

전류 측정을 이용한 수력학적 잉크젯 토출 모니터링

Electrohydrodynamic Ink Jetting Monitoring based on Current Measurement

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: 2011.8.3 / Revised: 2011.11.25 / Accepted: 2011.12.11

The method for spraying of liquid through an electrical filed has become a printing method since it can make very small droplet. To increase the reliability using the electro-hydrodynamic (EHD) jet printing, the jetting status needs to be monitored. Vision measurement techniques using high speed camera has been used to visualize the jet images. However, it requires image processing of a lot of images after image acquisitions. So, it is difficult to understand jet behavior such as jetting frequency, jet repeatability etc. In this work, a low cost electrical current measurement method was developed to measure electrical current from EHD jet printing. To verify the jetting monitoring capability of developed circuit, images from high speed camera were processed for comparison purpose.

Key Words: EHD Inkjet (전기수력학 잉크젯 프린팅), Current Measurement (전류 측정), Jetting Visualization (제팅 가시화)

1. 서론

전기수력학적 프린팅 시스템은 유체가 강력한 국소 전기장에 노출 되었을 때 정전기적 힘이 유체에 작용하여 대전을 일으키고 이러한 전기적인 상호 인력을 사용하여 기판에 패턴을 행하는 장치이다.

현재까지는 전기수력학적 미립화에 대한 연구는 오랜 역사를 지닌다. 전기분무에 대한 실험은 초기 실험은 1600 년대로 거슬러 올라가는 것으로 알려져 있다.¹ 이러한 현상의 이론적인 접근에 대한 논문은 Rayleigh 에 의해 최초로 출판이 되었다.² 그 이후에 많은 논문이 발표가 되고 있다. 이러한 흥미로운 현상을 이용한 응용 범위도 넓어지고 있고 특히 프린팅에 적용하려는 연구도 꾸준히 진행중이다.³ 그러나 아직까지 연구의 수준이

생산 장비로서 양산화하기 위해서는 아직 해결해야 될 여러 기술적인 이슈가 있다.

특히 제팅의 신뢰성을 확보해야 되는 문제점이 있다. 이를 위하여 미소 액적의 제팅 현상을 정량화 하여 측정해야 되고 안정적인 제팅이 되는 최적화 되는 조건을 찾아야 한다. 이를 위하여 고속 카메라를 사용한 비전 측정 방법이 많이 사용되고 있다.⁴ 그러나, 고속카메라로 측정하는 방법은 많은 이미지 정보로부터 토출 정보를 얻어내는 것이 효율적인 방법이 되지 못하고 실시간 토출 모니터링을 하는 것이 불가능하다.

한편으로는 기존의 피에조 잉크젯 토출 현상을 측정하기 위하여 카메라의 조명인 LED 의 점등을 토출 신호와 동기화 시킨 strobe 방식의 이미지 측정 방법을 기존의 잉크젯 방법에서 많이 사용되고 있다.⁵ 그러나 기존의 잉크젯 방법과 달리 수력학

적 잉크젯인 경우 제팅의 반복성이 좋지 않기 때문에 측정에 어려움이 있다. 또한 EHD 를 프린팅에 응용하기 위하여 DC 의 고전압을 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우 strobe LED 를 이용하는 방법으로 토출 상태를 측정하는 것이 불가능하다. 또한 입력전압이 DC 인 경우에는 입력 전압으로부터 토출 주파수를 아는 것이 어렵다. 한편으로는 토출 상태를 평가하기 위하여 토출 주파수의 측정 및 분석이 필요하다. 특히 토출 주파수가 시간에 따라서 변화하지 않아야 원하는 패턴을 정밀하게 프린팅하는 것이 가능하다. 이러한 토출 현상은 잉크의 표면 장력, 잉크의 전도도, 잉크의 점성, 인가하는 전압의 크기, 잉크의 유량 또는 잉크에 가해주는 압력등과 밀접한 관계가 있다.

