https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.4.339

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

Check for updates

인쇄전자 패턴의 핀홀 측정 방법 개발

김충환[a*]

Development of a Measurement Method for Pinholes in the Printed Patterns of Printed Electronics

Chung Hwan Kim[a*]

[a] *Dept. of Mechanical & Material Engineering Education, Chungnam National Univ.*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	April	2020
Revised	10	July	2020
Accepted	22	July	2020

Keywords:
Printed electronics
Pattern
Pinhole
Measurement

ABSTRACT

In printed electronics technology, the pinholes in the printed pattern voids can affect the quality or performance of printed electronic devices. Therefore, it is important to measure and control the pinholes in printed patterns during the manufacturing process. The pinhole has a three-dimensional (3D) shape and should be measured using a 3D microscope for accurate measurement. However, such equipment is typically too expensive to be acquired by a small-sized company. This paper proposes a measurement method for pinholes in printed patterns, involving pattern images obtained using a relatively inexpensive 2D microscope. The proposed method is based on a pinhole threshold index, which defines the boundary between the pinhole and pattern. The actual measurement results are shown to have varying threshold indices. This research contributes to the advancement of the printed electronics industry.

1. 서 론

인쇄전자(Printed electronics)는 인쇄를 이용하여 전자소자를 생산하는 기술로, 기존의 인쇄 방식인 잉크젯, 그라비어, 플렉소, 코팅 등의 인쇄방식을 이용한다[1,2]. 그러나, 색상을 표현하기 위한 안료(pigment)를 사용하는 기존의 잉크와는 달리 실버나노입자, 실버나노와이어, 전도성 폴리머 등의 기능성 입자를 분산한 형태의 잉크를 사용한다[3,4]. 따라서, 인쇄 속도, 인쇄압, 잉크 점도 등의 인쇄 공정이 기존의 인쇄와는 크게 달라질 뿐만 아니라, 인쇄된 결과물인 패턴도 그 형태와 선폭, 에지 균일도, 두께, 표면조도 등의 기하학적인 특징도 기존 미디어 인쇄 결과와 크게 상이한 경우가 많다[5,6].

특히, 인쇄전자 인쇄 방식에서 그라비어, 플렉소, 잉크젯등의 인쇄공정으로 얻어진 패턴은 공정 조건에 따라 핀홀(pinhole)이 쉽게 발생한다. 이러한 핀홀은 인쇄전자소자의 성능을 저하시켜 품질과 생산성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 가령, 전극의 핀홀은 전자의 이동을 방해하여 전기저항을 상승시키고 열을 발생시키며, 투명 전극의 핀홀은 투명도를 떨어뜨리는 요인이다. 이러한 핀홀은 전기적인 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 기계적인 결함에 해당되어 기계적인 내구성을 저하시킨다[2,7]. 핀홀에 대한 정확한 정보는 인쇄전자공정에서의 인쇄성을 제어하고 관리하는데 매우 중요하며, 이러한 정보는 다양한 패턴의 조합으로 이루어지는 인쇄전자소자의 신뢰성과 성능에 영향을 준다.

따라서, 인쇄전자소자의 품질을 측정하고 품질의 균일성을

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-8584
E-mail address: mech@cnu.ac.kr (Chung Hwan Kim).

측정하기 위해서는 이러한 인쇄전자소자를 구성하는 패턴에서 핀홀의 크기, 분포, 형태를 포함하여 핀홀을 정확하게 정의하고, 이를 바탕으로 정밀하게 측정할 필요가 있다.

핀홀의 측정을 위한 가장 정확한 방법은 3차원 현미경이지만, 이러한 고가의 측정 장치를 구비하여 측정하기에는 산업체에서는 비용적인 어려움이 있다. 따라서, 낮은 비용으로 쉽게 핀홀을 측정할 수 있는 방법에 대한 산업계의 요구에 따라 국제전기표준회의(International Electrotechnical Commission, IEC)의 인쇄전자 표준 분야인 IEC/TC119에서 저가의 2차원 현미경으로부터 얻을 수 있는 2차원 패턴 이미지로부터 핀홀을 측정하는 방법이 최근 제안되었다[8,9]. 이 논문은 핀홀 측정 국제표준 개발에 대한 핵심적인 연구 내용을 다루고 있다. 이 논문의 연구 결과는 인쇄전자 국제 표준을 한국이 주도함과 동시에 인쇄전자 산업 발전을 가속하기 위한 인쇄전자 국제 표준을 소개하며, 이를 통해 산업계와 학계에서 인쇄전자 표준에 관심을 가질 수 있도록 하는 데에 목적이 있다.

