

도전재 종류에 따른 리튬이차전지 음극재 SiOx의 전기화학적 특성

연지수¹, 장보윤², 김성수¹ , 김향연³ 

¹ 충남대학교 에너지과학기술대학원

² 한국에너지기술연구원 분리변환소재연구실

³ 한국생산기술연구원 EV부품소재그룹

Electrochemical Properties of SiOx Anodes with Conductive Agents for Li Ion Batteries

Ji-Su Yun¹, Boyun Jang², Sung-Soo Kim¹, and Hyang-Yeon Kim³

¹ Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

² Separation and Conversion Materials Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Deajeon 34129, Korea

³ EV Components & Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

(Received March 8, 2019; Revised March 28, 2019; Accepted April 1, 2019)

Abstract: This work investigated the effects of different conductive agents on the electrochemical properties of anodes. SiOx possesses high theoretical capacity and shows excellent cycle performance; however, the low initial coulombic efficiency and poor electrical conductivity limit its applications in real batteries. In this study, electrodes were fabricated using two different conductive agents, and the resulting physical and electrochemical properties were analyzed. SEM observations confirmed the formation of a CNT conductive network throughout the electrodes, while the electrical conductivity contributed to the electrode was confirmed by impedance measurements. Thus, the electrode fabricated with the CNT conductive agent showed greater capacity and superior cycle performance than did the electrode fabricated using the DB conductive agent.

Keywords: SiOx, Conductive agent, Carbon nanotube, Denka black, Anode materials, Li-ion battery

1. 서론

화석 연료 사용에 의한 환경오염 문제에 전 세계의 관심이 고조되는 가운데 리튬이차전지는 이를 해결하기 위한 친환경적인 에너지원으로 주목받고 있다. 소형 전자기기 및 휴대용 IT 기기들이 중심이었던 리튬이차전지 시장은 최근 전기자동차, 에너지저장시스템까지

적용 영역이 광범위해지고 있다. 리튬이차전지 적용 범위의 확대에 따라 고용량, 고출력을 위한 신규 소재의 개발이 요구되고 있다 [1-3]. 현재 리튬이차전지 음극재로서 상용화되고 있는 흑연은 리튬 이온의 삽입과 탈리가 일어나는 동안 결정구조의 변화가 적어 산화·환원 반응이 지속적으로 일어나 우수한 수명특성과 높은 이론 용량을 나타낸다. 하지만 다양한 응용분야에서 제한적인 이론용량(372 mAh/g)은 고출력, 고용량 요구조건 한계에 부딪히고 있다 [4-6]. 흑연의 한계를 극복하기 위해 새로운 음극재에 대한 연구가 계속되고 있고 그중 주목받고 있는 물질이 실리콘이다. 실리콘은 매장량이 풍부하며 흑연보다 약 10배 높은 이론 용량(4,200 mAh/g)을 가지고 있다 [7,8]. 또한 리튬과의

✉ Sung-Soo Kim; kimss@cnu.ac.kr
 Hyang-Yeon Kim; hy_kim@kitech.re.kr

반응 전위가 낮고 친환경 물질이라는 장점을 가지고 있다. 하지만 리튬과의 합금화 과정에서 발생하는 커다란 부피 팽창으로 인하여 입자 내에 균열이 발생하여 활물질의 분쇄가 일어나고 불규칙한 입자 균열 발생으로 전해질과 반응하지 못하거나 전기적으로 단락된 부분들이 발생한다. 그 결과 일부 입자들은 전기화학적 반응에 참여하지 못하게 되고 전지는 심각한 용량 감소를 겪게 된다 [9-11]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 입자의 나노화 [12], 다른 원소와의 복합체 형성 [13], 탄소 코팅 [14-16] 등의 연구가 진행 중이다. 그러나 응용 단계까지는 여전히 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다. 높은 용량과 우수한 사이클 성능으로 최근 주목받고 있는 또 다른 물질은 실리콘 산화물(SiOx)이다 [17,18]. SiOx의 초기 충전 시 리튬과의 반응으로 생성된 리튬산화물은 충방전 과정 동안의 부피 변화에 대한 완충 성분으로 작용하여 사이클 성능을 향상시킨다 [19,20]. 하지만 낮은 초기 쿨롱 효율과 빈약한 전기전도도는 실제 배터리의 적용에 어려움이 있다 [14,21]. SiOx의 초기 효율 향상과 전도성 부여를 위한 방법으로 탄소와의 복합체를 제조 [22-24]하거나 금속을 도핑 [25]하는 방법 등의 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 음극재에 미리 Li를 도입하여 초기 효율을 향상시키고자 하는 pre-lithiation에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [26]. 이러한 음극재를 바탕으로 제작된 전극의 특성 및 전극 설계 방법 등은 전지의 특성 및 성능에 핵심적인 역할을 한다 [27]. 전극 제작에 필요한 전도성 탄소 도전재는 비록 소량 사용되지만 전기 저항, 이온 저항 및 전극 밀도 등의 전극 파라미터를 제어 및 조정하는 중요한 역할을 한다 [28-30]. 또한 전도성 도전재의 타입과 형태는 전지의 성능에 영향을 미친다. 도전재는 형태에 따라 입자형과 섬유형으로 나뉘며, 입자형에는 카본 블랙(carbon black), 아세틸렌 블랙(acetylene black) 등이 있고 섬유형에는 탄소 섬유(carbon fibers)나 탄소 나노 튜브(carbon nanotubes) 등이 있다 [31]. 도전재의 입자 형태에 따라 접촉 표면적은 달라지고, 리튬 이온의 확산 또한 영향을 받는다 [32].

