

탄소나노소재의 제조와 응용전망

조권구 · 안효준 · 김기원 · 안인섭
경상대학교 공과대학 재료공학부

1. 서 론

21세기가 시작되면서 재료분야에서는 나노소재의 제조와 응용에 관한 것이 단연 최대의 화제였다. 이들 나노소재중에서도 탄소나노소재는 물리적·기계적 특성이 우수하면서도 다른 나노소재에 비해 화학적으로 매우 안정하다는 장점 때문에 가장 큰 주목을 받았다. 물론 탄소나노소재가 개발된 것은 최근이 아니며 아주 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔으나 그 응용가능성이 크게 대두된 것이 최근이라 할 수 있다.

21세기 3대 탄소나노소재를 꼽는다면 플러렌(fullerene),¹⁾ 탄소나노튜브(carbon nanotubes)²⁾ 그리고 탄소나노섬유(carbon nanofiber or graphitic nanofiber)³⁾가 그것이다. 이 세 물질들은 동일한 원자구조(sp²)를 가지고 있으나 그 외형적인 구조가 다르기 때문에 서로 다른 명칭을 가지고 있으며 각 물질의 특성에 차이가 있어 응용분야도 조금씩 다르다. 그림 1에 세 물질의 외형적인 구조를 나타내었다. 플러렌은 탄소 60개가 모여 축구공 형상을 이루고 있으며, 탄소나노튜브는 graphene sheet가 이음매 없이 밀려 튜브모양의 형상을 이루고 있는데 이 튜브가 하나일 경우를 단일벽 탄소나노튜브(single walled carbon nanotube)라 하고 2개 이상의 튜브가 밀려 있는 경우를 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube)라 한다. 탄소나노섬유는 외형적인 형상과 미세구조에 따라 명칭이 다르다. 외형적인 형상으로 구분으로는 straight, spiral, helical 그리고 branched type이 있고 미세구조에 따른 명칭으로는 herringbone, twisted, platelet 그리고 ribbon-like type이 있다. 그림 1(c)는 외형적으로는 straight type이고 미세구조 측면에서는 herringbone type을 갖는 대표적인 탄소나노섬유의 구조이다. 그림에서 보듯이

graphene sheet가 섬유축과 일정 각도를 가지면서 배열되어 있으며, 이로 인해 graphene sheet의 edge면이 표면으로 향해 있다는 것이 큰 특징이며, 탄소나노섬유는 대부분 이와 같은 특징적인 미세구조를 가지고 있다.

뚜렷한 구분을 하는 것은 어렵지만 전체적으로 평가하였을 때 나노소재의 제조와 응용부분에서 가장 앞선 국가로는 일본을 꼽는다. 최근 니혼케이자이 신문 보도에 따르면⁴⁾ 일본 기업의 절반정도가 NT 투자계획을 갖고 있는 것으로 나타났으며, 그 중 22%는 이미 관련 사업을 시작한 상황이라고 한다. 또한 그 신문에 따르면 10년 뒤엔 NT시장규모가 현재의 철강시장 규모(110조원)와 비슷한 수준이 된다는 것이다. 더 흥미가 있는 것이 NT연구를 잘하는 일본기업의 순위이며, 그 순위를 표 1에 나타내었다. 표에서 보듯이 순위 5위내에 탄소나노소재와 관련된 것이 3개 업체나 들어 있다는 것이다. 이것은 탄소나노소재가 큰 경제적 부가가치를 가지고 있다는 것을 암시하는 것이며, 실제로 어떤 나노소재보다도 탄소나노소재는 그 응용분야가 매우 다양하다. 그러나 탄소나노소재를 상업화하기 위해서는 대량생산과 고른 분산 그리고 대량생산할 때 탄소나노소재의 결정성 개선 등 해결해야 할 크고 작은 문제가 여전히 남아 있다.

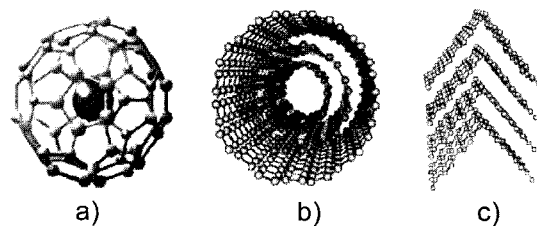


그림 1. 대표적인 탄소나노소재의 구조. a) 플러렌 b) 탄소나노튜브 c) 탄소나노섬유

표 1. NT연구 잘하는 일본 기업 순위

순위	회사	주요 NT 연구
1	NEC	탄소나노튜브 활용법 개척, 연료 전지 연구에 NT 응용
2	미쓰이	벤치기업 활용해 광범위한 분야 연구
	히타치	다양한 분야의 NT관련 특허 많음
4	미쓰비시 화학	플러렌 양산기술, 산학교류 적극적
5	미쓰비시 상사	탄소나노튜브 양산
7	시마즈제작소	단백질 분석기기, 바이오칩개발
10	도요타자동차	연료전지분야 선두주자

따라서 본 고에서는 지금까지 발표된 탄소나노소재의 제조 방법과 그 응용분야를 소개하고 앞으로 개선해야 할 문제점을 소개하고자 한다.

