

# 탄소나노튜브 액츄에이터의 이론적 모델링

## Analytical Modeling of Carbon Nanotube Actuators

박철휴\*, 염영일  
(Chul-Hue Park and Young-Il Youm)

**Abstract :** Carbon nanotubes have outstanding properties which make them useful for a number of high-technology applications. Especially, single-walled carbon nanotube (SWNT), working under physical conditions (in aqueous solution) and converting electrical energy into mechanical energy directly, can be a good substitute for artificial muscle. The carbon nanotube structure simulated in this paper is an isotropic cantilever type with an adhesive tape which is sandwiched between two SWNTs. For predicting the geometrical and physical parameters such as deflection, slope, bending moment and induced force with various applied voltages, the analytical model for a 3 layer bimorph nanotube actuator is developed by applying Euler-Bernoulli beam theory. The governing equation and boundary conditions are derived from energy principles. Also, the brief history of carbon nanotube is overviewed and its properties are compared with other functional materials. Moreover, an electro-mechanical coupling coefficient of the carbon nanotube actuator is discussed to identify the electro-mechanical energy efficiency.

**Keywords:** carbon nanotube, actuator, bucky paper, Euler-Bernoulli model, SWNT

### I. 서론

탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)가 1991년 Iijima에 의해 발견된 이후 뛰어난 기계적 화학적 성질로 인해 많은 연구가 행하여 졌고[1], 그 중 1999년 Baughman 등에 의하여 단일벽 탄소나노튜브(SWNT)가 전해질 속에서 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있는 Bucky paper로 불리워지는 작동기로서의 가능성을 실험을 통해 보고하였다[2]. CNT 작동기는 동작전압이 낮고 ( $\leq 2$  Voltage), 2000 °C 이상의 고온에서도 작동이 가능하며, 1% 이상의 변형률, 그리고 테라파스칼(1-2 TPa) 수준의 높은 Young's Modulus 의 물성치로 인하여 기존의 매크로/마이크로 작동기 보다 우수한 성능을 가지고 있다 [3, 4]. 뿐만 아니라 SWNT 작동기(0.75 MPa)는 자연 근육(0.3 MPa)보다 높은 응력을 생성할 수 있으며, 자연근육과 같이 수십억개의 개별 나노튜브 작동기가 조합된 형태로서 작동기의 수명을 단축시키는 이온교환이 불필요한 작동기구를 가지므로 긴 수명을 유지할 수 있는 생리학적 조건(in salt water)에서도 작동 가능한 생체 친화적인 인공근육으로 관심이 집중되고 있다[5-7].

본 논문에서는 탄소나노튜브 발달과정과 작동기로서의 작동원리를 간단히 살펴보고 3층 구조물에 대하여 Euler-Bernoulli beam 이론을 적용하여 해석적 모델링을 수행하여, 작동기가 작동했을 때의 변위와 기울기를 예견하며, CNT에 전압을 가했을 때 발생한 변위, 굽힘 모멘트와 작용되는 작동기의 힘에 대하여 살펴본다. 또한 전압에 대한 변위와 모멘트의 변화도 고찰하고, 변형에 의한 기계적 에너지와 공급된 전기적 에너지의 비를 계산하여 에너지 효율도 고찰하고자 한다.

### II. 탄소 원자 구조에 따른 종류 및 특성

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 29., 채택확정 : 2004. 8. 15.

박철휴, 염영일 : 포항공과대학교 기계공학과

(diparkch@postech.ac.kr/youm@postech.ac.kr)

