

|                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                       |                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                                                           | (19) 대한민국특허청(KR)<br>(12) 공개특허공보(A)                                                                                                                                    | (11) 공개번호 10-2011-0075653<br>(43) 공개일자 2011년07월06일 |
| (51) Int. Cl.<br><i>C23C 16/26</i> (2006.01) <i>B82B 3/00</i> (2006.01)<br>(21) 출원번호 10-2009-0132159<br>(22) 출원일자 2009년12월28일<br>심사청구일자 없음 | (71) 출원인<br>고려대학교 산학협력단<br>서울 성북구 안암동5가 1<br>(72) 발명자<br>김웅<br>서울특별시 동대문구 제기동 153 벽산아파트<br>106-1105<br>김병우<br>경기도 고양시 일산동구 백석동 밀레니엄리젠시<br>1404호<br>(74) 대리인<br>특허법인충현 |                                                    |

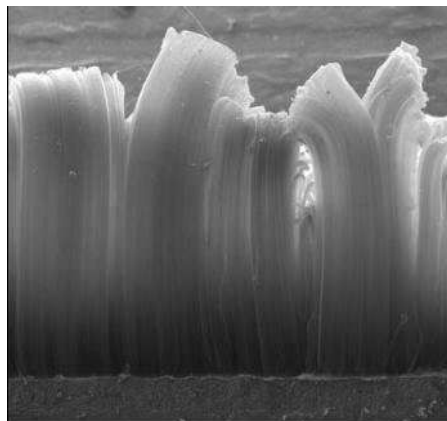
전체 청구항 수 : 총 11 항

#### (54) 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법 및 이에 의해 제조된 탄소나노튜브

##### (57) 요약

본 발명은 탄소나노튜브를 제조하는 방법 및 이에 의해 제조된 탄소나노튜브에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 스테인리스강 상에 금속이중층을 증착하는 단계; 상기 촉매가 증착된 스테인리스강 기판을 알루미늄 보트에 올린 후 퍼니스 장치의 퀴즈 튜브 중앙에 놓는 단계; 상기 장치 내부에 수소와 아르곤을 흘려주면서 튜브의 온도를 750 ~ 850 ℃까지 가열하는 단계; 상기 온도가 750 ~ 850 ℃에 이르면 탄소원과 함께 물(H<sub>2</sub>O)을 공급하여 탄소나노튜브를 성장시키는 단계;를 포함하는 것이 특징이며, 이에 따라 스테인리스 기판 상에 고밀도의 수직 정렬된 탄소나노튜브를 합성하여 스테인리스강의 전기적 특성을 향상시킬 수 있었다.

**대표도** - 도1b



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20090081507

부처명 한국과학재단

연구관리전문기관

연구사업명 미래유망파이오니어사업

연구과제명 자성천이제어와 영속발광이 가능한 복합기능 마그네틱-포토닉 나노결정 개발

기여율

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2009년 03월 01일 ~ 2010년 02월 28일

---

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

스테인리스강 상에서 화학기상증착법을 통해 탄소나노튜브를 제조하는 방법에 있어서,

스테인리스강 상에 금속이중층을 증착하는 단계;

상기 촉매가 증착된 스테인리스강 기판을 알루미늄 보트에 올린 후 퍼니스 장치의 퀴즈 튜브 중앙에 놓는 단계;

상기 장치 내부에 수소와 아르곤을 흘려주면서 튜브의 온도를 750 ~ 850℃까지 가열하는 단계;

상기 온도가 750 ~ 850℃에 이르면 탄소원과 함께 물(H<sub>2</sub>O)을 공급하여 탄소나노튜브를 성장시키는 단계;를 포함하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 금속이중층은 알루미늄(Al)층과 철(Fe)층으로 이루어진 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 3

제1항에 있어서,

상기 수소와 아르곤의 유속은 각각 75 ~ 125 sccm 및 100 ~ 150 sccm 인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 4

제1항에 있어서,

상기 탄소원은 에틸렌인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 에틸렌의 유속은 25 ~ 75 sccm인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 6

제1항에 있어서,

상기 물은 버블러를 통과하는 아르곤을 통해 공급되는 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 7

제6항에 있어서,

상기 아르곤의 유속은 0.5 ~ 2 sccm인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 8

제1항에 있어서,

상기 탄소나노튜브는 상기 스테인리스강 기판에 수직정렬되는 것을 특징으로 하는 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

### 청구항 9

제1항에 있어서,

상기 수직정렬된 탄소나노튜브의 길이는 300 ~ 600  $\mu\text{m}$ 인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

#### 청구항 10

제1항에 있어서,

상기 성장된 탄소나노튜브의 직경은 10nm ~ 30 nm인 것을 특징으로 하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법.

#### 청구항 11

제1항에 있어서,

물을 이용한 화학기상증착법을 통해 성장되어, 수직정렬된 탄소나노튜브를 포함하는 스테인리스강.

