

## CNT 필름 전기화학 센서의 온도 의존 특성에 관한 연구

노재하<sup>1</sup> · 안형수<sup>1</sup> · 안상수<sup>1</sup> · 이창한<sup>1</sup> · 이상태<sup>2</sup> · 이문진<sup>3</sup> · 서동민<sup>3</sup> · 장지호<sup>1,+</sup>

### Temperature-Dependent Characteristics of Carbon Nanotubes-Film-Based Electrochemical Sensor

Jaeha Noh<sup>1</sup>, Hyung Soo Ahn<sup>1</sup>, Sangsu An<sup>1</sup>, Changhan Lee<sup>1</sup>, Sangtae Lee<sup>2</sup>,  
Moonjin Lee<sup>3</sup>, Dongmin Seo<sup>3</sup>, and Jiho Chang<sup>1,+</sup>

#### Abstract

In this study, we investigated a carbon nanotube (CNT) film sensor to detect hazardous and noxious substances distributed in seawater. The response change of the sensor was studied according to environmental temperature, and its temperature coefficient of resistance (TCR,  $\alpha$ ) was measured. The temperature of the CNT film ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ) was in the range of 20–50 °C, and  $\alpha\text{CNT}$  was calculated to be  $-0.0011 \%/^{\circ}\text{C}$ . We experimentally confirmed that the CNT film had a smaller TCR value than that of the conventional sensor. Therefore, we investigated the response change of the CNT sensor according to temperature. The CNT sensor showed a relatively small error of approximately 2.3 % up to 30 °C, which is within the temperature range of the seawater of the Korean Peninsula. However, when the temperature exceeded 40 °C, the error in the CNT sensor increased by more than 5.2 %. We fabricated a metal oxide (ITO, indium-tin-oxide) film and compared its performance with that of the CNT sensor. The ITO sensor showed an error of  $>12.5 \%$  at 30 °C, indicating that in terms of the stability of the sensor to temperature, the CNT film sensor has superior performance.

**Keywords:** carbon nanotube, electrochemical sensor, hazardous and noxious substance, temperature-dependent characteristics, temperature coefficient of resistance

#### 1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 증가하면서 화학물질 검출을 위한 다양한 센서에 관한 필요성도 증가하였다. 그 중에서도 액체상 유해물질 검출 센서의 경우 pH Sensor[1], DNA Sensor[2], LoC 센서[3] 등 다양한 센서가 개발되어 있다. 하지만 약 6,000 여 종에 이르는 액체상 위험유해물질 (HNS, hazardous and noxious substances)은 수중에서 용해, 침전, 증발, 부유 등 다양한 거동을 보이며 특히 대부분 작은 분자량을 가져 일반적인 방법으로 검출이 어렵다는 특징을 가지고 있다[4]. 게다가 HNS가 해상에

유출될 경우 독성, 인화성, 화학반응성 등으로 인해 인체 및 환경에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 액상 HNS 검출을 위해 우수한 내구성과 높은 수준의 응답특성을 보이는 액상 HNS 검출 센서가 필요하다. 특히 해수 중 신뢰성 있는 동작이 가능하려면 해수의 온도에서 동작이 가능하여야 하며, 연중 온도가 변화하는 해수의 특성에 대응이 가능해야 한다. 따라서 우수한 내구성과 높은 감도를 보이는 것으로 알려진 나노 소재를 이용한 센서의 활용이 유력한 방안으로 연구 중이다. 관련된 종래의 연구로는 인듐-주석-산화물 (ITO, indium-tin-oxide) 기반 센서에 대한 연구가 있다[5]. ITO 인쇄박막 센서를 이용해 액체상의 Methanol (MeOH), Ethanol (EtOH), Iso-propanol (IPA)를 검출한 결과 선형적인 센서 응답을 확인하였다. 하지만, 보다 신뢰성 있는 센서를 확보하기 위하여 해수 온도의 변화에 대응 가능한 센서가 매우 중요하지만 아직 이에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 물리적, 화학적 내구성이 우수하며 넓은 표면적을 통해 높은 응답을 기대할 수 있는 탄소나노튜브(CNT, carbon nanotubes)를 센서 검지부로 사용하였다. 카본계 재료인 그래핀과 풀러렌을 이용하여 저항의 온도변화 특성을 확인한 종래의 연구는 존재하지만 액상 유해 물질 검출을 위한 센서의 응답의 온도 변화에 대해 고찰한 연구는 확인하기 어렵다[6,7]. 따라서 본 연구

