

전기수력학적 프린팅 기술을 이용한 Ag 미세회로의 굽힘 특성

이용찬 · 안주훈 · 이창열†

조선대학교 항공우주공학과

Bending Characteristics of Ag Micro Circuits using Electrohydrodynamics Printing Technology

Yong-Chan Lee, Ju-Hun Ahn and Chang-Yull Lee†

Department of Aerospace Engineering, Chosun University

Abstract

The objective of this study was to study the bending characteristics of Ag nano ink using EHD (Electrohydrodynamics) inkjet printing technology for flexibility and miniaturization of devices. The optimal conditions for the technology were derived, and bending characteristics of the Ag nano circuit obtained. For the EHD printing, it is essential to find the optimal point for each parameter such as material characteristics, density, flow rate, voltage, discharge height etc. Therefore, it was derived as the point from the working height and the applied voltage. Also, bending characteristics are confirmed by measuring resistance with each radius of curvature using a fabricated bending module. It was confirmed that rate of resistance change increases rapidly as the radius of curvature increases.

초 록

본 논문에서는 장치의 유연성과 소형화를 위해 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 은 나노 잉크의 굽힘 특성을 확인하였다. EHD 기술을 위한 최적조건을 도출하였고 은 나노 회로의 굽힘 특성을 파악하였다. EHD 프린팅을 위해서는 재료 특성, 밀도, 유량, 전압, 토출 높이 등 각 파라미터 별 최적점을 찾아내는 것이 필수적이므로 작동 높이와 인가 전압에 따른 각각의 최적점을 도출하였다. 또한, 제작한 굽힘 장치를 통해 각 곡률 반경 별 저항을 측정하여 굽힘 특성을 알아보고, 곡률이 증가함에 따라, 저항변화율이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

Key Words : Electrohydrodynamics(전기수력학), Bending Characteristics(굽힘 특성), Resistance(저항), Optimal Point(최적점)

1. 서 론

1950년대 이후 전자기기 기술의 발달로 인해 이전 보다 장치의 크기가 더 작고 속도가 빨라졌으며 우수한 신뢰성을 확보하게 되었다. 각종 장치 및 장비의 기술 개발에 따라 소형화 및 유연화를 통해 디스플레이

이, 전자기기, 센서 등이 개발 및 상용화 되어 많은 분야에서 기술적 이점을 제공해 주었다[1]. 그에 따라 항공우주분야에서는 기술 개발로 인한 항공전자부품의 소형화 및 드론, 소형위성의 초미세 전기기계시스템(MEMS; micro electro-mechanism systems) 도입 등 많은 발전을 이루었다[2-4]. 소형 위성 설계의 핵심은 위성의 중량과 크기를 줄이면서 대형 위성과 같은 성능으로 설계하는 것이다. 이러한 설계 목표를 달성하기 위해 일부 우주개발선진국에서는 MEMS에 대한 연구가 진행되고 있으며, 또한 항공분야에서는

MEMS 압력센서가 장착된 무인항공기용 공력자료시스템(ADS; air data system)을 개발하는 등 활발한 연구가 진행되었다[5, 6].

이처럼 MEMS 기술 응용을 위한 나노 공정의 기술 개발에 따라, 정밀한 전자 프린팅에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[7]. 그러나 과거에 기술 발전 방향은 화학적인 공정 방식을 선택했고 이로 인해 공정 과정에 많은 시료 손실과 환경오염 등을 발생시켰다[8]. 또한 MEMS/NEMS 제품을 제작하기 위해서는 간단한 공정 방식으로는 제작이 어렵다는 단점이 존재한다[9]. 최근에 이러한 문제들을 보완하기 위해 친환경 기술에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이 중 주목을 끌고 있는 기술이 전기장을 이용한 EHD (Electrohydrodynamics) 잉크젯 프린팅이다[10]. 이는 이전의 잉크젯 프린팅과는 달리, 전기장을 이용하여 전도성 잉크를 수 마이크로 단위부터 나노 단위까지 미세하게 토출할 수 있는 최신 기술이다. EHD 기술을 이용하여 미세 패터닝으로 회로를 제작할 수 있으므로, 센서부의 민감도를 향상시킴으로써 민감도를 중요시하는 센서 제작 등에 용이하다[11]. 실제로 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 보다 작고 정밀한 가스센서, 바이오센서, 습도센서 등과 전방표시장치용 투명전극과 미세균열감지용 격자식 센서에 대한 연구가 수행되고 있다.[12-14].

