Appl. Chem. Eng., Vol. 21, No. 5, October 2010, 495-499

탄소나노튜브 기반 벌크 소재의 전기적 임피던스 특성을 이용한 생화학 센서용 전극 개발 연구

소대섭[*,**] **· 허 훈**[***] **· 김희진**[***] **· 이해원**[**] **· 강인필**[****,†]

*한국과학기술정보연구원 산업정보분석실, **한양대학교 나노공학과,
***한국생산기술연구원 청정공정센터, ****부경대학교 기계자동차공학과
(2010년 3월 23일 접수, 2010년 8월 10일 채택)

Preparation of Bio-Chemical Sensor Electrodes by Using Electrical Impedance Properties of Carbon Nanotube Based Bulk Materials

Dae-Sup So[*,], Hoon Huh[***], Heejin Kim[***], Haiwon Lee[**], and Inpil Kang[****,†]**

[*]Industrial Information Analysis Department, Korea Institute of Science and Technology Information, Seoul 130-741, Korea
[**]Department of Nanotechnology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
[***]Cleaner Production Center, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 330-825, Korea
[****]Department of Mechanical and Automotive Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
(Received March 23, 2010; Accepted August 10, 2010)

본 연구에서는 대량 생산 가능한 센서 전극의 생화학 센서 전극 개발을 위하여 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 복합재료화 공정에 의하여 필름과 나노웹 형태의 벌크 재료로 제작한 후, 이들 전극의 넓은 표면적과 뛰어난 화학적 흡착성을 이용하여 화학적 검출 대상에 노출이 되었을 때 이들로 인한 센싱 특성을 연구하였다. CNT 기반 벌크 전극으로 제작하기 위하여 Nafion을 기저재료로 하는 필름과 PAN 기반의 나노 파이버를 전기방사법에 의하여 제작을 한 후 이들 전극의 화학적 영향에 의한 전기적인 특성 변화 실험을 위하여 버퍼 용액의 정전용량에 대한 전기적 임피던스 요소 값인 저항과 정전용량의 변화를 LCR 계측기로 측정하였다. 생화학센서용 전극으로서 CNT벌크전극의 임피던스 변화 형태가 복합소재 전극의 기저재료에 따라 달리 나타났으며 일정량의 버퍼용액 투여 후에는 변화가 없는 포화 상태의 응답을 보였으며 특히, 정전용량이 저항에 비하여 상대적으로 급격하게 큰 변화를 보여 높은 감도 특성을 지니고 있음이 조사되었다. 이들의 전기적인 특성변화는 버퍼 용액의 화학적 성분들이 전극에 흡수 된 후에 CNT에 흡착이 되어 이들의 전기적인 특성을 변화 시키는 것으로 추론된다.

To develop chemical and biosensors, this paper studies sensing characteristics of bulk carbon nanotube (CNT) electrodes by means of their electrical impedance properties due to their large surface area and excellence chemical absorptivity. The sensors were fabricated in the form of film and nano web style by using composite process for mass production. The bulk composite electrodes were fabricated with singlewall and multi-wall carbon nanotubes based on host polymers such as Nafion and PAN, using a solution-casting and an electrospinning technique. The resistance and the capacitance of electrodes were measured with LCR meter under the various amounts of buffer solution to study the electrical impedance change properties of them. On the experimental of sensor electrode, impedance characteristics of the composite electrode are affected by its host polymer and nanofiller and its sensing response showed saturated result after applying some amounts of buffer solution for test chemical. Especially, the capacitance values showed drastic changes while the resistance values only changed within few percent range. It is deduced that the ions in the solution penetrated and diffused into the electrodes surface changed the electrical properties of the electrodes much like a doping effect.