표 2. 탄소나노소재의 제조방법

탄소나노소재	제조방법	제조방법의 개요
플러렌	Arc-discharge	헬륨가스 속에서 흑연전극의 아크방전에 의해 제조
	Arc-discharge	헬륨가스 속에서 흑연전극의 아크방전에 의해 제조, 양극흑연에 Fe, Ni, Co등의 분말을 혼합하여 사용
	Laser Vaporization	그래파이트 타겟에 레이저를 조사하여 기화된 탄소 cluster들을 냉각된 collector에 응축시켜 제조
	Gas-Phase Synthesis	- Unsupported Catalytic Method(Pyrolysis method) : Hydrocarbon gas(예: C ₂ H ₂ , CH ₄ , CO등)와 Metal Catalytic gas(예: Fe(CO) ₅ , Ni(CO) ₅ 등)를 고온/고압으로 유지되는 전기로 내부로 유입시켜 제조
	Flame Synthesis	CH ₄ 등의 탄화수소화합물이 미량의 산소분위기에서 연소되면서 그 연소열이 열원이 됨. Hydrocarbon과 금속촉매가스를 diffusion flame분위기에 흘려줌으로서 조건에 따라 단일벽 혹은 다중벽 탄소나노튜브가 합성됨
탄소나노튜브	Arc-discharge	헬륨가스 속에서 흑연전극의 아크방전에 의해 제조, 금속분말 사용하지 않음
	Gas-Phase Synthesis	- Unsupported Catalytic Method(Pyrolysis method) : 단일벽탄소나노튜브의 gas-phase synthesis와 유사, 다른점은 고압일 필요가 없음(상압에서 제조) - Supported Catalytic Method(Thermal Chemical Vapor Deposition) : Co-precipitation법이나 Impregnation법 및 기타의 방법으로 먼저 금속촉매를 제조한 다음 이 촉매를 고온의 전기로에 장입하고 Hydrocarbon gas를 유입시켜 제조
	Flame Synthesis	단일벽탄소나노튜브합성과 동일
	Electrolysis Synthesis	흑연막대(음극)를 용융상태의 LiCl 전해질이 함유된 흑연 crucible(양극)에 담그고 전기회로를 구성하여 합성하는 방법
탄소나노섬유	Gas-Phase Synthesis	- Unsupported Catalytic Method(Pyrolysis method) - Supported Catalytic Method(Thermal Chemical Vapor Deposition) : 다중벽탄소나노튜브의 합성방법과 유사하지만 사용하는 금속촉매의 종류 및 함량에 차이가 있음. 주로 2번 방법으로 제조

2. 탄소나노소재의 제조 방법

플러렌, 탄소나노튜브 그리고 탄소나노섬유의 제조 방법을 표 2에 요약하였다. 표에서 보듯이 그 방법들은 상호 유사하며, 단지 그 준비과정에 따라서 생성물이 다르게 나타난다. 표 2에서는 약간의 제조방법의 차이에 따라 여러 가지 방법으로 분류되어 있지만 실제로는 크게 2가지 방법으로 요약할 수 있다. 그것은 탄소나노소재의 형성에 필요한 탄소의 공급소스를 최초로 어떤 형태로 준비하느냐 하는 것이다. 고체상태로 준비되는 방법으로는 아크방전법⁵⁾과 레이저증착법⁶⁾이 있으며, 나머지는 기체상태로 준비되는 것으로 기상합성법(gas-phase synthesis)⁷⁻⁹⁾과 flame법이 그것이다. 이러한 분류법은 소량생산과 대량생산 그리고 결정성이 우수한 것과 그렇지 않은 것으로 분류되어질 수도 있다.