본 논문에서는 차세대 기술의 요소인 장치의 유연성과 소형화를 위해 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 나노 잉크와의 최적점을 확보하였고 은 나노 회로의 굽힘 특성을 파악하였다.

2. 실험 세팅

2.1 Electrohydrodynamics(EHD)

EHD 잉크젯 프린팅 방법은 잉크젯 방식을 기반으로 노즐과 기판 사이에 전기장을 형성시켜 토출되는 잉크에 인가된 전기적 힘이 액면을 변형시켜 액적을 미세하게 형성하는 방법이다. 잉크의 점도와 분산성, 노즐과 기판 간의 거리, 인가 전압, 토출 유량 등 잉크의 특성과 실험 환경, 실험 파라미터간의 최적화가 필수적이다.

본 인쇄방법은 노즐 헤드 팁보다 작은 크기의 액적

을 형성할 수 있고, 고점도의 잉크도 사용할 수 있으며, 나노스케일의 미세 선폭 구현이 가능하여 발전 가능성이 유망한 인쇄 기술이라 할 수 있다. EHD 잉크젯 프린팅 원리는 Fig. 1과 같다.

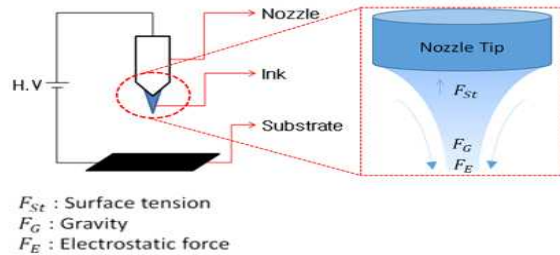


Fig. 1 Principle of EHD inkjet printing for micro discharge

전압을 인가하지 않은 상태로 잉크가 공급되면 노즐 끝에 반달형의 액면이 형성된다. 여기서 노즐 헤드와 기판에 고전압을 인가하면 두 전극 주변에 전기장이 형성된다. 잉크 내의 유도된 전하가 전기력 방향으로 잉크가 이동하고, 잉크표면에 전하가 모여며 포화상태가 되면 토출하게 된다.

2.2 EHD 잉크젯 프린팅 시스템

EHD 잉크젯 프린팅 시스템은 전도성 잉크를 정전기력 기반의 노즐을 통해 기판(substrate)에 패터닝하기 위한 공정 시스템이다. EHD 잉크젯 프린팅 시스템은 Fig. 2와 같은 장치 단위의 시스템으로 구성된다.

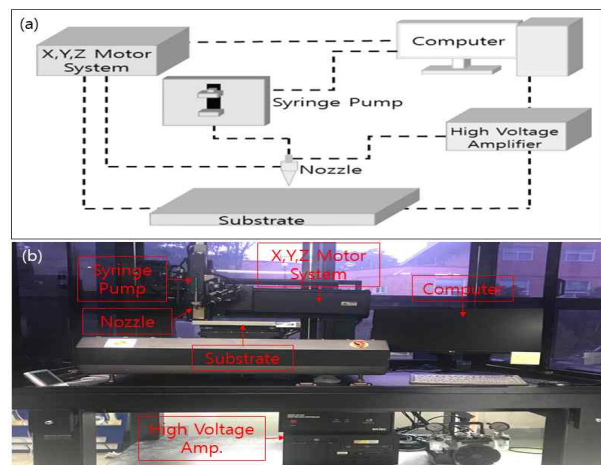


Fig. 2 (a) Schematic diagram of EHD inkjet printing system and (b) printing machine

공정변수 제어를 위한 시스템은 공정 제어 시스템 (computer), 유량 제어기(syringe pump), 고전압 증폭기(high voltage amplifier), 3축 구동 장치(3-axis motor system) 그리고 정전기력 헤드(nozzle) 등으로 구성된다.

