

미소 액적의 접촉각 및 건조 특성 측정 시스템 개발

Development of Measurement System for Contact Angle and Evaporation Characteristics of a Micro-droplet on a Substrate

권계시^{1,✉}, 안승현¹, 장민혁¹
Kye-Si Kwon^{1,✉}, Seung-Hyun An¹, and Min Hyuck Jang¹

¹ 순천향대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang Univ.)
✉ Corresponding author: kskwon@sch.ac.kr, Tel: +82-41-530-1670

Manuscript received: 2012.11.5 / Revised: 2012.11.24 / Accepted: 2012.12.10

We developed inkjet based measurement system for micro-droplet behavior on a substrate. By using the inkjet dispenser, a droplet, which is as small as few pico-liter in volume, can be jetted and the amount can be controlled. After jetting, the droplet image on the substrate is acquired from side view camera. Then, droplet profile is extracted to measure droplet volume, contact angle and evaporation characteristics. Also top view image of the droplet is acquired for better understanding of droplet shape. The previous contact angle measurement method has limitations since it mainly measures the ratio of height and contact diameter of droplet on a substrate. Unlike previous measurement system, our proposed method has advantages because various behavior of droplet on substrate can be effectively analyzed by extracting the droplet profile.

Key Words: Contact Angle (접촉각), Evaporation (증발), Inkjet (잉크젯), Image Analysis (이미지 분석), Measurement (측정)

1. 서론

잉크젯 기술이 발전함에 따라서 사무실용 프린터로부터 전자 인쇄 등 생산 및 제조의 도구로서 응용 범위가 넓어지고 있다.

잉크젯 기술을 제조 공정에 적용하기 위해서는 정밀한 스테이지 (stage), 잉크젯 헤드, 잉크 및 재료, 기판 (substrate)이 중요한 요소가 되고 있다.

특히 잉크젯 공정의 재료 및 소재 측면에서 중요한 이슈는 기판과 잉크와의 관계이다.

기판위에서 토출된 잉크가 어떤 거동을 보이는지 측정하고 평가를 할 수 있어야 기판 개발 및 잉크 개발을 효과적으로 할 수 있다. 또한 기판에 따라서 잉크가 흡수가 일부 되기도 하는데 이러한 특성을 명확하게 관찰하고 평가할 필요가 있다.^{1,2}

한편으로는 프린팅이 전자 인쇄에 응용하면서 종이에 인쇄하는 것과 달리 잉크가 거의 흡수가 되지 않는 기판을 사용하면서 건조 특성을 평가하는 것이 더욱 중요해졌다.

기존의 기판과 잉크의 관계를 측정하기 위한 장치로는 접촉각 측정 장치가 있다. 그러나 일반적으로 상용화된 접촉각 장치는 2 가지 문제가 있다. 첫 번째 문제로는 잉크젯 액적과 같은 아주 작은 양의 액적을 만들지 못할 뿐더러 액적 양을 제어하기가 힘들어 액적 양에 따른 평가가 불가능하다. 또한 접촉각 뿐만 아니라 건조과정에서의 프로파일, 기판으로의 잉크가 흡수가 되는 경우 평가, 기판의 표면의 거칠기가 균일 하지 않은 경우 등의 현상을 종합적으로 평가해야 하는데 그런 중요한 평가 등이 불가능 하다.

이러한 평가를 위하여 잉크젯을 이용하여 기관 위에 아주 작은 액적을 만들고 이를 시간에 따른 접촉각 측정과 건조 되고 있는 현상을 측정하기 위한 노력이 있었다.^{3,6}

기관위에서의 액적의 거동을 측정하기 위하여 고속 카메라를 사용하여 수십 마이크로 이내의 현상을 측정하는 방법과 CCD 카메라를 사용하여 수 초 이상의 장시간 동안 액적의 거동을 분석하는 방법이 있다.

본 연구에서는 주로 CCD 카메라를 사용하여 기관 위의 잉크의 젖음 특성 및 건조특성을 효과적으로 분석하고 평가할 수 있는 통합 시스템을 개발하는 것을 목표로 하였다. 개발한 시스템은 이러한 실험과 동시에 분석 결과를 사용자에게 보여주는 것이 가능하도록 자동화하였다. 또한 본 연구실에서 개발된 평가장치는 기존의 평가 장치와는 다음과 같은 차별성을 갖는다.

