

단일벽 탄소 나노튜브의 액츄에이터 응용

Actuators based on Single Walled Carbon Nanotube

오영석†·조승범*·최재봉*·김영진*·백승현*

Youngseok Oh, Cao Chengfan, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim, Seunghyun Baik

Key Words : 단일벽 탄소나노튜브, 액츄에이터(Actuator), Bucky paper, 유전 영동(Dielectrophoresis)

ABSTRACT

Several actuation mechanism for carbon nanotubes has been reported recently, including actuation by double-layer charge injection and ac voltages applied to multiple electrodes. Carbon nanotube actuator based on double layer charge injection work well in electrolyte at low voltage. AC dielectrophoresis based on four electrode geometry demonstrated carbon nanotubes in solution phase can be orientally manipulated by dielectrophoresis. From this point of view, and in regard to their performance, bucky paper actuator may alternate natural muscle. also, applied AC signal with appropriate magnitude and frequency together with four electrode arrangement has potential to realize nanotube electrokinetics.

1. 서 론

탄소나노튜브는 1991년 일본 NEC의 이지마 박사가 TEM(Transmission electron micrograph)을 통해 처음으로 발견한 이후로, 많은 연구를 통해 뛰어난 전기적, 기계적, 광학적 특성이 밝혀지고 있다⁽¹⁾. 따라서 탄소나노튜브는 21세기를 대표하는 신소재로서, 나노 복합재료, 나노 전기 소자, 나노 바이오 소자등에 대한 응용 가능성이 매우 크다.

탄소나노튜브를 액츄에이터로 활용하려는 시도는 1999년 미국방위고등연구계획국(DARPA)의 지원을 바탕으로 Baumhman 박사 등에 의해 처음으로 이루어졌다.⁽²⁾ 이때 개발된 탄소나노튜브 액츄에이터는 수용액 상에서 전기 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 원리였으며, 이를 계기로 탄소나노튜브를 이용한 마이크로 로보틱스, 인공 근육등으로써의 응용이 가능함을 보여주게 되었다.

한편, 다중벽 탄소나노튜브는 길이가 수 μm , 직경은 30nm 이하이며, 단일벽 탄소나노튜브의 경우 길이는 1 μm , 직경은 0.8~1.2nm 정도이다. 이러한 탄소나노튜브의 구조적 특

성으로 인해, 탄소나노튜브를 마이크로 모터로 응용하고자 하는 연구가 이루어졌다. D.L Fan등은 수용액 상에 다중벽 탄소나노튜브를 띄운 후 이를 4개의 전극 사이에 위치시키고, 일정 교류 전압을 가함으로써 나노튜브의 회전을 유발시키는 성공하였다⁽³⁾. 이러한 연구는 다중벽 탄소나노튜브뿐만 아니라 단일벽 탄소나노튜브의 회전 가능성을 간접적으로 증명하였으며, 이를 통해 MEMS Device로의 응용 가능성을 보여주었다.

본 논문에서는 단일벽 탄소나노튜브를 이용하여, 앞서 언급한 두 종류의 액츄에이터를 직접 제작 및 구동시켜 봄으로써, 앞으로의 응용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 나노튜브 액츄에이터

2.1 Bucky Paper 액츄에이터

(1) 원리

전해질 용액안에 2중으로 구성된 탄소나노튜브 시트를 위치시킨 후, 각각의 탄소나노튜브 시트에 전압을 인가하면, 시트 표면에 전기 이중층이 생기고 이로 인해 시트가 휘어지게 된다. 다시 말하면, 두 개의 탄소나노튜브 시트에 전압을 인가할 경우, 화학적 작용에 의해 2개의 탄소나노튜브 시트 모두 팽창하게 되지만, 인가된 전하에 따라 양 시트의 팽창률이 다르게 되므로 결국 팽창이 많이 이루어지는 쪽으로

† 성균관대학교 기계공학과
E-mail : zeroshot@skku.edu
Tel. 031-290-7670

* 성균관대 기계공학부

시트가 휘어지게 되는 것이다.