2.1. 아크 방전법과 레이저 증착법

아크방전법은 진공을 유지할 수 있는 챔버 내부에 헬륨이나 수소가스를 100~500 Torr로 유지시킨 다음 탄소봉을 양극과 음극에 배치하고 직류전원을 인가하는 방법이다. 두 전극 사이에 직류전원을 인가하면 두 전극 사이에 방전이 일어나고 방전에 의해 발생된 다량의 전자는 양극으로 이동하여 양극의 탄소전극에 충돌하게 되는데 이때 전자의 충돌에 의해서 양극의 탄소막대에서 떨어져 나온 탄소 클러스터들이 낮은 온도로 냉각된 음극의 탄소막대나 챔버 내벽에 응축된다. 단일벽 탄소나노튜브를 얻기 위해서는 양극의 탄소봉에 Fe, Ni, Co, Y 등과 같은 금속입자를 혼합하여 탄소봉을 준비하면 되고 이중벽 탄소나노튜브를 얻기 위해서는 금속입자를 혼합할 필요가 없다. 아크방전법은 아크방전에 의해 고체의 탄소막대를 탄소클러스터로 만들어 응축시키는 방법이고 레이저 증착법은 탄소타겟에 레이저를 조사하여 탄소타겟을 탄소클러스터로 만들어 응축하는 방법이다. 즉, 고체의 탄소물질을 탄소클러스터로 만드는 열원이 무엇인가에 따라 아크방전법과 레이저 증착법으로 분류되며 실제로 그 원리는 동일하다.

아크방전법과 레이저 증착법에 의해 제조된 응축물질에는 플러렌, 탄소나노튜브, 비정질 탄소 등 여러 물질이 혼재해 있다. 실험실 규모의 장비에서 얻을 수 있는 응축물질의 총 무게는 수 g에 불과하며, 이 중에서 실제로 플러렌이나 탄소나노튜브가 차지하는량은 매우 적다. 또한 순수한 플러렌이나 탄소나노튜브를 얻기 위해서는 정제를 해야 하며, 정제는 대기중에서 약 400°C 정도의 열을 가하여 비정질 탄소를 제거한 다음 질산이나 염산과 같은 강산으로 다른 이물질들을 제거하는 것이 일반적이다. 이처럼 정제를 하고 난 후에는 정제하기 전에 비해 그량이 매우 적다. 실제로 정제 후에는 정제하기 전에 비해 그

무게가 탄소나노튜브의 경우에는 1/10 이하이고 플러렌의 경우는 겨우 1/100 정도의 수준밖에 되지 못한다. 그림 2는 아크방전법으로 제조한 단일벽 탄소나노튜브의 정제 전과 정제 후의 결과를 보여주는 그림이다.

이처럼 아크방전법과 레이저 증착법에 의해 얻을 수 있는 플러렌이나 탄소나노튜브의량은 매우 적기 때문에 그 응용분야도 극히 한정될 수밖에 없지만 그 결정성이 매우 우수하기 때문에 높은 특성을 요구하면서 소량이 필요한 응용분야(예: emitter, nano device)를 찾는 것이 바람직하다.

2.2. 기상합성법(Gas-Phase Synthesis)과 Flame법

기상합성법에는 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 지지체를 사용하지 않는 방법(unsupported catalytic method 혹은 pyrolysis method)과 지지체를 사용하는 방법(supported catalytic method 혹은 thermal chemical vapor deposition)이 그것이다.

지지체를 사용하지 않는 방법(라 함)은 금속촉매입자 가스와 hydrocarbon 가스를 반응기 내부로 연속적으로 주입하면서 탄소나노튜브나 탄소나노섬유가 합성되게 하는 방법이다. 금속촉매입자 가스로는 $Fe(CO)_5$, $Ni(CO)_5$, $Mo(CO)_6$, $Fe(NO)_3$ 등을 사용하며, hydrocarbon으로는 C_2H_2 , CH_4 , CO , C_6H_6 , C_2H_4 , Xylene 등을 사용한다. 이때 반응기의 온도는 600~1200°C로 유지한다. 그 반응과정을 예로 들어 설명하면 $Fe(CO)_5$ 가 100°C 정도에서 기화되고 이 기화된 가스는 반응로 내부로 들어가 열분해($Fe(CO)_5 \rightarrow Fe + 5CO$)되며 이 열분해된 Fe는 기상에서 cluster를 형성하여 탄소나노튜브나 탄소나노섬유를 형성하기 위한 핵으로 형성된다. 또한 hydrocarbon 가스인 2CO는 금속 cluster상에서 열분해($2CO \rightarrow CO_2 + C(s)$)되어 탄소나노튜브나 탄소나노섬유를 형성하기 위한