- 1) 기존의 접촉각 측정 방법은 주로 20 방법에 근거 하고 있는데 본 연구에서 제안하는 방법은 에지 검출에 의하여 액적의 프로파일을 추출하고 이를 통하여 접촉각을 검출한다. 이를 통해 액적의 건조과정에서의 형태도 측정이 가능하다.
- 2) 건조 과정의 분석을 위하여 기관위의 액적의 형상의 프로파일 좌표를 저장하였고 이를 추후에 분석할 수 있도록 하였다. 건조 특성의 이해를 돕기 위해 액적의 시간에 따른 프로파일은 3 차원 형태로 보여줄 수 있도록 하였다.
- 3) 측면에서 액적을 관찰하는 것 뿐만 아니라 상단에서 동시에 관찰 할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 퍼짐이 대칭이 아닌 경우에 이를 평가 할 수 있도록 하였다.
- 4) 잉크젯을 이용하여 액적의 토출 주파수 및 토출 방울수를 자동으로 조절하여 토출 과정중의 액적의 기관 위의 거동 현상과 토출 후의 건조과정을 동시에 측정할 수 있도록 하였다.
- 5) 기존의 디스펜싱 시스템 뿐만 아니라 다양한 제팅 방법, 잉크젯, 전기 수력학 잉크젯으로 형성된 액적을 측정할 수 있고 다양한 측정 알고리즘을 적용할 수 있는 확장성을 갖는다.
- 6) 스테이지를 이동함으로써 액적의 간격을 조절하여 실제 프린팅 중에 패턴 형성과정을 실시간으로 측정 할 수 있다.

- 7) 실시간으로 떨어진 액적의 체적도 측정할 수 있는 기능을 포함한다. 이를 통하여 시간 뿐만 아니라 액적의 양에 따른 접촉각의 변화를 측정하는 것이 가능하게 하였다.

본 시스템 개발을 통하여 실험의 효율성 및 최근 대두 되고 있는 전자 인쇄에서 필요로 하는 잉크 및 기관의 특성을 다양한 조건에서 효율적으로 평가하는 것이 가능할 것으로 기대한다.

2. 접촉각 측정 시스템 개발

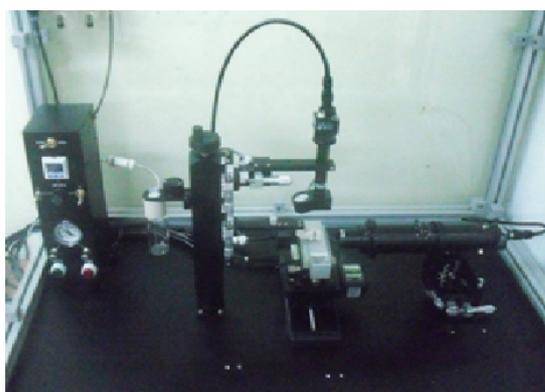
기존의 접촉각 측정 장치는 2 μ L 정도의 양을 디스펜싱하고 접촉각을 측정하기 때문에 전자 인쇄에 사용하는 pL 정도의 양이 토출 되었을 때의 현상을 측정하고 평가하기 어렵다. 접촉각등은 기관의 표면의 상태에 따라서 잉크의 양에 따른 다른 결과를 가져올 수 있다. 따라서 잉크젯 디스펜싱을 사용한 정밀한 잉크 액적의 크기 측정 및 원하는 양을 정확하게 디스펜싱 할 수 있는 것을 특징인 측정 장치를 Fig. 1 과 같이 개발하였다. 본 연구실에서는 토출 현상을 측정하기 위하여 평가장치를 개발하여 발표하였다.⁸ 기존의 잉크젯 토출 측정 장치와 본 연구에서 사용한 실험 장치의 차이점은 기관에서의 거동을 효과적으로 볼 수 있도록 2 축 스테이지를 구성하고 상단에서 액적을 관찰 할 수 있도록 카메라를 설치한 것이다.

토출을 위한 잉크젯 헤드로는 Microfab 의 단일 노즐인 MJ-AT-01-50 의 직경 50 μ m 의 노즐을 갖는 헤드를 사용하였다. 한편으로 보다 작은 액적을 위해서는 더 작은 직경의 노즐을 사용할 수 있다.