본 연구에서는 유도 용해 공정을 통해 합성된 SiOx 분말에 입자 형태가 다른 두 종류의 탄소 도전재를 사용하여 제작한 전극의 전기화학적 성능 향상에 대하여 조사하였다. 전극의 물리적 특성을 분석하기 위하여 XRD, SEM 등을 측정하였으며, 코인 타입 반쪽 전지를 제작하여 전기화학적 평가를 실시하여 리튬이차전지 음극재로서의 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 SiOx nanoparticle 제조

SiOx 나노 입자는 유도용융가열장치에서 휘발과 응축 과정을 통해 합성하였다. 흑연 도가니에 Si를 넣고, 흑연 도가니를 둘러싸는 구리 호일에 일정 전류를 인가하여 Si를 녹였다. 그 후 O₂와 Ar 가스 혼합물을 구리 노즐을 통하여 주입하여 SiOx를 증발시키기 시작하였다. 60분의 합성 시간 후, 인가되었던 전류를 감소하여 합성된 SiOx 나노 입자를 냉각시키고 챔버에서 응축시켰다 [1,34,38].

2.2 SiOx 전극의 미세구조 분석

도전재의 종류를 다르게 하여 제작한 SiOx 전극 샘플의 결정구조를 분석하기 위하여 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD, D/teX Ultra 250 by Rigaku Corp.)을 진행하였다. 또한 전극을 구성하는 도전재 입자의 형태 및 표면을 분석하기 위하여 전계 방출형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, SU 8230, Hitachi High Technologies Corp.) 분석을 실시하였다.

2.3 전기화학적 특성 평가

도전재의 종류를 달리한 SiOx의 전기화학적 특성을 평가하기 위하여 리튬메탈을 상대전극으로 하는 코인 타입 반쪽 전지를 제작하였다. 전극 활물질은 SiOx nanoparticles을 사용하였고, 도전재로는 덴카블랙(denka black)과 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 두 종류를 사용하였다. 섬유형 도전재인 CNT의 우수한 기계적 특성을 구현하기 위해서는, 얇은 가지 형태로 존재하는 CNT를 적당한 수준으로 분리하여 안정된 나노분산 상태를 만드는 것이 필요하다. 본 연구에서는 CNT 도전재는 LG화학에서 제공된 용매에 분산되어 있는 CNT 분산액을 사용하여 전극을 제작하였다. 바인더는 유기계바인더인 PAI (polyamide-imide)에 NMP (N-methyl pyrrolidone)로 점도를 조절하며 활물질과 도전재 및 바인더의 중량비를 60:20:20로 하여 전극을 제작하였다. 제작된 전극은 110°C 오븐에서 용매를 휘발시킨 후, PAI 바인더의 경화반응을 위하여 아르곤(Ar) 분위기 열처리로서 400°C, 1시간 열처리 과정을 진행하였다. 전지 조립은 아르곤(Ar) 분위기 글로브박

스 안에서 분리막 및 전해액[1 M LiPF₆ in EC:EMC = 3:7 (v/v) with 5% FEC]을 사용하여 제작되었다. 제작된 전지의 전기화학적 특성 평가를 위하여 사이클, 율속 테스트, 임피던스를 진행하였다. 제작된 셀은 첫 사이클은 0.21 A/g, 후속 사이클은 1.05 A/g로 충방전을 진행하였고, 이때 전압 범위는 첫 사이클은 0.005~1.5 V, 후속 사이클은 0.005~1.0 V의 범위에서 진행하였다. 율속 특성 평가는 동일한 전압 범위에서 0.42 A/g부터 21 A/g까지 전류 조건을 달리하여 진행하였다. 임피던스 시험은 ZIVE LAB (Won A Tech)를 사용하여 100 KHz ~ 0.001 Hz 범위에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SiO_x 전극의 물성 분석

전극 제작 전 SiO_x 파우더 샘플과 도전재의 종류를 다르게 하여 제작한 SiO_x 전극의 XRD 결과를 그림 1에 나타내었다. 모든 XRD 패턴은 15~30°에 걸친 완만하고 넓은 비정질 SiO_x에 해당하는 피크를 포함하고 있다. 또한 그림 1(b)에서는 자세하게 관찰할 수 없었

