

## 전기저항형 금속산화물 센서의 인쇄공정 최적화에 관한 연구

이석환<sup>1</sup>, 구지은<sup>3</sup>, 이문진<sup>1,4</sup>, 정정열<sup>1,5</sup>, 장지호<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

<sup>2</sup> 한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자소재공학전공

<sup>3</sup> 일본 물질재료연구기구 재료나노구조공학 국제센터

<sup>4</sup> 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양안전연구부

<sup>5</sup> 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

## Optimization of Printing Process for the Development of Metal-oxide Resistivity Sensor

Seokhwan Lee<sup>1</sup>, Jieun Koo<sup>3</sup>, Moonjin Lee<sup>1,4</sup>, Jung-Yeul Jung<sup>1,5</sup>, and Jiho Chang<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup> Department of OST School, Korea Maritime and Ocean University Busan 21040, Korea

<sup>2</sup> Major of Electronic Material Engineering, Korea Maritime and Ocean University Busan 21040, Korea

<sup>3</sup> International Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA), National Institute for Materials Science (NIMS), Ibaraki 08220, Japan

<sup>4</sup> Division of Maritime Safety Research, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KIOST, Daejeon 25040, Korea

<sup>5</sup> Technology Center for Offshore Plant Industries, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KIOST, Daejeon 25040, Korea

(Received March 9, 2016; Revised April 27, 2016; Accepted April 28, 2016)

**Abstract:** In this paper, we have studied about the optimum fabrication condition of the printed Indium Tin Oxide (ITO) layers for the electrical resistance-type sensor application. We have investigated on the substrates surface treatments, mixing ratio of organic binder/ITO powder, and viscosity of the printing paste to determine the optimum condition of the screen printed ITO layer. Also, we found that the printing condition is closely related with the sensor performance. To know the feasibility of printed ITO layer as an electrical resistance-type sensor, we have fabricated the ITO sensors with a printed and sputtered ITO layers. The printed ITO films revealed  $10^2$  times higher sensitivity than the sputtered ITO layer. Also, the sputtered ITO layer exhibited an operating temperature of  $127^\circ\text{C}$  at the operating voltage of 5 V. While, in case of the printed ITO layer showed the operating temperature of  $27.6^\circ\text{C}$  in high operating voltage of 30 V. We found that the printed ITO layer is suitable for the various sensor applications.

**Keywords:** Indium Tin Oxide, Gas sensor, Fire sensor

### 1. 서 론

a. Corresponding author; [jiho\\_chang@kmou.ac.kr](mailto:jiho_chang@kmou.ac.kr)

Copyright ©2016 KIEEME. All rights reserved.  
 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.

다양한 센서 재료 중에서도 금속 산화물은 높은 감도, 뛰어난 응답속도와 안정성을 가져 센서 재료로서 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적인 금속산화물로는

ZnO, SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 등이 있으며, 전기 저항형 (electrical resistor) 센서로 구성하였을 경우 액체, 기체, 광 신호 등 다양한 물리량의 검출이 가능하다 [1-7]. 이러한 금속 산화물 중에서도 ITO (indium tin oxide)는 뛰어난 전도성과 넓은 밴드 갭을 가지고 있고, 화학적으로 매우 안정적인 구조를 지니고 있다 [8]. 또한, 생산성 및 재현성이 뛰어난 인쇄 전자 기법을 이용할 경우 폭 넓은 응용이 기대되지만, 일반적인 박막제작 공정과 다르게 인쇄 기법의 종류가 매우 다양하여 각각의 기법에 관한 체계적인 연구가 부족한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 스크린 프린팅 기법을 이용한 ITO 인쇄 박막 제작 공정에 대한 체계적인 조사를 진행 하여, 센서 제작에 최적화된 인쇄 공정을 정립하였다. 이를 위하여 기판 표면의 전처리 방법, 인쇄 가능한 최소 선폭의 결정, 인쇄용 바인더의 점도와 인쇄 정밀도의 상관관계 등을 연구하였다. 또한 인쇄공정 조건이 센서의 동작 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 ITO 인쇄박막 센서의 응용 가능성을 알아보기 위하여 스테퍼로 제작한 ITO 박막을 이용한 센서와 특성을 비교 검토하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 스크린 인쇄기법을 이용하여 박막을 제작하였다. 스크린 인쇄기법은 다양한 응용이 가능한 인쇄전자 기법으로 프랑스의 F. Garnier 그룹에서는 스크린 인쇄법으로 형성된 전계형 유기트랜지스터를 제작·보고하였고 [9], 미국 Stanford 대학의 Z. Bao 그룹에서도 스크린 인쇄법으로 유기박막트랜지스터를 제작·보고하였다 [10]. 스크린 인쇄법은 설비가 간단하고 제판 및 제작이 쉽고, 경제성 및 소형화에 있어서도 장점을 지닌다. 따라서 유/무기 재료를 활용한 인쇄전자공학 소자 제작에 있어 향후 다양한 응용이 기대가 되는 박막제작 기법이다 [11].

