

## 웨어러블용 *Nylon - Yarn* $NO_x$ 가스 센서의 검출 온도 변화에 따른 열 특성 시뮬레이션

장경욱 

가천대학교 전기공학과

### Thermal Characteristics Simulation with Detecting Temperature for the Wearable *Nylon - Yarn* $NO_x$ Gas Sensors

Kyung-Uk Jang

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received March 17, 2020; Revised March 24, 2020; Accepted March 30, 2020)

**Abstract:** Atmospheric environmental problems have a major impact on human health and lifestyle. In humans, inhalation of nitrogen oxides causes respiratory diseases, such as bronchitis. In this paper, thermal analysis of a gas sensor was carried out to design and fabricate a wearable nylon-yarn gas sensor for the detection of  $NO_x$  gas. In the thermal analysis method, the thermal diffusion process was analyzed while operating the sensors at 40 and 60°C to secure a temperature range that does not cause thermal runaway due to temperature in the operating environment. Thermal diffusion analysis was performed using the COMSOL software. The thermal analysis results could be useful for analyzing gas adsorption and desorption, as well as the design of gas sensors. The thermal energy diffusion rate increased slightly from 10.05 to 10.1 K/mm as the sensor temperature increased from 40 to 60°C. It was concluded that the sensor could be operated in this temperature range without thermal breakdown.

**Keywords:** Wearable sensor, Nylon + MWCNT gas sensor, Comsol, FEM, Heating energy simulation

### 1. 서론

대기 환경 문제는 인간의 건강과 생활 패턴에 큰 영향을 미친다. 환경 문제를 일으키는 요소로 가스인 질소산화물( $NO_x$ )은 기본적으로 모든 고온의 연소 과정에서 형성되며, 이산화질소( $NO_2$ ), 아산화질소( $N_2O$ ), 일산화질소( $NO$ ) 등으로 구성된다.

CH계열 연료가 연소될 시, 질소가 없거나 무시할 정도의 경우 미량의 질소로 인해 공기 중에서  $NO$ 가 형성된다. 대부분의 고체 연료가 질소산화물의 주요 공급원이 된다. 연소 중 발생하는 질소산화물을 줄이기 위한 시스템은 많은 연구가 진행되고 있다. 질소산화물은 대기 환경에서 자외선에 의해 광화학 반응을 일으키는 오존을 전구체로서 생성시키며 또한, 공기 중의 물 분자와 결합하여 산성비를 발생시키는 원인이 된다. 인간에 미치는 영향으로서는 질소산화물을 흡입하게 되면 기관지염 등의 호흡기 질환의 원인이 된다. 이와 같이 질소산화물은 다양한 문제를 발생시키므로 이로 인해 제기되는 환경 문제는 인간에게 악영향을 끼치므로 이를 실시간으로 감지할 수 있는 센서가 필요하다 [1].

✉ Kyung-Uk Jang; [kujang@ghachon.ac.kr](mailto:kujang@ghachon.ac.kr)

Copyright ©2020 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.

본 논문에서는  $NO_x$  가스를 검출하기 위한 Nylon-yarn 가스 센서를 설계하고, 제작하기 위해서 가스센서에서 중요한 가스 분자의 흡착 탈착과정에서 열에너지의 전달과정이 중요한 인자이기 때문에 가스센서의 열해석을 모사하였다. 모사에 사용된 가스센서는 애노드와 캐소드 간격 30 mm를 갖는 웨어러블 Fabric (Nylon yarn) + MWCNT 가스 센서에 대해서 모델링하였다. 특히 센서 사용 환경에서 온도에 의한 열폭주 현상이 일어나지 않는 온도 구간을 확보하기 위해서 센서 하부에서 40 및 60°C로 각각의 온도별로 열을 인가하면서 열확산 과정을 분석하였다. 열확산 분석은 Comsol 프로그램을 이용하여 진행하였으며, 열해석 결과는 가스센서의 설계뿐만 아니라 가스의 흡·탈착을 해석하는 데 유용하게 사용할 수 있었다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 센서 제작 및 모델링

그림 1은 Nylon-yarn 가스 센서의 제작과정에 대한 이미지를 나타낸다. 그림 1(a)는 실제 사용된 Nylon-yarn의 실제도이다. 그림 1(b)는 MWCNT 박막 처리된 Nylon-yarn을 나타내고 있으며, MWCNT가 박막처리가 되어 기존의 Nylon-yarn 실의 색이 MWCNT의 색인 검은색으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 그림 1(c)는 전극 처리된 Nylon-yarn 가스 센서를 나타낸다.

