

웨어러블 NO_x 가스센서의 열유동 해석

Thermal Flux Analysis for the Wearable NO_x Gas Sensors

장 경 옥^{*★}

Kyung-uk Jang^{*★}

Abstract

In this study, the diffusion process and the thermal energy distribution gradient of the sensor were confirmed by using the finite element analysis program (COMSOL) of the mesh method to analyze the thermal diffusion in the wearable fabric (Nylon) + MWCNT gas sensor.

To analyze the diffusion process of thermal energy, the structure of the gas sensor was modeled in a two dimension plane. The proposed modeling was presented with the characteristic value for the component of the sensor, and the gas sensor designed using the mesh finite element method (FEM) was proposed and analyzed by suggesting the one-way partial differential equation in the governing equation to know the degree of thermal energy diffusion and the thermal energy gradient.

In addition, the temperature gradient 10[K/mm] of the anode-cathode electrode layer and the gas detection unit was investigated by suggesting the heat velocity transfer equation.

요 약

본 연구에서는 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스센서 내부에서 열확산을 해석하기 위해서 요소해석 프로그램 (comsol)을 이용하여 센서 내부에서의 열용량의 확산 과정과 열용량 분포 경도를 확인하였다.

열용량의 확산과정을 해석하기 위해서 가스센서의 구조체에 대하여 이차원으로 모델링을 진행하였으며, 제시된 모델링에 대해서 센서 구성 부분에 대한 특성값을 제시하여 메시 요소법(FEM)을 이용하여 설계된 웨어러블 가스센서에 대해서 열용량이 확산되는 정도와 열용량 경도를 구하기 위해서 지배방정식으로 1계 편미분방정식을 제안하여 해석하였으며, 열속도 전달식을 제안하여 전극층과 가스 검출부의 10[K/mm] 온도 경도를 구하였다.

Key words : Wearable gas sensor, COMSOL, Nylon + MWCNT gas sensor, FEM, Thermal energy gradient

1. 서론

오늘날 미세먼지 및 자동차 배기가스의 문제는 심각하다. 가스센서는 연소가스 및 화장품 제조 공정 등 폭넓은 분야에서 사용되고 있으며, 이들 특성을 만족해야 한다. 특히 가스 검출 센서는 폭넓

은 농도의 가스를 검출해야 하며, 낮은 비용, 박막화, 지속성 등 조건을 만족해야 하지만 현재까지 사용하여 온 기존의 가스센서는 고온 특성, 빠른 응답성, 중량, 수명 문제 등 해결해야 할 과제가 많이 남아있다[1, 2].

가스센서에서는 가스 흡착의 안정성을 높이기 위

* Dept. of Electrical Engineering, Gachon University

★ Corresponding author

E-mail : Kujang@gachon.ac.kr, Tel : +82-31-750-5710

※ Acknowledgment

Manuscript received Aug. 12, 2019; revised Sep. 12, 2019; accepted Sep. 16, 2019.

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.

하여 센서 표면의 온도를 일정하게 유지하기 위해 센서 하부에서 열을 가하여 효과적으로 가스 분자가 흡착되도록 하는 것이 필요한데 센서 하부에서 가해진 열이 센서 내부에서 확산되어 가스 검출 표면으로 전이되는 현상은 중요한 요소로 생각된다. 본 연구에서는 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스센서 내부에서 열용량의 확산을 해석하기 위해서 comsol이라는 메시법의 요소 해석 프로그램(comsol)을 이용하여 센서 내부에서의 열용량의 확산 과정과 열용량 분포 및 경도를 확인하였다[3, 4].

열용량의 확산과정을 분석하기 위해서 가스센서의 구조체에 대하여 2D적으로 설계하여 해석을 진행하였으며, 제시된 구조체에 대해서 센서 구성 부분에 대한 규정값을 제시하여 메시 요소법(FEM)을 이용하여 설계된 웨어러블 가스센서에 대해서 열용량이 확산되는 정도와 열용량 경도를 알기 위해서 지배방정식으로 1계 편미분방정식을 제안하여 해석하였다[5].

또한, 열속도 전달식을 제안하여 전극층과 가스 검출부의 온도 경도를 고찰하였다.