본 연구에서는 토출되는 상태를 평가하기 위하여 저가로 구현이 가능한 전류 측정 회로를 개발하였다. 수력학적 잉크젯에서 토출을 평가하기 위해서는 수 μA 에서 nA 정도의 전류가 측정되어야 한다. 따라서 전류를 측정하기 위해서는 아주 정밀한 전류 측정 장치를 사용해야 한다. 전류 측정을 위하여 센싱 저항을 연결하여 사용할 수도 있지만 전류가 작기 때문에 잡음에 민감할 수 있는 문제가 있다. 본 연구에서는 작은 전류를 증폭하고 잡음을 필터링하여 전류 신호를 얻을 수 있는 방법을 개발하였다.

전류 측정결과를 전기적 잡음에 민감할 수 있으므로 반드시 검증을 해야 한다. 측정되는 전류를 검증 하는 방법으로 프린팅 결과와 비교하는 방법이 있다.⁶ 그러나 프린팅 결과는 토출후의 프린팅 결과를 관찰하는 것이기 때문에 실제 거동 현상을 보기 어려운 단점이 있다. 또한 토출 과정에서 위성 액적등이 생기면 토출 주파수를 정확하게 평가하기 어렵다. 본 연구에서는 전류측정과 동시에 고속카메라의 이미지를 측정하여 전류 신호와 실제 토출의 관계를 비교하였다. 실제 고속카메라의 이미지를 분석하여 토출 현상을 보기 위해서는 수천장의 이미지를 분석해야 된다. 본 연구에서는 고속카메라의 이미지를 분석하는 소프트웨어를 개발하여 수천장의 이미지를 소프트웨어를 사용하여 1-2 초 이내에 분석하여 실제 전류신호와 비교하여 전류 측정의 결과를 검증하였다.

향후 연구과제로서 전류 측정으로 얻은 결과를 사용하여 토출 시점 및 토출 반복성 그리고 주파수등을 실시간으로 분석할 수 있는 실시간 모니터링 시스템을 개발중이다.

2. 전류 측정 회로 개발

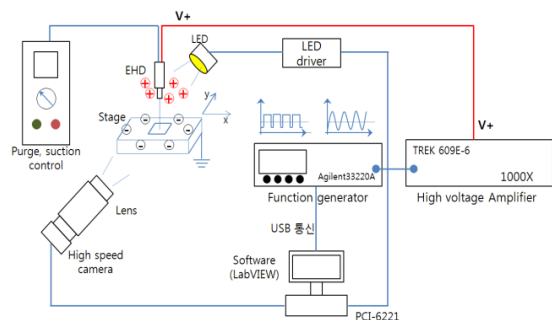


Fig. 1 Schematic of current measurement

전기수력학 제팅의 특성 측정을 위하여 Fig. 1 과 같은 실험장치를 구성하였다.

전기수력학 잉크젯을 위하여는 노즐로부터 메니스커스 형상을 제어해 주어야 된다. 이를 위하여 잉크 공급부와 노즐과의 상대적 높이(수두)를 이용하여 헤드에서 약간의 양압이 걸릴 수 있도록 하였다.

다양한 형태의 전압을 헤드 또는 기관에 인가하기 위하여 임의의 파형 발생기인 Agilent 33220A 를 사용하였고, USB 를 이용하여 컴퓨터와 통신을 통하여 원하는 파형을 생성하였다.

임의의 파형 발생기로부터 생성된 파형은 고전압 증폭기인 TREK 609E-6 을 통해 1000 배 증폭이 되어 헤드에 전압을 인가하였다. 이 때의 액적을 관찰하기 위하여 카메라 줌 렌즈인 MORITEX-ML-Z07545 와 Lens 어댑터인 MORITEX ML-Z20 을 사용하였다. 측정을 위한 고속 카메라로는 Speed Cam MiniVis 를 사용하였다.