## 명세서

### 발명의 상세한 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 탄소나노튜브를 제조하는 방법 및 이에 의해 제조된 탄소나노튜브에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 스테인리스강 상에서 화학기상증착법을 이용하여 탄소나노튜브를 제조하는 방법 및 이에 의해 제조된 탄소나노튜브에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 스테인리스강 등의 전도성 기관의 전기화학적 특성은 탄소나노튜브와의 결합을 통해 크게 향상되어 여러 곳에 적용될 수 있다. 탄소나노튜브는 뛰어난 전기적 특성, 화학적 안정성, 기계적 강도, 넓은 표면적 등의 특성으로 인해 연료전지, 리튬이온전지, 슈퍼캐패시터, 바이오 센서 등에 이용될 수 있는 물질로 각광받고 있다. 반면에 스테인리스강은 낮은 가격과 가공이 용이하다는 점 등으로 인해 좋은 전도성 기관으로 각광받고 있다. 스테인리스강과 탄소나노튜브를 결합시키면 탄소나노튜브로 인한 표면적 증대, 전극 물질로서 전자 이동도의 증가 등으로 인해 전기화학적 특징이 증대될 수 있다.

[0003] 탄소나노튜브와 스테인리스강을 잘 접촉시킬 수 있으면 탄소나노튜브와 접촉된 부분의 스테인리스강 부분은 전기화학적 특성이 증대되며 이는 스테인리스강 위에서 탄소나노튜브를 직접 성장시킴으로서 이루어질 수 있다. 화학기상증착법을 이용해 기관 위에서 탄소나노튜브를 직접 성장시키는 방법은 미리 성장된 탄소나노튜브를 분산시킨 용액을 이용해 기관에 붙이는 방법에 비해 더 뛰어난 질과 높은 밀도를 기대할 수 있다. 탄소나노튜브를 용액에 분산시키려면 산처리과정을 거쳐야 하는데 이는 탄소나노튜브의 본질적인 우수한 성질을 파괴할 수 있다. 반면에 직접 기관위에서 성장시키면 산처리과정을 피할 수 있기 때문에 본질적인 우수한 탄소나노튜브의 성질을 유지할 수 있다. 게다가 분산된 뒤 기관에 증착된 탄소나노튜브는 그 방향이 기관과 나란한 데 비해 기관에 수직 성장된 탄소나노튜브는 더 높은 표면적을 기대할 수 있다.

[0004] 간편하고 신뢰할 수 있는 방법으로 스테인리스강 기관 위에서 직접 성장된 탄소나노튜브는 다양한 분야에 적용을 할 때 유리하다. 금속 기관에서 탄소나노튜브를 직접 성장시키는 방법은 이전에 이미 연구가 되었지만 이 방법들은 제한적이거나 복잡한 과정을 거친다. 예를 들어 Hiraoka 등이 전도성 금속 호일 위의 탄소나노튜브를 합성하였지만 이 방법은 탄소나노튜브와 기관 사이에 비전도성 물질인 알루미늄을 포함한다. Talapatra와 masarapu등은 기상촉매증착법을 이용하여 금속위에 직접 탄소나노튜브를 합성하였으나 이 방법은 가연성, 휘발성 액체인 자일렌을 포함하기 때문에 복잡한 셋업이 필요하며 또한 기화를 시키기 위해 온도를 올려야 한다.

[0005] 따라서 이러한 문제점을 해결하고, 신뢰할 수 있는 방법으로 양질의 탄소나노튜브를 스테인리스강 위에서 직접 수직성장시킬 수 있는 방법을 개발할 필요가 있다.

#### 발명의 내용

### 해결 하고자하는 과제

- [0006] 본 발명이 해결하고자 하는 첫 번째 기술적 과제는 스테인리스강 상에 화학기상증착방법을 통해 수직 정렬된 탄소나노튜브를 제조하는 방법을 제공하는 것이다.
- [0007] 또한 본 발명이 해결하고자 하는 두 번째 기술적 과제는 상기 제조 방법에 의해 성장된 기관 상에 수직정렬된 고밀도 탄소나노튜브를 포함함으로써 전기적 특성이 향상된 스테인리스강을 제공하는 것이다.

