

전기적으로 구동하는 나노 스위치의 동적 해석

Dynamic Analysis of Electrically Actuated Nanomechanical Switch

김일광*·이수일†

Il Kwang Kim and Soo Il Lee

1. 서론

탄소나노튜브(carbon nanotube: CNT)는 그 우수한 성질로 나노전자기계시스템(NEMS)의 주요한 재료로 사용되곤 한다. 그 중 탄소나노튜브에 전압을 인가시켜 나노 스위치로 활용 가능한 연구가 진행되바 있다[1,2]. 하지만 이러한 연구들은 탄소나노튜브가 일정 전압 이상에서 전극에 달라붙는 pull-in 전압과 일정 이하의 전압에서 전극으로부터 떨어지는 pull-out 전압을 구하기 위한 정적 해석(static analysis)으로만 이루어져 있으며, 그때의 그 거동을 예측하지 못한 단점이 존재한다.

따라서 본 연구는 선행 연구[3]의 단일벽 탄소나노튜브 기반의 이론 모델을 발전시켜 나노 스위치로 응용하기 위한 동적 해석(dynamic analysis)을 진행하였다. 탄소나노튜브를 전극에 달라 붙게 하기 위한 최소의 pull-in 전압과 그 후, 전압을 감소시켜 전극으로부터 떨어지는 pull-out 전압을 동적 해석으로부터 구하였다. 이러한 두 전압을 기준으로 탄소나노튜브를 구형파(pulse wave)로 제어하는 나노 스위치를 저속 및 고속 구동을 하기 위한 제어 조건들을 확인하였으며, 그 때의 시간 응답(time response) 특징을 예측하였다.

2. 나노 스위치 모델링

Fig. 1 으로부터 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)를 외팔보로 가정하여 구조 및 관성 비선형성을 고려한 관계식[3]과 CNT 에 작용하는 정전기력(electrostatic force), 레너드-존스(Lennard-Jones) 포텐셜로 유도한 반데르발스 상호력(van der Waals interactions)을 포함하여 정리하면 다음 식(1)과 같이 정리할 수 있다.

$$\ddot{w} + w''' + c\dot{w} + \alpha_1[w'(w'w'')] + \alpha_1 \left[w' \int_1^x \int_0^x \{ \ddot{w}'w' + (w')^2 \} dx dx \right] = \alpha_2 q_{elec} + \alpha_3 q_{vdw} \quad (1)$$

† 교신저자; 서울시립대학교 기계정보공학과

E-mail : leesooil@uos.ac.kr

Tel : (02) 2210-5667, Fax : (02) 2210-5575

* 서울시립대학교 대학원 에너지환경시스템공학과

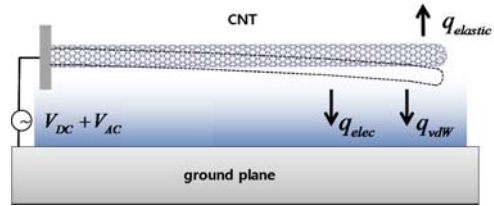


Fig. 1 CNT based electrically actuated nanomechanical switch.

Fig. 1 과 식 (1)에서 q_{elec} , q_{vdw} 는 SWCNT 와 전극이 이루는 정전기력과 반데르발스 상호력, V_{DC} , V_{AC} 는 SWCNT 에 인가되는 구형파를 의미한다. 선행 연구[3]와 같이 식 (1)을 켈러킨 근사화로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & A\ddot{y} + cy + By + C\alpha_1 y^3 + D\alpha_1 (y^2 \ddot{y} + y\ddot{y}^2) \\ &= \alpha_2 \int_0^1 \frac{\phi(x)}{\sqrt{(1-\phi_1 y)(1-\phi_1 y + 2R)} \log^2 \left[1 + \frac{(1-\phi_1 y)}{R} + \sqrt{\frac{(1-\phi_1 y)(1-\phi_1 y + 2R)}{R^2}} \right]} dx \\ &+ \alpha_3 \int_0^1 \phi_1(x) R \sqrt{(1-\phi_1 y)(1-\phi_1 y + 2R)} \\ &\quad \times \frac{(8(1-\phi_1 y)^4 + 32(1-\phi_1 y)^3 R + 72(1-\phi_1 y)^2 R^2 + 80(1-\phi_1 y)R^3 + 35R^4)}{(1-\phi_1 y)^5 (1-\phi_1 y + 2R)^5} dx \\ &+ \alpha_4 \int_0^1 \phi_1(x) \frac{(256a^{10} + 5760a^8 + 20160a^6 + 16800a^4 + 3150a^2 + 63)}{R^{10} (a^2 - 1)^{21/2}} dx, \end{aligned} \quad \left(a = \frac{1 - \phi_1(x)y_1(t)}{R} + 1 \right)$$

