

전극 건조 온도가 리튬이차전지의 실리콘 전극 특성에 미치는 영향 연구

함동완 · 정명희 · 김정태 · 이범희 · 문현모 · 유선율*

한밭대학교 화학생명공학과, 34158 대전광역시 유성구 동서대로 125

(2024년 4월 26일 접수 : 2024년 6월 17일 수정 : 2024년 7월 22일 채택)

Study on The Effect of Electrode Drying Temperature on The Silicon Electrode Characteristics of Lithium Secondary Batteries

Dong-Wan Ham, Myeong-Hui Jeong, Jeong-Tae Kim, Beom-Hui Lee, Hyeon-Mo Moon, and Sun-Yul Ryou*

Hanbat National University, 125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Republic of Korea

(Received April 26, 2024 : Revised June 17, 2024 : Accepted July 22, 2024)

초 록

상용화된 리튬이차전지의 전극은 습식 공정을 통해 제조되고 있으며, 전극의 건조공정은 전극 생산속도 및 공정비용 측면에서 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 실리콘 전극의 건조 조건에 따른 품질 및 이를 포함하는 전극의 전기화학적 성능을 조사하고자, 고온(180 °C) 및 저온(50 °C) 건조 조건에서 실리콘 음극을 제조하였다. 고온 건조 조건은 전극 슬러리 내 용매를 빠르게 증발시키며 전극 생산속도를 향상시킬 수 있지만, 집전체로부터 전극 복합체의 박리를 유발하였다. 그 결과 실리콘 전극의 접착력을 약화시키고 전극 코팅 품질을 감소시켰으며, 저온 대비 고온 건조 조건에서 제조된 실리콘 전극은 두꺼운 복합체 두께를 보였다. 180 °C 전극은 50 °C 전극보다 면저항이 컸으며, 전기전도도는 낮았다. 또한 50 °C 전극은 180 °C 전극 대비 152.5% 우수한 수명 특성을 보였다(300회의 충·방전 이후 180 °C 전극 용량 = 844 mAh g⁻¹, 50 °C 전극 용량 = 1287 mAh g⁻¹). 실리콘 전극에 대한 건조 조건 설정은 손쉽게 실리콘 전극의 품질 및 안정성을 향상시킬 수 있는 새로운 시각을 제공할 수 있다.

Abstract: The electrodes of commercialized lithium secondary batteries are manufactured through a wet coating process, and the drying process (DC) is a very important factor as to electrode production speed and process cost. In this study, silicon anodes were manufactured under high-temperature (180 °C) and low-temperature (50 °C) DC to investigate the quality and the electrochemical performance of Si-electrodes according to DC. High-temperature DC can quickly evaporate the solvent in the Si-electrode slurry, improving the electrode production rate. However, this also causes the electrode composite to peel off from the current collector. As a result, the Si-electrode's adhesion weakened, and the electrode coating's quality deteriorated. In addition, the Si-electrode manufactured under high-temperature was found to have a thicker composite material than the Si-electrode manufactured under low-temperature. Si-electrodes manufactured under high-temperature had higher sheet resistance and lower electrical conductivity than those manufactured under low-temperature. Consequently, the Si-electrode manufac-

*E-mail: mhryou@hanbat.ac.kr

tured under low-temperature showed 152.5% superior cycle performance compared to the Si-electrode manufactured under high-temperature. (Discharge capacities of Si-electrodes manufactured under high-temperature and low-temperature DC were 844 and 1287 mAh g⁻¹, respectively, after 300 cycles). Establishing the DC of Si-electrodes can easily provide new perspectives to improve the quality and stability of Si-electrodes.

Keywords : Silicon electrode, Polyacrylic acid, Thickness, Drying condition, Temperature, Lithium-ion batteries

1. 서 론

무분별한 화석연료의 사용은 이산화탄소(CO₂), 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO), 질소 산화물(NO_x)을 배출시켜 대기 오염을 비롯한 다양한 환경문제를 초래했다.¹⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해 환경오염 물질 배출 규제와 국내외 규모의 여러 협약은 뚜렷하고 지속 가능한 목표를 수립해 왔다.^{2,3)} 환경 문제에 대한 여러 규제 중 화석 연료 소비량의 대부분을 차지하는 내연 기관 차량에 대한 탄소 배출 규제를 해결하고자,^{4,5)} 전기 자동차(electric vehicles, EVs)의 사용을 독려하며 환경 문제 완화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{6,7)} EVs의 원활한 사용을 위해, 화석연료의 의존도를 감소시킬 수 있고 높은 에너지 밀도와 효율을 가진 리튬 이온 전지(Li-ion batteries, LIBs)는 가장 유망한 차세대 배터리로 논의되고 있다.^{8,9)} 현재의 LIB는 소형 기기인 휴대용 전자 기기에서 EVs, 우주 발사체 탑재용 배터리와 같은 대형 기기에 이르기까지 다양한 응용 분야에서 전력 시스템의 중추적인 역할로 작용하고 있다.¹⁰⁻¹²⁾

