특 집

탄소나노섬유의 특성과 응용

양갑승 · 김보혜 · 이완진

1. 서론

탄소나노 섬유는 탄소를 90%이상 포함하고 있는 1 μm 만의 굵기를 갖고 있는 섬유상 물질을 지칭하는 것으로 그것의 형상과 미세구조에 따라서 그 응용 분야가 다르다. 우선 탄소원소의 기본특성이 재료를 형성했을 때 sp, sp^2, sp^3의 혼성에 의한 결합을 하기 때문에 다이아몬드와 같은 높은 강도, 흑연과 같은 우수한 전기, 열 전도성 및 화학적으로 안정하고 생체친화적인 특성을 나타낸다.

이러한 구조적인 특성을 가지고 있는 물질이 직경이 나노의 크기인 나노섬유화되었을 때, 상대적으로 비표면적이 커지고(**그림 1**) 거기에 세공이 도입되었을 때 그 세공의 가능 즉 흡착특성은 극대화된다. 한편, 비표면적이 큰 특성은 그 표면에 촉매를 올리는 촉매 지지체로 응용했을 때 그 효율이 극대화된다. 한편, 이 나노섬유를 만드는 과정이나 처음 프리커서 물질에 따라서 그 기본구조가 달라지고 물성이 달라지기 때문에 그 용도가 달라진다.

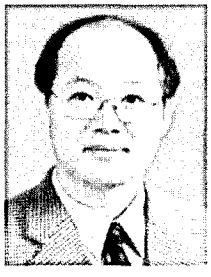
나노섬유에 세공의 크기는 섬유 전기방사 조건에 따라 조절될 수 있으며 그 크기가 극 마이크로 세공(Ultra micropore<0.7 nm)일 경우 기체의 저장능력은 커지며 그 기체가 N_2였을 때 0.5 nm에서 −3,000 K의 효과를 나타내며 그 저온 효과는 흡착 물질에 따라 다르게 나타나지만 저장 효과를 나타내는 우수한 성능을 보이게 된다 (**그림 2**).

여기에서는 탄소섬유 프리커서를 전기방사하고 안정화 탄화 과정을 통하여 제조한 탄소나노섬유(e-CNFs)와 촉매를 이용하여 기상성장한 탄소나노섬유(VGCFs)의 물성과 그것들의 응용들에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 전기방사 탄소나노섬유

2.1 전기방사

전기방사방법은 이미 1930년대에 특허 등록 되었으나[2] 1990년대까지는 별 관심을 끌지 못하다가 2002년에 국내회사인 NanoTechnics에서 하루에 200 Kg/day 이상 양산에 성공하는 기술개발에 성공하였다.[3] 그후 여러 응용분야가 창출되었으며 예를 들면, 필터 전해질 분리막, 투습방수의류[4-6] 및 탄소섬유 프리커서를 이용하여 탄소나노섬유를 제조하고 그것으로부터 전극소재, 촉매지지체, 흡착제, 에너지 저



양갑승

1978 한양대학교 섬유공학과(학사)
1980 한양대학교 섬유공학과(석사)
1988 North Carolina State Univ.(박사)
2007~2008 한국탄소학회 회장
1989~현재 전남대학교 고분자·섬유시스템공학부 교수

김보혜

1997 전남대학교 화학교육과(학사)
2000 전남대학교 화학과(석사)
2003 전남대학교 화학과(박사)
2004~2007 동신대학교 한약재산업학과 전임강사
2007~현재 전남대학교 Alan G. MacDiarmid 에너지 연구소 연구교수

이완진

1981 전남대학교 응용화학공학과(학사)
1983 전남대학교 응용화학공학과(석사)
1989 University of Alabama, USA(석사)
1994 University of Alabama, USA(박사)
1995~현재 전남대학교 응용화학공학부 교수

Characteristics of Carbon Nano-fibers and Their Applications

전남대학교 고분자·섬유시스템공학부 (Kap Seung Yang, Department of Polymer and Fiber System Engineering, Chonnam National University, 300 Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea) e-mail: ksyang@chonnam.ac.kr
전남대학교 Alan G. MacDiarmid 에너지 연구소 (Bo-Hye Kim, Alan G. MacDiarmid Energy Research Institute(AMERI), Chonnam National University, 300 Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea)
전남대학교 응용화학공학부 (Wan Jin Lee, Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, 300 Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea)

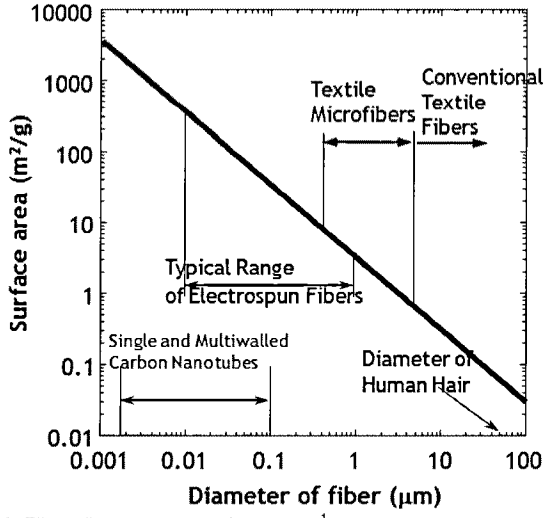
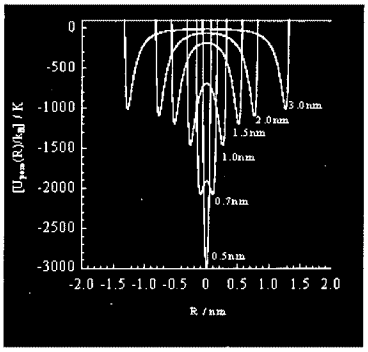
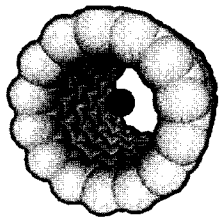


그림 1. Fiber diameter *vs.* surface area.[1]





N_2 molecule in SWCNT

그림 2. Strong potential field of an internal pore of single wall carbon naotube (SWCNT) for N_2 (courtesy of professor K. Kaneko, Shinshu University).