II. 본론

1. 실험 방법

본 연구에서는 그림 1과 같이 애노드와 캐소드사이의 전극간격이 30[mm]로 설계된 가스센서에 대해서 가스 분자가 효과적으로 흡착되도록 하기 위해서 가스센서 검출 표면의 온도를 20[°C]로 균일하게 유지하도록 하였다. 그림2에서 보는 바와 같이 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스 센서의 구조는 애노드(Drain), 캐소드(Source) 전극으로 두께 0.5[mm]의 Au를 이용하였으며 가스 검출 부로는 두께 2[mm]의 Fabric (Nylon) + MWCNT 으로 구성하였다.

웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스센서에서 가스 검출 표면의 온도를 20[°C]로 유지하기 위해서는 센서 하부에서 온도를 가열하여야 하는데, 가해진 열용량이 웨어러블 센서 내부에서 어떤 양상으로 확산되는가 하는 문제는 가스 분자 검출 특성에서 매우 중요한 인자로 생각된다. 웨어러블 가스센서에 흡착되는 가스분자의 측면에서 센서를 보면 전극간격이 넓어야 효과적이지만 전극간격이

상대적으로 너무 넓게 되면 균형적인 열 분포의 균형을 잃고, 이러한 상보적인 관계를 해결하기 위해서 센서 설계시에 이상적인 전극간격을 결정해야 한다[6].

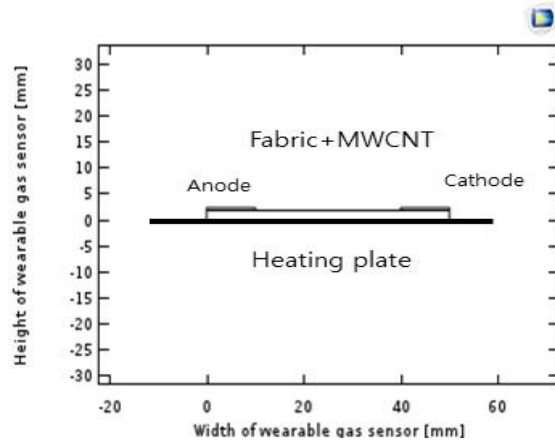


Fig. 1. The structure of wearable gas sensor.
그림 1. 웨어러블 가스센서의 구조

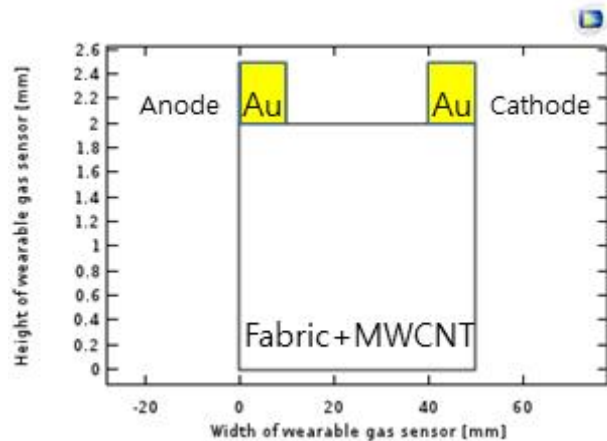


Fig. 2. Detail diagram of wearable gas sensor.
그림 2. 웨어러블 가스센서의 상세도

이를 해석하기 위해서 comsol 프로그램을 이용하여 열용량의 확산 과정과 열용량의 분포 경도를 확인하는 것이 필요하다[7, 8].

웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스 센서 내의 열용량 분포를 해석하기 위해서는 다음의 열용량 전달식을 이용하였다. 열용량 해석 지배식인 열용량 전달형태로서 물체 내에 두 지점 사이의 온도 차이가 있을 때 열용량은 높은 곳에서 낮은 온도 측으로 전달된다. 국소적으로 보면 물질 내 결정격자 내의 원자나 분자의 상호 작용에 의해 열용량이 전달되며, 즉 격자의 진동과 미립자의 거동에 의해

인접한 분자에 열을 전달하는 열용량의 유동률은 매질의 특성 값인 열용량 전도계수 c 에 크게 좌우되며, (1) 식으로 표현되는 열용량 전도법칙인 Fourier's Law을 지배 방정식으로 적용하였다[9].

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

여기서, q 는 열용량의 유동량, t 는 열용량의 전달 시간, A 는 열용량의 전달단면적, ΔT 는 온도 변화량, x 는 열용량의 전도길이, c 는 열용량의 전도도이다.

