

< 논문 >

## 단일벽 탄소나노튜브의 표면 전도도 조절 및 유전영동에 대한 영향

홍승현\* · 정세훈\* · 김영진\* · 최재봉\* · 백승현†  
(2005년 11월 9일 접수, 2006년 1월 10일 심사완료)

### Surface Conductance Modulation of Single-Walled Carbon Nanotubes and Effects on Dielectrophoresis

Seung-hyun Hong, Se-hun Jung, Young-jin Kim,  
Jae-boong Choi and Seunghyun Baik

**Key Words:** Single-Walled Carbon Nanotubes(단일벽 탄소나노튜브), Dielectrophoresis(유전영동), Surface Conductance(표면 전도도), Cationic Surfactant(양극성 계면활성제)

#### Abstract

Dielectrophoresis has received considerable attention for separating nanotubes according to electronic types. Here we examine the effects of surface conductivity of semiconducting single-walled carbon nanotubes (SWNT), induced by ionic surfactants, on the sign of dielectrophoretic force. The crossover frequency of semiconducting SWNT increases rapidly as the conductivity ratio between the particle and medium increases, leading to an incomplete separation of ionic surfactant suspended SWNT at an electric field frequency of 10 MHz. The surface charge of SWNT is neutralized by an equimolar mixture of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS) and cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), resulting in negative dielectrophoresis of semiconducting species at 10 MHz. A comparative Raman spectroscopy study shows a nearly complete separation of metallic SWNT.

#### 1. 서 론

단일벽 탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotubes, SWNT)는 향후 미래의 나노 전자소자 구현을 위한 핵심요소로서 그 가능성이 주목받고 있다.<sup>(1-4)</sup> 하지만 나노튜브 기반의 전자 소자를 구현함에 있어 문제가 되고 있는 것은 나노튜브의 전자 구조에 따라 그 종류를 분리해 낼 수 없다는 점이다.<sup>(5-9)</sup> 지금까지 알려진 조작 기술들은

금속성, 반금속성, 반도체성 나노튜브를 종류별로 분리해내지 못한 채 나노튜브를 계면활성제(surfactants)에 의해 분산된 형태로만 만들 수 있었다.<sup>(9)</sup> 최근에 계면활성제로 탄소나노튜브를 분산시키는 기술에 바탕을 두고 수행된 교류 유전영동(AC dielectrophoresis)법은 위와 같은 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되는 기술이다.<sup>(6-8,10-13)</sup>

용매 내에 분산되어 있는 유전입자(dielectric particle)는 전기장의 작용에 따라 극성을 띠게 된다. 유전 상수(dielectric constant or permittivity), 전기장의 주파수(frequency of electric field), 전도도(conductivity)로 구성된 클라우시우스-모조티 인자(Clausius-Mossotti factor; CM factor)는 입자가 얼마나 효과적으로 분극이 되었는지를 나타낸

\* 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : sbaik@me.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7456 FAX : (031)290-5889

다.<sup>(14)</sup> 금속성 나노튜브는 전기장에 의해 유도된 극성의 정도가 반도체성 나노튜브와는 다르기 때문에 선택적으로 침전될 수 있다. 즉, 금속성 나노튜브의 유전상수는 반도체성 나노튜브의 유전상수 값에 비하여 월등히 큰 값이기 때문에 더욱 효과적으로 분극이 유도될 수 있고, 이로 인한 튜브의 침전(positive dielectrophoresis)은 금속성 나노튜브에 대해 선택성을 가지게 되는 것이다.<sup>(8)</sup> 반면에 반도체성 나노튜브는 부하 전기장의 주파수 혹은 극성을 띄는 계면활성제와의 상호작용에 의해 유도되는 튜브의 표면 전도도(surface conductivity)에 따라 양성 혹은 음성의 유전영동(positive or negative dielectrophoresis)의 영향을 받게 된다.<sup>(6-7)</sup> 한편 금속성 나노튜브라 할지라도 다이조늄(diazonium) 화합물에 의한 나노튜브 기능화를 통해 전도도와 유전상수를 변화시키면 클라우시우스-모조티 인자를 조절하는 것이 가능하다.<sup>(6)</sup>

본 논문에서는 유전영동에 의한 탄소나노튜브의 거동에 영향을 미치는 요소로서 표면 전도도의 영향을 고찰하기 위하여 음이온/양이온 성질의 계면활성제 혼합물을 이용한 유전영동 실험을 수행하였다. 이에 따른 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 분리는 반도체성 나노튜브의 표면전하가 중성화됨에 따른 결과로 설명될 수 있었고, 이 같은 실험결과는 침전된 나노튜브에 대한 라만 스펙트럼(Raman spectrum) 비교 연구를 통해 확인할 수 있었다. 또한 나노튜브의 표면 전도도에 따른 유전영동력(dielectrophoretic force)의 변화에 관한 이론연구도 실험 결과를 뒷받침한다.