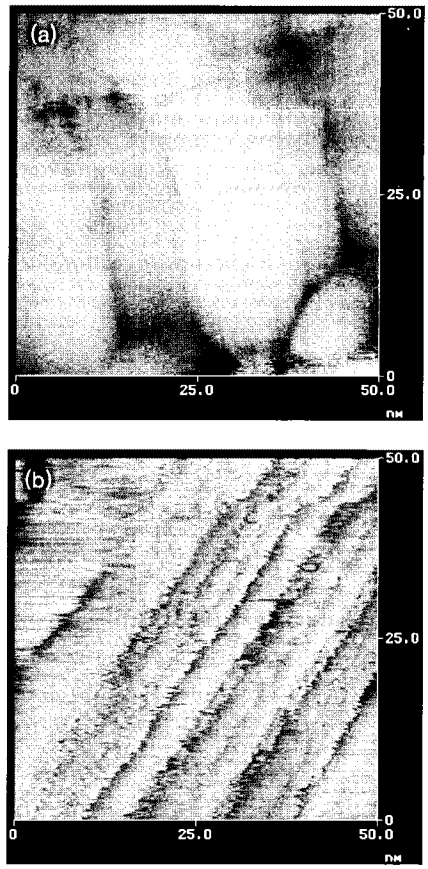


그림 3. (a) AFM image of the PAN based e-CNFs garfitized at 2,500 ℃. (b) AFM image of the polyimide based e-CNFs garfitized at 2,500 ℃.

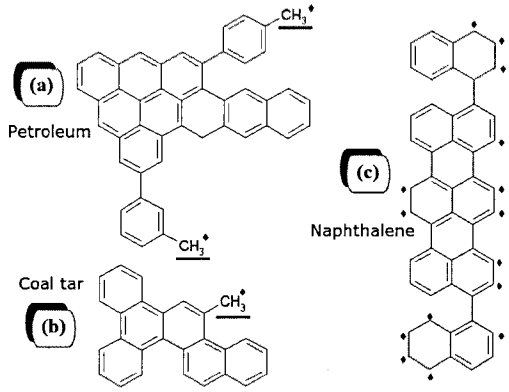


그림 4. Chemical structure of unit molecules derived from (a) petroleum, (b) coal tar, and (c) naphthalene (◆ active site).

장재, 보강재료로 사용하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

특별히 전기방사는 용액으로 방사하는 것이 일반화되어 있기 때문에 용액을 블렌드해서 각기 다른 특성을 갖는 물질을 복합하고 그 다양한 특성을 이용하는 응용분야도 다양하게 되었다. 예를 들면, 실리콘 나노입자를 PAN과 블렌드 방사하여 탄화한 후 Li 이온전지의 용량을 증가시키거나[7] 촉매를 블렌드하여 촉매의 접착특성을 향상시키고, PAN/Pitch를 블렌드하여 세공의 크기를 제어하고 전기 전도도를 향상시키는 연구 성과가 발표되었다.[11-13]

2.2 구조 및 물리적인 특성

전기방사 섬유는 기존의 상용화된 탄소섬유를 제조하는 공정과는 달리 섬유를 인장상태에서 안정화 탄화할 수 없기 때문에 구성 분자의 배향을 통한 기계적인 특성의 발현이 현재의 기술로는 어려운 상태에 있다. 따라서, 미세 구조는 피브릴 구조라기 보다는 라멜라 구조로부터 발현된 결정 구조를 하고 있는 것이 특징이다 (**그림 3(a)**). 그러나 그 프리커서가 경직성을 갖는 polyimide일 경우 그 결정 구조는 배향도가 향상된 구조가 되는 것을 알 수 있다 (**그림 3(b)**).

다른 한 탄소섬유 프리커서인 피치는 그 분자가 대부분 방향족으로 이루어져 있고 판상 구조를 하고 있어(**그림 4**) 그자체로는 쉽게 탄화되고 탄화 후 높은 결정성을 나타내지만 분자의 구조 및 크기가 다양하여 탄소섬유를 제조했을 때 인장 탄성률은 큰 반면 인장 강도는 PAN 프리커서에 비해 낮은 특성을 나타낸다. 그리고 피치의 전기방사성이 PAN이나 다른 고분자 섬유에 비해서 저조하기 때문에 일반 전기방사 섬유에 비해서 섬유의 굵기가 큰 편이지만 용융방사 섬유에 비해서는 2-3 μm로 작은 편이다(**그림 5**).

그림 6은 다양한 프리커서를 전기방사하여 1,000 ℃에서 탄화하여 웹상태로 전기전도도를 측정한 결과이며 고분자 물질 프리커서에 비해서 피치가 월등히 높은 것으로 나타난다. 구체적인 수치는 PAN (1.95 S/cm), polyamide (PI), polybenzimidazoles (PBI) 등은 비슷

한 반면 pitch는 52.03 S/cm으로 25배 이상이다.

전기방사를 통해서 제조된 탄소섬유는 나노크기의 직경을 가지고 있기 때문에 활성화할 경우 상대적으로 효과적으로 비표면적을 크게 할 수 있으며, 전기방사 과정에서 용제의 증발을 통해서 생성된 ultra-micropore (< 0.7 nm)가 산화성 기체가 활성화할 수 있는 시발점이 되어 다양한 크기의 다공성 나노섬유가 제조 가능하다. 그리고 프리커서 물질의 산화 특성에 따라서 비표면적이 다양하고 그 세공의 크기도 다르다(**표 1**). 그 중에서도 가장 burn-off 낮으면서도 비표면적이 큰 것은 피치로부터 제조된 전기방사 탄소섬유이며 세공의 평균 직경도 2.1 nm로 크고 비표면적 2,000 m^2/g 이상이면서 우수한 전기

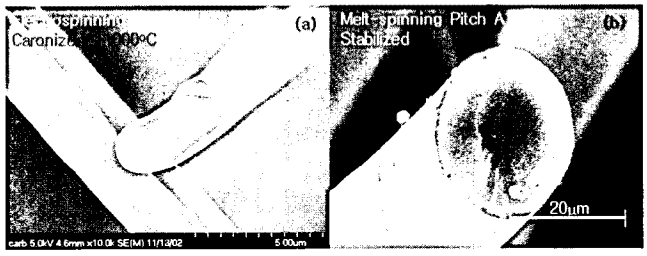


그림 5. SEM images of the e-CNFs (a) and melt spun fiber from pitch (b).