<sup>1</sup> 한국해양대학교 전자소재공학과(Major of Electronic Materials Engineering, Korea and Maritime Ocean University), Busan, 49112, Korea

<sup>2</sup> 한국해양대학교 해양플랜트 운영학과(Department of offshore plant management, Korea and Maritime Ocean University), Busan, 49112, Korea

<sup>3</sup> 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부(Maritime Safety and Environmental Research Division, KRISO), Daejeon, 34103, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: jiho\_chang@kmou.ac.kr

(Received: Apr. 6, 2022, Revised: May 16, 2022, Accepted: May 19, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

는 해수 중 가열 없이도 동작이 가능한 액체상 HNS 검출 센서를 제작하고, 본 연구에서 제안한 CNT 센서가 해수 온도 변화에 대응이 가능한지 확인하기 위하여 온도 의존성을 분석하고 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 블레이드 캐스팅 기법을 이용하여 다중벽 탄소 나노튜브 (MWCNT, multi-walled carbon nanotubes) film을 제작하였다[8]. MWCNT는 IPA (iso-propanol)를 사용하여 초음파 수조 속에서 3시간 동안 분산 처리하여 사용하였다. 기판으로는 200  $\mu\text{m}$  두께의 PET (polyethylene terephthalate) 필름을 사용하였다. PET 기판은 DI water를 사용하여 10분 동안 초음파 세척 후 사용하였다. CNT 필름의 인쇄용 바인더로는 SBR (styrene butadiene rubber)과 CMC (carboxymethyl cellulose)를 혼합하여 사용하였다. 또한 필름의 전도도를 향상시켜 전극과 센서 제작을 용이하게 하기 위해 페이스트에 acetylene black을 첨가하였다. 페이스트 혼합 비율은 CNT : Binder : acetylene black = 78 : 17 : 5의 무게비로 제작하였다[9]. 이러한 무게비를 선택하기 위하여 여러 가지 혼합 비율을 갖는 페이스트 이용하여 필름의 표면 균질성, 전사율 등을 비교하여 가장 균질한 필름이 얻어지는 조건을 실험하였다. 인쇄 후 CNT 필름에 잔존하는 바인더와 수분을 제거하기 위해 건조용 오븐을 이용하여 90°C에서 2시간 동안 열처리하였다[9]. 제작한 CNT 필름의 표면 형상과 두께를 분석은 광학현미경과 전계방출형 주사전자현미경 (FE-SEM, field emission-scanning electron microscope)을 사용하였다. 시료의 전기적 특성과 센서 동작 특성은 I-V Sourcemeter (Keithley 2400)를 이용하여 분석하였다. 제작한 CNT 필름의 온도저항계수 ( $\alpha_{TCR}$ , temperature coefficient of resistance)를 분석하기 위해 필름의 표면 온도에 따른 저항 변화를 관찰하였다. 센서의 응답은 자극 유무에 따른 저항비로 정의하였다. (Response  $\Delta R = R_t/R_0$ ,  $R_0$ : 무 자극 초기 저항,  $R_t$ : 분석물 접촉 후 포화 저항) 센서 응답은 물의 전기분해가 과전압 1.23 V에서 [10] 일어나는 점을 고려하여 1 V의 정전압을 가하여 실온에서 측정하였다. 해수의 온도가 변화하는 환경에서 CNT 필름의 온도 의존성을 확인하기 위해서 Hot plate를 사용하여 필름을 가열하였으며, 이때 시료 표면의 온도를 열화상 카메라(Flir T440)로 직접 측정하여 온도를 확인하였다 [11]. 또한 CNT 필름의  $\alpha_{TCR}$  이 센서 응답에 미치는 영향을 확인하기 위해 20~50°C의 온도 변화에 따른 센서 응답 변화를 분석하고 이 결과를 본 실험에서 제작한 ITO 필름을 이용한 센서와 비교하여 성능을 검토하고 변화의 원인을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 PET 기판상에 제작한 CNT 필름, Fig. 1(b)는 FE-