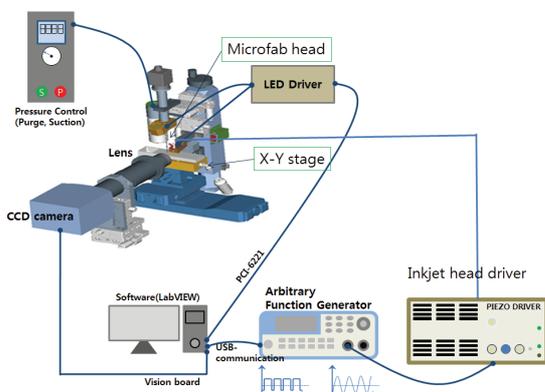
CCD 카메라로는 SONY XC ES 50 을 사용하였다. CCD 카메라로부터의 이미지를 획득하기 위하여 NI 사의 PCI-1405 를 사용하였다. 카메라는 측면과 상단에서 토출 액적의 위에서의 형상을 관찰할 수 있도록 2 개의 카메라를 사용하였다.

측면 측정을 위하여 Zoom Lens 인 MORITEX-ML-Z07545 (배율 0.75~4.5) 와 Lens adaptor 인 MORITEX-ML-Z20 (배율 2)을 사용하여 총 배율은 약 9 배까지 가능하도록 사용하였다. 한편으로는 상단에서 토출된 액적을 측정하기 위하여 MORITEX_MML6_ST65 (배율 6)의 렌즈를 사용하였다.

잉크젯 노즐에서는 일정 정도의 음의 압력이 걸려야 한다. 따라서 이를 위하여 잉크 공급부



(a) Photo of experimental setup



(b) Schematic of experimental setup

Fig. 1 Inkjet based Contact angle measurement system

(reservoir)의 높이를 이용하여 노즐의 압력을 제어하였다. 따라서 헤드 노즐의 높이에 비해서 잉크 공급부에서 잉크의 높이가 낮게 하여 약간의 음의 압력이 걸리도록 하였다. 또한 헤드의 베인터너스를 위하여 공기 압력으로 잉크를 밀어내는 퍼지 (purge)가 가능하게 하였다.

피에조헤드를 드라이브하기 위한 구성의 예는 기존의 출판된 논문을 참고 할 수 있다.⁸ 기존의 제팅 성능 측정 장치와 주로 달라지는 것은 잉크 액적이 기관에 떨어졌을 때를 측정하려고 하기 위한 하드웨어 부분과 이를 분석하기 위한 소프트웨어이다. 기관 위의 거동을 효과적으로 측정하기 위하여 기관 고정장치를 움직이기 위하여 x-y stage (SGSP, Sigma Koki, Japan)를 사용하였다. 사용된 스테이지의 구동 범위는 20 x 85 mm 이다. 또한 측면 카메라를 이동하기 위한 전동 stage 를 추가로 사용하여 측면과 동시에 상단에서 측정이 가능하도록 하였다.



(a) 1 drop (b) 20 drops

Fig. 2 Drop volume effect

3. 소프트웨어 개발

잉크젯 헤드를 사용하면 전압의 크기 또는 모양을 변경하면 잉크 액적의 크기를 미세하게 조절이 가능하고 또한 잉크 액적의 방울 수를 조절하면 액적의 크기를 원하는대로 조절할 수 있다. 잉크를 20 방울과 1 방울 토출 하였을 때의 접촉각 측정 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 잉크의 양에 따라서 접촉각 특성이 바뀔 수 있음을 알 수 있다. 이러한 접촉각 현상은 주로 기관의 표면 특성 및 잉크의 흡습 가능성 여부에 따라서 영향을 받을 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 2 와 같은 잉크의 액적의 양에 따른 기관위의 다른 현상을 정확히 측정하기 위해서는 기관위의 액적의 양을 실시간으로 측정하였다. 또한 건조과정을 측정 할 수 있도록 시간에 따른 액적의 양과 접촉각을 측정하였다.

3.1 이미지 측정 방법

3.1.1 접촉각 계산 알고리즘

접촉각을 측정하기 위한 기존의 방법은 액적의 퍼짐과 높이를 이용하여 접촉각을 구하는 2θ 방법에 근거하였다. 기존의 방법은 2θ 방법을 사용하여 다음과 같이 접촉각을 구한다. $\theta = \tan^{-1}(H/L)$ 에서 θ 를 구한 후에 2 배를 곱해준 값이 접촉각이 된다. 여기서 H 는 액적의 높이이고, L 은 접촉 반경 (contact radius)이다.⁷

그러나 건조 과정에서 고형분 (solid content)이 있는 경우에는 2θ 방법으로 측정하는 것이 부정확할 수 있다. 또한, 기관에서의 흡습 (absorption)또는 기관의 거칠기의 효과를 분석하려면 기존의 방법으로 측정하는 것은 한계를 지닌다.

