

탄소 나노튜브와 생체 분자와의 결합을 통한 나노-바이오 응용

황응수*, 조승범**, 홍상현**, 정혜진*, 차창용*, 최재봉**, 김영진**, 백승현#

Nano-Bio Applications Using Carbon Nanotube-Biomolecule Conjugates

Eung-Soo Hwang*, Cao Chengfan**, Sanghyun Hong**, Hye-Jin Jung*, Chang-Yong Cha*,
Jac-Boong Choi**, Young-Jin Kim**, Seunghyun Baik#

ABSTRACT

Single-walled carbon nanotubes (SWNT) exhibit strong Raman signals as well as fluorescence emissions in the near infrared regions where most biomolecules are transparent. Such signals do not blink or photobleach under prolonged excitation, which is advantageous to optical nano-bio marker applications. In this paper, single walled carbon nanotubes are conjugated with specific types of single-stranded DNA in order to detect oligonucleotides of corresponding complimentary sequences. Dot blotting experiments and comparative Raman spectroscopy observations demonstrated excellent sensitivity and specificity of carbon nanotube-DNA probes. The results show the possibility of using SWNT as generic nano-bio markers for the precise detection of specific kinds of genes.

KeyWords: Biomolecule(생체분자), Conjugate(복합체), Fluorescence(형광), Nano-bio markers(나노- 바이오 마커), Raman spectroscopy(라만 분광법), Single walled carbon nanotubes(SWNT)(단일벽 탄소 나노튜브)

1. 서론

탄소 나노튜브는 1991 년 Iijima¹ 에 의해 발견된 이래 우수한 기계적, 전기적, 광학적 특성으로 인하여 나노- 복합재료, 나노- 전자 소자, 나노- 바이오 소자 등 극미세 응용영역에서 많은 각광을 받게 되었다.^{2,3,4} 특히, 탄소 나노튜브는 큰 라만 단면적 (Raman cross-section)을 가지고 있을 뿐 아니라, 근적외선 근처에서 강한 형광신호를 방출한다.^{5,6} 이러한 라만 및 근적외선 형광신호를 이용하여 나노튜브의 특성을 파악하고, 센서 및

마커로 활용하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 대부분 생체분자들은 근적외선 형광신호에 투명한 성질을 가지고 있어 근적외선 형광신호를 이용하면 비침습적 방법으로 세포에 이식되어 사용되는 광학 나노- 바이오 센서를 개발할 수 있다.⁷ 탄소 나노튜브의 밴드갭 (bandgap) 형광신호는 pH 값의 변화에 매우 민감하고 나노튜브 벽에 흡착된 분자들의 기능화 (functionalization)에도 높은 민감도를 나타내고 있다.⁷ 또한, 플루오레세인 (fluorescein) 및 로다민(rhodamine) 등과 같은 상용 세포 유기

* 접수일: 2005 년 8 월 9 일; 게재승인일: 2006 년 2 월 10 일

* 서울대학교 의과대학

** 성균관대학교 기계공학과

교신저자: 성균관대학교 기계공학과

E-mail: sbaik@mc.skku.ac.kr Tel: (031) 290-7456

염색물에 비해, 탄소 나노튜브의 라만 및 밴드갭 형광신호는 블링킹(blinking) 또는 광표백(photobleaching)현상이 잘 발생하지 않아서 장기간 및 반복적인 세포 관측에도 활용될 수 있다.⁸ 이러한 광학 특성은 나노-바이오 마커로서 아주 우수한 특성이다. 나노튜브는 생체분자와 상응하는 크기를 가지고 있으므로, 생체분자와 결합되어 광학 나노-바이오 마커로서 개발될 수 있다.

본 논문에서는 HiPco 방법⁹으로 제작된 단일벽 탄소 나노튜브(single walled carbon nanotubes: SWNT)와 올리고 뉴클레오타이드 (oligonucleotide)로 만들어진 나노-바이오 복합체를 프로브로 이용하여 나노-바이오 마커로서 사용할 수 있는가를 알아보았다.

