

# 드레인-소스 전극 간극의 변화에 따른 Gas Sensor의 열에너지 확산 해석

장경욱<sup>a</sup>

가천대학교 전기공학과

## Heat Energy Diffusion Analysis in the Gas Sensor Body with the Variation of Drain-Source Electrode Distance

Kyung-Uk Jang<sup>a</sup>

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

(Received July 18, 2017; Revised July 21, 2017; Accepted July 24, 2017)

**Abstract:** MOS-FET structured gas sensors were manufactured using MWCNTs for application as NOx gas sensors. As the gas sensors need to be heated to facilitate desorption of the gas molecules, heat dispersion plays a key role in boosting the degree of uniformity of molecular desorption. We report the desorption of gas molecules from the sensor at 150°C for different sensor electrode gaps (30, 60, and 90 μm). The COMSOL analysis program was used to verify the process of heat dispersion. For heat analysis, structure of FET gas sensor modeling was proceeded. In addition, a property value of the material was used for two-dimensional modeling. To ascertain the degree of heat dispersion by FEM, the governing equations were presented as partial differential equations. The heat analysis revealed that although a large electrode gap is advantageous for effective gas adsorption, consideration of the heat dispersion gradient indicated that the optimal electrode gap for the sensor is 60 μm.

**Keywords:** FET-MWCNT gas sensor body, Heat energy diffusion analysis, p-typed MOS-FET, Heat transfer gradient

### 1. 서론

일반적으로 가스 센서는 미세먼지를 비롯하여 자동차 배기가스, 대기 오염, 화학, 의료 등 광범위한 분야에서 사용되고 있으며, 신속성, 선택성, 민감성 등의 특성이 요구되고 있다. 특히 가스분자 검출 센서는 농후 및 희박 범위의 가스를 검출해야 하며, 온도에 독립적이고, 간단한 공정 방법, 저 비용, 소형화, 내구성 등 조건을 고루 갖추어야 하지만 지금까지 사용하여 온 반도체식, 광학식 및 화학식 등 기존의 가스 센서

는 고온의 동작 조건, 속응답성, 경량화, 장수명 등의 문제점이 있다 [1,2].

본 연구에서는 전극 간극의 변화에 따라서 제작된 가스 센서는 가스 검출의 재현성을 높이기 위하여 센서에 흡착된 가스분자를 효과적으로 탈착시켜야 한다. 흡착된 가스분자를 효과적으로 탈착하기 위해서는 센서에 열에너지를 가하게 되는데, 가해진 열에너지가 센서 내부에서 확산되는 과정은 매우 중요한 인자로 생각된다. 이를 분석하기 위해서 메시법의 유한요소 해석 프로그램(comsol)을 이용하여 열에너지의 확산 과정과 열에너지 분포 구배를 확인하였다 [3,4].

특히, 본 연구와 관련한 선행 연구에서 30 μm 고정된 전극을 갖는 가스 센서에서 살펴보았던 열유동 특성에 대한 결과를 제시하였고, 이를 바탕으로 본 연구에서는 소스와 드레인 사이의 전극 간극을 변화시키면

a. Corresponding author; [kujang@gachon.ac.kr](mailto:kujang@gachon.ac.kr)

서 설계된 가스 센서에 대해서 전극거리의 변화에 따른 가스흡탈착에 대한 최적의 상보 관계를 제시하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석하였다 [13].

열에너지의 확산과정을 해석하기 위해서 FET 가스 센서의 구조체를 평면적으로 모델링을 진행하였으며, 제시된 모델링에 대해서 센서 구성 부분에 대한 특성 값을 제시하여 메시 유한요소법(FEM)을 이용하여 설계된 가스 센서에 대해서 열에너지가 확산되는 정도와 열에너지 구배를 알기 위해서 편미분방정식으로 정의된 지배방정식을 제안하여 해석하였다 [5,6].