Keywords: *carbon nanotube, nano composite, nano bulk material, bio-chemical sensor*

1. 서 론

탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 우수한 기계적인 강도 및 전기 전도도를 지님과 더불어 넓은 우수한 전기 화학적 특성으로 인하여 화학적 및 생물학적 센서 재료로 많은 연구의 대상이 되어 왔다. 특히 CNT의 전기전도 특성은 이들이 화학적 환경에 노출이 될 경우 그의 전기적 특성이 매우 민감하게 변화 되므로, 이러한 특성은 화학센서로 활용될 수 있다[1]. 또한, CNT는 넓은 표면적을 지니고 있을

† 교신저자 (e-mail: ipkang@pknu.ac.kr)

뿐만 아니라 검출 대상 물질에게는 일종의 화학적 저장소와 같은 역할을 할 수 있으므로 순환전압전류법(cyclic voltametric), 전류법(amperometric) 등의 전기화학분석법에 의하여 화학적 또는 생물학적 응용 센서로 연구되어 왔다[1-7].

이와 같이 센서 재료로서 우수한 성질을 가지고 있는 CNT를 개별적으로 취급하여 나노 또는 마이크로 영역에서 센서 전극으로 활용하여 센서를 제작하는 방법은 나노튜브를 원하는 전극 위치에 놓이는 기술 및 그 조작의 어려움으로 대량 생산에는 적합하지 않다, 따라서 센서 전극제작을 위한 경제적인 방법까지 고려한 방법으로는 CNT를 복합재료 등과 같이 벌크 재료화하여 전극으로 활용하는 방법이다[3,4]. 이러한 벌크 전극의 제작 방법 중에서 대량 생산을 위한 센서 전극 방법으로는 현재 일반적인 센서 전극 제작에 널리 사용되고 있는 스크린 프린트 방법이 유용하다고 할 수 있다[8]. 이러한 선행연구로서 Wang과 Sanches는 다중벽 탄소나노튜브(multiwalled carbon nanotube, MWCNT)/polysulfone를 이용하여 대량으로 센서용 전극 제작이 용이한 스크린 프린트 방법으로 효소 바이오센서를 제작하고 그 특성을 순환전압전류법을 이용하여 측정하였다[9,10].

제작의 용이성 보다는 센서 벌크 전극의 성능 향상을 위한 또 다른 CNT 벌크전극의 개발 방법으로는 나노튜브기반의 나노웹을 제작하여 이를 활용하는 방법이다. 나노웹은 수 나노 굵기의 나노섬유로 얽히어 구성된 형태이므로 작은 직경과 높은 비표면적을 지니고 있으므로 나노복합재료 뿐만 아니라, 약물전달용 멤브레인, 고효율 필터 재료, 상처 보호용 거즈 재료 및 바이오-트랜스플랜트 재료 등과 같이 의공학적 응용 연구에도 많이 이용이 되고 있는 신소재이다[11,12]. 이러한 나노 웹의 체적 대비 높은 표면적을 지니는 특성을 이용하여 화학적 또는 생화학적 센서로 이용하고자 하는 연구는 이미 보고가 되고 있다. Wang은 fluorophore를 포함하는 폴리머 멤브레인을 전기방사법에 의하여 제작하여 이 나노웹 센서가 동일한 필름 형태의 재료보다는 flouresecnt optical sensor로서 감도가 2~3배 높다는 결과를 연구하였다[13,14]. 그러나 CNT를 첨가한 나노웹 제작과 관련된 연구는 보고가 되고 있으나[15,16], 아직 이를 이용하여 센서를 개발하는 연구는 잘 보고가 되고 있지 않다. CNT를 벌크 재료화 하여 센서로 전극을 제작하는 방법은 나노 크기의 센서 제작 방법에 비하여 현재 상업적으로 활용하기에 유리한 제작방법으로 사료가 된다. 그러나 CNT가 센서 재료로서 나노 스케일 영역에서 지닌 그 우수성을 복합재료화 하여 매크로 스케일의 영역에서 구현하기 위해서는 분산과 기저재료와의 균일한 혼합 등 많은 장애 요소 기술들이 산재해 있다. 이러한 장애 요소들은 현재 나노튜브의 기능화 및 나노복합재료 개발과 같은 관련연구들에서 활발히 진행이 되고 있으므로, 향후 우수하고 균일한 성질을 지닌 나노복합재료가 개발될 것으로 기대가 된다. 또한 CNT 기반의 경제적인 센서 제작을 위해서는 그 제작 방법뿐만 아니라 측정 방법 역시 간단하며 효과적인 방법이 이용되어야 할 것이다. 앞서 문헌적으로 고찰한 CNT 기반의 생화학 센서들은 주로 전기화학적 분석 방법 등과 같은 특수한 분석기법을 요구하고 있다. 일반적을 널리 사용되는 공업용 센서와 같이 센서의 응답이 저항 또는 정전용량 값의 변화로 변화 되어 측정이 가능하다면 이는 보다 간단한 센서의 개발을 가능하게 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 대량 생산 가능한 센서 전극의 생화학 센서 전극 개발을 위하여 CNT를 복합재료화 공정에 의하여 필름과 나노웹 형태의 벌크 재료로 제작하였다. 그리고 넓은 표면적과 뛰어난 화학적 흡착성을 지니고 있을 이들 나노복합 벌크 전극이 화학적 검출 대상에 노출이 되었을 때 이들로 인한 전극의 성질 변화를 전기적 임피던스 거동 변화를 이용하여 연구하였다. 이와 같은 전기적 임피던스의 측정법은 계측이 간단하므로 CNT 전극의 벌크 복합재료화를 통한 센서 적극의 산업적 대량제작과 더불어 경제적인 계측 방법을 제시할 수 있을 것으로 기대가 된다.