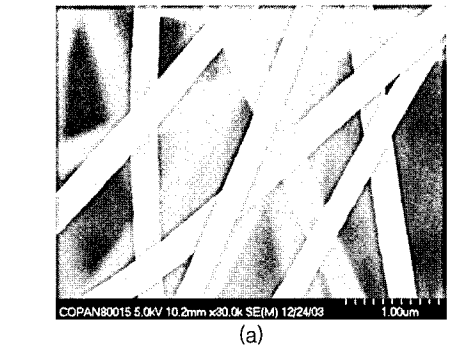


그림 6. SEM image of the e-CNFs (a) and the electrical conductivity of the carbonized web from various precursors (b).

표 1. Pore properties of steam activated CNFs at 800 ℃ for 30 min

Sample	Burn-off (%)	BFT SA (m^2/g)	Total Pore Volume (cc/g)	Micropore Volume (cc/g)	Average Pore Dia. (Å)
PAN	77	1,523	0.760	0.599	20.0
PAN/MWCT	65	1,200	0.550	0.533	17.5
Pitch	46	2,025	1.109	0.870	21.9
PI	68	1,412	0.571	0.553	16.2
PBI	51	1,220	0.565	0.470	18.0

전도성을 나타내어 이온을 흡착시켜 에너지를 저장하는 목적으로 우수한 특성을 나타낼 것으로 예측된다.

2.3 응용 분야

앞에서 언급한 전기방사 탄소섬유의 특성 때문에 현재 상태로는 기계적인 물성을 이용하는 응용보다는 넓은 비표면적, 제어된 세공, 우수한 전기전도성을 이용하는 연구들이 대부분을 차지하고 있는 상황이다.

2.3.1 전극재료

주로 연구되는 전극재료는 응용분야는 슈퍼캐패시터, 연료전지, Li 이온전지이다.

슈퍼캐패시터는[8,9] 전기 이중층을 이용하여 효과적으로 에너지를 저장하고 그것을 이용하는 축전지이다. 이 축전 용량은 비표면적, 유전율, 전해질 이온의 크기에 적합한 전극의 세공 등에 의해서 결정된다.[10-12] 이러한 전기 이중층 캐패시터 전극의 연구 방향은 동력 밀도와 에너지 밀도를 동시에 향상시켜 기존의 축전 장치나 배터리를 대체하여 전기자동차의 상용화를 앞당기는 것을 지향하고 있다.

따라서, 전극재료로의 성능은 전극 표면에 금속 불순물로 인해 전해질의 분해가 일어나지 않도록 하고, 이온의 흡착 탈착에 대해서 저항이 최소화되어야 하고, 그 저장 표면적이 극대화되어야 하며, 세공의 크기가 최적이 되어 전하의 성능이 효과적으로 발현되는 구조를 갖고 있으면서, 전자를 쉽게 이동시킬 수 있도록 우수한 전기전도성을 보이도록 설계되는 것이 바람직하다.

이러한 여러 영향들은 다양한 연구 보고를 통해서 알려져 있는데

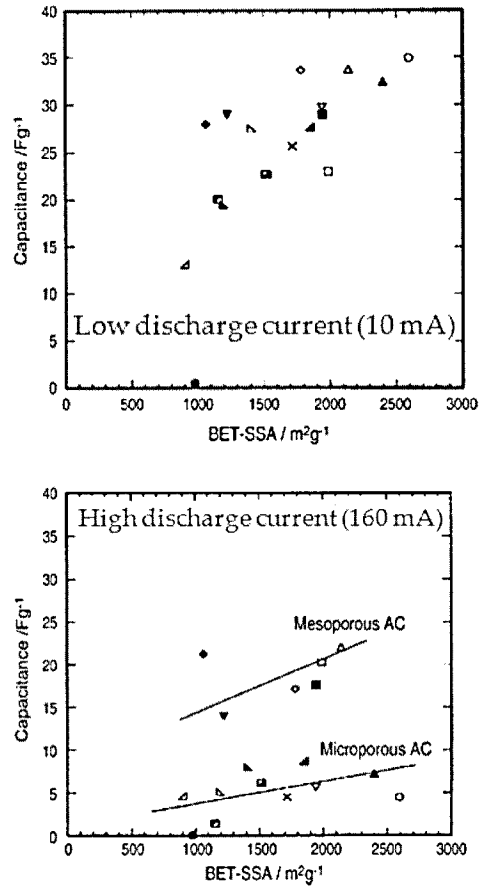


그림 7. Effect of the employed experimental conditions on the carbon capacitance.[37]

그림 7에서 보는 바와 같이 전극의 비표면적과 이온 저장 성능은 항상 일치하는 것은 아니다. 즉, 축전 용량이 낮은 방전속도에서는 비표면적에 비례해서 상승하지만, 방전속도가 낮은 경우에는 비표면적에 비례하지 않는 현상을 보인다. 이러한 현상은 세공 내에서의 이온의 유동성과 관계되는 인자로써 세공의 깊이가 낮아지는 것이 바람직하다는 소재의 특성을 말해준다.

한편, 세공 크기의 영향에 대해서 연구된 현상이 보고되었으며, 세공의 크기가 유기계용액에서 해리된 이온을 저장할 수 있는 적당한 크기가 되어야 축전 용량이 극대화될 수 있다는 연구 결과가 보고되었다.[14] 이 보고는 이온이 용액 내에서 최대의 전하(charge)를 발현하기 위해서는 이온을 둘러싸고 있는 용매의 층의 숫자가 최소화되어야 된다고 제안하고 있으며, 이 층의 숫자는 세공 벽과 전하 사이의 인력에 의해서 경쟁적으로 제어될 수 있음을 제안하고 있다. **그림 8**에 따라서 전극의 세공 크기를 전하의 크기에 적합하도록 제어하는 것이 중요