## 2. 유전영동에 대한 이론적 고찰

### 2.1 클라우시우스-모조티 인자

유전용매(dielectric medium)내의 유전입자는 부하 전기장 내에서 클라우시우스-모조티 인자의 값에 비례하여 전기장의 세기가 강한 영역으로 향하게 되거나 약한 영역으로 이끄는 힘의 영향을 받게 된다.<sup>(14,15)</sup> 식 (1)은 실린더 형태의 입자에 대해 표현된 식으로 클라우시우스-모조티 인자와 유전율, 전도도, 부하 전기장 주파수의 상관관계를 잘 보여준다.<sup>(14)</sup>

$$f_{CM} = \frac{\overline{\epsilon_p - \epsilon_m}}{3\epsilon_m} \quad (1)$$

$$\overline{\epsilon_p} = \epsilon_p - i \frac{K_p}{\omega} ; \quad \overline{\epsilon_m} = \epsilon_m - i \frac{K_m}{\omega} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전율(혹은 유전상수)이고  $K$ 는 전도도,  $\omega$ 는 부하 전기장의 주파수이다. 하첨자  $m$ 과  $p$ 는 각각 용매와 용매내의 입자를 의미한다. 유전영동 시, 전기장 내에서 발생한 힘은 클라우시우스-모조티 인자의 실수부 값이 양수일 때 입자가 전기장 세기가 강한 곳으로 이동하도록 작용한다. 이와 반대로 관련된 인자의 실수부 값이 음수일 경우에, 입자는 전기장의 세기가 약한 곳으로 이동하게 된다. 한편 클라우시우스-모조티 인자의 실수부 값이 0이 될 때, 유전영동에 의해 발생하는 힘은 존재하지 않으며 이때의 부하 전기장 주파수를 교차 주파수(crossover frequency)라 한다. 유전 입자는 교차 주파수보다 낮은 주파수 영역에서 양성 유전영동의 거동을 보이게 된다. 탄소나노튜브의 유전상수는 나노튜브의 밴드 갭 에너지(band gap energy)의 제곱에 반비례하는 것으로 알려져 있다.<sup>(16)</sup> 금속성 나노튜브의 유전상수 값은 매우 큰 반면에, 반도체성 나노튜브는 5보다 작은 상수 값을 갖는다.<sup>(8,17)</sup>

### 2.2 유전영동의 표면 전도도와와의 관련성

Fig. 1은 부하 전기장의 주파수가 10MHz일 때 변수  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대해 클라우시우스-모조티 인자를 나타낸 것이다.

$$\alpha = \epsilon_p / \epsilon_m ; \quad \beta = K_p / K_m \quad (3)$$

여기서  $\epsilon_m$ 과  $K_m$ 은 1wt%의 SDS/D<sub>2</sub>O 용액에 대해 측정된 값으로 각각 80, 0.0971S/m를 계산에 적용하였다.<sup>(6)</sup> 이를 바탕으로 계산된 결과를 살펴보면  $\alpha$ 의 값이 큰 경우, 즉 금속성 나노튜브인 경우에는 항상 양성 유전영동의 영향 하에 놓이게 됨을 확인할 수 있다. 반면  $\alpha$ 의 값이 0.0625보다 작은 경우, 즉 반도체성 나노튜브의 경우에는  $\beta$ 값에 따라 양성 혹은 음성 유전영동이 될 수 있음을 살펴볼 수 있다. 한편 전해질 내에서 유전입자의 전도도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(14,18)</sup>

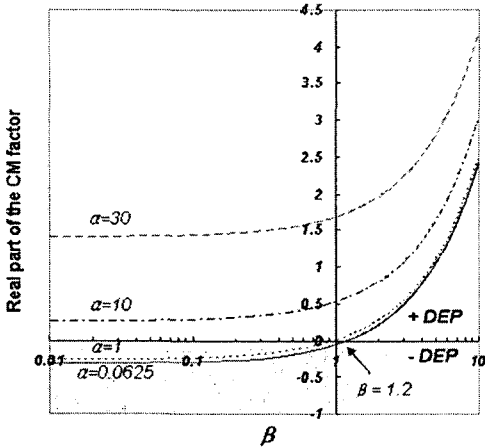


Fig. 1 Theoretical plot showing the variation in the real part of the Clausius-Mossotti factor

