

## 나노전자소자로서의 관성센서 시스템에 관한 연구

이 준 하<sup>†</sup>

<sup>†</sup>상명대학교 컴퓨터시스템공학과

### A Study on Inertia Sensor System for Nano Electronic Device

Jun-Ha Lee<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Computer System Engineering, Sangmyung University

#### ABSTRACT

We investigated a nanoscale inertia sensor based on telescoping carbon nanotubes, using classical molecular dynamics simulations. The position of the telescoping nanotubes is controlled by the centrifugal force exerted by the rotation platform, thus, position shifts are determined by the capacitance between carbon nanotubes and the electrode, and the operating frequency of the carbon nanotube oscillator. This measurement system, tracking oscillations of the carbon nanotube oscillator, can be used as the sensor for numerous types of devices, such as motion detectors, accelerometers and acoustic sensors.

**Key Words** : carbon nanotube, nano inertia sensor, nanotube oscillators, molecular dynamics

## 1. 서 론

CNT (Carbon Nanotube) 로 불리는 탄소 나노 튜브는 나노 크기 수준의 기계류와 센서 등의 소재로 응용되고 있다[1]. 관성 센서는 다양한 종류의 전자시스템에 적용되는 소자로서, 유도 장치, 항법 장치와 제어 장치 등에 사용되고 있다[2]. 관성 측정 시스템을 개발하기 위한 최근의 연구는 낮은 전력 소모를 가지고 작은 크기의 플랫폼에서 GPS(Global Positioning System)가 없는 항법 장치를 위한 적은 회전 비율을 가지는 센서의 실용적인 구현에 집중되고 있다[3,4].

본 연구에서는 이중벽 탄소 나노튜브 관성 센서를 분자 동역학 시뮬레이션을 이용하여 해석하였다. 제안된 CNT 오실레이터 관성 센서는 다중벽 탄소 나노튜브의 상대적인 텔레스코핑 운동에 기반을 두고 있다. 구조적으로 바깥쪽의 큰 CNT에 둘러싸인 두 개의 CNT 오실레이터는 시스템의 회전에 의해 진동하고, 이로부터 원심력이 발생하게 되며, 작동 주파수의 이동에 의한 커패시턴스 이동에 의해 피드백 센싱이 이루어진다.

어진다. 나노튜브의 위치는 회전하는 플랫폼에 의해 발생하는 원심력에 의해 제어되고, 피드백 센싱은 커패시턴스 변이 혹은 주파수 변이에 의해 얻어질 수 있다 [5-6]. 본 논문에서 쓰인 MD (Molecular Dynamics) 시뮬레이션은 이중벽 CNT -오실레이터 시스템이 나노 크기 수준의 관성 센서에 적용될 수 있음을 보여준다.

## 2. 본 론

### 2.1. 관성센서의 구조

이중벽 CNT 오실레이터 관성 센서에 대한 구조도를 Fig. 1(a)에 나타내었고, 이에 해당하는 단면도를 Fig. 1(b)에 제시하였다. 이러한 시스템은 감도와 성능 향상을 위해서 여러겹의 탄소나노튜브를 사용하는 다중벽 CNT를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 대칭형을 갖는 시스템을 위해 두 개의 CNT 오실레이터를 사용하였다. 바깥쪽 CNT는 두 개의 작은 CNT를 포함하고, 금속 전극에 매몰되어 있다. 두 개의 전극이 위치하고, 양쪽 전극과 중심 전극 사이에는 공기로 절연되어 있는 구조이다. 이러한 구조는 CNT의 축 또는 그 연장선상을 기준으로 회전하는 플랫폼에 설치된다. 만약 플랫폼

<sup>†</sup>E-mail : junha@smu.ac.kr

이 회전한다면, 바깥쪽 CNT는 회전하는 플랫폼 위에서 고정되어있고, 두 개의 안쪽 CNT는 원심력을 받아서 바깥쪽 CNT로부터 안쪽 CNT가 왕복 운동을 하게 만든다. 회전에 의한 안쪽 튜브의 왕복 운동은 원심력과 균형을 이루는 반데어발스(van der Waals) 힘이 발생하게 된다. 이와 같은 왕복 운동하는 CNT로 인하여 양쪽 전극 사이에서 전기적인 커패시턴스의 변동이 발생하게 되고, 이를 전극에서 감지할 수 있게된다[7].

