

잉크젯 프린팅 기술을 이용한 플렉서블 온·습도센서 개발

계지원² · 한동철¹ · 신한재¹ · 김헌곤¹ · 이왕훈^{1,+}

Fabrication of Flexible Temperature & Humidity Sensor Using Inkjet-printing Technology

Ji Won Kye², Dong Cheul Han¹, Han Jae Shin¹, HeonGon Kim¹, and Wanghoon Lee^{1,+}

Abstract

This paper presents the inkjet-printed flexible temperature and humidity sensor(F-TH sensor) using PEDOT:PSS. The series, mesh and parallel type sensing element using PEDOT:PSS ink was printed on the overhead projector(OHP) film. The fabricated sensor of each structure has the temperature sensitivity of 140 $\Omega/^{\circ}\text{C}$, 29 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ and 1.4 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ with linearity, respectively. Also the fabricated sensor was not only possible to measure a temperature, but also to detect humidity. The humidity sensitivity of 400 $\Omega/\%RH$, 3.4 $\Omega/\%RH$ and 3 $\Omega/\%RH$ with linearity, respectively. The fabricated F-TH sensor is expected for the various applications such as electronic devices, bio-healthcare, industrial field.

Keywords: Inkjet print, Flexible sensor, Temperature sensing, Humidity sensing

1. 서 론

최근 유연한 전자기기에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 따라 유연성 기판의 사용이 용이한 인쇄 전자 산업 및 인쇄 전자 기술에 대한 관심도 함께 높아지고 있다[1-6]. 잉크젯 프린팅은 비 접촉식 프린팅 기술로써 노즐로부터 액적(drop)을 분사하여 기판 위에 패턴을 직접 인쇄하는 기술이다. 기존의 포토리소그래피 기술과 비교하였을 때 빠른 패턴 제작이 가능하고, 공정과정이 줄어들어 시간과 공정비용을 절감할 수 있으며, 재료의 낭비가 적어 전자기기, 의료·바이오, 산업 분야 등에서 유용한 기술이다. 현재 잉크젯 프린팅 공정을 이용하여 인쇄 전자 소자 제작 및 유연성 회로, 디스플레이, 센서, 배터리 등의 인쇄 전자 기기에 적용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다[7,8]. 잉크젯 프린팅 기술은 대부분 전

도성 잉크를 이용하여 프린트회로기판(PCB), RFID, 전극 및 배선 등의 소자분야에 적용[9-12]뿐만 아니라, LCD 칼라필터 공정 등에 적용되고 있다[13]. 이러한 잉크젯 프린팅 기술로 제작하는 센서의 경우 가볍고, 공정이 간단하며, 저렴한 공정비용, 유연성 기판 적용이 가능하고, 상온 공정 등의 장점이 있어 유연성 전자기기의 구동 소자로서 각광받고 있다. 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 유연성 센서의 개발은 경량화, 간편화, 휴대성 등의 강점을 가지고 있어서 유비쿼터스 시대에 활용하기 위한 유용한 소자이다.

본 연구에서는 유연한 기판 위에 유기태양전지에 주로 사용되는 P형 전도성 고분자 물질인 PEDOT:PSS 잉크를 이용하여, 잉크젯 프린팅 기법으로 유연성 온·습도 감지 소자를 개발하고, 구조 별 소자의 특성을 비교했다.

2. 설계 및 제작

2.1 잉크젯 프린팅

잉크젯 프린팅 공정 기술은 헤드로부터 미세 잉크방울(수십 μm)을 원하는 위치에 기판의 손상 없이 패턴을 형성할 수 있는 비 접촉식 공정 방식이며, 재료의 낭비를 줄일 수 있는 직접 패턴링 방식의 기술로 주목 받고 있다[14-17]. 잉크젯 기술은 고전압을 걸어 싱글 노즐을 사용하여 고속으로 인쇄가 가능해 산업용으로 주로 쓰이는 continuous 방식과 전기적 신호를 통해 필요한 시기에만 잉크를 토출시키는 Drop-on-demand(DOD)방식으로 크게 나눌 수 있는데, 이 중 DOD방식은 잉크 액적의 형

¹ 구미전자정보기술원(Gumi Electronics and Information Technology Research Institute)

Smart Components Technology Research Center, Gumi Electronics and Information Technology Research Institute, Cheomdangjeop 1ro-17, Sandongmyeon, Gumi, Gyeongsangbuk-do 730-853, Korea