탄소의 외부 돌출 형태로는 그래파이트(graphite)와 다이아몬드(diamond)만이 예전에 존재하였다. 그래파이트(graphite)의 원자 구조는 서로 교차 결합된 육각형의 평면들이 느슨하게 연결 되어 있고, 다이아몬드 원자구조는 탄소원자들이 사면체의 형태로 3차원적으로 공유 연결되어 있다. 1985년에 이르러서 또 다른 탄소의 외부 돌출 형태가 발견되었는데 생긴 모양이 미국건축가 Fuller 의 돔 형태의 빌딩과 닮아서 Fulleren이라고 명명되었다(그림 1a). 플러린의 탄소원자 구조는 탄소원자 60개로 구성된 공모양의 구 표면에 육각형의 평면이 서로 연결되어 있는 모습이다. 1991년 이르러 튜브형태의 탄소 구조물이 일본의 Iijima에 의해 발견되었는데 하나의 그래파이트 평면을 둥글게 말아놓은 구조로 벽을 이루고 있는 결합의 수에 따라서 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWNT), 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWNT)로 분류되며 그림 1에서처럼 실린더 형태로써 지름이 1-50 nm 이고 길이는 마이크로미터 수준이다.

탄소나노튜브의 특징으로는 높은 가로세로비 (aspect ratio)의 구조적 특성, 탄소계 물질의 특성인 화학적 안정성, 탄소원자 사이의 강한 결합력으로 인해 우수한 기계적 특성 및 일차원적인 전기적 전도성을 갖는다. 특히 탄소 나노튜브는 강철을

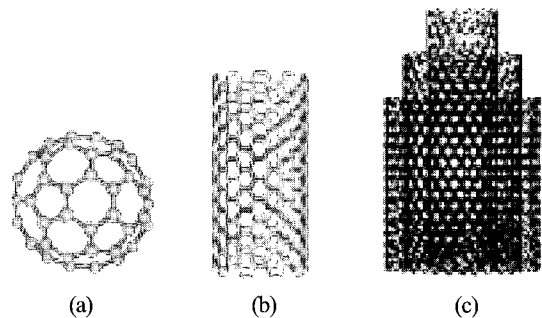


그림 1. (a)플러린 (b)단일벽 (c)다중벽 탄소나노튜브[4].  
Fig. 1. (a) Fulleren (b) SWNT (c) MWNT.

표 1. 지능재료물의 성질 비교[4].

Table 1. Physical properties of intelligent materials.

	Piezo ceramic	Magneto -strictor	SMA	CNT
Young's modulus [Gpa]	70	40	20-80	270-1800
Tension strength [MPa]	80	28	1000	3600-63000
Max. elastic Strain [%]	0.1	0.1	10	1 이상
Max. temperature[°C]	160	280	400	2800
Dynamics	<10kHz	<10kHz	<2Hz	<1kHz

포함한 어떤 재료보다 매우 높은 탄성계수와 항복강도[표 1], 그리고 낮은 밀도로 인하여 그 응용범위가 넓으며, 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 능력은 대표적 지능재료물인 압전 세라믹 보다 낮은 전압을 공급 받아 더 많은 변형을 일으킬 수 있는 탁월한 작동기로서의 능력을 가지고 있다.

II. 탄소 나노튜브 작동기의 작동 원리

그림 2은 소금물 속에서 작동하는 2장의 SWNT Bucky paper가 접착 테이프 양면에 고정되어 3층의 복합 구조물을 구성하는 바이모프 형태의 캔틸레버 구조물로서 전기가 공급되어 작동했을 때와 작동하지 않았을 때를 나타낸다. 전기화학적으로 한 층에서는 양극 나트륨 이온들이 존재하며 음전하로 대전되었고, 그 반대층에서는 음극 염화물을 보유하며 양전하로 대전되어 있다.

그러므로 전체적으로는 중성이지만 전압의 변화로 유도되는 전기적 전하 투입(electronic charge injection)에 의해 공유결합 방향(covalently bonded direction)으로의 치수 변화하게 발생하는데 이는 양자 기계학적 효과(quantum mechanical effects)와 겹 층에 의한 정적 효과(double layer electrostatics effects)에 기인

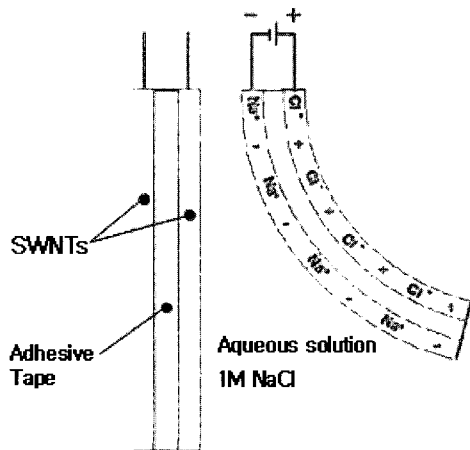


그림 2. 바이모프 나노튜브 작동기의 개략도[4].  
Fig. 2. The schematic drawing of a bimorph SWNT.