2. 탄소 나노튜브의 나노-바이오 마커 응용

2.1 나노-바이오 복합체에서 발생하는 라만 및 근적외선 형광신호

HiPco 방법에 의해 제작된 SWNT는 지름 0.7~1.1 nm, 길이 1 μm 정도로 구성되며, chirality 특성에 따라 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브로 분류된다.^{2,3} 나노튜브의 전기적 특성은 2 차원의 그라파이트 판이 원통형으로 나노튜브를 형성하는 과정에서 방향성에 따라 결정되며, 두개의 정수 벡터(chirality vector)를 이용하여 방향성을 나타낸다. 두 정수의 차이가 3의 배수이면 금속성 나노튜브, 그렇지 않으면 반도체성 나노튜브가 형성되게 된다. 전기적 특성에 따른 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 분리는 여러 그룹에 의해 연구되고 있다.^{10,11}

탄소 나노튜브는 강한 반 데르 발스 힘(van der waals force)에 의해서 고체 상태에서 다발(aggregates)을 형성하게 된다. 나노튜브를 각각의 튜브들로 분산시키기 위해 친수성과 소수성을 동시에 가지고 있는 계면활성제와 액체 용액(liquid medium)에서 혼합하는 방법이 주로 사용되고 있다.⁵ 액상에서 균일하게 분산된 반도체성 탄소 나노튜브는 밴드갭 특성에 따라 근적외선 근처에서 강한 형광특성을 나타낸다.^{5,12} 따라서, 근적외선 형광신호를 이용하여 나노튜브의 분산 정도를 정량화하여 측정하는 것이 가능하다.

탄소 나노튜브를 이용하여 바이오 응용 연구를 수행하기 위해서는 탄소 나노튜브-바이오 분자 복합체를 제작해야 되며, 나노튜브-포도당 효소 복합체 제작 연구가 보고된 바 있다.⁷ 먼저, 분말 상태의 SWNT를 2 wt. % cholate H₂O 용액에 넣은 다음 혼합기(mixer)로 균일하게 섞는다. Cup horn을 이용한 초음파처리 및 120,000g에서의 원심분리과정을 거쳐 소수성(hydrophobic)을 지닌 SWNT는 cholate 미셀(micelle)에 둘러싸인 형태로 액상에 균일하게 분산되어 있는 SWNT 디캔트로 존재하게 된다. 원심분리를 수행하게 되면, 비중이 1보다 큰 나노튜브 덩어리(aggregate)는 시험관 밑으로 가라 앉게 되고, 이를 제외한 상층부의 supernatant만이 실험에 사용되었다. 여기서 cholate 대신 DNA, sodium dodecyl sulfate(SDS)를 사용해도 비슷한 결과물을 얻을 수 있으며, 2.2 절에서 설명하는 바와 같이 DNA를 이용하여 분산된 나노튜브가 본 연구에 사용되었다.

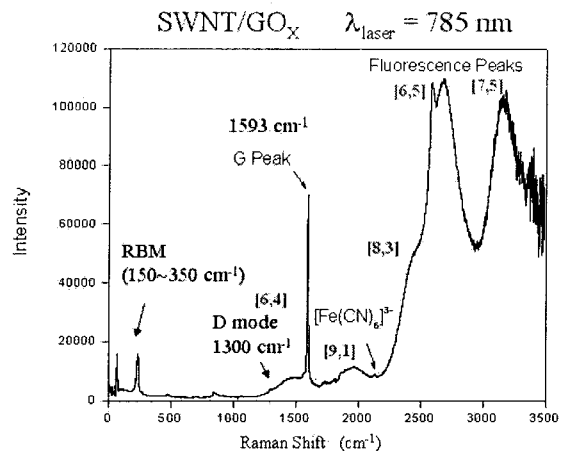


Fig. 1 Raman and near-infrared fluorescence signals of SWNT-glucose oxidase bio-conjugates. The excitation wavelength of the laser was 785 nm

Cholate을 제거하고 SWNT와 포도당 효소(glucose oxidase: GOx)의 복합체를 만들기 위해 다음과 같은 처리과정을 사용한다. 이미 만들어진 SWNT 디캔트와 GOx를 일정한 질량비로 혼합한 다음 투석(dialysis)과정을 거친다. 결과적으로 분자량이 작은 cholate은 서서히 투석 카트리지를 cut off 분자량: 10000) 밖으로 나오게 되고 분자량이 상대적으로 큰 GOx는 카트리지 안에

남게 되며 SWNT 를 비공유결합 형식으로 친화적으로 둘러싸게 된다. GOx 는 pH 7.4 에서 dimer 를 이루고 있으며, dimer 의 내부는 소수성이기 때문에 이 부분에 소수성 표면을 가지는 나노튜브가 결합하게 된다. SWNT-GOx 복합체도 액상에서 균일하게 분산된 상태로 존재할 수 있다.