2. 인쇄전자 국제표준화 동향

인쇄전자 분야 기술위원회(technical committee)인 TC119가 우리나라 주도로 IEC 산하에 2011년 9월 설립되었으며 우리나라가 간사국의 위치를 확보하였다[5,8]. 이후 4개의 실무위원회(working group, WG)가 구성되어 용어 및 로드맵(WG1), 재료(WG2), 장비(WG3), 인쇄성(WG4), 품질평가(WG5) 분야 별로 활발한 활동 중이며, WG3와 WG4에서 한국의 전문가가 컨비너(convenor)를 맡고 있다. 2020년 4월 현재 총 23개의 표준문서가 출판되었으며[8], 핀홀 측정 표준은 WG4를 통해 진행 중에 있다[9]. 재료 분야에서는 인쇄전자 잉크뿐만 아니라 기판, 인쇄전극의 특성 등의 표준이 제안, 출판되었고, 장비 분야에서는 잉크젯 공정 측정, 롤투롤 프린팅 장비의 제판 정밀도 측정 등의 표준이 출판되었으며, 인쇄성 분야에서는 패턴의 선폭 측정과 에지 측정에 대한 표준 등이 완료되었다. 한편, 품질평가 분야에서는 인쇄전자 소자의 성능 평가가 주를 이루는데, 인쇄전자 반도체, 솔라셀, OLED 조명, 배터리 등 다양한 소자의 성능 측정 표준이 제안되었다[8].

3. 2D 이미지를 이용한 핀홀 측정

핀홀은 Fig. 1(a)와 같이 핀홀 부근에서 패턴의 두께가 점진적으로 변하는 3차원 구조를 갖고 있으며, 2D 이미지로 측정하면 Fig. 1(b)와 같이 패턴과 핀홀에서 픽셀의 명도((brightness)가 다르게 나타나며 핀홀의 경계 부근에서 명도의 단계적차이(gradation)를 보인다. 명도는 가장 어두운 것을 0으로 정의하고 가장 밝은 것을

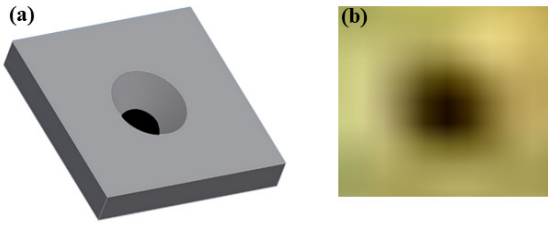

Fig. 1 Images of pinhole (a) 3-D schematic picture and (b) 2-D photo image

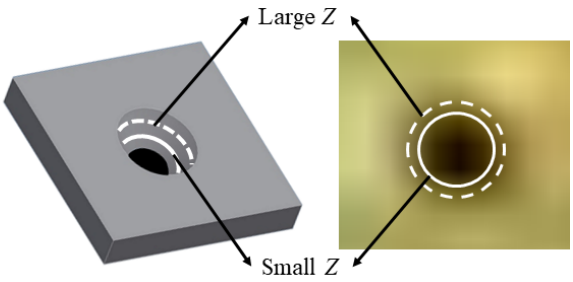

Fig. 2 Effect of pinhole threshold index Z

명도의 구분 단계에 따라 가장 큰 값으로 정의한다. 가령, 8(bit) 단계로 명도를 정의하는 경우 가장 어두운 값이 0, 가장 밝은 값이 255로 정의된다. 따라서 Fig. 2에서 보듯이 핀홀의 경계를 어떻게 설정하는지에 따라 핀홀을 인식하는 경계가 달라지고, 핀홀의 인식 범위, 즉, 측정 민감도가 달라지며 이에 따라 핀홀의 면적과 개수가 달라진다. 이 연구에서는 0에서 1사이의 값을 갖는 핀홀 경계값 지수(threshold index) Z를 정의하였다.