된 것이다. 여기서 양자 기계학적 효과란 궤도점령(orbital occupation)과 밴드구조(band structure)의 변화를 말한다. 본 탄소 나노튜브 작동기는 두 층이 동시에 인장되지만 음극으로 대전된 층이 양극으로 대전된 층보다 더 많이 인장됨으로써 굽힘이 발생한다. 이 현상은 반대 극의 전압을 가할 때는 반대 방향의 굽힘이 발생하여 작동기로서의 성능을 발휘한다.

III. 탄소 나노튜브에 대한 이론적 모델링

1. 변형률 모델링

탄소 나노튜브 바이모프 작동기의 전기적 변형률은 작동기에 공급된 전압에 비례하며 SWNT층들과 접착테이프는 완전한 접합으로 가정한다. 탄소 나노튜브 작동기의 변형률은 기계적 부분과 전기적 부분으로 나누어 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_s = C_s \sigma_s + N_s V_s \tag{1}$$

여기서  $\sigma_s$ 은 작동기에서의 응력,  $C_s$ 은 constant electric field 때의 탄성 컴플라이언스(compliance)이다.  $N_s$ 는 변형률 변화와 전압의 변화 비로 정의되는 변형률-전압 계수이고,  $V_s$ 는 나노튜브 작동기를 구동하는 전압이다. 본 논문의 이론적 해석을 위해서 작동기에 공급된 전압과 그로 인해 유도된 변형률 사이의 변형률-전압 계수는 Baughman[2]등의 논문에서 행하여진 실험 데이터를 이용하였다. 참고된 실험의 절차를 간단히 살펴보면 그림 3에서 처럼 Bucky paper 구조물의 한쪽 끝은 전해조 바닥(1M NaCl 용해액)에 고정되어 있고, 그 반대쪽 끝은 수평 PVC 캔틸레버에 매달려 있다.

공급된 전압에 의한 작동기의 변형은 PVC 캔틸레버의 변위를 유도하고 PVC 캔틸레버의 끝에 부착된 거울위에 설치된 광학센서를 이용함으로써 Bucky paper 횡적 변형률을 계산할 수 있다. 그림 4에서는 -0.8V와 0V 사이에서 구하여진 탄소 나노튜브 작동기 변형률이다. 최대 변형률은 -0.8V에서 0.04%이지만 기록된 최대 변형률은 0.2%라고 한다[2].

그림 4의 -0.8V에서 0V까지 변형률 데이터를 이론적 모델링에 적용하기 위하여 실험 데이터를 curve fit함으로써 변

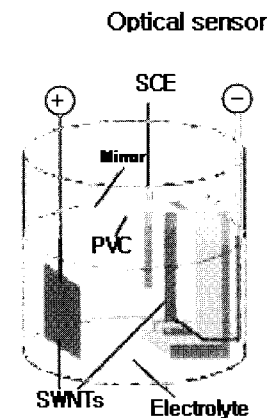


그림 3. 나노튜브 작동기의 실험장치[2].  
Fig. 3. Experimental set-up of a SWNT actuator.

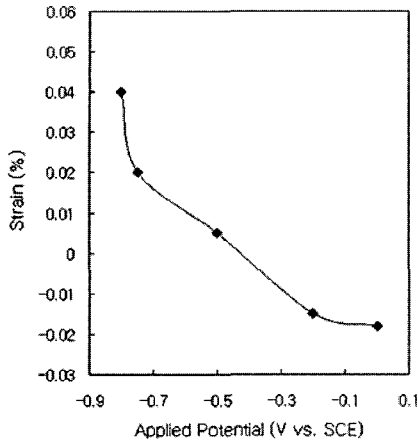


그림 4. 나노튜브 작동기의 변형률[5].