2. 실 험

2.1. 필름형 벌크 전극 제작

CNT 기반의 센서용 벌크 전극제작을 위하여 몰드를 이용한 필름 제조 방법과 전기방사법에 의한 나노 웹 제작 방법을 이용하여 각기 다른 형태의 박막형 전극을 제조하였다. 몰드 제조 방법에 의한 박막형태 벌크 전극은 용매와 단일벽 탄소나노튜브(single walled carbon nanotube, SWCNT)만을 이용한 버키 페이퍼(bucky paper)와 용매에 분산된 SWCNT 또는 MWCNT에 이온전도성 폴리머인 Nafion, perfluorinated ion-exchange resin (Aldrich 제조, 274704)을 첨가 시킨 폴리머 전극 형태들로 제작되었다. 여기에 사용된 CNT 종류로는 HiPCO방법으로 생산된 SWCNT (Carbon Nanotechnologies 제조)와 MWCNT (Aldrich 제조, 677248)가 주 전극재료로 이용되었다. 버키 페이퍼는 폴리머 기저재료의 도움 없이 반 데르 발스의 힘만으로 SWCNT가 다발 형태로 서로 엉켜서 구성되는 기본적인 벌크 재료의 형태이다. 이 벌크 전극의 제작을 위하여 나노튜브를 용매를 이용하여 고르게 분산시킨 후 그 용매를 증발시킴으로써 분산된 SWCNT들이 벌크전극을 형성하도록 다음과 같이 제작하였다. 고르게 분산된 현탁액으로 만들기 위해 10 mg 내외의 나노튜브를 용매인 N, N-dimethyl formamide (DMF, Aldrich 제조)에 1.5 mg/mL정도의 비율로 넣고 20 kHz의 출력으로 8 h 동안 혼 형태의 초음파 분산 장치(Fisher Scientific Model 100)를 이용하여 분산시켰다. 분산처리 후에 얻은 SWCNT 현탁액을 실리콘 몰드에 붓고 진공 로에 질소 분위기에서 5 kg_f /cm^2의 압력 하에서 120 ℃로 12 h 동안 용매를 증발시킨 후에 몰드에 박막 형태로 남아 있는 두께 20 μm 정도의 버키 페이퍼를 얻었다.

몰드 제조방법을 이용한 SWCNT 또는 MWCNT 기반의 Nafion 복합체 박막전극은 두 종류의 나노튜브를 질량 대비 10% 양을 용매에 분산시킨 후에 질량 대비 90% Nafion을 첨가하여 제작하였다. MWCNT는 나노튜브 자체의 직경이 SWCNT의 수 배에서 수십 배에 달하므로 나노튜브들이 기저재료의 도움 없이 순수한 반 데르 발스 힘으로 결합할 수 없으므로 버키 페이퍼와 같은 나노튜브만으로 구성된 벌크재료의 제작이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 우수한 전기화학적 특성을 지니고 있어 전극 표면개질과 바이오센서의 전극에 사용되고 있는 이온 전도성 폴리머 Nafion을 나노튜브의 결합을 위한 기저재료로 활용하여 벌크 전극을 제작하였다. 뿐만 아니라 Nafion은 높은 감도를 지키는 동안 양이온의 전송 채널에서의 아스코르브 산이나 다른 음이온의 일반적인 간섭을 제거하는 등 센서 전극 제작에 이점을 제공하는 것으로 보고되고 있다[16,17].