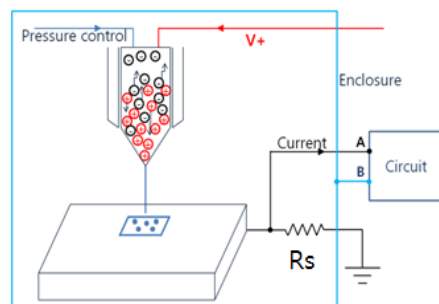


Fig. 2 Electrical current measurement

전류를 측정하기 위하여 센싱 저항($R_s=10\text{k}\Omega$)을 substrate 와 드라이버의 그라운드 사이에 Fig. 2 와 같이 위치시켰다. 여기서 센싱 저항 (R_s)가 크면

클수록 전류 측정 감도가 좋아지나 전기적 잡음의 영향을 받기 쉽다. 반면에 센싱 저항이 작으면 전류측정의 감도가 떨어지는 단점이 있다.

센싱 저항으로부터 측정되는 전류는 저항과의 곱으로 측정이 된다.

$$V_{\text{current}} = i \times R_s \quad (1)$$

본 연구에서는 $R_s=10k\Omega$ 를 사용하였으므로 전류 $1\mu A$ 는 약 $0.01V$ 에 해당한다. 따라서 실제 전류의 크기를 측정했을 때 측정에 적당한 전압이 되도록 증폭할 필요가 있다. 이를 100 배 증폭하고 고주파의 노이즈를 제거하기 위하여 저주파 대역 통과 필터(low pass filter)를 사용한 회로를 Fig. 3 과 Fig. 4 와 같이 개발하였다. 전류를 측정하기 위하여 부가적인 회로를 추가하면 회로의 추가로 인한 로딩 효과(loading effect)에 의하여 실제 전류가 변할 수 있다. 이를 최소화 하기 위하여 측정 회로의 입력 임피던스를 R_s 의 10 배로 하였다.

미소한 전류를 측정하기 때문에 전기적인 잡음에 민감하다. 측정된 전류에 있는 잡음을 줄이기 위하여 실험장치의 사시의 전압을 측정하고 차동 증폭기를 사용하여 같은 위상의 잡음을 줄일 수 있도록 하였다.

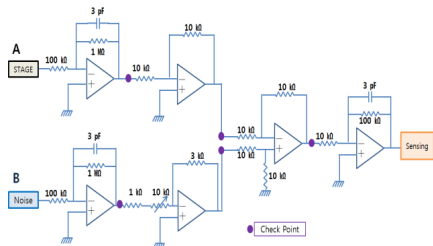


Fig. 3 Electrical circuit for current measurement



Fig. 4 Photo of developed circuit

본 방법에서 개발된 회로는 기존의 미소한 전류를 측정하기 위한 상용화된 전류 측정기에 비해서 저가로 구현이 가능하고 전원노이즈 등과 같은 잡음을 차동증폭기를 사용하여 주변 노이즈의 영향을 최소화 하였고 아날로그 필터를 사용하여 고주파 잡음을 최소화한 특징을 갖는다.

3. 전류신호를 이용한 제팅 모니터링

전류 데이터 획득을 위하여 디지털 오실로스코프(Lecroy, Wavesurfer 422)를 사용하였고 샘플링 rate 로는 500kS/s 을 사용하여 2 초동안 500,000 개의 데이터를 획득하여 전류의 거동을 관찰하였다.

전류를 측정함으로써 토출 주파수 및 토출 간격 등을 측정할 수 있다. 이러한 전류를 이용하여 주파수 분석등을 통하여 토출 조건에 따른 주파수 분석을 시도한 논문도 있다.^{7,8} 그러나 주파수 분석을 하면 평균화를 통하여 데이터 획득 시간동안의 평균적인 거동을 볼 수 있을 뿐 실제로 토출 현상의 변화를 정확하게 평가할 수 없는 단점이 있다. 따라서 전류와 토출 현상을 효과적으로 분석하여 비교하는 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고속 카메라를 사용하여 이미지를 측정하고 전류와 직접 비교하였다. 전류 신호 측정과 이미지 획득의 직접 비교를 위하여 측정 시점을 동기화하였다. 이를 위하여 Fig. 6 과 같이 외부 트리거를 위한 스위치를 오실로스코프의 트리거와 고속카메라의 트리거에 동시에 연결하여 측정하였다. Fig. 5 의 외부트리거를 누르면 고속카메라의 이미지 획득과 동시에 전류 측정을 시작하기 때문에 두 개의 측정 정보를 동기화 시켜 측정하였다.

