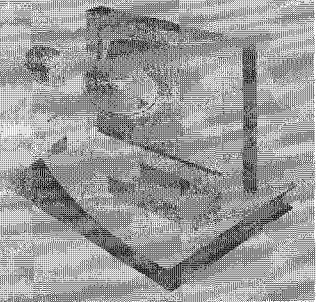


탄소나노튜브의 전기화학적 특성



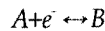
서선희 선임연구원, 차승일 선임연구원, 이동윤 책임연구원 (한국전기연구원 나노융합에너지소재연구센터)

1. 서론

전기화학은 쉽게는 한 금속 위에 다른 금속을 입히는 도금에서부터 배터리의 작동, 전기분해, 금속의 제련과 정제, 신경전달 및 생체 내 대사작용을 이해하는 데에도 널리 사용된다. 오랜 역사를 갖고 이 분야는 초기에는 전기화학적 성능을 열역학적 관계나 전해질 내 이온의 이동도와 활동도로 이해하려고 했으나, 최근에는 전극/전해질 계면 특성에 따라, 즉 전극표면의 미세구조 및 조성 등에 따라 전극 반응이 크게 달라짐이 인식되었다. 특히 탄소계 전극 물질은 저가의 소재로 높은 화학적 안정성, 넓은 전압 범위에서 수용액 속의 전극소재가 산화 또는 환원되지 않는 장점 (Wide potential window)과 여러 산화환원쌍에 대해 전기화학적 촉매 기능을 수행할 수 있는 장점이 있다. 흑연, 유리상 탄소 (Glassy carbon), 카본블랙과 같은 탄소계 물질은 유기분자와 생물분자에 대한 산화-환원 성능이 귀금속 보다 우수하며 전지와 슈퍼 커패시터에 에너지를 저장할 수 있게 한다. 이 중 탄소나노튜브 (Carbon nanotube, CNT)는 높은 가로세로 비 (Aspect ratio)와 우수한 전기전도도, 열적 안정성, 유연성 등을 갖으며, CNT 특유의 형상으로 인해 Bulk conductor와 Enzyme 또는 Redox-active electrode modifier 사이의 전기적 소통을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 본 원고는 CNT를 포함한 탄소계 전극의 전기화학적 특성에 대한 리뷰 논문을

바탕으로 작성되었다 [1-3].

CNT의 전기화학적 특성을 이해하기 위해 탄소계 전극의 일반론을 간략히 언급하고자 한다. 전기화학에서 탄소계 전극 소재의 성능은 대체로 전자전달 속도 (k^0)로 규정된다. 이때의 산화환원 반응식은 다음과 같다 [3].



이때 k^0 는, 맨 기판과 이 기판에 흡착된 전극물질의 Mass transport regime이 같은 경우, 그림 1과 같은 Cyclic voltammetry (CV) 측정을 통해 산화-환원 피크의 전압차이 (ΔE_p)로 쉽게 추정할 수 있는데, ΔE_p 가 작을수록 k^0 는 커진다고 본다 [4]. 전기화학에서 주로 사용되는 촉매제로 직경이 1 μm 이하인 백

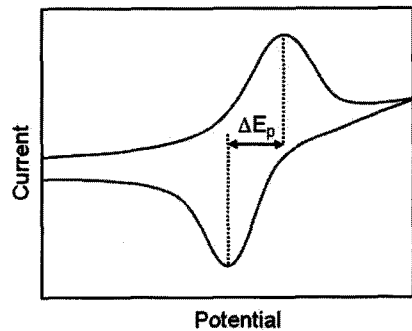


그림 1. Cyclic voltammogram at a given scan rate.

금 전극의 경우 산화환원쌍 (Redox couple)이 $\text{Ru}(\text{NH}_3)_6^{3+/2+}$ 일 때 보통 k^0 가 0.6-1.0 cm/s를 갖는다. 일반적으로 k^0 가 1.0 이상인 경우는 측정하기 매우 어려워 백금에서의 $\text{Ru}(\text{NH}_3)_6^{3+/2+}$ 는 이상적인 산화환원 계 (Redox system)로 간주된다 [1].

