

# 수중 유해물질 검출용 금속산화물 인쇄박막 센서의 최적화를 통한 낮은 검출하한의 구현

이창한\* · 안상수\*\* · 조영지\*\*\* · 장지호\*\*\*\* · 안형수\*\*\*\* · 박재진\*\*\*\*\* · 이문진\*\*\*\*\*

\*, \*\* 한국해양대학교 나노반도체공학과 석사과정, \*\*\* 한국해양대학교 나노반도체공학과 박사, \*\*\*\* 한국해양대학교 나노반도체공학과 교수, \*\*\*\*\* 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 연수연구원, \*\*\*\*\* 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 영년직 책임연구원

## Implementation of Low Limit of Detection through Optimization of Metal Oxide Printed Thin Film Sensor for Detecting Harmful Substances in Water

Changhan Lee\* · Sangsu An\*\* · Youngji Cho\*\*\* · Jiho Chang\*\*\*\* · Hyungsoo Ahn\*\*\*\* · Jaejin Park\*\*\*\*\* · Moonjin Lee\*\*\*\*\*

\*, \*\* Graduate student, Major of Nano-semiconductor Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

\*\*\* Ph.D, Major of Nano-semiconductor Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

\*\*\*\* Prof., Major of Nano-semiconductor Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

\*\*\*\*\* Post-doctoral Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

\*\*\*\*\* Tenured Principal Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

**요약** : 해양산업시설에서는 많은 종류의 유해물질의 배출 가능성이 존재하기 때문에 이에 대한 체계적인 대응체계가 필요하다. 그 중 연속자동 측정이 가능하면서 ppb 수준의 낮은 검출하한 (limit of detection:LOD)를 갖는 센서 구현은 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 활성탄소(carbon black)와 Indium tin oxide (ITO) 나노입자를 혼합한 film의 표면저항의 변화를 이용한 고성능 센서 제안 및 구현을 위해 성능인자를 최적화하였다. 센서 구조는 접촉 면적과 전극 간격을 최적화하였다. 접촉 면적이 증가하면 감도, LOD 성능이 향상되었으며 60 mm<sup>2</sup>에서 최적화되었다. 또한, 전극 간격은 접촉 면적을 일정하게 유지한 상태에서 변화시켰으며 센서 응답은 전극 간격이 감소함에 따라 증가하는 것을 확인하였다. 마지막으로 센서 표면에서의 유해물질의 잔류시간 증가를 위해 화학흡착제를 적용하였다. 화학흡착제는 유해물질을 선택적으로 흡수할 수 있는 polyester계를 선택하였다. 그 결과 농도가 증가함에 따라 응답이 선형적으로 증가하여 센서로 활용이 가능한 것을 확인하였다. 이러한 3가지의 방법을 통해 센서를 제작하였을 때 액상 유해물질을 기존 센서의 LOD(89.9 ppb)와 비교 10~40 ppb 정도의 낮은 농도를 검출할 수 있는 센서를 구현하였다.

**핵심용어** : 유해물질, Absorber, ITO, Carbon Black, LOD

**Abstract** : Owing to the potential release of various types of noxious substances from marine industrial facilities, there is a need for a systematic response system. The implementation of a sensor capable of continuous automatic measurement with a low limit of detection (LOD) at the ppb level is significant. In this study, performance factors were optimized to propose and develop a high-performance sensor that utilizes changes in surface resistance of a film blended with activated carbon (carbon black) and indium tin oxide nanoparticles. Regarding the optimization of the sensor structure, the contact area and electrode spacing were carefully adjusted. Sensitivity and LOD performance were enhanced with an increase in the contact area, reaching an optimal value at 60 mm<sup>2</sup>. Additionally, electrode spacing was manipulated while keeping the contact area constant, revealing that sensor response increased as electrode spacing decreased. To prolong the presence of noxious substances on the sensor surface, a chemisorbent was applied. A polyester-based material, capable of selectively absorbing harmful chemicals, was chosen as the chemical adsorbent. The experimental results demonstrated a linear increase in sensor response as the concentration of noxious substances rose. This confirmed the viability of using the sensor. By employing these three methods, a sensor capable of detecting low concentrations ranging from 10 - 40 ppb was developed, surpassing the LOD (89.9 ppb) of the previous liquid noxious substances sensor.