### 과제 해결수단

- [0008] 상기 첫 번째 기술적 과제를 해결하기 위하여, 스테인리스강 상에서 화학기상증착법을 통해 탄소나노튜브를 제조하는 방법에 있어서, 스테인리스강 상에 금속이중층을 증착하는 단계; 상기 촉매가 증착된 스테인리스강 기관을 알루미늄나 보트에 올린 후 퍼니스 장치의 퀴즈 튜브 중앙에 놓는 단계; 상기 장치 내부에 수소와 아르곤을 흘려주면서 튜브의 온도를 750 ~ 850 °C까지 가열하는 단계; 상기 온도가 750 ~ 850 °C에 이르면 탄소원과 함께 물(H<sub>2</sub>O)을 공급하여 탄소나노튜브를 성장시키는 단계;를 포함하는 스테인리스강 상에서 탄소나노튜브를 제조하는 방법을 제공한다.
- [0009] 본 발명의 일실시예에 따르면, 상기 금속이중층은 알루미늄(Al)층과 철(Fe)층으로 이루어진 것이 바람직하다.
- [0010] 또한 본 발명의 다른 일실시예에 따르면, 상기 수소와 아르곤의 유속은 각각 75 ~ 125 sccm 및 100 ~ 150 sccm인 것이 바람직하다.
- [0011] 또한 본 발명의 다른 일실시예에 따르면, 상기 탄소원은 에틸렌인 것이 바람직하며, 에틸렌의 유속은 25 ~ 75 sccm인 것이 바람직하다.
- [0012] 또한 본 발명의 다른 일실시예에 따르면, 물은 버블러를 통과하는 아르곤을 통해 공급되는 것이 바람직하고, 아르곤의 유속은 0.5 ~ 2 sccm인 것이 바람직하다.
- [0013] 또한 본 발명의 다른 일실시예에 따르면, 상기 탄소나노튜브는 상기 스테인리스강 기관에 수직정렬되며, 수직정렬된 탄소나노튜브의 길이는 300 ~ 600 μm이고, 성장된 탄소나노튜브의 직경은 10 nm ~ 30 nm이다.
- [0014] 상기 두 번째 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 물을 이용한 화학기상증착법을 통해 성장되어, 수직정렬된 탄소나노튜브를 포함하는 스테인리스강을 제공한다.

### 효 과

- [0015] 본 발명에 따르면 소량의 물을 첨가하여 화학기상증착방법으로 스테인리스강 상에서 고밀도로 기관상에 탄소나노튜브를 수직 성장시킬 수 있다. 이와 같이 성장된 탄소나노튜브는 길이 우수하고, 전도성 기관과 전기적으로 잘 연결되어 있으며, 전자-전자 이동 효율도 이상적인 값에 가까워서, 전기화학적 에너지 변환이나 저장 등에 적용될 수 있다.

### 발명의 실시를 위한 구체적인 내용

- [0016] 본 발명에 따른 스테인리스강 상에서 화학기상증착법을 통해 탄소나노튜브를 제조하는 방법은 스테인리스강 상에 금속이중층을 증착하는 단계; 상기 촉매가 증착된 스테인리스강 기관을 알루미늄나 보트에 올린 후 퍼니스 장치의 퀴즈 튜브 중앙에 놓는 단계; 상기 장치 내부에 수소와 아르곤을 흘려주면서 튜브의 온도를 750 ~ 850 °C까지 가열하는 단계; 상기 온도가 750 ~ 850 °C에 이르면 탄소원과 함께 물(H<sub>2</sub>O)을 공급하여 탄소나노튜브를 성장시키는 단계;를 포함하는 것이 특징이다.
- [0017] 본 발명의 일구현예에 따르면, 상기 금속이중층은 알루미늄(Al)층과 철(Fe)층으로 이루어진 것이 바람직하다.
- [0018] 또한 본 발명의 다른 일구현예에 따르면, 상기 수소와 아르곤의 유속은 각각 75 ~ 125 sccm 및 100 ~ 150 sccm인 것이 바람직하다.
- [0019] 또한 본 발명의 다른 일구현예에 따르면, 상기 탄소원은 에틸렌인 것이 바람직하며, 에틸렌의 유속은 25 ~ 75 sccm인 것이 바람직하다.
- [0020] 또한 본 발명의 다른 일구현예에 따르면, 물은 버블러를 통과하는 아르곤을 통해 공급되는 것이 바람직하고, 아르곤의 유속은 0.5 ~ 2 sccm인 것이 바람직하다.

[0021] 또한 본 발명의 다른 일구현예에 따르면, 상기 탄소나노튜브는 상기 스테인리스강 기판에 수직정렬되며, 수직정렬된 탄소나노튜브의 길이는 300 ~ 600  $\mu\text{m}$ 이고, 성장된 탄소나노튜브의 직경은 10nm ~ 30 nm이다.

[0022] 한편 본 발명에 따른 스테인리스 강은 물을 이용한 화학기상증착법을 통해 성장되어, 수직정렬된 탄소나노튜브를 포함하는 것이 특징이다.

[0023] 이하, 바람직한 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명하지만, 본 발명이 이에 의해 제한되는 것은 아니다.

#### [0024] 실시예 1: 탄소나노튜브의 합성

[0025] 스테인리스강 기판(304 스테인리스강, 1cm X 1cm 크기) 상에서 물이 첨가된 화학기상증착법을 이용해 탄소나노튜브를 합성하였다. 실험에 사용된 모든 기판은 사용 전에 아세톤, 이소프로판올의 순서로 각각 5분간 초음파처리하였다. 전자빔 증착기를 이용해 증착된 10나노미터 두께의 알루미늄 층과 1나노미터 두께의 철 층을 촉매로서 사용하였다.

[0026] 기판은 알루미늄 보트에 올려진 채로 1인치 지름의 쿼츠 튜브 가운데에 놓여졌다. 튜브는 수소와 아르곤이 각각 100sccm(standard cubic centimeter per minute), 125sccm 흐르는 가운데 퍼니스를 통해 800도까지 가열하였다. 반응 온도에 도달하면 50sccm의 에틸렌을 탄소 소스로서 추가로 공급하였다. 동시에 소량의 물을 버블러를 통과하는 0.75sccm의 아르곤을 통해 공급하였다.