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 드레인과 소스사이의 전극 간극의 변화( $x=30, 60, 90 \mu\text{m}$ )에 따라서 제안된 가스 센서에 대해서 가스 분자를 반복적으로 검출하기 위해서 흡착된 가스분자는 효과적으로 탈착해야 된다. 센서에 흡착된 가스분자를 효과적으로 제거하기 위해서는  $150^\circ\text{C}$ 의 열에너지를 센서에 인가하게 되는데, 가해진 열에너지가 센서 내부에서 어떻게 확산되는가 하는 문제는 매우 중요한 인자로 생각된다. 가스분자의 흡착 측면에서 센서를 보면 전극 간격이 넓어야 효과적이지만 전극 간격이 너무 넓게 되면 열에너지 분포의 균형을 잃게 되기 때문에, 이러한 상보관계를 해결하기 위해서 센서 설계시에 최적의 전극 간극을 결정해야 한다. 이를 해석하기 위해서 유한요소해석 프로그램(comsol)을 이용하여 열에너지의 확산 과정과 열에너지의 분포 구배를 확인하였다 [7,8].

센서 내의 열에너지 분포를 해석하기 위해서는 다음의 열에너지 전도식을 이용하였다. 열에너지 해석 지배식인 열에너지 전도식은 고체 매질을 통해 일어나는 열에너지 전달형태로서 물체 내에 두 지점 사이의 온도 차이가 존재할 때 열에너지는 높은 온도에서 낮은 온도 측으로 전달된다. 국소적으로 보면 물질 내 결정 격자 내의 원자나 분자의 상호 작용에 의해 열에너지가 전달되며, 즉 격자의 진동과 미립자의 거동에 의해 인접한 분자에 열을 전달하는 열에너지의 유동률은 매질의 특성 값인 열에너지 전도계수  $k$ 에 크게 좌우되며, 식 (1)로 표현되는 열에너지 전도법칙인 Fourier's Law를 적용하였다 [9].

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 열에너지의 유동량,  $t$ 는 열에너지의 전달 시간,  $A$ 는 열에너지의 전달 단면적,  $\Delta T$ 는 온도 변화량,  $x$ 는 열에너지의 전도 길이,  $k$ 는 열에너지의 전도도이다.

그림 1은 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.

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

여기서,  $Q$  (W)는 열에너지의 유동량,  $k$  (W/m·K)는 열에너지의 전도도,  $A_c$ ( $\text{m}^2$ )는 센서의 열에너지 전달 면적,  $\Delta T$ ( $^\circ\text{C}$ )는 온도차,  $\Delta t$ 는 열에너지 전달 시간,  $L$  (m)는 열에너지 전달체의 전체 높이를 나타낸다.

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

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

$$\Delta \cdot (-k\Delta T + \rho C_p T v) = 0 \quad (5)$$

위와 같이 식 (1)~(5)는 열에너지 전달체에 대한 유동 시뮬레이션의 열에너지 용량에 대한 압력, 열에너지의 전도도, 속도벡터의 방정식을 열에너지 이동의 차동 속도로 대입하였으며, 시뮬레이션 시 센서 열에너지 전달 지배방정식은 점도  $\eta$  ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ), 열에너지 전달 속도  $v$  (m/s), 센서의 고체밀도  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), 압력  $p$  (Pa), 열에너지의 전도도  $k$  (W/m·K), 열에너지용량  $C_p$  (J/kg·K)로 표현된다 [5].

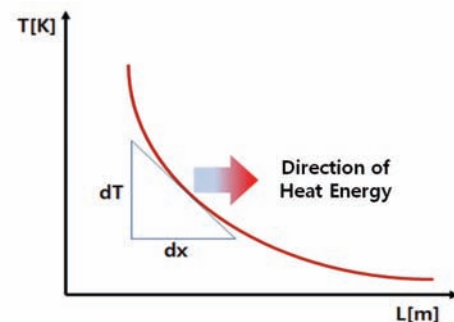


Fig. 1. Correlation with the temperature  $T$  and the distance  $L$ .