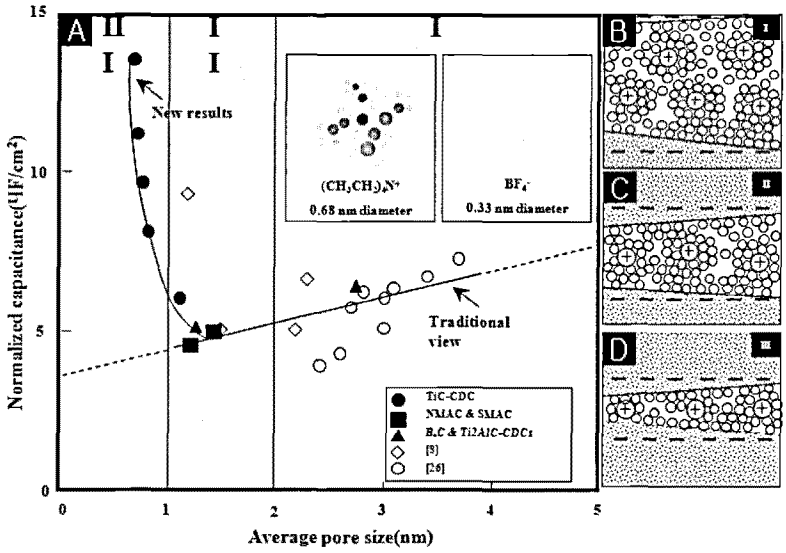
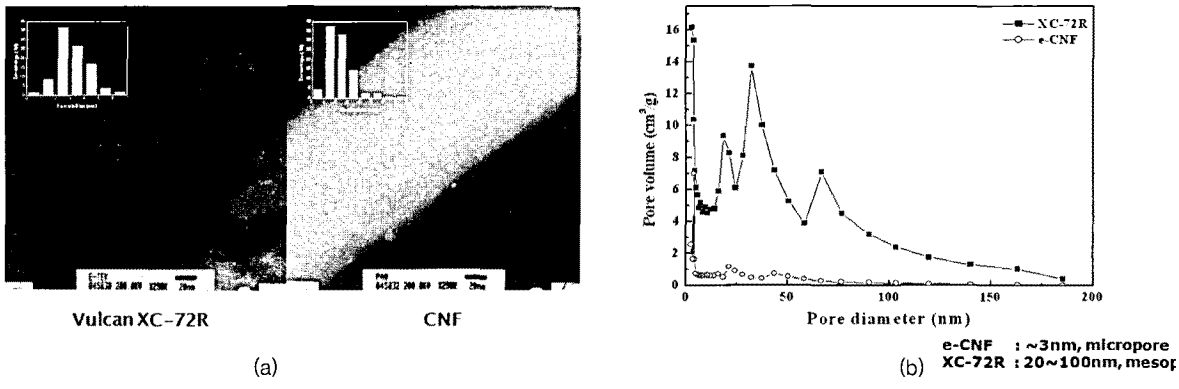


그림 8. (A) Plot of specific capacitance normalizes by BET SSA for the carbons in this study and in two other studies with identical electrolytes. The normalizes capacitance decreased with decreasing pore size until a critical value was reached, unlike the traditional view assumed that enough to accommodate diffuse charge layers, the capacitance would approach a constant value. (B to d) Drawing of solvated ions residing in pore with distance between adjacent pore walls (B) greater than 2 nm, (C) between 1 and 2 nm, and (D) less than 1 nm illustrate this behavior schematically.[14]



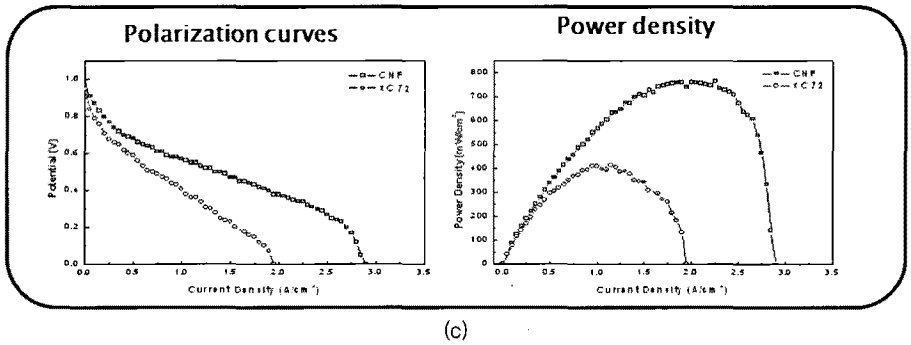


그림 9. Comparisons of the electrodes of fuel cell made from XC-72R and e-CNFs; SEM (a), pore size distributions (b), and polarization and power density curves (c).[17]

할 것으로 예측된다. 한편, 6 M KOH 수용액계의 경우는 컴퓨터 모사의 결과 세공의 크기가 10 Å가 최적으로 보고되었다.[15]

Ultra-micropore가 생성되어있는 전기방사 탄소나노섬유는 Li 이온전지의 부극으로 사용되었으며 그 가역 용량이 450 $mAhg^{-1}$으로 흑연의 이론 용량 372 $mAhg^{-1}$ 보다 높은 것으로 나타났다.[7] 한편, Si 나노입자를 PAN 용액에 분산하여 전기방사 및 탄화후 Li 이온전지의 부극으로 사용한 결과 기존의 전극에 비하여 그 용량이 월등하게 높게 나타나고(885 $mAhg^{-1}$) Si에 Li의 흡착으로 인한 부피팽창의 문제도 해결할 수 있는 가능성을 보였다.[16]

2.3.2 촉매 지지체

촉매 반응은 큰 비표면적과 지지체의 높은 전도성에 의해서 그 효율이 향상되고 반응물질이 반응속도에 맞추어 지체할 수 있는 세공이 있음으로 인해서 그 수율이 높아지는 것으로 알려져 있다. 따라서, 전기방사 탄소나노섬유의 특징이 우수한 촉매 지지체가 될 수 있음을 말해준다.