**Key Words** : Noxious Substances, Absorber, ITO, Carbon Black, LOD

\* First Author : dgks114@gkmou.ac.kr, 051-410-4833

† Corresponding Author : jiho\_chang@kmou.ac.kr, 051-410-4833

## 1. 서론

수질은 중요한 환경인자이기 때문에 수질 환경 모니터링 기술은 매우 중요하다. 발전소 및 수처리장 등을 포함한 해양산업시설에서의 유해물질 배출은 법으로 금지되어 있지만 배출 가능성은 배제할 수 없으므로 배출수 중 유해물질의 존재 여부를 확인할 방법과 기술에 대한 연구가 필요하다. 기존에는 상용화된 수질 센서(Kruse, 2018)를 활용한 pH, 온도, 용존 산소, 인(P)이나 질소(N)의 농도, 기타 오염물질과 같은 다양한 변수 및 특성을 전기화학적 방식(Alam et al., 2020)이나 광학적 방식(Murphy et al., 2015)으로 감지하고 측정할 수 있는 기술이 개발되어 있다. 그러나 이러한 센서는 상대적으로 작은 분자량을 갖는 수중 유해물질의 검출에는 적용할 수 없다고 알려져 있다. 더욱이 종래의 수중 센서에는 검출에 필요한 충분한 감도 부족, 특정 유해물질만을 선택적으로 모니터링 할 수 있는 선택성 부족, 수중 동작을 보장하기 위한 내구성 부족, 경제성 부족, 번거로운 유지 관리가 필요한 점 등 다양한 문제점을 가지고 있다. 따라서 아직도 현장에서 유해물질의 자동 연속 측정이 가능한 적절한 센서 기술은 존재하지 않으며 수중 유해물질 측정이 가능한 고감도 센서의 연구개발이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 금속산화물 나노입자를 이용한 수중 유해물질 검출 가능 센서 구현과 충분한 감도 확보를 위한 연구를 수행하였으며, 특히 유해물질 농도 검출에 필요한 감도 확보에 주안점을 두었다. 종래의 금속산화물 나노입자를 사용한 연구결과를 참고하면, CuO film은 H<sub>2</sub>O에 대해서 20 ppm (Varghese et al., 2001), SnO<sub>2</sub> film은 NO<sub>2</sub> 가스에 대해서 5 ppb (Santos et al., 1997), SnO<sub>2</sub>(Pt) film은 O<sub>3</sub>에 대해서 25 ppb(Novak et al., 2003), WO<sub>3</sub> film은 NH<sub>3</sub>에 대해서 625 ppb(Ivanov et al., 2005) 수준까지 검출 가능하다는 보고가 있었다. CuO film이 검출할 수 있는 H<sub>2</sub>O는 유해물질은 아니지만 수중 유해물질의 검출을 위해서는 H<sub>2</sub>O를 검출할 수 있는 것이 중요하다.

하지만 이러한 센서들은 분석물이 가스 상태이거나 100 °C 이상의 고온과 같은 제한된 작동 조건에서 얻어진 결과들이므로 본 연구는 상온조건에서 수중에 포함된 유해물질 검출을 위한 실험을 진행하였다. Indium Tin Oxide(ITO)에 Carbon Black을 첨가한 ITO:CB film(Lee et al., 2022)을 사용하고 화학흡착제를 적용하여 검출하한(Limit of Detection : LOD)을 개선하였으며 소자화를 위하여 센서 구조를 최적화하여 센서의 성능을 평가하였다.

## 2. 실험방법

ITO:CB film의 제작은 범용 인쇄박막 제작 방법 가운데 하나인 Screen printing 법을 사용하여 인쇄하였다. ITO(입도 20 ~ 70 nm)와 Carbon black(입도 35 ~ 40 nm)를 혼합한 파우더와  $\alpha$ -terpineol과 ethylcellulose를 혼합하여 제작한 유기바인더를 일정 비율로 혼합한 페이스트를 이용하였다. 이를 기판에 인쇄하고 유기바인더 제거를 위해 100 °C에서 3시간 동안 열처리를 진행하였다. 그리고 표면에 잔류하는 바인더를 제거할 목적으로 O<sub>2</sub> ashing을 30분 진행하여 센서를 제작하였다. 센서 표면에 화학흡착제를 적용하기 위한 접착제로는 파우더에 혼합에 사용한 동일한 바인더를 이용하였다. 이때 기판 및 film의 크기는 각각 76 × 26 mm<sup>2</sup>, 16 × 8 mm<sup>2</sup>로 인쇄하였다. 제작한 film의 전기적 특성 및 센서 응답 특성은 I-V sourcemeter(Keithely 2400)을 사용하여 측정하였다.