열에너지의 확산과정을 해석하기 위해서 FET 가스 센서의 구조도에 대해서 모델링을 진행하였으며, 제시된 모델링에 대해서 센서 각각의 구성 부분에 대한 재료를 지정하고, 지정된 재료의 특성값을 제시하였으며, 유한요소법을 이용하여 제시된 FET-MWCNT 가스 센서에 대해서 열에너지가 확산되는 과정을 제시하기 위해서 메시 분석을 수행하였으며, 제시된 메시 분석 구조체에 대해서 편미분 방정식으로 표현되는 식 (1)~(5) 및 식 (6)~(9)까지의 지배방정식을 이용하여 열에너지 유동해석을 진행하였다 [10,11].

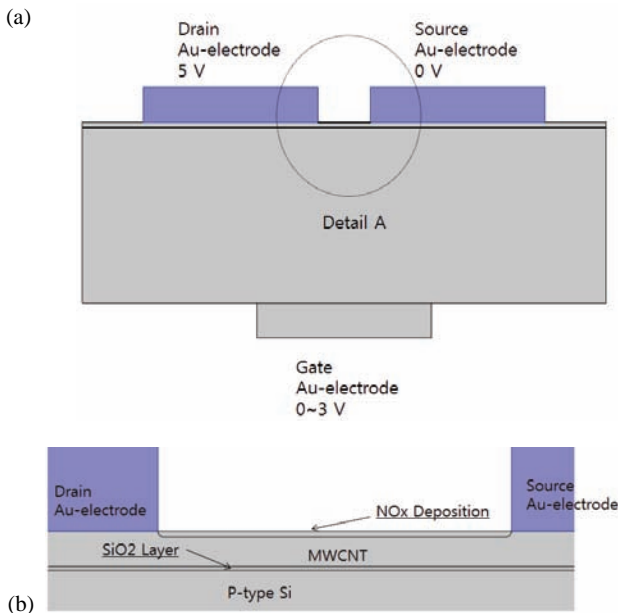
또한, 제안된 가스 센서에서 최대 열에너지전달 능력은 일반의 전기회로와 같이  $(m-1)$ 일 때,  $\eta_{max}$  효율은 다음과 같다.

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

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

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

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



**Fig. 2.** The diagram of the gas sensor (a) structure of gas sensor and (b) detail A in the gas sensor.

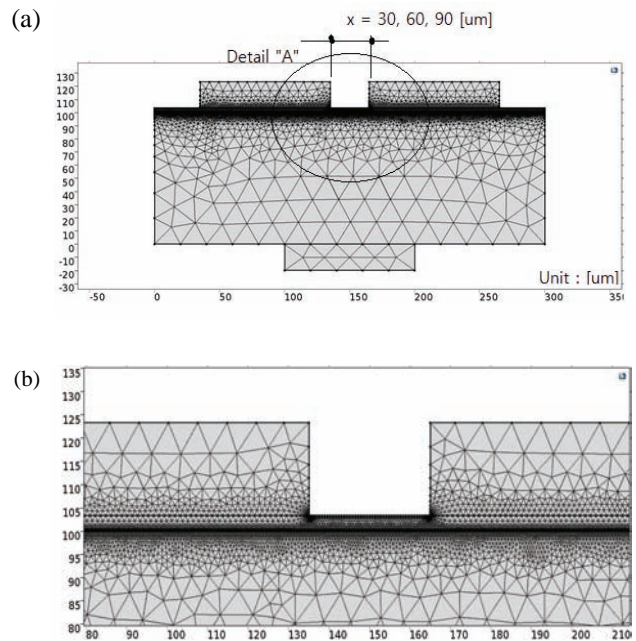
열에너지 전달효율  $\eta$ 가 최대가 되는  $m$ 을 구하기 위하여  $\partial\eta/\partial m = 0$ 으로 놓고,  $m$ 을 구하면  $\eta_{max}$ 를 구할 수 있다.

