

< 논문 >

단일벽 탄소나노튜브의 분산도 정량적 평가

윤도경* · 최재봉** · 김영진* · 백승현†
(2006년 10월 14일 접수, 2007년 3월 2일 심사완료)

The Quantitative Characterization of the Dispersion State of Single-Walled Carbon Nanotubes

Dokyung Yoon, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim and Seunghyun Baik

Key Words: Dispersion(분산), Single-Walled Carbon Nanotube(단일벽 탄소나노튜브), Fluorescence(형광), Raman Spectroscopy(라만 분광법), Absorption Spectroscopy(흡광 분광법)

Abstract

We have investigated quantitative measurement techniques of the degree of dispersion of single-walled carbon nanotubes (SWNTs). SWNTs were suspended in aqueous media using a sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant. SWNTs with different dispersion states were prepared by controlling the intensity and time of sonication and centrifugation. The laser spectroscopic techniques were employed to characterize the dispersion state; i.e., raman fluorescence and absorption spectroscopic techniques. Raman spectroscopy has been used to probe the dispersion and aggregation state of SWNTs in solution. Individually suspended SWNTs show increased fluorescence peaks and decreased roping peaks at a raman shift 267 cm^{-1} compared with the samples containing bundles of SWNTs. The ultraviolet-visible-near infrared (UV-vis-NIR) absorption spectrum of decanted supernatant samples show sharp van Hove singularity peaks

1. 서론

탄소나노튜브는 1991년 Iijima⁽¹⁾에 의해 발견된 이래 우수한 기계적, 전기적 및 광학적 특성으로 나노복합체, 나노전자소재 등 극 미세 응용영역에서 많은 각광을 받게 되었다.^(2,3) 그러나 이러한 탄소 나노튜브의 우수한 물성과 응용가능성에도 불구하고 아직은 상용화 되지 않고 있다. 장애요인들을 나열하면 탄소나노튜브 지름의 다양함, chirality 특성에 따른 금속성 나노튜브와 반도체

성 나노튜브 분리의 어려움 그리고 응집 (aggregation) 현상으로 인해 탄소나노튜브 하나하나를 제어하기가 힘들다는 점들을 들 수 있다. 특히 탄소나노튜브는 접촉면의 1 마이크로미터 (μm) 당 500eV의 반 데르 발스(van der Waals) 결합 에너지에 의하여 쉽게 다발(bundle)과 로프(ropes)를 형성하며^(4,5) 나노튜브 표면의 소수성(hydrophobic)에 의해 친수성(hydrophilic) 용액에서 쉽게 엉킴 현상을 보인다. 이런 탄소 나노튜브의 응집 현상을 해결하기 위해 dimethylformamide,⁽⁶⁾ 계면활성제,⁽⁷⁾ 복합 고분자⁽⁸⁾ 및 DNA⁽⁹⁾ 등을 이용한 분산법들이 연구되어왔지만 분산 방법과 나노튜브 제작 방법에 따라 각각 다른 탄소나노튜브 분산 정도를 보인다. 또한 세포의 endocytosis 기능을 응용한 바이오 실험에서 탄소나노튜브의 분산된 정도에 따라 나노튜브의 세포내로 uptaking 되는 정도가 달라진다는 보고가 있다.⁽¹⁰⁾ 그러므

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부, 나노과학기술학부

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

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

* 성균관대학교 나노과학기술학부

** 성균관대학교 기계공학부

로 탄소나노튜브의 용용을 위해서는 나노튜브의 분산도 정량적인 평가가 중요하다.

본 논문에서는 1wt% sodium dodecyl sulfate (SDS) 용액상에서 HiPco 방법으로 제작된 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled carbon nanotube: SWNT)를 다양한 조건에서의 초음파처리 및 원심 분리 과정을 거쳐 나노튜브의 분산 정도가 각기 다른 샘플을 제작하였다. 제작된 샘플에 대한 라만 스펙트럼(raman spectrum)과 형광 스펙트럼(fluorescence spectrum) 그리고 흡광 스펙트럼(absorption spectrum) 결과를 이용하여 용액상에서의 탄소나노튜브 분산 정도를 정량적으로 평가하는 방법을 개발하였다.

