

촉매 화학기상증착법에 의한 단일벽 탄소나노튜브의 합성과 미세구조

論 文
55C-7-5

Synthesis and Microstructure of Single-Walled Carbon Nanotubes by Catalytic Chemical Vapor Deposition Method

金鍾植*·金瓏河**·金昌日†
(Jong-Sik Kim · Gwan-Ha Kim · Chang-Il Kim)

Abstract - Single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) with few defects and very small amount of amorphous carbon coating have been synthesized by catalytic decomposition of methane in H₂ over well-dispersed metal particles supported on MgO. The yield of SWCNTs was estimated to be 88.5% and the purities of SWCNTs thus obtained were more than 90%. Peak of the radial breathing mode in the Raman spectrum demonstrated that the diameters of synthesized CNTs are in the range 0.4-2.0 nm. Our results also indicated that MgO support materials are useful to a large-scale synthesis of high-quality SWCNTs. Increasing temperature could remarkably increase the yield and also improve the quality of SWCNTs from catalytic decomposition of methane. The morphologies and microstructures of the synthesized carbon materials were characterized by scanning electron microscopy (SEM), Thermogravimetric analysis (TGA), Raman spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD).

Key Words : Carbon Nanotube, Single-Walled CNT, Catalytic CVD

1. 서 론

21세기 나노기술의 핵심소재인 탄소나노튜브는 다양한 물리적, 화학적, 기계적 특성으로 인하여 전계방출 디스플레이, 극소형 나노 크기의 반도체소자, 나노 화학 및 바이오센서, 나노 크기 탐침, 전자파 차폐, 연료전지 및 2차 전지 전극, 고강도 복합소재 등에서 많은 응용이 기대되고 있다. 탄소나노튜브가 꿈의 신소재로 떠오른 이유는 대부분 물질의 원자 구조가 상하좌우가 달라서 비대칭의 3차원 구조를 이루는 반면에 탄소나노튜브만은 독특하게도 좌우가 똑같은 대칭꼴을 이루는 1차원 분자의 선형적인 물리 특성을 나타낸다. 그리고 탄소원자만으로 이뤄진 단분자이면서 좌우 대칭꼴을 이루는 단순한 구조를 가지고 있는 물질이 바로 탄소나노튜브인 것이다.

탄소나노튜브는 1985년 영국 Brighton에 있는 Sussex 대학교의 H. W. Kroto 교수와 미국 텍사스 주에 있는 Rice 대학교의 R. E. Smalley 교수가 탄소의 동소체의 하나인 Fullerene을 처음으로 발견한 이후[1], 1991년 일본전기회사(NEC) 부설연구소의 Iijima 박사가 전기방전 중 흑연음극 상에 생성된 탄소덩어리로부터 탄소나노튜브를 관찰하여 처음으로 보고되었다[2]. 이후 탄소나노튜브에 대한 연구는 그들의 독특한 구조와 폭넓은 범위의 잠재적 응용성(예: 전기

화학적 장치, 수소저장, 전계방출장치, 나노미터 크기의 전자 장치, 센서 및 플로브)때문에 매우 많은 주목을 끌어왔다. 이와 같이 많은 과학자와 연구자들이 탄소나노튜브의 무한한 가능성에 매력을 느껴서 지금까지도 다양한 주제를 가지고 계속 연구를 하고 있다.