실리콘(silicon, Si)은 높은 용량 및 풍부한 매장량으로 인해 LIB에서 가장 각광받고 있는 음극 소재 중 하나이다. Si는 약 0.2 V vs. Li/Li⁺의 낮은 방전 전위와 함께, 4200 mAh g⁻¹의 높은 이론용량을 보유하고 있고 이는 상용 LIB에서 가장 널리 사용되는 음극 소재인 흑연(372 mAh g⁻¹) 대비 약 10배 더 높은 수치이다.¹³⁾ 이러한 여러 장점에도 불구하고 리튬 이온 배터리에서 Si의 상용화는 몇 가지 결점으로 인해 방해 받고 있다.

Si의 상용화와 관련된 주요 결점 중 하나는 충전동안 발생하는 부피 팽창(>300%)으로, 이는 Si활물질의 자체 분쇄 및 전극 구조의 기계적 저하를 유발하며, 전기적 접촉 저하 및 사이클링 중 용량 감소를 유발해 Si 기반 배터리의 장기적인 안정성에 부정적인 결과를 초래한다.¹⁴⁾ 또한, 충·방전 중 Si의 부피 팽창으로 인해 새롭게 드러나는 Si 표면에 고체 전해질 인터페이스(solid-electrolyte interphase, SEI) 층이 반복적으로 형성되는데, 이는 전해질의 지속적인 소모를 유발해 결국 전해질의 고갈로 이어지는 문제를 야기

할 수 있다. 따라서, SEI 층의 지속적인 성장과 파괴로 인해 리튬 이온이 과하게 소모되어 용량 손실이 발생하고 반복적인 충·방전 동안 쿨롱 효율(Coulombic efficiency)이 감소한다.^{15,16)}

Si의 전기화학적 특성 향상을 위해 나노 구조화¹⁷⁾, Si/graphite 복합체¹⁸⁾, 다공성 Si¹⁹⁾ 같이 Si활물질(active material)의 구조적 변형하는 연구들이 진행되었으며, 이러한 연구들을 통해 Si 전극의 전기화학적 특성을 크게 증가시켰다. 하지만 Si활물질이 개선되었다 하더라도, 일반적으로 Si 활물질은 젖음 공정(wet process)을 통해 음극으로 제조되기 때문에 궁극적으로 Si의 전극의 제작 공정이 확립되어야 할 필요가 있다. 특히 Si 활물질의 경우 공정 효율 향상을 위해 나노 사이즈에서 마이크로 사이즈로 점차 크기가 커지면서 수계 용매에서의 분산 및 코팅 품질과 관련되어 문제가 발생하고 있다. 해당 문제들은 결국 Si 전극의 성능으로 이어질 수 있기 때문에, 전극을 제조하는 과정에서 공정 특성을 확립할 필요성이 있다.

실제 LIBs 용 전극 제조 과정에서 집전체에 도포된 전극 슬러리 건조 공정은 주로 고온에서 짧은 시간동안 진행하게 되는데, 이는 고온에서 전극 건조 시 생산 시간을 절감할 수 있기 때문이다.²⁰⁾ 하지만 고온 건조 과정이 전극 슬러리 표면에서의 빠른 용매 증발을 유발하며, 이로 인하여 집전체 표면에 코팅된 전극 슬러리 내 고분자 바인더 분포의 불균형을 초래할 수 있다는 연구가 보고되었다.²¹⁾ 빠른 용매 증발로 인해 슬러리 내 고분자 바인더는 모세관 현상으로 전극 표면으로 이동하게 되어, 전극 복합체-전극 집전체 간 계면 접착력을 저하시킬 수 있다. 이는 전극의 불균일한 분포와 박리를 야기시킬 수 있다.