2. 샘플 제작

2.1 계면활성제 SDS를 이용한 SWNT 분산

HiPco (High-pressure CO reactor) 방법에 의해 제작된 분말상태의 단일벽 탄소나노튜브는 지름 0.7~1.1 nm, 길이 1 μ m 정도로 구성되어있다. 탄소나노튜브를 1wt% SDS H₂O 용액에 넣은 다음 초음파처리와 원심분리의 과정을 거쳐, 음극(anionic)의 성질을 지닌 SDS는 소수성질을 지닌 탄소나노튜브 표면에 효과적으로 코팅된다. 즉 SDS가 나노튜브의 표면에 흡착하여 안정된 콜로이드 분산용액을 형성할 수 있으며 동시에 coupling agent 역할을 하기 때문에 용액상에서 탄소나노튜브가 분산될 수 있다.⁽¹¹⁻¹³⁾

2.2 분산정도별 샘플 제작

Fig. 1은 용액상에서 탄소나노튜브의 분산정도가 각각 다른 현탁액 샘플을 제작하는 과정을 보여준다. 약한 초음파처리(4W)를 거친 샘플에 대하여 170,000g의 원심분리를 거치면 동일시간 동안 강한 초음파처리(540W)를 거친 샘플에 비하여 상층액상에 개별적으로 분산된 탄소나노튜브의 양이 적다는 결과로부터 강한 초음파처리가 보다 효과적인 나노튜브분산에 효과적임을 알 수 있다. 그러나 강한 초음파처리(540W)를 15분 이상 실시하면 분산의 효과보다는 나노튜브의 잘려짐 현상 때문에 오히려 형광신호가 줄어든다(본 논문에는 표기하지 않았음). 그러므로 본 실험에서는 540W 초음파처리를 15분까지 실시하였다.

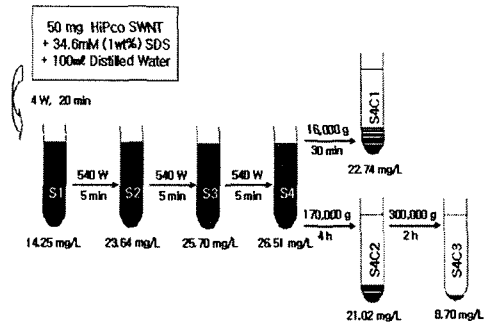


Fig. 1 Schematic diagram of the preparation of suspended SWNTs with different dispersion states in 1wt% SDS solution. In the names of samples, "S" and "C" stand for "sonication" and "centrifugation", respectively. The concentration of SWNTs in solution at each step is given

Table 1 Summary of sample preparation

Sample	Dispersion		Concentration (mg/ℓ)
	Procedure	Condition	
S1	Sonication	4W, 20min	14.25
S2		540W, 5min	23.64
S3		540W, 5min	25.70
S4		540W, 5min	26.51
S4C1	Centrifugation	16,000g, 30min	22.74
S4C2		170,000g, 4hr	21.02
S4C3		300,000g, 2hr	8.70

이러한 실험 결과로부터 초음파처리와 강도와 시간에 따라 다른 분산도를 가진 샘플은 다음의 순서로 제작되었다. 단일벽 탄소나노튜브 분말 50 mg를 1wt% SDS가 용해되어 있는 100ml H₂O 용액에 넣고, 4W(Watt)의 파워로 20분간 초음파처리를 한 후, 다시 540W로 5분간 3회의 초음파처리를 한다. 이 때 각 단계마다 초음파처리가 끝난 후 분산도 측정을 위한 샘플(S1~S4)을 추출한다. 초음파처리를 거친 샘플 S4에 대하여 각각 16,000g와 170,000g의 원심분리를 하였다. S4C1 샘플은 16,000g 원심분리를 통하여 샘플 S4 내에 존재하는 비중이 큰 bundle형태의 나노튜브를 제거되었으며, S4C2는 O'Connell⁽¹⁵⁾ 등이 보고한 바와 같이 비중이 1.1 g·cm⁻³인 D₂O 용액상에서 나노튜브가 SDS에 의해 개별적으로 분산되었을 시