2. 탄소나노튜브 전극의 연구결과

2.1 탄소계 전극

일반적으로 탄소계 전극의 표면은 크게 두 가지로 구분된다. 그림 2와 같이 평면형태의 'Basal plane' 과 Graphene sheet의 절단면인 'Step edge'로 구성된다. 고도의 결정성을 갖는 Highly oriented pyrolytic graphite (HOPG)는 Basal plane에서 k^0 가 0.0014 cm/s (for $\text{Ru}(\text{NH}_3)_6^{3+/2+}$), Edge plane에서는 0.06(0.1 cm/s (for $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$)로 Active site가 어디냐에 따라 매우 다른 전자전달 속도를 갖는다. 이들은 그림2에서처럼 전자전달 속도가 달라 다른 CV 곡선을 보여준다 [5]. 탄소계 전극에서 주목해야할 점은 이들 전극의 전기화학적 특성이 전극준비를 위한 전처리와 표면처리 과정에 따라 매우 크게 변하게 된다: 첫 번째 이유는 전극처리 내력에 따라 표면의 Basal plane 대 Step edge의

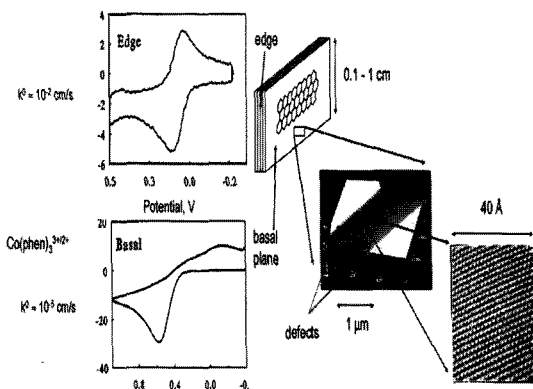


그림 2. 원자적으로 평평한 Basal plane과 Step edge에서의 Voltammograms (for $\text{Co}(\text{phen})_3^{3+/2+}$ in 1 M KCl, scan rate 0.2 V/s) [5].

비율을 변화시키기 때문이다. 두 번째는 Step edge의 탄소원자가 산소 혹은 물과 쉽게 반응하는 특성으로 인해 처리 과정에 따라 그림 3과 같은 다양한 결합이 형성될 수 있다. 카르복실기 (-COOH)와 같은 Negative surface charge는 전자전달뿐만 아니라 이온의 흡착에도 크게 관여하게 되므로, 연구대상이 되는 전기화학 시스템에 따라 적합한 처리과정을 거쳐야만 한다.

2.2 CNT 전극

CNT는 익히 알려진 바와 같이 크게 SWNT (Single-walled carbon nanotube)와 MWNT (Multi-walled carbon nanotube)로 구분된다. Graphene sheet를 둥글게 말아 놓은 형상인 SWNT는 직경이 0.7-3 nm, MWNT의 경우는 2-30 nm 수준이며 길이는 수 십 마이크로미터에 이른다 [6]. SWNT와는 달리 MWNT는 합성법에 따라 튜브 길이 방향의 표면 형상이 그림 4와 같은 'Hollow tube', 'Bamboo', 'Herringbone' 과 같은 형태를 가질 수 있다 [7]. CNT는 C_{60} 과 같은 Fullerene을 합성하기도 하는 Arc-discharge법과 Fe, Ni, Co와 같은 금속 나노입자를 사용하는 Chemical vapor deposition (CVD)법 등에 의해 합성할 수 있다. 그림 5는 합성법에 따른 CNT 형상을 보여주고 있다 [8-11]. CNT는 Graphene sheet의 Basal plane으로 형성된 'Sidewall' 과, Pentagon과 같은 Fullerene으로 끝이 막힌 형태 또는 Step edge와 같은 끝이 열린 형태의 'End' 부로 구성되어 있다. 각각의 튜브는 원주방향으로 Hexagon의 숫자에 따라 전기적 특성이 금속성이거나 반도체 성질을 갖는다. SWNT의 경우 합성 후 대체로 1/3은 금속성

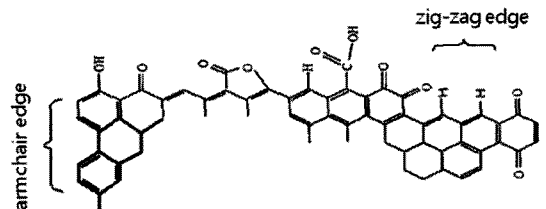


그림 3. Edge plane에 형성될 수 있는 표면 산화기능의 예 [1].