센서의 성능 평가를 위해 일정한 부피의 액적을 센서 표면에 투하하는 방식을 사용하였다. DI(De Ionized) water와 유해물질을 수~수백  $\mu$ g/L의 농도로 혼합하여 실험하였다. 유해물질 농도 변화에 따른 센서응답( $\Delta R = R/R_0$ , 용액접촉 전 저항 R<sub>0</sub>, 용액접촉 후 포화저항 R) 변화를 통하여 성능 평가를 진행하였다.

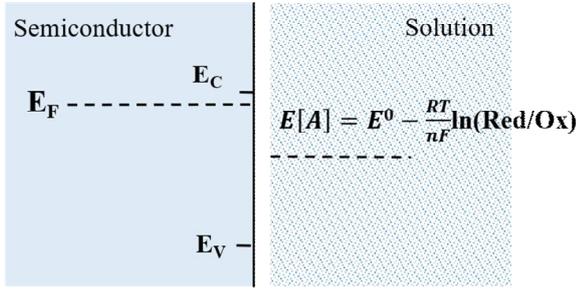
센서의 성능을 나타내기 위한 성능 인자는 다음과 같은 일반적인 정의를 활용하였다. 센서응답( $\Delta R$ ), 감도(농도변화에 따른 센서응답 변화율  $S = \delta R/\delta C$ ), 그리고 선형성( $R^2$ : 측정 데이터의 선형회귀하였을 때 얻어진 결정계수), 최소응답(Limit of Detection : LOD =  $3 \cdot \frac{s}{m}$ , s : 표준편차, m : 선형회귀 직선의 기울기) 등을 종합하여 성능을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 금속산화물 나노입자(Metal Oxide Nano Particle: MONP) 센서의 작동원리

금속산화물 나노입자 film은 수중에서도 안정적인 재료이며 일반적 박막보다 넓은 표면적을 갖게 되므로 표면물성의 변화를 이용한 센서 응용에 적합하다. Fig. 1은 MONP 센서의 기본적인 동작 원리를 나타내고 있다(Tan et al., 1994). 이는 분석물이 film의 표면에 접촉하였을 때 발생하는 저항의 변화를 이용하여 분석물 중 유해물질의 농도 변화를 결정하는 원리이다. 구체적으로 MONP film과 용액 사이의 계면에 film의 화학적 포텐셜(Fermi energy : E<sub>F</sub>)와 용액의 전기화학 포텐셜(E[A/A-])의 차이(V<sub>bi</sub>)의 영향으로 film의 표면에 두께 W의 표면공핍층이 형성된다. 이때 표면의 전하농도 n<sub>s</sub>는 식(1)로 제시되며, V<sub>bi</sub>의 변화에 의해서 그 값이 변화한다.

(a) Before contact



(b) After contact

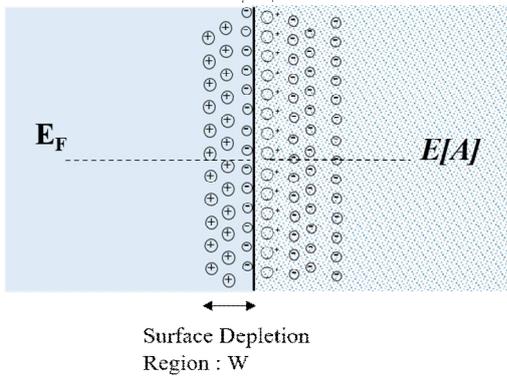


Fig. 1. Theoretical background of metal-oxides nanoparticle film sensors.

$$n_s = n_b \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT}\right) \quad (1)$$

여기서 표면전하농도  $n_s$ , 벌크전하농도  $n_b$ , 단위전하량  $q$ , 볼츠만 상수  $k$ , 절대온도  $T$ 이다.  $V_{bi}$ 는  $x=W$  지점에서의 전위  $V(x)$ 이다.  $V_{bi}$ 가 증가함에 따라  $n_s$ 가 감소하여 film의 저항이 상승한다. 그로 인해 전도도가 변화하고 센서의 저항 변화까지 이어진다. 결과적으로 저항의 변화 정도는 용액의 농도에 비례하므로 저항의 변화를 이용하여 용액의 농도를 결정할 수 있다.