지만, 28.3°, 47.3°, 56.1°, 69.1° 및 76.3°의 결정성 Si에 해당하는 피크가 그림 1(a)에서는 확실하게 관찰되었다. 그림 1(b)의 43°, 51°, 74°의 피크는 구리(Cu) 전극으로 인한 피크임을 확인하였고, 이를 제외한 피크를 비교해 보았을 때 도전재의 주성분인 탄소로 인한 28° 부근의 (002) 피크가 관찰되어야 하지만 본 XRD 결과에서는 관찰할 수 없었다. 도전재의 종류를 다르게 하여 제작한 전극의 XRD 분석 결과 도전재의 종류에 따른 결정성의 커다란 차이는 관찰할 수 없었다. 그림 2에는 전극 제작 전과 후의 미세구조를 확인하기 위하여 실시한 FE SEM 이미지를 나타내었다. 그림 2(a)에서 SiO_x nanoparticle은 10~20 nm 크기의 비구형과 와이어 형태 입자가 혼재되어 있었고 와이어 형태에 비하여 파티클 형태의 입자들이 더 많이 관찰되었다. 그림 2(b)와 (c)는 SiO_x 입자로 제작된 전극의 SEM 이미지로 도전재의 종류에 따라 서로 다른 형태를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

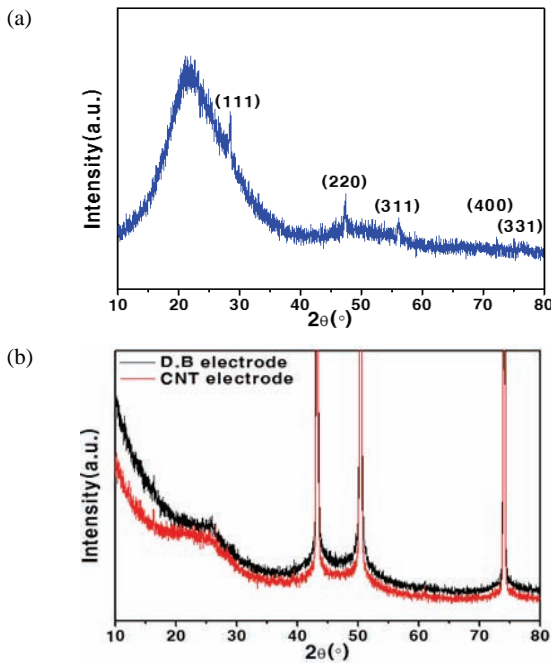


Fig. 1. X-ray diffraction (XRD) patterns of (a) SiO_x nanoparticles and (b) SiO_x with conductive agents.

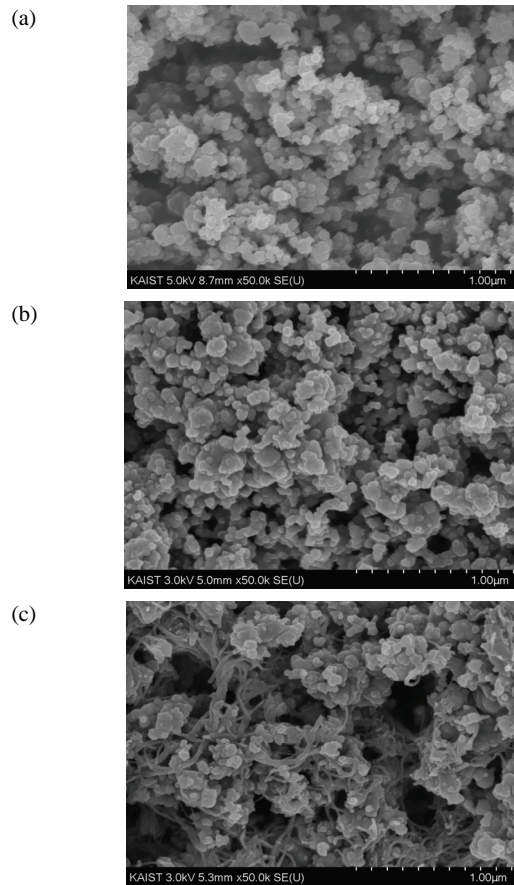


Fig. 2. SEM images of (a) SiO_x nanoparticles, (b) SiO_x with denka black (DB), and (c) SiO_x with carbon nanotubes (CNT).

그림 2(b)에서 SiO_x 입자 사이에 무작위로 응집되어 있는 입자형 도전재인 덴카블랙(denka black, DB)을 확인하였다. 이러한 입자 분포는 충방전 과정 동안 부피 변화가 일어날 시 SiO_x 입자와 DB 입자 사이의 전기적 접촉을 약화시킬 것이다. 그림 2(c)는 섬유형 도전재인 탄소 나노 튜브(carbon nanotubes, CNT)를 사용한 전극의 SEM 이미지이다. 섬유형 도전재인 CNT는 SiO_x 입자 사이를 연결하는 다리와 같은 형태를 띠고 있었으며, 이러한 전극 구조 때문에 CNT 도전재를 사용할 경우 전기전도도 향상 및 활물질과 전도성 첨가제 입자 사이의 접촉을 효율적으로 높일 것이다. 또한 빠른 확산을 가능하게 하는 전자 전달 채널을 제공하여 전기화학적 특성 향상을 위한 중요한 요소로 작용할 것이다.