[0027] 20분간 탄소나노튜브를 성장시킨 후 에틸렌과 수소 공급을 차단하고, 버블러를 통과하는 0.75sccm의 아르곤과 원래 공급되고 있던 125sccm의 아르곤은 그대로 두었다. 5분 뒤 버블러를 통과하는 0.75sccm의 아르곤 공급을 차단하고, 원래 공급되던 125sccm의 아르곤은 그대로 둔 채로 퍼니스의 온도를 상온으로 냉각시켰다.

[0028]

#### [0029] 비교예 2: 스테인리스강의 열처리

[0030] 스테인리스강 기판은 탄소나노튜브 합성 방법과 동일한 온도에 노출되며 에틸렌을 제외하고는 가스 분위기도 동일하게 해주었다. 알루미늄/철 금속이중층은 증착하지 않았다.

#### [0031] 시험예 1: 전기적 특성 측정

[0032] 전기적 특성 측정은 HP4145B 반도체 파라미터 측정기(HP4145B semiconductor parameter analyzer)와 프로브 스테이션(probe station)을 통해 전기적 특성을 측정하였다. 프로브 스테이션의 한 쪽 팁은 스테인리스강 기판에 위치시키고, 나머지 한 쪽 팁은 탄소나노튜브보다 살짝 위에 위치시켰다. 전기전도성은 탄소나노튜브보다 살짝 위에 있는 팁이 마이크로메니퐁레이터(micromanipulator)를 통해 천천히 하강하는 가운데 측정하였다. 전기적 특성 조사 이후에 팁은 탄소나노튜브 부분에서 스테인리스강이 노출된 부분으로 기판과 평행하게 이동시켰다. 작업을 하는 동안 탄소나노튜브는 굽히지 않았으며, 일단 팁이 탄소나노튜브 부분을 떠난 이후에는 어떤 전기적 신호도 감지되지 않았다.

#### [0033] 시험예 2: 순환 전압 전류(cyclic voltammetry, CV)

[0034] 전기화학 분석장치(electrochemistry analyzer) (제조사: Ivium technology, compact stat 장비 사용)를 이용한 3전극 셋업을 통해 순환 전압 전류를 측정하였다. 스테인리스강 위에 직접 성장된 탄소나노튜브, 열처리된 스테인리스강, 아무런 처리가 되지 않은 스테인리스강이 각각 작업 전극(working electrode)으로 이용되었으며 순환 전압 전류 실험의 결과가 서로 비교되었다.

[0035] 백금 망사와 은/염화은 전극(제조사: CH instruments, 제품명 CHI111, 농도 3M KCl)이 각각 상대 전극(counter electrode)과 기준전극(reference electrode)으로 사용되었다. 2mM 농도의  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 가 산화-환원 화학종으로 사용되었으며 1M 농도의  $\text{KNO}_3$ 가 전해액으로 사용되었다. 순환 전압 전류법은 50mV/s의 전위변환 속도를 이용해 수행되었다.

[0036] **시험결과: 전기화학적 특성**

[0037] 도 1a에는 물이 첨가된 화학기상증착법을 이용해 스테인리스강 기판 위에서 균일하게 성장된 탄소나노튜브의 사진이 나타나있다. 알루미늄/철 촉매층은 스테인리스강 기판 중 절반에만 증착되었으며 뾰족한 탄소나노튜브는 촉매층이 증착된 곳에서만 발견되었다. 주사전자현미경 이미지는 탄소나노튜브의 길이가 약 400 마이크로미터이며 기판위에 수직 성장되었다는 것을 보여준다.

[0038] 또한 도 1b에 의해 탄소나노튜브가 개별적으로 잘 정렬되어 있음을 확인할 수 있다. 도 1c의 투과전자현미경 이미지는 탄소나노튜브의 지름이 대략 10nm정도라는 것을 보여주며, 도 1d의 라만 스펙트럼은 G-band와 D-band의 피크 비율이 약 3:1이며 이는 탄소나노튜브의 성질이 만족할만하다는 것을 보여준다.

[0039] 탄소나노튜브가 수직하게 잘 성장되기 위해서는 물의 첨가와 알루미늄/철 금속이중층 둘 다 중요하다. 소량의 물이 화학기상증착과정 동안 첨가되면 이 물이 약한 산화제로 작용하여 촉매가 오염되는 것을 막아주며, 결과적으로 탄소나노튜브의 성장 효율이 크게 좋아진다.