² 안동대학교 바이오전자공학과(School of Bio Electrical Engineering, Andong National University)

Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong 760-749, Korea

⁺ Corresponding author: whlee@geri.re.kr

(Received : Mar. 20, 2015, Revised : Apr. 2, 2015, Accepted : Apr. 2, 2015)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성방식에 따라 thermal 방식과 piezoelectric 방식으로 나눌 수 있다. Thermal 방식은 헤드에서 열을 가해 순간적으로 잉크 속에 기포가 발생하여 그 압력으로 잉크가 토출되는 방식으로, 헤드의 비용이 저렴하고 노즐이 막힐 염려가 없는 장점이 있지만 열이 가해지기 때문에 헤드의 내구수명이 짧고 사용 가능한 잉크가 한정된다는 단점이 있다. Piezoelectric 방식은 잉크가 노즐 안의 piezo 소자를 진동시키면 piezo 소자가 잉크에 압력을 주어 노즐로 토출시키는 방식으로, 잉크에 열을 가하지 않기 때문에 헤드의 수명, 잉크의 넓은 선택폭 등의 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 DOD방식 가운데 piezoelectric 방식을 사용했다. 유연성 온도센서 제작을 위해 PEDOT:PSS(Heraeus社, CLEVIOS™ PH500)에 적당한 점도를 갖기 위해 Ethylene glycol과 Deionized Water(DI-water)로 희석한 잉크를 잉크젯 프린터(Microfab社, Jetlab4)를 이용하여 센서전극을 인쇄했다.

2.2 유연성 센서 설계 및 제작

2.2.1 유연성 센서 설계 및 제작

사용된 잉크젯 프린터는 50 μm크기의 노즐을 이용하여 패턴을 형성했다. 이때, -16 V(600 Hz)의 인가전압, 2 m/s의 속도로 분사했으며, 액적의 분사 간격(Drop space)은 40 μm이다. 센서 제작 시 일정한 선 폭, 패턴 간 일정간격의 확보, 단선에 대한 대

비 등을 고려한 반복 실험의 결과로 패턴 간 간격을 0.3 mm로 최적화 했다. 잉크젯 프린터를 사용하여 Fig. 1과 같이 PEDOT:PSS 잉크를 잉크젯용 Overhead project (OHP) 필름 상에 직렬 구조, 메시 구조 및 병렬 구조 형태로 각각 형성했다. 직렬 구조는 세로 10 mm×8 개의 라인패턴을 0.3 mm 간격으로 연결하여 인쇄했고(Fig. 1(a)), 메시 구조는 가로, 세로 각 10개의 라인패턴을 0.3 mm 간격(Fig. 1(b)), 병렬 구조는 가로 10 mm×5개의 라인패턴을 0.3 mm 간격으로 인쇄(Fig. 1(c))했다. 또한, 모든 구조의 전극은 Ag Pad를 형성하였으며, 제작된 센서의 단면도는 Fig. 2와 같다.

2.2.2 캡슐화

제작된 센서가 온도 측정용으로 사용 시 습도에 의한 영향을 최소화 하기 위하여 열용융형 접착제인 surlyn을 사용하여 Encapsulation처리를 했다. 제작된 온도센서 패턴 위에 surlyn을 형성한 뒤 오븐에서 120°C, 3분 열처리하여 센서에 외부 수분이 침투하는 것을 방지했다[18-20](Fig. 3).

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 특성

챔버 안의 온·습도를 일정하게 제어 가능한 장비인 항온항

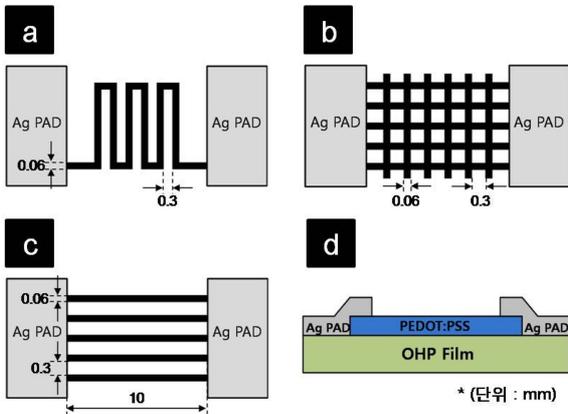


Fig. 1. Structure of flexible sensor. (a) Series type, (b) Mesh type, (c) Parallel type, (d) Cross sectional view.