Fig. 4. Variation of strain of a SWNT actuator.

형률-전압 관계의 다음과 같은 2차와 3차의 다항식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{2nd order } S_1^* &= 0.0792V^2 - 0.0016V - 0.018 \\
 \text{3rd order } S_1^* &= -0.075V^3 - 0.0102V^2 - 0.0268V - 0.0186 \quad (2)
 \end{aligned}$$

Curve-fit의 정확성을 나타내는 지수는 2차 다항식 경우  $R^2=0.9568$ , 3차인 경우 0.9585이다. 완전한 curve-fit 인 경우는  $R^2$ 은 1이다.

전압에 의한 변형률을 적용하여 (1)을 응력식으로 다시 나타내면

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s + E_N \varepsilon_N = E_s (\varepsilon_s + \varepsilon_N) \quad (3)$$

여기서  $E_s$ 는 SWNT의 Young's Modulus이다.

2. 모멘트 평형식

이론적 모델링을 위해 고전 보의 Euler-Bernoulli model을 기초로 하였다. Euler-Bernoulli model은 3층 구조물로 이루어진 작동기의 변형률을 그림 5와 같이 연속적으로 나타내면서 복합구조물의 곡률을 예견할 수 있는 이론이다[8].

전압을 가했을 때 각 층에서 발생하는 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

이때 아래첨자 SU, SL은 각각 위, 아래의 SWNT층을 나타내고, T는 접착 테이프층을 가리킨다. 식에서  $k$ 는 보의 곡률이다. 각 층에 대한 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

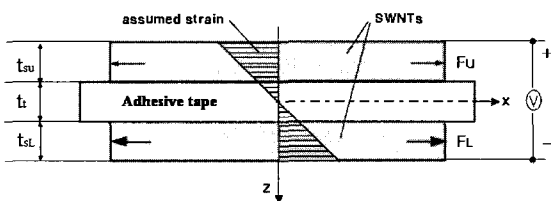


그림 5. 나노튜브 작동기의 Euler-Bernoulli model.

Fig. 5. Euler-Bernoulli model of a SWNT actuator.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{SU} &= E_{SU} (\varepsilon_{SU} - \varepsilon_{NU}) = -E_{SU} (zk + \varepsilon_{NU}), \\
 \sigma_{SL} &= E_{SL} (\varepsilon_{SL} - \varepsilon_{NL}) = -E_{SL} (zk + \varepsilon_{NL}), \\
 \sigma_T &= E_T \varepsilon_T = -E_T zk.
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 M_{SU} &= \int_{\frac{t_s}{2}}^{t_u + \frac{t_s}{2}} z \sigma_{SU} b dz \\
 M_T &= \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} z \sigma_T b dz \\
 M_{SL} &= \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} z \sigma_{SL} b dz
 \end{aligned} \quad (5)$$

응력 (4)를 모멘트 (5)에 대입하여 풀면

$$\begin{aligned}
 M_{SU} &= -\frac{1}{12} E_{SU} b t_{su} (3t_i^2 + 6t_i t_{su} + 4t_{su}^2) \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \\
 &\quad - \frac{1}{2} E_{SU} b t_{su} (t_i + t_{su}) N_{SU} V_{SU}, \\
 M_T &= -\frac{1}{12} E_T b t_i^3 \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right), \\
 M_{SL} &= -\frac{1}{12} E_{SL} b t_{sl} (3t_i^2 + 6t_i t_{sl} + 4t_{sl}^2) \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \\
 &\quad - \frac{1}{2} E_{SL} b t_{sl} (t_i + t_{sl}) N_{SL} V_{SL}
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $E_{SU} = E_{SL} = E_s$ ,  $t_{su} = t_{sl} = t_s$  라고 가정하고, 구조물에 작용하는 모멘트 균형식을 적용하면 내부 모멘트(internal moment)와 전압에 의한 외부 모멘트(external moment)가 평형을 이루는 모멘트 평형식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M &= -\frac{1}{2} E_s b t_s (t_i + t_s) N_s V_s \\
 &= \left[ -\frac{1}{6} E_s b t_s (3t_i^2 + 6t_i t_s + 4t_s^2) - \frac{1}{12} E_T b t_i^3 \right] \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)
 \end{aligned} \quad (7)$$

위 식을 간단히 다시 표기하면 다음과 같다.

$$M = -[(EI)_s + (EI)_T] k \quad (8)$$

여기서  $M$ 은 전압이 주어졌을 때 탄소 나노튜브 작동기에서 발생하는 모멘트이다.

