

CCD 카메라를 사용한 전기수력학적 잉크젯 토출 현상 가시화

Visualization of Electro-hydrodynamic Ink Jetting using CCD Camera

권계시^{1,✉}, 이대용¹
Kye-Si Kwon^{1,✉} and Dae-Yong Lee¹

¹ 순천향대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang Univ.)
✉ Corresponding author: kskwon@sch.ac.kr, Tel: 041-530-1670

Manuscript received: 2011.4.20 / Revised: 2011.9.18,10.14 / Accepted: 2011.11.12

The method for spraying of liquids through an electrical field has become a printing method since it can make very small droplet. For electro-hydrodynamic jet printing to become a reliable jetting tool, the jetting performance should be characterized with respect to various jetting conditions. To optimize jetting conditions, the jetting behavior should be measured. In this study, we present a visualization techniques to measure jetting behavior from electro-hydrodynamic (EHD) inkjet head. Unlike most previous method, we use the CCD camera to measure the jetting behavior. For this purpose, LED light is synchronized with jetting signal and sequential image was obtained by adjusting the delay time of the LED light. Finally, merits and demerits of using CCD camera were discussed to measure jetting image from EHD inkjet head.

Key Words: EHD Inkjet Printing (전기수력학 잉크젯 프린팅), Strobe LED (스트로브 LED), Jetting Visualization (제팅 가시화)

1. 서론

전기수력학적 잉크젯(EHD) 프린팅 시스템은 기존의 피에조 잉크젯 프린트 헤드와는 달리 잉크에 주입된 전하에 의해 유발되는 정전기적 상호인력을 바탕으로 기판 상에 패터를 행하는 장치이다. 기존의 잉크젯 프린팅 장비와 마찬가지로 정확한 위치에 정확한 토출량을 토출 시킴으로써 재료의 낭비를 최소화하는 장점이 있다. 정전기력 잉크젯 기술이란 정전기를 이용함으로써 기존의 피에조 잉크젯 방식에 비해서 고점도 및 미세 선폭의 패터닝이 가능하다는 장점이 있다. 또한 노즐 막힘 현상이 적기 때문에 공정 안정성이 높아 새로운 차세대 인쇄 기술로 평가 되고 있다. 이러한 장점으로 인해 RFID, 태양전지의 공정기술, 유연 기판을 갖는 전자 소자의 제조 공정 기술 등의

다양한 인쇄 전자 산업으로의 응용 가능성이 기대되고 있다.

전기수력학 분무(Electrohydrodynamic(EHD) spraying 또는 electrospray) 기술은 Zeleny¹ 와 Taylor² 의 선구자적인 연구 이후로부터 시작되었다. 최근에는 이를 프린팅 기술 분야에 적용하는 연구가 수행되고 있다.³⁻⁵ 전기 수력학에 의한 액적 분사의 형태는 인가전압 및 액체의 특성에 따라 달라진다.⁶ 현재까지 대부분의 연구는 cone-jet mode 에 대한 연구가 가장 많이 진행되어 왔다.

실제로 전기수력학 잉크젯이 제조 공정에 응용하려면 토출 특성이 측정 되어야 한다. 이를 위하여 카메라를 사용하여 토출 이미지를 측정하고 분석을 통하여 인가되는 전압과의 토출 성능의 관계를 정량화하여 토출 조건을 최적화해야 한다.

전기수력학 잉크젯에서는 주로 직류(DC)의 고

전압을 이용하여 액적을 토출시킨다.³ 따라서 EHD 헤드로부터 토출되는 액적의 토출 시점 및 주파수를 정확하게 제어하기 어렵다. 최근 직류의 전압이 아닌 교류(AC)전압의 모양 및 크기를 변형하여 원하는 토출 성능을 얻으려는 연구가 진행이 되고 있다.⁵ 직류와 교류를 동시에 갖는(DC+AC) 전압을 사용한 최적화된 제팅 조건을 찾기 위하여 여러 가지 잉크 및 제팅 조건에 대한 실험 데이터와 분석이 필요하다. 따라서 제팅 제어 및 최적조건을 찾기 위한 알고리즘을 완성하기 위하여는 제팅의 이미지를 정확히 측정하고 분석하는 것이 필요하다. 이를 위하여 고속 카메라 등을 사용하여 측정하는 방법을 일반적으로 사용하여 왔다.⁷ 고속 카메라를 사용하면 액적과 액적 사이의 편차 등을 분석하고 토출 현상의 변화를 정확하게 측정하는 것이 가능하다. 그러나, 일반적으로 긴 시간 동안 측정하려면 많은 수의 이미지가 있어서 이미지를 분석하려면 추가적인 노력이 필요하고, 이미지를 고속 카메라의 메모리에 저장된 것을 실험 후에 PC 로 전송이 되는데 시간이 걸리기 때문에 실시간으로 제팅 현상을 분석하는데 문제가 있다.