3.2 SiO_x 전극의 전기 화학적 특성 평가

그림 3(a), (b)는 도전재의 종류를 달리하여 제작한 SiO_x 전극의 첫 번째와 두 번째 사이클에 대한 전압 곡선 및 dQ/dV 그래프를 도시한 것이다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 DB 도전재를 사용한 경우 초기 용량 및 초기 가역 용량은 각각 3,052 mAh/g, 1,643

mAh/g이었고 초기 효율은 53.8%이었다. CNT 도전재를 사용한 경우에는 초기 용량 및 초기 가역 용량은 각각 3,405 mAh/g, 2,075 mAh/g이었고 초기 효율은 60.9%이었다. 도전재의 종류에 따른 초기 효율은 CNT 도전재를 사용한 경우가 약간 우수하지만 두 경우 모두 낮은 초기 효율은 나타내었다. 이러한 낮은 초기 효율은 SiO_x 나노입자의 높은 비표면적으로 인한 다량의 SEI층의 형성과 관련 있으며 [34,38], 또한 초기 충전 시 SiO_x의 산소와 리튬과의 반응으로 형성된 Li₂O, Li₂SiO₃ 등과 같은 비가역상에 의한 결과이다 [33]. 도전재에 따른 초기효율은 CNT 도전재를 첨가한 전극이 60.9%로 53.8%인 DB 도전재의 전극보다 높은 값을 나타내고 있다. 이는 CNT 도전재와 DB 도전재의 비표면적은 큰 차이가 없고, 입자 사이에 전자 네트워크를 잘 형성하고 있는 형태를 띠고 있는 CNT 도전재가 SiO_x 입자의 전자 전도 경로를 제공하고, 도전 역할이 아니고 안정한 SEI 막을 형성하는 역할을 하여 초기 효율에도 영향을 미쳤다는 것을 추론할 수 있다 [39]. 상기의 비가역상 화합물은 높은 기계적 강도를 가지고 있기 때문에 버퍼(buffer) 역할을 하며 이는 높은 용량 유지율에 영향을 준다 [35]. 두 경우 모두 초충전 용량 기준 약 300 mAh/g까지의 영역(~0.3 V 부근까지)은 SEI (solid-electrolyte interface)가 형성되는 Li₂Si₂O₅ 및 Li₂SiO₃ 등의 비가역상들이 생성되는 구간이다 [38]. 0.8 V 부근의 SEI 형성으로 인한 첫 번째 평탄면을 제외하고, 두 번째 평탄면은 300 mAh/g 이후에 보이는 평탄면(plateau)으로 Li-Si alloy 및 Li₄SiO₄의 형성이 시작되는 구간으로 그림 3(b)의 환원 피크 0.2 V 부근에 해당한다. 이후 0.2V 이하에서는 Li-Si의 단계적인 alloying 반응이 일어나고, 생성된 Li₄SiO₄의 일부가 분해되어 Li₁₅Si₄와 Li₂O를 형성한다. 다시 말해서 일반적인 SiO_x의 첫 번째 사이클에서는 SEI layer 형성 외에도 리튬 실리케이트(Li silicate)상 및 Li₂O 등의 비가역상 생성으로 낮은 초기 효율을 나타내게 되는 것이다. 리튬 탈리에 의한 반응은 0.3 V 및 0.5 V 부근에서 사이클이 진행됨에 따라 관찰되었다. 산화반응에서는 Li-Si가 역상의 분해에 의한 피크들이 관찰되었다. 도전재의 종류에 따른 커다란 차이는 관찰되지 않았다.

형태가 다른 두 종류의 도전재에 따른 사이클 특성을 알아보기 위하여 전기화학적 특성 평가를 진행하였고, 방전 용량 및 쿨롱효율을 그림 4에 나타내었다. 두 전극의 쿨롱 효율은 첫 번째 사이클 이후로 점진적으로 상승하였으며, 18번째 사이클 이후에는 99% 이상

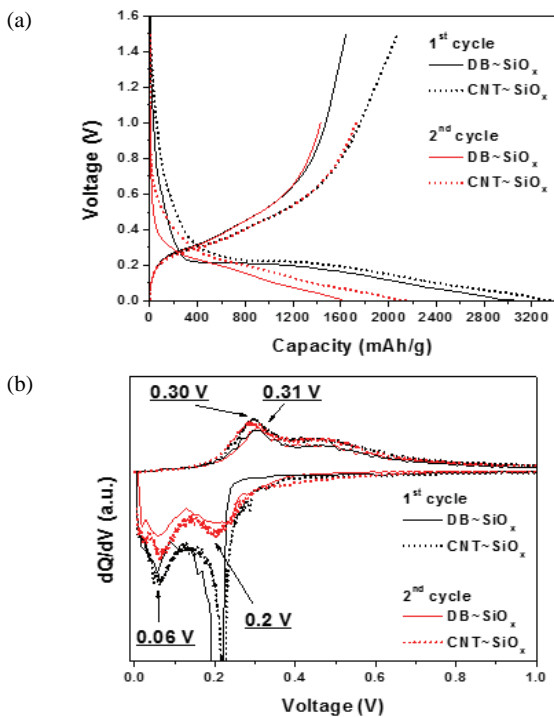


Fig. 3. Charge-discharge profiles and corresponding dQ/dV plots of SiO_x with DB or CNT conductive agents at (a), (b) 1st and 2nd cycles (0.21 A/g charge).