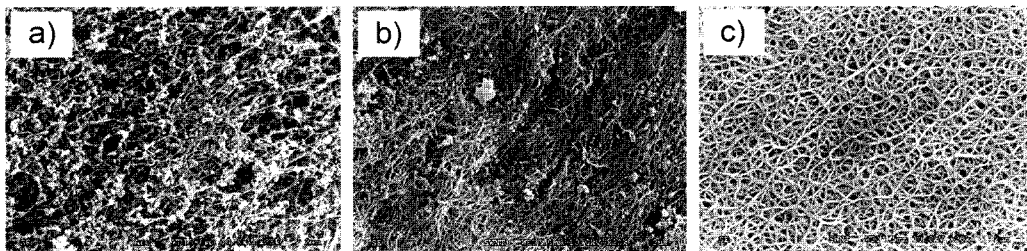


그림 2. 아크방전법으로 제조된 단일벽 탄소나노튜브 a) 합성된 직후 b) 열적 정제 후 c) 열적/화학적 정제 후

탄소를 공급하게 되는 것이다. 이러한 일련의 과정이 연속적으로 반복되면서 탄소나노튜브와 탄소나노섬유가 연속적으로 제조된다. Flame법은 금속촉매가스와 hydrocarbon가스를 분해하는 열원만 다를 뿐 그 방법은 상기에서 언급한 방법과 동일하다고 할 수 있다.

지지체를 사용하는 방법은 금속촉매입자를 먼저 제조한 후에 이 금속촉매를 반응기 내부에 장입하고 그 반응기에 hydrocarbon 가스를 공급하여 탄소나노튜브나 탄소나노섬유를 제조하는 방법이다. 이 방법은 금속촉매입자를 어디에 어떻게 형성하는가 혹은 hydrocarbon가스를 어떤 열원으로 분해하는가에 따라 여러 가지 방법으로 분류되고 있으나 그 원리는 서로 유사하다. 가장 많이 알려진 것으로는 기판(유리, 알루미늄 등)위에 나노크기의 금속촉매입자를 형성시킨 다음 이 기판을 반응기 내부에 장입하고 불활성가스 분위기에서 온도를 500~900°C로 올린 다음 hydrocarbon가스를 유입하여 기판위에서 탄소나노튜브가 수직으로 성장하도록 하는 것이다. 또 다른 방법으로는 공침법(coprecipitation)과 담지법(impregnation)으로서 제올라이트, 실리카 그리고 알루미늄 등에 나노크기의 금속촉매를 공침 혹은 담지시켜서 금속촉매를 준비한 다음 상기와 같은 방법으로 탄소나노튜브나 탄소나노섬유를 합성하는 방법이다.

좀 구체적으로 각 탄소나노소재에 적합한 합성방법을 살펴보면 다음과 같다. 단일벽 탄소나노튜브는 지지체를 사용하지 않는 방법으로도 제조가 가능하다. 그 방법은 상기에서 언급한 방법과 유사하지만 단지 반응기온도가 800~1200°C로 유지되는 반응기를 지나야 하며 또한 사용되는 기체의 압력이 10~30 atm을 유지해야 하는 가혹한 조건이 필요하다. 이러한 방법으로 Smalley 등이¹⁰⁾ 단일벽탄소나노튜브를 합성하기는 했지만 작은 변수에도 단일벽탄소나노튜브가 아닌 다중벽탄소나노튜브가 합성되기 때문에 합성되는 모든 탄소나노튜브를 단일벽으로 만들기 위해서는 많은 주의를 요하는 방법이다. 그러나 이 방법에 관심을 가져야 하는 것은 이 방법이 성공하게 되면 정제가 필요없으며 또한 대량생산도 가능하기 때문이다.

다중벽탄소나노튜브의 합성은 상기의 두 방법 모두 가능하지만 장단점을 가지고 있다. 지지체를 사용하지 않는 방법은 제조조건이 민감하고 합성된 탄소나노튜브가 반응기에 벽에 부착되어 브러쉬 같은 것으로 긁어서 수거해야 한다는 단점이 있으나 금속촉

매제조 과정과 탄소나노튜브의 합성과정이 동시에 이루어지기 때문에 제조시간이 짧고 결정성이 지지체를 사용하는 방법에 비해 매우 우수하다는 장점이 있다. 지지체를 사용하는 방법은 촉매제조과정과 합성과정이 따로 이루어지기 때문에 제조과정의 시간이 많이 필요하고 결정성도 떨어진다는 단점이 있으나 제조장치를 연속적으로 제작할 경우 연속적인 생산이 가능하므로 앞의 방법보다는 대량생산이 더 용이하다고 할 수 있다. 이러한 두 방법은 대량생산이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 많은 제조공정 및 장치에 관한 연구가 진행되고 있다. 그림 3은 앞에서 언급한 두 가지 제조방법으로 합성한 다중벽탄소나노튜브를 보여주는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 큰 차이점은 없지만 그 결정성에 있어서 지지체를 사용하지 않은 방법으로 제조된 것이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