특히, 그림 1(c)의 센서를 그림 2에 보이는 바와 같이 전극 사이의 애노드와 캐소드 간격을 30 mm로 하여 모델링하였으며, 모델링된 센서에 대해서 검출가스 분자가 센서 표면에 유효하게 흡착되도록 온도를 40 및 60°C로 균일하게 유지되도록 하여 열전달을 모사하였다. 그림 2는 웨어러블 Fabric (Nylon yarn) + MWCNT 가스 센서의 구조로서 애노드(anode)와 캐소드(cathode) 전극의 전극은 0.5 mm의 두께로 금을 증착하였으며 가스 검출부로는 전극 간격은 30 mm로 구성하였다.

그림 2의 가스센서에 온도를 40 및 60°C로 인가할 때 열전달을 해석하기 위해서 comsol 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 열의 확산 과정과 열의 분포 상태를 확인하였다 [2].

또한, 그림 3은 가스센서의 구조 상세도를 나타내고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 열의 확산 과정과 열의 전달률은 전달매체의 특성 값을 나타내는 열에너

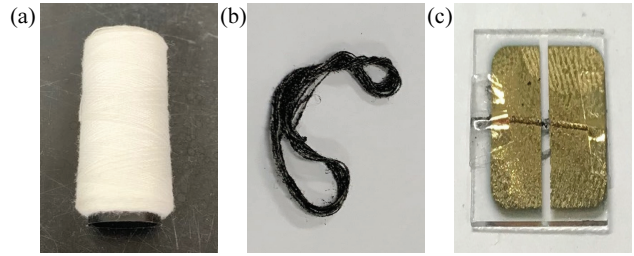


Fig. 1. The image of gas sensor. (a) Nylon-yarn, (b) Nylon-yarn with MWCNT, and (c) Nylon-yarn real gas sensor.

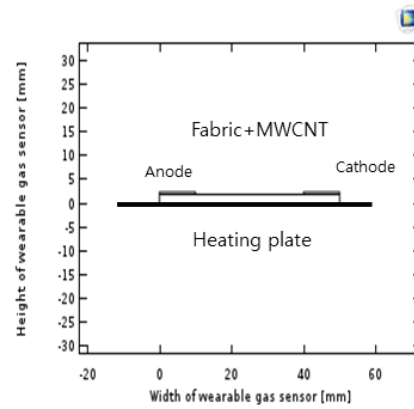


Fig. 2. The structure of gas sensor for simulation.

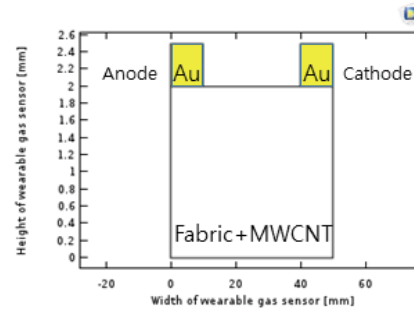


Fig. 3. Detail structure of gas sensor for simulation.

지 전달계수  $c$ 에 영향을 받으며, 다음의 열에너지 전도법칙의 식 (1)로 해석하였다 [3].

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = -cA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

여기서,  $q$ 는 열의 전달 유동량,  $t$ 는 열에너지의 전도 시간,  $A$ 는 열에너지의 전달 단면적,  $\Delta T$ 는 전달온도 변화량,  $x$ 는 열에너지의 전도 길이,  $c$ 는 열에너지의 전도도를 나타낸다.

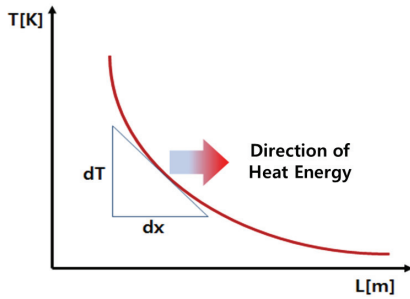


Fig. 4. Relation with the temperature T and the distance L.