인쇄박막에 사용된 ITO 페이스트는 상용화된 분말 (90% In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% SnO<sub>2</sub>)과 유기 바인더 (ethyl cellulose +  $\alpha$ -terpineol)를 혼합하여 제작하였다. 본 연구에 앞서, ITO 분말은 TEM을 이용하여 분석한 결과, 입자의 평균 직경이 38.5 nm, 표준편차는 5.8 nm 이며 분산은 35.2 nm인 것을 사용하였다 [12]. 기판으로는 약 25 mm × 25 mm, 1 mm 두께의 석영기판을 이용하였다. 기판 표면을 세척 후, 인쇄용 마

스크를 이용하여 ITO 인쇄박막을 제작하였다. 인쇄 후에는 ITO 인쇄박막 내의 유기 바인더를 제거 (디바인딩; debinding)하기 위하여 200°C 정도의 비교적 낮은 온도에서 30분간 열처리를 하였다.

스크린 인쇄 기법을 최적화 및 평가를 위해 세척된 기판의 표면에너지는 접촉각 측정기를 이용하여 측정하였다. ITO 페이스트의 점도는 점도계를 이용하여 측정하였으며, 인쇄박막의 표면과 인쇄 정밀도의 평가는 광학현미경을 이용하였다.

센서 소자로서의 특성평가는 ITO 인쇄박막과 스퍼터로 성장된 ITO 박막 (Sn 농도: ~10%, ITO 박막 두께: ~200 nm)을 사용하여 비교 분석하였다. 우리의 일전의 연구 과정과 결과를 바탕으로, 두 박막을 이용하여 전기저항형 센서를 구성하고 실온에서 전류-전압 측정이 가능한 I-V source meter를 이용하였다 [12]. 센서 동작 특성 측정 시 5 V 직류바이어스를 인가하여 저항 변화의 형태로 관찰하였다. 또한, 동작 시 센서의 발열 특성에 관한 평가는 FLIR 열화상 카메라를 이용하여 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 석영 기판의 표면 상태의 영향을 조사하기 위해 일반적인 유기세척 방법을 사용한 경우와 이소프로필 알콜 (isopropyl alcohol)을 이용한 세척의 경우의 인쇄 패턴의 형상과 표면에너지의 변화를 비교한 결과이다. 이소프로필 알콜은 무극성 물질을 용해하고 유리기판을 세척을 할 경우 유리의 유막을 제거하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다 [13,14].

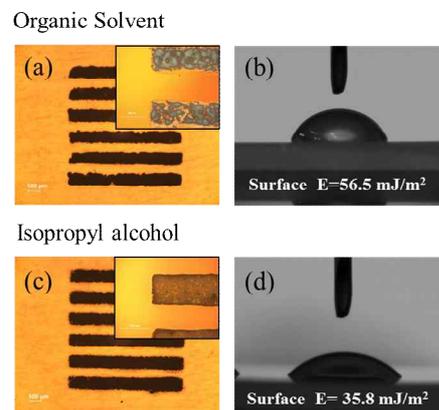


Fig. 1. Optical microscope images of printed ITO layers.

유기세척은 일반적인 방법에 따라 석영기판을 아세톤, 메탄올 그리고 초순수 (deionized water, DI)의 순서로 각각 15분 동안 초음파 세척조를 이용하여 세척하였다. 또한 이소프로필 알콜을 이용한 경우는 이소프로필 알콜과 초순수의 순으로 각각 15분 동안 초음파 세척소에서 세척하였다. 각각의 세척을 시행한 후, 동일한 페이스트를 이용하여 동일한 패턴으로 인쇄를 진행하여 비교하였다.