여기서 센서의 저항은 film의 표면 저항( $R_s$ )와 벌크저항( $R_b$ )의 병렬이므로 식(2)의  $R_0$ 로 정의할 수 있다. 또한, 표면에 분석물 액적이 접촉하였을 때 저항  $R$ 은 식(3)과 같이 표현된다. 여기서  $dR_s$ 는 액적이 접촉한 부위에 발생하는 표면 저항의 변화이다. 따라서 센서의 전체 응답  $\Delta R$ 은 식(4)와 같이 새로 나타낼 수 있다.

$$R_0 = R_s // R_b \quad (2)$$

$$R = (R_s + dR_s) // R_b \quad (3)$$

$$\Delta R = \frac{R}{R_0} = \frac{(R_s + dR_s) // R_b}{R_s // R_b} \quad (4)$$

해양산업시설로부터 배출되는 배출수(도시하수, 산업폐수 등)의 유해물질 검출 및 연속·자동 모니터링하기 위한 수질 오염 공정시험규정상의 유해물질 수중 허용 농도는 수에서 수백 ppb 수준이다. 따라서 이를 검출할 수 있는 낮은 LOD 확보가 필요하다. 본 연구의 센서에서는 표면 저항의 변화가 커야 높은 감도를 갖게 되어 낮은 LOD의 확보가 가능해진다. 하지만, 벌크저항의 크기가 너무 크면 상대적으로 작은 표면저항의 변화는 무시할 수 있게 되므로 적절한 전도성의 확보가 필요하다. 이와 관련하여 ITO/MONP와 카본블랙(carbon black : CB)을 혼합하는 실험을 진행하여 센서의 LOD를 64.68 ppb까지 개선하는 연구를 수행하였다.

### 3.2 센서구조의 최적화

#### 3.2.1 접촉면적의 변화와 센서의 응답

센서 구조의 최적화를 위해 우선 액적과 접촉 면적의 변화에 따른 센서 성능의 변화에 관해서 연구하였다. 분석물과의 접촉면적은 표면저항의 변화량에 영향을 미친다. 일반적으로 접촉면적이 증가하면 센서의 응답도 증가하지만, 일정 이상으로 접촉면적이 증가하면 전극간 거리가 길어져 센서의 전체 저항에 미치는 표면저항의 영향은 오히려 줄어들어 센서의 최종적인 응답은 감소하게 될 것이다. 따라서 적절한 접촉면적을 확인하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 40~100 mm<sup>2</sup> 범위 내에서 접촉 면적을 변화시켰다. ITO:CB film 표면에 내화학성 polyimide tape을 이용하여 의도된 면적 이외에 용액과 film이 접촉하지 않도록 하였다.

Fig. 2에 접촉면적의 변화에 따른 센서의 특성을 나타냈다. Fig. 2(a)는 접촉 면적 변화에 대한 감도(S)의 변화를 나타낸다. 앞서 예상한 대로 접촉면적이 증가함에 따라 감도도 상승하다 100 mm<sup>2</sup> 정도의 면적에서 포화되는 것을 알 수 있다. 이를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 단위면적당의 응답 변화를 정리하였다(Fig. 2(b)). 그 결과 접촉 면적이 증가함에 따라 단위면적당 응답은 지속적으로 감소하였고 60 mm<sup>2</sup>부터 포화하는 것을 확인하였다. 여기서 접촉면적의 증가에 따른 단위면적당 응답의 감소는 전체저항 중 벌크저항의 영향이 커지기 때문으로 설명할 수 있다. Fig. 2(c)는 각 센서의 LOD 값을 나타내며, 최소 LOD 값은 60 mm<sup>2</sup>에서 10 ppb 수준까지 확인되었다. 따라서 액적과의 접촉면적이 중요한 센서 설계 요인임을 알 수 있었다.