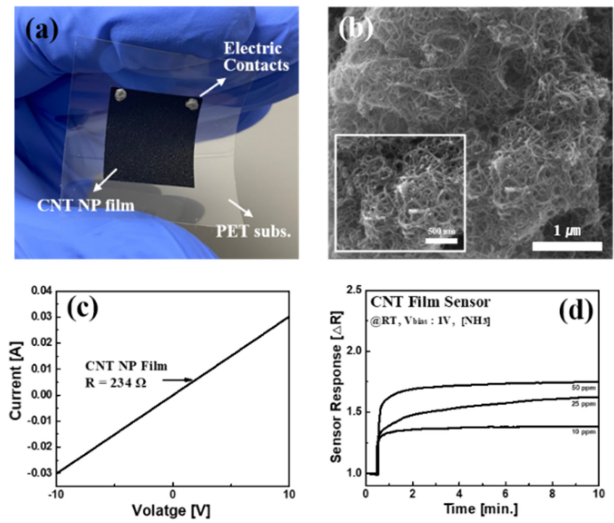


Fig. 1. (a) CNT film printed on PET substrate, (b) FE-SEM image of CNT film surface, (c) I-V test results of CNT film, (d) Temporal response of CNT film sensor in  $\text{NH}_3$  solution.

SEM을 통해 관찰한 CNT 필름의 표면 형상을 보여준다. CNT 다발이 서로 엉켜져 있는 형상으로 높은 응답을 갖는 센싱을 위한 필수적인 넓은 표면적을 가지고 있음을 알 수 있다. 제작한 CNT 필름의 두께는 FE-SEM을 이용하여 50  $\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 또한, Fig. 1(c)는 I-V sourcemeter를 통해 확인한 CNT 필름의 전류-전압 특성이다. Fig. 1(c)에서 본 실험에서 제작한 CNT 필름의 저항은 234  $\Omega$ 로 확인되었다. 그리고 Fig. 1(d)는 상온에서 측정된 CNT 필름 센서의 암모니아에 대한 시간-응답 특성이다. 측정을 위하여 1분 동안 공기중에서 센서의 저항 변화를 모니터링하였다. 저항이 안정된 후 마이크로 피펫을 이용하여 일정량의 분석물을 필름 표면에 투여하고 저항 변화를 관찰하였다. 센서 동작을 확인하기 위하여 사용한 분석물로 인공 염수(NaCl 3.5 wt%)를 사용하였다. 이렇게 제작한 CNT 필름의 경우 작동 범위 10~50 ppm에서 이론적 최소 검출 농도 (LOD, limit of detection,  $3 \frac{s}{m}$ )는 0.025 ppm, 응답시간은 31초로 확인되었고 센서 감도(Sensitivity,  $\Delta R/\Delta C_{HNS}$ )는 0.011 /ppm 정도로 파악되었으며 센서의 동작과 관련한 자세한 내용은 앞서 보고 하였으므로 본 연구에서는 생략하였다 [12].

Fig. 2는 먼저 실험 온도의 신뢰성을 파악하기 위한 실험 결과를 보여준다. 본 실험에서는 Hot plate를 이용하여 온도를 설정하고, 실제 CNT 필름의 표면 온도를 열화상 카메라를 통해 측정하고 설정 온도와 측정 온도의 관계를 분석하였다. Fig. 2(a)는 20°C에서 50°C 사이의 온도 구간에서 Hot plate의 설정 온도와 열화상 카메라 측정 온도의 상관관계를 보여준다. 그 중 대표적인 결과를 Fig. 2(b)와 2(c)에 나타냈다. 30 회 반복 측정했을 때 설정 온도와 측정 온도의 최대 오차는 0.8°C 미만이었으며, 설정 온도와 측정 온도의 선형관계 ( $R^2$ , Coefficient of determination)는 0.998로 확인되었다. 이 결과를 통해 파악된 설