먼저 일반적인 유기세척 방법으로 세척한 후에 인쇄된 패턴 형상은 부분적 끊어짐과 같은 형상이 관찰되었고 (그림 1(a)),  $56.5 \text{ mJ/m}^2$ 의 표면에너지를 값을 확인하였다 (그림 1(b)). 반면, 이소프로필 알콜 세척 후에 인쇄된 패턴 형상에서는 끊어짐이 없는 인쇄 패턴 (그림 1(c))과  $35.8 \text{ mJ/m}^2$ 의 감소된 표면에너지 값을 확인하였다 (그림 1(d)). 이러한 결과는 일반적인 박막성장과는 구분된다. 일반적인 박막성장에선 기판의 표면에너지가 낮으면 섬형 성장 (island growth)이 진행되기 쉬워져 박막의 품질 저하로 연결될 것으로 예상되는데 반하여, 본 실험에서는 낮은 표면에너지를 갖는 기판 상에서 상대적으로 정밀한 인쇄와 균일한 박막이 얻어졌다. 이러한 결과는 레벨링에 의한 것으로 설명할 수 있다 [15]. 인쇄 과정 중 페이스트는 스크린을 통해 공급된다. 이때 페이스트의 표면장력 ( $\gamma_p$ )은 스크린의 표면 에너지 ( $\gamma_{scr}$ )보다 커야 스크린에 대한 부착력이 감소하며, 기판의 표면 ( $\gamma_s$ )으로의 인쇄가 가능하다. 또한 기판의 표면에너지는 페이스트의 표면장력 보다 커야 기판과의 부착력이 발생하여 패턴 형성이 가능하다. 따라서  $\gamma_s < \gamma_p < \gamma_{scr}$  순의 관계가 필요하다. 하지만, 기판의 표면에너지가 너무 크면 ( $\gamma_s > \gamma_p$ ), 인쇄 패턴 속에서 페이스트가 평탄한 막을 형성하지 못하고 정밀한 인쇄가 되지 않는 현상이 일어나게 된다는 것을 시사하고 있다. 즉, 인쇄박막의 경우 기판 재료의 변화뿐만 아니라, 기판 재료의 표면 세척 방법의 변화, 페이스트의 점도 변화, 무기 재료 분말의 입도 등의 작은 변화에도 최적의 인쇄박막 제작 조건이 달라진다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 180 dPa·s의 점도를 갖는 페이스트를 사용하고 인쇄용 마스크의 선폭을 변화할 때 인쇄 정밀도의 변화를 관찰한 결과이다. 그림 2(a)와 같이 인쇄된 패턴은 인쇄된 패턴과 용매의 번짐 효과에 의한 약  $50 \mu\text{m}$  정도의 failure distance ( $d_{fail}$ )가 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 페이스트의 표면장력과 스크린의 표면에너지의 상호작용에 의해 인쇄 패턴의 질을 결정하게 된다. 그 척도 중의

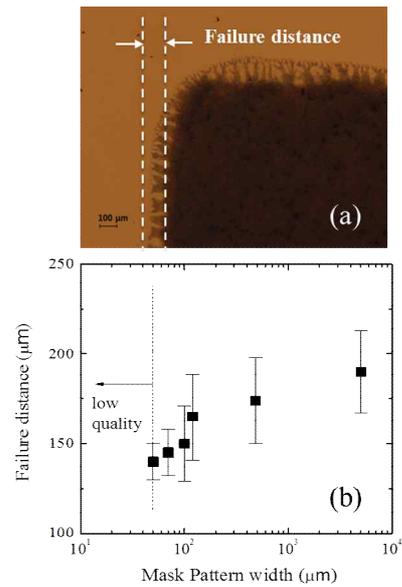


Fig. 2. (a) Printed ITO pattern image, (b) various failure distance of printed ITO pattern dependence on mask pattern width.