비중이 $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 7개의 rope 형태로 응집된 나노튜브가 SDS 코팅에 의하여 분산되었을 시 비중이 $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 가 된다. 그러므로 122,000g 이상의 원심분리 조건에서는 rope 형태의 나노튜브 다발들은 침전되며, 상층액상에서 개별적으로 분산된 나노튜브를 얻을 수 있다. 이런 결과를 바탕으로 비중이 D_2O 보다 적은 증류수 상에서 개별적으로 분산된 나노튜브를 얻기 위하여 170,000g 조건에서 원심분리를 4시간 수행되었다. S4C3 샘플은 S4C2 샘플을 다시 300,000g 원심분리를 2시간 동안 추가 수행하여 얻은 것으로 개별적 분산 조건인 170,000g 보다 강한 원심분리의 영향을 평가하기 위한 것이다. 샘플 준비 각 단계별 원심분리 시간은 원심분리 가속도에 따라 나노튜브의 침전이 충분히 이뤄졌을 때를 기준으로 결정되었다. 각 단계에서 보다 오랜 시간의 원심분리를 거처도 동일한 라만과 형광 및 흡광 스펙트럼 결과를 보여준다.

Table 1은 샘플 제작 각 단계별 초음파 처리 및 원심분리 조건과 제작된 샘플에서의 탄소나노튜브의 농도를 보여준다. 각 농도는 흡광 스펙트럼의 632nm 파장에서의 absorbance 값을 실험값인 0.036으로 나눈 값으로부터 얻어졌다. 샘플 S1~S4는 초음파처리 세기와 시간에 따른, 샘플 S4C1~S4C3는 원심분리의 강도와 시간에 따른 탄소나노튜브의 분산도 평가를 위한 분산용액으로 제작되었다.

3. 분산도 평가 실험

3.1 라만 스펙트럼을 이용한 분산도 평가

Fig. 2(a)는 HiPco 방법에 의해 제작된 단일벽 탄소나노튜브 분말에 대한 라만 스펙트럼과 Fig. 2(b)는 나노튜브를 1wt% SDS/ H_2O 용액상에서 540W 의 파워로 15분간 초음파처리된 후, 170,000g 원심분리를 통하여 개별적으로 분산되었을 시 나타나는 전형적인 라만 스펙트럼을 보여준다. 측정은 Kaiser Optics사에서 제작된 Holographic Raman System을 이용하여 수행되었고, 레이저 파장은 785nm 이다. Raman shift 150 ~ 350 cm^{-1} 에서 발생하는 Radial Breathing Mode (RBM)를 사용하면 나노튜브들의 지름을 측정할