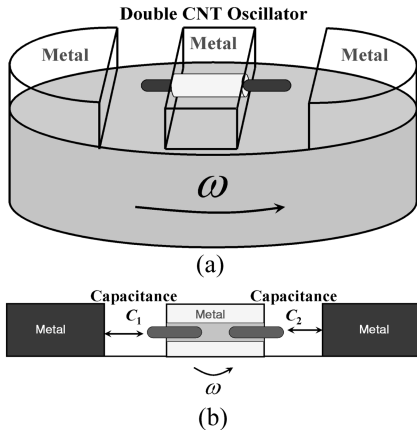


Fig. 1. (a) Double-wall CNT oscillator inertia sensor (b) Cross-sectional view.

## 2.2. 시뮬레이션 방법

탄소-탄소 사이 반응에는 일반적으로 탄소 시스템에 적용되는 Tersoff-Brenner 전위식을 사용하였다 [8,9]. 또한 탄소의 긴 범위에서의 반응은 Ulbricht 등이 구한 차단거리 10 Å인 Lennard-Jones 12-6 (LJ12-6) 전위식을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 해석프로그램인 MD 코드에는 velocity Verlet 알고리즘과 계산 효율을 높이기 위해 인접원자 목록(neighbor list)을 채택하였으며, MD 시간 간격(time step)은  $5 \times 10^{-4}$  ps으로 최적화 하였다[10]. MD 시뮬레이션을 수행하는 동안 온도는 300 K로 고정하였다. 본 논문에서 소개된 CNT 관성 센서는 내부 쉘의 개수와는 상관없이 다중벽 CNT를 고려한 개념이지만, 기본적으로 CNT 관성 센서는 이중벽 CNT를 기본으로 하는데, Fig. 2에서 보이듯이 끝이 열린 (10,10) CNT 와 끝이 닫혀있는 (5,5) CNT로 구성되어있는 형태이며, (10,10) CNT와 (5,5) CNT의 길이는 각각 82 Å과 32 Å이다.

이러한 CNT 관성 센서의 개념도를 기반으로 생각해 보면, 이 소자가 만들어질 때, 안쪽 CNT가 진동 동작을 하는 특성을 얻기 위해서는, 바깥쪽 CNT는 고정되어 있어야 하거나, 다른 물질 안에 포함되어 있어야 한

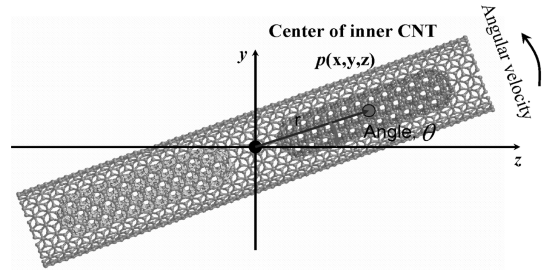


Fig. 2. System consisted by double walled by Open ended (10,10) CNT and close ended (5,5) CNT.

다. 그러므로 바깥쪽 CNT의 질량 중심은 일정하게 유지되어야 하는데, 이를 위해 본 연구에서는 매 MD 단계마다 위치 재조정 방법을 사용하였다. 이를 통해 이중벽 CNT 오실레이터의 진동 특성을 다양한 각속도에 따라 해석하였다.

