

60 μ m의 전극 간극을 갖는 FET식 MWCNT 가스센서에서 열 유동 현상

장경욱^a

가천대학교 전기공학과

Thermal Transport Phenomena in the FET Typed MWCNT Gas Sensor with the 60 μ m Electrode Distance

Kyung-Uk Jang^a

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 461-701, Korea

(Received May 11, 2015; Revised May 23, 2015; Accepted May 24, 2015)

Abstract: Generally, MWCNT, with thermal, chemical and electrical superiority, is manufactured with CVD (Chemical Vapor Deposition). Using MWCNT, it is commonly used as gas sensor of MOS-FET structure. In this study, in order to repeatedly detect gases, the author had to effectively eliminate gases absorbed in a MWCNT sensor. So as to eliminate gases absorbed in a MWCNT sensor, the sensor was applied heat of 423[K], and in order to observe how the applied heat was diffused within the sensor, the author interpreted the diffusion process of heat, using COMSOL interpretation program. In order to interpret the diffusion process of heat, the author progressed modeling with the structure of MWCNT gas sensor in 2-dimension, and defining heat transfer velocity($u = \Delta T / \Delta x$), accorded to governing equation within the sensor, the author proposed heat transfer mechanism.

Keywords: MWCNT sensor, Gas sensor, Thermal transport analysis, MOSFET, Thermal transfer velocity

1. 서론

오늘날 오염가스 분자, 바이오 분자, 화합물 등의 검출에 사용되는 가스센서에 대해서 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 이러한 가스센서는 대기오염, 화학, 의료 분야 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 특히 가스센서는 저농도와 고농도 범위에 대해서 폭넓게 가스 검출을 해야 하며, 상온 또는 낮은 동작 온도, 간단

한 공정 방법, 저비용, 소형화 등에 대한 조건을 충족시켜야 하지만, 기존의 반도체식 가스센서, 광학식 가스센서 및 전기화학식 가스센서 등 실용화 되어있는 가스센서는 높은 동작 온도 조건, 높은 가격 및 소형화에 문제점이 있다 [1,2]. MWCNT 가스센서에 대해서 가스를 반복적으로 검출하기 위해서 센서에 흡착된 가스는 효율적으로 제거해야 한다 [3,4].

본 연구에서 센서에 흡착된 가스를 제거하기 위해서는 센서에 423 K의 열을 가하게 되는데, 가해진 열이 센서 내에서 어떻게 확산되는지를 규명하기 위해서 COMSOL 해석 프로그램을 이용하여 열의 확산 과정을 확인하였다. 열의 확산 과정을 해석하기 위해서 MWCNT 가스센서의 구조체에 대해서 2차원으로 모델

a. Corresponding author; kujang@gachon.ac.kr

링을 제시하였으며, 제시된 모델링에 대해서 재료를 지정하고, 재료의 물성 값을 제시하여 유한요소법(FEM)과 PDE (partial differential equation) method에 대한 지배방정식을 제시하여 해석하였다 [5-9].

2. 실험 방법

본 연구에서는 가스센서에 가해진 열이 센서 내에서 어떻게 확산되어 가는지를 확인하기 위해서 다중물리 해석 프로그램인 COMSOL 해석 프로그램을 이용하여 열의 확산 과정을 확인하였다 [5-9].

시뮬레이션 과정의 기본 열 해석 지배식인 열전도는 고체 매질을 통해 일어나는 열전달 형태로 물체 내에 온도 구배가 존재할 때 열은 고온에서 저온 측으로 전달된다. 미시적 관점에서 보면 물질 내 원자나 분자의 상호 작용에 의해 열이 전달되며, 즉 원자 격자의 진동과 자유전자의 이동에 의해 인접한 분자에 에너지를 전달하는 열 유동률은 매질의 물성 값인 열전도계수 k 에 좌우되며, 열전도 법칙을 적용하였으며, 수식은 다음과 같다 [13].