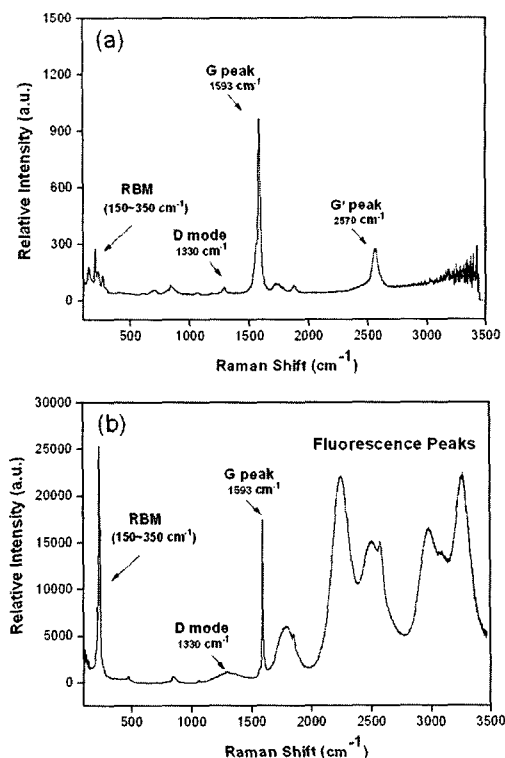


Fig. 2 Raman and near-infrared fluorescence signals of (a) raw HiPco SWNTs and (b) SWNTs dispersed using SDS in solution. The excitation wavelength of the laser was 785nm

수 있다. 지름은 아래와 같은 식으로 계산된다.⁽³⁾

$$\omega_{RBM} = \frac{a}{d_{SWNT}} + b \quad (1)$$

여기서 ω_{RBM} 은 RBM 신호의 주파수(cm^{-1})이며, d_{SWNT} 는 나노튜브의 지름(nm) 이다. $a = 223.5 \text{ nm}\cdot\text{cm}^{-1}$ 와 $b = 12.5 \text{ cm}^{-1}$ 는 실험적으로 결정된 상수이다. 약 1593 cm^{-1} 에서 나타나는 G peak는 sp^2 결합의 탄소원자들의 진동으로 생기는 탄소 나노튜브 및 그래파이트(graphite) 고유의 특성이 다. 탄소나노튜브는 큰 라만 단면적을 가지고 있으므로, G peak 신호를 이용하면 나노튜브의 존재유무를 미세하게 측정할 수 있다. 약 2570 cm^{-1} 에서 나타나는 약 1330 cm^{-1} 에서 나타나는 D 모드(disorder mode)는 탄소나노튜브와 흡착된 분자가 공유결합을 하여 그래파이트 구조의 sp^2 결합

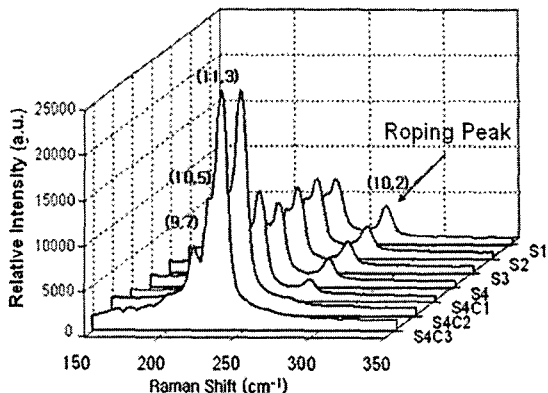
이 sp^3 결합으로 바뀔에 따라 야기되는 특성으로 탄소나노튜브의 구조적 변형여부를 판단할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 본 실험에서 사용한 초음파 처리과정은 강도의 크기에 따라 나노튜브 벽에 손상을 줄 수 있으며 D 모드에 의해 파괴 정도를 알 수 있다. 또한 SDS에 의한 탄소나노튜브 분산 전·후의 D 모드 피크가 변화되지 않음으로 SDS에 의한 나노튜브의 계면특성이 변화되지 않았음을 알 수 있다. Fig 2(b)에서 라만 주파수 후반부에 관측되는 광대역 형광신호들은 반도체성 단일벽 탄소나노튜브의 밴드갭에 의해 야기되는 것으로 반도체성 나노튜브가 SDS에 의해 개별적으로 분산되었을 때만 발생한다. 따라서 나노튜브 분산의 정도를 정량적으로 측정하는데 사용될 수 있다.⁽¹⁵⁾