본 연구에서는 전극 제조 공정의 여러 단계들 중 건조 조건이 Si 전극에 미치는 영향을 조사하였다. 슬러리 건조 조건을 고온 및 저온으로 구분하여 진행했으며, 고온 조건은 180 °C에서 1분간 표면 건조를 거친 후 잔여 수분 제거를 목적으로 50 °C 진공 오븐에서 하루 동안 재건조를 진행했다(180 °C 전극). 저온 조건은 표면 건조 없이, 하루 동안 50 °C 진공 오븐에서 완전 건조를 진행했다(50 °C 전극). 각기 다른 건

조 조건을 통해 Si 음극을 제조한 뒤, 전극 두께, 면저항(sheet resistance), 전기전도도 등의 물리적 특성 및 전기화학적 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 재료

음극활물질(Si nanoparticle, particle size = 30–50 nm, >98%; Nanostructure & Amorphous Materials, Inc., Houston, USA), 도전재(Super-P, Imerys, Switzerland), 바인더(Polyacrylic acid, PAA, *M.W.* = 450,000; Sigma-Aldrich, South Korea), 구리 집전체(두께 = 10 μm ; 일진머티리얼, 대한민국), 리튬 금속(두께 = 100 μm ; Honjo Metal, Japan), polyethylene (PE) 분리막(ND420, 두께 = 20 μm , porosity = 40%; Asahi Kasei E-materials, Tokyo, Japan), 전해질[ethylene carbonate/ethyl methyl carbonate (EC/EMC = 3/7 by wt%)에 용해된 1.15 M lithium hexafluorophosphate (LiPF_6) + 5 wt% fluoroethylene carbonate (FEC) (Enchem Co., Ltd., South Korea)]를 실험에 사용하였다.

2.2 Si 전극 제조

전극 슬러리 건조 온도에 따른 두 종류의 Si 전극을 준비하였다. Si 전극 제조 공정에서 건조 조건을 제외한 기타 모든 공정은 동일하게 제어하였다. Si 전극 슬러리 제조를 위하여 증류수 3 g에 Si 활물질, 도전재 및 고분자 바인더(활물질/도전재/고분자 바인더 = 60/20/20 by wt%) 혼합재 1.5 g을 넣고, THINKY Mixer (THINKY Corporation, AR-100, Japan)를 이용해 혼합해 주었다 (2000 rpm, 3 분). 완성된 슬러리는 doctor blade를 사용하여 구리 집전체 위에 80 μm 두께로 코팅하였다. 집전체 표면에 코팅된 Si 슬러리는 50 °C 및 180 °C의 각기 다른 온도에서 각각 건조하였다. 고온 조건은 180 °C에서 1 분간 표면 건조를 거친 후, 잔여 수분 제거를 목적으로 50 °C 진공 오븐에서 하루 동안 재건조를 진행했다(이하 180 °C 전극이라 명칭). 저온 조건은 표면 건조 없이, 하루 동안 50 °C 진공 오븐에서 완전 건조를 진행했다(이하 50 °C 전극이라 명칭). 건조가 끝난 후 두 전극은 roll-pressing machine (CLP-2025H,

CIS, Republic of Korea)을 사용하여 50 °C 전극의 두께는 15 μm , 180 °C 전극의 두께는 24 μm 로 되었다(초기 두께의 약 30% Roll-pressing). Roll-pressing 후 각 전극들을 12 mm의 직경을 가진 원 형태로 절삭하여 150 °C의 고진공 조건에서 6시간 동안 건조하였다.

2.3 전지 제조

각기 다른 온도 조건에서 건조된 Si 전극의 전기화학적 평가를 위해 CR2032-type의 반쪽 전지를 조립하였다. 반쪽 전지 조립 간 PE 분리막의 경우 리튬 금속(상대 전극 및 기준 전극)과 Si 전극(작업 전극)의 사이에 위치했으며, 액체 전해질 300 μL 를 반쪽 전지에 주입하여 조립을 완료하였다. 반쪽 전지를 조립하는 모든 과정은 아르곤으로 채워진 글러브 박스(이슬점 -80 °C 이하)에서 수행했다. 조립된 전지는 전극과 분리막에 충분한 전해액 흡수를 위해 12시간 resting을 가졌다.

2.4 전기화학적 특성 평가

제조된 전지는 충방전기(WonATech, South Korea)를 이용하여 formation과 cycle (1.2C) 평가를 진행했다. 초기 충·방전은 전류 밀도 200 mA g^{-1} 로 정전류(constant current, CC) 모드에서(전압 범위 = 0.05–2.0 V vs. Li/Li^+) 진행되었다. 수명 특성은 전류밀도 1200 mA g^{-1} 로 CC 모드에서(전압 범위 = 0.05–2.0 V vs. Li/Li^+) 300회 충·방·전 진행하며 평가하였다. 또한 임피던스 분광법(EIS)은 전기 화학 측정장치(VSP, Bio-Logic SAS, 프랑스)를 사용하여 formation 후에 수행되었다(주파수 범위 = 500 kHz–100 mHz).