$$\begin{aligned} A &= \int_0^1 \phi_1(x)^2 dx = 1, \quad B = \int_0^1 \phi_1(x) \phi_1'''(x) dx, \quad c = \frac{\beta^2}{Q} \int_0^1 \phi_1(x)^2 dx = \frac{\beta^2}{Q}, \\ C &= \int_0^1 [\phi_1(x) \phi_1''(x)^3 + 4\phi_1(x) \phi_1'(x) \phi_1''(x) \phi_1'''(x) + \phi_1(x) \phi_1'(x)^2 \phi_1'''(x)] dx, \\ D &= \int_0^1 \phi_1(x) \beta_1 dx \quad \left(\beta_1 = \left[\phi_1'(x) \int_1^x \int_0^x \phi_1'(x)^2 dx dx \right] \right). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $c = \beta^2 / Q$ ($\beta = 1.8751$), $\alpha_1 = (g_0 / L)^2$, $\alpha_2 = \pi \epsilon_0 V^2 L^4 / (g_0^2 EI)$, $\alpha_3 = C_6 \sigma^2 \pi^2 L^4 / (2g_0^5 EI)$, $\alpha_4 = C_{12} \sigma^2 \pi^2 L^4 / (64g_0^{11} EI)$ 이며 각각 SWCNT 의 감쇠 계수, SWCNT 의 비선형성을 고려한 무차원화 계수, 정전기력 및 반데르발스 인력과 반발력을 무차원화 계수를 의미한다.

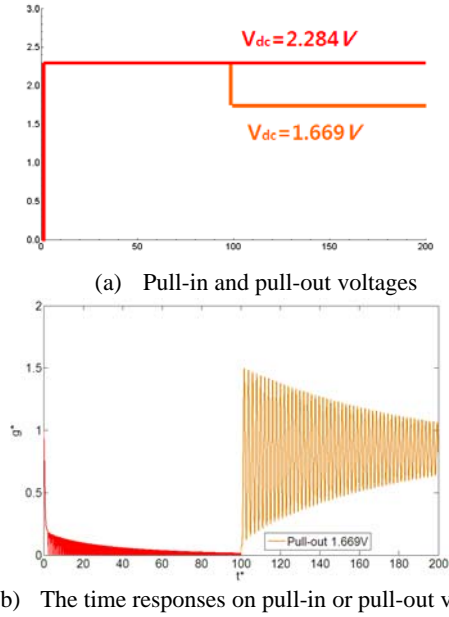


Fig. 2 The pull-in and pull-out behaviors in the nonlinear model ($Q = 150$)

3. 해석 결과

SWCNT의 비선형 모델의 최소 pull-in 전압 및 pull-out 전압과 그 때의 시간 응답을 Fig. 2와 같이 구하였다. 최초로 SWCNT가 pull-in 하는 전압은 약 2.284V이며, 그 후 전압을 감소시켜 약 1.669V가 되면 전극으로부터 떨어져 1차 모드로 자유 진동하는 시간 응답을 보인다.