FET MWCNT 센서의 구조는 그림 2(a), (b)에 보이는 바와 같이 Au의 두께 20  $\mu\text{m}$ 의 게이트(gate)와 두께 100  $\mu\text{m}$ 의 드레인(drain), 소스(source) 전극과 p-type Si위에 3,000 Å의 SiO<sub>2</sub> 산화층을 구성하였으며, 산화층 위에 300 nm의 MWCNT의 가스 흡착층을 성장시킨 것을 모델링하였다. 그림 2(b)는 드레인 전극과 소스 전극사이의 확대도를 보이고 있으며, 드레인과 소스 전극 사이의 거리는 30, 60, 90  $\mu\text{m}$ 로 모델링하였다.

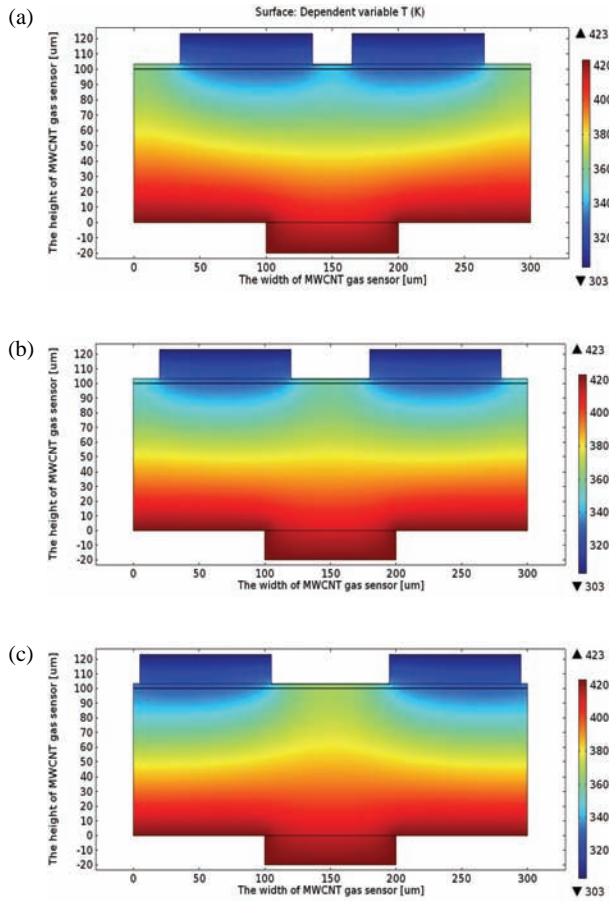
### 3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 전극 간극을 변화시켜 모델링한 FET MWCNT 가스 센서에 대해서 열에너지 유동해석을 하기 위한 메시 해석 결과를 보이고 있고, 그림 3(b)는 보는 바와 같이 A부분의 상세도를 보이고 있다 [12,13].

그림 4 (a)~(c)는 전극 간극에 따른 MWCNT 가스 센서에 대해서 게이트 부분에서 150°C의 열에너지를 인가하였을 경우에 센서 내부에서 열에너지가 확산되는 현상을 도식적으로 보이고 있다.



**Fig. 3.** The FEM analysis result of (a) the diagram of FET MWCNT gas sensor and (b) the fine diagram A in the FET MWCNT gas sensor.