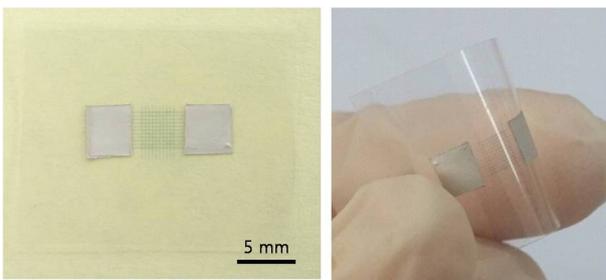


Fig. 2. Fabrication of flexible temperature & humidity sensor.

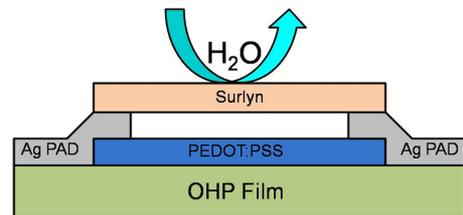


Fig. 3. Cross sectional view of encapsulation sensor.

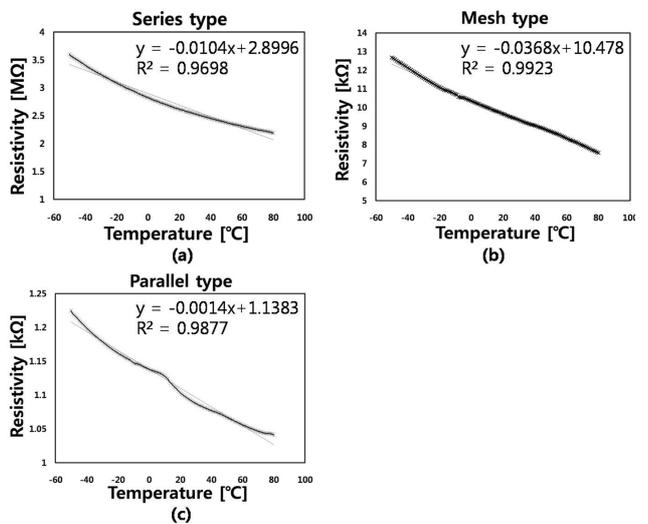


Fig. 4. Temperature-Resistance graph of flexible sensor. (a) Series type, (b) Mesh type, (c) Parallel type.

Table 1. comparison of temperature characteristic of structure of flexible sensor.

Type	직렬	메시	병렬
저항변화	3.60~2.19 MΩ	9.87~6.11 kΩ	1.22~1.04 kΩ
감도	140 Ω/°C	29 Ω/°C	1.4 Ω/°C
선형성	96.9%	99.2%	98.7%

습기를 이용하여 -50~80°C의 온도 범위 내에서 1°C씩 변화를 주며 각각의 구조로 제작된 센서의 온도변화에 따른 저항특성 변화를 디지털 멀티미터로 측정했다. 온도변화(-50~80°C)에 따른 저항특성변화를 관찰한 결과, Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 각각의 구조마다 변화폭은 다르지만 3가지 구조의 센서 모두 온도가 증가할수록 전체 저항이 감소하는 것을 확인했다(Negative Temperature Coefficient of Resistance, NTC).

직렬 구조의 센서는 3.60~2.19 MΩ의 범위 안에서 1.4 kΩ/°C의 감도로 97.0%의 선형성을 가지며 감소했고, 메시 구조의 센서는 9.87~6.11 kΩ의 범위 안에서 29Ω/°C의 감도로 99.2%의 선형성을 가지며 감소했고, 병렬 구조의 센서는 1.22~1.04 kΩ의 범위 안에서 1.4Ω/°C의 감도로 98.8%의 선형성을 가지며 감소했다. 외인성 반도체는 진성 반도체와 달리 금지대에 전자가 허용되는 에너지 준위가 존재한다. 이로 인해 불순물 에너지 준위와 전도대 또는 가전자대 사이에서 전자의 이동이 원활해진다.

$$E_f = E_{fi} - kT \ln \frac{P_0}{N_i} \quad (1)$$

P형 반도체의 경우 식(1)에서 보여주는 바와 같은 페르미 에너지 준위를 가지므로 가전자대에 가깝게 불순물 에너지 준위가 형성된다. 여기서 E_f 는 P형 반도체 페르미 레벨 에너지, E_{fi} 는 진성 페르미 레벨에너지, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, N_i 는 진성 캐리어 농도, P_0 는 P형 반도체의 정공 농도이다. 외부로부터 에너지가 가해지면 가전자대의 전자가 여기되어 이에 상응하는 정공이 가전자대에 형성됨으로 인해 전기전도도가 증가한다[21,22]. Table. 1에서는 각 구조로 제작된 유연성 센서의 온도에 따른 특성을 요약했다.