Z는 패턴에서의 핀홀이 인쇄전자 소자에 주는 영향의 정도에 따라 다르게 설정할 수 있다. 가령, 핀홀 부근의 패턴 두께 변화에 매우 민감한 소자의 경우 Z를 크게 설정해야 하며, 핀홀의 유무가 크게 중요하지 않은 소자의 경우 Z를 작게 설정할 수 있다. 단, 측정자는 측정 결과를 이용하는 수요자나 사용자에게 Z 값을 알려주어야 한다.

4. 핀홀 측정 방법 및 단계

4.1 측정 이미지의 획득

본 연구는 인쇄전자 측정 표준을 목적으로 하기 때문에 이미지의 획득 방법에는 제한을 두지 않는다. 즉, 측정에는 기 획득된 이미지를 사용하며, 측정에 사용될 이미지의 해상도와 관련된 정보인 픽셀(pixel) 크기를 측정보고서에 기술함으로써 이미지에 대한 정보를 사용자에게 알려준다. 다만, 픽셀 크기는 측정하고자 하는 최소 핀홀 크기의 절반보다 작아야 하는 규정을 표준 문서에 규정한다. 또한, 측정 이미지의 핀홀 부와 패턴부의 구분을 위해 패턴을 포함하지 않는 배경부를 반드시 포함해야 한다.

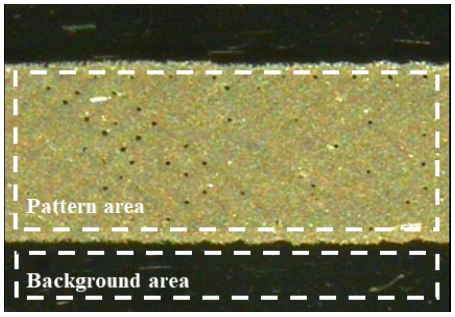

Fig. 3 Pattern area and background area in ROI in image

4.2 측정 절차

준비된 이미지로부터 핀홀을 측정하기 위한 절차는 다음과 같다.

(1) 관심영역(region of interest, ROI) 설정

관심영역은 핀홀을 측정하려는 인쇄 샘플의 전체 혹은 일부 패턴을 포함할 수 있다. ROI는 Fig. 3과 같이 핀홀을 포함한 패턴영역과 배경영역을 반드시 포함해야 한다.

(2) 패턴영역과 배경영역의 정의

Fig. 3과 같이 배경영역은 인쇄 패턴을 포함하지 않는 부분이며, 패턴영역은 배경영역을 제외한 부분으로 핀홀을 포함한다. 이때, 배경영역의 명도는 핀홀 경계값(threshold)을 정의하는데 사용된다.

(3) 패턴영역과 배경영역 픽셀의 명도 측정

패턴영역과 배경영역을 구성하는 모든 픽셀의 명도를 측정한다. 픽셀의 명도를 측정하는 데에는 상용 소프트웨어 혹은 자체적으로 개발한 소프트웨어를 사용할 수 있다. 측정 표준은 특정 소프트웨어를 규정할 수 없기 때문에 측정자가 개별적으로 선택하여 사용한다. 모든 소프트웨어에서는 픽셀의 명도를 동일한 값으로 정하기 때문에 임의의 소프트웨어를 사용해도 동일한 명도 값을 얻는다. 핀홀의 깊이에 따라 핀홀을 구성하는 픽셀의 명도가 달라지며, 이를 통해 정상적인 패턴과 핀홀을 구분하게 된다. Fig. 4는 패턴영역과 배경영역을 구성하는 픽셀의 휘도 분포도이다. 이 데이터로부터 패턴영역 휘도의 평균값 B_p과 배경영역 휘도의 평균값 B_b을 계산할 수 있다.