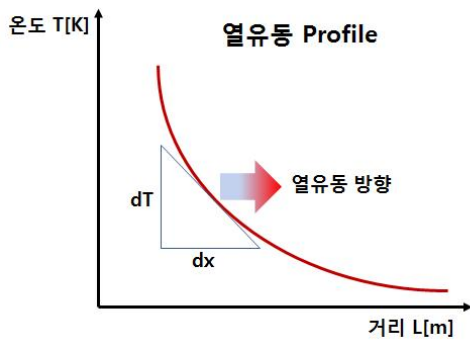


Fig. 3. Correlation with the temperature T and the distance L .
그림 3. 온도 T 와 거리 L 사이의 상관관계

그림 3은 거리 L 의 변화에 따른 온도 T 의 유동에 관한 그래프이며, 그림에서 보는 바와 같이 온도 T 와 거리 L 의 상관관계는 지수 함수적으로 반비례한다는 것을 직감적으로 확인 할 수 있다. 그렇지만 미소 구간에서는 직선적으로 선형화할 수 있다는 것을 알 수 있다.

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

여기서, q [W]는 열용량의 유동량, c [W/mK]는 열용량의 전도도, A_c [m²]는 센서의 열용량 전달면적, ΔT [°C]는 온도차, Δt 는 열용량 전달시간, L [m]는 열용량 전달체의 전체높이를 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 열용량 전달체에 대한 유동 시뮬레이션의 열용량 용량에 대한 압력, 열용량

의 전도도, 속도벡터의 방정식을 열용량 이동의 차동속도로 대입하였으며, 시뮬레이션시 가스 센서의 열용량 전달 지배방정식은 점도 η [kg/(ms)], 열용량 전달속도 v [m/s], 센서의 고체밀도 ρ [kg/m³], 압력 p [Pa], 열용량의 전도도 c [W/(K · m)], 열용량용량 C_p [J/(kg · K)]로 구성되어 표현된다[5].

열용량의 확산과정을 해석하기 위해서 가스센서의 구조도에 대해서 모델링을 진행하였으며, 제시된 모델링에 대해서 센서 각각의 구성 부분에 대한 재료를 지정하고, 지정된 재료의 특성값을 제시하였으며, 유한요소법을 이용하여 제시된 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스센서에 대해서 열용량이 확산되는 과정을 제시하기 위해서 메시 분석을 수행하였으며, 제시된 메시 분석 구조체에 대해서 지배 방정식인 편미분 방정식으로 표현되는 식(1)~(5) 및 식(6)~(9)까지의 방정식을 이용하여 열용량 유동해석을 진행하였다[10, 11, 12].

또한, 제안된 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스센서에서 최대 열용량전달 능력은 일반적인 전기회로와 마찬가지로 $(m-1)$ 일 때, η_{\max} 효율은 나타나므로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

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

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

$$P = (a_{pm} \Delta T - rI)I = RI^2 \quad (8)$$

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

열용량 전달효율 η 가 최대가 되는 m 을 구하기 위하여 $\partial\eta/\partial m = 0$ 으로 놓고, m 을 구하면 η_{\max} 를 구할 수 있다.

2. 결과 및 고찰

그림 4는 30[mm]의 전극간격을 갖는 가스 센서에 대해서 모델링한 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스 센서에 대해서 열용량 유동해석을 하기 위한 메시 해석 결과를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 애노드와 캐소드부분인 금속체 부분에서 열경도 경도가 가스 검출부인 Fabric(Nylon) + MWCNT의 중심부 보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

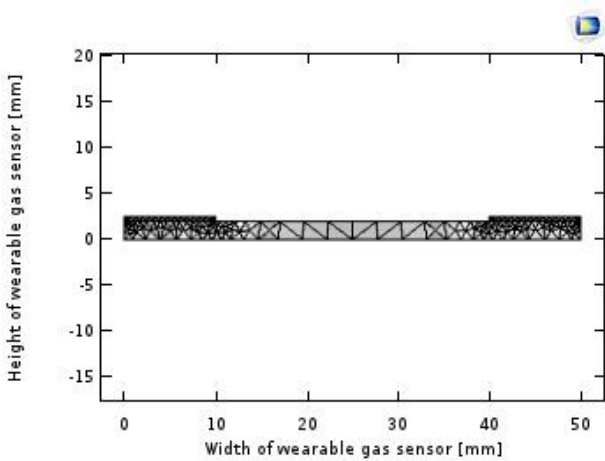


Fig. 4. Mesh analysis using FEM for wearable gas sensor.
그림 4. 웨어러블 가스센서의 FEM 메시해석