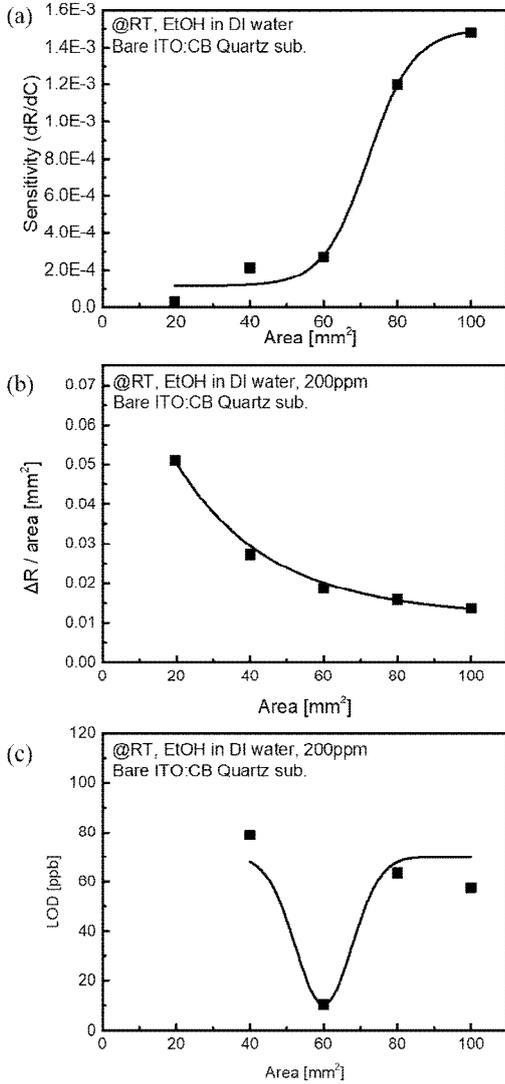


Fig. 2. (a) Sensor response with increasing contact area, (b) Sensor response according to unit area, (c) LOD (Limit Of Detection) change according to contact area.

### 3.2.2 전극 간격의 변화와 센서의 응답

앞서 전극간의 간격이 증가하면 센서의 응답이 감소하게 됨을 제시하였다. 다음으로는 전극 간격의 변화에 따른 센서 성능 변화에 관한 연구가 필요하다. 이를 위해 Ag 전극과 ITO 사이의 접촉저항의 영향을 파악하였다. 이를 위하여 ITO film에 Transmission Line Method(TLM) 법을 이용하여 Ag 전극을 제작하여 접촉저항을 측정하였다(An et al., 2022). 그 결과 접촉저항은 무시할 수 있을 정도로 파악되었으며, 전극 간격이 증가할 때 관찰되는 저항의 증가는 단순히 표면저항과 벌크 저항의 증가에 기인하는 것으로 설명할 수 있다.

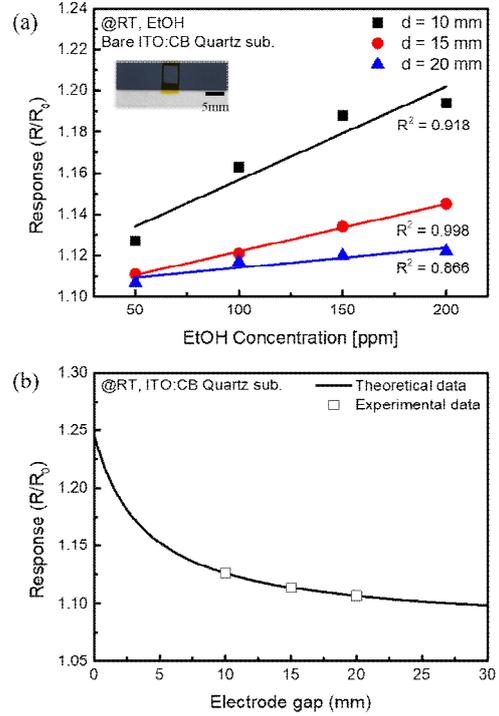


Fig. 3. (a) Sensor response change according to electrode spacing of ITO:Carbon black film, (b) Theoretical and experimental data of electrode spacing and sensor response

본 실험에서는 시작품 제작 시 활용할 수 있는 센서의 크기를 고려하여 전극 간격을 최소 10 mm, 최대 20 mm로 제한하였다. 또한, 내화학성 polyimide tape를 부착하여 접촉 면적에 따른 변수를 제어하였다.

