수의 벌지 현상이 발생하였다. 라인에서 잉크들이 작은 벌지를 발생하고 이 물림이 증가하여 인접한 라인간의 겹침을 형성하다고 생각했을 때 라인 폭의 증가는 DGP-40LT-15C 잉크의 경우와 마찬가지로 라인에서의 벌지를 줄이는 방향으로 작용한다. 그러나 표면 처리에 따라 접촉각의 변화가 적은 무극성 잉크의 경우에는 라인 폭의 증가가 거의 없으므로 큰 효과를 얻을 수 없었다.



<그림 4> UV/O₃ 처리시간과 액적 간격에 따른 DGP-55HTG 잉크의 라인 패턴의 변화: (a): UV/O₃ 4분/ 25% 액적 겹침; (b) UV/O₃ 6분/ 25% 액적 겹침; (c): UV/O₃ 4분/ 50% 액적 겹침; (d) UV/O₃ 6분/ 50% 액적 겹침

4. 결론

본 연구에서는 잉크젯 인쇄된 라인 패턴에서 발생할 수 있는 잉크의 물림과 이에 따른 라인들의 물림 발생에 대해 알아보았다. 기판의 표면에너지 변화는 잉크 액적과의 접촉각을 변화시켜 잉크의 퍼짐성을 변화시킬 수 있다. 잉크의 퍼짐성의 정도에 따라 라인 패턴에서 발생하는 벌지의 정도가 달라질 수 있다. 또한 무극성 용매를 사용한 잉크는 서로 다른 기판에서 라인 패턴의 폭이 비교적 일정하게 유지될 수 있으나 라인 폭이 작을 경우 라인에서의 벌지 현상이 발생하기 쉽다. 라인을 형성하는 잉크의 양을 줄이는 다른 한 가지 방법은 액적의 분사 간격을 조절하는 것이다. 라인 패턴의 인쇄 시 액적간의 겹침이 최소로 발생할 수 있도록 분사간격을 조절하는 것도 라인의 벌지 현상을 줄이는데 도움을 준다. 향후 연구에 있어서 잉크젯 인쇄 시 기판의 온도가 라인 패턴의 특성에 미치는 영향에 대해 진행될 예정이다.

5. 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 “Direct writing 기법을 이용한 미소 부품 제조기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] D. Soltman and V. Subramanian, “Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect”, *Langmuir*, 24, 2224-2231, 2008
 [2] Hartmut Gau, et al., “Liquid morphologies on structured surface: From microchannel to microchips”, *Science*, 283, 46, 1999
 [3] P. C. Duineveld, “The arability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate”, *Journal of fluid mechanics*, 477, 175-200, 2003