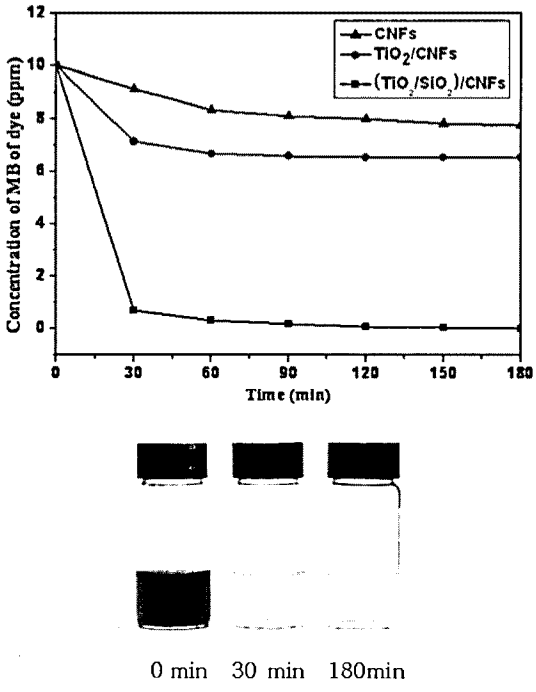


그림 10. Photocatalytic activities of TiO_2 supported on CNFs.[18]

	Mean pore diameter(nm)	Ultra-Micropore(%)	Micropore (%)	Mesopore (%)	Macropore (%)	BTX, TCE Adsorption	Surface Area (m^2/g)
Active carbon	10-100	-	20	65	15	unsuitable	400-700
Activated Carbon fiber	1-4	-	80	20	-	medium	700-1,500
ACNF	0.5-1	88	10	2	-	Excellent	800-2,500

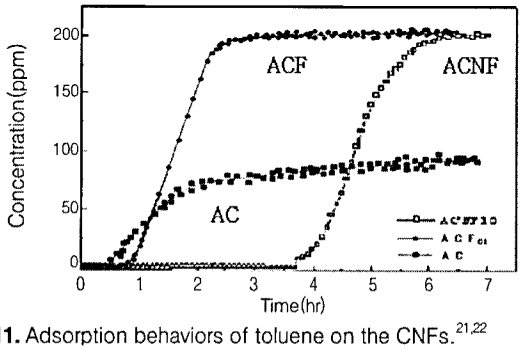


그림 11. Adsorption behaviors of toluene on the CNFs.[21,22]

그림 9에 보고된 연구 결과를 보면 carbon black에 Pt 촉매를 올려서 상용화된 연료전지 촉매와 전기방사 탄소나노 섬유에 Pt 촉매를 올려서 polarization과 power를 비교해본 결과 전기방사 탄소나노섬유가 전기전도성과 촉매의 입자보다 작은 세공의 기여로 성능이 2-3배 더 우수한 것으로 보고되었다.[17]

광촉매를 전기방사 탄소나노섬유에 코팅해서 그 성능이 우수하며 SiO_2와 광촉매를 복합화했을 때 고온에서 Anatase 구조가 Rutile 구조보다 안정해져서 광활성이 크게 향상되는 것으로 보고되었다 (**그림 10**).[18,19]

2.3.3 가스 흡착재

가스 흡착은 세공의 벽과 흡착 가스의 인력에 의해서 그 흡착량이 결정되므로 비표면적과 함께 그 비표면적을 나타내는 세공의 크기가 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. Benzene, toluene, xylene 등의 흡착실험을 실시한 결과 파과시간이 상용화된 활성탄과 활성탄소섬유는 1시간 이하인데 비해서 전기방사 탄소나노섬유는 4시간으로 나타나 그 흡착능이 뛰어난 것으로 밝혀졌으며 이것은 대부분의 세공을 이루고 있는 ultra-micropore(88%)의 기여도가 큰 것으로 평가되었다(**그림 11**).[20-22]

3. 기상성장 탄소나노섬유(VGCFs)

3.1 기상성장 나노섬유의 제조 방법

VGCFs는 흑연구조의 벽으로 형성된 길이/직경의 비가 >100인 나노크기의 실린더이다. 이 나노섬유는 촉매의 표면에 탄화수소 기체가 접촉하여 탄소만 응축된 결과이며 그 메카니즘은 촉매가 부유된 상태에서 섬유가 자라게 하는 floating reactant 메커니즘(**그림 12**), 촉매 입자가 tip에서 기상성장시키는 tip growth 메카니즘(**그림 13(a)**), 촉매가 뿌리가 되어서 기상성장하게 하는 root growth 메카니즘(**그**

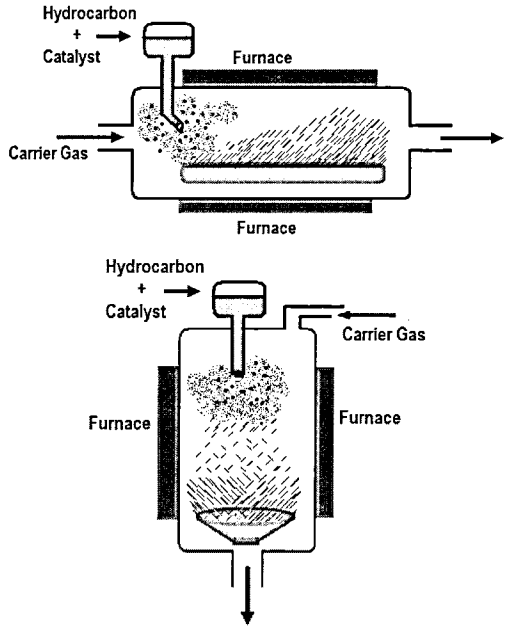


그림 12. Schematics reactors for the production of vapor grown carbon nanofibers in floating reactant methods.[31]

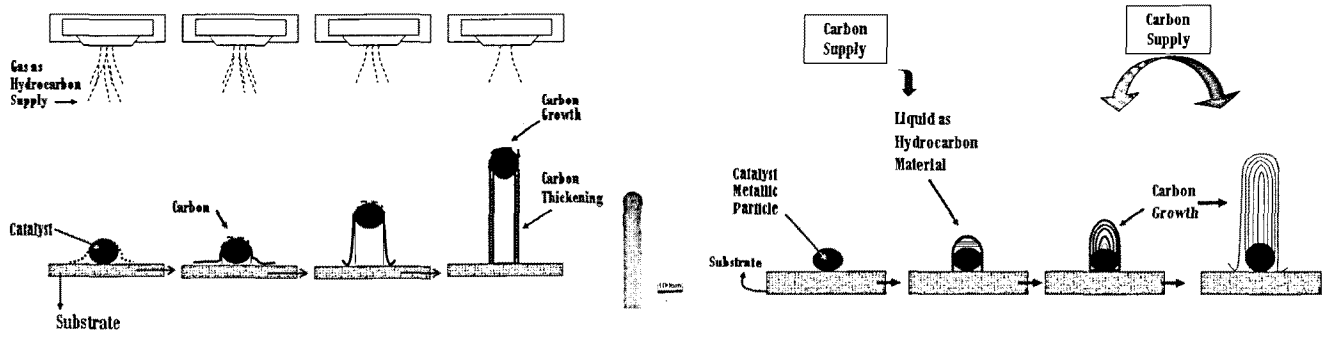


그림 13. (a) Schematical representation of tip growth mechanism of CNF following gas-liquid-solid phase using catalyst in vapor grown process.[38] (b) Schematical representation of root growth mechanism of carbon nanofiber using liquid as hydrocarbon material.[39]