3. 결과 및 고찰

각기 다른 건조 조건에서 제작한 두 전극들의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 50 °C 전극과 180 °C 전극의 무게와 로딩량은 각각 0.0107 g, 0.53 mg cm^{-2} 으로 두 전극 모두 동일하게 제어되었다. 전극 슬러리를 구리 집전체에 도포한 이후, 각기 다른 건조 조건에서 건조한 결과, 50 °C 전극과 180 °C 전극은 매우 다른 두께 편차를 보임을 확인할 수 있었다(50 °C 전극 두께 = ~7 μm , 180 °C 전극 두께 =

Table 1. Physical properties of electrodes manufactured under different drying conditions (electrode diameter = 12 mm)

Sample	전극 무게	로딩량	압착 전 두께 (집전체 제외)	압착 후 두께 (집전체 제외)	면적당 용량 (areal capacity)
50 °C 전극	0.0107 g	0.53 mg cm^{-2}	7 μm	5 μm	2.2 mAh cm^{-2}
180 °C 전극	0.0107 g	0.53 mg cm^{-2}	17 μm	14 μm	2.2 mAh cm^{-2}

~17 μm). 높은 건조 조건에서 제조된 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극이 낮은 온도에서 건조된 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극 대비 매우 높은 전극 두께를 보였다. 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 경우, 건조 시 공기와 접하는 코팅된 전극 슬러리 표면으로부터 용매가 빠르게 증발된다. 용매의 증발로 인해 코팅된 전극 슬러리 표면은 굳어지게 되며, 이후 슬러리 내부로부터 용매 건조가 발생하더라도 그에 따른 물리적 형태 변화는 불가능하게 된다.²¹⁾ 반면 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 경우, 건조 속도가 느리기 때문에 코팅된 전극 슬러리 표면과 내부에서 동시다발적으로 용매가 증발되며, 이로 인해 전극 슬러리 표면은 내부 용매 증발에 의해 지속적인 물리적 형태 변화가 가능하다(Fig. 1). 건조 후, 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극과 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극에 대해 roll pressing을 진행했고, 음극 구성 물질 간 원활한 접촉 유지를 위해 처음 두께의 약 30%만 감소시켰다. 압착 후 시간이 지나며 전극의 스프링 백(spring back) 현상으로 인해 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극과 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 최종 두께는 각각 5 μm , 14 μm 였다.

용매의 건조 속도가 빠를수록 전극 슬러리 내 포함된 고분자 바인더의 마이그레이션(migration) 현상이 가속화될 수 있다. 이는 전극 슬러리 표면에서 건조되는 용매를 따라 고분자 바인더가 표면으로 이동하는 현상을 의미하며, 그 결과 전극 내 고분자 바인더의 분포가 불균형해지는 결과를 초래할 수 있다(Fig. 1c). 이러한 고분자 바인더의 불균일한 분포는 전극의 접

착력을 약화시킬 수 있으며, 더 나아가 전극 박리를 유발할 뿐만 아니라 높은 저항을 초래할 수 있다.²¹⁾ 건조 온도 및 속도에 따른 전극의 접착 특성 분석을 위해, 90 $^{\circ}$ peel test 실험을 진행하였다. 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 경우 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극에 비해 테이프 측면에 묻어 나오는 음극 콤포짓(composite)이 비교적 많은 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 이를 통해 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 전극 내부 결합력이 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극 대비 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

50 $^{\circ}\text{C}$ 와 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조된 전극의 표면 및 단면을 SEM으로 촬영했다(Fig. 3). 아래 그림에서 보여지는 바와 같이, 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극에서 실리콘 복합체 내 크랙(crack)이 발생하였음을 확인했다. 이는 실리콘 복합체 내 결합력이 약화되었음을 의미하며, 더 나아가 고온으로 인한 바인더의 표면 이동 결과물로 사료된다. 결합력 약화에 기인한 실리콘 복합체 내 크랙(crack)은 복합체 간 물리적 접촉을 저해하여 전극의 저항 증가를 초래했다. 또한 복합체 내 발생한 크랙은 전극 두께에 큰 영향을 끼친 것으로 확인됐으며, 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 두께는 17 μm , 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 두께는 7 μm 로 상당한 두께 차이를 확인할 수 있었다(Table 1).