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{1}$$

여기서, A 는 단면적, ΔT 는 온도 변화량, x 는 열전도 길이, k 는 열전도계수이다. 열의 확산 과정은 열원에서 거리에 따른 반비례 곡선에 따라서 온도가 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 1은 온도 변화에 따른 열 유동에 관한 그래프이며, 그림에서 보는 바와 같이 온도와 거리는 비선형적으로 반비례하다는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 접선 구간과 같이 미소 구간에서는 선형화할 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$Q = -k \cdot A_c \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot \Delta T = \frac{Q \cdot L}{k \cdot A_c} \tag{2}$$

여기서, Q W는 열 유동비, k W/mK는 열전도계수, A_c m²는 센서의 열 전달 면적, ΔT K는 온도 변화량, L m는 센서의 전체 높이를 나타낸다.

$$\rho u \Delta u = \Delta[-pI + \eta(\Delta u)^T - (2\eta/3)(\Delta u)I] + \rho g \tag{3}$$

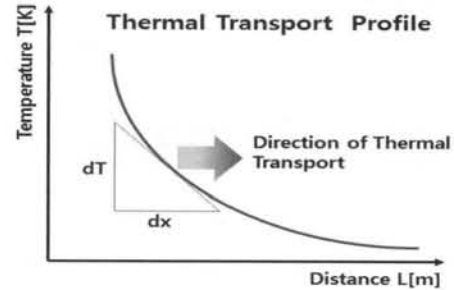


Fig. 1. Curve properties to the temperature and the distance.

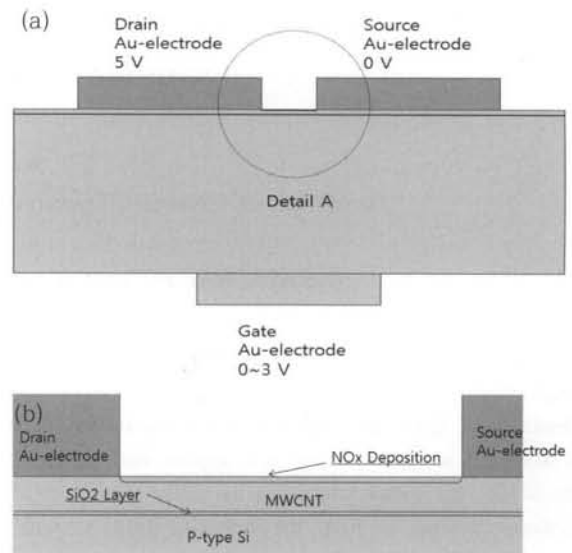


Fig. 2. The structure of the MWCNT gas sensor. (a) The structure of MWCNT gas sensor and (b) The detail A in the MWCNT gas sensor.

$$\Delta(\rho u) = 0 \tag{4}$$

$$\Delta(-k\Delta T + \rho C_p T_u) = 0 \tag{5}$$

이상과 같이 식 (1~5)는 센서에 대한 열 유동 시뮬레이션의 열용량에 대한 압력, 열전도도, 속도벡터의 방정식을 열의 차동 속도 u 로 대입하여 해석하였다. 시뮬레이션 시 센서 열전달 지배 방정식으로 점도 η kg/ms, 열전달 속도 u m/s, 기판 밀도 ρ kg/m³, 압력 p Pa, 열전도계수 k W/K·m, 열용량 Q J/kg·K를 제시하였다 [5,10].

열의 확산 과정을 해석하기 위해서 MWCNT 가스센서의 구조체를 2차원으로 모델링을 진행하였으며, 제시된 모델링에 대해서 센서 구성 부분의 재료를 선정하고, 재료의 물성값을 제시하였고, 유한요소법(FEM)을 이용하여 제시된 MWCNT에 대해서 열이 확산되는 정도를 알기 위해서 메쉬 분석을 수행하였으며, 수행된 메쉬 분석 구조체에 대해서 PDE (partial differential equation) method에 의해서 식 (1)~(5)까지의 지배방정식을 이용하여 열 유동 해석을 진행하였다 [11,12].

그림 2(a)는 FET MWCNT 가스센서의 구조도를 보이고 있으며, 그림 2에서 센서는 두께 20 μm의 Au 게이트(Gate), 드레인(Drain), 소스(Source) 전극과 두께 100 μm의 p-type Si에 3,000 Å의 SiO₂ 산화층을 성장시키고, 그 위에 300 nm의 MWCNT 분산층으로 구성하였다. 그림 2(b)는 드레인 전극과 소스 전극 사이의 상세도를 보이고 있으며, 전극 사이의 간극은 60 μm로 모델링하였다.

그림 3에서 각 구조체의 크기를 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 제시된 MWCNT 가스센서에 대해서 다중 물리해석을 하기 위해 메쉬 해석 결과를 보이고 있다. 또한, 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 SiO₂와 MWCNT 층에서 정밀한 해석을 위해서 조밀하게 메쉬 분석을 하였다 [13].