3. 작동기의 지배 방정식

에너지 방정식을 이용하면 3층 구조물로 이루어진 탄소 나노튜브의 지배 방정식 뿐 만 아니라 구조물의 경계조건도 동시에 구할 수 있다. 작동기의 포텐셜 에너지는 응력과 변형률의 곱을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\delta U = \delta \int_{Volume} \frac{1}{2} \sigma \varepsilon dV = \int_{Volume} E \varepsilon \delta \varepsilon dV = 0 \quad (9)$$

앞에서 구해진 응력과 변형률을 (9)에 대입하면

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_0^L \int_{-(t_s+t_i/2)}^{(t_w+t_i/2)} \int_{-b/2}^{b/2} dw (E \varepsilon \delta \varepsilon) dz dx \\ &= b \int_0^L \int_{(t_i/2)}^{(t_w+t_i/2)} \left[ E_S \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} - \varepsilon_{NU} \right) \delta \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} - \varepsilon_{NU} \right) \right] dz dx \\ &+ b \int_0^L \int_{-(t_i/2)}^{(t_i/2)} \left[ E_T \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \delta \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \right] dz dx \\ &+ b \int_0^L \int_{-(t_s+t_i/2)}^{-(t_i/2)} \left[ E_S \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} - \varepsilon_{NL} \right) \delta \left( -z \frac{d^2 w}{dx^2} - \varepsilon_{NL} \right) \right] dz dx \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $b$ 는 구조물의 넓이이다. 먼저 (10)에 대해 두께에 대한 적분을 수행하면

$$\begin{aligned} \delta U &= b \int_0^L \left[ \frac{d^2 w}{dx^2} \delta \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) (2E_S I_S + E_T I_T) \right] dx \\ &+ E_S b t_s (t_s + t_i) \int_0^L N_S V_S \delta \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) dx \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $I_S$ 와  $I_T$ 는 SWNT층과 접착층의 각 중립축에 대한 관성 모멘트이다. (11)을 한번 더 적분하면

$$\begin{aligned} \delta U &= b \int_0^L \left[ (2E_S I_S + E_T I_T) \frac{d^2 w}{dx^2} - E_S t_s (t_s + t_i) N_S V_S \right] \\ &\delta \left( \frac{dw}{dx} \right) \Big|_{x=0}^L - b \frac{d}{dx} \left[ (2E_S I_S + E_T I_T) \frac{d^2 w}{dx^2} \right] \delta w \Big|_{x=0}^L \\ &+ b \int_0^L \left[ \frac{d^2}{dx^2} (2E_S I_S + E_T I_T) \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \delta w \right] dx = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 탄소나노튜브의 지배 방정식은 다음과 같고,

$$\delta U = \frac{d^2}{dx^2} (2E_S I_S + E_T I_T) \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = 0 \quad (13)$$

경계조건을 다음과 같이 구할 수가 있다.

$x=0$  에서 고정단

$$w=0, \quad \frac{dw}{dx} = 0$$

$x=0$  에서 자유단

$x=0$

$$\begin{aligned} (2E_S I_S + E_T I_T) \frac{d^2 w}{dx^2} - E_S t_s (t_s + t_i) N_S V_S &= 0 \\ \frac{d}{dx} (2E_S I_S + E_T I_T) \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

지배 방정식과 경계조건으로부터 외부의 힘이 작용하지 않는다고 가정할 때 다음의 변위 방정식을 구할 수가 있다.

$$w(x) = \frac{E_S t_s (t_s + t_i) N_S V_S}{2(E_T I_T + 2E_S I_S)} x^2 \quad (15)$$