Fig. 3은 전극 간격 변화에 따른 센서 응답의 변화이다. Fig. 3(a)는 전극 간격이 다른 3개 시료의 EtOH 농도에 따른 센서 응답 변화를 나타낸 그래프이다. 전극 간격이 감소함에 따라 센서 응답이 증가하는 것을 확인하였으며, 이는 센서 응답에 있어 상대적으로 벌크 저항이 미치는 영향이 변화하기 때문이다. 이를 증명하기 위해 식(4)에 근거하여 응답 변화를 예상해 보면 전극 간격이 증가함에 따라 센서의 응답이 감소하는 것을 확인할 수 있었고 이는 실험 결과와 일치하였다(Fig. 3(b)). 따라서 전극 간격이 작을수록 표면저항이 센서 전체저항에 미치는 영향이 증가하므로 센서 응답이 커지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 화학흡착제 (Polymer absorber)의 적용 효과

앞에서 액체 분석물과의 접촉면적은 커질수록, 전극사이의 간격은 좁을수록 센서의 응답이 커짐을 알았다. 하지만

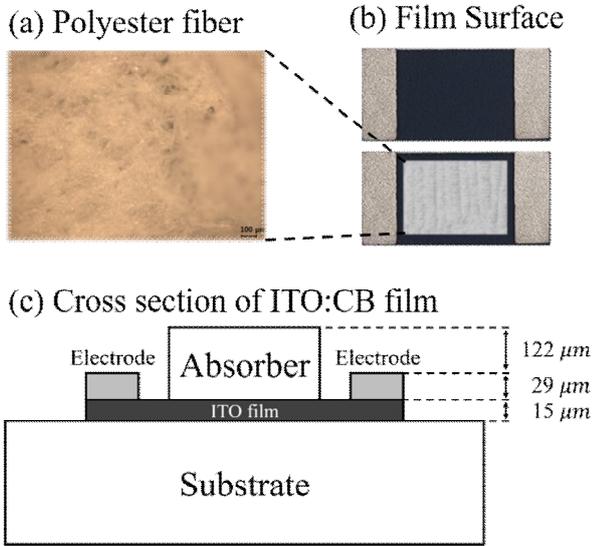


Fig. 4. (a) Surface of polyester fiber observed with an optical microscope, (b) Surface of ITO film and ITO:Carbon black film, (c) Schematic diagram of a cross-section of a sensor with absorber applied.

이러한 조건은 현실적인 센서의 설계 요인에 의해서 제한되므로, 본 실험에서는 제한된 면적에서 센서의 응답을 개선할 목적으로 표면에 소수성 화학흡착제를 부착하여 접촉 면적 내 유해물질의 농도를 증가시켰다. 결과적으로 표면저항 변화의 정도를 증가시킬 목적으로 실험을 진행하였으며, 센서의 응답 변화의 여부를 분석하였다. 여기서 화학흡착제는 ITO film 표면에 유해물질의 농도와 잔류하는 시간을 증가시켜 응답을 증대하는 역할을 할 것으로 기대하였다. 본 실험에서는 시판 중인 화학흡착제(Polymer absorber)인 polyester fiber(polyester + cellulose fiber)를 이용하였다.

Fig. 4(a)는 화학흡착제의 표면 사진이며, Fig. 4(b), (c)는 각각 화학흡착제를 적용한 센서의 사진 및 화학흡착제를 적용한 센서의 단면 개략도이다. 화학흡착제로 사용한 폴리에스터는 테레프탈산과 에틸렌글리콜의 중합체로 만들어지는 인공 섬유이다(Jaffe et al., 2020). 일반적으로 폴리에스터는 내구성이 뛰어나고 세탁이 쉬우며 다양한 색상으로 제공되기 때문에 의류, 가구 및 기타 제품에 인기 있는 소재이지만 유해 화학 물질을 흡수할 수도 있는 것이 잘 알려져 있다. 폴리에스터가 화학 물질을 흡수하는 이유는 분자 구조 때문에 길고 가지가 없는 사슬로 구성된 고분자 분자 구조는 화학 물질이 폴리에스터에 쉽게 흡수될 수 있도록 작용하는 것으로 알려져 있다.

화학흡착제를 적용한 ITO film(Polyester/ITO:CB film)의 센서의 동적 특성을 Fig. 5에 정리하였다. Fig. 5(a)는 대표적인