이렇게 폭넓은 분야에서 탄소나노튜브 소재의 본격적인 응용을 실현하기 위해서는 탄소나노튜브 소재의 제조원가를 획기적으로 낮추어야 한다. 즉 여러 가지 응용분야에 따라서 탄소나노튜브에 대한 기초물성 및 응용연구가 활발히 촉진되어야 하는데 구조가 일정하고 특성이 균일한 탄소나노튜브의 성장을 위한 구조제어 성장법과 산업에의 응용을 위한 대량생산 및 소재특성 평가가 반드시 해결되어야 한다. 뿐만 아니라 고순도의 탄소나노튜브의 합성기술, 길이 및 직경 제어기술, 구조 제어기술, 저온 대면적 생산기술, 저가격 대량생산기술, 수직배향성장 및 선택적 성장, 결정성 및 결함제어, 표면구조제어 및 표면개질 등을 통한 특성제어가 필수적으로 요구되고 있지만 아직은 그 단계에 도달하지 못하고 있다. 지금까지 탄소나노튜브를 성장시키는 여러 방법이 개발되었는데, 초기의 아크 방전법(arc discharge)[2]과 레이저 기화법(laser evaporation)[3]이 구조 및 전기 특성 연구를 위한 소량의 탄소나노튜브를 제공하는 역할을 하였고, 이후 여러 응용에 적합한 열 화학기상증착법(thermal CVD)[4], 기상 반응법(vapor phase growth)[5], 플라즈마 화학기상증착법(plasma enhanced CVD)[6], 전기분해법(electrolysis method)[7], 프레임 합성법(flame synthesis)[8] 등 다양한 방법들이 사용되고 있고, 지금도 지속적으로 보다 효율적인 합성법을 개발하기 위한 연구가 추진되고 있다. 그 중에서도 최근에 촉매 화학기상증착법(catalytic CVD)법이 상대적으로 낮은 가격에서 고품질 단일벽 탄소나노튜브

† 교신저자, 正會員 : 中央大學 電子電機工學部 副教授 · 工博
E-mail : cikim@cau.ac.kr

* 正會員 : 中央大學 電子電機工學部 碩士課程

** 正會員 : 中央大學 電子電機工學部 博士課程

接受日字 : 2006年 3月 22日

最終完了 : 2006年 5月 3日

를 대량 합성하는데 유리한 합성기술로 각광받고 있고 많은 연구그룹들에서 합성변수가 되는 촉매조성비, 담지체의 유형, 금속 촉매의 고유특성, 탄소 소스 가스 등을 적절히 조합하여 단일벽 탄소나노튜브를 합성한 것으로 보고되었다 [9-17]. 하지만 이들 많은 그룹들의 연구결과를 살펴보면 아직도 단일벽 탄소나노튜브의 수율이 낮고 품질이 좋지 않음을 보여주고 있다. 이처럼 지금까지 촉매 화학기상증착법으로 탄소나노튜브를 합성하는 데 있어서 많은 진전이 있었던 것도 사실이지만 고수율, 고품질의 단일벽 탄소나노튜브를 합성하는데 여전히 어려움이 많다.

이에 본 연구에서는 탄소나노튜브를 합성하는 여러 가지 방법 중에서 탄소나노튜브의 길이, 직경, 그리고 구조제어가 비교적 용이하며, 고순도 및 고품질의 탄소나노튜브를 대량으로 합성할 수 있고, 단일벽 탄소나노튜브만을 선택적으로 성장시킬 수 있는 합성방법으로 판단되는 촉매 화학기상증착법을 이용하여 단일벽 탄소나노튜브를 합성하고 미세구조에 대한 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 촉매분말 제조와 탄소나노튜브 합성

본 실험에서 탄소나노튜브를 합성에 사용될 촉매분말 제조를 선행하였는데 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 의 세 가지 시료를 준비하여 Fe, Mo, MgO에 대한 적절한 질량비율을 취하여 최소량의 폴리에틸렌 글리콜 200(PEG200)에 용해시킨 후 사발에 담아 입자가 균일하게 되도록 장시간 교반하였다. 그 후 촉매를 전통적인 연소방법을 통하여 혼합 금속 산화물 형태의 분말 촉매를 제조하였다[18].

촉매 분말의 제조가 끝난 후 본 실험에서 탄소나노튜브를 성장시키기 위해서 사용한 장치는 열화학기상증착 장치로써 그림 1에 장치의 개략도를 나타내었다.

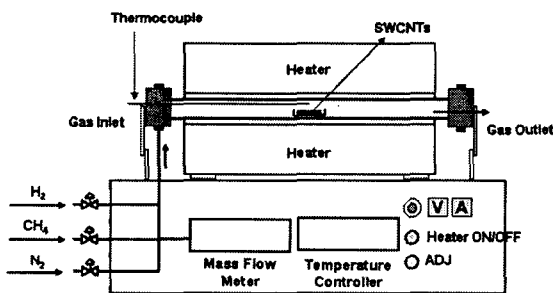


그림 1. 탄소나노튜브를 합성하기 위해 사용된 열화학기상증착장치의 개략도

Fig. 1. Schematic of thermal chemical vapor deposition for carbon nanotube growth