$$K_p = K_{int} + \frac{2\lambda}{a} \quad (4)$$

여기서  $K_{int}$ 는 입자 고유 전도도이며  $\lambda$ 는 표면 전도도,  $a$ 는 구형 입자의 반지름을 의미한다. 표면 전도도는 나노튜브 표면에 흡착되어 있는, 전하를 띄고 있는 계면활성제가 표면전하로서 작용함에 따라 발생하며, 이는 나노튜브의 전도도를 본래의 값보다도 수배만큼 크게 할 수 있기 때문에 유전영동 시 나타나는 반도체성 나노튜브의 거동을 변화시킬 수 있다. 계면활성제는 친수성과 소수성의 경계면에 더욱 많이 존재하기 때문에, 극성을 가지는 계면활성제는 나노튜브의 전도도를 주변 용매의 전도도보다 큰 값을 갖게 한다. 이 같은 이유로 나타나게 되는 용매와 탄소나노튜브의 전도도 차이가 유전영동 시 반도체성 나노튜브의 전기영동 방향을 바꾸게 한다. 즉, Fig. 1에서는 각각 다른  $K_p$  값의 경우를 파라미터  $\beta$ 의 변화로 나타낸다. 표면전하의 작용에 의한  $\beta$  값의 변화에 따라 반도체성 나노튜브는  $\beta = 1.2$  값을 기준으로 서로 다른 경향을 보이게 된다. 한편 금속성 나노튜브는 매우 큰 값의 유전상수 값을 가지기 때문에  $\beta$  값의 변화에 관계없이 항상 동일한 방향의 힘의 영향 하에 놓이게 되는 것이다.

### 2.3 표면 전도도와 교차주파수

Fig. 2는  $\alpha$ 의 값이 0.0625인 반도체성 탄소나노튜브에 대해  $\beta$  값에 따른 교차주파수의 변화를

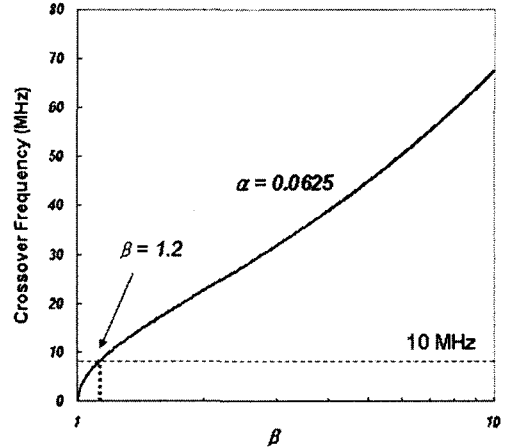


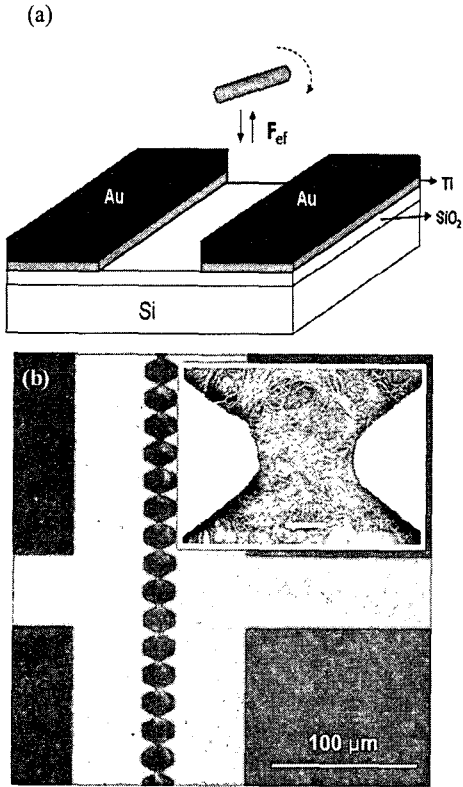
Fig. 2 The variation in crossover frequency of semiconducting SWNT as a function of  $\beta$

나타낸 것이다.  $\beta$  값이 1인 경우 교차주파수는 0 MHz가 되며, 교차주파수는  $\beta$  값이 증가함에 따라 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한  $\beta$  값이 1.2보다 큰 값을 가질 경우 교차주파수는 10 MHz 보다 큰 값을 확인할 수 있다.  $\alpha$ 의 값이 0.0625보다 작은 나노튜브의 경우에서도 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 계면활성제의 작용으로 분산된 탄소나노튜브의  $\beta$  값은 앞서 말한 바와 같이 계면활성제 표면흡착으로 1.2보다 크게 되어 반도체성 나노튜브 또한 10 MHz 주파수에서 양성 유전영동의 특징을 보일 수 있게 되는 것이다. Fig. 1을 통해 확인할 수 있는 또 다른 사실은  $\beta$ 가 1.2보다 큰 값일 때 금속성 나노튜브의 클라우시우스-모조티 인자 값이 반도체성 나노튜브의 값보다 크기 때문에, 유전영동 시 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브가 완전하게 분리되는 것은 아니지만 금속성 나노튜브가 더욱 많이 침전될 것이라 예상할 수 있다.