## 3. 결과 및 검토

Fig. 3(a)~(c)는 각속도가  $\pi 10^{-2}$  rad/ps 일 때, MD 시간에 따른, 두 개의 안쪽 CNT 들에 미치는 vdW 에너지, 두 개의 안쪽 CNT의 상대적인 위치와 두 개의 안쪽 CNT에 미치는 힘을 해석한 결과이다. 이러한 각속도에 의해 발생된 원심력은 매우 낮기 때문에 Fig. 3(a)에서 보이듯이 vdW 에너지의 변동에서 진동 특성이 거의 보이지 않는다. 진동의 피크-피크 값은 2 Å이

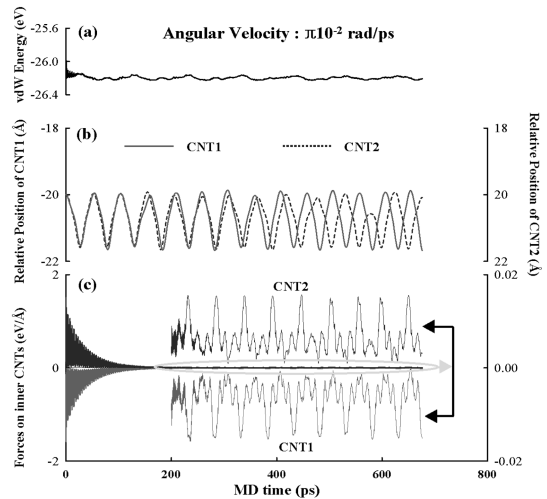
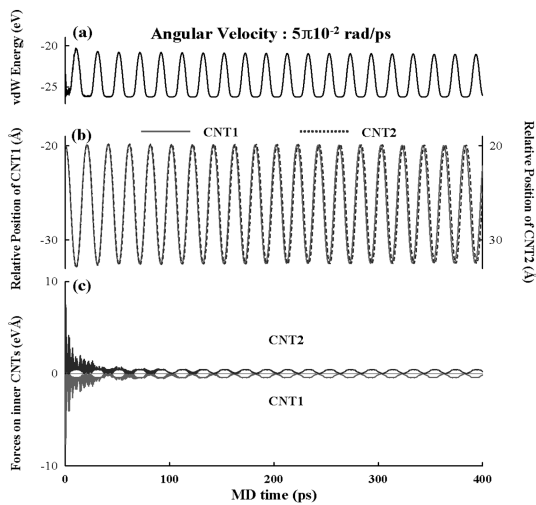


Fig. 3. The analysis results when angular speed is  $\pi 10^{-2}$  rad/ps as a MD simulation time. (a) Energy of vdW (b) Relative position of inner CNTs (c) Forces on inner CNTs.

하이코, 두 개의 CNT에 미치는 힘은  $0.015 \text{ eV/\AA}$  이하였다.

Fig. 4(a)~(c)는 각속도가  $5\pi \times 10^{-2} \text{ rad/ps}$ 일 때, MD 시간에 따른, 두 개의 안쪽 CNT 들에 미치는 vdW 에너지, 두 개의 안쪽 CNT의 상대적인 위치와 두 개의 안쪽 CNT에 미치는 힘을 보여준다. 이러한 각속도에 의한 원심력은 두 개의 안쪽 CNT들을 진동시키기에 충분한 힘이다. 그러므로 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 vdW 에너지의 변동이나 Fig. 4(b)에 보이듯이  $12 \text{ \AA}$  이상의 피크-피크 값의 값이 보인다.



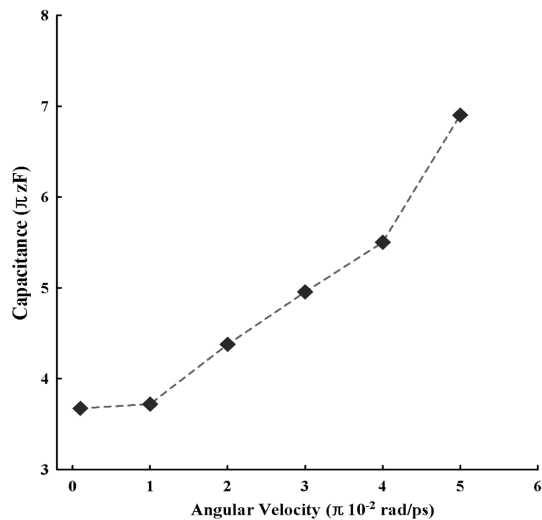
**Fig. 4.** The analysis results when angular speed is  $5\pi \times 10^{-2} \text{ rad/ps}$  as a MD simulation time. (a) Energy of vdW (b) Relative position of inner CNTs (c) Forces on inner CNTs.