을 2/3은 반도체성을 갖으며 [12], 금속과는 달리 페르미 준위 근처의 전자분포밀도가 매우 낮아, 낮은 Capacitance를 갖는 특징이 있다 [13].

전기화학에서 사용되는 CNT는 다양한 크기를 갖는 Bundle 형태가 주로 사용되었다. CNT 소재는 단일상으로 (Monodispersed) 만들기 어려운 물질로 여러 직경과 길이를 갖는 나노튜브가 혼합된 형태이다. 따라서 전자전달 메커니즘을 설명하거나 예측할 수 있는 페르미 레벨 근처의 전자밀도는 CNT 혼합물의 평균에 해당하게 된다. 이런 CNT 집합체의 경우는 전자밀도 측면에서 '금속'으로 간주되고, CNT 배열방향이 일정하지 않고 엉켜있어 Sidewall과

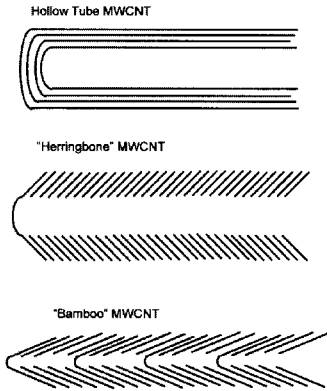


그림 4. MWNT 튜브 안에서 Graphene sheet의 방향에 따른 종류 [7].

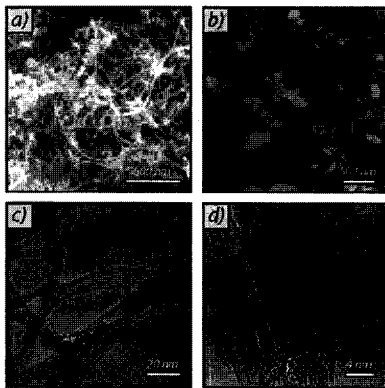


그림 5. 합성법에 따른 CNT 형상 (a) Arc-discharge, (b) Laser-ablation, (c) HiPCO, (d) CVD [8-11].

Step edge에 해당하는 Edge-like-defect가 뒤섞인 상태가 된다.

2.3 초기 CNT 전기화학 연구

초기 CNT 관련 연구는 Arc-discharge 법으로 합성된 CNT를 정제하지 않고 전극으로 준비하여 사용하였다. 이런 상태에서 CNT 전극은 그림 6에서 보는 바와 같이 백금보다도 우수한 전기화학적 촉성을 보이기도 했다 [14]. 이때 사용되었던 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ 산화환원쌍은 전기화학에서 전자전달 연구에 널리 사용되는 것이나, 탄소계 전극에서는 흡착과 분해가 일어나 전자전달 연구에 적합하지 않은 것으로 인식되고 있다.

이때 제기된 의문점으로 'CNT의 전기화학적 특성은 CNT 고유의 것인가?' 아니면 'CNT 전극에 존재하는 불순물이나 결합에 의해 전기화학적 촉매 거동을 보이는 것인가?' 이다. CNT는 합성과정에서 필연적으로 CNT가 아닌, 그리고 전기화학적 촉매제로 알려진, 탄소계 불순물과 촉매금속을 포함하고 있다. 또한 CNT sidewall이나 End에 존재하는 결합

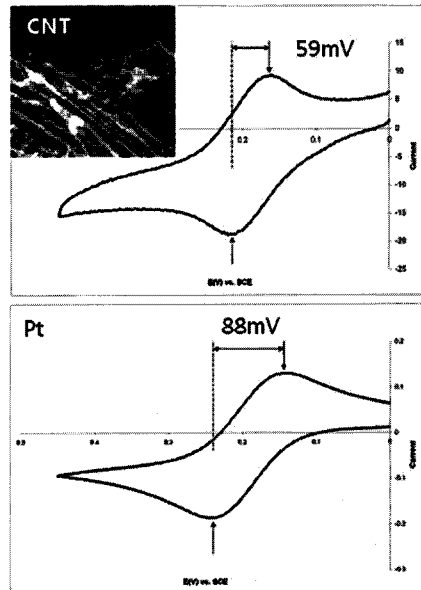


그림 6. MWNT의 SEM 사진과 CV (for $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$) [14].