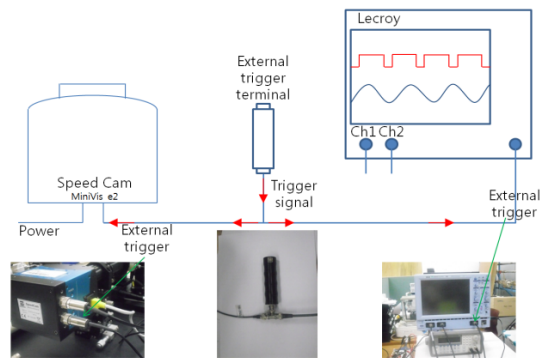


Fig. 5 Jetting Image from high speed camera

토출을 위한 액체로는 글리세린(50%)과 물(50%)을 혼합하여 사용하였다.

고속 카메라는 6013fps (frame per second)로 이미지를 Fig. 6 과 같이 측정하였다. 전류 측정과 비교를 위하여 2 초의 시간동안 측정하였으므로 모두 약 12000 장의 이미지가 있다.

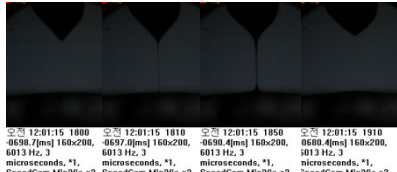


Fig. 6 Jetting Image from high speed camera

Fig. 6 과 같이 고속 카메라를 이용하여 얻은 이미지로부터 토출 시점을 알 수 있다. 그러나 12000 장의 이미지를 모두 분석하여 토출 시점 및 주파수를 분석하는 것은 현실적으로 시간과 노력이 많이 필요하다.

따라서 시간에 따른 이미지 분석을 위하여 영상처리를 위한 소프트웨어를 제작하였다. 이를 위하여 측정된 gray 이미지를 binary 로 변환시킨 후에 제팅을 측정하기 위하여 메니스커스의 최하단점의 위치를 그림 7 과 같이 시간에 따라서 구하였다.

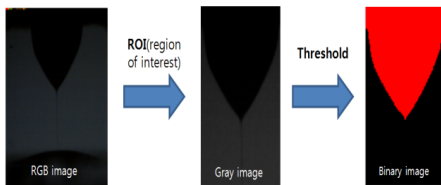


Fig. 7 Image processing of high speed camera image

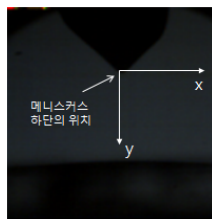


Fig. 8 Meniscus location

Fig. 7 과 같이 이미지 프로세싱을 통하여 메니스커스 위치를 구하게 되면 Fig. 8 과 같이 메니스커스의 하단 y 방향 위치를 pixel 의 단위로 얻을 수 있다.

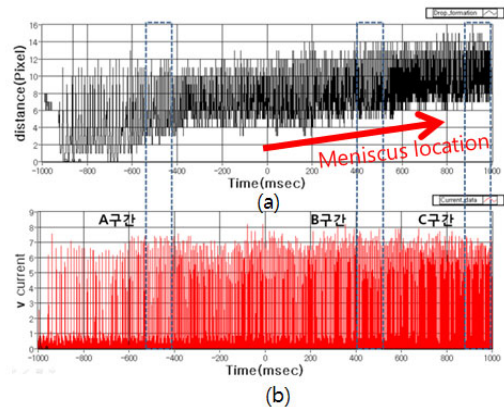


Fig. 9 Current sensing and high speed camera images (a) Meniscus motion; (b) measured current

Fig. 9 는 측정된 전류 신호와 카메라의 이미지 프로세싱 결과를 함께 보여준다.