3.1.1 RBM 모드를 이용한 분산도 평가

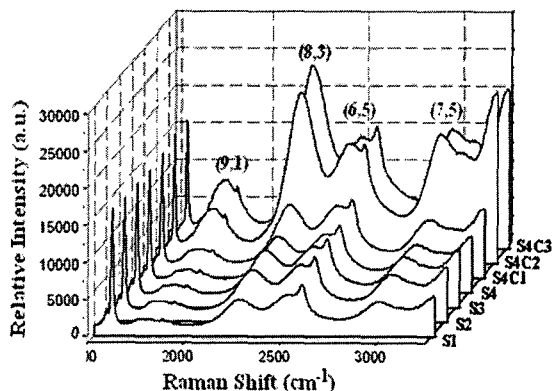
Daniel A. Heller 등은 단일벽 탄소나노튜브의 응 집(aggregation) 정도에 따른 RBM mode에서의 라만 피크의 변화를 관찰하였다.⁽¹⁶⁾ 탄소나노튜브가 로프 형태로 응집된 정도가 높을수록 267 cm^{-1} 영역에서 피크의 증가와 234 cm^{-1} 에서 피크 감소에 대해 보고하였다.⁽¹⁶⁾ Fig. 3(a)는 G 피크 값에 대해 표준화(normalize)한 라만 RBM 모드이다. Daniel A. Heller 등이 보고한 것과 같이 탄소나노튜브가 용액상에서 분산이 잘 될수록 267 cm^{-1} 에서의 roping 피크의 점진적인 감소와 234 cm^{-1} 에서의 피크가 증가함을 알 수 있다. Fig. 4에서 왼쪽 Y축 값은 RBM 영역에서의 roping 피크 영역과 G 피크 영역의 크기를 대비한 값(roping peak/G peak)으로 변환한 것이다. 이는 나노튜브의 분산이 잘 될수록 roping 피크가 전 구간 (S1~S4C3)에 걸쳐 점진적으로 감소함을 보여 준다. 즉 G 피크 대비 roping 피크의 값으로부터 용액상에서의 탄소나노튜브 응집 정도를 민감하게 평가할 수 있다.

3.1.2 형광신호 피크를 이용한 분산도 평가

라만 스펙트럼 후반부에 나타나는 광대역 형광 신호들은 반도체성 단일벽 탄소나노튜브의 밴



(a) G-peak normalized RBM of samples



(b) G-peak normalized fluorescence of samples

Fig. 3 RBM (a) and fluorescence peaks (b), at 785nm excitation, of SWNT with different dispersion states in 1wt% SDS/H2O

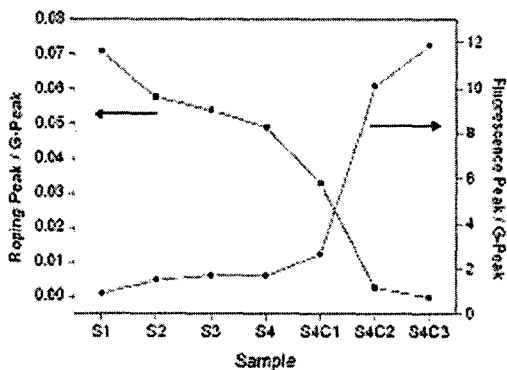


Fig. 4 Modulation of roping and fluorescence peaks with G-peak

드갭에 의해 야기되는 것으로 나노튜브가 다발이나 로프형태로 응집되어 있을 시 형광신호가 나타나지 않는다.⁽¹⁵⁾ Fig. 3(b)는 분산도에 따른 G 피크 값에 대해 표준화한 형광피크(fluorescence peak)의 변화를 보여준다. 단일벽 탄소나노튜브의 분산도가 증가할수록 형광피크가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4서 오른쪽 Y축 값은 형광신호 피크 영역과 G 피크 영역의 크기를 대비한 값 (Fluorescence peak/G peak)으로 변환한 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 초음파처리에 의해서만 분산된 나노튜브 현탁액 샘플(S1~4)에서는 형광신호 변화가 거의 없다. 원심분리를 통하여 나노튜브 다발과 로프를 침전시킨 후, 상층액을 추출한 샘플에서는 원심분리 속도에 따라 형광신호가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 같은 현상은 다발이나 로프 형태로 응집되어 있는 나노튜브 덩어리의 비중이 1 보다 커서 시험관 밑으로 가라앉게 되고, 개별적으로 분산된 나노튜브만이 상층액상에 존재하기 때문이다.⁽¹⁵⁾ 따라서 라만 스펙트럼에서 나타나는 형광신호들을 통해서 탄소나노튜브가 개별적으로 얼마나 분산되었는지 여부를 판단할 수 있다. 즉, 분산용액 속에 다발이나 로프 형태의 나노튜브 덩어리들이 다량 존재했을 시, 형광신호를 통하여 탄소나노튜브의 분산 정도를 파악하기가 어렵다는 것을 보여준다.