Fig. 1 은 SWNT-GOx 복합체의 라만 신호 및 근적외선 형광신호를 보여주며, DNA 를 비롯한 다른 생체 분자를 사용하여도 유사한 신호를 관측할 수 있다. 측정은 Kaiser Optics 사에서 제작된 Holographic Raman System 을 이용하여 수행되었고, 레이저 파장은 785 nm 이다. 광학 신호는 CCD camera 를 이용하여 측정되었고, Raman shift 3500 cm^{-1} 까지 측정이 가능하였다. Fig. 1 에서는 785 nm 와 공진을 일으키는 탄소 나노튜브의 대표적인 라만특성을 볼 수 있다. Raman shift 150 - 350 cm^{-1} 에서 발생하는 Radial Breathing Mode(RBM)를 사용하면 나노튜브들의 지름을 측정할 수 있다. 지름은 아래와 같은 식으로 계산 된다.³

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

여기에서 ω_{RBM} 은 RBM 신호의 주파수 (cm^{-1}) 이며, d_{SWNT} 는 나노튜브의 지름 (nm)이다. $a=223.5 \text{ nm } cm^{-1}$ 와 $b=12.5 \text{ } cm^{-1}$ 는 실험적으로 결정된 상수이다.

약 1593 cm^{-1} 에서 나타나는 G peak 는 sp^2 결합의 탄소 원자들의 진동으로 생기는 SWNT 및 그래파이트의 고유의 특성이다. 탄소 나노튜브는 큰 라만 단면적을 가지고 있으므로, G peak 신호를 이용하면 나노튜브의 존재유무를 미세하게 측정할 수 있다. 본 연구에서는 G peak 신호를 이용하여 나노튜브의 존재유무를 판단함으로써 나노-바이오 마커를 개발하였다. 약 1330 cm^{-1} 의 D 모드는 탄소 나노튜브 벽에 흡착된 분자가 공유결합을 하여 그래파이트 구조의 sp^2 결합이 sp^3 결합으로 바뀔 때 따라 야기되는 특성이다. 본 실험에서 사용한 초음파 처리과정은 강도의 크기에 따라 나노튜브 벽에 손상을 줄 수 있으며 D 모드에 의해 파괴 정도를 알 수 있다.¹³

라만 주파수의 후반부에서 관측되는 광대역 형광신호들은 각각 분산된 반도체성 나노튜브에서 발생하는 신호이다. Fig. 1 에서는 각각의

형광신호에 상응하는 나노튜브들의 정수 벡터(chirality vector)를 같이 표기하였다. 이 신호들은 근적외선 영역에서 발생되며, 반도체성 나노튜브가 각각 분산되어 있을 때만 발생하여 분산의 정도를 정량적으로 측정하는데 사용될 수 있다. 뿐만 아니라, 근적외선 형광신호는 나노-바이오 센서 및 마커를 개발하는데 사용될 수 있다.^{7,8}

2.2 SWNT-single stranded DNA 복합체의 제작

본 연구에서는 초음파처리 및 원심분리과정을 거쳐 제작된 SWNT-single stranded DNA (SWNT-ssDNA) 복합체를 이용하여 상보성 염기서열을 가지는 표적 ssDNA 를 변성(denaturing) 및 상동결합(annealing)과정을 통하여 선택적으로 추적 및 측정하였다. SWNT-ssDNA 복합체 프로브에서 발생하는 나노튜브의 라만 G peak 를 이용하여 프로브의 존재유무를 판단함으로써 바이오 마커로 활용하였다. 서던 블롯(southern blot) 실험 및 라만 신호(raman signal)를 측정한 결과 SWNT-ssDNA 복합체는 우수한 선택성 및 민감도를 가지고 있어 나노-바이오 프로브로 사용될 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

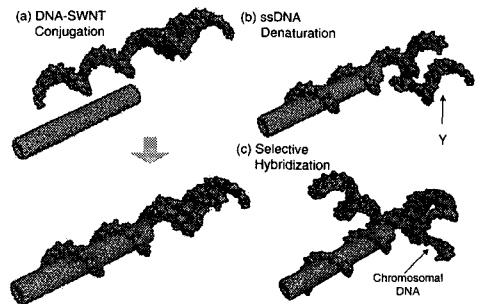


Fig. 2 Schematic diagram of a nanotube probe (a) Conjugation process of a nanotube with the ssDNA portion of an oligonucleotide complex (b) Separation of ssDNA with a sequence Y from the oligonucleotide complex (c) Selective hybridization with the target chromosomal DNA