그러나 각속도가  $6\pi \times 10^{-2} \text{ rad/ps}$ 이상인 경우에는, 발생하는 원심력이 두 개의 안쪽 CNT들에 작용하는 최대 vdW 힘보다 커서, 결국에는 두 개의 안쪽 CNT가 바깥쪽 CNT에서 빠져 나와버리는 결과를 나타낸다. 여러 번의 시뮬레이션 결과 오실레이션이 유지되는 최대 각속도는  $5.5\pi \times 10^{-2} \text{ rad/ps}$ 으로 해석되었다.

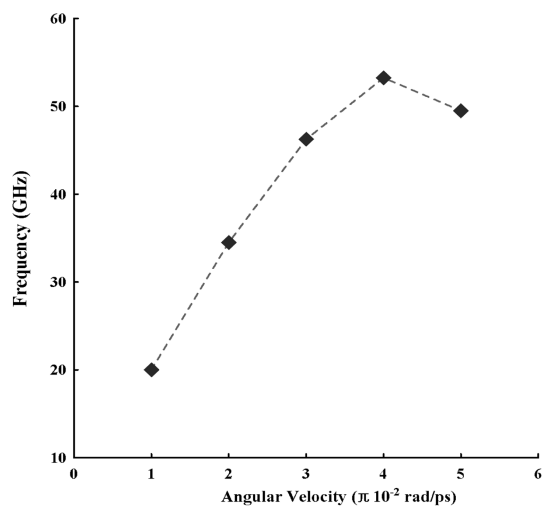
즉, 본 연구에서 제안한 관성센서 측정 시스템은 진동하는 커패시턴스를 추적하여 각속도를 결정할 수 있는데, 이러한 커패시턴스는 원심력이 다른 힘들, 즉 용량성 힘, vdW 힘, 결합력, 반발력들과 균형을 이루는 위치와 연관되어 있다. CNT 오실레이터는 해당하는 최대 vdW 힘을 가지고 있으므로, 만약 원심력이 최대 vdW 힘을 초과하면, 안쪽 CNT는 바깥쪽 CNT로부터 빠져나와 분리되어 버린다. 이러한 물리적인 힘의 균형을 고려하면, 감지 범위는 최대 원심력에 해당하는 최

대 각속도에 의해 결정된다. 만약 시스템의 크기가 커질 수 있다면, 최대 각속도는 증가할 수 있고, 감지 범위는 해당하는 최대 각속도에 맞게 증가할 수 있을 것이다.

Fig. 5는 각속도에 따른 커패시턴스의 비선형적인 관계를 나타내고 있으며, 이러한 비선형성은 CNT 오실레이터의 비선형 실효 스프링 상수와 밀접한 관련이 있다. 각속도가  $\pi \times 10^{-2}$  이하에서는 커패시턴스 변동이 미미하지만, 각속도가  $\pi \times 10^{-2}$ 와  $4\pi \times 10^{-2} \text{ rad/ps}$  사이에서는 급격한 커패시턴스의 증가가 나타나게 된다.



**Fig. 5.** Plot of Capacitance versus Angular velocity.



**Fig. 6.** Plot of Frequency versus Angular velocity.

커패시턴스는 오차 한계 이내에서 감지될 수 있는데,

오차 한계는 CNT 오실레이터의 자체 진동에 의해 발생하는 피크-피크 값의 변위와 연관되어 있다. 각속도가 증가함에 따라, CNT 오실레이터의 피크-피크 값도 증가하고 오차 한계도 증가한다. 피크-피크 값의 변동은 자체 진동 주파수의 변동을 유발하기 때문에, 작동 주파수 변이를 측정하여 각속도를 관찰할 수 있다.