## 3. 유전영동 실험

### 3.1 실험개요

광리소그래피(photolithography)방법으로 Fig. 3과 같은 패턴을 가진 전극(electrode)을 제작하였다. 전극의 기저(base)사이 거리는  $25 \mu\text{m}$ 이며, 전극 겹의 거리는  $5 \mu\text{m}$ 이다. 그리고 Si-SiO<sub>2</sub>기판위에 5nm, 100nm의 두께로 각각 티타늄(titanium)과 금(gold)이 스퍼터링(sputtering)되었다. 한편 HiPco - 탄소나노튜브를 분산시키기 위해서 음극(anionic)



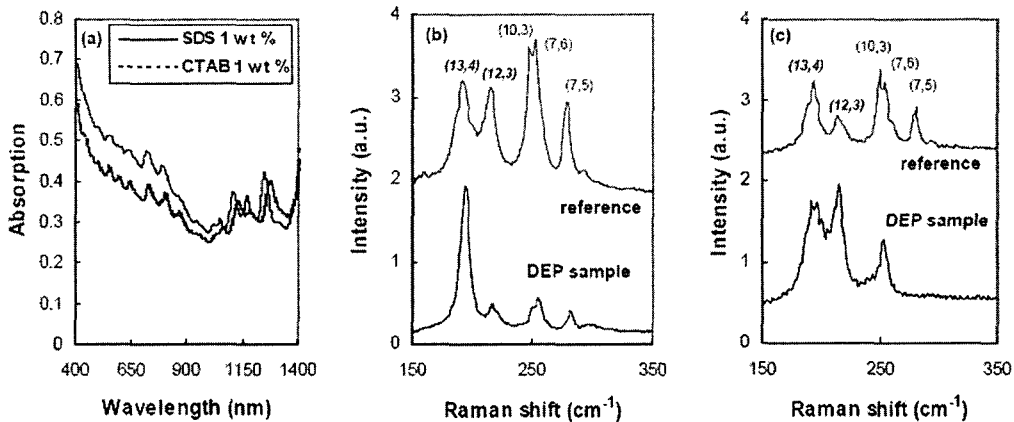
**Fig. 3** (a) Conceptual diagram of the dielectrophoresis process : nanotubes align with the electric field and deposit on the electrode depending on the CM factor (b) Electrode configuration used in this work. The inset shows a matted sheet of nanotubes deposited, by ac dielectrophoresis, at the 5  $\mu\text{m}$  gap

의 성질을 지닌 SDS(sodium dodecyl sulfate), 양성(cationic)을 띠는 CTAB(cetyltrimethylammonium), SDS와 CTAB의 혼합체로서 음극과 양극의 성질을 모두 가지는 양극성(catanionic) 계면활성제가 쓰였으며, 나노튜브 분산을 위한 프로세스는 homogenization, ultrasonication, ultracentrifugation 등의 과정을 사용하는 방법을 따르고 있다.<sup>(12)</sup> Fig. 3(a)는 교류 전기장의 영향을 받아 이동하는 나노튜브를 개념적으로 보여주고 있다. 유전영동을 위한 조건으로 부하 전기장의 주파수는 10MHz이고 peak-to-peak 전압( $V_{p-p}$ )은 10V로 양전극에 이 같은 조건의 교류전류를 가한 후 분산된 HiPco-탄소나노튜브 현탁액(decant) 20  $\mu\text{l}$ 를 전극 사이에 적용시켰다. 이 후 10분간 전기장을

가한 뒤, 전극사이에 남아 있는 현탁액을 질소가스( $\text{N}_2$ )를 분사함으로써 제거하고 그 후에 양전극 사이에 가해졌던 전기장을 제거하였다. 액상(liquid phase)에 존재하게 되는 브라운 운동(Brownian motion)의 영향을 고려하면 유전영동을 통해 나노튜브를 움직이기 위해 필요한 최소 전기장 세기는  $1\text{V}/\mu\text{m}$ 의 수준에서 결정된다.<sup>(7)</sup> 본 실험에서는 전극 갭 사이에  $2\text{V}/\mu\text{m}$ 의 세기로 전기장이 가해지고 있으며, 반면 전극의 기저 사이에는  $0.4\text{V}/\mu\text{m}$ 의 전기장이 작용하고 있다. Fig. 3(b)에 삽입된 그림은 유전영동의 작용으로 전극 사이에 침전된 나노튜브를 나타내고 있다. 이 같이 침전된 나노튜브는 라만 분광기(Raman spectroscopy, inVia Reflex)를 통해 분석되었다. 1800 grooves/mm의 그레이팅(grating)을 가지는 HeNe 레이저가 633nm 여기(excitation)에서 사용되었으며, 레이저의 세기는 20mW이고 레이저 초점의 지름크기는 1~2  $\mu\text{m}$ 이다.