그림 4는 전달온도 거리 L의 변화에 따른 전달온도 T의 유동에 관한 그래프이며, T와 L의 관계는 역비례한다는 것을 확인할 수 있었고, 작은 구간에서는 직선화할 수 있었다.

$$q = -c \cdot A_c \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot \Delta t \quad (2)$$

여기서, q [W]는 열에너지, c [W/mK]는 열전달계수,  $A_c$  [ $m^2$ ]는 센서의 열의 전도 면적,  $\Delta T$  [°C]는 두 점의 온도 차이,  $\Delta t$ 는 열의 전달 시간, L [m]는 열 전달체의 길이를 나타낸다.

$$\rho v \cdot \Delta v = \Delta \cdot [-pI + \eta(\Delta v + (\Delta v)^T) - (2\eta/3)(\Delta \cdot v)I] + \rho g \quad (3)$$

$$\Delta \cdot (\rho v) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta \cdot (-c\Delta T + \rho C_p T_v) = 0 \quad (5)$$

위와 같이 식 (1)~(5)는 센서에 대한 시뮬레이션에서 열압력, 열전도도, 속도의 식을 열 이동의 차동속도로 치환하여 대입하였으며, 시뮬레이션 시 가스 센서의 열 전달의 지배방정식은 점도  $\eta$  [kg/(ms)], 열전달속도  $v$  [m/s], 센서의 고체밀도  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], 압력  $p$  [Pa], 열 에너지의 전도도  $c$  [W/(K·m)], 열에너지에너지  $C_p$  [J/(kg·K)]를 의미한다 [4].

열의 전달과정을 분석하기 위해서 센서의 구조에 대해서 모사를 진행하였으며, 제시된 모사체에 대해서 센서 구성 요소에 대한 재료를 특정하고, 특정된 재료의 고윳값을 제시하였으며, FEM법을 이용하여 제시된 가스 센서에 대해서 열이 전달되는 과정을 밝히기 위해서 메시 분석을 수행하였으며, 분석된 메시 구조체에

대해서 편미분 지배방정식으로 표현되는 식 (1)~(5) 및 식 (6)~(9)까지의 방정식을 활용하여 열에너지 전달 특성을 분석하였다 [5].

또한, 모사된 웨어러블 Fabric (Nylon yarn)+MWCNT 가스 센서에서 최대 열전달 능력은 일반적인 전기회로와 마찬가지로  $(m-1)$ 일 때,  $\eta_{max}$ 은 효율을 의미하므로 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = (m-1) \frac{\Delta T}{T_h} \frac{1}{2+4/ZT_h - \Delta T/(2T_h)} \quad (6)$$

$$(R/r)_{opt} = \sqrt{1+ZT} = M \quad (7)$$

$$P = (a_m \Delta T - rI)I = RI^2 \quad (8)$$

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \frac{M-1}{M+(T_c/T_h)} \quad (9)$$

열 전달효율  $\eta$ 가 최대가 되는  $m$ 을 구하기 위하여  $\partial\eta/\partial m = 0$ 에서  $m$ 을 구하면  $\eta_{max}$ 를 구할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 5는 모델링된 가스 센서에 대해서 온도를 40 및 60°C에서 열에너지의 확산을 나타내는 메시 해석결과를 보이고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 애노드와 캐소드 전극 부분에서 열이 가스 검출부의 중심보다 크다는 것을 확인할 수 있으며, 온도가 증가할수록 전극부의 열에너지가 증가하는 것을 알 수 있다.

센서의 하부로부터 공급된 열에너지는 애노드와 캐소드 전극 쪽으로 같은 열에너지 전달속도 식 (10)에 의해 전파되는 것을 확인할 수 있었다 [6].

$$v = \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (10)$$

여기서,  $\Delta T$  [K]는 열의 전도경로에서의 온도차, 열원에서 최종 목적지까지의 거리  $\Delta x$  [mm]는 열의 전달경로를 나타낸다.

그림 6은 온도 변화에 따라서 센서 내부에서 열에너지가 확산되는 현상을 보이고 있다. 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 열에너지는 센서 하부 전극에서 애노드와 캐소드 전극 쪽으로 확산되는 현상을 볼 수 있다.

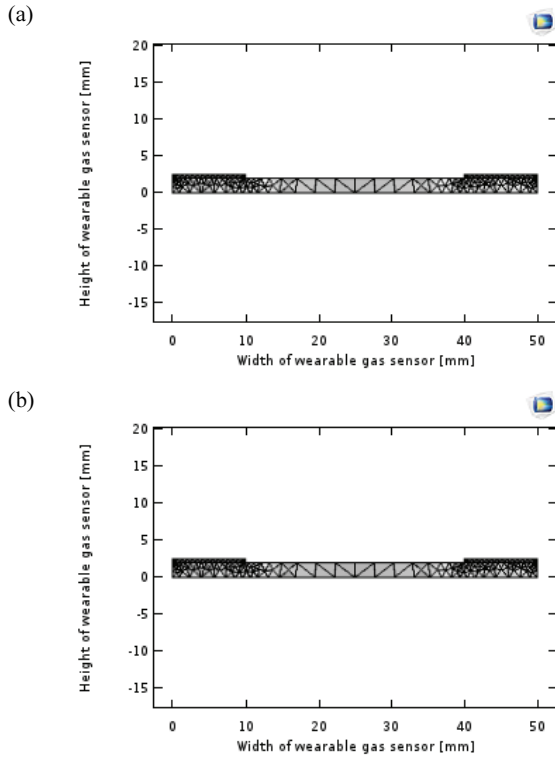


Fig. 5. Mesh analysis using FEM for gas sensor. (a) 313 K and (b) 333 K.