그림 5는 전극간격에 따른 MWCNT 가스센서에 대해서 가스 검출 표면의 온도를 20[°C]로 유지하기 위해서 센서 하부에서 열용량을 인가하였을 경우에 센서 내부에서 열용량이 확산되는 현상을 도식적으로 보이고 있다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 열용량이 센서하부 전극에서 애노드과 캐소드 전극 부분으로 확산되는 현상을 알 수 있다. 그림 6은 센서 내부에서 열용량이 확산되는 과정을 확대한 것이다. 그림 5와 6에서 알 수 있는 바와 같이 가스 검출 표면의 온도를 20[°C]로 유지하기 위해서는 가열부의 온도를 45[°C]로 해야한다. 그림 7은 제안된 센서에서 열용량이 확산되는 현상을 해석하기 위해서 웨어러블 센서 표면 부분의 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 8은 절단면에서의

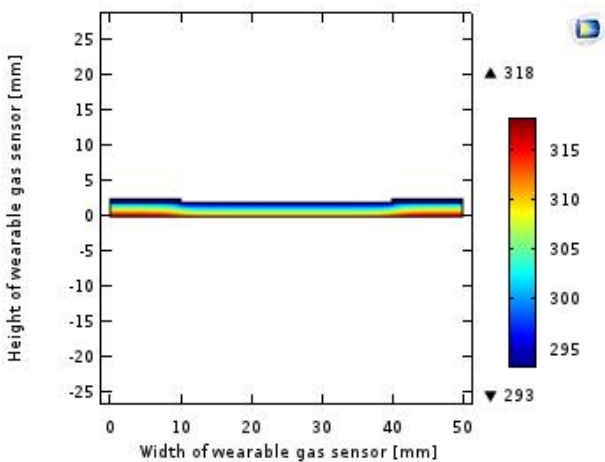


Fig. 5. 2D thermal flux analysis for wearable gas sensor.
그림 5. 웨어러블 가스센서의 2D 열유동 해석

열용량 분포곡선을 보이고 있다. 센서하부 전극으로부터 공급된 열용량은 애노드과 캐소드 전극 쪽으로 식(10)과 같은 열용량 전달속도 실험식에 의해 전파되며, 가스 검출 표면의 온도는 20[°C]로 균일하게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다[13].

$$v = \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{10}$$

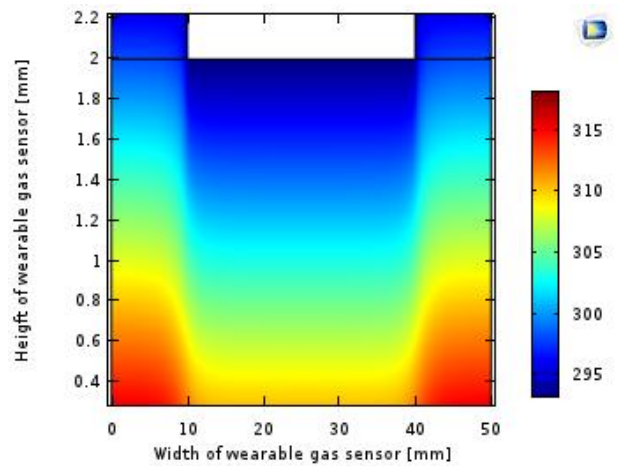


Fig. 6. Detail diagram of 2D thermal flux analysis for wearable gas sensor.
그림 6. 웨어러블 가스센서의 2D 열유동 해석의 상세도

여기서, $\Delta T[K]$ 는 열용량 전달경로 사이의 온도차, 열원으로부터 목적지까지의 $\Delta x[mm]$ 는 열용량 전달경로의 거리이다.