### 3.2 유전영동을 통한 탄소나노튜브의 분리

Fig. 4(a)는 음극(-)의 성질을 가지는 SDS와 양극(+)을 띠는 CTAB에 의해 분산된 탄소나노튜브 현탁액의 흡수 스펙트럼(absorption spectrum)이다. CTAB에 의해 분산된 탄소나노튜브의 흡수 스펙트럼은 SDS에 의해 분산된 탄소나노튜브 현탁액의 스펙트럼과 비교했을 때 스펙트럼의 피크(peak)가 좌우로 확장(broadening)됐음을 볼 수 있으며 동시에 적색편이(red-shifted)가 일어났음을 확인할 수 있다.<sup>(13)</sup> Fig. 4(b)는 SDS에 의해 분산된 탄소나노튜브의 라만 스펙트럼(Raman spectrum)이다. 유전영동에 의해 침전된 탄소나노튜브는 기준샘플에 대해 라만 스펙트럼의 RBM(Radial Breathing Modes)을 통해 비교되었고 그 결과는 계면활성제의 극성과 관계없이 CTAB에 대해서도 거의 동일하였다[Fig. 4(c)]. HipCo 나노튜브는 633 nm의 여기에 대해서 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브가 모두 공진을 일으킨다. 유전영동을 통해 침전된 금속성 나노튜브 신호가 기준 샘플과 비교했을 때 현저한 증가양상을 보인 반면에 반도체성 나노튜브는 기준샘플의 스펙트럼 피크에 비해 큰 폭으로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 실험을 통해 반도체성 나노튜브의 스펙트럼 세기가 금속성 나노튜브에 비해 확연히 약해진 것을 확인할 수 있었지만, 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 완전한 분리는



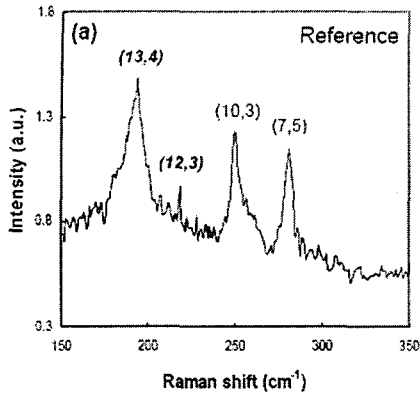
**Fig. 4** (a) Absorption spectra of nanotubes suspended by SDS and CTAB, respectively. (b) Raman spectra of the radial breathing mode regions of SDS-suspended nanotubes. Material dried on a glass slide(reference) and dielectrophoretically deposited sample are shown. (c) Raman spectra of CTAB suspended nanotubes

일어나지 않았다. 이 같은 라만 신호의 변화는 세 가지 원인에 의한 것으로 판단된다. 우선, 반도체성 나노튜브는 10MHz의 부하 전기장 주파수조건에서 계면활성제의 작용에 의한 표면 전도도 영향으로 양성의 유전영동, 즉 나노튜브를 전극으로 향하게 하고 침전시키는 전자기장의 영향 하에 놓이게 되는 것이다. 이러한 이유로 반도체성 나노튜브가 완전하게 분리되지 못하고 일부이지만 전극 사이에 침전되는 것이다. 한편 앞서 언급했던 것처럼 금속성 나노튜브는 표면 전도도의 영향과 상관없이 반도체 나노튜브보다 더 강한 양성 유전영동의 거동을 보인다. 다음으로 샘플 형태(morphology)의 상이함이 Fig. 4(b)와 같은 스펙트럼의 변화를 이끌어 낼 수도 있다. 이는 참고문헌 6과 23을 통해 체계적으로 설명되었다. 따라서 전기적인 특성에 따른 실제 나노튜브의 분리는 sample morphology 변화에 따라 과소 혹은 과대평가될 수 있으므로 라만 신호 해석에 세심한 주의를 기울여야 한다. 마지막으로 탄소나노튜브 현탁액을 만드는 과정 중에 발생할 수 있는 소수의 나노튜브의 다발이 나노튜브의 종류별 분리를 어렵게 만들 수 있다는 것이다. 이는 이미 연구된 바 있으며,<sup>(8,13)</sup> 그 결과에 따르면 매우 적은 양일지라도 금속성 나노튜브가 반도체성 나노튜브 다발 속에 존재하게 되면 다발은 매우 큰 유전상수 값을 갖게 되어 전극으로 이끌리게 되는 것이다.<sup>(8)</sup>