3.2 습도 특성

향온습기를 이용하여 20°C의 온도를 유지하며 30~85 %RH 습도범위 내에서 1%RH씩 변화를 주며 각각의 구조로 제작된 센서의 습도에 따른 저항변화를 디지털 멀티미터로 측정했다. 습도(30~85 %RH)에 따른 저항변화를 관찰한 결과, Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 습도가 증가할수록 각각의 구조마다 변화폭은 다르지만 3가지 구조의 센서 모두 습도가 증가할수록 전체 저항이 감소하는 것을 확인했다.

직렬구조의 센서는 1.09~1.12 MΩ의 범위 안에서 400 Ω/°C의 감도로 96.8%의 선형성을 가지며 감소했고, 메시 구조

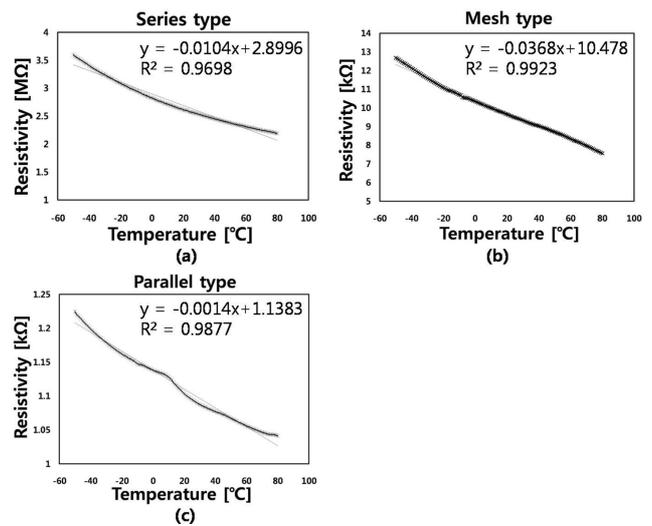


Fig. 5. Humidity-Resistance graph of flexible sensor. (a) Series type, (b) Mesh type, (c) Parallel type.

Table 2. comparison of humidity characteristic of structure of flexible sensor

Type	직렬	메시	병렬
측정 시 온도	19.5~20°C	19.5~20°C	19.5~20°C
측정 습도범위	30~80 %RH	30~80 %RH	30~80 %RH
저항변화	1.09~1.12 MΩ	4.42~4.47 kΩ	1.06~1.24 kΩ
감도	400 Ω/%RH	3.4 Ω/%RH	3 Ω/%RH
선형성	96.8%	94.0%	99.3%

는 4.42~4.47 kΩ의 범위 안에서 3.4 Ω/°C의 감도로 94.0%의 선형성을 가지며 감소했고, 병렬구조는 1.06~1.24 kΩ의 범위 안에서 3 Ω/°C의 감도로 99.3%의 선형성을 가지며 감소했다. 이는 고분자 층에서 물 분자의 흡착으로 인해 polythiophene 계 소자 특성에 큰 영향을 미친 것으로[21], 고분자의 표면이 물 분자와 접촉 시 thiophene 구조의 sulfur 원자는 O₂ 원자가 acceptor 형의 dopant로 작용하는 것을 허용한다. O₂ 밴드로 고분자의 전자가 이동한 결과, 고분자의 가전자대에 빈 공간(hole)이 부분적으로 생기게 되고, 그로 인해 페르미 레벨은 낮아진다. 흡착하는 O₂의 양이 많아질수록 가전자대의 빈 공간은 더욱 많아지고 그로 인한 페르미 레벨이 더욱 낮아져 결론적으로 더욱 많은 양의 자유 캐리어가 생성되어 전도도가 증가한다[23-25]. PEDOT:PSS는 압력변화에 대해서도 반응하는 소재이기 때문에[26], 피부 등의 굴곡을 가진 피검출물에 부착 시 발생하는 휨에 의한 저항변화를 방지하기 위해 평판 고정형의 기관에 감지영역(sensing area)이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 잉크젯 프린팅을 이용하여 감지 영역이 미세한 크기로 제작 가능하여 휨에 대한 저항변화의 최소화 가능하다. Table 2에서는 각 구조로 제작된 유연성 센서의 습도에 따른 특성을 요약했다.