탄소나노섬유의 제조는 지지체를 사용하는 방법으로 주로 이루어진다. 물론 지지체를 사용하지 않는 방법으로도 제조는 가능하지만 순수한 탄소나노섬유를 얻기란 거의 불가능 하다. 탄소나노섬유의 합성을 위한 금속촉매는 공침법과 담지법으로 준비된다. 탄소나노섬유에는 본 고의 처음에 언급한 바와 같이 여러 가지의 형상이 있다. 이러한 형상은 촉매를 준비하는 방법과 금속촉매의 종류 및 함량 등에 의해 좌우된다. 그림 4는 대표적인 탄소나노섬유의 외형적인 형상을 보여주는 그림이다.

상기에서처럼 기상합성법의 경우 합성과정도 중요하지만 금속촉매입자를 정밀하게 조절하고 얼마나 많이 제조할 수 있는가 하는 것도 대량생산에 큰 몫을 담당하기 때문에 이 분야에도 많은 연구가 이루어져야 한다.

3. 응 용

탄소나노소재가 현재 대량으로 응용되는 분야는 아직 없다. 이러한 것은 산업화에 적용될 만큼 확실한 연구결과가 없는 것도 그 이유지만 아직도 대량생산이 용이하지 않다는 것이 더 설득력이 있다. 그러나 탄소나노소재의 특성이 다른 어떤 소재보다도 우수하기 때문에 반드시 그 응용분야는 나타날 것이고 대량생산도 가능할 것으로 전망된다. 표 3은 탄소나노튜브와 탄소나노섬유 그리고 비교를 위해 그래파이트