2.3 실험 방법

은 나노 잉크 제조를 위해 먼저 무극성 용매인 DBA (Diethylene glycol monobutyl ether acetate)와 계면활성제인 α -terpineol을 혼합하여 solvent를 제조하였다. 그 후, 은 나노 페이스트 66.56 wt%과 제조된 solvent 33.44 wt%를 혼합하고, 제조된 잉크를 교반기를 이용해 4시간동안 분산하여 사용하였다[15].

제조된 은 나노 잉크를 EHD 프린팅 시스템을 이용하여 미세회로를 제작하였다. 은 나노 잉크를 사용하여 PI 필름위에 토출시켜 회로를 제작하였고 은 나노 잉크가 패터닝된 PI 필름을 'Convection oven'을 이용하여 85°C에서 12시간 가열 소결을 진행하였다.

유연전도성 실험을 위한 곡률 반경은 다음 Eq. 1과 같이 정의 된다[16].

$$r = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (1)$$

Figure 3은 유연전도성 시험의 개략도이다. 여기서 L 은 기판 길이, dL 은 굽힘 시 변형거리, 그리고 h_s 는 필름의 두께를 나타낸다. 그 후 제작된 굽힘 장치를 이용해 곡률 반경이 25, 22, 19, 16, 13, 10 mm 일 때의 저항을 각각 측정하고 초기 저항과 비교하여 저항 변화율을 측정 하였다.

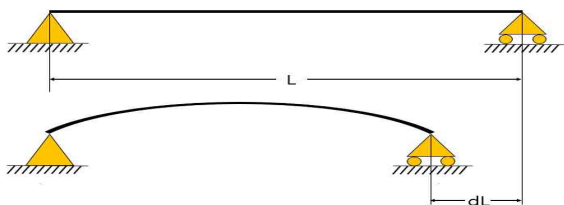


Fig. 3 Schematic diagram of flexible conductivity test

3. 실험 결과

3.1 토출 모드 별 분포도

본 실험에 앞서, Fig. 4는 제작된 은 나노 잉크의 토출 높이-전압에 대한 안정성 실험을 수행한 결과이다. 나노 잉크를 이용한 토출 실험을 통해 'Dripping mode', 'Micro dripping mode', 'Stable cone jet mode', 'Unstable cone jet mode' 및 'Whipping mode' 등 5 가지의 토출 모드와 과전압에 의한 'Short out' 현상을 확인하였다. 각각의 모드는 전압, 높이 등 세팅 파라미터의 영향을 받으며 각 구간마다 여러 모드의 일정 분포를 확인하였다.

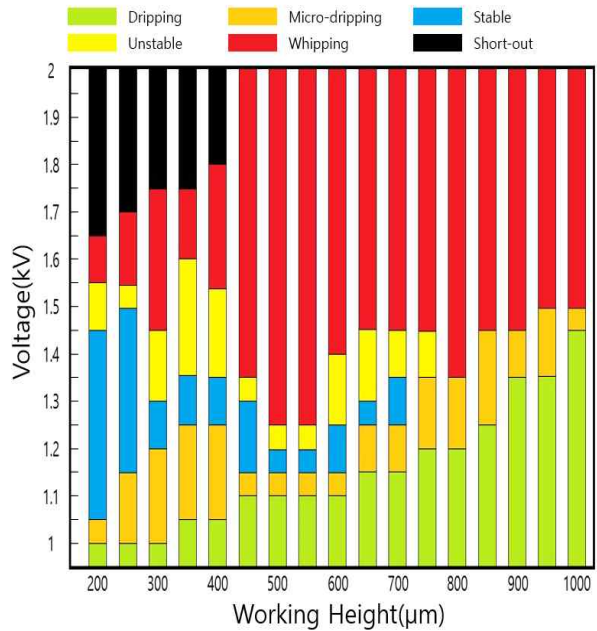


Fig. 4 Jetting stability regions with height-voltage parameters

첫째, 'Dripping mode'는 높이에 따른 토출 유효 전압에 미치지 못할 때 발생되고, 각각의 토출 높이에서 모두 확인할 수 있었다. 'Dripping mode'는 실린지 (syringe)로 부터 일정한 유량이 노즐 끝으로 공급되면, 생성되는 액적의 크기는 증가하게 되며, 액적의 무게로 인해 토출되는 원리이다. 기본적으로 액적의 크기가 노즐보다 크기 때문에 미세한 토출이 어려워 미세 회로 제작에 적합하지 않다. 또한 전기장의 영향을

거의 받지 않는 상태이기 때문에 오히려 중력에 더 큰 영향을 받아 토출된다. 인가전압을 늘릴수록 액적의 크기가 작아지고, 토출되는 빈도가 높아진다.