메니스커스의 최하단점의 위치가 최대가 되는 점이 제팅이 되는 시점이다. 여기서 최하단점은 Fig. 9(a)에서 픽셀의 위치의 값이 큰 시점에서 최대가 된다. Fig. 9(b)는 측정된 전류이고 토출될 때의 전류도 역시 급격히 상승 하므로 이미지의 메니스커스 하단점의 위치가 증가되는 시간과 전류가 증가되는 시간을 비교하면 전류를 측정함으로써 토출 상태의 모니터링이 가능한지 여부를 검증할 수 있다. Fig. 9 의 결과를 보면 초기 토출에 비해서 후반부에 토출 주파수가 빨라짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이 시간에 따라서 전체적으로 메니스커스의 하단의 위치가 밑으로 변하게 됨을 알 수 있다. 따라서 토출 주파수의 변화가 메니스커스의 형상 변화와 관련이 있음을 알 수 있다.

자세한 비교를 위하여 고속 카메라의 이미지부분과 전류 측정 부분을 시간 영역대인 A 구간(초기), B 구간(중간) 그리고 C 구간(후반)을 나누어서 확대하였다. Fig. 10 에서 볼 수 있듯이 고속 카메라를 이용하여 획득한 이미지를 분석한 결과와 전류를 측정한 결과의 토출 주기는 8.3 msec 에서 6.5 msec 정도로 비슷하다. 그러나 방법의 측정된 결과는 완벽하게 일치 하지 않을 수도 있다. 두 방법의 측정 결과가 정확하게 일치 않을 수 있는 원인은 메니스커스 모양은 실제 토출에 비해서 비교적 천천히 변화하고 토출 전류는 150μsec 의 범위 짧은 시간 안에 일어난다. 즉 메니스커스가 충분히 하단에 위치된 후에 토출이 되므로 측정 전류가 약간 시점이 다를 수 있다. 또한 위성 액적

등이 생겼을 때 메니스커스 측정에서는 관찰이 어렵지만 전류에서 약한 전류가 관찰이 될 수 있다. 이러한 이유로 토출 시점 및 주파수가 정확하게 일치하지는 않았지만 토출 특성의 전반적인 경향은 동일 하였고, 전류를 측정함으로써 토출 상태를 평가하는 유용한 정보를 얻을 수 있었다. 전류 측정 방법은 저가로 구현이 가능하고 실시간 모니터링이 가능하여 토출 상태의 상태를 모니터링하는 것이 가능한 유용한 방법이다.

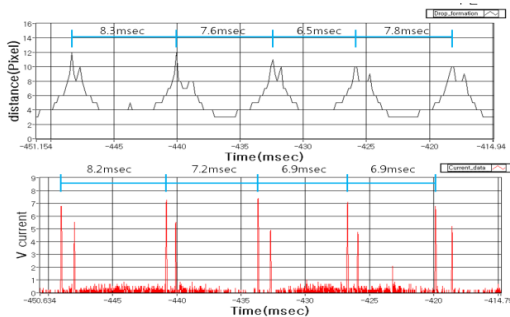


Fig. 10 Comparison between image processing results and measured current (time span:A)

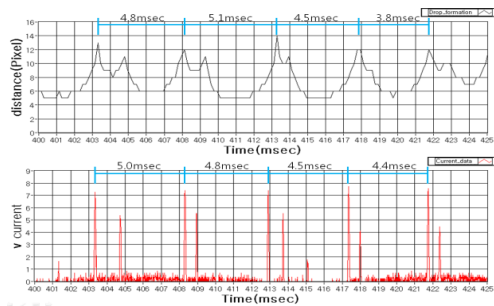


Fig. 11 Comparison between image processing results and measured current (time span: B)

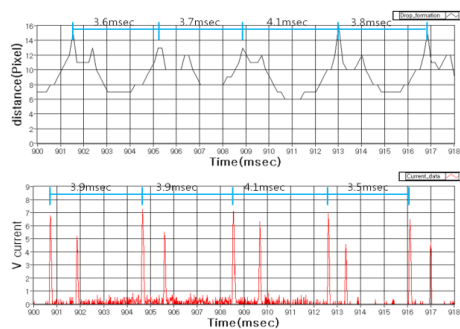


Fig. 12 Comparison between image processing results and measured current (time span: C)

Fig. 10 부터 Fig. 12 는 토출 현상을 보다 정밀하게 관찰하기 위하여 구간별로 시간을 확대한 그림이다. Fig. 10 에서 알 수 있듯이 전반 부(A 구간)에서는 토출 주기가 평균 7.55 ms(132 Hz)이고, Fig. 11 과 Fig. 12 에서 알 수 있듯이 시간이 지나면서 주기는 평균 4.675 ms(213 Hz)와 평균 3.85 ms(259 Hz)로 점점 빨라지게 된다.