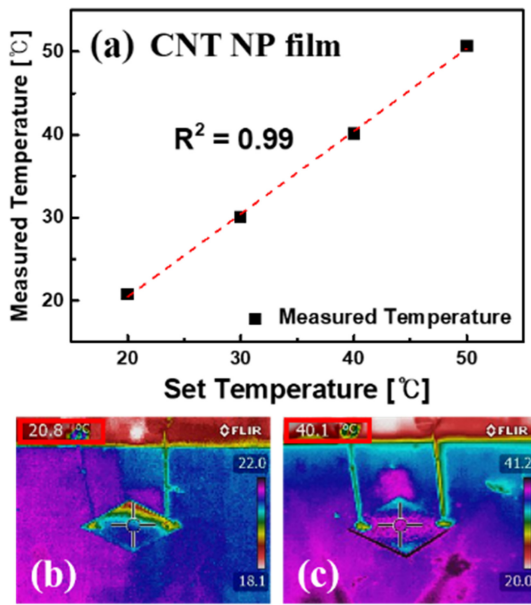


Fig. 2. (a) Comparison of controlled and measured temperature. Pyrometer images at (b) 20°C and (c) 40°C.

정 온도와 측정 온도의 오차는  $\pm 3.4\%$  이하로 파악되었다.

Fig. 3은 CNT 필름의 표면 온도를 20°C에서 50°C까지 변화시키며 표면 저항 변화를 측정된 결과이다. 온도가 상승함에 따라 CNT Film의 저항은 감소하였다. 여기서 온도저항계수  $\alpha_{TCR}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다[13].

$$\alpha_{TCR} = (R_T - R_i) / [R_i(T_T - T_i)] \quad (1)$$

여기서  $R_i$ 는 기준 온도에서의 저항(본 연구에서 기준 온도는 20°C),  $R_T$ 는 측정 온도에서의 저항이며,  $T_i$ 와  $T_T$ 는 각각 기준 온도와 측정 온도이다. 온도가 20°C에서 50°C까지 변화할 때 CNT 필름의 저항은 약  $6.8\ \Omega$  감소하였다. 즉, 온도가 증가할 때 저항이 감소하는 반도체적 특징이 관찰되었다. 이는 온도 증가에 의한 CNT 필름 내 유효전자 농도의 증가에 기인한다고 할 수 있다[14]. 또한 온도와 저항은 선형적으로 변화하였다. 실험 결과를 선형 fitting 했을 때 각 데이터들의 선형 관계  $R^2$ 은 0.99로 관찰되었다. 이 결과를 이용하여 본 실험에서의 CNT 필름의 온도 저항계수 ( $\alpha_{CNT}$ )를 계산한 결과  $-0.0011\ \%/^{\circ}\text{C}$ 로 확인되었다. 여기서  $\alpha_{TCR}$ 의 절대값이 작을수록 온도 변화에 둔감하여 온도가 변화하는 환경에서도 사용하기 적합하다는 것을 의미한다[15]. 참고로 종래의 CNT 필름의 결과를 살펴보면 25~60°C의 온도 범위에서 측정된 CNT 기반 응력 센서의  $\alpha_{CNT}$ 가  $-0.0112\ \%/^{\circ}\text{C}$  [16], 26~102°C의 온도 범위에서 측정된 CNT 기반 온도 센서의  $\alpha_{CNT}$ 가  $-0.109\ \%/^{\circ}\text{C}$  [17]로 동일한 CNT 필름의 경우에도 바인더 배합비율 등의 제작 방법이 달라짐에 따라  $\alpha_{TCR}$ 의 차이를 발생시키는 것을 알 수 있다. 결과적으로 종래의 CNT 센서에 비해 본 연구의 CNT 필름 센서가 온도에 더 둔감할 것으로 예상되었으며, 실제 다양한 온도의 염수 중에서 센서 응답 변화를 확인하였다.