4. 결 론

본 연구에서는 잉크젯 프린팅 기법을 이용하여 필름 위에 온·습도감지 물질의 전극을 인쇄한 유연성 온·습도센서를 제작했다. 제작된 센서의 기판은 OHP 필름을 사용했으며, P형 유기반도체 재료인 PEDOT:PSS 잉크를 이용하여 직렬, 메시, 병렬 구조의 전극 패턴을 형성했다. 온도 특성 실험 시, 습도의 영향을 최소화 하기 위해 밀봉하여 제작된 센서는 온도의 변화에 따라 각 구조 별로 140 $\Omega^{\circ}\text{C}$, 29 $\Omega^{\circ}\text{C}$, 1.4 $\Omega^{\circ}\text{C}$ 의 감도를 가지는 특성을 나타냈으며, 각 96.9%, 99.2%, 98.7%의 선형성을 확보하고 있어 온도센서로서 우수한 동작특성을 가지는 것을 확인했다. 또한 습도의 변화에 각 구조 별로 400 $\Omega^{\circ}\text{C}$, 3.4 $\Omega^{\circ}\text{C}$, 3 $\Omega^{\circ}\text{C}$ 의 감도를 가지는 특성을 나타냈으며, 각 96.8%, 93.9%, 99.3%의 선형성을 보여 습도센서로서도 우수한 동작특성을 가지는 것을 확인했다. 본 센서는 구부러지고 휘는 모양으로 유연성은 물론 비교적 저렴하고 간단한 공정기반의 신속한 소자 제작과 경량 및 소형의 제작이 가능한 장점이 있어, 전자기기, 의료·바이오, 농업현장 등의 다양한 분야에의 적용이 기대된다.