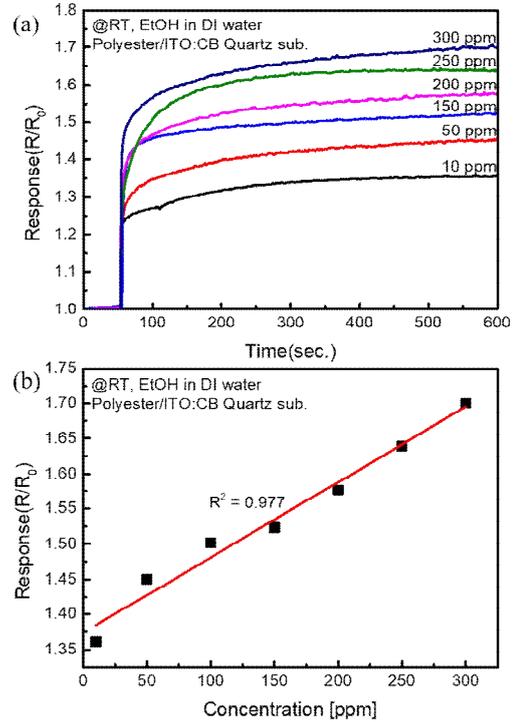


Fig. 5. (a) Dynamic characterization of EtOH concentration over time, (b) Sensor response change according to EtOH concentration change.

유기용매인 에탄올 (EtOH)의 농도 변화에 대한 시간응답 특성이이다. DI water에 희석한 에탄올 분석물 센서 표면에 접촉시키면 응답이 증가하다가 포화되었다. 이를 통해 얻은 EtOH 농도에 대한 응답의 변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 농도가 증가함에 따라 응답이 선형적으로 증가하여 선형 전달 특성을 갖는 센서로 활용이 가능함을 시사하고 있다.

우선 Fig. 5(a)에서 용액이 센서 표면에 접촉하였을 때 응답의 변화는 약 10분이 걸리는 것으로 측정되었다. 이는 액체-고체 계면에 전하이중층(Electrical double layer)이 안정화되고, ITO film 내 공핍층의 변화가 평형상태에 도달했다는 것을 의미한다. 다만 본 실험에서 관찰된 반응시간은 단순히 전하이중층의 형성으로 설명하기에는 긴 변화이다. 일반적으로 전하이중층 캐패시터의 충전시간은 수십 초 이내이므로(Lim, 1993), 이러한 변화는 표면에서의 화학적 평형에 의한 것으로 ITO film 표면에 유해물질 농도가 포화되어 가는 것을 반영하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 유해물질의 농도에 따른 변화는 ITO의 화학적 포텐셜과 유해물질 용액의 화학적 포텐셜의 차이에 의한 것으로 설명할 수 있다. 이러한 농도에 따른 응답변화는 Fig. 5(b)에서 보인 선형회귀의  $R^2=0.977$ 로 농도변화에 따른 선형성을 확인하였다.

Table 1. Optimization of sensor structure and comparison of sensors applied with chemical adsorbent

Sensors	contact area	LOD	Linearity [ $R^2$ ]
Sample (a) ITO film	[19.6mm <sup>2</sup> ]	89.9 ppb	0.938
Sample (b) ITO:Carbon black film	[19.6mm <sup>2</sup> ]	64.68 ppb	0.924
Sample (c) polyester/ITO:Carbon black film	[50mm <sup>2</sup> ]	36.9 ppb	0.977
Sample (d) ITO:Carbon black film	[60mm <sup>2</sup> ]	10.4 ppb	0.998

본 연구에서는 소수성 화학흡착제를 적용하여 수중 유해 물질 검출 성능의 향상을 구현하였다. 하지만 소수성 화학흡착제 사용으로 인해 친수성 유해물질 검출이 제한될 수 있어 다양한 화학흡착제 적용에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 3.4 센서 성능 비교

Table 1에는 본 연구에서 사용한 (a) ITO film 센서, (b) 일반적인 ITO:CB film 센서, (c) 화학흡착제 사용한 센서 (Polyester/ITO:CB), (d) 접촉면적이 최적화된 ITO:CB film 센서의 성능을 비교하였다. 센서의 선형성의 경우 모든 센서가 0.9 이상으로 확인되었다. 다음으로 본 연구에서 중요하게 다루고 있는 LOD를 비교해 보았다. 기존 형태인 (a) ITO film 센서의 LOD(89.9 ppb)와 비교하였을 때 (b) ITO:CB film 센서의 LOD는 64.68 ppb로 다소 (28.05%) 감소하였고, (c) polyester/ITO:CB film 센서는 36.9 ppb로 (58.95%) 감소하였다. 시료 (a)와 (b)의 변화는 전도성의 향상으로 설명이 가능하고, 시료 (a)에서 (c)사이의 변화는 화학흡착층의 작용으로 설명이 가능하다. 또한 (d) ITO:CB film 센서는 접촉면적의 최적화 결과로 LOD가 가장 낮은 수준인 10.4 ppb까지 감소하였다. 이러한 결과로 센서의 구조 최적화가 성능 향상에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 최적의 성능을 보이는 센서를 설계할 경우 접촉 면적이나 전극의 간격 그리고 센서 표면에서의 유해물질의 농도를 증가시킬수 있는 방법을 종합적으로 고려하여야 함을 알 수 있었다.