과 여기에 형성된 산소를 포함한 기능기도 전기화학적 특성에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 정제하지 않은 CNT의 경우 금속 나노입자와 CNT가 아닌 탄소계 불순물이 다량 존재해 CNT 고유의 전기화학적 거동을 이해하기엔 부족한 것으로 인식되었다.

이후 정제된 CNT를 첨가제와 함께 용매에 분산시켜 전도성 기판에 코팅한 형태의 'CNT로 개질된 전극'에 관한 연구가 수행되었다 [15,16]. 전도성 기판으로는 유리상 탄소, HOPG나 백금이 주로 사용되었다. 이러한 전극의 경우 높은 Sensitivity와 Selectivity와 같은 특성을 보인다는 여러 보고가 있다(그림 7) [3]. 이런 경우도 'CNT로 개질된 전극'의 전기화학적 우수성이 CNT의 전기화학적 촉매작용이 아닌 산화환원쌍이 다공성 CNT 사이에 갇혀 Thin layer diffusion에 의한 것이라는 보고도 있다 [4]. 정제를 위해 화학적으로 처리된 CNT는 그 과정에서 길이가 짧아져 전기전도도가 감소하게 되고, 많은 산소를 포함한 기능을 포함할 수 있다. 또한 CNT의 분산성 향상을 위해 사용된 고분자나 계면활성제가 CNT 표면을 뒤덮어 Active site와 전해질과의 접촉을 방해할 수 있어 CNT 전극 준비과정과 연구결과 분석에 주의가 요구된다.

2.4 금속나노입자 불순물의 역할

CNT 정제는 합성 후 황산/질산의 혼합산 처리를 통해 비정질 탄소를 효과적으로 제거할 수 있고 [17],

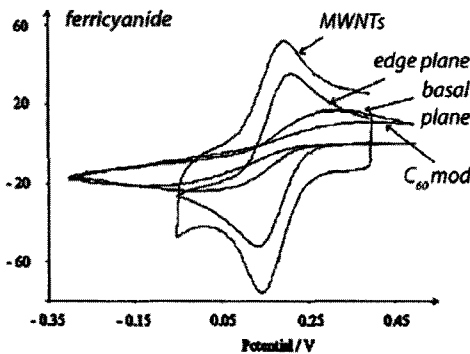


그림 7. Basal and edge plane pyrolytic graphite (BPPG, EPPG)와 MWNT로 개질된 BPPG 전극의 Fe(CN)₆³⁻의 환원 [3].

질산에서 초음파 처리를 통해 금속 나노입자를 제거할 수 있다고 알려져 있다 [18]. 그러나 많은 그룹에서 정제과정을 거치더라도 금속 불순물이 상당히 존재함을 보고 하였다 [19,20]. 따라서 어떤 산화환원 시스템에서는 이러한 금속 불순물로 인해 전기화학적 특성이 향상될 수 있다. Hydrazine oxidation 반응의 경우 Fe계 불순물을 제거한 경우 Hydrazine에 대한 전기화학적 촉매작용은 사라지게 된다고 보고된 바 있다 [21]. 여러 금속입자가 사용된 합성의 경우, Co 나노입자에 Fe를 포함하고 있어 hydrogen peroxide의 환원 작용에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 [22]. 전극 전체 면적의 평균값을 얻게 되는 전기화학 분석의 특성상 금속 나노입자의 역할과 CNT 고유의 역할을 분리하는 것에는 어려움이 있다.

2.5 CNT 결함의 역할

MWNT 전극의 경우 전해질과 접촉하는 전극의 양을 증가시켰을 때 (혹은 전해질에 노출된 면적이 넓은 경우) 산화/환원 전류밀도가 증가함을 보고하였는데, 이는 CNT의 전기화학적 활성도는 높은 비율로 존재하는 Edge site 혹은 Defect에 의한 것이라고 주장된 바 있다. CNT의 Sidewall이 Edge-like-defect보다 전자전달 속도가 느리다는 이러한 견해는 MWNT로 개질된 HOPG의 결과에 의한 것이다(그림 8) [21].