열화학기상증착 장치의 기본 구조는 수평형 반응관과 발열부, 유량조절장치가 연결 되어있는 가스의 도입부와 반응 후 배출되는 배기부로 구성되어 있다. 사용된 반응관은 내경 25 mm, 외경 28 mm, 길이 240 mm의 크기의 석영튜브

로 제조되었다. 만들어진 촉매분말의 일정량(200 mg)을 석영보트에 담아 700~1000℃의 온도범위에서 H_2 와 CH_4 를 5대1의 가스유량의 비율로 흘려주어 30분 합성을 진행하였다. 반응시간이 종료되면 N_2 분위기로 장치를 실온까지 떨어뜨린 후 합성된 생성물을 꺼내었다.

2.2. 탄소나노튜브 분석

열화학기상증착 공정을 통해서 얻어진 물질은 여러 가지 분석방법을 통해서 그 특성이 평가되었으며, 촉매의 특성평가도 함께 아래에 열거된 분석장비를 이용하여 진행되었다.

첫째, 본 연구에서 성장시킨 탄소나노튜브의 길이, 직경, 수직정렬 상태, 밀도, 균일도 등 미세구조를 분석하기 위하여 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 통하여 성장된 탄소나노튜브의 형상을 확인하였다. 일반적으로 SEM 분석시 생기는 charging 현상을 억제하기 위해서 시행되는 금이나 백금의 코팅은 본 연구의 시편에서는 시행하지 않았다. 이는 나노미터 단위의 촉매나 나노튜브의 크기나 직경이 이러한 금이나 백금 코팅으로 증가되는 것을 막기 위함이었다. 분석에 이용된 장비는 JEOL사의 JSM-6700F 모델로써, 15kV의 가속전압에서 x15,000~x100,000의 배율로 관측되었다.

둘째, 성장시킨 탄소나노튜브의 정량을 측정하기 위해 열중량 분석법(thermogravimetric analysis, TGA)을 이용하여 온도변화에 따른 시료의 무게변화를 측정하여 분석하였다. 분석에 이용된 장비는 TA Instruments사의 TGA-2050 모델을 이용하여 이루어졌다. 분석은 실온에서부터 1000℃까지 온도를 일정한 비율로 상승시키면서 O_2 를 첨가하면서 합성된 샘플이 산화되는 과정을 통하여 시료의 중량에 대한 감소를 분석을 통하여 생성물에 대한 정량을 측정하였다.

셋째, 성장시킨 탄소나노튜브의 구조적인 평가와 결정성 등의 흑연화 정도를 평가하기 위한 방법으로 Raman 분광분석(Raman spectroscopy)을 진행하였다. 이때 사용된 장비는 Burker사의 RFS 100/S 모델을 이용하여 이루어졌다. 분석시 이용된 레이저는 1064 nm의 파장을 갖는 Nd:YAG 레이저였으며, 2 W의 전력으로 분석이 실시되었다. 이러한 Raman 분석은 단일벽 탄소나노튜브에 대해서 두 가지 활성모드를 통한 분석이 이루어졌다. 이는 탄소나노튜브의 흑연화된 정도를 파악할 수 있는 피크가 관찰되는 영역인 $1300\text{ cm}^{-1} \sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 범위의 tangential mode와 단일벽 탄소나노튜브에서만 고유하게 관찰되는 $150\text{ cm}^{-1} \sim 300\text{ cm}^{-1}$ 영역의 radial breathing mode(RBM)이다[19]. 따라서 TEM 분석을 거치지 않고서도 생성되는 튜브가 단일벽 탄소나노튜브인지 아닌지를 판단할 수 있는 유용한 방법으로 널리 사용된다.