기존의 피에조 또는 버블젯 잉크젯의 제팅 현상을 실시간으로 측정 및 분석하기 위하여 CCD 카메라를 이용한 스트로브 측정 방법이 많이 사용되고 있다.⁸ 그러나 전기수력학 제팅 분석을 위하여 strobe 측정 장치는 아직 까지 널리 사용되고 있지 않다. 한편으로 조명(LED)과 이미지 획득 보드를 동기화 시키는 방법으로 EHD 제팅 이미지를 CCD 카메라로 얻는 방법이 사용되었다.^{9,10} 그러나 기존의 방법은 DC 전압을 사용한 토출 현상을 측정하였기 때문에 인가 전압의 펄스와 동기화된 결과와는 아니다. 따라서 기존의 방법으로 토출을 위하여 AC 전압 인가시 토출 전압을 인가한 후의 토출 현상을 측정 및 분석을 하는 것은 토출 신호와 동기화를 하지 않았기 때문에 불가능하다. 또한 기존의 방법은 토출 현상이 측정시 발생하는 1 회의 현상이므로 평균적인 현상을 평가하기 어려운 단점이 있다.

본 방법은 직류와 교류를 가지고 있는 (DC+AC)전압 구동시 제팅 현상을 strobe 를 사용하여 실시간 분석이 가능한 하드웨어 및 소프트웨어를 개발하였다. 제팅 시점으로부터 정확한 시점의 토출 현상을 측정하는 것이 가능하였고, 토출되는 이미지를 관찰함으로써 토출 현상이 안정적인지의 여부를 평가할 수 있는 장점을 가진다. 특정한 시

간의 현상을 정지화면을 얻을 수 있고 실시간으로 분석이 가능한 장점이 있다. 또한 저가의 CCD 카메라로 측정하기 때문에 실험장치 가격을 기존의 고속 카메라에 비해서 현저히 낮출 수 있는 장점이 있다. 반면에 토출이 반복되지 않을 때는 이미지가 흐릿하게 되는 (Blur) 현상이 발생하게 될 수 있으므로 본 방법을 사용하여 토출 이미지를 효과적으로 관찰하기 위해서는 토출의 안정화가 필요하다.

2. 실험장치 개발

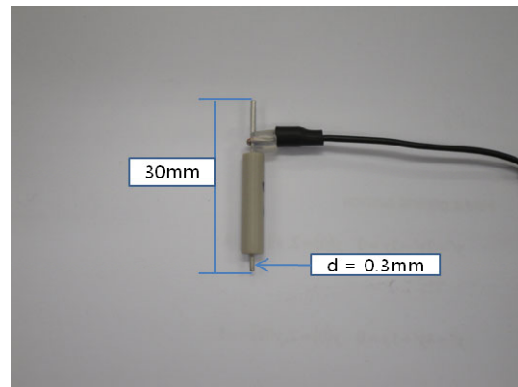


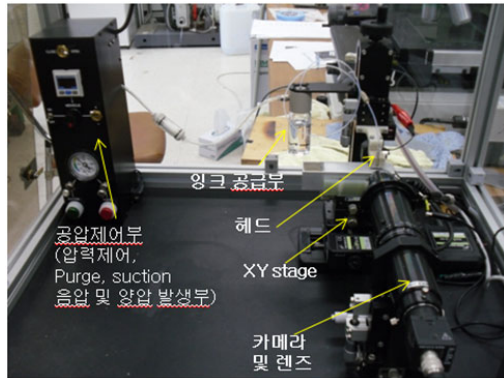
Fig. 1 EHD head

전기 수력학을 이용한 프린팅을 위한 헤드를 Fig. 1 과 같이 제작하였다. 헤드 제작을 위하여 내경 0.3mm 의 스테인레스 주사기 바늘을 노즐로 사용하였다.