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 자유변위, 기울기, 모멘트와 작동힘

탄소 나노튜브 작동에 Euler-Bernoulli beam 이론을 적용한 이론적 모델링을 이용하여 전압이 작동기에 가해졌을 때의 변위와 기울기를 예견하며, 변형을 일으킨 모멘트와 작동힘에 대하여서도 살펴본다. 본 시뮬레이션에 사용된 탄소나노튜브의 탄성계수는  $1.2 \times 10^9$  Pa 이고, 시편의 크기는  $20 \times 10^{-3} \text{m} \times 4 \times 10^{-3} \text{m} \times 50 \times 10^{-3} \text{m}$  이다[5]. 탄소 나노튜브에 의해 샌드위치된 스퀘어 이중 접착 테이프는 탄성계수  $1.1 \times 10^9$  Pa [9]와 시편의 크기  $20 \times 10^{-3} \text{m} \times 4 \times 10^{-3} \text{m} \times 60 \times 10^{-6} \text{m}$  이 사용되었다. 그림 5는 -0.8V 에서 0V 까지 실험 변형률 데이터로부터 계산된 변형률-전압 계수는  $N_S$ 를 0.06%/V(dot line)로 (1)의 변형률 식에 적용하여 구한 자유변위, 기울기, 굽힘 모멘트, 그리고 작동힘에 대한 결과이고, 다른 커브는 실험 데이터를 curve-fit 함으로써 얻어진 2차(solid line)와 3차 (dash line)의 변형률 다항식을 적용하여 얻은 값들이다.

그리고 본 시뮬레이션을 위한 -0.8V 작동 전압이 적용되었다. 그림 6으로부터 변형률-전압 계수로 구한 결과들은 curve-fit함으로써 얻어진 2차와 3차 변형률 다항식을 적용하여 얻은 결과와 약간의 차이가 발생함을 알 수가 있다. 이는 주어진 전압 구간 내에 대한 일정한 상수값을 적용한 변형률-전압 계수보다는 각각의 전압값에 따른 변형률을 계산할 수 있는

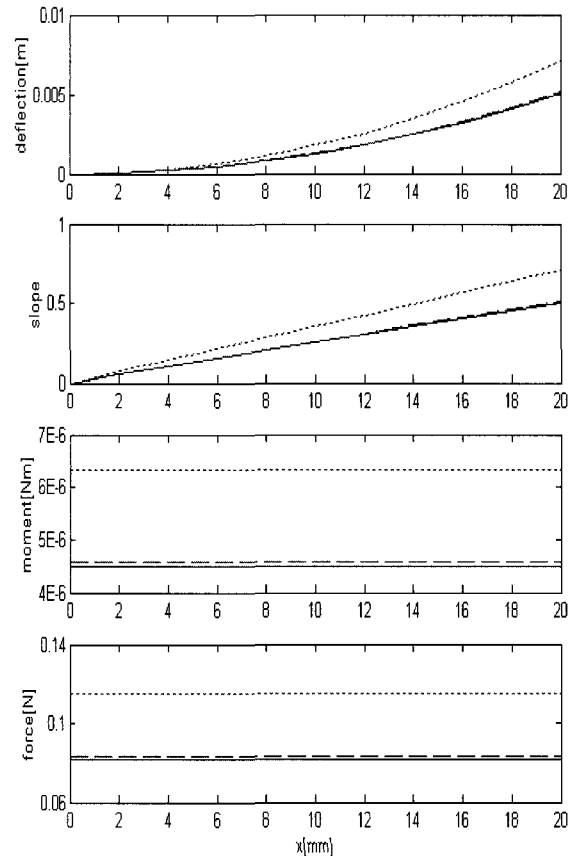


그림 6. 작동기의 기하학적, 물리적 파라미터들.

Fig. 6. Geometrical and physical parameters of SWNTs.

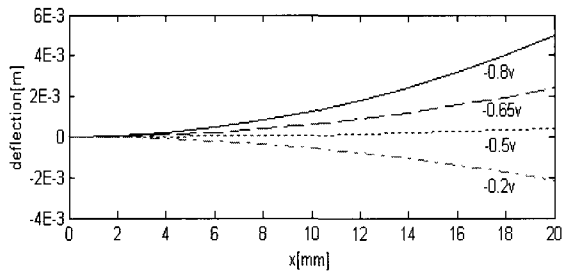


그림 7. 전압에 따른 변위.  
Fig. 7. Deflection-length curve for various voltages.