림 13(b))이 있다. 이렇게 성장된 나노섬유는 중공이 비어있는 multi wall carbon nanotube(MWCNT) 형태를 하고 있다.

3.1.1 기상성장 탄소나노섬유

여기에서는 floating growth 방법으로 양산된 sub-micron VGCFs (s-VGCFs)에 대해서 구조적 특성, 물성을 검토하고 그러한 특성 때문에 응용되는 분야에 대해서 검토하도록 한다.

3.1.1.1 구조 및 물리적 특성

s-VGCFs는 탄화수소 즉 benzene이나 methane 등을 전이금속을 이용하여 1,000-1,300 ℃에서 분해하여 탄소를 침착시키는 방법으로 제조한다.[23-31] 이런 방법으로 성장한 섬유는 섬유축과 평행하게 흑연의 면이 동심원의 모양을 하고 배향하게 된다. 이러한 구조 때문에 탁월한 기계적 특성, 열 및 전기전도성을 나타내게 되고 쉽게 흑연화되는 특성을 보인다.[23,24] 그러한 특성 때문에 상용화를 위한 연구가 계속되었고 가장 제조원가가 낮은 floating reactant method를 선택하고[25-27] ferrocene과 같은 organometallic 화합물을 열분해로 부터 얻은 촉매입자와 탄화수소 혼합물을 3차원적으로 반응기에 분사함으로써 직경(0.2 μm)과 길이(10-20 μm)가 일정한 VGCFs를 저가로 얻게 된다.

이렇게 얻어진 VGCFs는 직경이 0.1-0.2 μm로 작고 분포가 좁으며 직경이 10-20 μm인 일반 VGCFs와 구조적으로 비슷하여, 내부에는 동심원 흑연 면이, 외부에는 pyrolytic 탄소가 충전된 상태이다. 이러한 구조적인 특성 때문에 복합재료의 보강 물질이나 Li 이온전지의 부극이나 전도성이 우수한 특성이 응용되는 부극의 첨가제로 사용이 가능할 것으로 보인다. 따라서, 납축전지나 Li 이온전지 전극에 충전제로서 상용화가 진행되는 것으로 알려지고 있다.[32] 이 s-VGCFs의 기본 물성은 **표 2**와 같다.

표 2에서 보여준 특성과 같이 섬유의 직경에 대한 길이의 비가 >100으로 크고 비중이 0.02-0.07로 매우 낮으며 이러한 특성은 전극의 충전제로 사용하기에 편리하다. 또한, 열처리 온도가 높아지면 흑연 면간의 거리 및 섬유내부의 결함이 크게 줄어들어 쉽게 흑연화되는 현상을 나타낸다.

전기전도도는 전극이나 전기화학의 활성 물질 혹은 지지체로 사용하기 위해서 매우 중요한 특성이다. 4단자 법으로 측정된 탄화된 s-VGCFs의 비저항은 1×10^{-3} Ωcm이고 흑연화된 섬유의 비저항은 1×10^{-4} Ωcm으로 측정되었고 이 값은 전통적인 탄소섬유의 전기전도도보다 높고 일반적인 VGCFs 보다는 낮은 것으로 평가되었다.[34]

표 2. Basic Properties of Submicron VGCFs[33]

	Carbonized s-VGCFs[a]	Graphitized s-VGCFs[b]	Units	Method
Lattice constant(*C*)	6.900	6.775	Å	XRD
Diameter of fiber	0.2	0.2	μm	SEM
Length of fiber	10-20	10-20	μm	SEM
Volume density	0.02-0.07	0.02-0.07	g/cm^3	Tapping
Real density	1.9	2.1	g/cm^3	Pycnometer
Surface area(BET)	37	15	m^2/g	N_2 absorption
Ash content	1.5	0.03	%	SDK
pH	5	7	-	JIS-K6221
Starting temperature of oxidation	550	650	℃	TGA

[a]Carbonized s-VGCFs indicate the sample heat treated at 1200 ℃.
[b]Graphitized s-VGCFs indicate the sample heat treated at 2800 ℃.

이 s-VGCFs가 전극에 도전제로 사용될 경우 기계적인 강도가 중요한데 기계적인 물성이 배터리 전극의 성능을 좌우하기 때문이다. 탄소 혹은 흑연화 s-VGCFs의 물성은 기존의 등방성 피치계 탄소섬유보다는 인장 강도나 인장 탄성률이 큰 것으로 평가되었다.[35] 이러한 면에서 보면 이 s-VGCFs는 배터리 전극의 충전제로서 사용하기에 적합한 것으로 평가되었다.