SWNT 와 ssDNA 복합체는 듀풍그룹에 의해 최초로 제작되었다.^{14,15} 나노튜브는 DNA 의 base 와

π -stacking 을 통하여 결합을 하고, double-stranded DNA (dsDNA) 보다는 ssDNA 와 더욱 결합이 잘 됨이 보고되었다. dsDNA 와 나노튜브를 결합시키기 위해서는 강한 초음파 처리과정이 필요하였다. 또한 ssDNA 중에서도 Guanine(G)-Thymine(T) 서열이 반복되며, base pair 길이가 10 에서 45 인 경우에 결합 효율이 가장 좋았다.

본 연구에서 사용된 SWNT-ssDNA 복합체는 Fig. 2 와 같은 절차로 제작되었다. 먼저 표적 DNA 에 대응하는 상보성 염기서열을 갖고 SWNT 에 친화적인 ssDNA 를 준비한다. ssDNA 의 염기서열은 다음과 같다. 5' - d(GTGTGTGTGTGTGTGTGTGTGTA AAAA- X)-3' (42-mer). 여기서, X 염기서열은 human adenosine deaminase 의 상보적인 결합으로 5' - d(AGCCCCGCCTTGATGAAG)-3' (18-mer)와 같이 디자인 되었다. 중복되는 염기서열 d(GT)₁₀ 은 초음파처리시 HiPco SWNT 와 강력한 친화력을 나타내는 이유로 선택되었다. 분자 모델링(molecular modeling)에 의하면 일정한 길이의 중복되는 GT 계열의 ssDNA 는 분산된 나노튜브를 나선형구조로 감싸며 강한 결합력을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁴ 다음 단계에서, 200 μ l TE 버퍼(10mM Tris-HCl, 1mM EDTA, pH 8.0)에서 X 와 상보적인 염기서열 Y 로 구성된 올리고 뉴클레오타이드와 혼합시키고 60 °C에서 약 5 분간 상동결합과정을 거쳐 올리고 복합체를 만든다. d(GT)₁₀ 서열과 X 서열 사이에 AAAA 를 삽입시킨 이유는 d(GT)₁₀ 과 상보적인 X - Y 로 결합된 dsDNA 사이에 SWNT 와 결합이 잘 되지 않는 염기서열로 일정한 간격을 만들어 주어 dsDNA 부분과 나노튜브와 결합되는 ssDNA 부분을 분리하기 위함이다. 다음 단계에서 약 1:1 질량비로 HiPco SWNT 분말을 추가하고, 0.1M NaCl 용액에서 약 5 시간 동안 약한 정도의 초음파 처리과정을 거친다. 이 과정에서 π - stacking 에 의해 SWNT 와 DNA 복합체의 d(GT)₁₀ 부분이 Fig. 2a 와 같이 결합된다.

초음파처리의 강약 정도는 SWNT 와 올리고 복합체의 결합에 큰 영향을 미친다. 강한 초음파처리는 dsDNA 의 수소결합을 파괴하여 두개의 ssDNA 를 발생시키게 된다. dsDNA 가 ssDNA 로 변하게 되면 표적 DNA 와 상보성 염기서열을 가지고 있는 X 서열 부분이

나노튜브와 결합하게 되어 SWNT-ssDNA 프로브가 DNA hybridization 을 수행할 수 없게 된다.

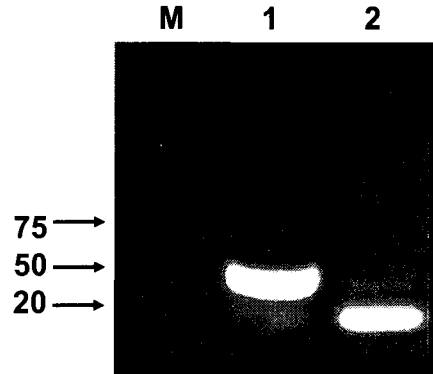


Fig. 3 Agarose gel electrophoresis of double stranded oligonucleotides before (lane 1) and after sonication (lane 2). Lane M denotes size marker