본 방법에서는 기존의 2θ 방법이 아닌 에지 검출을 이용한 기관위의 잉크 프로파일 (형상) 측정 방법을 이용하였다. 에지 검출 방법은 관심 영역을 직선으로 하여 이미지 값의 급격한 변화를 찾는 것이다. 이를 잉크젯의 토출 특성을 측정하기 위하여 사용되기도 하였다.⁹

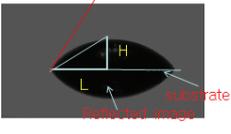
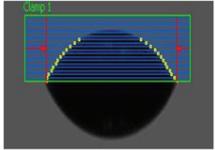
Previous method	Proposed method
 <p>2θ (contact angle)</p> <p>- 2θ method</p>	 <p>- profile and shape measurement - contact angle</p>
Binary image analysis	Edge detection technique

Fig. 3 Edge detection techniques

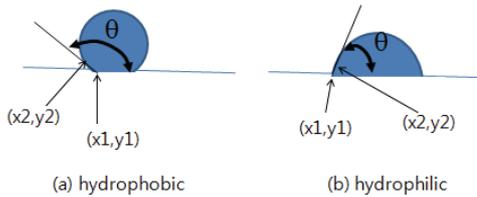


Fig. 4 Contact angle calculation

기관위의 잉크 프로파일을 측정하기 위하여 수평방향의 다수의 직선 관심영역을 설정한다. 직선 관심영역을 통하여 수평 방향으로 검출된 에지의 위치를 이용하면 액적의 형상을 좌표 형태로 얻을 수 있다. 자세한 알고리즘은 본저자의 최근 저서에서 참고할 수 있다.¹⁰ 액적의 형상을 얻으면 검출된 에지들의 좌표로부터 접촉각을 계산하여 얻을 수 있다.

Fig. 3 는 기존의 상용화된 접촉각 측정방법과 본 방법으로 제안된 방법의 기술적인 차별성을 보여주는 그림이다.

Fig. 3 과 같이 측정된 edge 의 좌표 중에서 기관에 가까운 두 점 또는 여러 점을 이용하여 Fig. 4 와 같이 접촉각을 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}((y2-y1)/(x2-x1)) \quad (1)$$

접촉각은 Fig. 4 와 같이 기관과 액적의 접촉점 부근의 두 점을 이용하여 식 (1)과 같이 기울기를 통하여 구한다. 한편으로는 보다 신뢰성이 높은 결과를 얻기 위해서 액적과 기관의 접촉 부분의 여러 점의 위치를 이용한 커브 피팅을 통해 기울기를 구하고 이를 통해서 접촉각을 구할 수도 있다. 본 방법은 Fig. 4 와 같이 친수성 및 소수성의 접촉각을 모두 효과적으로 계산 할 수 있다.

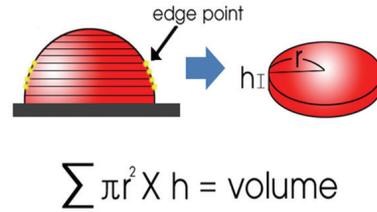


Fig. 5 Volume measurement using edge detection

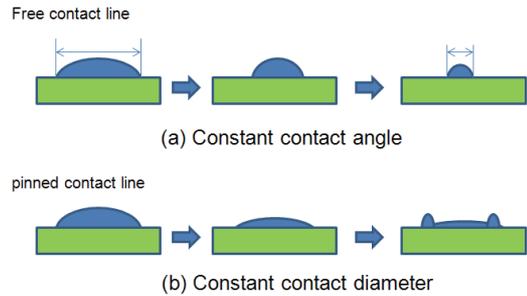


Fig. 6 Contact angle behavior during evaporation

본 방법에서 제안하는 프로파일 측정 방법을 사용하면 접촉각을 구하는 것 이외에도 기존의 방법과 다른 다음과 같은 장점이 있다.