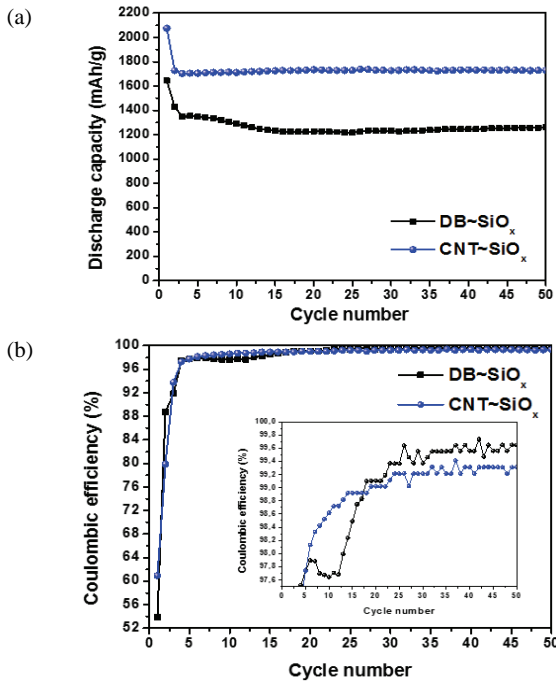


Fig. 4. (a) Cycle performance and (b) coulombic efficiency of SiOx with DB or CNT conductive agents.

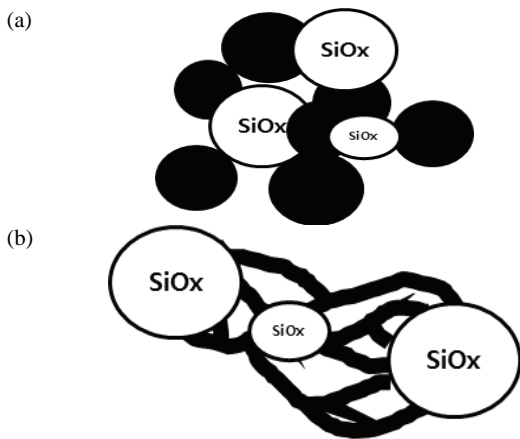


Fig. 5. (a) Schematic representation of changes in DB loaded anodes and (b) schematic representation of changes in CNT loaded anodes.

의 유사한 효율을 나타내었다. 또한 전 구간에서의 용량은 CNT 도전재를 사용한 경우의 용량이 약 500 mAh/g 정도 높게 나타났다. 50회 충방전 동안의 용량 유지율은 DB 도전재를 사용한 경우와 CNT 도전재를 사용한 경우 각각 76%, 84%를 나타내었다. 섬유형태를 띠고 있는 CNT 도전재는 활물질 입자 사이에서 탄력 있는 전도성 다리 역할을 하며, 수 사이클 동안

일어나는 부피 팽창에도 입자 사이의 접촉을 긴밀하게 유지시켜 줄 수 있다 [37]. 그 결과 입자형 도전재 사용 전극에 비하여 보다 우수한 용량 유지율을 나타내는 것으로 보인다.

그림 5는 SiOx 음극에서 활물질 사이에 존재하는 두 종류의 도전재의 모습을 나타낸 개략도이다. 두 가지 경우를 그림과 함께 전기회로와 비유하였을 때, DB 도전재를 사용한 경우는 회로의 직렬연결과 같다고 할 수 있고, CNT 도전재를 사용할 경우 병렬연결과 같다고 볼 수 있다. 즉 CNT 도전재를 사용하는 경우에는 활물질 입자와 도전재 사이가 긴밀하게 연결되어 있어서 어느 한 부분이 끊어지더라도 다른 부분의 네트워크가 작동하여 전체 전지에는 영향을 주지 않게 되는 것이다 [39]. 이러한 CNT의 전도성 네트워크는 전지의 수명특성 향상과 밀접하게 관련되어 있다. 종류가 다른 도전재를 사용한 경우 SiOx 전극의 다양한 C-rate에서의 용량 특성 및 수명 특성을 알아보려고 울속 특성 평가를 진행하였다.