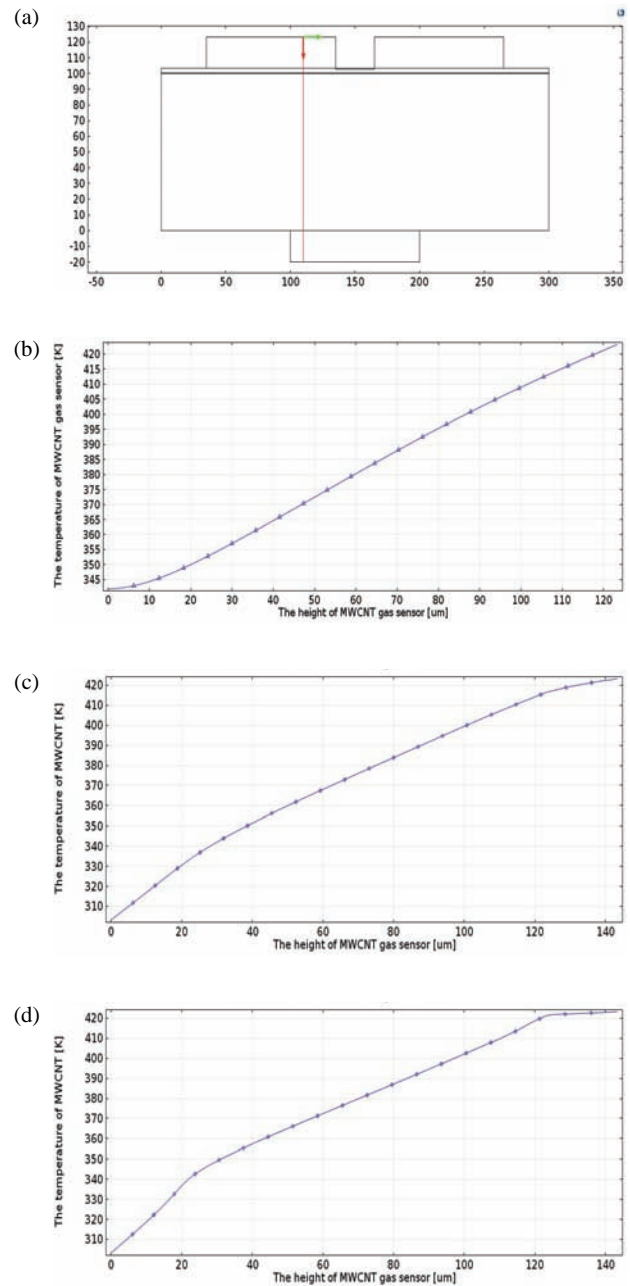
**Fig. 4.** The heat energy diffusion phenomena in the FET MWCNT gas sensor with (a) drain-source distance 30 μm, (b) 60 μm, and (c) 90 μm.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열에너지가 게이트 전극에서 드레인과 소스 전극 부분으로 확산되는 현상을 알 수 있다.

그림 5(a)는 제안된 센서에서 열에너지가 확산되는 현상을 해석하기 위해서 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 5(b)~(d)는 절단면에서의 열에너지 분포곡선을 보이고 있다. 게이트 전극으로부터 공급된 열에너지는 드레인과 소스 전극 쪽으로 식 (10)과 같이 Jang's 의 열에너지 전달 속도 실험식에 의해 전파된다 [13].

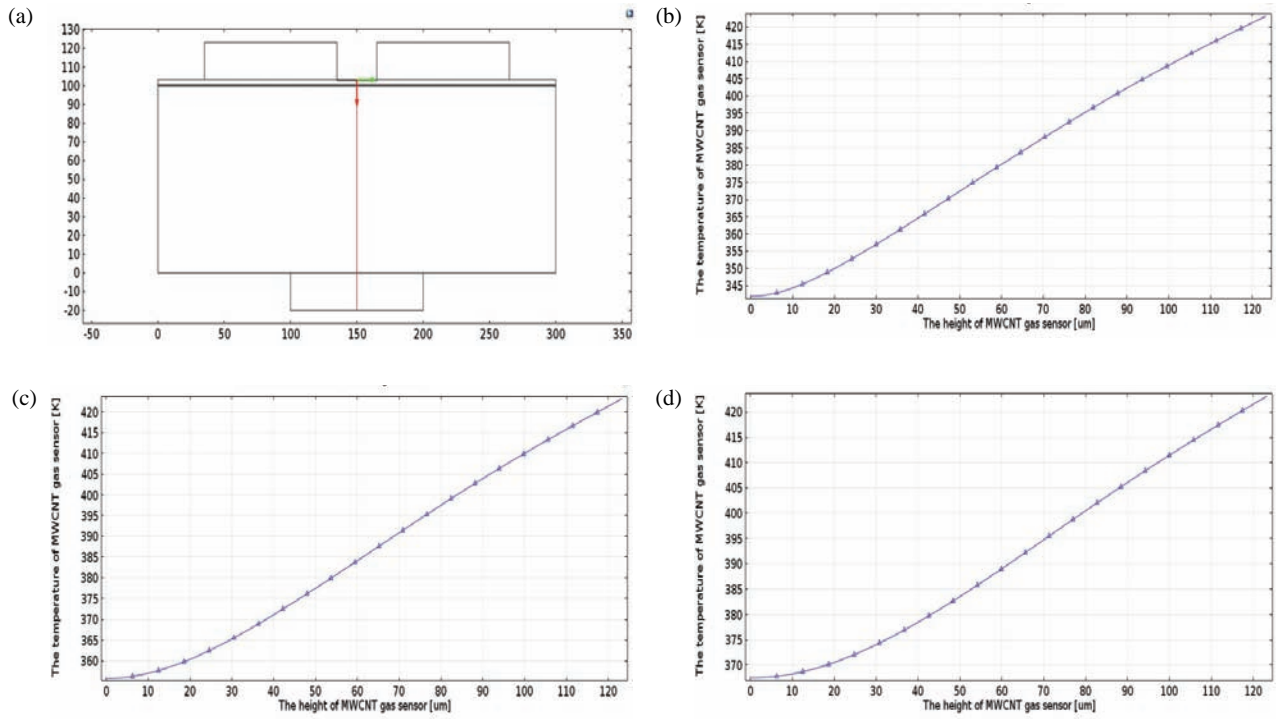
$$v = \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{10}$$