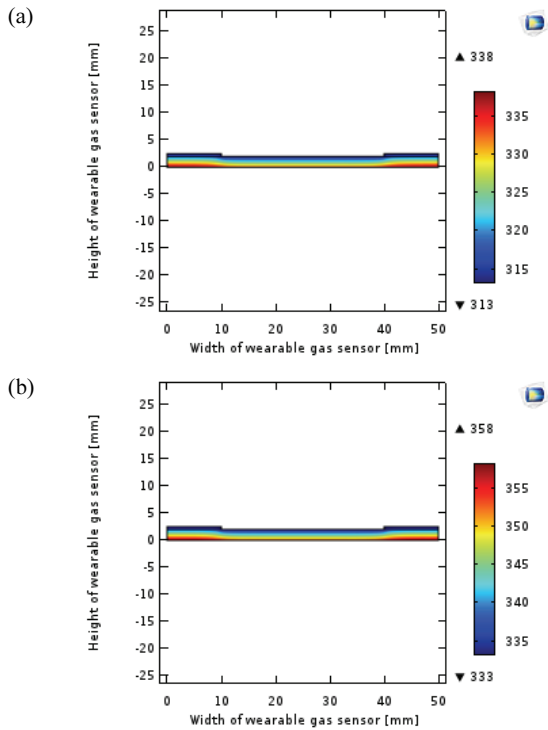


Fig. 6. 2D thermal flux analysis for gas sensor. (a) 313 K and (b) 333 K.

그림 7은 가스 센서의 2D 열유동 해석 결과를 상세하게 보여주고 있으며, 센서 하부의 열원으로부터 가스 분자 감지 표면으로 열이 전달되는 과정을 보이고 있다.

그림 8은 온도 변화에 따라서 모델링된 센서의 내부 위치에 따라서 열에너지가 확산되는 현상을 해석하기 위해서 가스 센서 중앙 부분에 붉은색으로 전단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 9는 해당 전단면에서의 온도 변화에 따른 열에너지 분포곡선을 보이고 있다. 센서 하부 게이트 전극으로부터 공급된 열에너지는 애

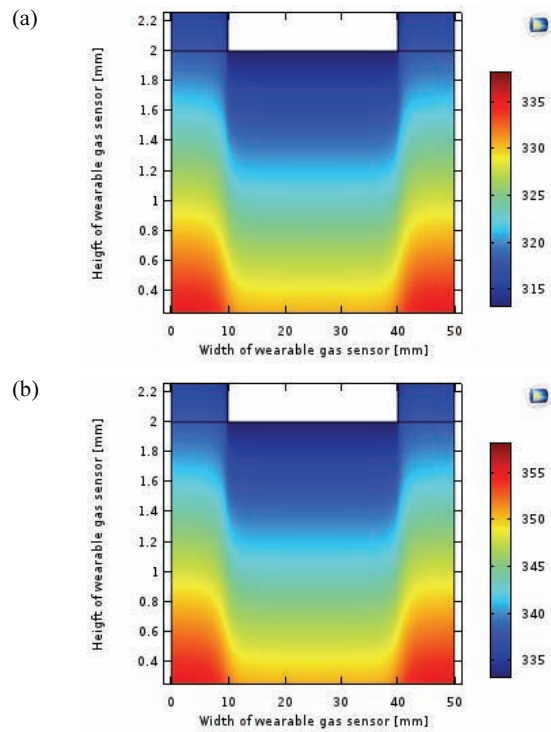


Fig. 7. Detail map of 2D thermal flux analysis for gas sensor. (a) 313 K and (b) 333 K.

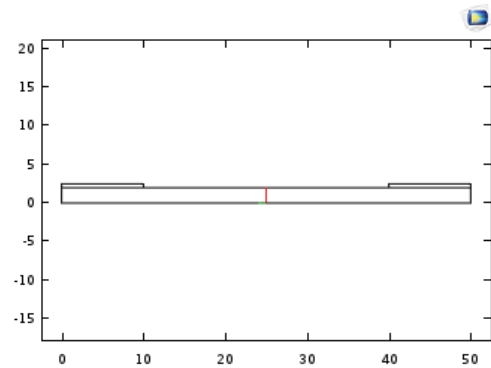


Fig. 8. Analysis position of sensor cross section.