그림 6은 전류 속도를 0.2 C, 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C, 5 C, 10 C로 변화시킨 다음 용량보존율을 확인하기 위하여 다시 0.2 C로 측정된 울속 특성 시험 결과이다. 울속 특성 평가 결과 CNT도전재를 사용하는 경우 5 C (10.5 A/g)까지는 전류 속도에 따른 용량 변화가 거의 없는 반면, DB 도전재를 사용하는 경우 0.2 C (0.42 A/g)에서부터 계속되는 용량 감소를 확인할 수 있었다. 즉 첫 번째 사이클 이래로 두 종류의 서로 다른 도전재를 사용한 전극에서 용량 차이는 점차 증가하는 것을 확인하였다. 또한 전류의 속도 조건을 10 C (21 A/g)의 매우 빠른 속도에서 매우 느린 속도 0.2 C (0.42 A/g)로 변화시켜 용량의 회복률을 측정된 결과 CNT 도전재를 사용한 경우에는 초기 용량과 거의 유사한 용량을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. CNT는 넓은 표면적, 높은 전자 전도성, 높은 유연성과 인장 강도를 갖는 물질로 알려져 있다. 이러한 특징 때문에 충방전 시 활물질의 부피 팽창에 대하여 완충성분으로 작용하여 응력을 완화시킬 수 있으며 전기적으로 집전체와 접촉을 유지하기 때문에 안정적인 수명 특성을 나타낸다 [36]. 또한 튜브형태로 이루어진 CNT의 구조는 리튬 이온(Li⁺)과 전자의 이동에 필요한 채널을 제공하는 역할을 하여 빠른 충전과 방전이 가능하므로 우수한 속도 성능을 갖는다 [37]. 본 연구에서 전류의 속도가 변하여도 CNT 도전재를 첨가한 SiOx 전극의 용량이 유지되는 특성과 10 C의 빠른 전류 조건에서도 용량이 크게 감소하지 않은 것은 이러한 CNT의

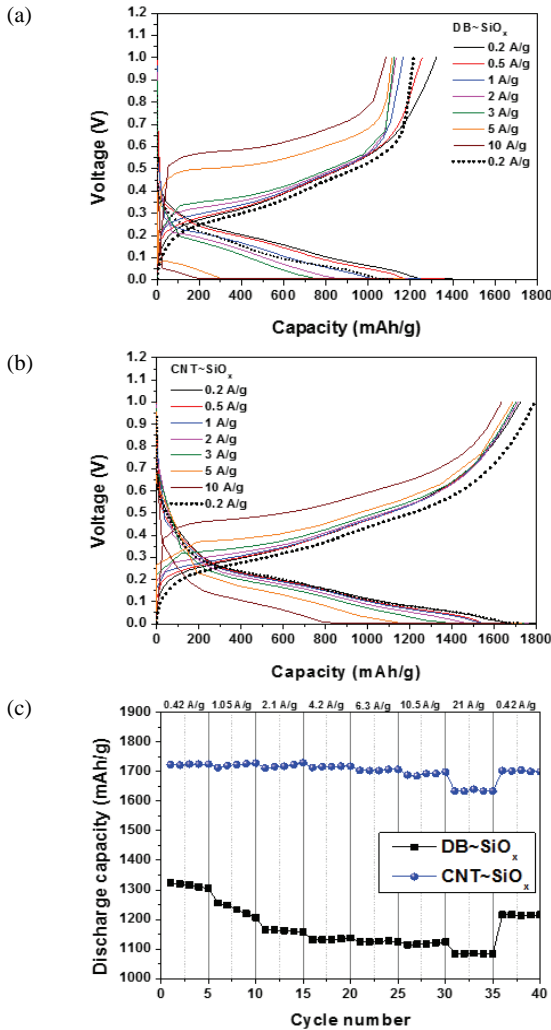


Fig. 6. Charge-discharge profiles of SiOx with (a) DB (b) CNT conductive agents at various current densities, and (c) rate capability of SiOx with DB or CNT conductive agents.

성능 때문인 것을 확인하였다.

그림 7은 출력 특성 평가 후 도전재의 종류가 다른 두 전극의 전도성을 측정하기 위해 시행한 임피던스 측정 결과이다. 곡선의 고주파수 영역은 전해질 내에서 외부 연결, 접촉 저항 및 이온 전도로 인한 오믹 저항만 관찰할 수 있으며, 저주파 반원 영역은 전하 이동 저항(Rct) 부분에 해당한다. 전기 저항은 탄소의 종류에 따라 다르게 나타나며 이것은 흑연의 결정성 및 미세 구조의 차이에 의해 영향을 받는다. CNT의 경우 XRD에서는 커다란 차이점을 관찰할 수 없었지만, SEM 분석 결과 특징적인 미세구조로 전자 전달에 유리하다는 것을 알았다. 표 1은 탄소 도전재와 탄소 도전재를

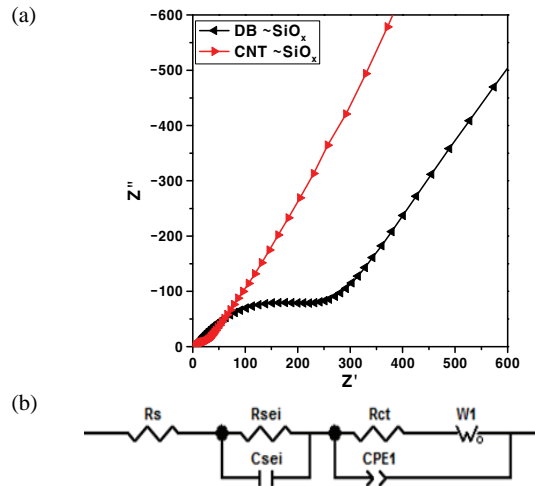


Fig. 7. (a) Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of iOx with DB and CNT conductive agents and (b) equivalent circuits used to fit the impedance data.

Table 1. Electrical resistivities of two kinds of conductive agents and the corresponding composite cathodes ($10^{-2} \Omega$).