이런 논리가 SWNT에도 적용될 수 있는지, 과연 Sidewall은 전기화학적으로 어떤 역할도 수행하지 못하는 것인지, 또한 어떤 종류의 결함이 전기화학적

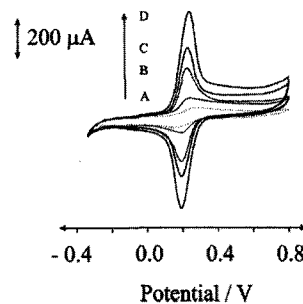


그림 8. MWNT로 개질된 BPPG 전극의 MWNT 양 증가 (20-80 µg)에 따른 CV [21].

역할을 하는 것인지에 대한 의문점이 존재한다. CVD로 합성된 MWNT의 경우 많은 비정질 탄소를 포함하고 있는데, 이들을 열처리를 통해 제거할 경우 그 성능이 감소된다는 보고도 있다 [23]. HiPCO법으로 합성된 SWNT의 경우 산처리를 통해 길이를 짧게 해 Edge-like-defect를 증가시키고, 초음파처리를 통해 산소를 포함한 기능기를 유도한 경우도 전기화학적 특성이 향상된 바 있다 [24]. Au 기판 위에 Self-assembly monolayer를 통해 SWNT를 수직 배향할 경우 무질서한 경우보다 우수한 전기화학적 특성을 보이는데, 이는 표면에 노출된 Edge-like-defect의 수가 증가하였기 때문이라고 주장하였다 (그림 9)[25].

전도성을 갖는 기판의 효과를 제거하고 CNT 고

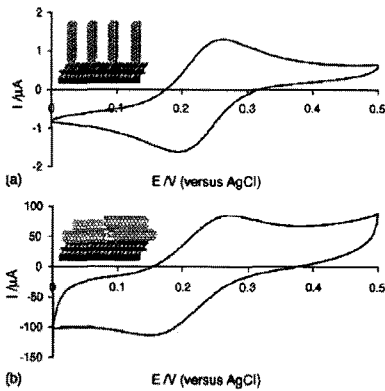


그림 9. SWNT로 개질된 Au 전극의 CV 곡선 [25].

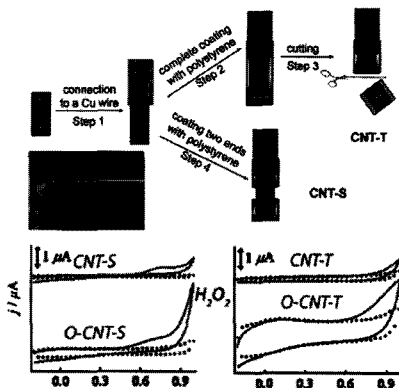


그림 10. CNT 전극 준비법과 CNT 준비법에 따른 H₂O₂의 산화반응 [28].

유의 특성을 이해하기 위해 전기화학적으로 불활성이며, 절연체인 SiO₂/Si 기판에 SWNT를 CVD법으로 합성하였다. 이렇게 합성된 SWNT는 결함과 비정질 탄소 함량이 매우 낮고, 결정성 또한 우수한 특성을 갖는다. 이들 CNT는 Sidewall만 노출된 상태에서 전자전달 작용이 있고 [26], 산처리나 플라즈마 처리를 통해 결함을 유발한 경우에 Dopamine의 산화작용이 유리해짐이 확인되었다 [27]. 그 후 2008년에 수직 배향된 Superlong double-walled CNT를 이용한 연구결과는 전기화학적 성능이 Sidewall/edge 비율이나 산소가 포함된 기능기의 존재 여부보다는 관찰하고자 하는 산화환원 계에 따라 달라짐을 의미한다 (그림 10)[28]. 예를 들면, Hydrogen peroxide의 산화는 산소를 포함한 작용기 유무에 무관하게 Sidewall에서만 일어나고, Cysteine의 산화는 Sidewall/edge에 무관하게 산소를 포함한 작용기가 있는 경우에 발생하였다.