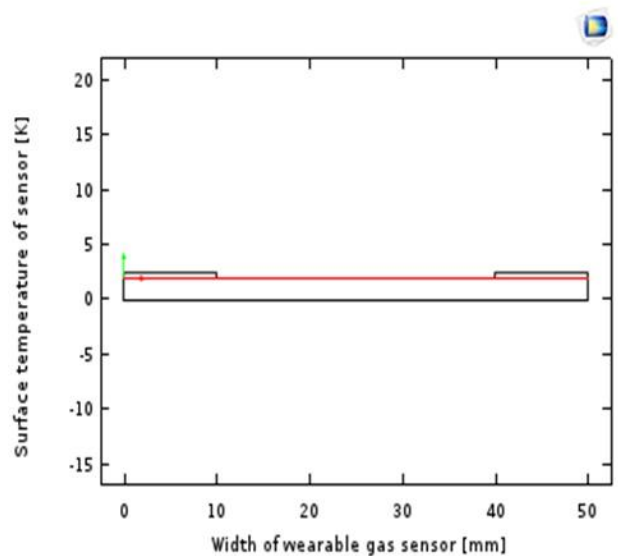


Fig. 7. Thermal analysis position of sensor surface.
그림 7. 센서 표면의 열유동 해석 위치도

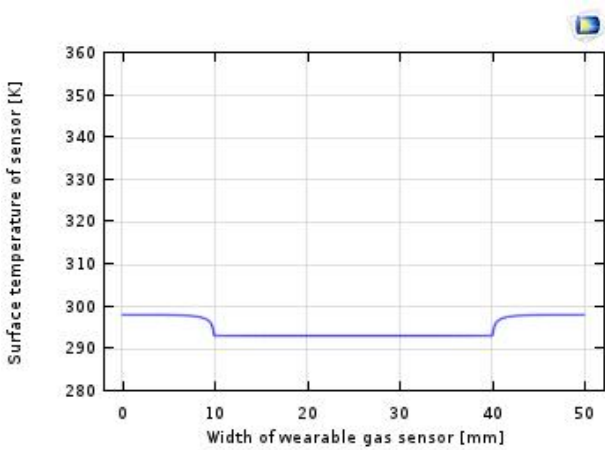


Fig. 8. Thermal analysis results of sensor surface.
그림 8. 센서 표면의 열유동 해석 결과

그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 (10)식에 의해 구한 열용량 전달속도는 센서 하부의 열원 영역으로부터, 애노드-캐소드 전극영역으로 전달되며 센서하부 전극에서 멀어질수록 열용량 전달속도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

그림 9는 제시된 센서에서 열확산을 해석하기 위한 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 10은 표시된 절단면에서의 열용량 분포곡선을 보이고 있으며, 센서 하부에서 공급된 열은 Fabric(Nylon) + MWCNT을 거쳐서 애노드 Au 전극 쪽으로 이동하는 것을 보이고 있다. 센서하부 전극으로부터 공급된 열용량은 센서 하부에서 애노드 전극 쪽으로 이동되고, 열용량 전달속도는 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 열 확산 속도가 균일하다는 것을 의미한다. 가스 검출부와 전극부의 접합부에서 미세한 열경도의 차이는 보이고 있으나

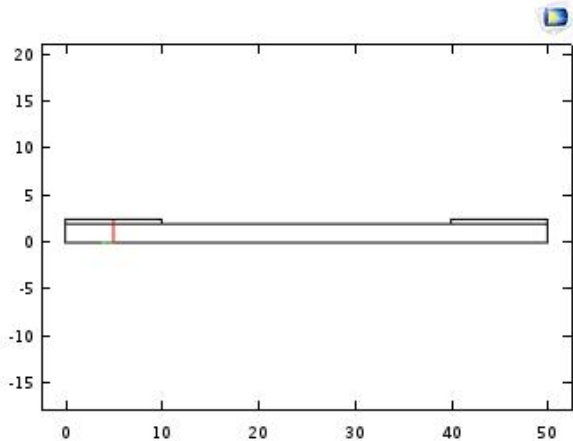


Fig. 9. Thermal analysis position of sensor cross section.
그림 9. 센서 단면의 열유동 해석 위치

영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 즉 열용량 전달속도는 센서하부에서 내부를 거쳐서 표면까지 등온적으로 열용량이 확산되어 열용량이 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