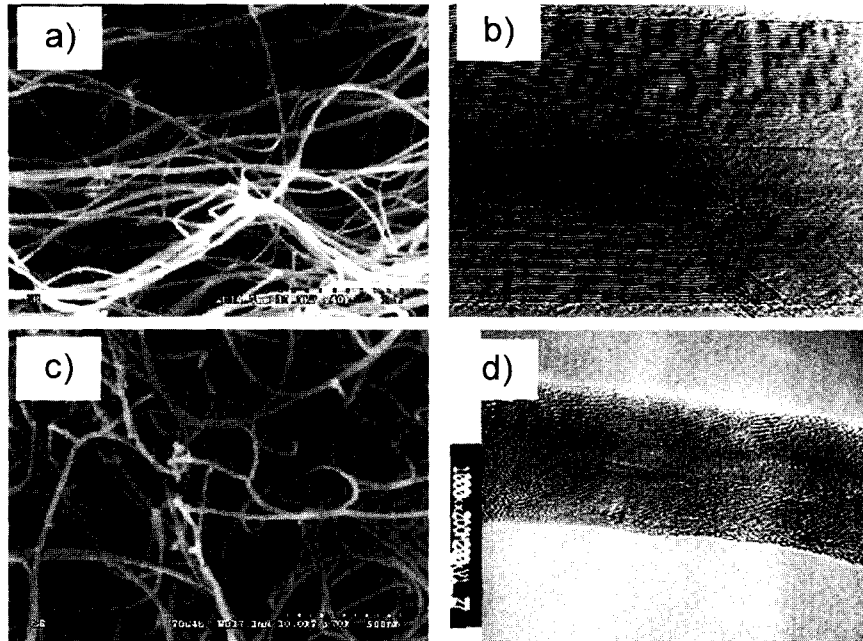


그림 3. 지지체를 사용하지 않는 방법(a, b)과 사용하는 방법(c, d)으로 제조한 탄소나노튜브의 SEM과 TEM 조직사진

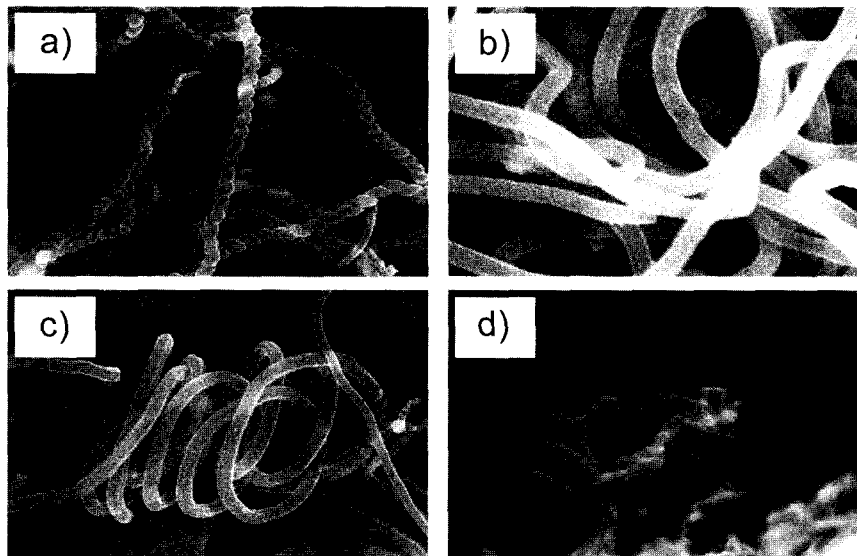


그림 4. 탄소나노섬유의 외형적인 형상 a) Spiral type b) Straight type c) Helical type d) Branched type

트의 특성을 나타내었다. 표 3은 여러 참고문헌에서 인용한 것으로 그 특성은 큰 범위로 주어져 있다. 이것은 탄소나노소재의 크기가 매우 작아 직접적인 측정이 어렵고 또한 그 준비과정에 있어 연구자들에 따

라 큰 차이가 있기 때문이라 사료된다. 그렇다고 하더라도 그 물리적·기계적 특성은 매우 우수하며 특히 화학적으로 매우 안정하다는 장점이 있기 때문에 가까운 미래에 응용분야가 대두될 것으로 기대된다.

표 3. 탄소나노소재의 특성

특성	탄소나노튜브	탄소나노섬유	그래파이트	
Density	~2.0 g/m ³	1.8~2.2 g/m ³	2.26 g/m ³	
Electronic property	Metal/semiconductor	semimetal	semimetal	
Interlayer spacing	3.38~3.41 Å	3.40 Å	3.35 Å	
Electrical Properties	Resistivity	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵ Ωcm	10 ⁻³ ~0.23Ωcm	Basal//: 10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵ Ωcm
	Max. current density	1013 A/m ²	1~202 A/m ²	-
Structural properties	Aspect ratio	> 10,000	> 3000~4000	< 100
	surface area	100~700 m ² /g	300~700 m ² /g	< 10 m ² /g
Thermal conductivity	1800~6000 W/m·K	1000~2000 W/m·K	~2000 W/m·K	
Mechanical Properties	Young's modulus	~1000 Gpa	150~820 Gpa	10 Gpa
	Max. tensile strength	~30 Gpa	1~3 Gpa	25 Mpa

표 4. 탄소나노소재별 응용분야

탄소나노소재	응용분야
플러렌	핵의학 분야, 고체 윤활제, Storage, 트랜지스터
단일벽탄소나노튜브	에미터, AFM/STM Tip, Nanoscale wire, Nano pipet, Nano tweezer
다중벽탄소나노튜브 및 탄소나노섬유	전극용(전기 이중층 커패시터, 리튬이온 혹은 sulfur 배터리, 연료전지, 해수담수화), 수소저장, 촉매담체, 복합재(전자파 차폐, 정전기 방전, 복합재의 충전재 등), 가스센서

표 4에 탄소나노소재에 따른 응용분야를 요약하였다. 물론 언급한 모든 분야에 적용될 수 있을지는 아직 미지다. 그 가능성이 높은 것도 있으며 낮은 것도 있다. 물론 새로운 응용분야도 계속 도출되고 있다. 본 고에서는 그 응용가능성이 높은 몇 가지 분야에 대해서만 기술하고자 한다.

3.1. 플러렌의 응용분야

플러렌이 응용될 가능성이 높은 분야로는 핵의학 분야와 고체 윤활제로의 응용이다. 핵의학이란 인간의 몸에 방사선 약물을 투여하여 그 약물에서 방출되는 감마선을 측정하여 건강상태를 평가하는 학문이다. 그런데 기존의 방법은 방사선 약물을 아무런 보호기능을 부여하지 않고 투여하기 때문에 그 효력이 오랫동안 유지되지 못하였다. 만약 그 약물을 플러렌 내부에 주입한 상태에서 체내에 투입한다면 그 효력은 매우 오랫동안 유지될 수 있다는 큰 장점이 있을 것이다. 실제로 이 분야에는 많은 연구가 이루어

어지고 있으며 응용이 가능할 것으로 기대하고 있다.

또한 플러렌은 구형이면서 매우 미세하고 단단하기 때문에 고체 윤활제의 응용 가능성을 보이고 있다.