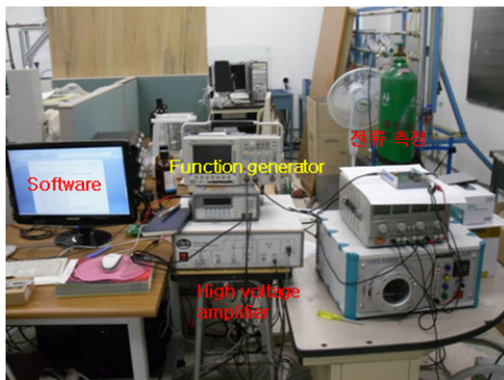
Fig. 1 과 같은 헤드를 이용하여 미소 액적을 만들고 이때의 제팅 이미지를 측정하기 위하여 Fig. 2 와 Fig. 3 과 같은 장치를 구성하였다. 이미지 획득을 위한 CCD 카메라는 640x480 의 해상도를 갖는 SONY XC ES 50 을 사용하였다. Zoom lens 로는 MORITEX-ML-Z07545 와 lens adaptor 인 MORITEX-ML-Z20 을 사용하였다. 이미지 획득을 위한 이미지 보드로는 NI 사의 PCI-1405 를 사용하였다. LED 제어를 위한 pulse 는 PCI-6221 의 counter 를 사용하여 발생시켰다.

EHD 잉크젯을 위하여는 잉크젯 노즐로부터 잉크가 돌출되어 있는 부분인 메니스커스 형상을 Fig. 4 와 같이 제어를 해야 된다. 이를 위하여 공압 모듈을 개발하여 헤드에서 약간의 양압이 걸릴 수 있도록 하였다. 메니스커스 형상을 제어한 후에는 고전압을 헤드 또는 기관에 인가하여 미소

액적을 만들어야 한다. 다양한 형태의 전압을 헤드 또는 기관에 인가하기 위하여 임의 파형 발생기(Arbitrary function generator)인 Agilent 33220A 를 사용하였고, USB 를 이용하여 컴퓨터와 통신을 통하여 원하는 파형을 생성하였다.