여기서,  $\Delta T$  (K)는 열에너지 전달경로 사이의 온도차,  $\Delta x$  μm는 열에너지 전달경로의 거리이다.

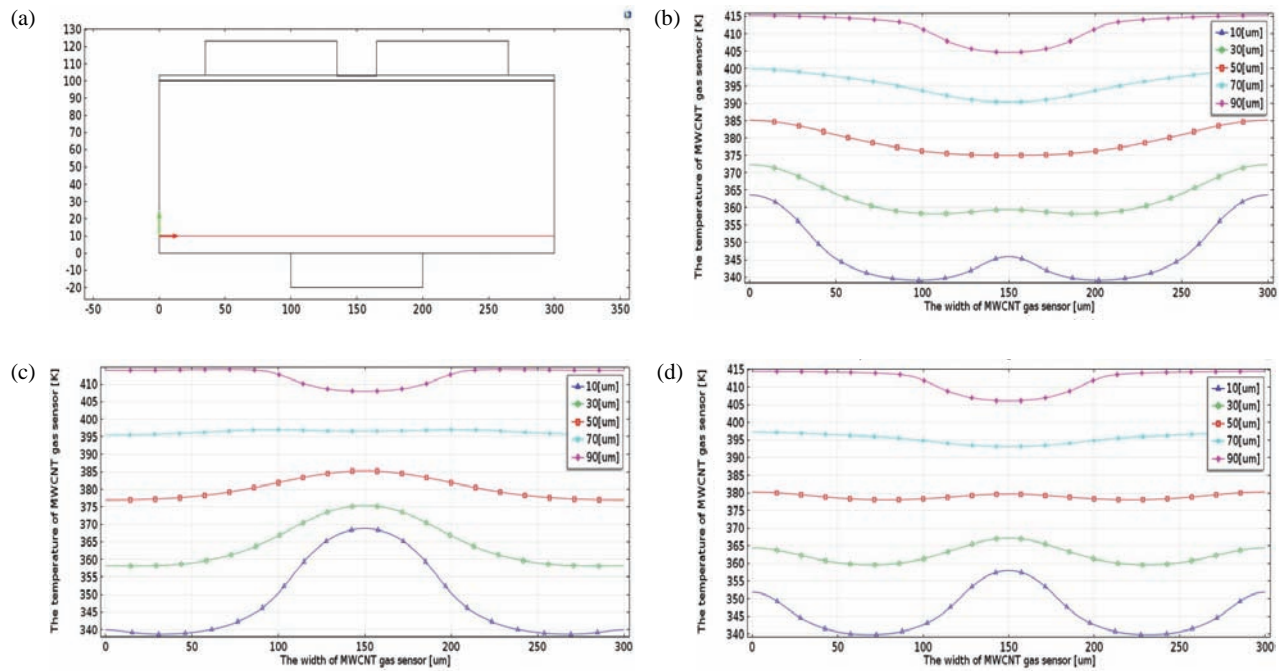


**Fig. 5.** The heat energy distribution in the left side of FET MWCNT gas sensor at (a) the analysis position, and with (b) the drain-source distance 30 μm, (c) 60 μm, and (d) 90 μm.