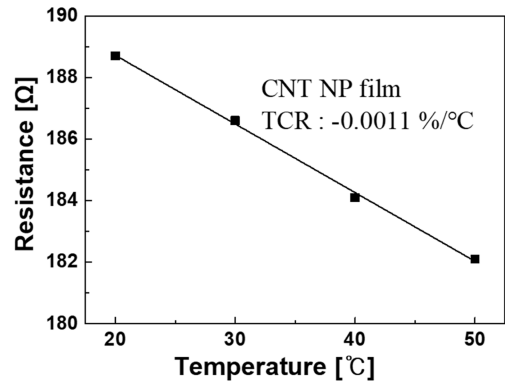


Fig. 3. Temperature coefficient of resistance of CNT film.

Fig. 4(a)는 20~50°C의 온도 범위에서 CNT 필름 표면에 염수를 투여한 뒤 관찰한 센서의 응답( $\Delta R$ ) 결과이다. 온도가 증가함에 따라 센서의 응답도 증가하였다. 또 온도에 따른 응답 변화를 분석한 결과를 Fig. 4(b)에 나타냈다. Fig. 4(b)의  $\Delta R_A$ 는 해수의 온도변화를 고려하지 않은 상태의 저항 변화,  $\Delta R_B$ 는 해수의 온도변화에 의해서 발생하는 저항 변화 성분을 나타내고 있다. 즉 온도가 증가할수록 오차가 증가하고 있음을 알 수 있다.

여기서 온도변화에 따른 센서 응답의 변화를 이론적으로 고찰해 보면 다음과 같이 설명할 수 있다[18].

$$V_{bi} = |E_f - E_{Redox}|q \quad (2)$$

$$n_s = n_b \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT}\right) \quad (3)$$

여기서 표면전하농도  $n_s$ , 벌크전하 농도  $n_b$ , 단위전하량  $q$ , 볼츠만상수  $k$ , 절대온도  $T$ , 고체의 페르미 준위  $E_f$ , 고체-액체 계면의 산화환원준위  $E_{Redox}$ 이다. 여기서 만약 액체-고체의 계면 형성에 의한  $V_{bi}$  표면전위의 변화를 무시할 수 있다면, 식 (3)으로부터 온도  $T$ 가 증가할 때 표면 전하농도  $n_s$ 가 증가할 것이므로 결국 센서의 응답( $\Delta R$ )이 감소해야 함을 나타내고 있다. 그러나 본 실험에서는 이와 반대로 센서의 응답은 증가하였다. 이는  $V_{bi}$ 의 변화를 무시할 수 없으며  $V_{bi}$ 의 변화가 센서의  $\Delta R$  변화에 큰 영향을 미쳤음을 의미한다. 따라서  $V_{bi}$ 의 변화를 추정해 볼 필요가 있다.  $V_{bi}$ 의 변화는 식(4)의 네른스트 방정식으로 [19] 부터 추정해 볼 수 있다.

$$E_{Redox} = E_{Redox}^0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{[C_{red}]}{[C_{ox}]} \quad (4)$$

식(4)에서 온도가 증가하면  $E_{redox}$ 가 증가하며, 따라서 식(2)에 의거  $V_{bi}$ 가 감소하고, 캐리어 농도 ( $n_s$ ) 증가하여 센서  $\Delta R$ 은 감소할 것을 시사하고 있다. 이 역시 관찰된 결과와 부합하지 않았다. 이러한 결과는 결국 온도가 변화하면 산화환원 반응물이 변화하는 것을 의미한다고 판단된다. 즉, 식(4)의 마지막 항에  $[C_{red}/C_{ox}]$ 의 감소에 의해서  $E_{redox}$ 가 감소하여 (따라서  $V_{bi}$ 가 증가