둘째, 'Micro dripping mode'는 역시 전 구간에서 확인 할 수 있었으며 'Dripping mode'에서 전기장의 세기를 증가시킬 때 관찰되는 토출 모드이다. 'Dripping mode'와는 달리 미세한 액적을 부분적으로 토출하는 형태이므로, 토출된 이후에도 액면의 크기가 거의 줄어들지 않는다.

셋째, 'Stable cone jet mode'는 가장 일반적인 EHD 토출 모드 중 하나이다. 토출 높이 200 μm 부터 700 μm 까지 안정적인 구간이 존재한다는 것을 확인하였고, 750 μm 부터는 안정적으로 토출이 되지 않는다. 'Cone jet mode'를 이용하여 미세하고 정교한 패턴형성이 가능하기 때문에 미세 패턴 응용이 가능하다. 다만 인쇄 거리가 매우 길어 질 때(750 μm 이상), 토출은 전기장에 의해 액적 줄기에서 분무되는 형태로 변하므로, 미세 패턴을 위해서는 인쇄 거리를 최소화 하여야 정교한 인쇄 공정이 가능하다.

넷째, 'Unstable cone jet mode'의 경우는 'Stable cone jet'와 뒤에서 언급할 'whipping'의 경계에서 불안정하게 'cone jet'를 형성하는 모드이다. 안정적인 토출과 'whipping'이 반복해서 발생하고, 'whipping'이 발생하다가도 안정적인 토출이 불규칙하게 이루어진다.

마지막으로, 'Whipping mode'는 액적의 표면장력보다 인가 전압에 의한 정전기적 반발력이 클 때, 요동치듯 다소 불안정하게 토출되는 모드이다. 토출 높이 대비 전압이 높을 때 발생하고 또한 전 구간에서 일정 부분 발생하는 것을 확인하였다.

토출 높이 200 μm 부터 400 μm 까지 일정 이상의 전압을 인가하면 낮은 높이에서 과전압이 흐르며 short out 현상이 발생하여 실험이 불가능하였다. 토출 높이 400 μm 부터 1000 μm 까지는 2 kV까지 증가시켜도 과전압에 의한 short out 현상이 발생하지 않아 실험에 적합한 토출 높이를 확보할 수 있었다.

따라서 PI 필름의 두께가 150 μm 이므로 토출 높이가 400 μm 이하에서는 기관과 가깝기 때문에 전기적 요인이 과하게 작용한다. 이러한 점을 고려했을 때, 미세회로 제작을 위한 공정 조건으로 토출 높이가 450 μm

그리고 인가 전압 1.25 kV에서 EHD 프린팅 조건이 적합하다고 판단하여 실행하였다.

3.2 유연 전도성 실험

전자기기의 기술개발에 따라 플렉서블 장치에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 플렉서블 장치는 굽힘과 같은 물리적 변화에 대한 전기적 특성 연구가 필수적이다. 따라서 은 나노 미세회로의 굽힘에 따른 저항 변화율을 확인하기 위해 앞서 진행한 토출 안정성 실험을 토대로 은 나노 미세회로를 제작하여 유연 전도성 실험을 진행하였다.

Equation 1을 이용해 곡률 반경 별 이송 거리를 구하였고 그에 따라 6 가지의 굽힘 케이스로 측정을 진행하였다. Figure 5는 굽힘 장치를 이용해 곡률 반경의 6가지 케이스를 측정된 사진이다.