2.2. 나노웹 벌크 전극 제작

또 다른 형태의 벌크전극 제작을 위하여 MWCNT와 polyacrylonitrile (PAN, 150000 g/moL)의 복합체를 이용하여 전기 방사공정에 의한 나노 파이버를 제조하고 이들을 나노웹 형태의 벌크재료로 구성하여 제작을 하였다. 전기방사는 제조 공정이 간단하고 제조된 웹은 섬유의 직경이 작아 높은 표면적과 유연성을 지니고 있어 압착가공이 용이하므로 나노섬유 제조에 가장 유력한 기술로 평가되고 있다.

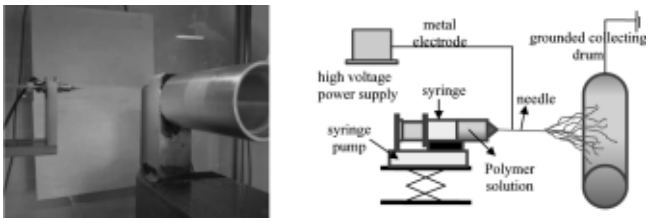

Figure 1. Electrospinning equipment and its schematic illustration.

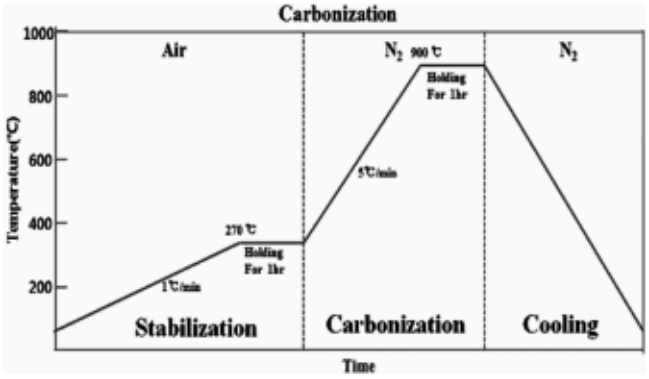

Figure 2. Carbonization process for nanoweb.

나노웹 전극은 나노 파이버들간 얽힘에 의하여 조직되어 있으며, 이들 나노 파이버들은 PAN을 기저재료로 하여 MWCNT를 파이버 내부에 포함하여 탄화가 된 형태로 존재하도록 제작하였다. 먼저 MWCNT를 포함하는 나노 파이버를 제작하기 위하여 MWCNT를 파이버제작을 위한 기저 재료가 되는 PAN과 이를 용융시키기 위한 용매인 DMF와 혼합하여 방사 복합체 용액을 제조하였다. 나노 파이버의 방사 복합체 용액은 PAN을 DMF에 녹여 10 wt%의 PAN/DMF용액을 제조한 후에, 이 용액에 PAN에 대해서 3 wt% 분량의 MWCNT를 앞에서 기술한 방법으로 분산시켜 CNT-PAN/DMF로 구성된 복합체 용액 형태로 준비되었다. 이와 같이 준비된 방사 복합체 용액을 Figure 1에 도시한 바와 같이 전기방사장치를 이용하여 전압 17 kV, 방사거리 15 cm와 토출량 0.0075 mL/min의 조건 하에서 방사 시켜 100~500 nm의 직경 나노 파이버로 구성된 나노웹을 얻었다.