Fig. 3 은 강한 초음파처리과정으로 인하여 변성된 dsDNA 의 전기영동 결과를 보여준다. 20 base pair 를 가지는 두개의 ssDNA 를 결합시켜 dsDNA 를 제작하였다. 레인 M 은 DNA base pair 크기를 측정하기 위하여 사용된 마커이다. 아가로스 젤을 이용하여 전기영동을 수행하면 음극으로 대전된 DNA 는 전기장의 영향을 받아 크기의 함수로 이동하게 된다. Fig. 3 에서는 윗부분에 음극을, 아래부분에는 양극의 전기장을 가하였으므로 DNA 는 위에서 아래 방향으로 이동하게된다. 이 과정에서 크기가 작은 DNA 일수록 이동 저항을 적게 받아 더욱 빠른 속도로 이동하게 된다. 60 W 에서 약 2 시간 동안 초음파처리를 하기 전·후의 dsDNA 를 각각 전기영동하였다. 레인(lane) 1 은 초음파처리 전 dsDNA 전기영동 결과이고, 레인 2 는 초음파처리 후 전기영동 결과이다. 강한 초음파 작용하에서 dsDNA 는 ssDNA 로 변성되어 초음파처리 전 보다 더 멀리 이동하였음을 알 수 있다. 초음파 강도가 너무 약하면 나노튜브가 ssDNA 와 잘 결합할 수 없고, 너무 강하면 dsDNA 가 파괴됨으로 적절한 초음파 강도가 매우 중요함을 알 수 있다.

다음 단계에서, 혼합용액을 다시 약 13,000 g 원심력 하에서 2 시간 동안 원심분리과정을 수행하였다. 이러한 과정을 거치게 되면 덩어리

상태의 탄소 나노튜브와 기타 이물질들은 시험관 밑으로 침전하게 되며 완충액상에서 균일하게 분포되는 SWNT-올리고 복합체들만 용액 상에 떠있게 된다. 상층액의 80~90 %의 supernatant 를 채취하고 (Fig. 2a), Fig. 2b 에서와 같이 2 분간 변성과정을 거쳐 염기서열 Y 로 구성된 ssDNA 를 제거하면 SWNT-ssDNA 복합체 프로브를 얻게 된다. Fig. 2c 는 SWNT-ssDNA 프로브가 표적 DNA 에 결합하는 과정을 개념적으로 보여준다.

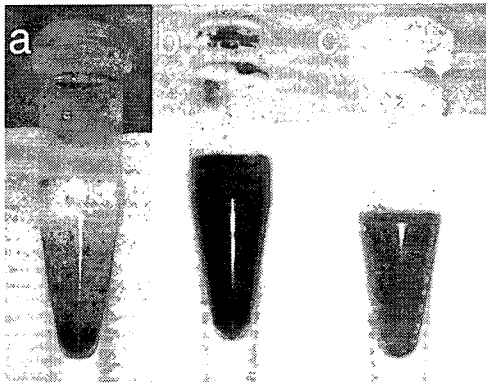


Fig. 4 (a) SWNT + oligo complex before sonication (b) after sonication (c) and after centrifugation

Fig. 4 는 SWNT-ssDNA 복합체를 제작하는 과정에서의 샘플의 변화를 단계적으로 보여준다. Fig. 4a 는 SWNT 와 올리고 복합체를 혼합한 직후의 사진이다. Fig. 4b 에서 보듯이 초음파 처리를 수행하게 되면, 나노튜브들이 수용액 상에서 균일하게 혼합되게 된다. Fig. 4c 는 원심분리를 통하여 나노튜브 다발을 제거한 이후의 사진이다.

2.3 SWNT-ssDNA 복합체 프로브와 상대되는 ssDNA 와의 선택적 결합

만들어진 SWNT-ssDNA 복합체 프로브를 이용하여 다양한 종류의 ssDNA 와의 선택적인 결합(hybridization)을 검증하기 위해 Fig. 5 와 같이 서던 블롯 실험을 수행하였다. 표적 DNA 는 human fibroblast DNA 를 사용하였으며, 선택성을 확인하기 위하여 대장균(*Escherichia coli*:*E.coli*) DNA 를 Control 로 사용하였다. Fig. 5 에서 보듯이 SWNT-ssDNA 복합체의 X 염기서열은 human

fibroblast DNA 의 염기서열 조각과 상보적으로 매칭(matching)하는 관계를 갖고 있지만, *E.coli* DNA 와는 상보적인 조각을 갖지 않아 human fibroblast DNA 와만 선택적으로 결합하게 된다. 따라서, 나노튜브의 G peak 라만 신호를 이용하면 SWNT-ssDNA 프로브의 존재유무를 알수있고, 이를 바탕으로 human fibroblast DNA 의 존재 유무를 파악할 수 있게 된다. 본 연구에서는 라만 분광기로 나노튜브의 라만 G peak 를 측정함으로써 선택적인 결합여부에 대한 증거를 제시하였다.