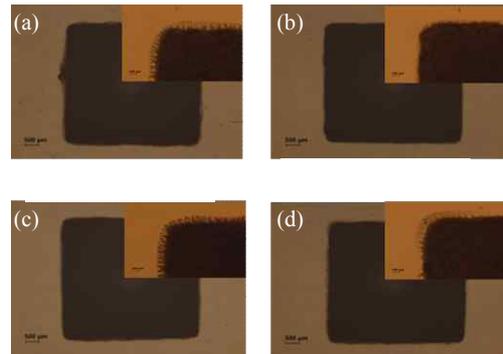


Fig. 3. The variation of screen printed pattern shape depending on the paste viscosity. (a) 180 dPa·s, (b) 260 dPa·s, (c) 290 dPa·s, and (d) 365 dPa·s.

하나로서 인쇄된 패턴의 번짐 정도를 failure distance ( $d_{fail}$ )로 정의하여, 페이스트에 따른 인쇄정밀도를 확인하였다.

그림 2(b)는 인쇄 마스크 패턴 선폭이 변화할 때  $d_{fail}$ 의 변화를 관찰한 결과이다. 인쇄 마스크 패턴 선폭이 작아질수록  $d_{fail}$  또한 감소하는 것을 알 수 있으며,  $50 \mu\text{m}$  이하의 마스크 선폭에서는 패턴간의 간섭 (중첩)이 일어나 인쇄가 되지 않는 결과를 확인하였다.

이 결과로부터 위에서 설명한  $d_{fail}$ 이 인쇄 정밀도를 결정한다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 스크린 인쇄기술에서는 선폭 50  $\mu\text{m}$  정도의 인쇄 정밀도가 구현되어 있으며, 이보다 미세 패턴이 필요한 경우에는 그라비아 오프셋 (Gravure-offset) 방식 등이 이용된다 [16]. 따라서 본 연구의 인쇄 기술은 일반적 스크린 인쇄 기술의 최소선폭 결과와 유사한 수준인 것으로 판단할 수 있다. 또한 정밀한 인쇄를 구현하기 위해서는 페이스트의 혼합비를 변화시켜 페이스트의 점도를 최적화 하는 것이 중요함을 알 수 있다.

그림 3은 위에서 예측한 바와 같이 페이스트의 점성을 달리했을 때의 인쇄된 형상의 광학 현미경 사진이다. 모두 동일한 패턴을 사용하였고 ITO 분말과 유기 바인더의 혼합비를 바꿔가며 페이스트의 점성을 180~365 dPas로 달리 했을 때 관찰한 결과이다. 이 결과, 260 dPas의 점도일 때  $d_{fail}$ 가 20  $\mu\text{m}$  정도로 최소화되는 것을 알 수 있었다. 즉, 점도를 최적화함에 따라 인쇄 정밀도가 개선되는 효과가 기대됨을 알 수 있었다.

인쇄 정밀도는 미세 패턴의 형성 가능성뿐만 아니라 의도된 제원과 형상의 패턴을 충실히 구현할 수 있는 가라는 관점에서도 정의될 수 있다. 따라서 마스크 패턴 상의 선폭이 기판 상에 정확히 구현되는지를 전사율 (transfer rate; %)로 정의하고 다양한 무기재료 분말에 대해서 페이스트의 점도 변화에 따른 전사율의 변화 정도를 조사하였다. 먼저 전사율은 아래 식 (1)과 정의하였다.

$$Tr = \text{Transferrate} (\%) = \frac{D_{\text{print}}}{D_{\text{mask}}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서,  $D_{\text{print}}$ 는 인쇄된 패턴의 간격(선폭),  $D_{\text{mask}}$ 는 스크린 마스크의 패턴 간격(선폭)이다.

그림 4는 ITO (입도=38.5 nm),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (입도=44.5 nm), ZnO (입도=40.5 nm),  $\text{SiO}_x$  (입도=45.5 nm)의 다양한 금속산화물 페이스트의 점도를 변화시켰을 때의 전사율을 비교한 그래프이다. 페이스트 점도는 150에서 400 dPas까지 변화를 시켰으며, 각각의 전사율을 측정하였다. 페이스트의 점도와 물성에 따라 서로 다른 점도에서 최적화된 전사율을 확인할 수 있는데, ITO는 260 dPas,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 280 dPas, ZnO는 280 dPas,  $\text{SiO}_x$ 은 285 dPas에서 가장 높은 전사율을 확인하였다.