Fig. 3는 임의로 $\Delta t^* = 50$ (약 260kHz)마다 pull-in 전압을 CNT에 인가시키거나 pull-out 전압으로 감소시킨 구형파로 가진 할 때의 시간 응답을 보여준다. Fig. 3(a)와 같이 최초의 pull-in / pull-out 전압을 인가시키더라도 일정 시간이 지난 후에는 나노 스위치로 사용할 수 없는 거동을 보인다. 이 때, Fig. 3(b)와 같이 pull-in 전압을 더 높이고 pull-out 전압을 0으로 낮추면 나노 스위치로 사용할 수 있는 거동을 보인다.

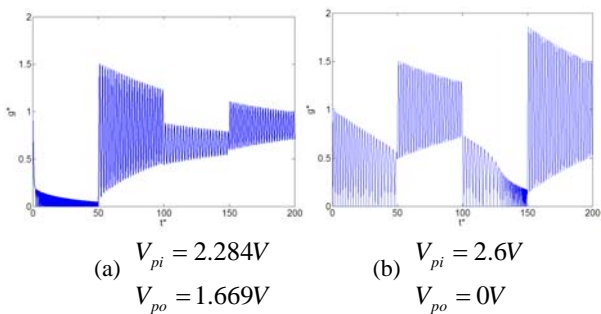


Fig. 3 The time response with different V_{pi} , V_{po} ($Q = 150$)

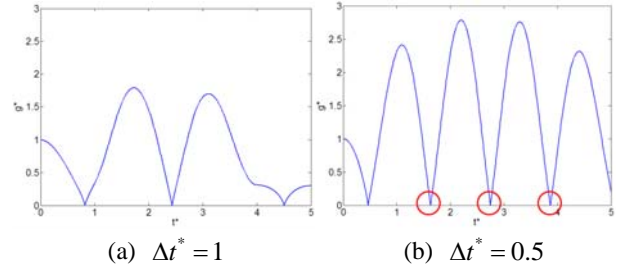


Fig. 4 The time responses with different time step on $V_{pi} = 2.7V$, $V_{po} = 0V$ and $Q = 150$

저속 구동과 달리 고속으로 구동하는 나노 스위치에서는 가진 구형파의 pull-in 전압의 크기와 시간 간격을 유의해야 한다. Fig. 4(a)는 Fig. 3의 pull-in 전압보다 더 높은 2.7V로 $\Delta t^* = 1$ (약 13MHz), $\Delta t^* = 0.5$ (약 26MHz)마다 각각 CNT에 전압을 on/off로 가진 했을 때의 시간 응답을 의미한다. Fig. 3(a)는 $\Delta t^* = 1$ 씩 pull-in/pull-out의 정상적인 거동을 보이는 것과 달리 Fig. 3(b)는 붉은 동그라미로 표시한 것과 같이, 일정 시간이 지난 후 전압을 인가시키지 않을 때 pull-in 혹은 전압을 인가시킬 때 pull-out 하는 CNT 거동을 보인다.

4. 결론

본 연구 결과 탄소나노튜브를 이용한 나노 스위치를 고속의 구형파로 구동시킬 경우, 정적 해석 결과와 달리 구동 주파수에 유의하여 pull-in 전압을 높여야 하고 pull-out 전압을 낮추어야 하는 결과를 얻었다.

후기

본 연구는 2010년도 두뇌한국(BK)21 사업과 한국연구재단의 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

- (1) Dequesnes, M., Rotkin, S. V., and Aluru, N. R., 2002, "Calculation of Pull-In Voltages for Carbon-Nanotube-Based Nanoelectromechanical Switches," *Nanotechnology*, Vol. 13, pp. 120-131.
- (2) Dequesnes, M., Tang, Z., and Aluru, N. R., 2004, "Static and Dynamic Analysis of Carbon Nanotube-Based Switches," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 126, pp.230-237.
- (3) 김일광, 이수일, 강상욱, 2010. "외팔보형 나노 디바이스의 비선형 동적 모델링," 한국소음진동공학회 2010년 춘계학술대회논문집, pp. 616-617.