## 4. 결론

해양산업시설 배출 유해물질을 연속·자동으로 검출할 수 있는 센서 개발을 위하여 금속산화물 나노입자 film을 이용한 센서를 제작하고 접촉면적, 전극간격 그리고 화학흡착제의 적용 여부 등에 따라 센서 성능의 변화에 대하여 연구하였다. 그 결과 각각의 인자가 센서 성능에 미치는 영향을 고찰하였으며, 에탄올을 대상으로 한 실험에서 10~40 ppb 정도의 낮은 LOD 수준을 달성하였다.

## 사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(RS-2021-KS211535, 해양 위험유해물질(HNS) 배출 등 관리기술 개발사업, 해양 산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발).

이 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012451, 2020년 산업전문인력역량강화사업).

## References

- [1] Alam, A. U., D. Clyne, H. Jin, N.-X. Hu, and M. J. Deen (2020), Fully Integrated, Simple, and Low-Cost Electrochemical Sensor Array for in Situ Water Quality Monitoring, ACS Sensors, Vol. 5, No. 2, pp. 412-422.
- [2] An, S. S., J. H. Noh, C. H. Lee, S. T. Lee, D. M. Seo, M. J. Lee, and J. H. Chang(2022), Study on the Effect of the Electrode Structure of an ITO Nanoparticle Film Sensor On Operating Performance, Journal of Sensor Science and Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 90-95.
- [3] Ivanov, P., M. Stankova, E. Llobet, X. Vilanova, J. Brezmes, I. Gracia, C. Cane, J. Calderer and X. Correig(2005), Nanoparticle metal-oxide films for micro-hotplate-based gas sensor systems, IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 5, pp. 798-809.
- [4] Jaffe, M., A. J. Easts, and X. Feng(2020), Polyester fiber, in: Michael jaffe and Joseph D. Menczel, Thermal Analysis of Textiles and Fibers, pp. 133-149.
- [5] Kruse, P.(2018), Review on water quality sensors, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 51, No. 20, pp. 1-25.
- [6] Lee, C. H., S. S. An, Y. N. Heo, Y. J. Cho, J. H. Chang, S. T. Lee, S. W. Oh, and M. J. Lee(2022), Study on High Sensitivity Metal Oxide Nanoparticle Sensors for HNS Monitoring of Emissions from Marine Industrial Facilities, Journal of the Korean Society of Marine Environment &

Safety, Vol. 28, Special Issue, pp. 30-36.

- [7] Lim, G. J.(1993), Characteristics and applications of electric double layer capacitors, world of electricity, Vol. 42, No. 7, pp. 9-17.
- [8] Murphy, K., B. Heery, T. Sullivan, D. Zhang, L. Paludetti, K. T. Lau, D. Diamond, E. Costa, N. O'Connor, and F. Regan (2015), A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring, Talanta, Vol. 132, No. 15, pp. 520-527.
- [9] Novak, J. P., E. S. Snow, E. J. Houser, D. Park, J. L. Stepnowski, and R. A. McGill(2003), Nerve agent detection using networks of single-walled carbon nanotubes, Applied Physics Letters, Vol. 83, No. 19, pp. 4026-4028.
- [10] Santos, J., P. Serrini, B. O. Beirn, and L. Manes(1997), A thin film SnO<sub>2</sub> gas sensor selective to ultra-low NO<sub>2</sub> concentrations in air, Sensors and Actuators B, Vol. 43, No. 1-3, pp. 154-160.
- [11] Tan, M. X., P. E. Laibinis, S. T. Nguyen, J. M. Kesselman, C. E. Stanton, and V. S. Lewis(1994), Principles and applications of semiconductor photo electrochemistry, Progress in Inorganic Chemistry, Vol. 41, pp. 21-144.
- [12] Varghese, O. K., P. D. Kichambre, D. Gong, K. G. Ong, E. C. Dickey, and C. A. Grimes(2001), Gas sensing characteristics of multi-wall carbon nanotubes, Sensors and Actuators B, Vol. 81, No. 1, pp. 32-41.

---

Received : 2023. 09. 12.

Revised : 2023. 10. 24.

Accepted : 2023. 10. 27.