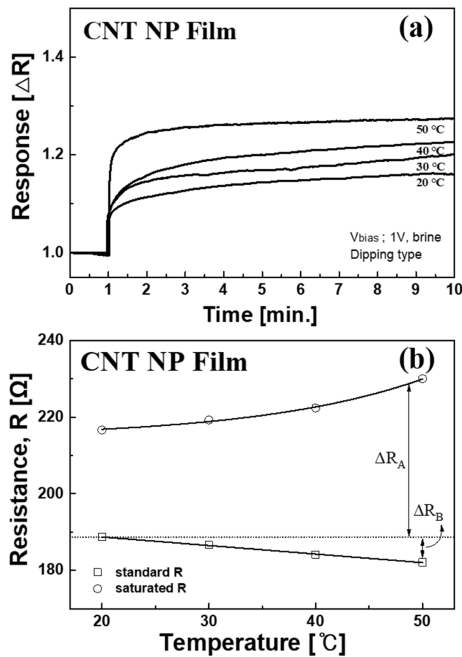


Fig. 4. (a) Temporal response of CNT film sensor in seawater at elevating temperature, (b) analysis of sensor response.

하고), 결국 식(3)의  $n_s$ 가 감소하기 때문에 센서의  $\Delta R$ 이 증가하는 것으로 해석하는 것이 타당하다고 판단된다. 이는 온도 증가 시 용액 중 산화반응종의 농도가 증가함을 의미하며 일반적으로 고온에서 수산화반응이 증가하므로 [20] 본 연구에서 관찰된 결과와 부합되는 설명이라고 할 수 있다.

따라서 CNT 필름 센서의 경우, 온도변화에 의한  $\Delta R$ 의 변화는 (I)  $\alpha_{TCR}$ 에 의한 변화 및 (II) 전기화학적 반응도 ( $[C_{red}/C_{ox}]$ ) 변화에 의해 주도하고 있음을 알 수 있다.

위 결과를 본 실험과 유사한 나노 입자를 이용한 필름형 센서의 경우와 비교하기 위하여, 본 연구에서 제작한 ITO 필름 센서의 온도 변화에 대한 센서의 응답 변화를 Fig. 5에 나타냈다. CNT 필름 센서 실험과 동일하게 20~50°C의 온도 범위에서 염수를 이용하여  $\Delta R$  변화를 관찰하였다. Fig. 5(a)에서 보인 것처럼 온도가 30°C일 때 응답이 크게 증가하였고, 온도가 더 상승함에 따라 변화가 포화 되는 경향을 보였다. 이러한 변화는 앞에서 고찰한 바와 같이  $[C_{red}/C_{ox}]$ 의 감소에 의해서  $\Delta R$ 이 증가한 것으로 설명할 수 있다. Fig. 5(b)는 5(a)의 결과를  $\Delta R_A$ 와  $\Delta R_B$ 로 구분하여 나타냈다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 제시한 결과에 대해서  $\alpha_{TCR}$ 을 고려하지 않았을 경우에 발생하는 오차를 Table 1에 정리하였다. 여기서 온도 오차( $\epsilon_{temp}$ )는 식(6)과 같이 전체 응답 ( $\Delta R_A$ )중  $\alpha_{TCR}$ 에 의한 응답 변화 ( $\Delta R_B$ )로 정의하였다.

$$\epsilon_{temp} = \left( \frac{\Delta R_B}{\Delta R_A} \right) \times 100\% \quad (5)$$

CNT 필름 센서의 경우  $\epsilon_{temp}$ 는 각각 1.8%(30°C), 3.8%(40°C),

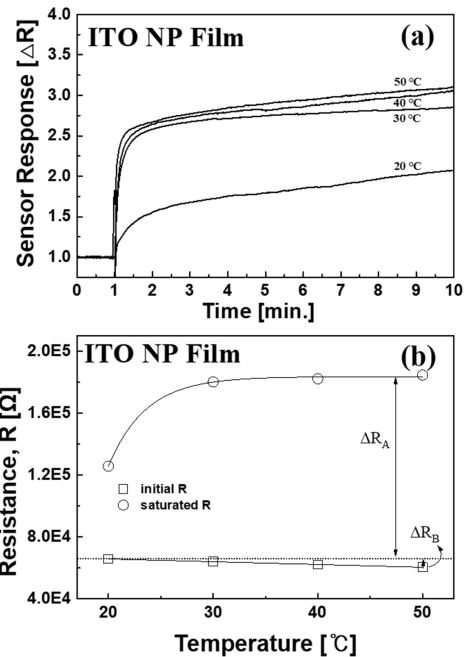


Fig. 5. (a) Temporal response of ITO film sensor in seawater at elevating temperature, (b) analysis of sensor response.