	Resistivity
AB	8.9
CNTs	3.5
AB/LiCoO ₂	5,500
CNTs/LiCoO ₂	375

Table 2. Electrical resistivities of two kinds of conductive agents and the corresponding composite SiOx.

	Resistivity
DB/SiOx	201.2
CNT/SiOx	12.4

양극 물질과 합성하였을 때 전기 저항을 나타낸 표이다. 표로부터 각각의 도전재가 홀로 존재할 때보다 활물질과 합성하였을 때 저항차는 현저하게 커지는 것을 확인할 수 있다 [37]. 이것은 음극 활물질의 경우에도 동일하게 적용되는 것으로 보인다. 두 전극의 임피던스 측정 결과 저항값은 매우 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 그림 7(a)에 나타난 나이퀴스트 플롯(Nyquist plots)을 이용한 방법 외에 그림 7(b)에 나와 있는 등가회로를 이용하여 전하 이동 저항 피팅값을 구할 수 있었고 계산한 전하 이동 저항값은 표 2에 정리하였다. 계산된 전하 이동 저항값 역시 약 17배 정도의 매우 큰 차이를 보였다. 임피던스 결과로부터 CNT 도전

재를 사용할 경우 DB 도전재를 사용한 경우에 비해 개선된 저항 특성을 보이는 것을 확인하였고, 이는 섬유형 도전재인 CNT의 사용으로 전기전도성이 향상되어 Li 이온과 전자의 원활한 이동으로 저항값이 감소하였기 때문인 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 리튬이차전지 음극소재 SiO_x의 율속 특성을 향상시키기 위하여, 두 종류의 형태가 다른 도전재를 이용하여 전기화학적 특성 연구를 수행하였다. 준비된 입자를 이용하여 미세구조(XRD, SEM) 분석과 전기화학적 특성 평가를 진행하였다. 미세구조 분석 결과 결정 구조나 결정성 정도에 있어서는 커다란 차이를 관찰할 수 없었고, 입자 사이에 존재하는 형태가 확연히 다른 두 종류의 도전재를 확인할 수 있었다. 입자 사이를 엮어매어 있는 듯한 튜브 형태의 CNT는 집전체와 활물질 사이의 접촉을 긴밀하게 연결시켜 주어 수명 특성 향상에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. CNT 도전재를 사용한 전극의 수명 특성 평가 결과 초기 용량은 2,075 mAh/g, 초기 효율은 60.9%를 나타내었다. 이에 반해 DB 도전재를 사용한 경우 초기 용량은 1,643 mAh/g, 초기 효율은 53.8%를 나타내었다. 또한 출력 특성 평가 10 C의 매우 빠른 전류 속도에서 CNT 도전재를 사용한 경우에는 용량의 차이가 초기 0.2 C의 전류 속도의 용량과 비교하여 크게 나지 않는 것을 확인하였다. 이는 CNT의 특징적인 형태로 인하여 Li 이온 및 전자의 이동이 보다 원활하게 일어나게 되고 그 결과 빠른 충전과 방전 과정에서도 커다란 용량의 감소를 보이지 않은 것으로 확인되었다. CNT 도전재 사용으로 전기 전도도도가 향상되었고 이로 인한 저항의 감소는 임피던스 측정으로 확인하였다.

ORCID

Sung-Soo Kim <https://orcid.org/0000-0001-8969-7075>
Hyang-Yeon Kim <https://orcid.org/0000-0003-3713-2245>

감사의 글

본 연구는 LG화학의 CNT도전재와 연구과제로 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Lee, J. Koo, B. Jang, and S. Kim, *J. Power Sources*, **329**, 79 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.035>]
- [2] L. F. Cui, L. Hu, J. W. Choi, and Y. Cui, *ACS Nano*, **4**, 3671 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn100619m>]
- [3] J. M. Tarascon and M. Armand, *Nature*, **414**, 359 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1038/35104644>]
- [4] T. D. Tran, J. H. Feikert, X. Song, and K. Kinoshita, *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 3297 (1995). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2049977>]
- [5] M. Winter, J. O. Besenhard, M. E. Spahr, and P. Novák, *Adv. Mater.*, **10**, 725 (1998). [DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199807\)10:10<725::AID-ADMA725>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199807)10:10<725::AID-ADMA725>3.0.CO;2-Z)]
- [6] M. Yoshio, H. Wang, K. Fukuda, T. Umeno, N. Dimov, and Z. Ogumi, *J. Electrochem. Soc.*, **149**, A1598 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1518988>]
- [7] M. Mohri, N. Yanagisawa, Y. Tajima, H. Tanaka, S. Nakajima, M. Yoshida, Y. Yoshimoto, T. Suzuki, and H. Wada, *J. Power Sources*, **26**, 545 (1989). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(89\)80176-4](https://doi.org/10.1016/0378-7753(89)80176-4)]
- [8] U. Kasavajjula, C. Wang, and A. J. Appleby, *J. Power Sources*, **163**, 1003 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.084>]
- [9] J. Yin, M. Wada, K. Yamamoto, Y. Kitano, S. Tanase, and T. Sakai, *J. Electrochem. Soc.*, **153**, A472 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2160429>]
- [10] Z. P. Guo, J. Z. Wang, H. K. Liu, and S. X. Dou, *J. Power Sources*, **146**, 448 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.112>]
- [11] B. Liang, Y. Liu, and Y. Xu, *J. Power Sources*, **267**, 469 (2014) [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.096>]
- [12] M. Green, E. Fielder, B. Scrosati, M. Wachtler, and J. S. Moreno, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **6**, A75 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1563094>]
- [13] U. Kasavajjula, C. Wang, and A. J. Appleby, *J. Power Sources*, **163**, 1003 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.084>]
- [14] A. Veluchamy, C. H. Doh, D. H. Kim, J. H. Lee, D. J. Lee, K. H. Ha, H. M. Shin, B. S. Jin, H. S. Kim, S. I. Moon, and C. W. Park, *J. Power Sources*, **188**, 574 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.137>]
- [15] Y. Liu, Z. Y. Wen, X. Y. Wang, A. Hirano, N. Imanishi, and Y. Takeda, *J. Power Sources*, **189**, 733 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.016>]
- [16] C. H. Doh, H. M. Shin, D. H. Kim, Y. C. Ha, B. S. Jin, H. S. Kim, S. I. Moon, and A. Veluchamy, *Electrochem. Commun.*, **10**, 233 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2007.11.034>]