본 연구에서 센서전극은 전기적인 전도성이 요구가 된다. 따라서 CNT-PAN 기반의 나노웹을 전기 가열로에서 불완전 연소 시킴으로써 카본화된 벌크 나노 웹을 얻었다. 본 실험에서 제작된 나노웹은 소량의 MWCNT를 포함하고 있어 이미 전기적으로 도전성이 있으나, PAN 기반의 나노섬유를 연소시켜 탄화시킴으로써 전기적 전도성이 더욱 향상되게 하였다. 나노웹의 탄화 과정은 Figure 2와 같은 연소공정을 통하여 이루어 졌다. 이 탄화공정에서는 전기 방사한 복합나노섬유를 공기 분위기에서 1 ℃/min의 속도로 270 ℃까지 가열하여 1 h 동안 유지한다. 그리고 N_2 분위기에서 5 ℃/min의 속도로 900 ℃까지 가열하여 다시 1 h 동안 유지한 후 상온으로 냉각시킨다.

CNT 기반 필름형과 나노웹 형태로 제작된 벌크 소재에 전선을 연결시켜 센서의 전극 형상으로 제작한 샘플들을 Figure 3에 도시하였다.

2.3. 버퍼 용액에 의한 벌크 전극의 전기적 임피던스 변화 실험

CNT기반 복합소재는 다공성과 전기 전도성을 지닐 수 있으며, 전기 임피던스 분석 법(electrical impedance spectroscopy, EIS)에 의한 전기화학적 상사모델을 이용하여 이들의 전기적 센서 모델은 저항과

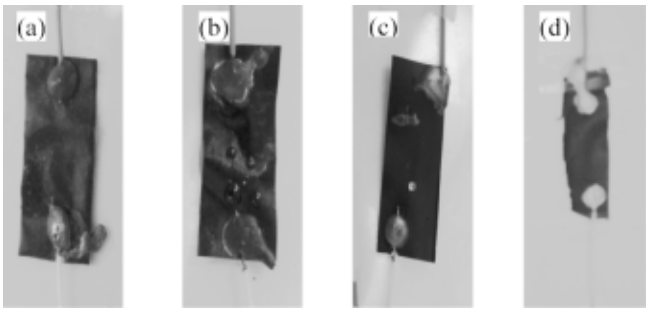

Figure 3. CNT bulk electrodes; (a) film type electrodes those are bucky paper, SWCNT/Nafion and MWCNT/Nafion composite electrode and (b) a carbonized electrospun nanoweb electrode (MWCNT/PAN).

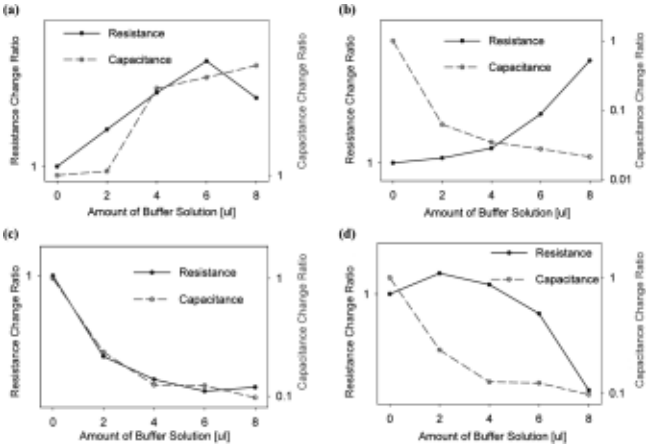

Figure 4. Electrical impedance changing patterns of the fabricated bulk electrodes under pH 7 buffer solution : (a) bucky paper electrode, (b) SWCNT/Nafion (wt% 10/90) composite electrode, (c) MWCNT/Nafion (wt% 10/90) composite electrode; and (d) electrospun PAN-MWNT/DMF (wt% 10/90) nanoweb electrode.

축전기가 병렬 형태로 구성된 간략한 전기적 센서모델로 구성할 수 있다[18]. 이들 나노복합재료의 전기적 임피던스 성분들은 물리적 또는 화학적인 주변 환경의 영향으로 변화 할 수 있으며, 특히 화학적인 환경 노출에 정전용량 성분이 민감한 변화를 보였다[19]. 따라서 이와 같은 사전의 연구에 의거하면서 본 연구에서는 제작된 여러 종류의 CNT 기반의 벌크 센서전극들의 화학적 노출에 다른 전기 임피던스 성분의 변화를 실험하였다. 각각의 전극에 2 μL/방울 양 버퍼용액(Sigma-Aldrich 제조, pH7)을 마이크로피펫을 사용하여 떨어뜨린 후 충분히 전극에 흡수가 된 후에 이들의 저항과 정전용량 값들을 1 kHz에 LCR 미터(HIOKI, HiTESTER 3522)를 사용하여 측정하고 결과를 Figure 4에 도시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 벌크 전극의 모폴로지(morphology)