[0040] 도 2a와 2b는 화학기상증착과정 동안 소량의 물이 첨가되어 밀도있게 잘 정렬되어 자란 탄소나노튜브의 측면도와 사시도를 보여주는 사진을 넓은 범위에서 찍은 것이다. 성장속도는 약 분당 20  $\mu\text{m}$  정도이다. 반면에 화학기상증착과정 동안 물이 첨가되지 않은 탄소나노튜브는 상대적으로 짧으며 (< 50  $\mu\text{m}$ ) 길이와 밀도가 균일하지 않다. 게다가 철 층과 기판 사이에 개재된 알루미늄 층도 중요한 역할을 한다. 알루미늄 층이 없이 1 nm 두께의 철 층만 사용하였을 때 탄소나노튜브의 수율은 매우 낮았으며, 고밀도의 탄소나노튜브가 성장하는 대신 도 2e에서 보여주듯이 방향성 없이 저밀도의 탄소나노튜브가 성장된다. 이는 금속이중층이 철만 사용했을 때보다 탄소나노튜브 성장을 위해 더 효율이 높다는 것을 입증하는 것이다.

[0041] 탄소나노튜브가 스테인리스강과 전기적으로 잘 결합되어 있다는 것을 증명하기 위해 전기적 특성 조사가 이루어졌으며, 측정에 사용된 구성은 도 3a에 표시되어 있다. 도 2에서 보여준 길이가 긴, 고밀도의 수직 정렬된 탄소나노튜브는 이러한 측정이 가능하게 한다. 전압과 전류는 선형으로 비례하며 이는 만족할만한 수준의 전기적 접촉이 이루어졌다는 것을 의미한다. 측정된 저항은 약 640  $\Omega$  였다.

[0042] 더욱이 스테인리스강 위의 탄소나노튜브는 산화환원시 발생하는 전류나 전자기동도 등의 전기화학적 특성을 향상시킨다. 순환 전압 전류 측정 과정동안 탄소나노튜브-스테인리스강, 열처리된 스테인리스강, 아무런 처리가 되지 않은 스테인리스강 등이 각각 작업 전극(working electrode)으로 쓰였으며 탄소나노튜브의 역할을 보여주기 위해 도 3b에서 그 결과가 서로 비교되었다. 우선 우리는 용액과 스테인리스강 사이의 계면에서 전자기동도가 많이 나쁘다는 것을 발견하였다. 아무런 처리가 되지 않은 스테인리스강 기판에서는 -0.1~0.5V의 전위 범위에서 뚜렷한 산화-환원 전류 피크를 발견할 수 없었다.

[0043] 다음으로 우리는 열처리를 통해 스테인리스강 기판의 전기화학적 특성이 좋아진다는 것을 발견하였다. 산화-환원 전류 피크의 전위차(E)는 약 150mV였다. 마지막으로 탄소나노튜브가 합성된 스테인리스강 기판에서는 피크 전류의 세기와 피크 전위의 차 등의 전기화학적 특성이 모두 좋아진다는 것을 발견하였다. 자세히 말하면 산화-환원 전류 신호는 열처리된 스테인리스강 기판에 비해 약 4배가 되었으며 산화-환원 전류 피크의 전위차는 약 60mV로 감소하였다. 스테인리스강 위에서 수직 성장된 탄소나노튜브 중 전기화학 반응(산화-환원)에 관여하는 면적은 약  $2.33\text{cm}^2$ 으로 계산되며 이는 스테인리스강 위에서 방향성 없이 합성된 탄소나노튜브나 열처리된 스테인리스강에 비해서 각각 2배, 5배 증대된 것이다.

[0044] 전기화학반응에 관여하는 면적은 Randels-sevick 식을 이용해서 계산하였으며 그 식은 다음과 같다.

[0045] 
$$I_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A C D^{1/2} \nu^{1/2}$$

[0046] 상기 식에서, I는 전류, n은 산화-환원에 참여하는 전자의 개수, A는 전극의 면적, C는 산화-환원 물질의 농도, D는 확산계수,  $\nu$ 는 전위변환속도이다. 방향성 없이 스테인리스강에서 합성된 탄소나노튜브의 전기화학반응에 참여하는 표면적의 넓이는 Yun의 논문에서 합성된 방향성 없이 스테인리스강에서 성장된 탄소나노튜브를 이용한 결과값 중 가장 높은 값을 사용하였다. (Y. Yun, R. Gollapudi, V. Shanov, M. J. Schulz, Z. Y. Dong, A. Jazieh, W. R. Heineman, H. B. Halsall, D. K. Y. Wong, A. Bange, Y. Tu, S. Subramaniam, J. Nanosci. Nanotechnol. 7, (2007), 891-897.)

[0047] 수직 성장된 스테인리스강 위의 탄소나노튜브를 이용한 실험의 결과는 단지 탄소나노튜브가 존재하는 것 뿐 아니라 그 정렬된 상태도 산화환원반응에 참여하는 면적을 증대시킨다는 것을 알려주며, 또한 전극의 면적 증대뿐만 아니라 전하이동도도 효과적으로 개선된다는 것을 알려준다. 또한 산화환원반응에 참여하는 면적의 증대는 탄소나노튜브와 용매의 접촉부분의 개선을 통해 더 증대될 수 있다.