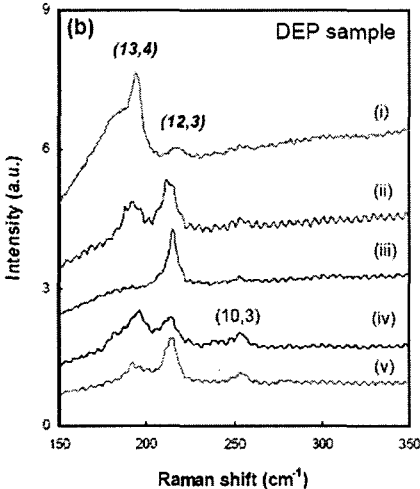
### 3.3 유전영동에 미치는 표면 전도도의 영향

유전영동에 미치는 표면 전도도의 영향을 살펴보기 위해 CTAB에 의해 분산된 탄소나노튜브 현탁액에 SDS용액을 첨가하였다. 이를 통해 형성되는 양극성(cationic)계면활성제는 음이온(anion)과 양이온(cation)을 모두 가지는 양친성(amphiphilic) 화합물로 zwitterionic pseudo double-chain의 성질을 가진다.<sup>(19-22)</sup> 반대극성의 물질을 첨가함으로써 이로 인한 화합물 분자간의 정전기적 반발력 감소는 친소수성 환경에서 분자응집을 강화시킨다. 또한 양극성 계면활성제를 사용하였을 때 탄소나노튜브간의 응집이 관찰되지는 않았다. 또한 두 물질간의 혼합반응으로 800nm 크기 수준의 crystallite를 일부 포함해 많은 양의 600nm크기의 vesicle이 동시다발적으로 형성되고, 이로 인해 용액은 혼탁해진다. 한편 혼합 물농도가 1:1에서 벗어나게 되면 혼합으로 인해 생겨나는 crystallite나 vesicle의 크기는 작아지게 된다.<sup>(20)</sup> 농도가 조절된 세 종류의 SDS용액이 27.4mM(1wt%)의 CTAB현탁액과 혼합되었으며, 그 혼합비율은 각각 1:1, 1:2, 6:1 (SDS:CTAB)이다. CTAB의 비율이 높은 경우에는 혼합액 내의 입자는 양성(+)을 갖게 되고, SDS의 비율이 높은 경우에는 음성(-)을 띄게 된다. 그 혼합비율이 동일한 경우에는 전하 전도도가 0에 가까워진다.

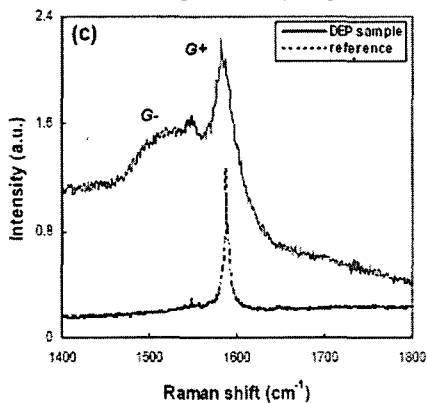
Fig. 5는 동일한 비율(1:1)로 섞인 SDS-CTAB 혼합액에 분산돼 있는 탄소나노튜브에 대한 라만