제작된 벌크 소재 내부조직과 CNT들의 배치를 알아보기 위하여 SEM 촬영을 하여 그 조직을 관찰하였고 그 결과를 Figure 5에 도시하였다. 이 사진에서 CNT들이 기저재료 내에서 비교적 고르게 분포가 되어 구성하고 있음이 확인된다.

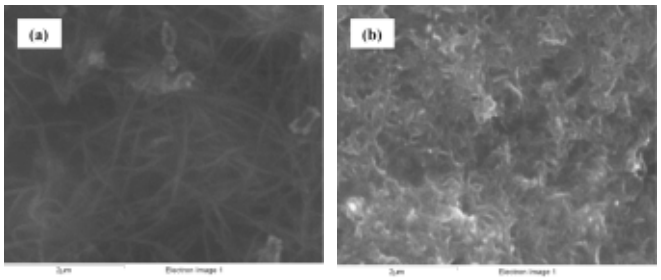

Figure 5. SEM images of electrode film samples (× 20000): (a) SWCNT/Nafion (wt% 10/90) and (b) MWCNT/Nafion (wt% 10/90).

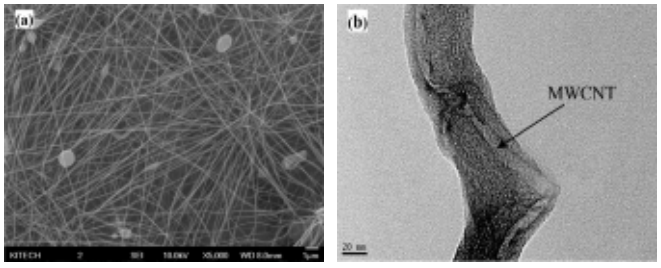

Figure 6. FE-SEM and TEM images of the nanoweb electrode sample: (a) FE-SEM (× 5000) of PAN-CNT/DMF (wt% 10/90) and (b) TEM of nanoweb showing a MWCNT in the nanofiber.

Figure 2에서 도시한 바와 같은 탄화 과정을 거친 나노웹의 섬유 조직을 확인하기 위하여 Figure 6에 도시한 바와 FE-SEM (JEOL, JES-6067F)과 FE-TEM (Philips, TecnaiTM, G2F30)을 이용한 사진 분석을 통하여 탄화된 나노 섬유의 조직을 확인하였다. 그리고 제작된 나노웹을 구성하는 나노섬유들의 길이 방향을 따라 MWCNT가 위치함을 확인 할 수 있었다.

3.2. 벌크전극의 전기적 임피던스 변화 고찰

전극의 저항값들은 기존의 다른 센서들이 측정값이 변동하는 드리프트를 보임과 유사하게 측정 시에 시간이 지남에 따라 약간의 변동을 보였다. 이러한 현상은 CNT의 표면에 흡착되는 분자들에 CNT 외벽의 그라픈 내의 전자 운반층에 영향을 주어 발생이 된다고 보고가 되었다[8]. 반면에 정전용량의 측정값은 비교적으로 안정된 변화를 보였다. 저항과 전기 용량의 변화 형상은 큰 차이를 보였다. 저항 값들은 소폭으로 변동을 하는 반면에 정전용량은 상대적으로 급격한 변화를 보였다. 각각의 전극에는 마이크로 피펫을 이용하여 한 방울에 2 μL 양의 버퍼 용액을 최대 10방울(20 μL)까지 떨어뜨려 측정을 하였으며, 4~5 방울 후에 전기적 임피던스 성분들은 변화가 없는 포화된 응답을 보였다. 버퍼 용액 내의 이온들이 전극 표면 내로 침투하여 나노튜브 주변에 이온 충전 층(double layer charge, DLC)을 형성하며, 이들이 확산되어 마치 도핑과도 같이 전극의 전기적 특성 변화를 유발한다. 따라서 전극에 적용된 화학적 변화는 이와 같은 화학적 확산에 의한 CNT의 도핑으로 인한 이들의 전기 전도성과 정전용량을 변화시키므로 이들의 임피던스 변화 측정으로 검출이 가능하다. CNT는 넓은 표면적을 지니고 있으므로 침투된 이온은 CNT 주변에 DLC를 형성함으로써 이들의 정전용량 값의 급격한 변화를 가져온다고 추정된다.