[0048] 본 발명자는 화학기상증착방법 동안 소량의 물을 첨가함으로써 탄소나노튜브가 성공적으로 합성될 수 있다는 것을 증명하였다. 탄소나노튜브는 고밀도로 기판상에 수직 성장하였다. 투과전자현미경은 탄소나노튜브의 지름이 약 10나노미터라는 것을 알려주었다. 또한 라만 스펙트럼에서의 G band와 D band의 비율이 약 3:1이라는 것은 탄소나노튜브의 질이 만족할만하다는 것을 의미한다.

[0049] 또한 탄소나노튜브는 전도성 기판과 전기적으로 잘 연결되어 있으며 이는 직류 전압-전류 측정과 순환 전압 전류 측정을 통해 증명되었다. 전자 이동 효율도 거의 이상적인 값(ideal value, ~60mV)에 가깝다는 것이 확인되었다. 본 발명에 따라 스테인리스강 상에서 합성된 탄소나노튜브와 이를 통한 전기화학적 특성의 증가는 전기화학적 에너지 변환이나 저장 등에 적용될 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

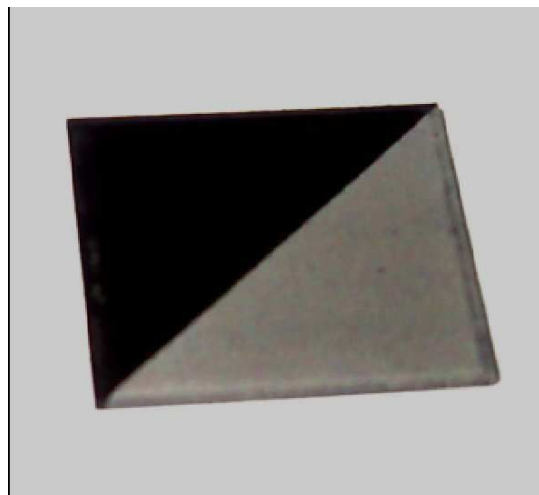
[0050] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 스테인리스강 기판(SS304, 1 cm by 1 cm)의 사진이며, 도 1b는 스테인리스강 상에서 성장된 수직정렬된 탄소나노튜브의 단면도이고, 내부 사진은 SEM 이미지이다. 또한 도 1c는 탄소나노튜브의 TEM 이미지이고, 도 1d는 탄소나노튜브의 라만 스펙트럼이다.

[0051] 도 2는 Al/Fe 촉매의 존재하에 물을 이용하여 화학기상증착법에 의해 성장시킨 탄소나노튜브의 (a) 단면도와 (b) 사시도이다. 또한 (c)는 Al/Fe 촉매는 사용했지만 물을 사용하지 않고 성장시킨 탄소나노튜브의 (c) 단면도와 (d) 정면도이다. (e)는 Al층 없이 Fe층만 증착하고 물을 이용하여 화학기상증착법으로 탄소나노튜브를 성장시킨 경우를 보여주는 사진이다.

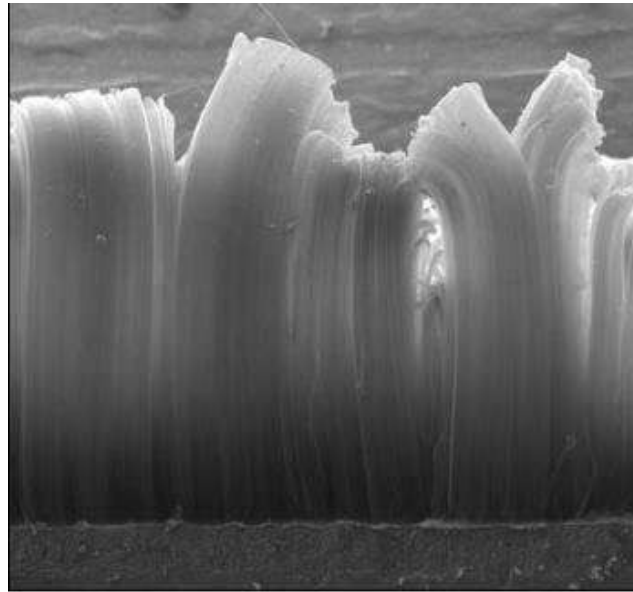
[0052] 도 3(a)는 순환전류전압 측정을 보여주는 그래프로서, 내부에 구성도가 나타나있다. (b)는 탄소나노튜브가 성장된 스테인리스강, 열처리된 스테인리스강 및 아무런 처리가 되지 않은 스테인리스강의 순환 전압 전류 측정 결과 그래프이다.