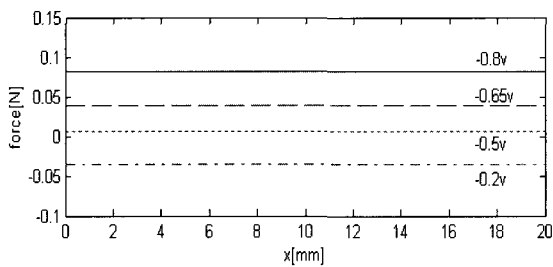


그림 8. 전압에 따른 작동힘.  
Fig. 8. Induced force-length curve for various voltages.

curve-fit기법과의 차이에 의한 결과이다.

2. 전압에 따른 자유변위와 작동힘

전압에 따른 변위와 탄소 나노튜브의 작동힘에 대하여 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 각 결과 값은 -0.2V, -0.5V, -0.65V, -0.8V의 전압을 가함으로써 얻어졌다. 그림 6에서 끝단 최대 변위는 -0.8V에서  $5 \times 10^{-3}m$ 를 얻을 수 있었고, -0.2V에서는 반대 쪽으로 변위가 발생함을 보여 주는데 이는 그림 3의 나노튜브 작동기의 변형을 그래프에서 -0.35V부터 네가티브 변형률이 발생한다는 사실로 그 결과를 유추할 수 있고, 이러한 네가티브 변형률이 발생하는 이유는 탄소 나노 튜브의 작동원리에 있어서 위 아래 두 탄소 나노 층이 한 층이 인장되고 또 다른 한 층이 수축함으로써 굽힘이 발생하는 것이 아니라, 두 층 모두 동시에 인장되면서 음극으로 대전된 층이 양극으로 대전된 층보다 더 많이 인장됨으로써 굽힘이 발생하기 때문인 것으로 생각되어 진다.

그림 8에서는 전압의 변화에 대한 탄소 나노 튜브의 작동힘의 변화를 나타낸다. -0.8V를 가했을 때 0.08N이 발생함을 알 수 있고 -0.2V일때 -0.04N이 발생함을 알 수 있다. 이는 전압에 따른 탄소 나노튜브의 변위의 결과와 서로 상응함을 알 수 있으며, 그 원인도 위에서 설명한 사실에 기인한다고 추측할 수 있다.

3. 전기적-기계적 커플링 계수식

탄소 나노 튜브 작동기 원리로부터 고찰 한 바와 같이 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 트랜스듀스(transducer)이다. 이 단락에서는 탄소나노튜브 변환기의 효율에 관하여 전기적-기계적 커플링 계수를 계산함으로써 알아보고자 한다. 전기적-기계적 커플링 계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k = \sqrt{\frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electrical energy applied}}} \tag{16}$$

여기서 기계적 에너지와 전기적 에너지는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$E_{ME} = \frac{1}{2} \int_V \sigma \epsilon dV, E_{EE} = \frac{1}{2} CV_S^2. \tag{17}$$