CNT 합성 과정 중에 형성된 Local impurity, Point defect, sp³ hybridized defect와 같은 결함들도 전기화학적으로 활성이다. Sidewall에 결합된 카르복실기와는 달리 Vacancy에 결합된 카르복실기는 반도체성 SWNT의 전기전도도를 향상시키기도 한다 [29]. 따라서 CNT 고유의 전기화학적 특성을 이해하기 위해서는 CNT 고유결함에 대한 깊이 있는 이해가 필요하다. Ni의 경우 CVD로 합성된 SWNT

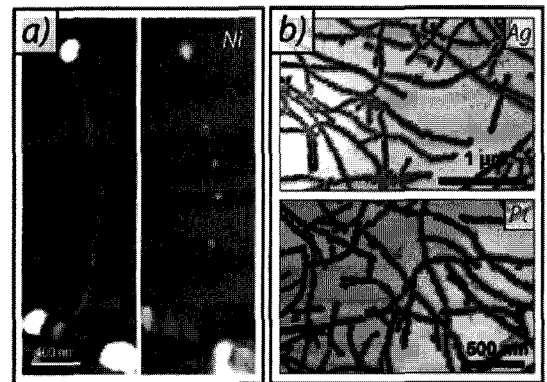


그림 11. SWNT에 전기도금 된 금속 나노입자의 SEM 사진 [30,31].



에 인가전압을 미소량 조정하여 (Electroplating에 의한 금속 나노입자 형성법) Ni 나노입자를 선택적으로 혹은 균일하게 CNT 표면에 형성할 수 있고, 은이나 백금 같은 금속은 결합 사이트에만 형성되는 것이 아니라, CNT의 길이방향으로 균일하게 형성됨이 확인되었다 [30,31]. 이는 SWNT의 Sidewall이 전자전달에 효과적임을 의미한다.

3. 응용 분야 및 향후 연구 방향

CNT의 전자전달 성능을 염료감응 태양전지의 상대전극으로 이용해서 백금 상대전극에 준하는 태양전지 효율이 보고된 바 있다 [32-34]. 이 경우는 Fluorine-doped tin oxide 투명전도성전극에 CNT 두께가 1 μm 이상 일 때 보이는 결과로, 임피던스 분석 결과 특성주파수가 백금 대비 1/100 수준의 작은 곳에서 CNT/ 전해질 계면 반응이 일어나, I/I_3 의 환원에 기여하는 것으로 판단된다.

또한 탄소계 전극은 바이오센서에서 중요한 부분을 차지한다. 그럼에도 기존의 탄소계 전극은 스크린프린팅으로 인쇄되거나 비정질 탄소를 사용하여, Sensitivity나 Stability가 좋지 못하고, 응답속도가 느린 단점이 있다. CNT는 이런 단점들을 극복해 줄 것으로 기대되고 있다. 실제 CVD로 합성된 MWNT를 SiO₂에 수직으로 배열한 Micro-disk형 전극의 경우

아토몰 수준의 측정한계로 DNA를 감지할 수 있고 [35], dopamine의 경우 nM 수준의 농도측정이 가능하였다 [36]. 이는 CNT 고유의 특성인 낮은 Capacitance 때문으로 Background와 Non-faradaic 반응이 작고 전극의 응답속도가 빠르기 때문이다. 또한 뇌 기능연구에도 CNT가 효과적으로 사용되고 있어, 향후 바이오 관련 응용을 위한 연구가 더욱 활발해 질 것으로 기대된다.

CNT 전기화학 분야가 여러 장점이 있음에도 여

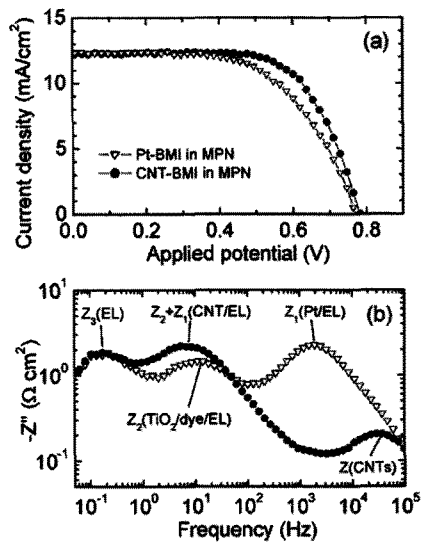


그림 12. CNT 상대전극을 사용한 염료감응태양전지의 I-V와 임피던스 스펙트럼 [32].