마지막으로, 본 연구에 사용된 촉매 금속이 고온의 분위기하에서 화학반응을 거쳐 탄소나노튜브를 형성하는 과정에서 일어나는 내부의 결정구조 변화를 관측하고 성장시킨 탄소나노튜브의 결정질 화합물을 정성적으로 확인하기 위해 X-ray 회절 분석(X-ray diffractometer, XRD)을 진행하였다. 이때 사용된 장비는 Rikaku사의 모델이었으며, 분석은 $10^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위의 영역에서 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

CH₄의 열촉매분해에 의한 촉매 화학기상증착법을 이용하여 비정질 탄소 찌꺼기의 양이 매우 적고 결합이 거의 없는 고품질의 단일벽 탄소나노튜브를 합성하였다. 그림 2는 열화학기상증착 방법으로 합성시킨 탄소나노튜브의 SEM 이미지를 나타낸다. Fe-Mo/MgO촉매에 CH₄의 열촉매분해에 의해서 성장된 탄소나노튜브가 수십 μm 이상의 길이를 가지고 실타래처럼 엉켜있는 것을 볼 수 있다. 탄소나노튜브의 성장온도가 낮을수록 탄소나노튜브 표면에 탄소 파티클 (particle)이나 탄소덩어리가 보이고 성장밀도가 매우 낮아졌다. 성장온도가 높을수록 탄화수소가스로 사용하였던 메탄이 촉매로써의 탄소공급이 제대로 이루어져 탄소나노튜브의 핵생성이 이루어질 수 있었다. 따라서 성장온도가 높을수록 비정질 탄소 찌꺼기가 적게 생성이 되고 수율과 순도가 높은 탄소나노튜브가 합성됨을 입증한다. 그리고 합성된 탄소나노튜브의 수율을 정량화하기 위해 무게이득측정 방법을 사용하였으며 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\text{Carbon deposit} = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{catalyst}}}{W_{\text{catalyst}}} \times 100$$

위의 식에서 W_{total}은 합성 후 최종 생성물의 총무게를 나타내며, W_{catalyst}는 합성 전 사용한 촉매의 무게를 나타내는데, 식에 의해 계산한 결과 탄소나노튜브의 수율은 88.5%였다.

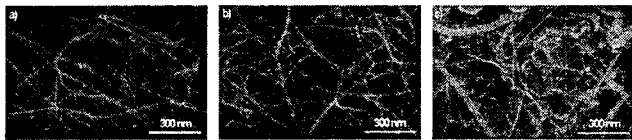


그림 2. 열화학기상증착장치로 합성한 탄소나노튜브의 SEM 이미지 (a) 1000°C (b) 900°C (c) 800°C에서 성장
Fig. 2. SEM images of carbon nanotubes grown by thermal CVD method at (a) 1000°C (b) 900°C (c) 800°C.

그림 3은 1000°C에서 성장시킨 탄소나노튜브의 TGA 분석결과이다. 금속 촉매가 산화됨이 거의 없이 비정질 탄소가 400°C까지 산화되는 것을 볼 수 있으며 450~600°C사이에서 TGA곡선이 급격히 감소되었다. 산화되는 온도를 보면 비정질 탄소는 330°C부근이고 단일벽 탄소나노튜브는 500~600°C, 다중벽 탄소나노튜브는 700°C에서 산화된다고 보고되고 있다[20]. 이 기준에 맞추어 보면, 생성된 물질이 산화됨에 따라 시료의 무게가 감소되는 요인이 단일벽 탄소나노튜브를 포함한 탄소물질들임을 확증할 수 있다. 또한 Fe-Mo/MgO 촉매 위에 CH₄ 가스를 사용해서 촉매화학기상증착법으로 합성된 단일벽 탄소나노튜브의 수율은 TGA 결과에 의하면 약 88%였다. 단일벽 탄소나노튜브의 산화분해 반응 온도는 나노튜브 직경과 튜브 외벽의 결합구조에 강하게 의존하는 것으로 알려져 있다. 직경이 클수록 산화되는 반응온도가 크고, 결합이 적고 고품질일수록 고온이 된다. 연소에 의한 중량감소의 1차 미분곡선(DTG)의 피크 위치가

596.3°C인데 피크 위치가 높을수록 결합이 적고 내열성이 높다. 또 연소에 의한 중량감소의 1차 미분곡선의 피크가 뾰족하고 이 피크의 반치폭(half width)은 100°C정도로 매우 좁음을 알 수 있는데 이것은 합성된 탄소나노튜브가 결합이 적고 직경이 균일하며 고품질의 단일벽 탄소나노튜브가 합성되었음을 나타낸다.