그림 4는 MWCNT 가스센서에 gate 부분에서 423 K의 온도를 인가하였을 경우에 센서 내부에서 열이 확산되는 현상을 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 게이트 전극에서 드레인과 소스 전극 부분으로 열이 확산되는 현상을 알 수 있다.

그림 5(a)는 센서 왼편에서 열이 확산되는 과정을 보기 위해서 절단면을 보이고 있으며, 그림 (b)는 전단면에서의 열 분포 곡선을 보이고 있다. 게이트 전극으로부터 공급된 열은 드레인과 소스 전극 쪽으로 식(6)과 같이 Jang's의 열전달 속도 실험식에 의해 정의된 열전달 속도로 진행된다.

$$u = \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (6)$$

여기서, ΔT K는 전달 경로 사이의 온도 변화량, Δx μm는 전달 경로의 거리를 나타낸다.

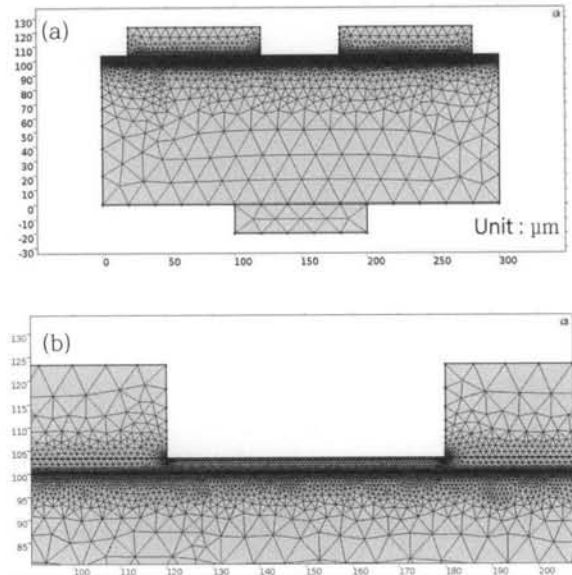


Fig. 3. The mesh analysis result of MWCNT gas sensor. (a) The structure of MWCNT gas sensor and (b) The detail A in the MWCNT gas sensor.

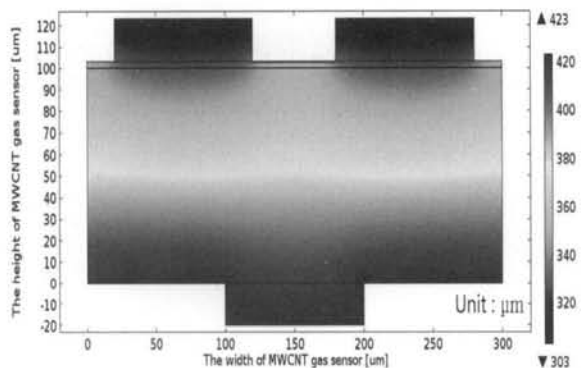


Fig. 4. The thermal transport phenomena in the FET typed MWCNT gas sensor.

그림 5(b)에서 식 (6)에 의해 구한 열전달 속도는 게이트 영역, 기판 내부 및 드레인 전극 영역에서 각각 1.5, 0.8 및 0.75 K/μm의 값을 보였다. 즉 게이트 전극에서 떨어질수록 열전달 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6(a)는 센서 중앙에서 절단면을 보이고 있으며, 그림 (b)는 절단면에서의 열 분포 곡선을 보이고 있다.

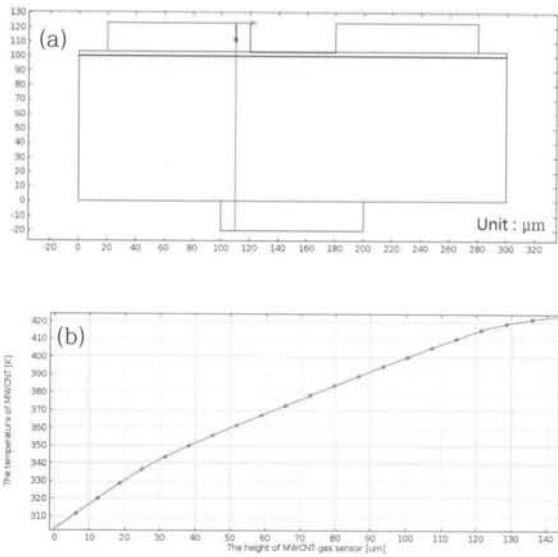


Fig. 5. The thermal distribution in the left side of MWCNT gas sensor. (a) The cross section line in MWCNT gas sensor and (b) The thermal distribution of MWCNT gas sensor.