### 도면

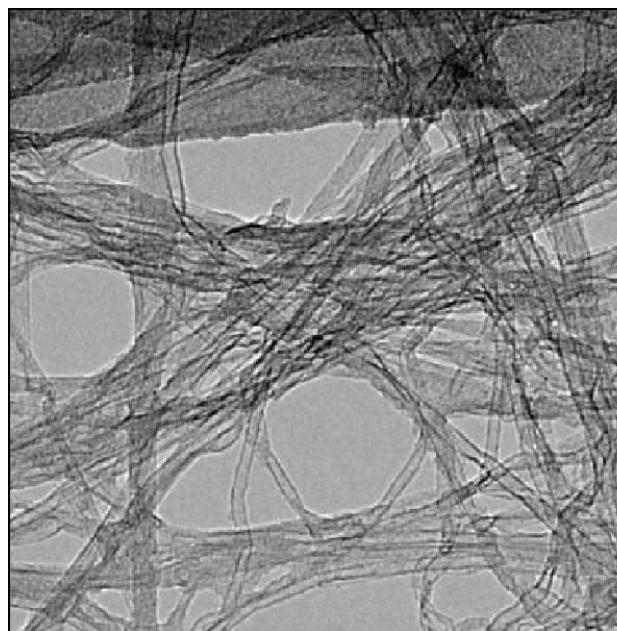
#### 도면1



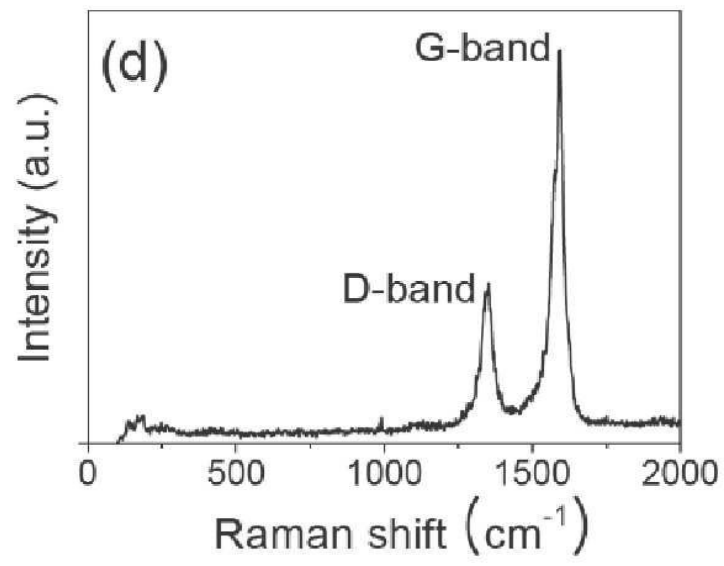
도면1b



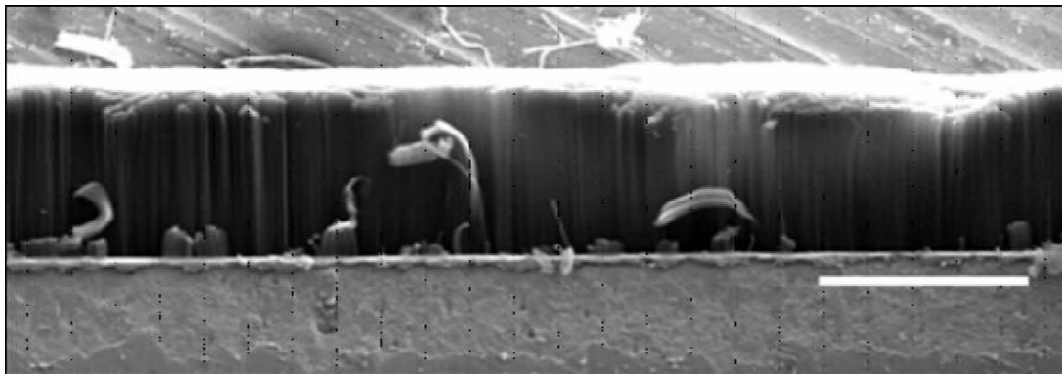
도면1c



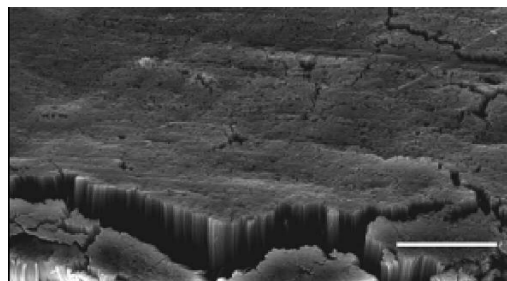
도면1d