3.1.2 액적의 체적 계산

기존에는 토출되는 잉크 체적을 구하기 위해서는 3 차원 이미지를 구로 가정하여 평면에서 구한 액적의 크기를 사용하여 체적을 계산하였다.⁸ 그러나 실제 기관위의 잉크의 체적은 바로 계산하기가 어렵다. 본 연구에서는 Fig. 3 와 같은 수평방향의 다수의 직선 관심영역에서 검출된 에지를 이용하여 근사적으로 잉크 프로파일의 좌표를 구하고 이를 이용하여 Fig. 5 와 같이 미소 원기둥 요소의 체적의 합으로 기관 위의 액적의 체적을 실시간으로 구하였다. 자세한 알고리즘 구현 방법은 참고서적에서 참고 할 수 있다.¹⁰

3.1.3 건조 과정 측정

잉크에 따라서 다른 건조 특성이 있기 때문에 이를 시간에 따라서 측정 하고 평가하는 것은 중요하다.

건조 과정은 Fig. 6 와 같이 기관과 잉크의 특성에 따라서 “1) 일정한 접촉각, 2) 일정한 접촉 반경”의 2 가지로 구분될 수 있으나 두 가지 건조 특성이 모두 관찰 되는 경우도 많다.

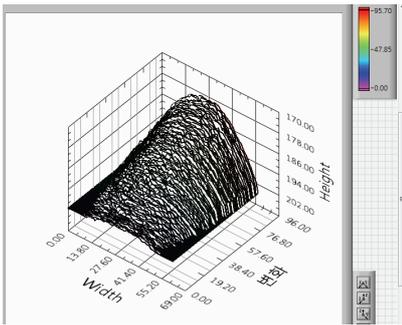


Fig. 7 3-D image of evaporation process



Fig. 8 Top and side view

본 연구에서는 건조 과정의 효과적인 이해를 위하여 시간에 따른 프로파일을 저장하고 이를 Fig. 7 과 같이 3 차원 형상으로 보여줄 수 있도록 소프트웨어를 구성하였다.¹¹ 또한 측정 프로파일을 사용하여 다양한 현상을 측정 및 분석 할 수 있고 저장된 데이터를 사용하여 후처리가 가능하다.

본 방법은 주로 측면에서 측정하는 방법이므로 Fig. 6(a)와 같은 건조 특성을 측정하기에 유리한 방법이다. 그러나 Fig. 6(b)와 같은 거동을 측정하게 되면 프로파일의 결과가 실제 현상을 설명하기에 부족할 수 있다. 이를 보완적으로 측정하기 위하여 측면의 이미지와 상단부의 이미지를 동시에 측정 할 수 있도록 하였다. 토출 현상을 보기 위해서는 측면 카메라가 노즐의 위치에 있어야 한다. 그러나 상단부의 카메라와 동시에 액적의 측면 형상을 관찰하려면 토출된 액적을 상단 카메라의 위치로 이동시키고 동시에 측면 카메라의 위치도 액

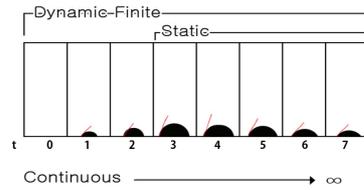


Fig. 9 Finite droplet jetting

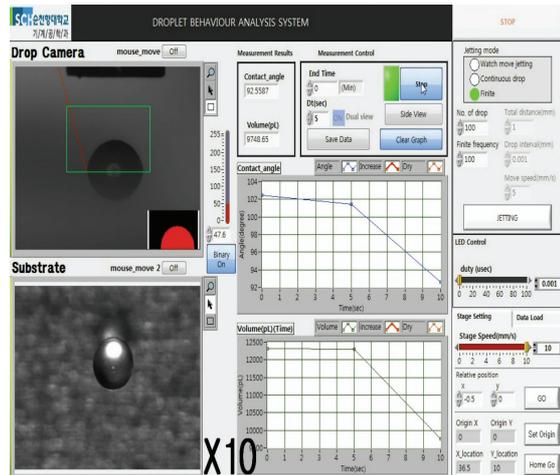


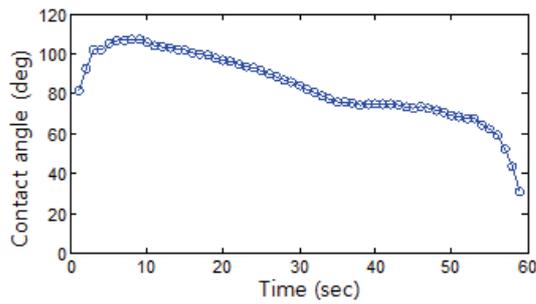
Fig. 10 Measurement of dynamic contact angle