(a) Vision measurement



(b) System integration

Fig. 2 Photo of EHD jetting system

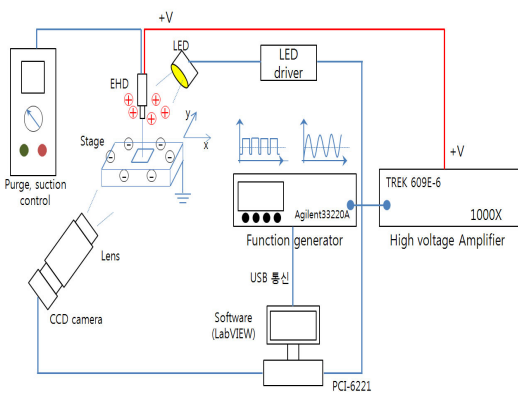


Fig. 3 Schematic of EHD jetting system

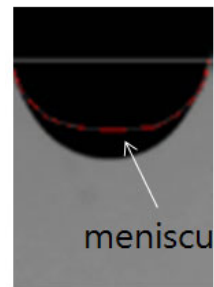


Fig. 4 Meniscus control

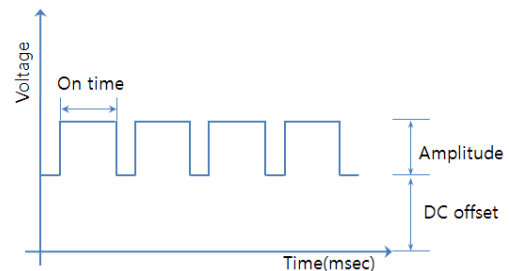


Fig. 5 Typical driving voltage for EHD

전압의 형상으로는 Fig. 5 와 같은 직류와 교류를 가지고 있는 전압의 형태를 사용하였다. DC 전압은 메니스커스를 용이하게 형성시키는데 목적이 있다. 이 때 직류(DC) 오프셋을 가지고 있는 교류(AC)전압을 인가시켰을 때 토출이 되도록 교류(AC)전압의 크기 및 구동 전압의 시간(on time)을 조정하였다. Fig. 5 와 같은 형태의 전압을 생성시키기 위하여 임의 파형의 데이터를 LabVIEW 를 통하여 만들고 이를 임의 파형 발생기(Agilent 33220A)에 다운로드 시켰다. 임의 파형 발생기에 저장된 전압 파형은 외부 트리거를 임의파형 발생기에 입력시킬 때 마다 발생한다. 외부 트리거 발생은 다기능 데이터 획득 보드(DAQ)인 NI(National instrument)사의 PCI-6221 의 카운터를 이용하여 일정 주파수의 토출 트리거를 만들어서 발생시켰다.

임의 파형 발생기로부터 생성된 파형은 고전압 증폭기인 TREK 609E-6 을 통해 1000 배 증폭이 되어 헤드에 전압을 인가하였다. CCD 카메라를 이용하여 고속 현상을 측정하기 위하여는 조명이 중요하다. 이를 위하여 조명으로는 LED 를 사용하였고 LED 의 점등은 토출을 위한 인가 전압과 정확하게 동기화 시켰다. 이를 위하여 Fig. 6 과 같이 카운터를 이용하여 토출 카운터의 신호(counter 0)를 트리

거로 이용하여 AC 전압을 발생시키고 동시에 LED 점등을 위한 디지털 펄스(counter 1)의 트리거로 사용하였다. 이때 LED 점등의 밝기는 LED 점등을 위한 트리거의 duty 를 설정하여 제어하였다. 또한 토출 시점으로부터 경과된 시간의 토출 현상을 관찰하기 위하여 LED 제어를 위한 신호에 트리거 지연을 설정하여 토출 시점으로 지정된 시간의 현상을 측정하였다.

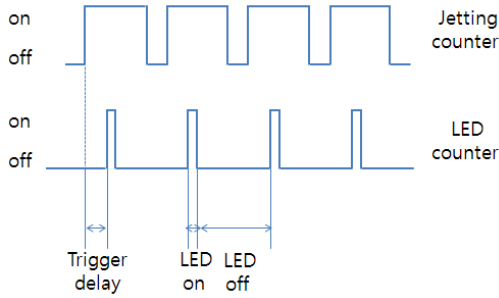


Fig. 6 Strobe LED light control

3. 소프트웨어 개발

3.1 스트로브를 이용한 이미지 측정

제팅을 위한 액체로는 1:1 의 부피 비율로 글리세린과 초순수(DI water)를 혼합하여 사용하였다. 또한 토출을 위해서는 교류 구동 전압의 구동 전압 시간(on time)이 중요하다. 본 실험에서는 구동 전압의 시간을 2.5ms 로 하였다. 또한 교류 전압 인가 시점으로 부터 언제 토출이 되는지가 중요한 측정 항목이 된다. 따라서 이를 측정하기 위하여 토출 신호로부터 LED 를 점등시키기 위한 트리거 지연 시간을 변화시키고 이미지를 획득하였다.

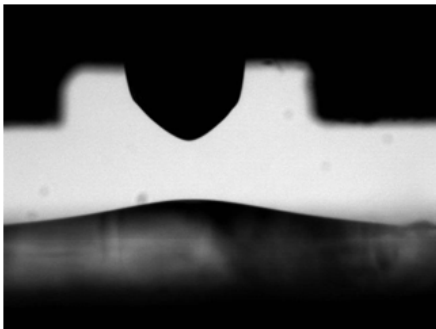


Fig. 7 Visualization of image at 1.5ms (non-jetting)

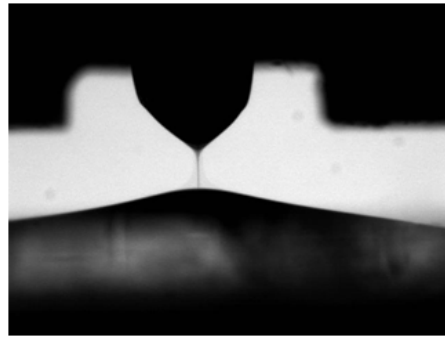


Fig. 8 Visualization of image at 2ms (jetting)