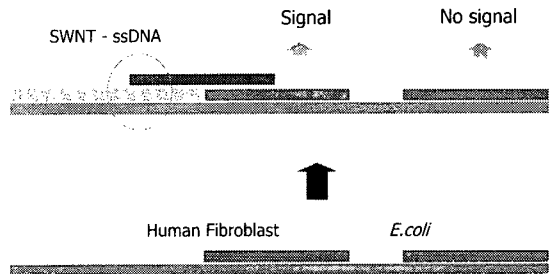


Fig. 5 Schematic diagram of the selective binding of the SWNT-ssDNA probe with the target ssDNA during the southern blot process

신호 대 노이즈 비를 증가시키기 위하여 nitrogen-cellulose (NC) membrane, nylon membrane, polyvinyl-difluoride (PVDF) membrane 을 이용하여 각각 서던 블롯 실험을 수행하였다. 이 중에서 NC membrane 의 신호 대 노이즈 비가 가장 컸으며 그 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다.

먼저, human fibroblast DNA 와 *E.coli* DNA 를 NC membrane (pore size: 0.2 μm , binding capacity: 100 $\mu\text{g}/\text{cm}$) 위에 초기 시작농도 1.8 $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 부터 단계적으로 희석시키면서 2 μl 씩 각각 로딩 한다. 다음 단계에서, 자외선 (ultraviolet)을 이용하여 약 3 분간 크로스-링킹 (cross-linking)을 시킨다. 여기서, 농도를 비례적으로 희석시킨 목적은 SWNT-ssDNA 복합체와 표적 DNA 와의 결합에 관한 상관관계를 도출하기 위해서이다. 다음 단계에서, SWNT-ssDNA 복합체 프로브를 이용하여 NC membrane 에 결합된 두 가지 종류의 DNA 와 반응시킨다. 앞에서 만들어진 SWNT-ssDNA 복합체 (나노튜브 농도 5.6 mg/L)를

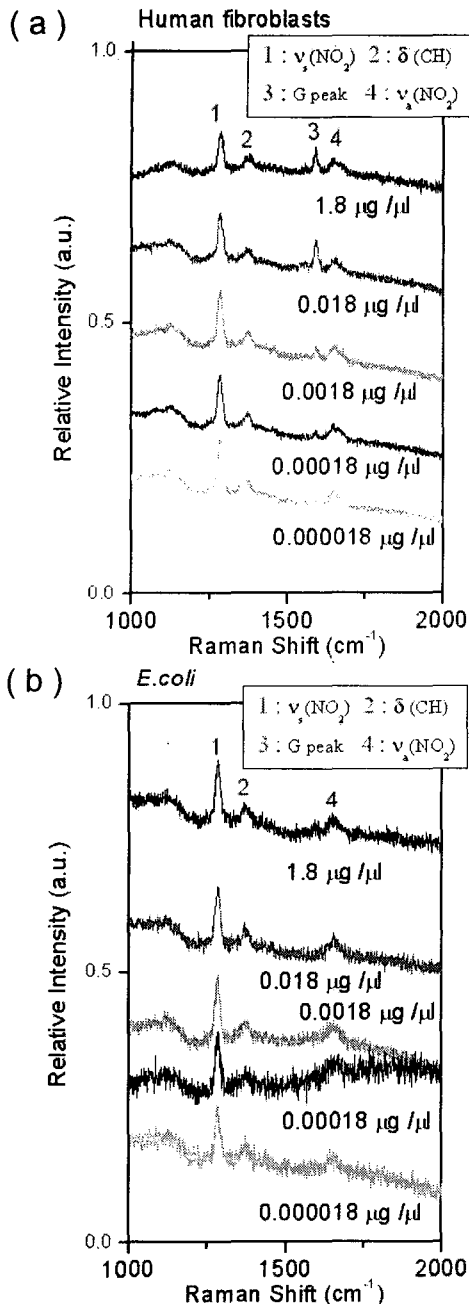


Fig. 6 Raman spectra after Southern blotting (a) Human fibroblast chromosomal DNA. The G mode as well as NO₂ and CH modes on the nitrogen-cellulose membrane are shown. Notation: ν, stretching; δ, scissoring; subscript s, symmetric; subscript a, antisymmetric (b) *E. coli* chromosomal DNA does not show the G mode