3.2 흡광 스펙트럼을 이용한 분산도 평가

흡광 스펙트럼을 이용하면 현탁액 상에서의 탄소나노튜브의 농도와 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 분포⁽¹⁷⁾ 및 개별화 상태를 확인할 수 있다.^(15,18) Fig. 5는 초음파처리 및 원심분리 조건에 따른 탄소나노튜브 현탁액의 흡광 스펙트럼을 보여준다. 초음파처리 시간이 길어짐에 따라 다발이어나 로프 형태로 덩어리진 탄소나노튜브에서 점차적으로 개별화된 나노튜브로 1wt% SDS/H₂O 용액상에 분산된다. 그 결과 개별적인 분산이 되지 않았지만, 상대적으로 비중이 작은 로프 형태의 나노튜브들은 상층액에 떠있게 된다 [Fig. 5(a)]. 하지만 170,000g 이상의 원심분리를

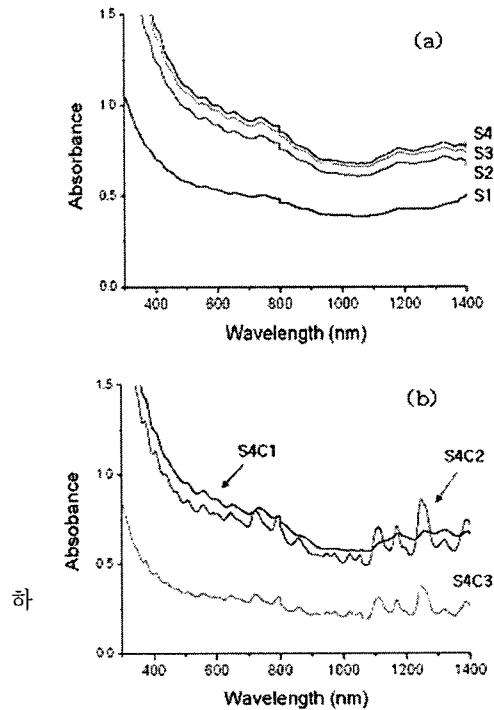


Fig. 5 Absorption spectra of supernatant SWNTs with different dispersion states depends on sonication (a) and centrifugation (b) conditions

면 개별화된 나노튜브를 제외한 나머지 나노튜브 로프나 다발들은 가라앉게 되고 상층액의 농도는 다시 감소하게 된다[Fig. 5(b)]. 또한 170,000g 이상의 가속도에서 원심분리를 거친 샘플 S4C2와 S4C3는 다른 샘플에서의 흡광 스펙트럼보다 매우 뾰족한 형태를 보여준다. 이러한 결과는 170,000g 이상의 원심분리를 통하여 bundle 이나 rope 형태로 응집된 탄소나노튜브가 걸러졌다는 것을 보여준다. 개별화된 탄소나노튜브는 금속성 나노튜브 (M₁₁: 400 ~ 600nm)와 반도체성 나노튜브 (S₁₁: 800 ~ 1600nm, S₂₂: 550 ~ 900nm)의 특성에 따라 각각 흡광 스펙트럼의 파장영역에서 뾰족한 interband transition 보인다.⁽¹⁵⁾ 반면, 반 데르 발스 힘에 의해 다발이나 로프 형태로 뭉쳐진 탄소나노튜브는 상대적으로 작은 밴드갭(band gap)을 가진 인접해 있는 나노튜브로의 에너지 전이 (energy transfer)가 일어나 개별화된 나노튜브에 비하여 흡광 스펙트럼 피크의 넓어짐 현상