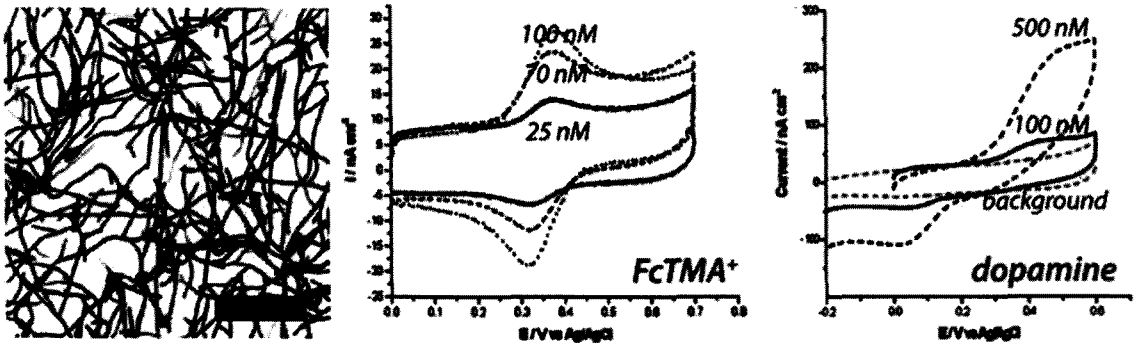


그림 13. SWNT의 Surface coverage가 1% 미만인 전극의 SEM 사진과 CV [35].

전히 전기화학적 기능에 대한 이해가 완전하지 않은 상태이다. 따라서 CNT 고유의 결합에 대한 정확한 이해와 전극제조를 위한 화학적 처리가 CNT 구조와 특성에 어떤 영향을 미치는지에 대해 정교한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] R. L. McCreery, *Chem. Rev.* 108, 2646 (2008).
- [2] I. Dumitrescu, P. R. Unwin, and J. V. Macpherson, *Chem. Comm.* 6886 (2009).
- [3] C. E. Banks, T. J. Davies, G. G. Wildgoose, and R. G. Compton, *Chem. Comm.* 829 (2005).
- [4] I. Streeter, G. G. Wildgoose, L. Shao, and R. G. Compton, *Sens. Actuators B* 133, 462 (2008).
- [5] M. T. McDermott, C. A. McDermott, R. L. McCreery, *Anal. Chem.* 65, 937 (1993).
- [6] L. X. Zheng, M. J. O'Connell, S. K. Doorn, X. Z. Liao, Y. H. Zhao, E. A. Akhadov, M. A. Hoffbauer, B. J. Roop, Q. X. Jia, R. C. Dye, D. E. Peterson, S. M. Huang, J. Liu and Y. T. Zhu, *Nat. Mater.*, 3, 673 (2004).
- [7] C. E. Banks and R. G. Compton, *Analyst*, 131, 15 (2006).
- [8] A. G. Rinzler et al., *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 67, 29 (1998).
- [9] H. Hiura, T. W. Ebbesen and K. Tanigaki, *Adv. Mater.* 7, 275 (1995).
- [10] M. J. Bronikowski, P. A. Willis, D. T. Colbert, K. A. Smith and R. E. Smalley, *J. Vac. Sci. Technol., A*, 19, 1800 (2001).
- [11] J.-F. Colomer, C. Stephan, S. Lefrant, G. Van Tendeloo, I. Willems, Z. Konya, A. Fonseca, C. Laurent and J. B. Nagy, *Chem. Phys. Lett.*, 317, 83789 (2000).
- [12] R. Saito, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London, 1998.
- [13] I. Heller, J. Kong, K. A. Williams, C. Dekker, S. G. Lemay, *J. Am. Chem. Soc.* 128, 7353 (2006).
- [14] J. M. Nugent, K. S. V. Santhanam, A. Rubio and P. M. Ajayan, *Nano Lett.*, 1, 87 (2001).
- [15] C.-Y. Liu, A. J. Bard, F. Wudl, I. Weitz and J. R. Heath, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2, 577 (1999).
- [16] H. Luo, Z. Shi, N. Li, Z. Gu and Q. Zhuang, *Anal. Chem.*, 73, 915 (2001).
- [17] Y. Li, X. Zhang, J. Luo, W. Huang, J. Cheng, Z. Luo, T. Li, F. Liu, G. Xu, X. Ke, L. Li and H. J. Geise, *Nanotechnology*, 15, 1645 (2004).
- [18] J.-M. Moon, K. H. An, Y. H. Lee, Y. S. Park, D. J. Bae and G.-S. Park, *J. Phys. Chem. B*, 105, 5677 (2001).
- [19] K. Jurkschat, X. Ji, A. Crossley, R. G. Compton and C. E. Banks, *Analyst*, 132, 21 (2007).
- [20] M. Pumera, *Langmuir*, 23, 6453 (2007).
- [21] C. P. Jones, K. Jurkschat, A. Crossley, R. G. Compton, B. L. Riehl, C. E. Banks, *Langmuir* 23, 9501 (2007).
- [22] M. Pumera and H. Iwai, *Chem. Asian J.*, 4, 554 (2009).
- [23] J. Li, A. Cassell, L. Delzeit, J. Han and M. Meyyappan, *J. Phys. Chem. B*, 106, 9299 (2002).
- [24] J. Liu, A. Chou, W. Rahmat, M. N. Paddon-Row and J. J. Gooding, *Electroanalysis (N. Y.)*, 17, 38 (2005).
- [25] J. J. Gooding, *Electrochim. Acta*, 50, 3049 (2005).
- [26] I. Heller, J. Kong, H. A. Heering, K. A. Williams, S. G. Lemay and C. Dekker, *Nano Lett.*, 5, 137 (2005).
- [27] I. Dumitrescu, N. R. Wilson and J. V. Macpherson, *J. Phys. Chem. C*, 111, 12944 (2007).
- [28] K. Gong, S. Chakrabarti and L. Dai, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 47, 5446 (2008).
- [29] C. Wang, G. Zhou, J. Wu, B.-L. Gu and W. Duan, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 173130 (2006).
- [30] Y. Fan, B. R. Goldsmith and P. G. Collins, *Nat. Mater.*, 4, 906 (2005).
- [31] T. M. Day, P. R. Unwin, N. R. Wilson and J. V. Macpherson, *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 10639 (2005).
- [32] S. H. Seo, S. Y. Kim, B.-K. Koo, S. I. Cha, and D. Y. Lee, *Langmuir*, 26, 10341 (2010).
- [33] S. I. Cha, B. K. Koo, S. H. Seo, and D. Y. Lee, *J. Mater. Chem.*, 20, 1 (2010).
- [34] J. Han, H. Kim, D. Y. Kim, S. M. Jo, and S.-Y. Jang, *ACS Nano*, 4, 3503 (2010).
- [35] J. Li, H. T. Ng, A. Cassell, W. Fan, H. Chen, Q. Ye, J. Koehne, J. Han and M. Meyyappan, *Nano Lett.*, 3, 597 (2003).
- [36] P. Bertonecello, J. P. Edgeworth, J. V. Macpherson and P. R. Unwin, *J. Am. Chem. Soc.*, 129, 10982 (2007).