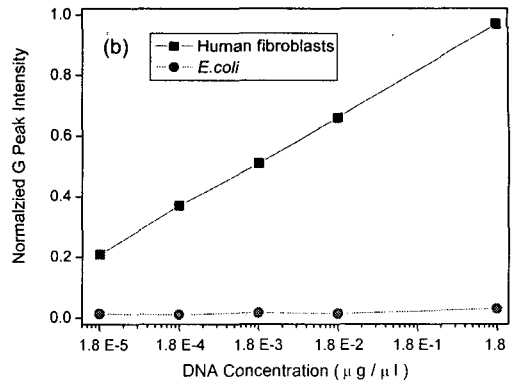


Fig. 7 Normalized G peak intensity as a function of DNA concentration

membrane 위의 대상 포인트에 로딩 한 다음 45 °C 에서 약 2 시간 동안 결합에 필요한 인큐베이션(incubation)을 수행한다. 마지막으로, deionized water 를 이용하여 표면을 깨끗하게 씻어내면 표적 DNA 염색체에 결합이 된 SWNT-ssDNA 복합체 프로브는 NC membrane 위에 부착이 되어 있고, 결합이 되지 않은 프로브와 올리고 뉴클레오타이드 및 여러 가지 분석물들은 제거된다. 마지막으로 라만 분광기를 이용하여 NC membrane 위의 분석물들에 대한 라만신호 측정을 수행하였다. 측정은 Reinshaw 에서 제작된 Micro - Raman System 을 이용하였고, 레이저 파장은 633 nm, 파워는 17.65 mW, 100 배율의 대물 렌즈가 사용되었다.

Fig. 6 은 human fibroblast 와 *E.coli* 에 대한 서던 블롯 결과물의 라만 신호를 보여준다. 탄소 나노튜브 표면의 탄소- 탄소 결합에 의해 발생하는 1593 cm⁻¹ 라만 주파수에서 나타나는 G peak 를 이용하여 SWNT-ssDNA 복합체 프로브의 존재 여부를 검증하였다. Fig. 6 에서 보면 *E.coli* DNA 염색체에서는 G peak 가 나타나지 않는 반면 human fibroblast DNA 염색체에서는 농도에 따라 크기가 비례하는 G peak 신호들이 나타난다. 다른 라만 주파수 (1275 cm⁻¹, 1373 cm⁻¹, 1655 cm⁻¹) 에서 생기는 여러 가지 다양한 피크들은 NC membrane 의 주요 구성요소들인 NO₂ 와 CH 작용기들의 상호간의 대칭 및 비대칭적인 스트레칭(stretching) 영향, 시저링(scissoring) 영향에 의해 야기된 라만 신호이다.¹⁶ 이러한 신호들은 각각 다른 샘플에서

측정하여도 그 크기의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 7은 서던 블롯 결과물에 대한 G peak 강도의 정규화된 결과를 보여준다. Human fibroblast 에서는 DNA 농도에 비례하는 G peak 강도를 관찰할 수 있으나, E. Coli DNA 에서는 G peak 를 관찰할 수 없었다. 이는 SWNT-ssDNA 복합체 프로브의 우수한 선택성을 보여준다. 측정된 최저 농도는 18 pg/ μ l 이다. 세포 안에서의 DNA 가 3 giga base pair 로 구성된다는 가정을 하면, 이는 약 20 copy 의 genome 에 상응하는 수치이며 SWNT-ssDNA 의 우수한 민감도를 보여준다.

3. 결론

SWNT-ssDNA 복합체 프로브의 나노튜브 라만 신호를 이용하여 상보성 염기서열을 가지는 ssDNA 를 측정하는 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SWNT-ssDNA 복합체는 미세량만 존재하여도 민감한 라만신호를 보여준다. 나노튜브의 광학 신호는 광표백 현상이 발생하지 않으며, 나노튜브의 크기는 생체분자의 크기와 상응하기 때문에 우수한 바이오 마커로서 개발될 수 있다.