Fig. 7 과 Fig. 8 은 LED 점등을 위한 트리거 지연을 1.5ms 와 2 ms 로 한 경우에 얻은 이미지를 보여준다. Fig. 7 과 Fig. 8 에서 알 수 있듯이 CCD 카메라를 이용하는 경우에도 LED 의 점등을 제어하여 토출 현상을 가시화하는 것이 가능하였다. 특히 Fig. 8 과 같이 짧은 시간 동안의 토출 현상을 측정하는 것이 가능하였다.

그러나 토출 현상이 교류 입력 전압으로부터 반복되지 않으면 반복되지 않은 이미지가 잔상으로 보이게 된다. 이것은 스트로브로 측정할 때 보이는 이미지는 순간적인 현상이라기 보다는 LED 조명이 켜질 때의 여러 현상이 겹쳐진 평균적인 이미지이기 때문이다. 따라서 스트로브를 이용한 측정은 토출 현상이 토출 트리거로부터 반복될 때의 현상을 측정하기에 유리한 방법이 된다.

전기수력학 잉크젯의 가장 큰 단점은 기존의 피에조 잉크젯 헤드에 비해 토출 현상이 정확하게 반복이 되도록 만드는 것이 상대적으로 어렵다는 것이다. 토출 현상이 토출 신호로부터 정확하게 반복되는 것은 프린팅 시 중요한 평가 항목이다. 만약 토출 신호로부터 토출 현상이 반복되지 않는다면 프린팅 시 패턴 정밀도에 악영향을 끼치게 된다. 특히 토출 신호로부터 정확한 시점에 토출이 발생하는 것은 정밀한 패턴 프린팅을 가능하게 하는 중요한 요구 조건이다.

한편으로는 본 측정 방법을 사용하게 되면 토출 반복성을 평가할 수 있다. 토출 현상이 반복되지 않을 때는 잔상 이미지가 남게 되어 토출 현상의 반복 여부를 평가하는 데에도 중요한 정보를 주게 된다.

토출 현상을 시간에 따라서 이해하려면 시간에 따른 토출 현상을 측정 및 분석해야 된다. 이를 위하여 LED 를 위한 트리거 지연을 순차적으로

Fig. 9 와 같이 연속적으로 발생시키면 연속 토출 이미지를 획득하는 것이 가능하다.

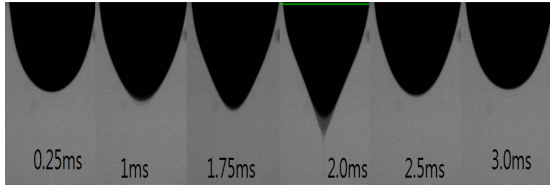


Fig. 9 Sequential image of jetting

Fig. 9 에서 알 수 있듯이 LED 의 조명을 위한 트리거 지연 시간을 조절하면 토출 현상을 실시간으로 관찰하고 분석하는 것이 가능하다. Fig. 9 에서 토출 시점시점부터 2ms 경과 된 시점인 경우 토출 끝부분에서 약간의 이미지에서 잔상 이미지를 볼 수 있다. 이는 토출이 정확하게 2ms 에서 반복되지는 않고 액적에 따라 약간의 변화가 존재하기 때문이다. 평균적으로는 약 2ms 부분에서 토출이 됨을 알 수 있다. 토출 현상의 반복성이 적어서 잔상이 생기는 이유는 CCD 카메라는 약 30 fps (frame per second)를 가지고 있고 실험을 위한 토출 주파수는 약 200Hz 로 설정하였으므로 실질적으로 측정되는 현상은 약 6-7 회의 현상이 겹쳐져서 나오게 된다.