본 연구에서는 벌크 전극을 박막 형태와 나노 웹 형태로 제작하여 벌크 전극의 제작 형태가 전극의 감도와 전기적 임피던스의 변화에 미치는 영향 역시 조사되었다. 순수한 CNT만으로 구성시킨 벌크 전극인 버키 페이퍼와 Nafion을 기저재료로 하여 제작된 복합소재 벌크 전극들과는 버퍼용액을 이용한 전기적 임피던스 측정 실험에서 서로 상이한 응답특성을 보이고 있다. 이것은 아마도 CNT를 복합재료화 함에 따라 재료의 전기화학적 특성이 변화함에 따른 것으로 추측되나, 향후 보다 심도 있는 연구가 진행되어야 할 부분으로 사료가 된다. CNT를 복합재료화 하여 제작한 벌크 전극들에서는 전기적 저항의 변화 경향이 다양하게 측정이 되었다. 반면에 정전용량의 변화 경향은 버퍼용액의 증가량에 대하여 지수함수적으로 감소하는 동일 변화 경향을 보이고 있다. 따라서 CNT 기반의 복합소재를 생화학 센서용 전극으로 활용하기 위해서는 이들의 전기적 저항 변화의 특성을 이용하는 것 보다는 정전용량 변화특성을 이용하는 것이 보다 높은 감도와 신뢰성을 얻을 수 있을 것으로 기대가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 CNT 복합소재를 기반으로 하는 생화학센서 전극의 화학적 영향에 의한 전기적 임피던스 특성변화를 연구하였다. CNT 기반의 벌크 전극을 제작하기 위하여 SWCNT 및 MWCNT를 이용하였으며, 이들을 벌크 재료로 제작하기 위하여 Nafion을 기저재료로 하는 필름과 PAN 기반의 나노 파이버를 전기방사법에 의하여 제작을 하였다. 그리하여 이들 CNT 기반 전극의 화학적 영향에 의한 전기적인 특성 변화 실험을 위하여 버퍼용액의 투입용량에 대한 전극의 전기적 임피던스 요소 값인 저항과 정전용량을 LCR 계측기로 측정하였다.

버퍼용액은 CNT 기반의 전극에 투여한 결과 이들의 전기적 임피던스 값들은 일정량의 버퍼용액 투여 후에는 변화가 없는 포화상태의 응답을 보였으며, 임피던스 성분 중에서 정전용량이 저항에 비하여 상대적으로 급격하게 큰 변화를 보였다. 이들의 전기적인 특성변화는 버퍼 용액의 화학적 성분들이 전극에 흡수 된 후에 CNT에 흡착이 되어 이들의 전기적인 특성을 변화 시키는 것으로 추론된다. 이러한 전기적 특성의 변화는 외부의 화학적 요소가 CNT표면의 분자 경계에서 마치 불순물과 같은 역할을 하여 CNT의 도핑효과를 유도하며, 이때 CNT와 버퍼 용액 사이에는 나노튜브의 넓은 표면적 경계층에 DLC가 형성되어 정전용량의 변화가 전기전 저항의 변화보다 크게 발생되는 것으로 추론을 하고 있으나, 보다 정확한 원인 규명을 위하여 이들 경계층 간의 전기화학적인 모델에 의한 연구가 요구되고 있다.