2. SWNT-ssDNA 복합체 프로브를 이용하여 상보성 염기서열을 가지는 ssDNA 와의 성공적인 선택적 결합을 수행하였다. 이러한 결합방식의 선택성은 바이오 연구에서 유용하게 사용될 수 있으며, 나노튜브의 광학신호를 이용하여 특정한 염기서열의 DNA 를 추적하여 측정하는 것이 가능하다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안정성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것이며, 본 연구에서 사용된 라만 분광기(Raman Spectroscopy)의 사용을 허락해 주신 성균관대학교 CNNC 이영희 교수님께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon," Nature, Vol. 354, pp. 56 - 58, 1991.
2. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Eklund, P. C., "Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes," Academic, San Diego, 1996.
3. Saito, R., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S., "Physical Properties of Carbon Nanotubes," Imperial College Press, London, 1998.
4. Han, C. S., Lee, E. S., "Assembly and Patterning of Carbon Nanotube," J of the KSPE, Vol. 22, No. 2, pp. 16 - 22, 2005.
5. 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., Jianpeng, Ma, Hauge, R. H., Weisman, R. B., Smalley, R. E., "Band Gap Fluorescence from Individual Single-Walled Carbon Nanotubes," Science, Vol. 297, pp. 593 - 596, 2002.
6. Bachilo, S. M., Strano, M. S., Kittrell, C., Hauge, R. H., Smalley, R. E., Weisman, R. B., "Structure-Assigned Optical Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes," Science, Vol. 298, pp. 2361 - 2366, 2002.
7. Barone, P. W., Baik, S., Heller, D. A., Strano, M. S., "Near-Infrared Optical Sensors Based on Single-Walled Carbon Nanotubes," Nature Mater., Vol. 4, pp. 86 - 92, 2005.
8. Heller, D. A., Baik, S., Eurell, T. E., Strano, M. S., "Single-Walled Carbon Nanotube Spectroscopy in Live Cells: Towards Long-Term Labels and Optical Sensors," Adv. Mater., Vol. 17, pp. 2793 - 2799, 2005.
9. Bronikowski, M. J., Willis, P. A., Colbert, D. T., Smith, K. A., Smalley, R. E., "Gas-Phase Production of Carbon Single-Walled Nanotubes from Carbon Monoxide via the HiPco Process: A Parametric Study," J. Vacuum Sci. Technol. A, Vol. 19, pp. 1800 - 1805, 1998.
10. Krupke, R., Hennrich, F., Lohneysen, H. v., Kappes, M. M., "Separation of Metallic from Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes," Science, Vol. 301, pp. 344 - 347, 2003.
11. Baik, S., Usrey, M., Rotkina, L., Strano, M., "Using the Selective Functionalization of Metallic Single-

- Walled Carbon Nanotubes to Control Dielectrophoretic Mobility," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 108, pp. 15560 - 15564, 2004.
12. Graff, R. A., Swanson, J. P., Barone, P. W., Baik, S., Heller, D. A., Strano, M. S., "Achieving Individual-Nanotube Dispersion at High Loading in Single-Walled Carbon Nanotube Composites," *Adv. Mater.*, Vol. 17, pp. 980 - 984, 2005.
 13. Heller, D. A., Mayrhofer, R. M., Baik, S., Grinkova, Y. V., Usrey, M. L., Strano, M. S., "Concomitant Length and Diameter Separation of Single-Walled Carbon Nanotubes," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 126, pp. 14567 - 14573, 2004.
 14. Zheng, M., Jagota, A., Semke, E. D., Diner, B. A., Mclean, R. S., Lustig, S. R., Richardson, R. E., Tassi, N. G., "DNA-Assisted Dispersion and Separation of Carbon Nanotubes," *Nature Mater.*, Vol. 2, pp. 338 - 342, 2003.
 15. 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., Walls, D. J., "Structure-Based Carbon Nanotube Sorting by Sequence-Dependent DNA Assembly," *Science*, Vol. 302, pp. 1545 - 1548, 2003.
 16. Moore, D. S., McGrane, S. D., "Comparative Infrared and Raman Spectroscopy of Energetic Polymers," *J. Mol. Struct.*, Vol. 661, pp. 561 - 566, 2003.