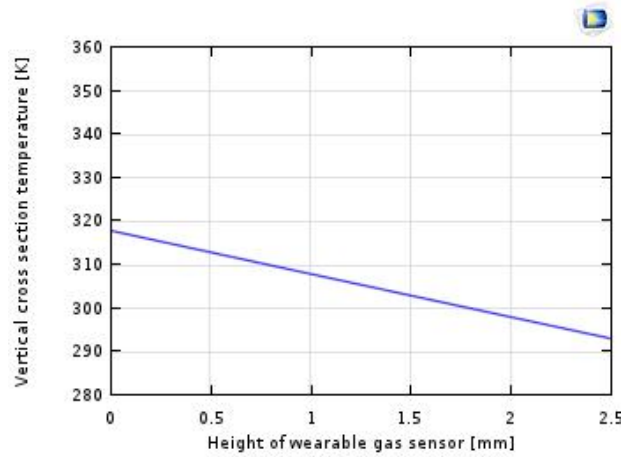


Fig. 10. Thermal analysis results of sensor cross section.
그림 10. 센서 단면의 열유동 해석 결과

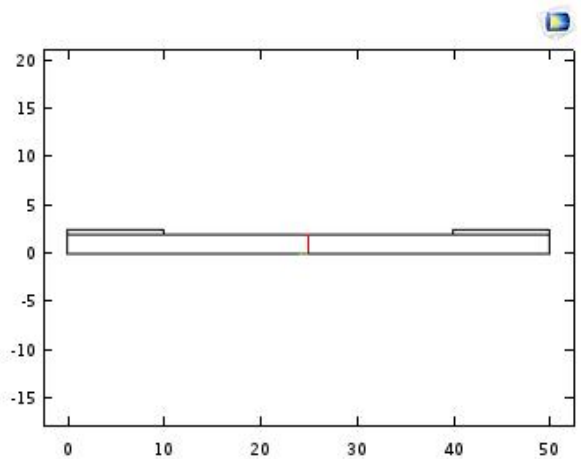


Fig. 11. Thermal analysis position of sensor center.
그림 11. 센서 중앙의 열유동 해석 위치

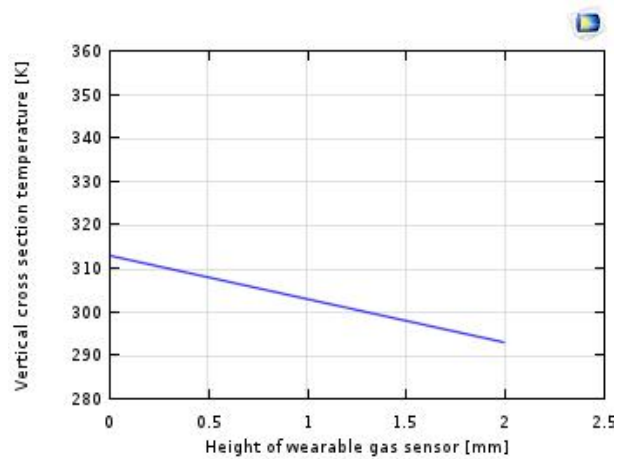


Fig. 12. Thermal analysis results of sensor center.
그림 12. 센서 중앙의 열유동 해석 결과

그림 11은 모델링된 센서에 대해서 센서 중심에서 수직 방향에 대한 열확산 해석을 하기 위해서 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 12는 센서 중심에서 수직 방향에 대한 열용량 분포곡선을 보이고 있다. 그림 10과 그림 12의 열용량 분포곡선으로부터 식(10)에 의해서 구한 열용량 확산속도는 10[K/mm]로서 큰 차이를 보이고 있지 않은 것을 확인하였다.

III. 결론

본 연구에서는 전극간격 30 [mm]를 갖는 웨어러블 Fabric(Nylon) + MWCNT 가스 센서에 대해서 모델링된 센서 검출 표면에서 센서 하부에서 가해진 열용량이 센서 내에서 어떻게 확산되는가를 확인하기 위해서 해석 프로그램(comsol)을 이용하여 제시된 일련의 편미분 지배방정식에 의해서 열용량의 확산 과정을 해석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 해석 결과로부터 모델링된 센서의 가스 검출부의 온도를 20[°C]로 유지하기 위해서는 센서 하단부의 가열부에서 45[°C]로 가열하여야 한다는 것을 확인하였다.
- 2) 센서 표면의 온도를 20[°C]로 유지하기 위해서 열을 인가하는 센서하부 영역에서 애노드-캐소드 전극 방향으로의 열용량 전달속도는 균일하게 증가한다는 것을 확인하였다.
- 3) 전극층에서의 온도 경도와 중심부에서의 온도 경도가 10[K/mm]로 거의 균일하다는 것을 확인하였다.