저|자|약|력|



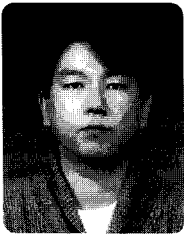
성 명 : 서선희

◆ 학 력

- 1997년 전남대학교 물리학과 이학사
- 1999년 광주과학기술원 신소재공학과 공학 석사
- 2004년 광주과학기술원 신소재공학과 공학 박사

◆ 경 력

- 2004년 - 2006년 삼성SDI 책임연구원
- 2007년 - 현재 한국전기연구원 나노융합에너지 소재연구센터 선임연구원



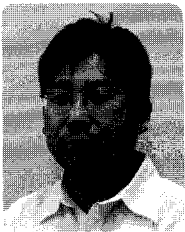
성 명 : 차승일

◆ 학 력

- 1996년 KAIST 재료공학과 공학사
- 1998년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 2002년 KAIST 재료공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2002년 - 2006년 KAIST 재료공학과 박사후 연구원
- 2006년 - 2008년 일본 NIMS ICYS Research Fellow
- 2008년 - 현재 한국전기연구원 나노융합에너지 소재연구센터 선임연구원



성 명 : 이동윤

◆ 학 력

- 1983년 부산대학교 공과대학 재료공학과 공학사
- 1985년 부산대학교 대학원 금속공학과 공학석사
- 1999년 Institute of Crystallography, Russian Academy of Sciences 박사

◆ 경 력

- 1987년 - 현재 한국전기연구원 나노융합에너지 소재연구센터 책임연구원