또한 본 연구에서는 CNT 벌크 전극을 CNT의 종류와 제조 형태에 따른 전기적 특성 변화 역시 연구 되었다. 이온전도성 고분자인 Nafion이 첨가된 박막형태의 벌크 전극이 MWCNT에 의하여 제작이 되었으며 또한 전기방사법을 이용하여 PAN 기반의 나노파이버로 구성된 나노웹 형태의 벌크 전극 역시 제작이 되었다. SWCNT 기반의 전극 실험에서는 동일 종류의 CNT일지라도 순수하게 CNT로만 제작된 버키 페이퍼와 이온전도성 고분자 Nafion을 기저재료로 하여 제작된 전극의 임피던스 변화 패턴이 다름을 보임으로써 CNT 기반의 복합소재 전극의 기저재료에 대한 영향이 있음이 조사되었다. 또한, CNT기반 벌크 전극들의 전기적 저항의 변화 경향은 CNT의 종류와 복합재료화에 따라 일관되지 못한 변화를 보였으나 정전용량의 변화 경향은 버퍼용액의 증가량에 대하여 지수함수적으로 감소하는 동일 변화 경향뿐만 아니라 상대적으로 높은 감도 특성을 지니고 있음이 조사되었다. 향후 CNT기반의 복합재료와 이들의 전기적 임피던스 특성은 경제적이고 우수한 화학 및 바이오센서의 개발을 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, and A. Zettl, *Science*, **287**, 1801 (2000).
2. W. Yang, P. Thordarson, J. J. Gooding, S. P. Rigner, and F. Braet, *Naotechnology*, **18**, 1 (2007).
3. K. H. An, S. Y. Jeong, H. R. Hwang, and Y. H. Lee, *Advanced Materials*, **16**, 1005 (2004).
4. I. Kang, Y. Y. Heung, J. H. Kim, J. W. Lee, R. Gollapudi, S. Subramaniam, S. Narasimhadevara, D. Hurd, G. R. Kirikera, V. Shanov, M. J. Schulz, D. Shi, J. Boerio, S. Mall, and M. R. Wren, *Composites: Part B*, **37**, 382 (2006).
5. J. Suehiro, G. Zhou, and M. Hara, *Journal of Physcis D: Applied Physcis*, **36**, 109 (2003).
6. S. H. Lim, J. Wei, J. Lin, Q. T. Li, and J. K. You, *Biosensors & Bioelectronics*, **20**, 2341 (2005).
7. S. R. Ali, Y. Ma, R. R. Parajuli, Y. Balogun, W. Y.-C. Lai, and H. He, *Anal. Chem.*, **79**, 2583 (2007).
8. K. Kordas, T. Mustonen, G. Toth, H. Jantunen, M. Lajunen, C. Soldano, S. Talapatra, S. Kar, R. Vajtai, and P. M. Ajayan, *Small*, **2**, 1021 (2006).
9. J. Wang and M. Musameh, *Anal. Chem.*, **75**, 2075 (2003).
10. S. Sanchez, M. Pumer, E. Cabruja, and E. Fabregas, *Analyst*, **132**, 142 (2007).
11. Y. Zhang, C. T. Lim, S. Ramakrishna, and Z.-M. *Journal of Materials Scinece: Materials in Medicine*, **16**, 933 (2005).
12. D.-R. Chang, E.-Y. Jeong, and H.-S. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **17**, 278 (2007).
13. X. Wang, C. Drew, S.-H. Lee, K. J. Senecal, J. Kumar, and L. A. Samuelson, *Nano Letters*, **2**, 1273 (2002).
14. X. Wang, Y.-G. Kim, C. Drew, B.-C. Ku, J. Kumar, and L. A. Samuelson, *Nano Letters*, **4**, 331 (2004).
15. G.-R. Choi, Y.-W. Ju, H.-R. Jung, C. Kim, K. S. Yang, and W. J. Lee, *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **11**, 911 (2005).
16. B. W. Ahn, Y. S. Choi, and T. J. Kang, *Journal of Applied Polymer Science*, **110**, 4055 (2008).
17. S. R. Ali, Y. Ma, R. R. Parajuli, Y. Balogun, W. Y.-C. Lai, and H. He, *Anal. Chem.*, **79**, 2583 (2007).
18. I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov, and D. Shi, *Smart Materials and Structures*, **15**, 737 (2006).
19. I. Kang, M. J. Schulz, J. W. Lee, G. R. Choi, J. Y. Jung, J.-B. Choi, and S.-H. Hwang, *Solid State Phenomena*, **120**, 289 (2007).