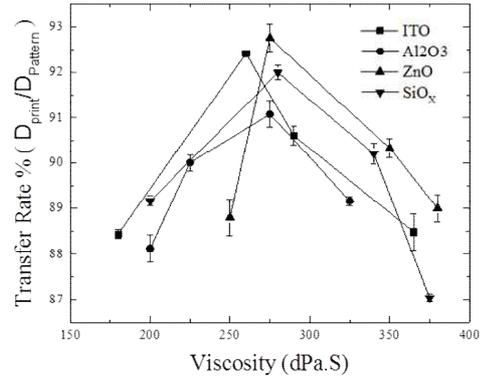


Fig. 4. The variation of transfer rate along with the paste viscosity.

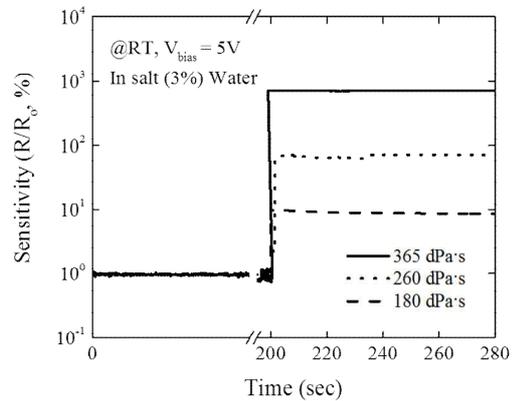
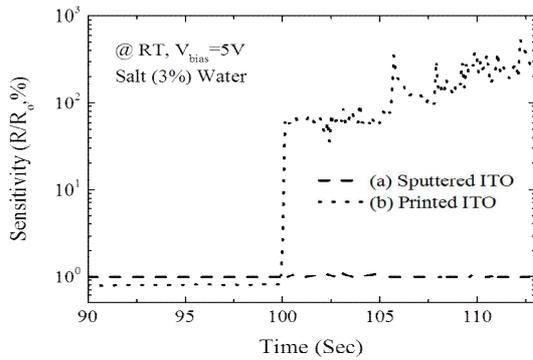


Fig. 5. Liquid sensing properties of printed ITO sensor.

그리고 각각의 오차 범위 (error range)는 0.5% 내외였다. (ITO : 0.2%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  : 0.3%, ZnO : 0.24%,  $\text{SiO}_x$  : 0.17%)

이렇게 각각의 물질별로 최적 전사율을 나타내는 점도가 다른 이유는 분말의 입도 (particle size), 유동성 (flowability)과 마모성 (grainability) 등이 여러 요인으로 작용될 수 있지만, 주된 이유는 입도가 다른 각각의 분말이 갖는 표면에너지의 차이 때문으로 판단되었다. 정밀한 인쇄 패턴의 형성을 위해서는 페이스트 점도의 최적화가 반드시 필요함을 알 수 있다.

그림 5는 점도의 변화가 센서의 동작 특성에 미치는 영향을 관찰한 결과이다. 우선 서로 다른 점도를 갖는 ITO 페이스트를 사용하여 sample-A (점도=180 dPa.s), sample-B (점도=260 dPa.s), sample-C (점도=365 dPa.s) 세 가지 시료를 제작하였고, 이를 이용하

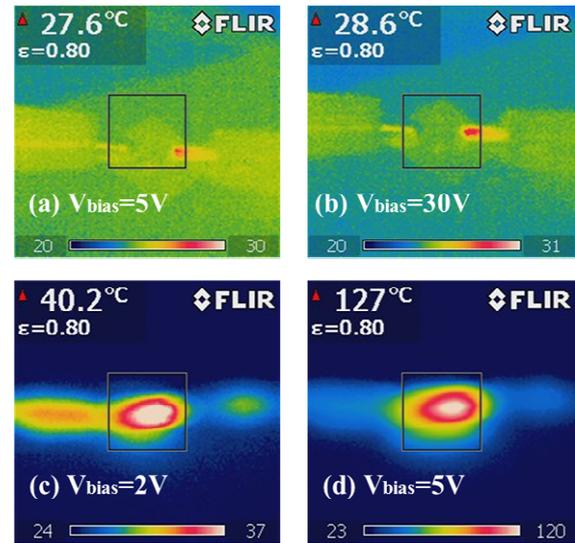


**Fig. 6.** Comparison of sensing properties of sputtered and printed ITO layers.

여 센서를 제작하여 각각의 센서에 동일한 양의 염수를 접촉시켜 센서 감도의 변화를 평가하였다. 그림에서 보듯이 A>B>C의 순으로 높은 감도를 보였다. 이러한 결과는 가장 정밀한 인쇄가 가능한 sample-B보다 인쇄 정밀도는 낮지만 sample-A가 높은 감도를 보이는 결과로 인쇄 공정의 최적화에 소자 특성의 변화도 고려되어야 함을 시사하고 있다.