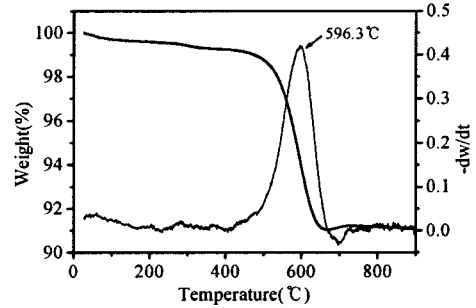


그림 3. 합성된 단일벽 탄소나노튜브의 TGA분석
Fig. 3. TGA analysis of synthesized SWCNTs

그림 4는 1000°C에서 성장시킨 탄소나노튜브에 대한 구조적인 분석결과인 Raman spectrum을 나타낸다. 전반적인 피크의 양상이 단일벽 탄소나노튜브에서만 고유하게 관찰되는 150 cm⁻¹~300 cm⁻¹ 영역의 radial breathing mode(RBM) 피크가 관찰되어 합성된 물질이 단일벽 탄소나노튜브라는 것을 알 수 있었으며 0.41~2.0 nm정도의 균일한 직경을 가지고 있음을 확인하였다. 또한 1590 cm⁻¹ 부근의 전형적인 그래파이트 면(graphite sheet)의 구조를 나타내는 G-band의 피크와 sp²결합의 비정질 탄소 불순물에 의한 특징을 나타내는 1345cm⁻¹ 부근의 D-band의 피크를 볼 수 있었다. 또한 G-band 피크에 비해 D-band 피크가 상대적으로 약하게 나타나는 것으로 보아 합성된 탄소나노튜브의 결정성이 우수한 것으로 판단된다.

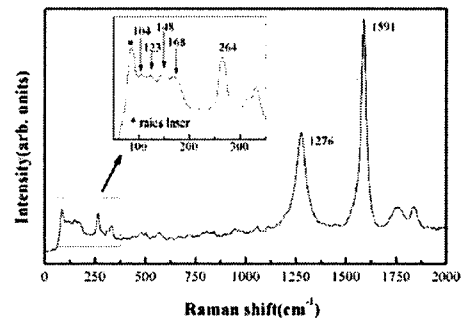


그림 4. 합성된 단일벽 탄소나노튜브의 Raman spectrum
Fig. 4. Raman spectrum of synthesized SWCNTs

그림 5는 합성된 탄소나노튜브에 대한 XRD 패턴 분석결과이다. 전형적인 그래파이트 각인 25.8이 보이는 반면 36.8, 42.9, 62.2, 74.5, 78.3 등의 회절각이 보여 합성이 진행되는 동안 금속 촉매와 약간의 MgO 담지체가 조금은 남아 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나 제거하기 힘든 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 제올라이트(zeolite) 등의 담지체와는 달리

MgO 담지체는 탄소 생성물로부터 단순한 산처리 과정으로 쉽게 제거시킬 수 있어 단일벽 탄소나노튜브를 합성시키고 효과적인 촉매를 제조하기 위한 좋은 담지체이고, 단일벽 탄소나노튜브에 아무런 손상도 주지 않고 산처리에 의해 즉시 용해되어 단일벽 탄소나노튜브의 대량생산에 도움이 되는 일로 여겨졌다[14]. 또한 본 연구에서 단일벽 탄소나노튜브를 고수율로 얻기 위해 철과 몰리브덴을 적절히 섞어서 사용했는데 Fe만 사용했을 때 동일한 합성조건으로 실험을 진행해 보면 단일벽 탄소나노튜브와 함께 다중벽 탄소나노튜브와 같은 원하지 않는 형태의 탄소나노튜브가 생성되었고, Mo만 촉매로 사용했을 때는 탄소나노튜브가 생성되지 않고 비정질 탄소 찌꺼기들만 생성되었다.