(a) RBM of material dried on a glass slide



(b) RBM of dielectrophoretically deposited materials



(c) G-mode region

**Fig. 5** Raman spectra, at 633nm excitation, SWNT suspended using an equimolar mixture of SDS and CTAB

서 건조된 기준 샘플에 대한 RBM 스펙트럼을 나타내고 있다. 금속성 나노튜브에 대한 Chirality는 **bold italic**체로 나타내었다. Fig. 5(b)는 유전영동으로 전극사이에 침전된 나노튜브에 대한 라만 스펙트럼을 보여주고 있다. (i)~(iii)의 그래프를 통해 반도체성 나노튜브와 관련된 피크가 완전히 사라진 것을 확인 할 수 있었다. 즉, 유전영동을 통해 금속성 나노튜브만이 전극사이에 침전된 것이다. 라만 스펙트럼의 상대적 세기가 탄소나노튜브의 응집상태에 따라 달라질 수 있기 때문에 신호 분석에 있어 논란의 여지가 있지만<sup>(6,23)</sup> 그럼에도 유전영동을 통해 침전된 나노튜브[Fig. 4(b) 및 Fig. 4(c)]에 대한 라만 스펙트럼을 비교한 결과는 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브가 분리되었음을 분명히 말해주고 있다. 한편 그래프 (iv)와 (v)에서 볼 수 있듯이 일부 전극 갭에서는 Chirality가 (10,3)인 반도체성 나노튜브 피크가 약하게 남아있는 것을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브를 모두 포함하는 나노튜브 다발이 존재함을 들 수 있다. 나노튜브의 종류별 분류의 또 다른 증거로 라만 스펙트럼의 G모드를 제시할 수 있다. 유전영동으로 침전된 나노튜브의 G모드 라만 스펙트럼은 기준 샘플과 비교했을 때 폭이 넓은 G<sup>-</sup> 모드신호와 상대적으로 작은 G<sup>+</sup>모드의 신호를 보이고 있다. 일반적으로 반도체성 나노튜브의 G모드 스펙트럼은 G<sup>-</sup>와 G<sup>+</sup>의 구별 없이 모두 Lorentzian lineshape의 형태를 가지며, G<sup>+</sup>모드 신호의 강도가 G<sup>-</sup>모드에 비해 매우 크게 나타난다.<sup>(8,24)</sup> 반면 금속성 나노튜브의 경우, G<sup>-</sup>모드 스펙트럼은 비대칭적인 Breit-Wigner-Fano(BWF) lineshape을 띄며, G모드를 나타내는 두 모드의 세기는 비슷해진다. 이와 같은 특징 때문에 G 모드 스펙트럼의 비교를 통해 금속성 나노튜브의 분리여부를 다시 한번 알아낼 수 있는 것이다. 위 실험의 결과에서 나타나는 반도체성 나노튜브의 음성(-) 유전영동은 양극성 계면활성제에 의해 나노튜브의 표면 전도도가 주변 용매와 전도도가 같아지는 중성화의 과정으로 인해 발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 1과 2에서 볼 수 있듯이,  $\beta$ 값이 1일 때 반도체성 나노튜브( $\alpha = 0.0625$ )의 클라우시우스-모조티 인자 실수부가 음수이고, 위 실험 조건의 교차주파수가 10MHz보다 작다는 사실을 통해 설명이 가능하다.

측정결과이다. Fig. 5(a)는 슬라이드 글래스 위에

#### 4. 결론

본 논문에서는 전하를 띄는 계면활성제에 의해 분산된 반도체성 나노튜브의 표면 전도도가 유전영동에 미치는 영향을 이론적 증명과 실험적 검증을 통해 알아보았다. 탄소나노튜브의 표면 유도 전하는 음(-)전하를 띄는 SDS와 양(+전하)의 성질을 가지는 CTAB의 1:1 혼합을 통해 중성화될 수 있으며, 이는 반도체성 나노튜브를 10MHz의 부하 전기장 내에서 음성 유전영동의 영향 하에 놓이게 하는 원인이 된다. 유전영동으로 전극 사이에 침전된 나노튜브에 대해 측정된 라만 스펙트럼은 반도체성 나노튜브와 금속성 나노튜브가 분리됨을 보여주고 있다. 향후 연구과제로서 반도체성 나노튜브의 전도도를 용액의 전도도에 대하여 더욱 낮게 조절한다면 나노튜브의 전기적 특성에 따른 분리는 보다 효과적으로 수행될 것이다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학기술단 산하 성균관대학교 산업설비 안정성 평가 연구센터와 과학기술부 주관 하의 21세기 프론티어 연구개발 산업의 일환인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(05K1401-00410)으로 이루어진 것이며, 본 연구에서 사용된 라만 분광기(Raman spectroscopy)의 사용을 허락해 주신 성균관대학교 CNC 이영희 교수님께 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