(broadening)이 나타난다.⁽¹⁹⁾ 따라서 Fig 5(b)에서의 샘플 S4C2와 S4C3에 대한 흡광 스펙트럼으로부터 탄소나노튜브가 개별적 분산됨을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 5(a)에서와 같이 원심분리를 거치지 않은 샘플들의 흡광 스펙트럼으로부터 나노튜브의 분산정도를 평가하기가 힘들다. 즉, 흡광 스펙트럼은 탄소나노튜브의 분산이 아주 잘 수행되었을 때만 각 나노튜브 band gap에 해당하는 각각의 peak 등을 발생시키게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 초음파처리 및 원심분리 조건에 따라 계면활성제에 의해 분산된 탄소나노튜브 용액의 분산도를 라만 스펙트럼, 형광 스펙트럼, 그리고 흡광 스펙트럼을 이용하여 평가하였다. 그 결과 라만 스펙트럼의 roping 피크는 전체 샘플(S1~S4C3) 각각에 포함된 나노튜브 다발과 로프의 분포에 민감하게 반응함으로써 현탁액 상에 존재하는 탄소나노튜브의 분산도를 분산 전 과정에 걸쳐 평가할 수 있다. 형광신호 피크는 원심분리를 거치지 않은 샘플들(S1~S4)간의 상대적인 분산도를 평가하기 어려우나, 원심분리를 거친 샘플(S4C1~S4C3)에 민감하게 반응함으로써 개별화된 탄소나노튜브의 분포 정도를 평가할 수 있다. 흡광 스펙트럼을 통한 탄소나노튜브가 잘 분산되어 있는 구간에서 민감하게 측정할 수 있다. 각각의 구간에 따라 민감한 측정방법이 있지만, 전 구간에서는 267cm^{-1} 에서 발생하는 라만 roping peak가 분산도를 측정하기에 적합한 방법으로 사료된다.

라만과 형광 및 흡광 스펙트럼을 이용한 탄소나노튜브의 분산도 평가방법은 분산정도가 각기 다른 샘플간의 상대적인 분산도를 평가한 방법이다. 이를 보완하기 위하여 현재 spin-coating 기술과 AFM(atomic force microscopy)를 이용한 분산도를 절대평가 방법을 개발 중이다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 지원하는 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스 기술개발사업단(05K1401-00410)의 연구비 지원으로 이루어졌다

참고문헌

- (1) Iijima, S., 1991, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol. 254, pp. 56~58.
- (2) Im, K. H., Hsu, D. K., Cha, C. S., Sim, J. K. and Yang, I. Y., 2002, "A Study on Ultrasonic Evaluation of Material Defects in Carbon/Carbon Composites," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 16, No. 12, pp. 1652~1663.
- (3) Choi, I. M., Woo, S. Y. and Kim, B. S., 2005, "Ionization Gauge by Carbon Nanotube Field Emission," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 11, pp. 2127~2132.
- (4) Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, H. Y., Kim, S. G., Rinzler, A. G., Colbert, D. T., Scuseria, G. E., Tománek, D., Fischer, J. E. and Smalley, R. E., 1996, "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 273, pp. 483~487.
- (5) Girifalco, L. A., Hodak, M. and Lee, R. S., 2000, "Carbon Nanotubes, Buckyballs, Ropes, and a Universal Graphitic Potential," *Phys. Rev. B*, Vol. 62, No. 19, pp. 13104~13110.
- (6) Kim, D. S., Nepal, D. and Geckeler, K. E., 2005, "Individualization of Single-Walled Carbon Nanotubes: Is the Solvent Important?", *Small*, Vol. 1, No. 11, pp. 1117~1124.
- (7) Moore, V. C., Strano, M. S., Haroz, E. H., Hauge, R. H., Smalley, R. E., Schmidt, J. and Talmon, Y., 2003, "Individually Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes in Various Surfactants," *Nano Lett.*, Vol. 3, No. 10, pp. 1379~1382.
- (8) Dalton, A. B., Stephan, C., Coleman, J. N., McCarthy, B., Ajayan, P. M., Lefrant, S., Bernier,