적의 위치로 이동시켜야 한다. 이를 위하여 측면 카메라에도 전동 스테이지를 설치하였다. 이를 통하여 Fig. 8 과 같이 동시에 상단과 측면의 이미지를 측정하고 분석할 수 있었다. 보다 자세한 분석 방법은 온라인의 동영상상을 참고 할 수 있다.¹¹

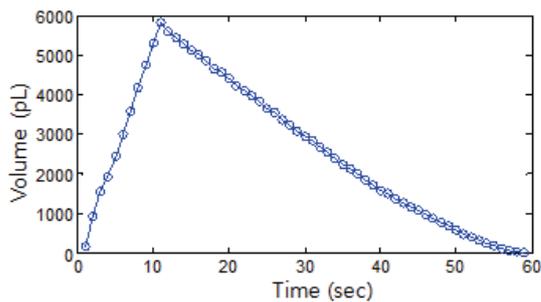
3.2 액적의 동특성 평가

디스플레이 제조등에 잉크젯이 적용이 되고 있다. 이러한 경우 잉크젯의 여러 방울이 매우 가까운 위치에 토출이 되는 경우가 많다. 특히 칼라 필터 제조등과 같이 격벽 (Black matrix)이 있는 곳에 토출시에는 빠른 시간에 거의 동일한 위치에 몇 개의 방울이 토출되기도 한다. 이와 같은 액적의 거동을 평가하기 위하여 방울수와 토출 주파수를 사용자가 입력하면 Fig. 9 와 같이 자동으로 해당 방울수만 토출이 되도록 소프트웨어를 구성하였다. 이러한 토출 과정을 측정하고 그 이후의 건조과정까지 측정 할 수 있도록 소프트웨어를 구성하였다.

Fig. 10 은 액적거동의 동특성을 평가하기 위하여 개발된 소프트웨어를 캡춰한 그림이다.⁹ Fig. 10 에서 알 수 있듯이 제팅 과정중의 접촉각 현상 및



(a) Dynamic contact angle



(b) Droplet Volume during and after jetting

Fig. 11 Droplet behavior on glass substrate

증발에 의한 체적의 변화를 실시간으로 측정이 가능하였다.

개발된 시스템의 이해를 돕기 위하여 Fig. 11 은 10 초 동안 10 Hz 로 토출을 시키는 과정과 그 이후의 기판 위에서 잉크의 접촉각 현상과 증발하면서 실시간으로 측정된 체적을 구하는 과정중에 소프트웨어를 캡처한 그림이다.¹¹ 토출을 위한 액체로는 초순수를 사용하였고 기판으로는 발수 코팅을 한 유리를 사용하였다. 측정 결과로서 Fig. 11 과 같이 증발 과정과 토출 과정에서 다른 접촉각 및 체적을 구하는 것이 가능하였다. Fig. 11(a)에서 알 수 있듯이 토출 과정중에는 접촉각이 점차로 증가하다가 토출이 중단되고 부터는 접촉각이 감소하기 시작하였다. 접촉각이 감소하는 것은 완벽하게 Fig. 6(a)의 일정 접촉각의 거동과 함께 어느 정도 액적 끝부분의 일정 접촉 반경의 거동이 일어나고 있는 것을 의미한다. 반면에 35 초부터 50 초 사이에는 Fig. 6(a)의 일정 접촉각 현상이 일어나면서 건조가 되고 있다. 건조 마지막 부분에서는 다시 Fig. 6(b)의 일정 접촉 반경의 거동이 지배적임을 알 수 있다.

3.3 미세 선 패턴 평가

기판위에 균일한 잉크젯을 사용하여 미세 선



Fig. 12 Evaluation for fine line patterning

패턴을 그리는 것은 기판과 잉크 액적에 따라서 어려운 과제가 될 수 있다. 예를 접촉각이 크면 쉽게 선이 끊어지고 접촉각이 작으면 선폭이 굵어질 수 있다. 이러한 현상을 보다 효과적으로 평가하기 위하여 Fig. 12 와 같이 스테이지를 움직이면서 토출된 액적간의 패턴 형성과정을 측정하는 것을 평가할 수 있도록 하였다.¹¹ 스테이지 속도 및 토출 간격등을 조절할 수 있도록 하였고 이를 통하여 프린팅 조건등을 최적화하는 것이 가능하다.