전극물질로 사용하기 위해서는 부피 전기 및 열전도도, 충방전에서 일어나는 부피의 변화에 따른 강도의 유지 특성을 좌우하는 기계적인 회복특성이 중요하다. 이 회복특성은 기존의 SiC나 SiN이 우수한 것으로 평가되고 이는 섬유 직경이 작고 흑연화도가 우수한 구조로부터 발현된 것으로 보인다.[35]

3.1.1.2 응용 분야

· 납축전지 충전제

흑연화된 s-VGCFs를 양극에 첨가할 때 그 전극저항은 감소하였고, 부극에 0.5-1.5 wt%를 첨가했을 때 cycle 특성이 첨가하기 전보다 현저하게 증가하였다.[41]

· Li 이온 배터리에 부극 첨가물

상용화된 부극의 SEM 사진(**그림 14**)에서 보여주는 바와 같이 부극물질에 흑연화된 s-VGCF를 첨가하여 제조되고 있고 그것의 첨가 특성은 첨가하기 전보다 cycle 효율이 유지(**그림 15**)된다는 특성을 보여주고 있다.[33]

· 금속 및 플라스틱 강화 복합재료

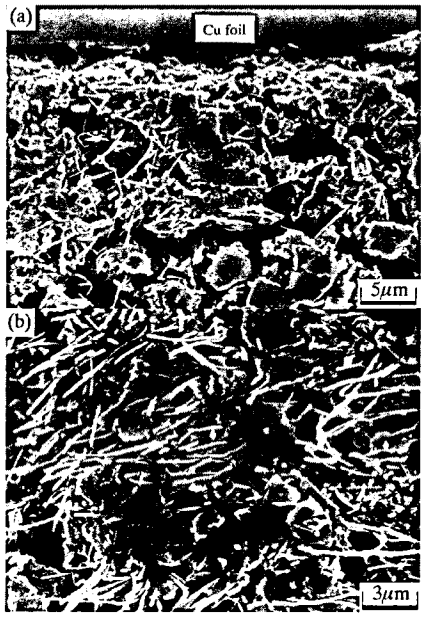


그림 14. SEM pictures of (a) the carbon anode sheet containing s-VGCFs in a commercial cell and (b) enlarged one.[33]

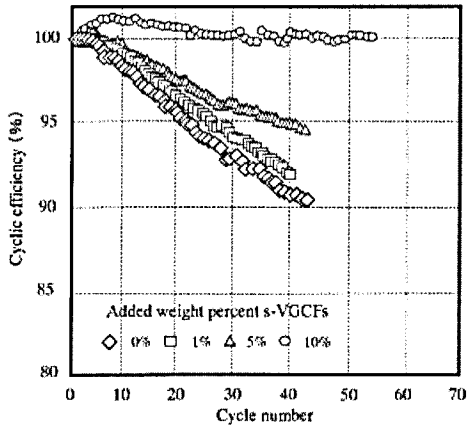


그림 15. Cyclic efficiency of synthetic graphite(HTT=2,900 ℃) as a function of added weight percent of graphitized s-VGCFs, in the range 0 to 1.5 V, with a current density of 0.2 mA/cm^2.[32,41]

금속복합재료 강화 물질은 금속재의 두께를 줄이거나 경량의 물질을 사용해서 비슷하거나 오히려 우수한 기계적 강도를 내는 목적으로 사용된다. Mg과 1 wt% s-CVDF를 이용해서 만든 5개의 복합재료 나사못이 stainless steel로 만든 1개의 나사 못보다 가볍고 그 기계적인 물성도 우수한 것으로 나타났다(일본 신슈대 Prof. Morinobu Endo, 개인 정보) (**그림 16**).

3.1.2 컵스택(Cup Stack) 기상성장 나노탄소섬유(그림 17)

Ferrocene이나 iron pentacarbonyl을 프리커서 촉매로 하고 여기에 황화수소를 co-catalyst로 이용하여 천연가스를 원료로 하여 flosting reactant method로 컵스택 VGCFs를 제조하였다.[29,31,36] 이렇게 해서 제조된 VGCFs는 (1) 직선상의 나노섬유 미세구조를 가지고 있고, (2) 다양한 각도를 갖는 원뿔이 포개져 있는 것으로 보이는 미세구조를 하고, (3) 섬유의 중심에는 큰 공동을 형성하고 있으며, (4) 흑연의 선단면이 섬유의 중심과 표면에 모두 노출되어 있어 섬유 외부와 내부 표면에서 모두 활성이 크고 반응성이 클 것으로 예상된다.

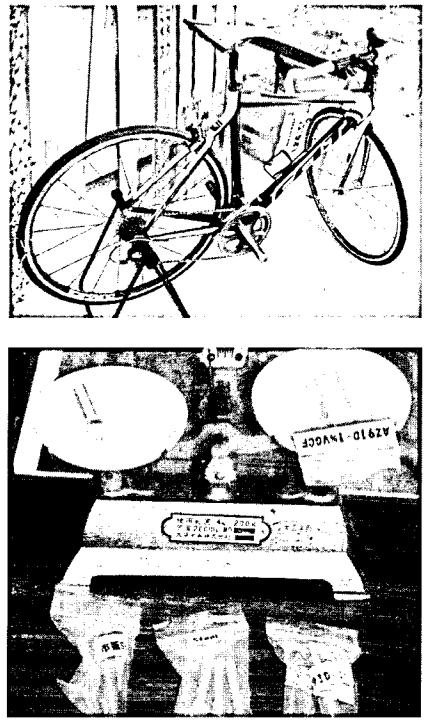


그림 16. Bicycle and screws using VGCFs composite(courtesy of Prof. Morinobu Endo, Shinshu University).

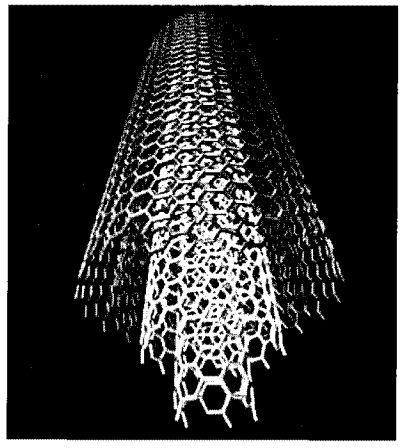


그림 17. Model of cup stack VGCFs.

4. 요약

전기방사 탄소섬유와 s-VGCFs는 그 미세구조의 특성 때문에 응용분야가 서로 다르다.