그림 5(b)~(d)에서 (10)식에 의해 구한 열에너지 전달 속도는 게이트 영역으로부터, 기판 내부 및 드레인-소스 전극영역으로 전달되며 게이트 전극에서 멀어질수록 열에너지 전달 속도가 떨어지는 것을 알 수 있다.



**Fig. 6.** The heat energy distribution in the center of FET MWCNT gas sensor at (a) the analysis position, and with (b) the drain-source distance 30  $\mu\text{m}$ , (c) 60  $\mu\text{m}$ , and (d) 90  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 7.** The heat energy distribution in the parallel region of FET MWCNT gas sensor at (a) the analysis position, and with (b) the drain-source distance 30  $\mu\text{m}$ , (c) 60  $\mu\text{m}$ , and (d) 90  $\mu\text{m}$ .

**Table 1.** The heat energy distribution value in sensor body with the several distance of drain-source.

(Unit : K/ $\mu$ m)

Height of cross section ( $\mu$ m)	Distance of electrode		
	30 $\mu$ m)	60 $\mu$ m	90 $\mu$ m
10	0.08	0.05	0.1
30	0.04	0.02	0.06
50	0.03	0.01	0.03
70	-0.03	-0.01	0.01
90	-0.03	-0.03	-0.02

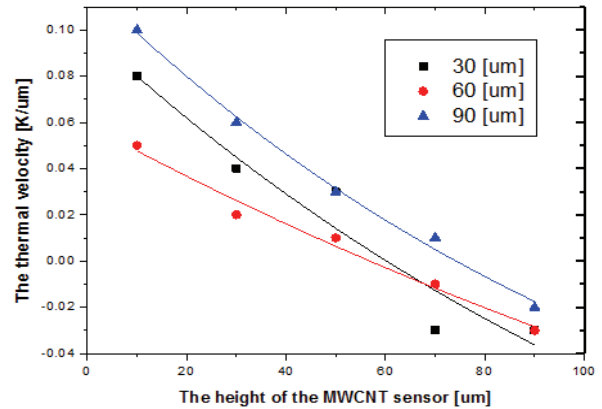
그림 6(a)는 제시된 센서에서 해석하기 위한 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 6(b)~(d)는 전극 간극의 변화에 따른 절단면에서의 열에너지 분포곡선이다. 게이트 전극으로부터 공급된 열에너지는 게이트에서 드레인과 소스 전극 쪽으로 이동되고, 열에너지 전달 속도는 전극 간극이 클수록 증가하는 경향을 보이고 있다.

중심부분에서의 열에너지 전달 속도는 게이트 근처에서는 등온적으로 열에너지가 확산되다가 Si 내부에서 급격히 온도 변화를 일으키면서 열에너지가 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

즉, 열에너지의 구배가 게이트 전극 부근에서는 작고 실리콘 기판 내부에서는 커지다가 다시 드레인-소스 전극 부분에서 작아지는 것을 볼 수 있다.

그림 7(a)는 모델링된 센서에 대해서 게이트의 밑면에서 수직 방향으로 10  $\mu$ m의 높이에 대한 해석을 하기 위해서 절단면의 위치를 보이고 있으며, 그림 7(b)~(d)는 소스-드레인간의 전극 간격을 30~90  $\mu$ m으로 절단한 절단면의 위치에 대해서 열에너지 분포곡선을 보이고 있다. 열에너지 분포곡선으로부터 식 (10)에 의해서 구한 열에너지 확산속도를 표 1에 제시하였다.