Table 1. Temperature related error of CNT and ITO film sensors

Temperature	Error [%, $\Delta R_B/\Delta R_A \times 100\%$ ]	
	CNT Film	ITO Film
20°C	0	0
30°C	1.8	6.1
40°C	3.8	12.5
50°C	5.2	17.4

5.2%(50°C)였다. 반면에, ITO 필름의 경우 각각 6.2%(30°C), 12.5%(40°C), 17.4%(50°C)로 나타났다. ITO 필름에 비해 CNT Film의 온도에 대한 오차가 작은 이유는 전도 메커니즘 차이로 확인된다. ITO 필름의 경우 hopping 전도에 의존하며[21], 온도 변화에 따른 결합의 이온화도 전도성 변화에 기여하지만[22], CNT 필름의 경우 구조적으로 그러한 영향이 적을 것이므로 온도에 의한 전도성 변화가 작고 온도 센서 응용에 적합할 것으로 판단된다. 앞선 연구에서 상온에서 반복 측정 시 발생하는 오차가  $\pm 4.5\%$  임과 비교할 때 [13] 온도변화에 의한 응답 변화를 무시할 수 없다는 것을 시사하고 있다. 따라서 실온에서 측정된 센서 응답을 기준으로 온도변화에 의해서 발생하는 응답 변화를 해석하는 것이 보다 정확한 검출 값을 기대할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CNT 필름을 이용하여 해수 중에서도 동작 가

능한 액상 HNS 검출 센서를 제작하고 센서 응답의 온도 의존성을 고찰하였다. 먼저 CNT 필름의 온도저항계수를 측정하였고, 이 결과를 이용하여 온도를 변화시키며 얻은 센서의 응답을 분석하였다. 온도 변화에 의한 CNT 필름의 응답 변화는 (1) 온도 저항 변화에 의한 성분과 (2) 표면의 산화환원 반응의 변화에 의해서 발생하는 것으로 설명하였다. CNT 필름의 온도 저항 변화에 의해서 발생하는 센서 응답의 오차는 연중 해수 온도의 변화 범위 안에서 5.2% 정도로 확인되었다. 따라서, 해수 중 정확한 측정을 위해서는 온도 변화에 따른 응답 변화를 보완할 수 있어야 한다는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(위험유해물질(HNS)사고 관리 기술개발)이다. (D11502119H480000120)

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다. (P0012451, 2022년 산업전문인력역량강화사업)