3.2 이미지 프로세싱을 통한 토출 현상 분석

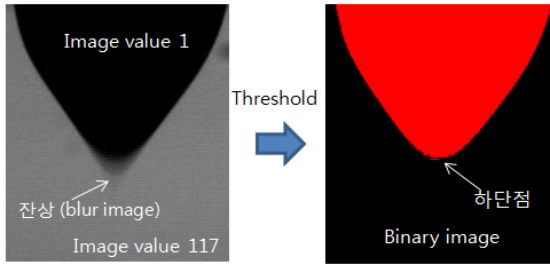


Fig. 10 Binary image conversion

gray 이미지는 이미지의 밝기에 따라서 0-255 의 값을 갖는다. Fig. 10 에서 메니스커스의 이미지 값은 약 1 이고 밝은 부분(배경)은 117 정도가 된다. 액적이 토출되는 위치를 알기 위해서는 메니스커스의 이미지와 배경의 이미지를 분리해 내는 것이 필요하다. 이를 위하여 이미지에서 문턱값을 1 과 117 의 사이값인 70 으로 설정하여 70 보

다 작은 이미지는 “1”로 큰 이미지는 “0”으로 하였다. 이와 같이 문턱값을 이용하여 메니스커스와 배경은 분리하는 것이 가능하고, 이를 통해 Fig. 10 과 같이 메니스커스의 최하단점 구하는 것이 가능하다.

이미지 프로세싱 방법을 사용하여 잔상 부분을 포함할 수도 있고 제외하여 분석할 수도 있다. 예를 들면 측정된 이미지에서 잔상 부분은 배경의 이미지보다는 어둡고, 일정하게 반복되는 토출 현상에 대한 이미지 부분보다는 밝다. 따라서 문턱값을 적절하게 선정하면 토출 현상을 분석할 때 잔상 부분을 포함할 수도 있고 제외 할 수도 있다. 이미지에서 잔상은 토출 현상의 반복성과 밀접한 관련이 있다. 따라서 잔상이 있을 때 토출 반복성을 제대로 평가하려면 고속 카메라의 이미지 등과 비교를 통한 통계적인 방법 등의 추후의 연구 과제로 진행할 예정이다.

이미지에서 메니스커스의 최하단점을 LED 를 위한 트리거 지연 시간에 따라 구하면 토출 시점을 평가하는 것이 가능하다. 토출 시점을 평가하는 것은 토출을 위한 전압을 최적화하기에 중요하다. 예를 들면 토출 시점의 평가로부터 토출을 위한 인가전압의 최소 on 시간을 결정하는 것이 가능하다.

Fig. 11 은 실제 토출 측정을 위하여 900V 의 직류 오프셋(DC offset)을 가지고 2.5ms 의 on 을 갖는 4kV 의 구형파를 250Hz 를 인가하였을 때의 토출 현상을 측정하고 이미지 프로세싱을 사용하여 자동으로 측정한 그림이다. Fig. 11 에서 알 수 있듯이 토출 시점으로부터 2.0 ms 에서 메니스커스의 위치가 최하단점에 있고 이를 통하여 토출이 되는 시점은 토출 교류의 전압을 인가한 후 약 2ms 가 됨을 알 수 있다. 토출 이후에는 2.6ms 시점까지는 급격하게 원래 메니스커스의 모양으로 회복이 되고 그 이후에는 완만하게 회복이 됨을 볼 수 있다. 안정적인 토출을 위한 토출 주파수를 결정하기 위해서는 토출 시점 및 메니스커스가 원래대로 회복이 되는 시간을 고려해야 된다. 따라서 이를 고려하면 300Hz 이상으로 토출 주파수를 상승시키면 안정적인 토출이 어려움을 알 수 있다. 이러한 토출 주파수는 노즐의 직경, 유체의 표면 장력과 관련이 있다.

토출 분석 및 토출 제어를 위하여 Fig. 12 와 같은 소프트웨어를 연구실에서 개발하였으며 다양한 실험과 이를 통한 토출 최적화를 위한 연구를 진행 중이다.