3.2. 단일벽탄소나노튜브의 응용분야

단일벽탄소나노튜브의 응용분야로는 전자방출원(emitter) 및 FED(field emission display)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본의 Saito 그룹¹¹⁾과 삼성종합기술원¹²⁾에서 FED의 응용가능성을 보인 바 있다. 그러나 아직 turn-on voltage가 높고 수명이 짧으며 대면적이 어렵다는 단점이 가지고 있다. 하지만 지금의 연구결과도 매우 우수하기 때문에 가까운 미래에 좋은 결과가 있을 것으로 전망된다.

단일벽탄소나노섬유는 SET(single electron transistor)와 같은 nano device에 적용이 가능하지만 그 사용량도 매우 적을 뿐만 아니라 graphite sheet가 딸리는 각도에 따라서 그 특성에 차이를 보이기 때문에 실제로 적용하기에는 많은 문제점이 있을 것으로 판단된다. 또한 단일벽 탄소나노튜브는 다중벽 탄소나노튜브에 비해 그 특성이 매우 우수하여 많은 응용분야 적용될 수 있으나 그 생산량이 워낙 적기 때문에 실제로 많은 분야에 적용하기는 어려울 것으로 판단된다.

3.3. 다중벽탄소나노튜브 및 탄소나노섬유의 응용분야

다중벽탄소나노튜브와 탄소나노섬유의 응용분야를 함께 나타낸 것은 아직 어떤 것이 각각의 응용분야에 적합할지 그 결과가 도출되지 않았기 때문이다.

그러나 다중벽탄소나노튜브와 탄소나노섬유는 대량생산만 실현된다면 실제로 엄청난 응용 분야를 가질 수 있다. 표 4에 나타낸 다중벽탄소나노튜브와 탄소나노섬유의 응용분야를 크게 분류해 보면 전극용 소재, 수소저장 그리고 복합체로 나눌 수 있다. 이들 응용분야 중에서 응용 가능성이 높고 산업화가 이루어진다면 인류에게 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 몇 가지만 언급하고자 한다.

21세기의 3대 재앙중의 하나가 물부족이며, 제 3차 대전은 물을 확보하려는 것 때문에 일어날 것이라는 전망도 있다. 이처럼 물은 전 인류에 큰 재앙으로 다가오고 있으며 우리나라도 물부족 국가로 등록되어 있다. 따라서 인류는 지구의 3/4인 바닷물을 정제하려는 노력을 하고 있다. 현재 바닷물을 정제하는 방법으로 가장 많이 이용되는 것은 증발법으로서 바닷물을 증발시켜 정제하는 방법이다. 그러나 이 방법은 많은 에너지 소모가 필요하기 때문에 그 한계성이 보이고 있다. 앞으로 가장 전망있는 해수담수화 방법으로는 전기투석법이다. 이 방법은 해수속에 녹아 있는 염분을 전기적인 방법으로 제거하는 것이다. 지금까지는 맴브레인이 그 전극으로 사용되어 왔으나 재활용이 불가능하고 사용 전력도 높아 새로운 소재의 개발이 시급한 실정이다. 여기에 적합한 것이 탄소나노소재이다. 탄소나노튜브나 탄소나노섬유를 전도성 폴리머와 혼합하여 전극을 만든 후 그림 5에 나타낸 바와 같이 전극을 구성하여 전원을 가하면 양극에는 음이온이 그리고 음극에는 양이온이 부착된다. 이러한 방법으로 해수를 담수화할 수 있다. 전극에 부착된 이온들은 전원을 가하지 않은 상태에서 물을 흘려줌으로써 제거할 수 있어 맴브레인에 비해 재활용이 가능하며 사용 전력도 맴브레인 보다 낮은 장점이 있다. 이러한 방법으로 해수를 담수화하여 공업용수로만 사용하더라도 그 가치는 매우 높을 것이다.

탄소나노소재의 또 다른 중요한 응용으로는 수소저장이다. 수소는 21세기에 인류가 확보해야 할 가장 중요한 에너지원이다. 이 수소를 탄소나노튜브나 탄소나노섬유의 빈 공간을 이용하여 저장하면 저장용량이 매우 증가될 것으로 기대된다. Rodriguez와 Baker는¹³⁾ 탄소나노섬유를 이용하여 수소를 최고 30 L/g까지 저장시키는 것이 가능하였다고 보고한 적이 있다. 그림 6은 그들이 제안한 것으로 탄소나노섬유의 흑연 구조층 사이에 수소가 저장된다는 것을 보