이상의 결과로부터 30[mm]의 전극간격을 갖는 웨어러블 가스센서의 모델링한 센서에 대해서 열용량의 확산과정을 해석하기 위해서 열용량 확산 지배 방정식을 제시하였으며, 애노드와 캐소드의 전극간격 30[mm]로 할 경우에 열 분포가 균일하게 유지되는 것을 확인할 수 있었으며, 제시한 웨어러블 가스센서의 전극간격을 30[mm]로 제작이 가능하다는 것을 확인하였다.

References

- [1] H. S. Kim and K. U. Jang, "The Fabrication of FET-Type NO_x Gas Sensing System Using the MWCNT," *J. KIEEME*, vol.26, no.4, pp.325-329, 2013. DOI: 10.4313/JKEM.2013.26.4.325
- [2] H. S. Kim, S. H. Lee, and K. U. Jang, "Detection Characteristics for the Ultra Lean NO_x Gas Concentration Using the MWCNT Gas Sensor Structured with MOS-FET," *J. KIEEME*, vol.26, no.9, pp.707-711, 2013. DOI: 10.4313/JKEM.2013.26.9.707
- [3] W. J. Lee, M. K. Choi, and K. U. Jang, "NO_x Gas Detecting Properties of the Nitrocellulose/MWCNT Thin Film Coated on the Glass Substrate," *J. KSDIT*, vol.11, no.1, pp.55-59, 2012.
- [4] H. S. Kim, Y. S. Park, and K. U. Jang. "Detection Characteristics for the NO_x Gas Concentration with the V_{gs} Using the MWCNT Gas Sensor Structured with MOS-FET," *J. KIEEME*, vol.26, no.4, pp.257-261, 2014.
- [5] Altsoft, "Comsol multiphysics guide," <http://www.comsol.com>
- [6] Marina Santo Zarnik, Franc Novak, Gregor Papa, "Thermal phenomena in LTCC sensor structures," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.290, pp.198-206, 2019.
- [7] Ilkka Korhonen, Jero Ahola, "Studying thermal protection for mobile sensor operating in combustion environment," *Measurement*, vol.145, pp.594-599 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.04.025
- [8] Mario Culebras, Antonio M. López, Clara M. Gómez, Andrés Cantarero, "Thermal sensor based on a polymer nanofilm," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.239, pp.161-165, 2016. DOI: 10.1016/j.sna.2016.01.010
- [9] Lin Shu, Xuemin Wang, Ling Li, Dawei Yan, Weidong Wu, "The investigation of integrated SAW strain sensor based on AlN/TC4 structure," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.293, pp.14-20, 2019. DOI: 10.1016/j.sna.2019.04.012
- [10] Abolhasan Khajepour, Faezeh Rahmani, "An approach to design a 90Sr radioisotope thermoelectric generator using analytical and Monte Carlo methods with ANSYS, COMSOL, and MCNP,"

[1] H. S. Kim and K. U. Jang, "The Fabrication

Applied Radiation and Isotopes, vol.119, pp.51–59, 2017. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.11.001

[11] Krishnadass Karthick, S. Suresh, Harjit Singh, Grashin C Joy, R. Dhanuskodi, “Theoretical and experimental evaluation of thermal interface materials and other influencing parameters for thermoelectric generator system,” *Renewable Energy*, vol.134, pp. 25–43, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.109

[12] Y. Q. Zhu, C. J. Hepp, G. A. Urban, “Modelling and Simulation of a Thermal Flow Sensor for Determining the Flow Speed and Thermal Properties of Binary Gas Mixtures,” *Procedia Engineering*, vol.168, pp.1028–1031, 2016.
DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.332

[13] K. U. Jang, JKEEME, “Thermal Flux Phenomena for the FET-typed MWCNT Gas Sensor with the Electrode Distance of 60 μm ,” vol.28, no.6, pp.403–407, 2015.

BIOGRAPHY

Kyung Uk Jang (Member)



1986 : BS degree in Electrical Engineering, Kwangwoon University.
1988 : MS degree in Electrical Engineering, Kwangwoon University.
1993 : Ph. D degree in Electrical Engineering, Kwangwoon University.
1995~present : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Gachon University.