Fig. 6에 제시된 주파수 대 각속도 관계의 결과는 각속도가  $4\pi \times 10^{-2}$  rad/ps 이하일 때는 각속도와 작동 주파수가 정비례하는 관계를 나타낸다. 그러나 각속도가  $4\pi \times 10^{-2}$  rad/ps를 초과하면, 작동 주파수는 감소하는데, 이는 CNT 오실레이터의 실효 스프링 상수가 비선형이기 때문이다. 그러므로 선형성을 나타내는 한정된 범위 내에서 작동 주파수를 측정함으로써 각속도를 결정할 수 있다. 주어진 텔레스코핑 변위에 대해 커패시턴스의 변이를 키우기 위해서는 보다 큰 지름의 CNT를 사용하거나, 여러 개의 CNT 오실레이터 구조로 응용하거나, 보다 큰 유전상수를 가진 물질을 이용해야 한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 텔레스코핑 나노튜브를 기반으로 한 나노 관성 센서의 특성을 분자 동역학 시뮬레이션을 활용하여 해석하였다. 나노튜브의 위치는 회전하는 플랫폼에 의해 발생하는 원심력에 의해 제어되고, 피드백 센싱은 커패시턴스 변이 혹은 주파수 변이에 의해 얻어질 수 있다. 센서의 이러한 물리적인 조건에 대해, 힘의 균형에 있어서 감지 범위는 최대 원심력에 해당하는 각속도에 의해 결정된다. 이러한 측정 시스템은 탄소 나노튜브 오실레이터의 진동을 추적하여 회전을 구할 수 있을 것이다. 이러한 나노전자소자는 다양한 전자시스템에 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

“이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-521-D00272)”

#### 참고문헌

1. J. Cumings and A. Zettl, “Tunable Nanoresonators

- Constructed from Telescoping Nanotubes,” *phys. Rev. Lett.*, Vol. 93, No. 8, pp. 086801(4 pages), 2004.
2. D. Qian, G. J. Wagner, W. K. Liu, M. F. Yu, and R. S. Ruoff, “Mechanical Properties of Carbon Nanotubes : Theoretical Predictions and Experimental Measurements,” *Appl. Mech. Rev.* Vol. 4, Issue 9, pp. 993-1008, 2003.
3. Q. Zheng and Q. Jiang, “Multiwalled Carbon Nanotubes as Gigahertz Oscillators,” *Phys. Rev. Lett.* Vol. 88, Issue 4, 045503(3 pages), 2002.
4. S. B. Legoas, V. R. Coluci, S. F. Braga, P. Z. Coura, S. O. Dantas, and D. S. Galvao, “Gigahertz Nanomechanical Oscillators Based on Carbon Nanotubes,” *Nanotechnology* 15, S184-S189, 2004.
5. J. L. Rivera, C. McCabe, and P.T.Cummings, “The Oscillatory Damped Behavior of Incommensurate Double-walled Carbon Nanotubes,” *Nanotechnology*, Vol. 16, pp. 186-198, 2005.
6. Y. E. Lozovik, A. V. Minogin, and A. M. Popov, “Atomic Scale Design of Carbon Nanotubes: The Way to Produce Bolt and Nut Pairs,” *International Journal of Nanotechnology*, Vol. 2, No.3, pp. 255-270, 2005.
7. P. Liu, Y. W. Zhang, and C. Lu, “Analysis of the Oscillatory Behavior of Double-walled Carbon Nanotube-based Oscillators,” *Carbon*, Vol. 44, Issue1, pp. 27-36, 2006.
8. J. Tersoff, “Modeling Solid-state Chemistry : Interatomic Potentials for Multicomponent Systems,” *Phys. Rev B* 38, pp. 5566-5568, 1989.
9. D. W. Brenner, “Empirical Potential for Hydrocarbons for use in Simulating the Chemical Vapor Deposition of Diamond Films,” *Phys. Rev. B* 42, pp. 9458-9471, 1990.
10. Jeong Won Kang and Jun Ha Lee, “Multi-Walled Carbon Nanotube Oscillator Behavior Analysis Using Classical Molecular Dynamics Simulations,” *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 53, No.2, pp. 646-651, 2008.

접수일: 2009년 11월 3일, 심사일: 2009년 11월 20일  
게재확정일: 2009년 11월 30일