### REFERENCES

- [1] K. F. Lei, K. F. Lee, and S. I. Yang, "Fabrication of carbon nanotube-based pH sensor for paper-based microfluidics", *Microelectron. Eng.*, Vol. 100, pp. 1-5, 2012.
- [2] X. Tang, S. Bansaruntip, N. Nakayama, E. Yenilmez, Y. Chang, and Q. Wang, "Carbon Nanotube DNA Sensor and Sensing Mechanism", *Nano Lett.*, Vol. 6, No. 8, pp. 1632-1636, 2006.
- [3] J. Y. Yoon and B. Kim, "Lab-on-a-Chip Pathogen Sensors for Food Safety", *Sensors*, Vol. 12, No. 8, pp. 10713-10741, 2012.
- [4] Y. R. Kim, T. W. Kim, M. H. Son, S. W. Oh, and M. J. Lee, "A Study on Prioritization of HNS Management in Korean Waters", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 21, No. 6, pp. 672-678, 2015.
- [5] D. Ko, J. Choi, J. Seo, J. Noh, S. Lee, J. Jung, and J. Chang, "Chemical sensing properties of indium-tin-oxide (ITO) printed films fabricated on biodegradable plastics", *AIP Adv.*, Vol. 10, No. 4, pp. 045228(1)-045228(6), 2020.
- [6] H. Huang, S. Su, N. Wu, H. Wan, S. Wan, H. Bi, and L. Sun, "Graphene-Based Sensors for Human Health Monitoring", *Front. Chem.*, Vol. 7, pp. 1-26, 2019.
- [7] A. S. Berdinsky, Y. V. Shevtsov, A. V. Okotrub, S. V. Trubin, L. T. Chadderton, D. FINK, and J. Lee, "Sensor properties of fullerene films and fullerene compounds with iodine", *Chem. Sustain. Dev.*, Vol. 8, Vol. 14, pp. 141-146, 2000.
- [8] M. I. Bodnarchuk, M. V. Kovalenko, S. Pichler, G. Fritz-Popovski, G. Hesser, and W. Heiss, "Large-Area Ordered Superlattices from Magnetic Wurtzite/Cobalt Ferrite Core/Shell Nanocrystals by Doctor Blade Casting", *ACS Nano*, Vol. 4, No. 1, pp. 423-431, 2010.
- [9] P. P. Prosini, C. Cento, M. Carewska, and A. Masci, "Electrochemical performance of Li-ion batteries assembled with water-processable electrodes", *Solid State Ion.*, Vol. 274, pp. 34-39, 2015.
- [10] M. Wang, Z. Wang, X. Gong, and Z. Guo, "The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 29, pp. 573-588, 2014.
- [11] S. Lee, H. Moon, Y. Choi, and D. K. Yoon, "Analyzing Thermal Characteristics of Urban Streets Using a Thermal Imaging Camera: A Case Study on Commercial Streets in Seoul, Korea", *Sustainability*, Vol. 10, No. 2, pp. 519(1)-519(21), 2018.
- [12] J. Noh, S. An, C. Lee, J. Chang, S. Lee, M. Lee, and D. Seo, "Investigation on the Printed CNT-Film-Based Electrochemical Sensor for Detection of Liquid Chemicals", *Sensors*, Vol. 21, No. 15, pp. 5179(1)-5179(10), 2021.
- [13] A. Naeemi and J. D. Meindl, "Physical Modeling of Temperature Coefficient of Resistance for Single- and Multi-Wall Carbon Nanotube Interconnects", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 28, No. 2, pp. 135-138, 2007.
- [14] Levinshtein M, Rumyantsev S, and Shur M, *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, World Scientific, Singapore, 1996.
- [15] B. Wang, J. Lai, H. Li, H. Hu, and S. Chen, "Nanostructured vanadium oxide thin film with high TCR at room temperature for microbolometer", *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 57, pp. 8-13, 2013.
- [16] Q. Li, S. Luo, Y. Wang, and Q. M. Wang, "Carbon based polyimide nanocomposites thin film strain sensors fabricated by ink-jet printing method", *Sens. Actuator. A Phys.*, Vol. 300, p. 111664, 2019.
- [17] M. C. Hsu and G. B. Lee, "Carbon nanotube-based hot-film and temperature sensor assembled by optically-induced dielectrophoresis", *IET Nanobiotechnol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 44-50, 2014.
- [18] A. O. Horvath and L. S. Greenberg, *The Working Alliance: Theory, Research, and Practice*, John Wiley and Sons, New York, pp. 1-295, 1994.
- [19] N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, and J. L. Dempsey, "A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry", *J. Chem. Educ.*, Vol. 95, No. 2, pp. 197-206, 2018.
- [20] R. Chandrasekharan, L. Zhang, V. Ostroverkhov, S. Prakash, Y. Wu, Y. R. Shen, and M. A. Shannon, "High-temperature hydroxylation of alumina crystalline surfaces", *Surf. Sci.*, Vol. 602, No. 7, pp. 1466-1474, 2008.
- [21] J. Ederth, P. Heszler, A. Hultåker, G. Niklasson, and C. Granqvist, "Indium tin oxide films made from nanoparticles: models for the optical and electrical properties", *Thin Solid Films*, Vol. 445, No. 2, pp. 199-206, 2003.
- [22] A. Tschöpe, "Grain size-dependent electrical conductivity of polycrystalline cerium oxide I. Experiments", *Solid State Ion.*, Vol. 139, No. 3-4, pp. 255-265, 2001.