(4) 핀홀 경계값 계산

핀홀의 패턴과 구분하는 핀홀 경계값은 식 (1)로부터 계산된다.

$$B_r = B_b + (B_p - B_b) \times Z \tag{1}$$

여기서 Z는 핀홀 경계값 지수(index)로, 핀홀의 측정 민감 수준

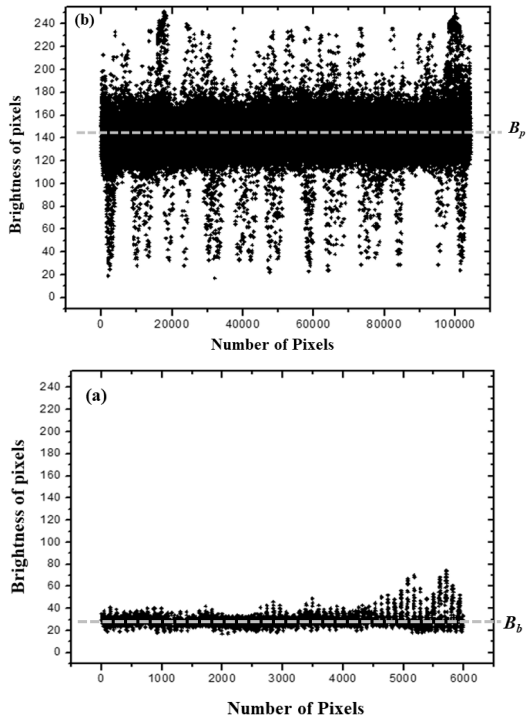

Fig. 4 Brightness of pixels of image (a) Pattern area and (b) Background area

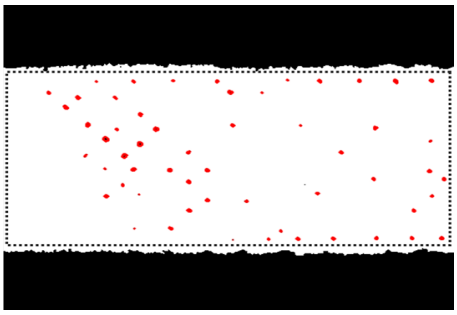

Fig. 5 Binarized image with pinholes

에 따라 측정자가 결정하는 값으로, 측정보고서에 제시한다.

(5) 핀홀의 측정

계산된 핀홀 경계값 B_r을 기준으로 B_r보다 낮은 휘도를 갖는 픽셀은 핀홀로, B_r보다 높은 휘도를 갖는 픽셀은 패턴으로 인식되며, 이를 바탕으로 이미지를 이진화(binarization) 한다. Fig. 5는 이진화된 이미지이다.

(6) 핀홀 관련 속성의 계산

측정된 패턴의 핀홀 수준을 평가하기 위하여 다음의 속성값을 계산하고 리포트 한다.

① 핀홀의 수 N_p

핀홀 픽셀의 집합을 인식하고 그 수를 계산한다.