이러한 결과는 인쇄박막 내 입자간 평균 거리의 변화로 고찰할 수 있다. 인쇄박막의 전기저항은 결정 경계의 산란에 의해서 결정되는 것으로 설명할 수 있다. 이런 모델을 Mott-다변위도약 모델 (Mott-variable range hopping model, VRH model)이라고 하는데 [17], 페이스트 점도의 변화에 따라서 인쇄박막 내의 입자간 평균거리가 변화하면 전하의 평균 도약거리가 변화하여 전도성이 달라지므로 전기저항형 센서를 구성하였을 경우 감도의 변화가 관찰되는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 센서 응용을 목적으로 스크린 인쇄 공정을 적용할 경우에는 단순히 정밀한 인쇄가 가능한 조건의 결정이 아니라 센서의 동작 특성이 최적화될 수 있는 조건을 동시에 검토하는 것이 필요함을 알 수 있다.

마지막으로 본 연구에서 제작한 ITO 인쇄박막을 사용한 센서의 동작 성능을 검토하기 위하여, 스퍼터로 제작된 ITO박막을 이용하여 동일한 형태의 센서를 제작하고 두 가지 센서의 동작 특성을 비교하였다. 두 센서의 검출부 면적은 15 mm×15 mm로 동일하게 하였고, 센서 검출부 표면에 염수 (3%)를 접촉시켜서 전기저항의 변화를 확인하였다. 소자 제작 전에 측정된 박막의 전기적 특성은 ITO 인쇄박막의 비저항은 21 Ω·cm, 이동도는 0.16 cm<sup>2</sup>/Vs였고, 스퍼터로 제작된 ITO 박막의 경우에는 비저항이 0.049 Ω·cm, 이동도는 95 cm<sup>2</sup>/Vs였다.



**Fig. 7.** Comparison of sensing properties of sputtered and printed ITO layers.

그림 6은 두 가지 센서의 감도 변화를 측정된 결과이다. 두 가지 센서 모두 염수 접촉 시 저항의 변화를 관찰할 수 있었다. 인쇄박막 ITO 센서의 경우 평균 감도 1.24, 스퍼터로 제작한 ITO 센서의 경우 평균 감도가 1.927로 확인되었다. 감도의 관점에서 보면 ITO 인쇄박막으로 제작한 센서가 100배 이상의 높은 감도를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 인쇄박막의 경우 넓은 접촉면적을 가지므로 센서 동작 시 필요한 전기저항의 변화를 극대화 할 수 있기 때문으로 판단되며, 인쇄박막을 이용할 때 높은 감도의 검출 성능을 기대할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한, 앞서 언급된 바와 같이 스퍼터로 제작한 ITO 센서는 높은 이동도, 낮은 비저항을 가지고 있다. ITO와 전해질용액이 만나는 경우, ITO 표면에 있던 전자 트랩 (electron trap)을 형성하던 산소들이 전해질과 만나 환원반응이 주로 일어나게 된다. 이 반응으로 ITO의 전기 전도도가 증가하게 되고, 저항의 감소로서 측정된다. 그래서 그림 6의 반응처럼 저항변화의 차이가 크게 일어나는 것을 알 수 있다 [12].