- P., Blau, W. J. and Byrne, H. J., 2000, "Selective Interaction of a Semiconjugated Organic Polymer with Single-Wall Nanotubes," *J. Phys. Chem. B.*, Vol. 104, pp. 10012~10016.
- (9) Zheng, M., Jagota, A., Semke, E. D., Diner, B. A., Mclean, R. S., Lustig, S. R., Richardson, R. E. and Tassi, N. C., 2003, "DNA-Assisted Dispersion and Separation of Carbon Nanotubes," *Nature Mater.*, Vol. 2, pp. 338~342.
- (10) Dumortier, H., Lacotte, S., Pastorin, G., Marega, R., Wu, W., Bonifazi, D., Briand, J. P., Prato, M., Muller, S. and Bianco, A., 2006, "Functionalized Carbon Nanotubes Are Non-Cytotoxic and Preserve the Functionality of Primary Immune Cells," *Nano Letters*, Vol. 6, pp. 1522~1528.
- (11) Krstic, V., Duesberg, G. S., Muster, J., Burghard, M. and Roth, S., 1998, "Langmuir-Blodgett Films of Matrix-Diluted Single-Walled Carbon Nanotubes," *Chem. Mater.*, Vol. 10, pp. 2338~2340.
- (12) Duesberg, G. S., Muster, J., Krstic, V., Burghard, M. and Roth, S., 1998, "Chromatographic Size Separation of Single-Wall Carbon Nanotubes," *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process*, Vol. 67, No. 1, pp. 117~119.
- (13) Jiang, L., Gao, L. and Sun, J., 2003 "Production of Aqueous Colloidal Dispersions of Carbon Nanotubes," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 260, pp. 89~94.
- (14) Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Saito, R. and Jorio, A., 2005, "Raman Spectroscopy of Carbon Nanotubes," *Physics Reports*, Vol. 409, pp. 47~99.
- (15) O'Connell, M. J., Bachilo, S. M., Huffman, C. B., Moore, V. C., Strano, M. S., Haroz, E. H., Rialon, K. L., Boul, P. J., Noon, W. H., Kittrell, C., Ma, J., Hauge, R. H., Weisman, R. B. and Smalley, R. E., 2002, "Band Gap Fluorescence from Individual Single-Walled Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 297, pp. 593~596.
- (16) Heller, D. A., 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.
- (17) Zheng, M., Jagota, A., Strano, M. S., Santos, A. P., Barone, P., Chou, S. G., Diner, B. A., Dresselhaus, M. S., Mclean, R. S., Onoa, G. B., Samsonidze, G. G., Semke, E. D., Usrey, M. and Walls, D. J., 2003, "Structure-Based Carbon Nanotube Sorting by Sequence-Dependent DNA Assembly," *Science*, Vol. 302, pp. 1545~1548.
- (18) Graff, R. A., Swanson, J. P., Barone, P. W., Baik, S., Heller, D. A. and Strano, M. S., 2005, "Achieving Individual-Nanotube Dispersion at High Loading in Single-Walled Carbon Nanotube," *Adv. Mater.*, Vol. 17, No. 8, pp. 980~984.
- (19) Reich, R. and Thomsen, C., 2002, "Electronic Band Structure of Isolated and Bundled Carbon Nanotubes," *Phys. Rev. B*, Vol. 65, pp. 155411~155421.