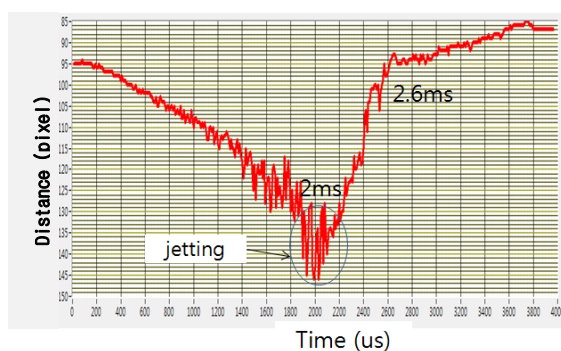


Fig. 11 Jetting evaluation based on image processing

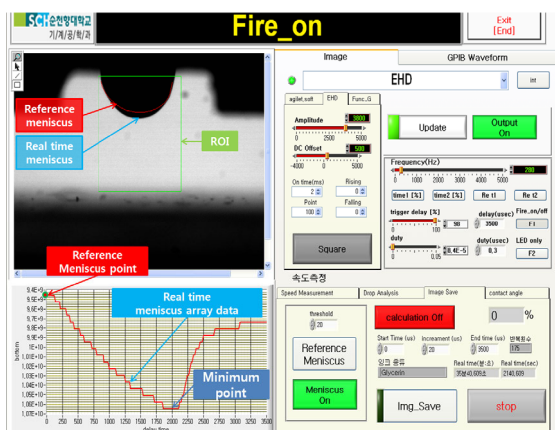


Fig. 12 Software for EHD jetting analysis

4. 결론

고속 카메라를 사용하지 않고 저가의 CCD 카메라를 사용하여 전기수력학 잉크젯 토출 현상을 가시화 할 수 있는 장치를 개발하였다. 이를 통하여 토출 현상을 실시간 이미지 처리를 이용하여 실시간으로 가시화 하는 것이 가능하였다. 또한 토출되는 이미지의 잔상여부를 판단하여 토출의 반복되는지 여부를 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 이미지 프로세싱을 통하여 실시간으로 토출의 현상을 측정하는 소프트웨어를 개발하였다. 이를 통하여 어느 시점에서 토출이 되는지를 분석하는 것이 가능하였다.

본 방법은 교류 전압과 동기화된 이미지를 측정하기 때문에 요구 적출형 파형 및 토출 평가에는 장점이 있으나 직류 전압만을 인가하는 토출 방법인 경우 토출 현상을 측정 및 분석하는 것이 어려운 단점이 있다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임 (No. 2010-0021127, 2011-0026563)

참고문헌

- Zeleny, J., "The electrical discharge from liquid points and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surface," *Physical Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 69-91, 1914.
- Taylor, G. I., "Disintegration of water drops in an electric field," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 280, No. 1382, pp. 383-397, 1964.
- Park, J. U., Hardy, M., Kang, S. J., Barton, K., Adair, K., Mukhopadhyay, D. K., Lee, C. Y., Strano, M. S., Alleyne, A. G., Georgiadis, J. G., Ferreira, P. M. and Rogers, J. A., "High resolution electrohydrodynamic jet printing," *Nature Materials*, Vol. 6, No. 10, pp. 782-789, 2007.
- Lee, S., Byun, D., Jung, D., Choi, J., Kim, Y., Yang, J. H., Son, S. U., Tran, S. B. Q. and Ko, H. S., "Pole-type ground electrode in nozzle for electrostatic field induced drop-on-demand inkjet head," *Sensors and Actuators A*, Vol. 141, No. 2, pp. 506-514. 2008.
- Mishra, S., Barton, K. L., Alleyne, A. G., Ferreira, P. M. and Rogers, J. A., "High-speed and drop-on-demand printing with a pulsed electrohydrodynamic jet," *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, No. 9, Paper No. 095026, 2010.
- Jaworek, A. and Krupa, A., "Classification of the modes of EHD spraying," *J. of Aerosol Science*, Vol. 30, No. 7, pp. 873-893, 1999.
- Nguyen, V. D. and Byun, D., "Mechanism of electrohydrodynamic printing based on ac voltage without a nozzle electrode," *Applied Physics Letter*, Vol. 94, No. 17, Paper No. 173509, 2009.
- Kwon, K. S., "Development of a Test stand for measuring ink jetting performance," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 8, pp. 45-50, 2008.
- Balachandran, W., Machowski, W. and Ahmad, C. N., "Electrostatic Atomisation of Conducting Liquid

- using AC superimposed on DC fields,” IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 2, pp. 1369-1373, 1992.
10. Sung, K. A. and Lee, C. S., “An Experimental Study on the effect of electrohydrodynamic monodisperse atomization according to nozzle characteristics,” Journal of Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 18-31, 2005.