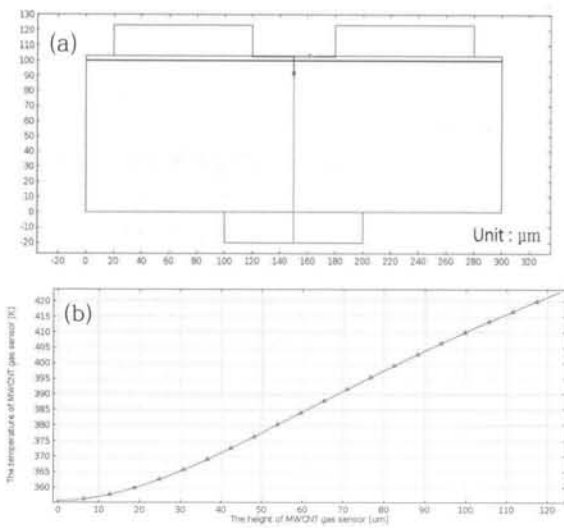


Fig. 6. The thermal distribution in the center of MWCNT gas sensor. (a) The cross section line in MWCNT gas sensor and (b) The thermal distribution of MWCNT gas sensor.

게이트 전극으로부터 공급된 열은 드레인과 소스 전극 쪽으로 게이트 영역 및 기판 내부에서 각각 0.25, 0.6 K/ μm 의 전달 속도 값을 보였다.

중심부에서의 열전달 속도는 게이트 부근에서는 등온적으로 열이 확산되다가 p-type Si 내부에서 급격히

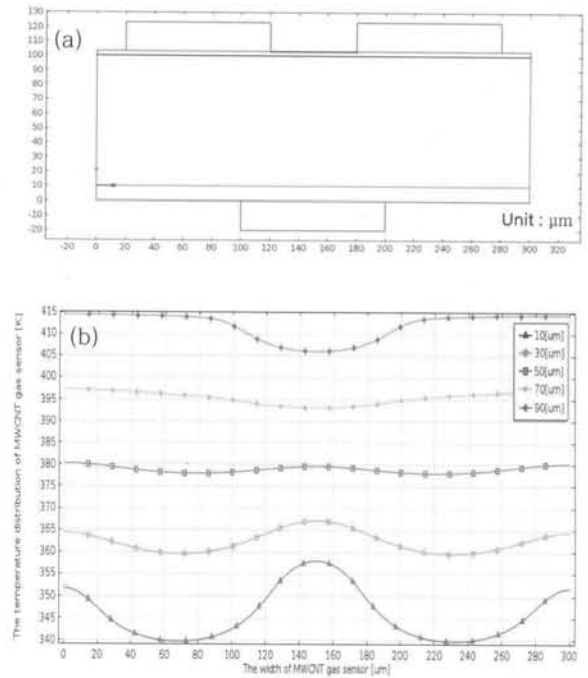


Fig. 7. The thermal distribution in the parallel region of MWCNT gas sensor. (a) The cross section line in MWCNT gas sensor and (b) The thermal distribution of MWCNT gas sensor.

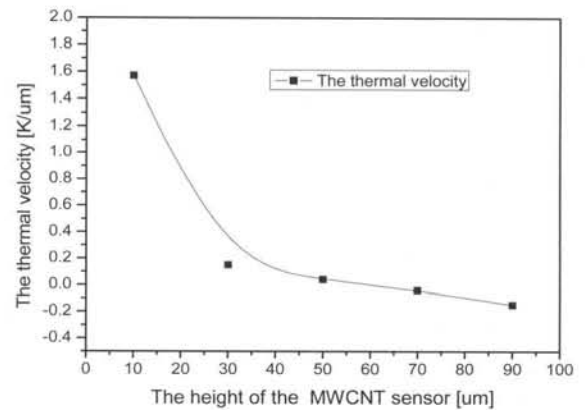


Fig. 8. The thermal velocity with the MWCNT gas sensor.