(2) 실험

단일벽 탄소나노튜브는 독특한 구조적, 전기적 특성에 의해, 나노튜브 표면에 이온이 존재할 경우, 축 방향 또는 지름 방향으로 팽창하게 된다.⁽⁴⁾ 하지만 이러한 현상은 하나의 나노튜브에 대해서는 관찰하기 어렵다. 따라서 많은 양의 탄소나노튜브를 종이 형태로 만듦으로써 이러한 현상을 거시적으로 관찰할 수 있다. 이렇게 탄소나노튜브를 종이 형태로 만든 것을 가리켜 Bucky Paper라 한다.⁽⁵⁾

본 연구에서 사용한 Bucky paper의 탄소나노튜브는 Hipco 방법으로 제조된 단일벽 탄소나노튜브(Carbon Nanotechnology Inc. #P0279)를 사용하였다. Bucky paper를 제조하기 위해 단일벽 탄소나노튜브 50mg을 질산 및 황산이 3:1 비율로 섞인 용액과 함께 병에 넣은 후 약 50°C의 물이 들어 있는 초음파 Bath(Model 5510, Bransonic) 안에서 중탕됨과 동시에 40Khz로 4시간 30분 동안 초음파를 가하였다. 이와 같은 초음파 및 산 처리 과정은 반데르발스 힘에 의해 뭉쳐 있는 탄소나노튜브를 분산시켜 줄 뿐만 아니라, 추후에 제작된 Bucky paper의 기계적, 전기적 특성을 향상 시켜주는 역할을 한다.⁽⁶⁾ 산 처리 및 초음파 과정을 거친 탄소나노튜브 분산 용액은 DI Water로 중화시키는 동시에 PTFE Filter(Pore size: 200μm)로 필터링 된다. 이 후 필터 위에 고르게 쌓인 나노튜브들은 Hot plate위에서 건조되어 Figure 1(a)과 같이 Bucky Paper가 완성된다. Figure 1(b)는 FE-SEM(JSM7000F, JEOL)을 이용하여 Bucky paper의 표면을 측정한 사진이다.

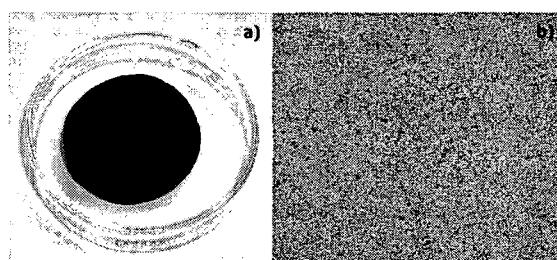


Figure 1(a) SWNT(Single Walled Carbon Nanotubes)
Bucky (b) SEM image of bucky paper(×15,000)

제작된 Bucky paper는 3×30mm 폴리머 필름 양면에 3M 양면 접착테이프를 이용하여 붙였다. 그 후, NaCl 1M 용액 안에 담근 체, Figure 2와 같이 두개의 Bucky Paper에 각각 +, - 전극을 연결하였다. 그리고 먼저 DC power Supply를 이용해 10V의 직류 전압을 인가하여 Bucky paper의 변형을 확인하고, 다음으로 Function generator(Agilent33220A)로 4Vp-p의 교류 전압을 사각파로 1Hz부터 10Hz까지 인가함으로써, Bucky paper의 구동

모습을 관찰하였다.

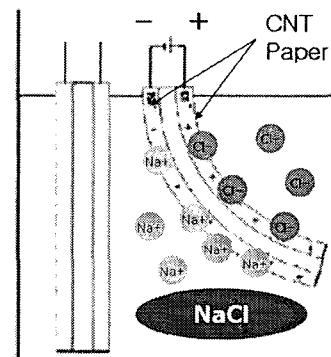


Figure 2. Schematic diagram of Bucky Paper Actuator

(2) 결과

먼저 Bucky Paper에 10V의 직류전압을 인가시킨 후 그 변형을 관찰한 결과는 Figure 3와 같다.

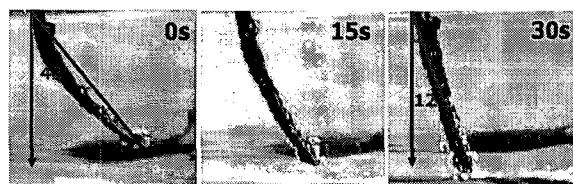


Figure 3. Bending of Bucky paper actuator by application of DC 10V

초기 42로 휘어져 있던 Buck paper는 전압 인가로 인해 각각의 Bucky paper 표면에 전기 이중층이 발생하여 개개의 탄소나노튜브에 변형을 가하였고, 이는 전체적으로 Bucky paper의 변형으로 나타나, 30초 후에는 거의 직각 방향으로 뻗어있는 모습을 나타내었다.

다음으로 함수 발생기로 4Vp-p, 사각파의 교류 전압을 1Hz부터 10Hz까지의 주파수로 인가함에 따른 Bucky paper의 구동 경향은 figure 4와 같다. 참고로, 액츄에이터의 구동 변화량이 미소할 뿐만 아니라 정밀 측정 장비의 부재로 인해 측정 데이터의 오차를 감수해야 했다.