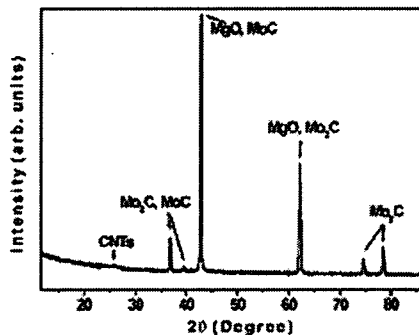


그림 5. 합성한 단일벽 탄소나노튜브의 XRD패턴
Fig. 5. XRD pattern of synthesized SWCNTs

Fe와 Mo 촉매 금속입자를 적정비율(1대0.1 또는 1대0.05)로 담지시켰을 때 균일한 직경을 가진 촉매크기가 형성되어 선택적으로 단일벽 탄소나노튜브를 대량합성 할 수 있었다. Eklund 그룹[21]은 Mo의 역할이 탄소나노튜브를 합성하는 성장온도를 낮춰줄 수 있고, H₂로 촉매를 활성화시키는 필요성을 제거해주고, 단일벽 탄소나노튜브의 수율을 증가시키는데 큰 역할을 한다고 보고되었다. XRD 분석결과 Mo는 Oxide 피크가 나타나지 않았는데 이는 Fe-Mo/MgO 촉매를 제조할 때 촉매 조성비가 Fe:Mo=1:0.05의 무게비로 조성을 했기 때문에 상대적으로 Mo의 양이 적어서 Mo Oxide 피크를 찾을 수가 없었다. 따라서 XRD 패턴으로부터 나타난 금속 산화물형태의 촉매는 large-scale의 단일벽 탄소나노튜브를 합성하는데 있어서 아주 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 Fe과 Mo을 MgO에 담지시켜서 CH₄의 열 촉매분해에 의한 촉매 화학기상증착법을 이용하여 비정질 탄소 찌꺼기의 양이 매우 적고 결함이 거의 없는 고품질의 단일벽 탄소나노튜브를 대량으로 합성하였다. 성장시킨 탄소나노튜브가 주로 16~30 nm의 직경을 가진 단일벽 탄소나노튜브 bundle 구조를 나타내었다. 또한 성장온도가 높을수록 탄소나노튜브의 밀도가 증가하였고 비정질 탄소 찌꺼기와 탄소 파티클(particle)의 형성되지 않았으며 전체 생성물에 대한 단일벽 탄소나노튜브의 선택성이 높았을 뿐 아니라 85%이상의 수율과 고순도의 특성을 가진 단일벽 탄소나

노튜브가 생성되었다. 탄소나노튜브의 합성온도에 따른 Raman 분석 결과를 보면 합성온도가 증가할수록 그래파이트 면(graphite sheet)의 결정정도를 나타내는 G-band의 세기와 합성된 탄소나노튜브의 외벽의 결함이나 비정질의 탄소 물질의 정도를 나타내는 D-band의 세기의 비율이 대체적으로 작아 합성된 단일벽 탄소나노튜브가 결정성이 우수한 특성을 보였고 평균 직경이 0.4~2.0 nm 인 균일한 탄소나노튜브가 합성되었다. 또한 실험에 사용된 MgO 담지체가 고품질, 고순도의 단일벽 탄소나노튜브를 대량으로 합성하는데 유리한 담지체임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl and R. E. Smalley, "C60: buckminsterfullerene", *Nature*, Vol. 318, pp. 162-163, 1985.
- [2] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [3] A. T. hess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, D. T. Colbert, G. Scuseria, D. T. omaneck, J. E. Fisher and R. E. Smalley, "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", *Science*, Vol. 273, pp. 483-487, 1996.
- [4] M. Terrones, N. Grobert, J. Olivares, J. P. Zhang, H. Terrones, K. Kordatos, W. K. Hsu, J. P. Hare, P. D. Townsend, K. Prassides, A. K. Cheetham, H. W. Kroto, D. R. M. Walton, "Controlled production of aligned-nanotube bundles", *Nature*, Vol. 388, pp. 52-55, 1997.
- [5] Y. Y. Fan, H. M. Cheng, Y. L. Wei, G. Su and Z. H. Shen, "The influence of preparation parameters on the mass production of vapor-grown carbon nanofibers", *Carbon*, Vol. 38, pp. 789-795, 2000.
- [6] L. C. Qin, D. Zhou, Krauss and D. M. Gruen, "Growing carbon nanotubes by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, pp. 3437-3439, 1998.
- [7] K. Tanaka, T. Yamabe and K. Fukui, "The Science and Technology of Carbon Nanotubes", CRC Press, p. 149, 1997.
- [8] R. L. V. Wal, T. M. Tichich and V. E. Curtis, "Diffusion flame synthesis of single-walled carbon nanotubes", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 323, pp. 217-223, 2000.
- [9] H. Dai, A. G. Rinzler, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert and R. E. Smalley, "Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 260, pp. 471-475, 1996.
- [10] J. Kong, A. M. Cassell and H. Dai, "Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 292, pp. 567-574, 1998.