이러한 토출 특성의 변화는 전체적인 메니스커스 위치의 변화와 함께 발생하는 것이 관찰되었다. 토출 특성이 시간에 따라서 변화하는 특성은 토출 정밀도 및 균일도에 영향을 미치기 때문에 이를 균일하도록 제어해야 한다. 토출 주파수를 균일하게 하려면 압력 제어등을 보다 정밀하게 하여 메니스커스 모양이 토출에 따라서 변화하지 않도록 제어하는 것이 필요하였다. 본 연구에서는 제팅 측정 방법 및 검증에 대한 연구를 주로 수행하였고 향후 과제로서 토출 균일화를 위한 연구를 지속할 예정이다.

본 연구에서 사용한 방법은 구동 전압을 DC 로 하였을 때 전류 측정과 고속 카메라의 토출 이미지를 분석하여 비교하였다. 그러나 구동전압이 DC 에 국한되는 것은 아니라 AC 및 다양한 구동전압에도 토출 평가가 가능하다.

4. 결론

수력학적 잉크젯 토출 현상을 측정하기 위한 방법으로 전류 측정회로를 개발하였다. 미세한 전류를 효과적으로 측정하고 저가로 구현하는 방법을 개발하였다. 이를 이용하여 토출되는 현상을 실시간으로 모니터링 하는 것이 가능함을 보였다. 실제 토출되는 현상과 비교를 위하여 고속 카메라를 이용하여 토출되는 현상을 분석하였으며 두 방법은 모두 토출 주파수 및 토출 현상을 측정하는데 유용한 정보가 됨을 보였다. 전류 측정 방법은 이미지 측정에 비하여 토출 여부 및 토출 특성의 변화를 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 수력학적 잉크젯의 또 다른 제팅 모드인 스프레이 현상 및 미세한 위성 액적이 발생하였을 때 이를 측정하고 평가할 수 있는지에 대해서는 추후에 검증 실험 및 연구가 필요하다.

전류 측정은 토출에 의한 전류의 변화를 측정하였기 때문에 토출 결과는 측정이 가능하다. 따라서 전류 측정 방법은 단순한 토출 상태를 모니터링 목적으로는 좋은 방법이나 메니스커스의 모

양의 시간에 따른 변화 및 토출 주파수의 변화의 근본적인 원인을 분석하기엔 한계를 지닌다.

후 기

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

참고문헌

1. Laudenslager, M. J. and Sigmund, W. M., "Developments in electrohydrodynamic forming: Fabricating nanomaterials from charged liquids via electrospinning and electrospraying," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 90, No. 2, pp. 22-27, 2011.
2. Rayleigh, L., "On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity," *Philosophical Magazine Series 5*, Vol. 14, No. 87, pp. 184-186, 1882.
3. 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, pp. 782-789, 2007.
4. Chen, C. H., Saville, D. A. and Aksay, I. A., "Scaling laws for pulse electrohydrodynamic drop formation," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, No. 12, Paper No. 124103, 2006.
5. 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.
6. 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," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, No. 9, Paper No. 095026, 2010.
7. Marginean, I., Parvin, L., Heffeman, L. and Vertes, A., "Flexing the Electrified Meniscus: The birth of a jet in Electrosprays," *Analytical Chemistry*, Vol. 76, No. 14, pp. 4202-4207, 2004.
8. Parvin, L., Galicia, M. C., Gauntt, J. M., Carney, L. M., Nguyen, A. B., Park, E., Heffeman, L. and Vertes, A., "Electrospray diagnostics by Fourier Analysis of Current Oscillations and Fast Imaging," *Analytical Chemistry*, Vol. 77, No. 13, pp. 3908-3915, 2005.