REFERENCES

- [1] J. H. Lee, D. Yang, S. Kim and I. Park, "Stretchable strain sensor based on metal nanoparticle thin film for human motion detection & flexible pressure sensing devices", *proc. Of IEEE conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, pp. 2624-2627, Barcelona, 2013.
- [2] H. Kudo, T. Sawada, E. Kazawa, H. Yoshida, Y. Iwasaki, and K. Mitsubayashi, "A flexible and wearable glucose sensor based on functional polymers with Soft-MEMS techniques", *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 22, pp. 558-562, 2006.
- [3] I. Manunza, A. Sulis, and A. Bonfiglio, "Organic semiconductor field effect transistors for unconventional applications: flexible sensors and wearable devices", *Proc. Of International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pp. 3-5, 2006.
- [4] H. Takao, M. Miyasak, H. Hara, A. Miyazaki, T. Kodaira, S. W. B. Tam, S. Inoue, and T. Shimoda, "Flexible semiconductor devices: Fingerprint sensor and electrophoretic display on plastic", *Proc. Of IEEE conf. on the 34th European Solid-State Device Research*, pp. 309-312, 2004.
- [5] H. Dobrinski, M. Wilkens, W. Benecke, and J. Binder, "Flexible microfluidic-device-stamp-system with integrated electrical sensor for real time DNA detection", *Proc. Of IEEE conf. on Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International*, pp. 33-35, 2000.
- [6] R. Liang and Q. M. Wang, "Pulse pressure sensor based on flexible PZT thick-film composite device", *Proc. Of IEEE conf. on International Ultrasonics Symposium*, pp. 1559-1562, 2014.
- [7] A. Traille, A. Coustou, H. A. CNRS, LAAS, S. Kim, J. Kimionis, and M. M. Tentzeris, "Novel inkjet printed modules for sensing, radar and energy harvesting applications", *Proc. Of IEEE conf. on European Microwave Conference*, pp.1-4, 2014.
- [8] S. Kim, A. Traille, H. Lee, H. Aubert, K. Yoshihiro, A. Georgiadis, A. Collado, and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed sensors on paper substrate for agricultural applications", *Proc. Of IEEE conf. on European Microwave Conference*, pp. 866-869, 2013
- [9] S. Y. Yoon, Y. Lee, G. S. Choi, S. H. Baek, and H. S. Chang, "Electricity Pattern Print of PCB by Inkjet Print-Head", *Proc. Of IEEE Conf. on Electrical Machines and Systems*, pp. 1729-1732, 2010.
- [10] S. Y. Yoon, G. S. Choi, S. H. Baek, and K. Yong, "Ink Drop-let Control of Piezoelectric Head Micro Pattern Printing System of FPCB", *Proc. Of IEEE Conf. on Electrical Machines and Systems*, pp. 1708-1710, 2007.
- [11] B. T. Shao, Q. Chen, Y. Amin, J. Hllstedt, R. Liu, H. Tenhunen, and L.-R. Zheng, "Process-dependence of inkjet printed folded dipole antenna for 2.45 GHz RFID tags", *Proc. Of IEEE Conf. on Antennas and Propagation*, pp. 2336-2339, 2009.
- [12] U. Kim, Y. Choi, and J. Choi, "Design of a Loop Antenna with Stubs for RFID Tag", *Proc. Of IEEE Conf. on Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Diego, CA, 2008.
- [13] S. F. Chen, C. H. Huang, J. P. Lu, M. X. Chan, and H. P. D. Shieh, "IER Film and inkjet printing method for full-color transreflective cholesteric LCD", *J. Display Technol.*, Vol. 1, No. 2, pp. 225-229, 2005.
- [14] M. Singh, H. M. Haverinen, P. Dhagat, and G. E. Jabbour, "Inkjet Printing-process and its applications", *Adv. Mater.*, Vol. 22, No. 6, pp. 673-685, 2010.
- [15] P. Calvert, "Inkjet printing for materials and devices", *Chem. Mater.* Vol. 13, pp. 3299-3305, 2001.
- [16] J. Vaillancourt, X. Lu, X. Han and D. C. Janzen, "High-speed thin-film transistor on flexible substrate fabricated at room temperature", *Electron. Lett.*, Vol. 42, No. 23, pp. 1365-1366, 2006
- [17] S. H. Ko, J. Chung, H. Pan, C. P. Grigoropoulos and D. Poulidakos, "Fabrication of multilayer passive and active electric components on polymer using inkjet printing and low temperature laser processing", *Sens. Actuators, A*, Vol. 134, pp. 161-168, 2007.
- [18] S. Seethamraju, A. D. Rao, P. C. Ramamurthy, and G. Madras, "Layer-by-layer assembly of nafion on surllyn with ultrahigh water vapor barrier", *Langmuir*, pp. 14606-14611, 2014.
- [19] S. Seethamraju, P. C. Ramamurthy, and G. Madras, "Organic passivation layer on flexible surllyn substrate for encapsulation organic photovoltaics", *Appl. Phys. Lett.*, No. 105, pp. 104102, 2014.
- [20] G. N. Kopanati, S. Seethamraju, P. C. Ramamurthy, and G. Madras, "Water vapor barrier material by covalent self-assembly for organic device encapsulation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, No. 53, pp. 17894-17900, 2014.
- [21] W. A. Daoud, J. H. Xin, and Y. S. Szeto, "Polyethylene-dioxythiophene coatings for humidity, temperature and

- strain sensing polyamide fibers”, *Sens. Actuators, B*, Vol. 109, pp. 329-333, 2005.
- [22] A.Elschner, *PEDOT : principles and applications of an intrinsically conductive polymer*, Boca Raton, FL : CRC Press, 2011, ch.2, pp.21-30.
- [23] O. Tourillon and F. Garnier, “Effect of Dopant on the Physicochemical and Electrical Properties of Organic Conducting Polymers”, *J. Phys. Chem.*, Vol. 87, pp. 2289-2292, 1983.
- [24] S. Hoshino, M. Yoshida, S. Uemura, T. Kodzasa, N. Takada, T. Kamata, and K. Yase, “Influence of moisture on device characteristics of polythiophene-based field-effect transistors”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 95, No. 9, pp. 5088-5094, 2004.
- [25] C. Lu and H. Meng, “Hole doping by molecular oxygen in organic semiconductors: Band-structure calculations”, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, Vol. 75, pp. 235206 , 2007.
- [26] P. C. Wang, W. K. Lin, S. Y. Hung and H.-J Lu, “Pressure-dependent Variable Resistors Based on Porous Polymeric Foams with Conducting Polymer Thin Films *in situ* Coated on the Interior Surfaces”, *proc. Of IEEE conf. on Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference*, pp.63-66, 2011.