사각파의 교류 전압이 인가됨에 따라 발생된 Na^+ 와 Cl^- 이온이 bucky paper의 양면에 교대로 침투함으로써, 이로 인해 Bucky paper 표면에 발생되는 전기 이중층 또한 수시로 변함을 예상할 수 있다. 따라서 이에 따라 양 Bucky paper의 변형률 또한 교대로 바뀌어, 결국 교류 주파수 신호에 따라 좌우로 구동되는 모습을 보여주었다. 또한, Fig.4에서처럼, Bucky paper에 인가된 교류 신호가 1Hz일 경우 최대 0.9°의 변형률을 나타낸 반면 3Hz에서는 0.33°의 변형률을 보여줌으로써 인가된 교류 전압의 주파수가 높아짐에 따라 bucky paper의 구동속도가 증가하지만 그 변형량은 감소

함을 관찰하였다.

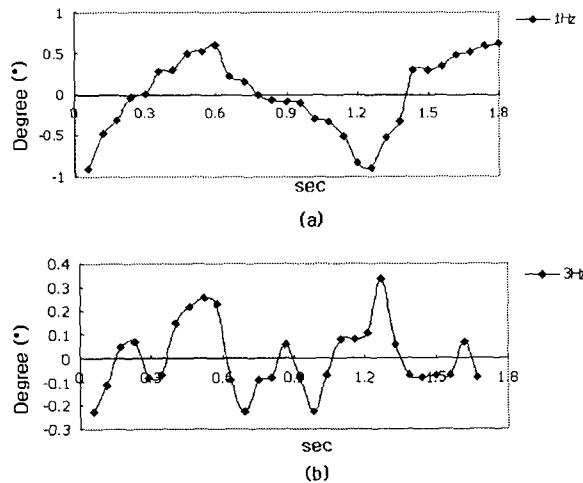


figure 4. Comparison of the actuation response curves according to frequency of applied AC.

2.2 Bulk manipulation

(1) 원리

탄소나노튜브가 균일하게 분산된 용액에 불균일(nonhomogeneous) 전기장을 가하게 되면 탄소나노튜브와 용액의 유전율 및 전도성의 차이, 전기장의 인가주파수에 따라 탄소나노튜브입자들은 일정한 방향을 따라 이동하게 된다. 이러한 현상을 유전영동(DEP: Dielectrophoresis)라고 한다.(Fig. 5(a)) 입자들이 전기장 세기의 변화율(gradient)에 따라 두 가지 이동패턴을 보여주게 되는데 전기장의 강한 쪽으로 향하는 패턴을 Positive DEP라 하고 약한 쪽으로 향하는 패턴을 Negative DEP라고 한다.(Fig. 5(b)) 이는 식 (1)과 같이 Clausius-Mossotti(CM) factor에 따라 결정된다.

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*}, \quad \epsilon^* = \epsilon - i\frac{\sigma}{\omega} \quad (1)$$

여기서, $K(\omega)$: Clausius-Mossotti factor

ϵ : permittivity
 σ : conductivity
 ω : frequency

subscript p and m denotes particle and medium

즉, 탄소나노튜브 및 용액의 유전율 및 전도성이 일정한 조건하에서 CM factor의 실수부와 허수부는 Fig. 5(b)와 같이 허수부는 $-0.5 \sim 0.0$ 사이, 실수부는 $-0.5 \sim 1.0$ 사이에 분포하게 되며 부호에 방향에 따라 Negative DEP와 Positive DEP로 나뉘게 된다. 전환주파수는 그림과 같이 몇 매개헤르츠(MHz)에 달한다. 이러한 현상을 이용하게 되면 탄소나

노튜브들을 전기장에 따라 원하는 방향으로 조작(manipulation)을 할 수 있다.

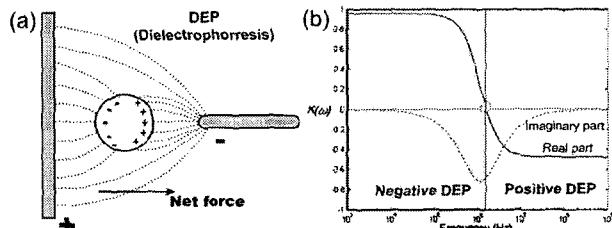


Figure 5. Representative schematic of (a) dielectrophoresis and (b) corresponding frequency response

(2) 실험 및 결과

전기장에 따른 탄소나노튜브의 조작실험을 하기 위해 Fig. 6에서 같이 원주형 방향에 따라 90도 차이로 배열된 전극을 제작하였다.(Fig. 5(a)) 서로 마주보는 전극사이의 거리는 0.2 mm이다. 실험에 쓰인 탄소나노튜브용액은 Probe tip sonicator로 HipCo SWNT를 10W에서 약 60분간 DI water로 균일하게 분산 시켰다. 나노튜브들 사이의 반드시 란스 힘으로 인해 나노튜브는 알갱이모양의 변들(bundle) 형태로 물에 분산되었다.