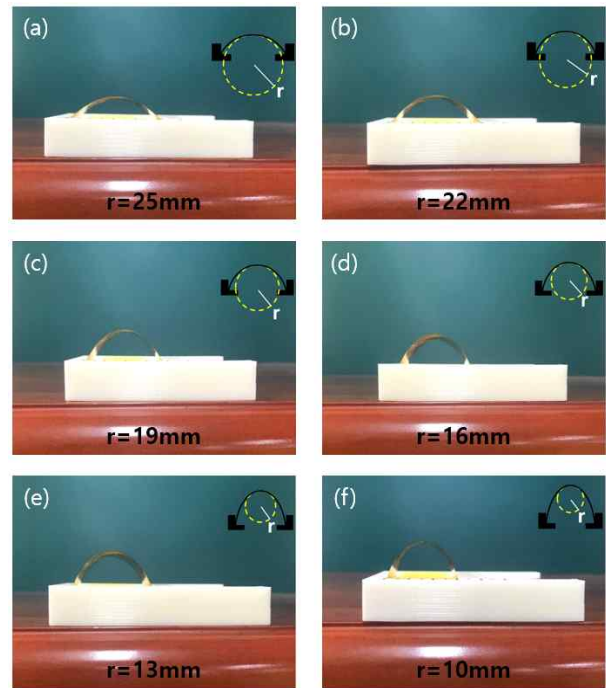


Fig. 5 Bending case according to radius of curvature with bending module; (a) $r = 25$ mm, (b) 22 mm, (c) 19 mm, (d) 16 mm, (e) 13 mm, (f) 10 mm

곡률 반경 별 저항 측정 결과 및 저항변화율을 Table. 1에 정리하였다. 저항 변화율은 $\Delta R/R_0$ 로 나타내었고 여기서 R_0 는 초기 저항, R 은 굽힘 시험

후 저항 값이다. 저항변화율은 작게는 0.2701, 크게는 0.6972까지 변화함을 알 수 있었다.

Table 1 Resistance measurement results of six cases with radius of curvature

	r^* (mm)	R^{**} (Ω)	$\Delta R/R_0^{***}$
Original	Flat	206.27	0
Test1	25	261.99	0.2701
Test2	22	262.33	0.2718
Test3	19	263.01	0.2751
Test4	16	275.12	0.3338
Test5	13	307.71	0.4918
Test6	10	350.08	0.6972

r^* = Bending radius

R^{**} = Measured resistance

R_0^{***} = Initial resistance

곡률 반경 별 저항 측정 결과 및 저항변화율을 Table. 1에 정리하였다. 저항 변화율은 $\Delta R/R_0$ 로 나타내었고 여기서 R_0 는 초기 저항, R 은 굽힘 시험 후 저항 값이다. 저항변화율은 작게는 0.2701, 크게는 0.6972까지 변화함을 알 수 있었다.

Figure 6은 곡률 반경 별 저항변화율을 나타낸 그래프이다. 유연전도성 실험 결과, 곡률 반경이 25 mm에서부터 19 mm까지는 저항변화율이 1.0066 ~ 1.0105 사이인 것을 알 수 있고, 저항 변화가 미비하여 비교적 안정적이라는 것을 확인하였다. 곡률 반경 19 mm 이후에는 저항변화율이 1.0105 ~ 1.3851까지 점차 증가하면서 16 mm, 13 mm 및 10 mm로 곡률 반경이 작아질수록 점진적으로 증가함을 확인하였다.

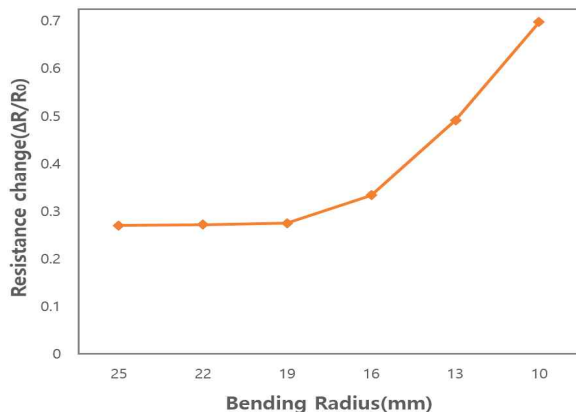


Fig. 6 Resistance change with radius of curvature

측정값보다 곡률반경을 더 작게 하는 경우, 저항변화율이 기하급수적으로 증가할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 차세대 미세 센서 제작을 위해, 은 나노 잉크를 이용하여 토출 안정성 분포를 확인하였으며, 제작한 굽힘 장치를 통해 유연 전도성 실험을 수행하였다. EHD 잉크젯 프린팅은 사용하는 전도성 잉크마다 점도, 분산성, 습도, 온도, 인가전압, 토출높이 등 잉크 특성과 실험 환경, 실험 파라미터간의 최적점이 존재한다. 본 연구에서는 은 나노 잉크의 EHD 프린팅 토출 높이와 인가 전압간의 최적 조건을 도출하였으며, 곡률 반경에 따른 저항 변화율을 측정하여 회로의 유연성을 확인하였다.