그림 8은 해석 높이에 따른 열에너지 전달 속도를 보이고 있다. 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 센서의 중심(높이=50  $\mu$ m)부에서 게이트 측의 고온부와 소스-드레인 측의 저온부 쪽으로 열에너지 확산 속도가 평형을 이루는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8과 표1에서 알 수 있는 바와 같이 열에너지 전달 속도의 구배 편차가 전극 간격 60  $\mu$ m의 센서에서 가장 작은 것을 알 수 있다.



**Fig. 8.** The heat energy velocity with the FET MWCNT gas sensor.

#### 4. 결론

본 연구에서는 드레인과 소스의 전극 간극을 30, 60 및 90  $\mu$ m로 변화시켜서 모델링된 FET MWCNT 가스 센서에서 흡착된 가스분자를 효과적으로 제거하기 위해서는 150°C의 열에너지를 가하게 되는데, 가해진 열에너지가 센서 내에서 어떻게 확산되는가를 확인하기 위해서 해석 프로그램(comsol)을 이용하여 제시된 일련의 편미분 지배방정식에 의해서 열에너지의 확산 과정을 해석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 열을 인가하는 게이트 영역에서 드레인-소스 전극 방향으로의 열에너지 전달 속도는 전극 간극이 증가함에 따라서 증가하는 것을 확인하였다.
2. 전극 간격의 변화에 따라서 제작된 센서 내부에서의 열에너지 전달 속도는 게이트 전극 부근에서 등온적으로 열에너지가 확산되다가 p-형 실리콘 기판 내부에서 급격한 온도 변화를 일으키면서 드레인과 소스 쪽으로 열에너지가 확산되는 현상을 확인할 수 있었다.
3. 수직 방향으로 센서를 절단한 절단면에서의 열에너지 분포곡선으로부터 구한 열에너지 확산속도는 절단면의 해석높이가 50  $\mu$ m 부근에서 최대 변곡점을 만드는 것을 확인하였으며, 전극 간극 60  $\mu$ m의 센서에서 열에너지 구배편차가 가장 적었다.

이상의 결과로부터 전극 간극을 변화시켜 모델링한 센서에 대해서 열에너지의 확산과정을 해석하기 위해서 열에너지 확산 지배 방정식을 제시하였으며, FET

MWCNT 가스 센서에서 가스분자 흡착과 탈착 과정에 영향을 미치는 인자인 안정적인 열구배 특성을 고려하였을 때, 최적의 드레인-소스 전극사이의 간극은 60  $\mu\text{m}$ 로 설계하는 것이 효과적이라는 결론을 얻었다.

## REFERENCES

- [1] H. S. Kim and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 325 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2013.26.4.325>]
- [2] H. S. Kim, S. H. Lee, and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 707 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2013.26.9.707>]
- [3] W. J. Lee, M. K. Choi, and K. U. Jang, *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, **11**, 55 (2012).
- [4] H. S. Kim, Y. S. Park, and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 257 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.4.257>]
- [5] <http://www.comsol.com> (2015).
- [6] C. J. Hepp, F. T. Krogmann, and G. A. Urban, *Sens. Actuators, A: Physical*, **253**, 136 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.009>]
- [7] C. Y. Huang, B. H. Huang, F. R. Cheng, S. W. Chen, and T. M. Liou, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **107**, 657 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.063>]
- [8] T. De Cuyper, S. Broekaert, K. Chana, M. De Paepe, and S. Verhelst, *Appl. Therm. Eng.*, **118**, 561 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.049>]
- [9] J. M. Toivanen, T. Tarvainen, J. M. J. Huttunen, T. Savolainen, and V. Kolehmainen, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **108**, 860 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.060>]
- [10] A. Paliathanasis and M. Tsampanlis, *J. Geometry Phys.*, **62**, 2443 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomphys.2012.09.004>]
- [11] X. Zhang, Z. Chen, and Y. Liu, *The Material Point Method*, **11** (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407716-4.00002-8>]
- [12] R. U. Haq, S. N. Kazmi, and T. Mekkaoui, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **112**, 972 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.041>]
- [13] K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 403 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2016.28.6.403>]