다음, 분산용액을 네 개의 전극사이에 로딩시키고 전극에 주파수 1MHz, 크기 10Vp-p의 교류신호를 인가하였다. Fig. 6(b)는 전극 C와 D사이에 교류신호를 약 10분간 인가한 후의 사진이고 Fig. 6(c)는 전극 A, B, C, D에 크기가 동일하고 위상차가 90도인 교류신호를 약 10분간 인가한 후의 사진이다. 사진에서 보여준 바와 같이 탄소나노튜브 알갱이들은 수용액상, 인가주파수 1MHz하에서 Positive DEP 영향을 받게 되고 탄소나노튜브는 주로 전극팁 사이 및 전극팁 에지(edge)에 쏠리는 모습이 관찰되었다.

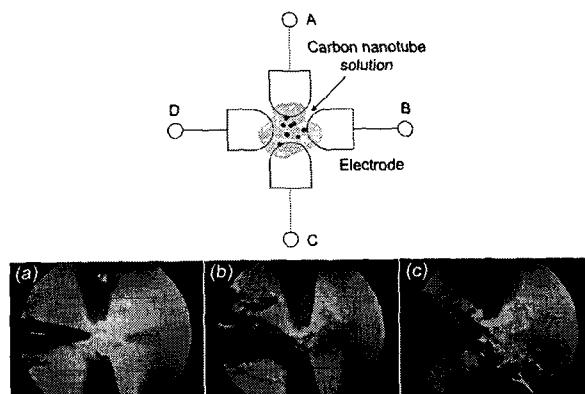


Figure 6. Carbon nanotube manipulation with DEP

고주파수 인가전압, 분산입자의 크기 및 형상, 용액의 전도도의 변화에 따라 Negative DEP를 이용하여 탄소나노튜

브를 전극중앙에 트래핑(trapping)시키는 실험은 현재 진행 중에 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단일벽 탄소나노튜브를 각각 Bucky paper 및 분산용액 상태에서 구동시켜봄으로써 엑츄에이터로서의 활용 가능성을 알아보았다.

Bucky paper 엑츄에이터는, 전해질 용액 안에서 비교적 낮은 전압으로 구동이 가능하였을 뿐만 아니라, 제어 방법 또한 간단하였다. 따라서 이러한 특성을 이용하여, 다양한 Bucky paper를 다발로 제작할 경우, 충분히 생체 근육을 대체할 수 있는 인공 근육으로서의 활용이 가능하다. 또한 Bulk manipulation 실험의 경우, 여러 개의 전극사이의 전기장을 제어함으로써, 전극 사이에 로딩/loading된 탄소나노튜브 번들에 대한 manipulation이 가능함을 보여주었다. 추후, 이를 이용하여 MEMS 모터로써 사용하기 위해서는, 탄소나노튜브를 전극 중앙에 트래핑 시킨 후 회전 구동을 시키기 위한 연구가 요망된다.

후기 .

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터(SAFE)와 과학기술부 주관하의 21세기 프론티어 연구개발 산업의 일환인 나노메카트로닉스 기술개발 사업단의 연구비 지원(05K1401-00410)으로 수행되었습니다.

참고문현

- (1) Iijima, S., 1991 Nature Vol.354, pp.56 ~ 58
- (2) R. H. Baughman et. al., 1999 Science Vol284, pp.1340 ~ 1344
- (3) D. L. Fan, F. Q. Zhu, R. C. Cammarata, and C. L. Chien, 2005 Physical Review Letters, Vol.94 #247208
- (4) Shankar Phosh, Vikram Gadagkar, A. K. Sood, 2005, Chemical Physics Letters Vol.406, pp.10~14
- (5) J. Fraysse, A. I. Minett, O. Jaschinski, G. S. Duesberg, S. Roth, 2002, Carbon, Vol.40, pp.1735~1739
- (6) Xiefei Zhang, T. V. Sreekumar, Tao Liu, Satish Kumar, 2004, Journal of Physical Chemistry B, Vol 108, 16435~16440
- (7) P. H. Michael, 2000 Nanotechnology Vol.11, pp.124~132