3.4 저장 및 분석

실험할 때의 모든 이미지는 날짜 별로 저장된다. 저장된 이미지는 추후에 재생 기능을 통해 마치 실시간으로 분석이 되는 것처럼 보여줄 수도 있도록 하였다. 본 방법은 일반 CCD 카메라를 사용한 방법에 대하여 주로 다루었다. 따라서 이미지 획득시간과 이미지 분석시간을 고려한다면 실시간으로 보여줄 수 있는 결과는 1 초에 20-30 프레임 정도이다. 한편으로는 CCD 카메라를 고속 카메라로 교체 하면 고속 현상도 측정하고 분석할 수 있다. 그러나 이 때에도 실시간 이미지 분석이 아닌 고속 카메라에서 획득된 이미지를 컴퓨터로 저장하고 이를 후처리 해야 하기 때문에 실제 프린팅 시스템에 적용하여 고속으로 프린팅되는 현상을 실시간으로 측정 및 분석하는 것은 불가능한 한계를 지닌다.

4. 결론

기관위의 잉크의 거동을 측정하기 위하여 접촉각 측정 및 건조 특성을 측정 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 시스템은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 잉크젯을 이용하여 토출되는 액적의 양을 제어 가능하도록 시스템을 구성하였다. 액적의 양을 제어하는 방법으로는 파형을 이용하여 수 pL 이하의 양을 제어하거나 액적의 방울 수를 이용하여 수십 pL 이상의 토출량을 제어할 수 있다.
- 2) 에지 검출을 사용하여 기관위의 액적을 체적을 실시간으로 측정하였다.
- 3) 에지 검출을 이용하여 잉크의 옆 모양의 형상을 건조과정에 대해서 측정이 가능할 뿐더러 기관 위에서도 잉크의 퍼짐 형상을 관찰할 수 있는 시스템을 구성하였다.
- 4) 잉크 액적사이의 간격을 조절하면 실제 프린팅 현상을 실시간 관찰 및 분석이 가능한 기능을 추가 하였다.
- 5) 모든 이미지를 정해진 시간에 저장하여 추후에 실시간 실험하는 것처럼 분석할 수 있는 시스템을 구성하였다.

다양한 기관 및 잉크에 대한 현상 측정 및 기관의 온도에 따른 증발 특성 측정에 대한 연구를 진행중이다.

후 기

이 논문은 2012 학년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음.

참고문헌

1. Chandra, S., Marzo, M. D., Qiao, Y. M., and Tartarini, P., "Effect of liquid-solid contact angle on droplet evaporation," *Fire Safety Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 141-158, 1996.
2. Deagan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R., and Witten, T. A., "Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops," *Nature*, Vol. 389, pp. 827-829, 1997.
3. Lim, T., Han, S., Jung, J., Chung, J. T., Ko, S., and

Grigoropoulos, C. P., "Experimental study on spreading and evaporation of inkjet printed pico-liter droplet on a heated substrate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 431-441, 2009.

4. Son, Y., Kim, C., Yang, D. H., and Ahn, D. J., "Spreading of an inkjet droplet on a solid surface with a controlled contact angle at low weber and Reynolds numbers," *Langmuir*, Vol. 24, pp. 2900-2907, 2008.
5. Ikegawa, M. and Azuma, H., "Droplet behaviors on substrates in thin-film formation using ink-jet printing," *JSME International Journal - Series B*, Vol. 47, No. 3, pp. 490-496, 2004.
6. Lok, B. K., "Transient contact angle of evaporating inkjet droplet on transparent polymer substrate," *SIMTech Technical Reports*, Vol. 11, No. 3, pp. 166-171, 2010.
7. Yang, M.-W. and Lin, S.-Y., "A method for correcting the contact angle from the $\theta/2$ method," *Colloids and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 220, pp. 199-210, 2003.
8. Kwon, K. S., "Development of a test stand for measuring ink jetting performance," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 25, No. 8, pp. 45-50, 2008.
9. Kwon, K. S., "Speed measurement of ink droplet by using edge detection techniques," *Measurement*, Vol. 42, No. 1, pp. 45-50, 2009.
10. Kwon, K. S., "LabVIEW Machine Vision," *Adbooks*, 2012.
11. Kwon, K. S., "Contact angle measurement," <http://youtu.be/W4s3XuAdHdw>