또한 그림 7은 두 가지 다른 ITO 박막을 사용한 센서의 동작 시 발열 특성을 조사한 결과이다. (a)와 (b)는 각각 V\_bias = 5 V, V\_bias = 30 V일 때의 ITO 인쇄박막의 발열 특성이고, (c)와 (d)는 각각 V\_bias = 2 V, V\_bias = 5 V일 때의 스퍼터로 제작된 ITO 박막의 발열 특성이다. 스퍼터로 제작된 박막은 동작 중 높은 발열이 일어나

지만, 인쇄박막의 경우에는 30 V까지 인가전압을 높여도 무시할 수 있는 정도의 발열만 관찰되었다. 전기저항형 센서의 동작에서 센서의 발열은 감도의 변화를 일으키고 센서의 전달 특성을 왜곡하는 요인으로 작용할 수 있어 가능한 억제되는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 ITO 인쇄박막의 경우가 센서로서의 더 적합한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ITO 인쇄박막을 이용한 센서 제작과 응용을 목적으로 스크린인쇄 공정을 최적화 하였다. 기판의 표면에너지의 변화에 인쇄 정밀도가 변화함을 알 수 있었고, 인쇄 공정으로 제작 가능한 최소 선폭은 불량거리( $d_{fail}$ )에 따라 결정되며, 전사율은 페이스트의 점도에 의존함을 알 수 있었다. 또한 금속산화물 분말 결정의 종류에 따라 동일한 혼합비에도 페이스트의 점도가 변화함을 확인하였다. 또한 이런 조건이 센서의 감도와도 연관됨을 확인하였다. 이런 조건을 고려하여 최적화된 조건에서 제작한 ITO 인쇄박막 센서의 경우 스퍼터로 제작된 ITO 박막과 비교할 때 높은 감도와 낮은 발열 특성을 보여 센서 응용에 적합함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(과제명 : 위험·유해물질(HNS)사고 관리기술개발)이다.

#### REFERENCES

- [1] S. Bai, W. Wu, Y. Qin, N. Cui, D. J. Bayerl, and X. Wang, *Advanced Functional Materials*, **21**, 4464 (2010).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201101319>]
- [2] M. Batzill, *Sensors*, **6**, 1345 (2006).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s6101345>]
- [3] H. Chen, H. Linfeng F. Xiaosheng, and W. Limin, *Advanced Functional Materials*, **22**, 1229 (2012).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201102506>]
- [4] L. Qin, P. S. Dutta, and S. Sawyer, *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 045005 (2012).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/27/4/045005>]
- [5] M. Batzill and D. Ulrike, *Prog. Surf. Sci.*, **79**, 47 (2005).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progsurf.2005.09.002>]
- [6] V. Elena, P. M. Laurence, F. Fresnel, J. R. James, G. Bernardo, W. Hongxia, C. Larisa, and D. Halina, *Sensors and Actuators A: Physical*, **171**, 87 (2011).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.07.005> Diebold]
- [7] M. Nistor, J. Perriere, C. T. Heber, and W. Seiler, *Journal of Physics. Condensed Matter : an Institute of Physics*, **22**, 045006 (2010).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/22/4/045006>]
- [8] J. Koo, S. Park, W. Lee, Y. Cho, H. Lee, S. Lee, and J. Chang, *Physica Status Solidi C*, **10**, 873 (2013).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.201200617>]
- [9] F. Garnier, R. Hajlaoui, A. Yassar, and P. Srivastava, *Science*, **265**, 1684 (1994).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.265.5179.1684>]
- [10] Z. Bao, Y. Fen, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, *Chem. Mater.*, **9**, 1299 (1997).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/cm9701163>]
- [11] H. Lee and Y. Chang, *Polymer Science and Technology*, **22**, 237 (2011).
- [12] S. H. Lee, J. Koo, S. Jung, M. Lee, J. Y. Jung, and J. Chang, *Proc. of SPIE 9655, Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference*, 96553 (2015).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2193885>]
- [13] M. Fang, A. Andrey, K. V. Rao, K. A. Andrei, and B. Lyubov, *RSC Advances*, **3**, 19501 (2013).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C3RA40487K>]
- [14] E. M. Harnett, J. Alderman, and T. Wood, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **55**, 90 (2007).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2006.11.021>]
- [15] M. Y. Lee, Ph. D. Thesis, Pukyong National University, Seoul (2008).
- [16] S. Nam, *The Monthly Packaging World*, **209**, 58 (2010).
- [17] S.S.N. Bharadwaja, C. Venkatasubramanian, N. Fieldhouse, S. Ashok, M. W. Horn, and T. N. Jackson, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 222110 (2009).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3139864>]