저항변화가 미비한 곡률반경 구간 내에서는 플렉서블 센서 제작이 용이할 것으로 사료되며 회로의 우수한 유연 안정성을 위한 개선된 연구가 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] R. W. Keyes, "Miniaturization of electronics and its limits," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 32, no. 1, pp. 84-88, Jan. 1998.
- [2] S. H. Chang, S. O. Koo and J. W. Park, "Development of the compact integrated flight control computer," *The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 17-21, Mar. 2008.
- [3] M. S. Kang, J. H. Hwang and J. S. Bae, "Control of focal plane compensation device for image stabilization of small satellite camera," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 86-94, Mar. 2016.
- [4] J. H. Lee, J. H. Hwang, J. Y. Yang, Y. H. Joo, J. S. Bae and J. Y. Kwon, "Design of the compound smart material pump for brake system of small-medium size UAV," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 1-7, Sep. 2015.

- [5] I. T. Lee, D. W. Kim, H. Y. Lee and Y. H. Kim, "Development status of Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) technologies for miniaturizing satellites," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 33, no. 5, pp. 106-114, May 2005.
- [6] U. R. Baek, S. S. Kim, S. H. Kim, C. B. Park and K. Y. Choi, "Development and Validations of Air Data System using MEMS Sensor for High-Performance UAV," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 36, no. 10, pp. 1017-1025, Oct. 2008.
- [7] J. W. Jung, J. W. Choi, D. K. Lee, J. H. Hwang and B. K. Kim, "A motor-driven focusing mechanism for small satellite," *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 75-80, Sep. 2018.
- [8] C. H. Je, C. A. Choi, S. Q. Lee and W. S. Yang, "MEMS Pressure Sensor Technology and Industry Trends," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 30, no. 6, pp. 21-30, Dec. 2015.
- [9] K. C. An, J. Choi, Y. J. Kim, S. Lee and S. U. Son, "High Aspect Ratio EHD Printing with High Viscosity Ink Ejection," *Journal of Tech Connect Briefs*, vol. 2, no. 4, pp. 267-270, June 2012.
- [10] B. W. An, K. J. Kim, M. J. Kim, S. Y. Kim, S. H. Hur and J. U. Park, "Direct Printing of Reduced Graphene Oxide on Planar or Highly Curved Surfaces with High Resolutions Using Electrohydrodynamics," *Small*, vol. 11, no. 19, pp. 2263-2268, May 2015.
- [11] S. Gamerith, A. Klug, H. Scheiber, F. U. Scher, E. Moderegger and E. J. W. List, "Direct ink-jet printing of Ag-Cu nanoparticle and Ag-precursor based electrodes for OFET applications," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17, no. 16, pp. 3111-3118, Sep. 2007.
- [12] M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne and J. A. Rogers, "Mechanisms, capabilities, and applications of high-resolution electro hydro dynamic jet printing," *Small* vol. 11, no. 34, pp. 4237-4266, Sep. 2015.
- [13] J. H. Ahn, Y. C. Lee, D. S. Choi and C. Y. Lee, "Effect of Conductive Particles on Electrical Conductivity using EHD Ink Jet Printing Technology," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 1-8, Nov. 2018.
- [14] K. Y. Kim and C. Y. Lee, "Mechanism of Micro Crack Sensor Using Electrohydrodynamic Printing," *Journal of Advanced Engineering and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 55-60, June 2019.
- [15] J. Y. Choi, Y. J. Kim, S. U. Son, K. C. An, H. S. Ko and S. H. Lee., "Evaluation of contact resistance between carbon fiber/epoxy composite laminate and printed silver electrode for damage monitoring". *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 34, no. 5, pp. 377-383, Oct. 2014.
- [16] S. I. Park, J. H. Ahn, X. Feng, S. Wang, Y. Huang and J. A. Rogers, "Theoretical and Experimental studies of bending of inorganic electronic materials on plastic substrates," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 18, no. 24, pp. 2673-2684, Nov. 2015.