- [11] B. C. Satishkumar, A. Govindaraj, R. Sen and C. N. R. Rao, "Single-walled nanotubes by the pyrolysis of acetylene-organometallic mixtures", Chem. Phys. Lett., Vol. 293, pp. 47-52, 1998.
- [12] P. Nikolaev, M. J. Bronikowski, R. K. Bradley, F. Rohmund, D. T. Colbert, K. A. Smith and R. E. Smalley, "Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide", Chem. Phys. Lett., Vol. 313, pp. 91-97, 1999.
- [13] J. -F. Colomer, G. Bister, I. Willems, Z. Konya, A. Fonseca, G. Van Tendeloo and J. B. Nagy, "Synthesis of single-wall carbon nanotubes by catalytic decomposition of hydrocarbons", Chem. Comm., Vol. 15, pp. 1343-1344, 1999.
- [14] E. Flahaut, A. Govindaraj, A. Peigney, Ch. Laurent, A. Rousset and C. N. R. Rao, "Synthesis of single-walled carbon nanotubes using binary (Fe, Co, Ni) alloy nanoparticles prepared in situ by the reduction of oxide solid solutions", Chem. Phys. Lett., Vol. 300, pp. 236-242, 1999.
- [15] A. M. Cassell, J. A. Raymakers, J. Kong and H. Dai, "Large Scale CVD Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes", J. Phys. Chem. B., Vol. 103, No. 31, pp. 684-692, 1999.
- [16] S. C. Lyu, B. C. Liu, T. J. Lee, Z. Y. Liu, C. W. Yang, C. Y. Park and C. J. Lee, "Synthesis of high-quality single-walled carbon nanotubes by catalytic decomposition of C_2H_2 ", Chem. Comm., Vol. 6, pp. 734-735, 2003.
- [17] B. C. Liu, S. C. Lyu, T. J. Lee, S. K. Choi, S. J. Eum, C. W. Yang, C. Y. Park and C. J. Lee "Synthesis of single- and double-walled carbon nanotubes by catalytic decomposition of methane", Chem. Phys. Lett., Vol. 373, pp. 475-479, 2003.
- [18] K. C. Patil, "Advanced ceramics: Combustion synthesis and properties", Bull. Mater. Sci., Vol. 16, pp. 533-541, 1993.
- [19] R. Saito, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, Physical properties of carbon nanotubes, Imperial College Press, pp.183-206, 1998.
- [20] B. Kitiyanan, W. E. Alvarez, J. H. Harwell and D. E. Resasco, "Controlled production of single-wall carbon nanotubes by catalytic decomposition of CO on bimetallic Co - Mo catalysts", Chem. Phys. Lett., Vol. 317, pp. 497-503, 2000.
- [21] A. M. Rao, E. Richter, S. Bandow, B. Chase, P. C. Eklund, K. A. Williams, S. Fang, K. R. Subbaswamy, M. Menon, A. Thess, R. E. Smalley, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, "Diameter-Selective Raman Scattering from Vibrational Modes in Carbon Nanotubes", Science, Vol. 275, pp. 187-191, 1997.

저 자 소 개

김 종 식 (金鍾植)



1975년 11월 26일생. 2001년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2004년~현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정

Tel : 02-812-9681

Fax : 02-812-9651

E-mail : jskim@nano.cau.ac.kr

김 관 하 (金瓏河)



1976년 3월 23일생. 2002년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전자전기공학부 졸업(석사) 2004년~현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정

Tel : 02-812-9681

Fax : 02-812-9651

E-mail : kim@gwanha.com

김 창 일 (金昌日)



1960년 7월 13일생. 1984년 중앙대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~현재 중앙대 전자전기공학부 부교수

Tel : 02-820-5334

Fax : 02-812-9651

E-mail : cikim@cau.ac.kr