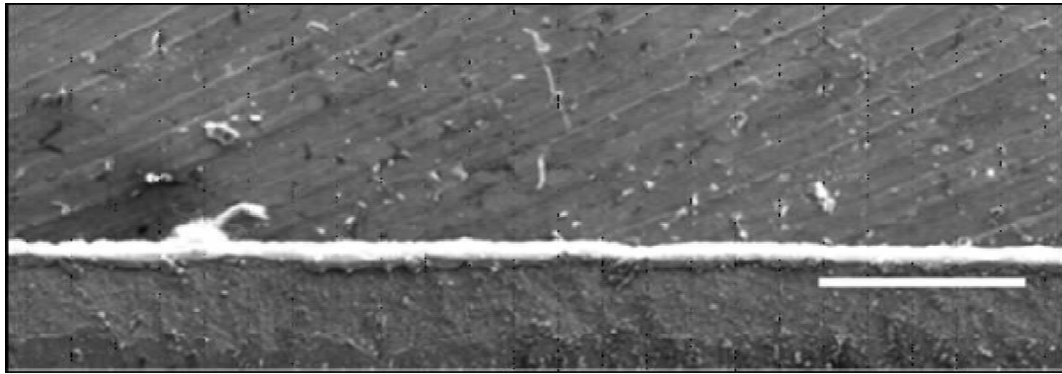
도면2a



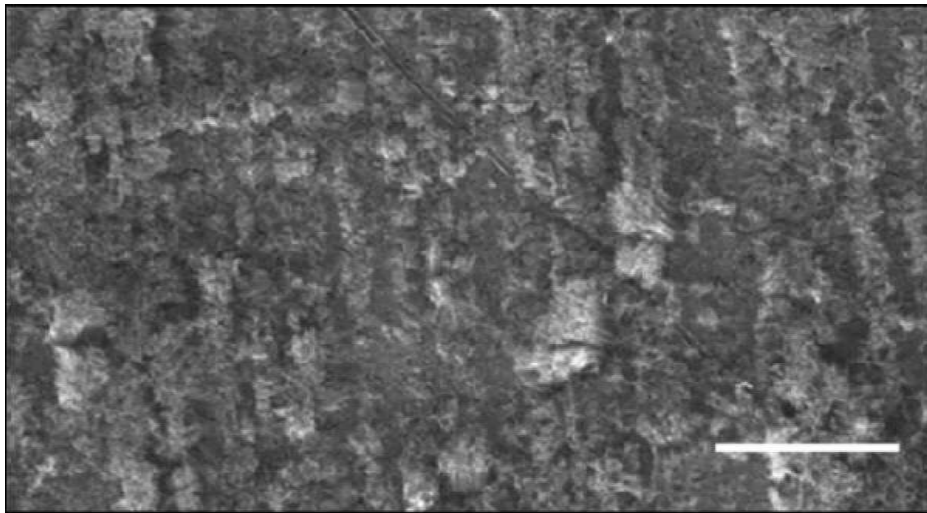
도면2b



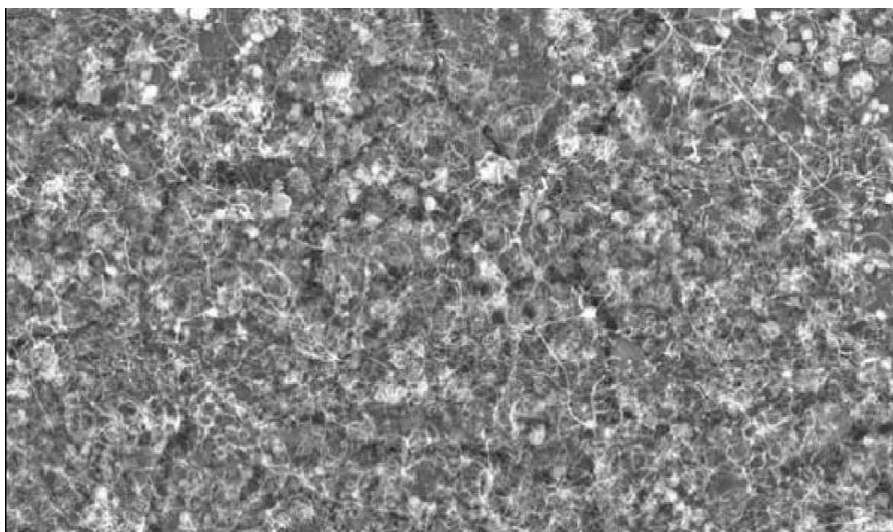
도면2c



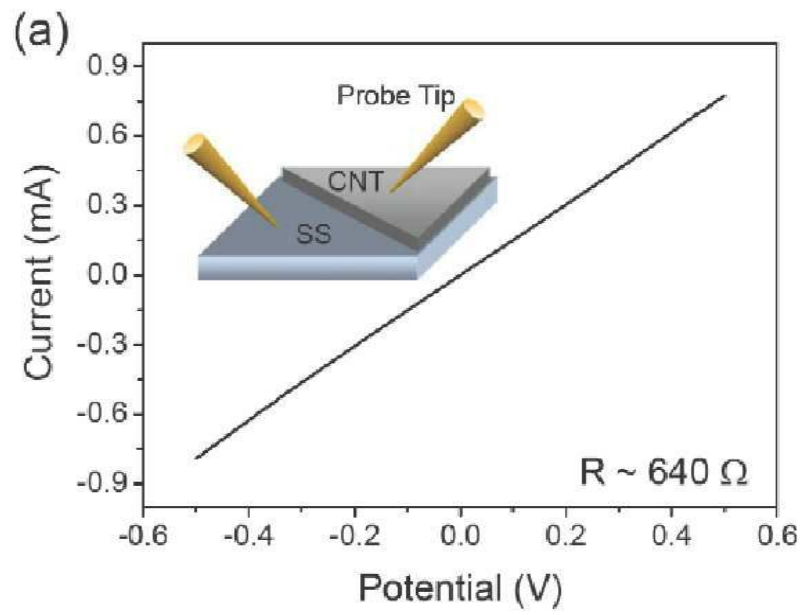
도면2d



도면2e



도면3a



도면3b