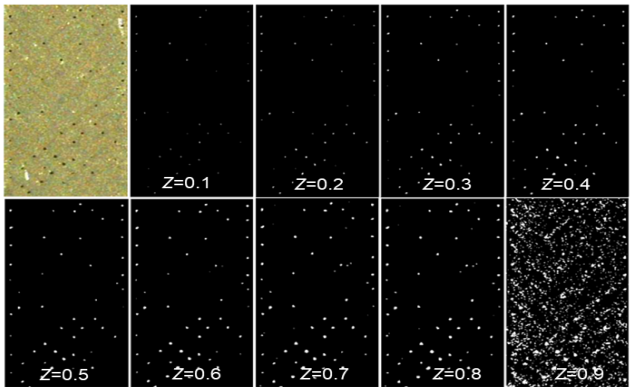

Fig. 6 Binarized images of the same pattern with pinholes with varying Z

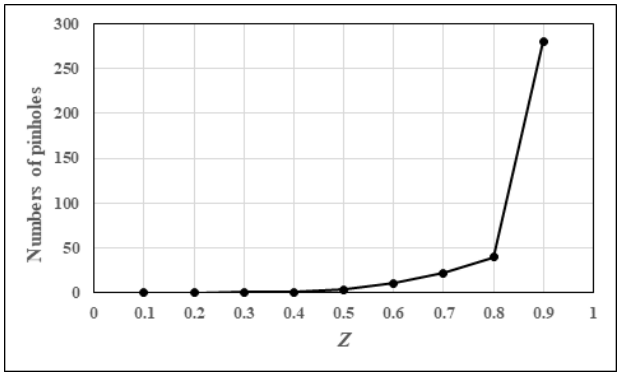

Fig. 7 Dependence of numbers of pinholes on Z

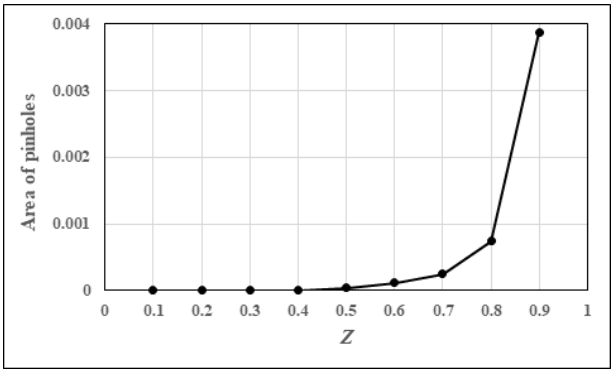

Fig. 8 Dependence of area of pinholes on Z

② 최대 핀홀의 크기 P_M

가장 큰 핀홀의 픽셀수를 이용하여 면적을 계산한다.

③ 핀홀의 평균 면적 P_m

핀홀들의 평균 면적을 계산한다.

④ 전체 핀홀 면적 P_A

전체 핀홀을 구성하는 픽셀수로부터 전체 핀홀 면적을 계산한다.

⑤ 핀홀 비율 R_p

전체 패턴 면적 대비 핀홀 면적을 계산한다.

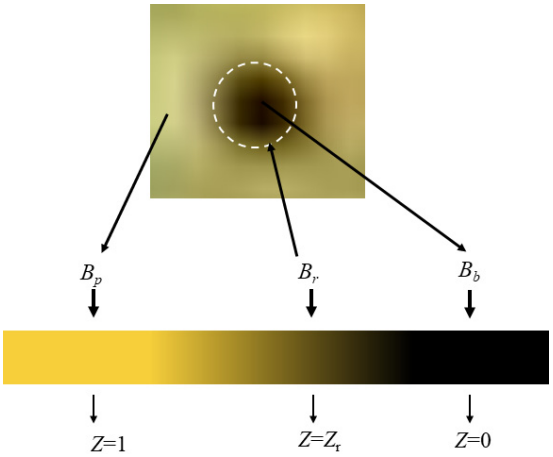

Fig. 9 Dependence of B_r on Z

5. 핀홀 경계값 지수의 효과

핀홀 경계값 지수에 따라 핀홀의 인식 민감도를 고찰하였다. Fig. 6은 동일한 이미지를 서로 다른 Z로 설정하여 측정한 결과를 보여주며, Fig. 7과 Fig. 8은 각각 Z에 따른 핀홀의 개수와 넓이의 변화를 보여준다. 여기에서 보듯이, Z=0.8까지는 측정되는 핀홀의 개수와 넓이는 서서히 증가하지만, Z=0.8 이후 급격히 증가한다. 이는 Z=0.8가 적정한 수준의 핀홀 경계값 지수임을 의미한다. 특히, Z=0.8 이상으로 Z를 설정할 경우 Fig. 6에서도 보듯이 과도하게 핀홀을 인식할 수 있으므로 Z=0.8 이상의 핀홀 경계값 지수는 잘못된 핀홀의 측정 결과를 얻을 수 있다. 이러한 것은 Z 값에 따른 핀홀 경계 휘도인 B_r의 변화를 설명하는 Fig. 9에서 자세히 확인할 수 있다. Fig. 9은 주어진 Z과 계산된 B_p 및 B_b로부터 계산된 B_r이 갖는 의미를 설명한 그림이다. 패턴의 평균 휘도 B_p, 배경부의 평균 휘도 B_b, 설정한 Z_r에 대하여 계산된 B_r은 핀홀의 경계를 결정하는 값이다. Z=0일 경우 핀홀 경계는 B_b가 되어 배경 픽셀의 평균 휘도보다 낮은 픽셀은 모두 핀홀로 인식하며, Z=1일 경우 핀홀 경계는 B_p가 되어 패턴 픽셀의 평균 휘도보다 낮은 픽셀은 모두 핀홀로 인식하게 된다. 따라서, Z가 1에 가까울수록 핀홀을 과도하게 인식할 수 있으며, Z가 0에 가까울수록 핀홀을 과소하게 인식할 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 인쇄전자 패턴의 핀홀을 2차원 이미지로부터 측정하는 측정 표준을 제안하였다. 핀홀은 패턴과의 경계면에서 패턴 두께가 감소하는 3차원 형상을 보이기 때문에 정밀한 측정을 위해서는 3차원 현미경과 같은 고가의 장치를 필요로 한다. 그러나