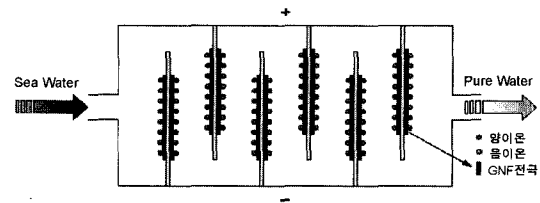


그림 5. 전기 화학적인 이온분리 방법으로 해수를 담수화하는 개략도

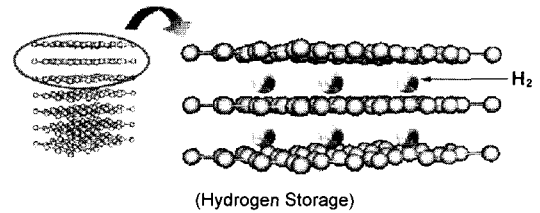


그림 6. 탄소나노섬유의 흑연구조층 사이의 수소저장 모형도

여주는 그림이다. 그들에 따르면 탄소나노섬유의 흑연 구조층 사이의 간격이 0.34 nm이며 수소의 원자 반경은 0.29 nm이기 때문에 충분히 흑연 구조층 사이에 수소저장이 가능하다는 것이다. 그러나 그 재현성이 부족하다는 문제점을 안고 있다. 탄소나노튜브도 수소저장에 연구에 많이 적용되었는데 충전은 가능하나 방전이 어렵다는 문제점에 봉착해 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

탄소나노튜브와 탄소나노섬유가 대량으로 생산된다면 가장 많이 활용될 분야가 복합재의 충전제로 사용되는 것이다. 복합재의 충전제로는 전자파 차폐, 정전기 방전 그리고 강화재 등 매우 다양하며, 그 경제적인 파급효과도 매우 크다. 따라서 많은 연구가 진행되고 있으며, 가장 큰 문제점으로는 기지재 내부에 고르게 분산시키는 것인데 아직도 완벽한 분산을 이루지는 못하고 있다.

상기에 언급한 응용분야 외에도 많은 응용분야가 있으며, 해결해야 할 문제점이 없는 것은 아니지만 탄소나노소재는 향후 큰 경제적 부가가치를 가지는 소재가 될 것으로 전망된다.

4. 결 언

탄소나노소재가 개발된 것은 10년 훨씬 지났다. 많

은 연구가 이루어 졌으며, 많은 응용가능성도 도출되었다. 당연히 탄소나노소재를 제조하여 판매하는 업체들이 전 세계적으로 등장하였고 국내에서도 탄소나노소재를 제조하여 판매하는 업체가 현재 세 업체가 있다. 규모는 크지 않지만 현재 세계적인 수준에 비해서는 크게 뒤지지 않는 것으로 파악되고 있다. 그러나 탄소나노소재를 이용한 응용분야는 삼성종합기술원에서 연구하고 있는 FED를 제외하면 극히 초보자 수준이라 할 수 있다. 물론 대학에서나 연구소에서 연구를 하고는 있지만 극히 한정된 분야에서 연구되어지고 있다. 실제로 탄소나노소재가 대량으로 사용될 수 있는 것은 복합체 분야나 전극분야이다. 이미 Hyperion사에서는 플라스틱에 탄소나노튜브를 혼합하여 펄렛형태로 판매하고 있다. 국내에서도 탄소나노소재가 대량으로 사용될 수 있는 분야로 연구 범위가 확대되어야 하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참고문헌

1. H. W. Kroto: Carbon, **30** (1992) 1139.
2. S. Iijima: Nature, **354** (1991) 56.
3. Baker and R. T. K: Carbon, **27** (1989) 315.
4. 2002년 11월 27일(수요일), 매일경제신문.
5. D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. deVries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez and R. Beyers: Nature(London) **363** (1993) 605.
6. A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, D. T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fisher and R. E. Smalley: Science, **273** (1996) 483.
7. M. Terrines, et. al., Nature **388** (1997) 52.
8. Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal and P. N. Provencio: Science **282** (1998) 1105.
9. M. M. J. Treacy, T. W. Ebbensen and J. M.: Gibson, Nature **381** (1996) 678.
10. J. H. Hafner, M. J. Bronikowski, B. R. Azamian, P. Nikolaev, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, K. A. Smith and R. E. Smalley: Che. Phys. Lett., **296** (1998) 195.
11. Y. Saito, K. Hamaguchi, K. Hata, K. Uchida, Y. Tasaka, F. Ikazaki, M. Yumura, A. Kasuya and Y. Nishina: Nature, **389** (1997) 554.
12. W. B. Choi, D. S. Chung, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. W. Jin, I. T. Han, Y. H. Lee, J. E. Jung, N. S. Lee, G. S. Park and J. M. Kim: Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 3129.
13. Rodriguez, M. N. and Baker: R. T. K, US patent 5,653,951 (1999).