여기서 C는 단일벽 탄소나노튜브의 이중층(double layer)에 대한 축전용량,  $10\mu F/cm^2$  을 사용하였고[10],  $V_S$ 는 공급된 전압으로 -0.8V이다. 이들의 값을 전기적-기계적 커플링 계수 (16)에 대입하여 계산하면 0.39를 구할수 있는데 이는 탄소나노 튜브에 공급된 줄(Joule)당 전기적 에너지에 대하여 15%의 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되어 탄소 나노 튜브를 작동시키고 나머지 에너지는 탄소 나노튜브에 전기적 에너지로 남아 있음을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 탄소 나노튜브 작동기의 간략한 역사와 작동원리를 살펴보고 단일벽 나노튜브가 접착층 양면에 부착된 형태의 3층 구조물에 Euler-Bernoulli beam 이론과 에너지 원리를 적용하여 탄소 나노튜브 작동기의 이론적 모델링을 유도 하여, 작동기가 작동했을 때의 변위와 기울기를 예견하며, CNT에 전압을 가했을 때 발생한 변위와 작동기의 힘에 대하여 살펴보았다. 본 논문에서 제시한 변형률 방정식을 이용하여 주어진 전압 구간 내에 대한 일정한 상수값을 사용한 변형률-전압 계수와 각각의 전압값에 따른 변형률을 계산할 수 있는 curve-fit기법과의 차이에 의한 결과를 고찰하였으며, 변형에 의한 기계적 에너지와 공급된 전기적 에너지의 비를 계산한 전기적-기계적 커플링 계수식으로부터 탄소 나노튜브 작동기에 대한 효율도 계산하였다. 본 연구에서 적용한 Euler-Bernoulli beam 이론과 물성치들을 선형탄성으로 가정하고 기하학적 성질들과 작용 힘을 예견하였으나, 나노 영역에서는 이러한 선형 이론을 적용할 경우 그 결과의 정확도가 감소함이 명약하므로 새로운 이론의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

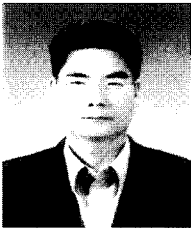
[1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56-58, Nov. 1991.  
 [2] R. Baughman, C. Cui, A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. Barisci, and G. Spinks, "Carbon nanotube actuators," *Science*, vol. 284, pp. 1340-1344, May, 1999.  
 [3] R. Baughman, A. Zakhidov and W. de Heer, "Carbon nanotubes-the route toward applications," *Science*, vol. 297, pp. 787-792, Aug. 2002.  
 [4] H. Monner, S., Mühle and P. Wierach, "Carbon nanotubes as actuators in smart structures," *Proc. of SPIE, Active Materials: Behavior and Mechanics*, vol. 5053, pp. 138-146, 2003.  
 [5] J. Fraysse, A. Minett, O. Jaschinski, G. Duesburg, and S. Roth, "Carbon nanotubes acting like actuators," *Carbon*, vol. 40, pp.

1735-1739, Jan. 2002.

- [6] U. Vohrer, I. Kolaric, M. Haque and S. Roth, "Carbon nanotube sheets for the use as artificial muscles," *Carbon*, vol. 42, pp. 1159-1164, Feb. 2004.
- [7] S. Roth and R. Baughman, "Actuators of individual carbon nanotubes," *Current Applied Physics*, vol. 2, pp. 311-314, May 2002.
- [8] Z. Chaudhry and C. Rogers, "The pin-force model revisited," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 5, pp.

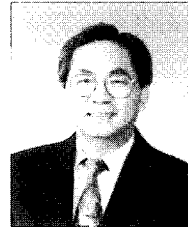
347-354, May 1994.

- [9] Z. Liu and J. Dong, "Correlation between elasticity modulus of metallic films and threshold dose for MeV ion-induced adhesion," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. B44, pp. 445-448, Oct. 1990.
- [10] A. Claye, J. Fischer and A. Metrot, "Kinetics of alkali insertion in single wall carbon nanotubes: an electrochemical impedance spectroscopy study," *Chemical Physics Letters*, vol. 330, pp. 61-67, Aug. 2000.



**박철휴**

1987년 성균관 대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1991년 (미) Catholic Univ. 기계공학과(공학석사). 1996년 동 대학원 기계공학과(공학박사). 1997년~1999년 Virginia Tech. 박사후 연구원. 2002년~현재 포항공과대학교 기계공학과 연구교수. 관심분야는 지능 구조물 제어 및 생체 응용공학.



**염영일**

1968년 Utah주립대 기계공학과 졸업(공학사). 1970년 Wisconsin 대학교 기계공학과(공학석사). 1973년 동 대학원 공학역학(공학석사). 1976년 동 대학원 기계공학과(공학박사). 1978년~1987년 (미) Catholic Univ. 의공학과 주임교수, 1987년~현재 포항공과대학교 교수. 관심분야는 로봇 및 의공학.