이 연구에서는 핀홀 경계값을 설정할 수 있는 경계값 지수를 제안하고, 이를 바탕으로 설정된 핀홀의 경계를 이용하여 핀홀을 인식하는 측정 과정을 제시하였다. 한편, 핀홀 경계값 지수에 따른 핀홀의 인식 정도를 고찰하여, 적정한 수준의 핀홀 경계값 지수를 찾을 수 있음을 보였다.

이 연구는 고가의 3차원 현미경을 이용하지 않고 저가의 2차원 현미경으로부터 얻을 수 있는 이미지로부터 핀홀을 측정할 수 있음을 보였으며, 인쇄전자 패턴의 품질 관리를 보다 쉽고 저렴하게 수행함으로써 인쇄전자 산업의 발전에 기여하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구진흥사업에 의해 지원되었음.

References

[1] Kim, C., Jeon, S. W., Kim, C. H., 2019, Reduction of Linearly Varying Term of Register Errors Using a Dancer System in Roll-to-Roll Printing Equipment for Printed Electronics, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 20 1485-1493, https://doi.org/10.1007/s12541-019-00157-2.

[2] Kim, C., Kim, C. H., 2018, Universal Testing Apparatus Implementing Various Repetitive Mechanical Deformations to Evaluate the Reliability of Flexible Electronic Devices, Micromachines., 9:10 492, https://doi.org/10.3390/mi9100492.

[3] Salmerón, J. F., Molina-Lopez, F., Briand, D., Ruan, J. J., Rivadeneyra, A., Carvajal, M. A., Capitan-Vallvey, L. F., de Rooij, N. F., Palma, A. J., 2008, Properties and Printability of Inkjet and Screen-printed Silver Patterns for RFID Antennas, J. Electron. Mater., 43 604-617, https://doi.org/10.1007/s11664-013-2893-4.

[4] Park, S., Vosguerichian, M., Bao, Z., 2003, A Review of Fabrication and Applications of Carbon Nanotube Film-based Flexible Electronics, Nanoscale., 5 1727-1752, https://doi.org/10.1039/c3nr33560g.

[5] Jeon, S. W., Kim, C., Park, J. V-C., Kim, D. S., Kim, C. H., 2014, Measurement of Geometric Properties of Printed Patterns and Evaluation of their Printability, J. Korean Soc. Precis. Eng., 31:11 981-986, https://doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.11.981.

[6] Lee, S. Y., Kim, C., Kim, Kim, C. H., 2017, Optimization of Printing Conditions Using Design Experiments for Minimization of Resistances of Electrodes in Roll-to-roll Gravure Printing Process, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 26:4 351-356, https://doi.org/10.7735/ksmte.2017.26.4.351.

[7] Kim, B. J., Choi, I. S., Joo, Y. C., 2016, Effect of Cyclic Outer and Inner Bending on the Fatigue Behavior of a Multi-layer Metal Film on a Polymer Substrate, Jpn. J. Appl. Phys., 06JF01, https://doi.org/10.7567/JJAP.55.06JF01.

[8] International Electrotechnical Commission(IEC), 2020, TC 119 Printed Electronics, <https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:23:9122893170041::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:8679,25>.

[9] IEC, 2020, Printed Electronics - Part 402-3: Printability - Measurement of Qualities - Voids in Printed Pattern Using Two-dimensional Optical Image, 119/298/CDV 62899-402-3, Geneva.

Chung Hwan Kim
Professor in the Department of Mechanical & Material Engineering Education, Chungnam National University. He is also working as the convener of working group of international standardization for Printed Electronics, IEC TC119.
E-mail: mech@cnu.ac.kr