전기방사 탄소나노섬유는 유기물을 섬유화하고 그것을 탄화하기 때문에 VGCFs에 비해서 낮은 가격에 대량생산이 가능하고 촉매를 사용하지 않기 때문에 전극으로 사용할 경우 금속불순물에 대한 부반응의 우려가 없다. 한편, 결정성이 낮고 세공이 잘 발달되어 비표면적이 크기 때문에 이온을 흡착해서 에너지를 저장하는 전기화학 캐패시터나 가스 흡착 분리나 촉매의 지지체로 사용하는데 장점이 있다. 이에 비해서 s-VGCFs는 섬유의 직경이 기존의 VGCF에 비해서 작으면서 잘 발달된 흑연구조가 동심원 구조를 하고 있어 굴곡강도가 크고 열 및 전기전도도가 우수하여 납축전지나 Li 이온전지의 충전제로

사용하여 역학적 특성과 전기전도성을 향상시켜 주는 역할을 한다. 또한, 금속과 복합화하여 가벼우면서도 강도를 증가시켜주는 보강재로 사용가능하다.

참고문헌

1. P. Gibson *et al., Colloids Surf. A : Physicochem. Eng. Aspects*, **187-188**, 469 (2001).
2. W. J. Morton, U.S. Patent 1,975,504 (1934).
3. Y. M. Kim, NanoTechnics, Patent 10-2004-0088578 (2002).
4. D. Li and Y. Xia, *Nano Letters*, **4**, 933 (2004).
5. M. Bognitzki, M. Czado, T. Frese, A. Schaper, M. Hellwig, M. Steinhart, A. Greiner, and J. H. Wendorff, *Adv. Mater.*, **13**, 70 (2001).
6. J. H. Yu, S. V. Fridrikh, and G . C. Rutledge, *Adv. Mater.*, **16**, 1562 (2004).
7. C. Kim, K. S. Yang, M. Kojima, K. Yoshida, Y. J. Kim, Y. A. Kim, and M. Endo, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 2393 (2006).
8. C. Kim, B. T. N. Ngoc, K. S. Yang, M. Kojima, Y. A. Kim, Y. J. Kim, M. Endo, and S. C. Yang, *Adv. Mater.*, **19**, 2341 (2007).
9. S. H. Park, C. Kim, Y. I. Jeong, D. Y. Lim, Y. E. Lee, and K. S. Yang, *Synth. Met.*, **146**, 207 (2004).
10. C. Kim and K. S. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 1216 (2003).
11. N.-N. Bui, B.-H. Kim, K. S. Yang, M. E. D. Cruz, and J. P. Ferraris, *Carbon*, **47**, 2528 (2009).
12. B.-H. Kim, N.-N. Bui, K. S. Yang, M. E. D. Cruz, and J. P. Ferraris, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **30**, 1967 (2009).
13. B.-H. Kim, K. S. Yang, M. E. D. Cruz, and J. P. Ferraris, PCT/KR2009/006454 (2009).
14. J. Chmiola, G. Yushin, Y. Gogotsi, C. Portet, P. Simon, and P. L. Taberna, *Science*, **313**, 1760 (2006).
15. Guang Feung, Rui Qiao, Jingsong Huang, Bobby G. Sumpter, and Vincent Meunier, Published on line, 10.1021/nn100126w (2010), www.acsnano.org.
16. L. Ji, K.-H. Jung, A. J. Medford, and X. Zhang, *J. Mater. Chem.*, **19**, 4992 (2009).
17. J. H. Park, Y. W. Ju, S. H. Park, H. R. Jung, K. S. Yang, and W. J. Lee, *J. Appl. Electrochem.*, **39**, 1229 (2009).
18. B.-H. Kim and K. S. Yang, PCT/KR2009/007733 (2009).
19. B.-H. Kim, K. S. Yang, and H.-G. Woo, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **10**, 3331 (2010).
20. G.-Y. Oh, Y.-W. Ju, H.-R. Jung, and W.-J. Lee, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **81**, 211 (2008).
21. G.-Y. Oh, Y.-W. Ju, M.-Y. Kim, H.-R. Jung, H. J. Kim, and W.-J. Lee, *Science of the total Environment*, **393**, 341 (2008).
22. W. J. Lee, G. Y. Oh, Y. W. Ju, and H.-R. Jung, Patent 10-0020834 (2008).
23. T. Koyama and M. Endo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **3**, 1175 (1974).
24. T. Koyama and M. Endo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **13**, 1933 (1974).
25. A. Oberlin and M. Endo, *J. Cryst. Growth.*, **32**, 335 (1976).
26. J. S. Speck, M. Endo, and M. S. Dresselhaus, *J. Cryst. Growth.*, **94**, 834 (1989).
27. G. G. Tibbetts, *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 666 (1983).
28. F. Benissad, P. Gadelle, M. Coulon, and L. Bonnetain, *Carbon*, **26**, 61 (1989).
29. G. G. Tibbetts, D. W. Gorkiewicz, and R. L. Alig, *Carbon*, **31**, 809 (1993).
30. M. Ishioka, T. Okada, K. Matsubara, and M. Endo, *Carbon*, **30**, 865 (1992).
31. M. Endo, *Chemtech*, **18**, 568 (1988).
32. Showa denko's catalog, Fine Carbon, V.G.C.F (1997).
33. M. Endo, Y. A. Kim, T. Hayashi, K. Nishimura, T. Matusita, K. Miyashita, and M. S. Dresselhaus, *Carbon*, **39**, 1287 (1992).
34. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sugihara, I. L. Spain, and H. A. Goldberg, *Graphite fibers and filaments*, Springer-Verlag, Berlin, p. 192 (1988).
35. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sugihara, I. L. Spain, and H. A. Goldberg, *Graphite fibers and filaments*, Springer- Verlag, Berlin, p. 122 (1988).
36. M. Endo, Y. A. Kim, T. Hayashi, Y. Fukai, K. Oshida, M Terrones, T. Yanagisawa, S. Higaki, and M. S. Dresselhaus, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1267 (2002).
37. H. Tamai *et al., Electrochem. Solid State Lett.*, **6**, A214 (2003).
38. G. G. Tibbetts, C. A. Bernardo, D. W. Gorkiewic, and R. L. Alig, *Carbon*, **32**, 569 (1994).
39. Ph. Serp and L. Figueiredo, *Carbon*, **34**, 569 (1996).
40. E. Hojo, J. Yamashita, K. Kishimoto, H. Nakashima, and Y. Kasai, *YUASA-JIHO, Tech Rev.*, **72**, 23 (1992).
41. K. Nishimura, Y. A. Kim, T. Matushita, T. Hayashi, M. Endo, and M. S. Dresselhaus, *J. Mater. Res.*, **15**, 1303 (2000).