온도 변화를 일으키면서 열이 전달되는 것을 알 수 있다. 열의 구배가 전극 부근에서는 작고 실리콘 기판에서는 커지다가 다시 드레인-소스 전극 부분에서 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 게이트 전극 부근의 고온 영역에서 열 전달 시 열 구배가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7(a)는 센서에 대해서 수직 방향으로 10 μm 에 대해서 절단한 절단면을 보이고 있으며, 그림 (b)는 절단면의 높이 h 가 각각 10~90 μm 로 절단한 절단면에서의 열 분포 곡선을 보이고 있다. 열 분포 곡선으로부터 식 (6)에 의해서 구한 열 확산 속도는 절단면의 높이 h 가 10 μm 에서 1.57 $\text{K}/\mu\text{m}$ 의 값을 보였으며, 30 μm 일 때 0.15 $\text{K}/\mu\text{m}$, 50 μm 일 때 0.04 $\text{K}/\mu\text{m}$, 70 μm 일 때 -0.04 $\text{K}/\mu\text{m}$, 90 μm 일 때 -0.16 $\text{K}/\mu\text{m}$ 의 열전달 속도 값을 보였다.

그림 8에 높이에 따른 열전달 속도 변화를 보이고 있다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 센서의 두께 중심($h=50 \mu\text{m}$)부에서 고온부와 저온부 쪽으로 열 확산 속도가 변화한다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 MWCNT 센서에서 가스를 반복적으로 검출하기 위해서 센서에 흡착된 가스를 효과적으로 제거할 목적으로 423 K의 열을 가하게 되는데, 가해진 열이 센서 내에서 어떻게 확산되어 가는지를 확인하기 위해서 COMSOL 해석 프로그램을 이용하여 지배방정식에 의한 열의 확산 과정을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 센서의 중심에서 벗어난 부분에서 열전달 속도는 게이트 영역, 기판 내부 및 드레인 전극 영역에서 각각 1.5, 0.8 및 0.75 $\text{K}/\mu\text{m}$ 의 값을 보였으며, 게이트 전극에서 멀어질수록 열전달 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

2) 센서 중심부에서의 열전달 속도는 게이트 부근에서는 등온적으로 열이 확산되다가 p-type Si 내부에서 급격히 온도 변화를 일으키면서 열이 전달되는 것을 알 수 있다.

3) 센서의 수직 방향으로 절단한 절단면에서의 열분포 곡선으로부터 구한 열 확산 속도는 절단면의 높이 h 가 10 μm 에서 1.57 $\text{K}/\mu\text{m}$ 의 값을 보였으며, 30 μm 일

때 0.15 $\text{K}/\mu\text{m}$, 50 μm 일 때 0.04 $\text{K}/\mu\text{m}$, 70 μm 일 때 -0.04 $\text{K}/\mu\text{m}$, 90 μm 일 때 -0.16 $\text{K}/\mu\text{m}$ 의 열전달 속도 값을 보였다.

이상의 결과로부터 열의 확산 과정을 해석하기 위해서 MWCNT 가스센서의 구조체를 2차원으로 모델링을 진행하였으며, 센서 내부에서 지배방정식을 따른 열전달 속도($u = \Delta T / \Delta x$)를 정의하여 열전달 Mechanism을 제시하였다.

REFERENCES

- [1] H. S. Kim and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 325 (2013).
- [2] H. S. Kim, S. H. Lee, and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 707 (2013).
- [3] W. J. Lee, M. K. Choi, and K. U. Jang, *J. KSDIT*, **11**, 55 (2012).
- [4] H. S. Kim, Y. S. Park, and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 257 (2014).
- [5] <http://www.comsol.com> (2015).
- [6] E.J.F. Dickinson, J. G. Limon-Petersen, and R. G. Compton, *J. Solid State Electrochem.*, **15**, 1335 (2011).
- [7] D. Britz, *Digital Simulation in Electrochemistry (3rd)* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- [8] I. J. Cutress, E.J.F. Dickinson, and R. G. Compton, *J. Electroanal. Chem.*, **638**, 76 (2010).
- [9] O. V. Klymenko, I. Svir, A. Oleinick, and C. Amatore, *Chem. Phys. Chem.*, **13**, 845 (2012).
- [10] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3rd.)* (Cambridge University Press, Cambridge (2007).
- [11] N. Godino, X. Borrisé, F. X. Muñoz, F. J. del Campo, and R. G. Compton, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 11119 (2009).
- [12] H. Reller, F. Kirowa-Eisner, and E. Gileadi, *J. Electroanal. Chem.*, **138**, 65 (1982).
- [13] A. Lavacchi, U. Bardi, C. Borri, S. Caporali, C. Fossati, and I. Perissi *J. Appl. Electrochem.*, **39**, 2159 (2009).