- [17] M. Miyachi, H. Yamamoto, H. Kawai, T. Ohta, and M. Shirakata, *J. Electrochem. Soc.*, **152**, A2089 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2013210>]
- [18] J. Yang, Y. Takeda, N. Imanishi, C. Capiglia, J. Y. Xie, and O. Yamamoto, *Solid State Ionics*, **152**, 125 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00362-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00362-4)]
- [19] M. Gauthier, D. Mazouzi, D. Reyter, B. Lestriez, P. Moreau, D. Guyomard, and L. Roué, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 2145 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C3EE41318G>]
- [20] M. Li, Y. Zeng, Y. Ren, C. Zeng, J. Gu, and X. Feng, *J. Power Sources*, **288**, 53 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.127>]
- [21] J. Wang, H. Zhao, J. He, and C. Wang, *J. Power Sources*, **196**, 4811 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.053>]
- [22] M. Yamada, A. Ueda, K. Matsumoto, and T. Ohzuku, *J. Electrochem. Soc.*, **158**, A417 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3551539>]
- [23] Q. Si, K. Hanai, T. Ichikawa, M. B. Phillipps, A. Hirano, N. Imanishi, O. Yamamoto, and Y. Takeda, *J. Power Sources*, **196**, 9774 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.08.005>]
- [24] W. R. Liu, Y. C. Yen, H. C. Wu, M. Winter, and N. L. Wu, *J. Appl. Electrochem.*, **39**, 1643 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-009-9854-x>]
- [25] M. Miyachi, H. Yamamoto, and H. Kawai, *J. Electrochem. Soc.*, **154**, A376 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2455963>]
- [26] X. Yang, Z. Wen, X. Xu, B. Lin, and S. Huang, *J. Power Sources*, **164**, 880 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.11.010>]
- [27] P. Novák, W. Scheifele, M. Winter, and O. Haas, *J. Power Sources*, **68**, 267 (1997). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02561-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02561-X)]
- [28] H. Zheng, R. Yang, G. Liu, X. Song, and V. S. Battaglia, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 4875 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jp208428w>]
- [29] Y. H. Chen, C. W. Wang, G. Liu, X. Y. Song, V. S. Battaglia, and A. M. Sastry, *J. Electrochem. Soc.*, **154**, A978 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2767839>]
- [30] C. W. Wang, K. A. Cook, and A. M. Sastry, *J. Electrochem. Soc.*, **150**, A385 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1543566>]
- [31] Q. Zhang, Z. Yu, P. Du, and C. Su, *Recent Pat. Nanotechnol.*, **4**, 100 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.2174/187221010791208803>]
- [32] X. Zhang, J. Ma, and K. Chen, *Nano-Micro Lett.*, **7**, 360 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0051-7>]
- [33] J. E. Lee, J. B. Koo, B. Y. Jang, and S. S. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 255 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.4.255>]
- [34] B. Lee, J. Y. Lee, B. Jang, J. Kim, and S. S. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 70 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.70>]
- [35] K. Yasuda, Y. Kashitani, S. Kizaki, K. Takeshita, T. Fujita, and S. Shimosaki, *J. Power Sources*, **329**, 462 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.110>]
- [36] M. Nishizawa, K. Mukai, S. Kuwabata, C. R. Martin, and H. Yoneyama, *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 1923 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1837722>]
- [37] G. Wang, Q. Zhang, Z. Yu, and M. Qu, *Solid State Ionics*, **179**, 263 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.01.015>]
- [38] J. Y. Lee, B. Lee, N. W. Kim, B. Jang, J. Kim, and S. S. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 78 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.78>]
- [39] J. Shu, H. Li, R. Yang, Y. Shi, and X. Huang, *Electrochem. Commun.*, **8**, 51 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.08.024>]