- (1) McEuen, P., 2000, "Single-Wall Carbon Nanotubes," *Phys. World*, Vol. 13(6), pp. 31~36.
- (2) Avouris, Ph., 2002, "Molecular Electronics with Carbon Nanotubes," *Acc. Chem. Res.*, Vol. 35, pp. 1026~1034.
- (3) Yao, Z., Kane, C. L. and Dekker, C., 2000, "High-Field Electrical Transport in Single-Wall Carbon Nanotubes," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, pp. 2941~2944.
- (4) Tans, S. J., Verschueren, A. R. M. and Dekker, C., 1998, "Room-Temperature Transistor Based on Single Carbon Nanotubes," *Nature*, Vol. 393, pp. 49~52.
- (5) Strano, M. S., Dyke, C. A., Usrey, M. L., Barone, P. W., Allen, M. J., Shan, H., Kittrell, C., Hauge R. H., Tour, J. M. and Smalley, R. E., 2003, "Electronic Structure Control of Single-Walled Carbon Nanotube Functionalization," *Science*, Vol. 301, pp. 1519~1522.
- (6) Baik, S., Usrey, M., Rotkina, L. and Strano, M. S., 2004, "Using the Selective Functionalization of Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes to Control Dielectrophoretic Mobility," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 108, pp. 15560~15564.
- (7) Krupke, R., Hennrich, F., Kappes, M. and Lohneysen, H., 2004, "Surface Conductance Induced Dielectrophoresis of Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes," *Nano Lett.*, Vol. 4(8), pp. 1395~1399.
- (8) Krupke, R., Hennrich, F., Lohneysen H. and Kappes M., 2003, "Separation of Metallic from Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 301, pp. 344~347.
- (9) Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. and Avouris, Ph., 2001, "Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications," Springer -Verlag: New York.
- (10) Lee, S. W., Lee, D. S., Yu, H. Y., Campbell, E. E. B. and Park, Y. W., 2004, "Production of Individual Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes Using the AC Electrophoresis Technique," *Appl. Phys. A*, Vol. 78, pp. 283~286.
- (11) Nagahara, L., Amlani, I., Lewenstein, J. and Tsui, R., 2002, "Directed Placement of Suspended Carbon Nanotubes for Nanometer-Scale Assembly," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, pp. 3826~3828.
- (12) O'Connell, M. J., Bachilo, S., Huffman, C., Moore, V. C., Strano, M., Haroz, E., Rialon, K., Boul, B., Noon, W., Kitrell, C., Ma, J., Hauge, R. H. Weisman, R. and Smalley, R. E., 2002, "Band Gap Fluorescence from Individual Single-Walled Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 297, pp. 593~596.
- (13) Moore, V. C., Strano, M. S., Haroz, Erik H., Hauge, R. H. and Smalley, R. E., 2003, "Individually Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes in Various Surfactants," *Nano Lett.*, Vol. 3(10), pp. 1379~1382.

- (14) Morgan, H., Green, N. G., 2003, AC Electrokinetics: Colloids and Nanoparticles, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England.
- (15) Jones, T. B., 1995, Electromechanisms of Particles, Cambridge University Press: Cambridge.
- (16) Benedict, L. X., Louie, S. G. and Cohen, M. L., 1995, "Static Polarizability of Single-Wall Carbon Nanotubes," *Phys. Rev. B*, Vol. 52, pp. 8541~8549.
- (17) Pichler, T., Knupfer, M., Golden, M. S. and Fink J., 1998, "Localized and Delocalized Electronic States in Single-Wall Carbon Nanotubes," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, pp. 4729~4732.
- (18) O'Lonski, C. T., 1960, "Electronic Properties of Macromolecules. v. Theory of Ionic Polarization in Polyelectrolytes," *J. Phys. Chem.*, Vol. 64, pp. 605~619.
- (19) Wang, C. and Lucy, C., 2004, "Mixed Cationic/Anionic Surfactants for Semipermanent Wall Coatings in Capillary Electrophoresis," *Electrophoresis*, Vol. 25, pp. 825~832.
- (20) Tamašić, V., Štefanić, I. and Filipović -Vinceković, N., 1999, "Adsorption, Association and Precipitation in Hexadecyltrimethylammonium Bromide/Sodium Dodecyl Sulfate Mixtures," *Colloid Polym. Sci.*, Vol. 277, pp. 153~163.
- (21) Tondre, C. and Caillet, C., 2001, "Properties of the Amphiphilic Films in Mixed Cationic/Anionic Vesicles: a Comprehensive View from a Literature Analysis," *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 93, pp. 115~134.
- (22) Marques, E. F., Regev, O., Khan, A. and Lindman, B., 2003, "Self-Organization of Double-Chained and Pseudo Double-Chained Surfactants: Counterion and Geometry Effects," *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 100, pp. 83~104.
- (23) Heller, D., Barone, P. W., Swanson, J. P., Mayrhofer, R. M. and Strano, M. S., 2004, "Using Raman Spectroscopy to Elucidate the Aggregation State of Single-Walled Carbon Nanotubes," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 108, pp. 6905~6909.
- (24) Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Jorio, A., Filho, A. G. S. and Saito, R., 2002, "Raman Spectroscopy on Isolated Single Wall Carbon Nanotubes," *Carbon*, Vol. 40, pp. 2043~2061.