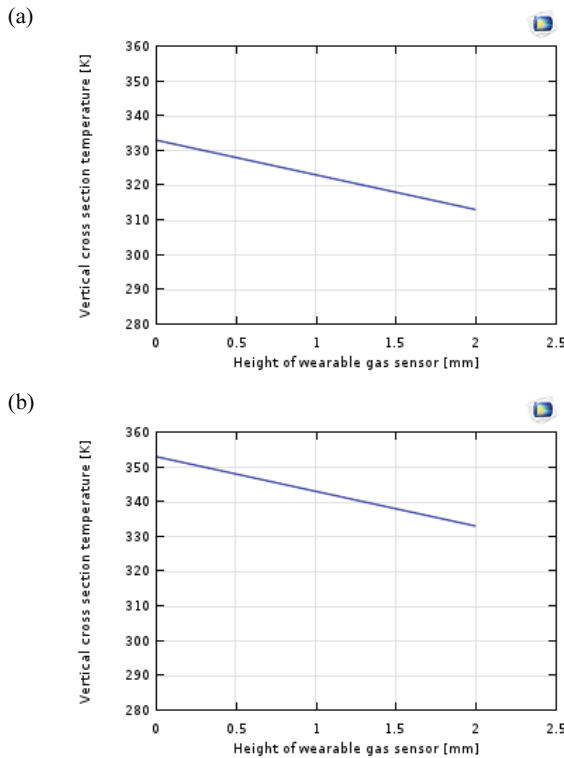


Fig. 9. Analysis results of sensor surface. (a) 313 K and (b) 333 K.

노드와 캐소드 전극 쪽으로 식 (10)과 같은 열전달 속도식에 의해 전달되는 것을 확인할 수 있었다 [7].

그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 식 (10)으로부터 구한 열전달속도는 온도 변화에 따라서 센서 하부로부터 애노드-캐소드의 전극영역으로 전달되며 하부 전극으로부터 멀어질수록 열에너지의 절댓값의 크기가 떨어지는 것을 알 수 있다. 그림 9의 열에너지 전달곡선으로부터 열 전달속도 식 (10)에 의해서 구한 열에너지 확산속도는 센서의 온도가 변화되면 10.05 K/mm 및 10.1 K/mm으로 미세하게 증가하고 있는 것을 확인하였지만, 거의 선형 구간으로 받아들일 수 있는 값으로 판단되었으며, 열 폭주가 없이 센서를 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 애노드와 캐소드 간격 30 mm를 갖는 웨어러블 *Fabric (Nylon yarn) + MWCNT* 가스 센

서에 대해서 사용 환경에서 온도에 의한 열 폭주 현상이 일어나지 않는 온도 구간을 확보하기 위해서 센서 하부에서 40 및 60°C로 각각의 온도별로 열을 인가하면서 comsol 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 열확산 과정을 분석하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) Comsol 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 모델링된 가스 센서의 각 부분에서 온도 분포를 해석하였으며 이는 가스 검출 특성을 해석하는 데 유용한 자료로 활용할 수 있었다.
- 2) 센서에 인가된 온도의 변화에 따라서 센서 하부 영역으로부터 전극 방향으로의 열이 전달되었으며, 전달속도는 균일하게 전달된다는 것을 확인하였다.
- 3) 열에너지 확산 속도는 센서의 온도를 40 및 60°C로 각각의 온도에서 10.05 K/mm 및 10.1 K/mm으로 미세하게 증가하였지만, 해당 온도 구간에서 열 폭주 현상은 보이지 않았으며, 센서 작동 온도로 적당하다는 결론을 얻었다.

#### ORCID

Kyung-Uk Jang

<https://orcid.org/0000-0002-0599-8370>

#### REFERENCES

- [1] H. S. Kim and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 521 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.7.521>]
- [2] I. Korhonen and J. Ahola, *Measurement*, **145**, 594 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.025>]
- [3] L. Shu, X. Wang, L. Li, D. Yan, L. Peng, L. Fan, and W. Wu, *Sens. Actuators, A*, **293**, 14 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.012>]
- [4] Altsoft, *Sealing Technol.*, **2010**, 4 (2010). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(10\)70335-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(10)70335-4)]
- [5] A. Khajepour and F. Rahmani, *Appl. Radiat. Isot.*, **119**, 51 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.11.001>]
- [6] K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 403 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.6.403>]
- [7] K. U. Jang, *J. Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **23**, 793 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.3.793>]