건조 온도가 전극의 전기전도도에 미치는 특성을 파악하기 위하여, 50 $^{\circ}\text{C}$ 전극과 180 $^{\circ}\text{C}$ 전극의 무작위한 지점을 골라 four point probe를 이용하여 면 저항

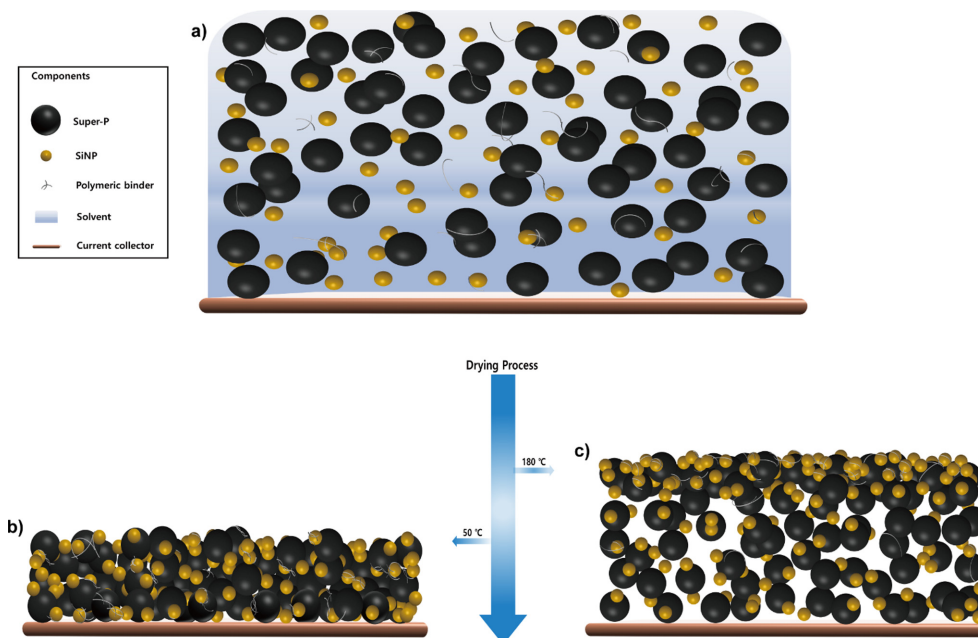


Fig. 1. (a) Cross-sectional schematic diagram of the silicon electrode slurry coated on the surface of the Cu current collector before drying. Cross-sectional schematic diagram of electrodes at (b) 50 $^{\circ}\text{C}$ and (c) 180 $^{\circ}\text{C}$ after drying.

(sheet resistance)을 측정하였다. 50 °C 전극은 180 °C 전극은 총 5번의 무작위 측정을 진행했으며, 50 °C 전극의 경우 180 °C 전극 대비 전반적으로 낮은 면 저항을 나타냈다(Fig. 4a). 전기전도도는 5번의 시트 저항 평균값으로 환산되었으며(Eq. 1 활용)²²⁾, 50 °C 전극의 전기 전도도는 4.07 S cm⁻¹로 180 °C 전극의 전기 전도도(= 3.64 S cm⁻¹) 보다 높은 수치를 보였다(Fig. 4b).

$$\begin{aligned} \text{시트 저항: } \Omega \times \text{C.F(보정계수)} &= \Omega/\text{sq} \\ \rho(\text{비저항}): \Omega/\text{sq} \times \text{Thickness(cm)} &= \Omega \cdot \text{cm} \\ \sigma &= 1/\rho \text{ (S/cm)} \end{aligned} \quad (1)$$

Si 활물질은 리튬 이온이 alloying/dealloying 되는 과정에서 부피 팽창 및 수축이 발생하는데, 50 °C 전극과 180 °C 전극은 로딩량이 동일하기 때문에 180 °C 전극의 경우 전극 내 다공 구조를 가져, 부피 변화에 따른 내부 응력 방출이 용이하다는 장점이 있다. 하지만, 앞서 결합특성(Fig. 2) 및 전기전도도(Fig. 4) 측정 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 지나친 전극 두께 증대는 전극 콤포짓 내 결합력 저하 및 전기전도 특성 저하를 초래할 수 있다는 단점이 있다. 전극 내에 균열이 나타나면 입자의 분리가 나타날 수 있으며 이는 전극의 용량 손실로 이어진다. 전극의 건조 조건이 전극의 전기화학적 특성에 미치는 영향을

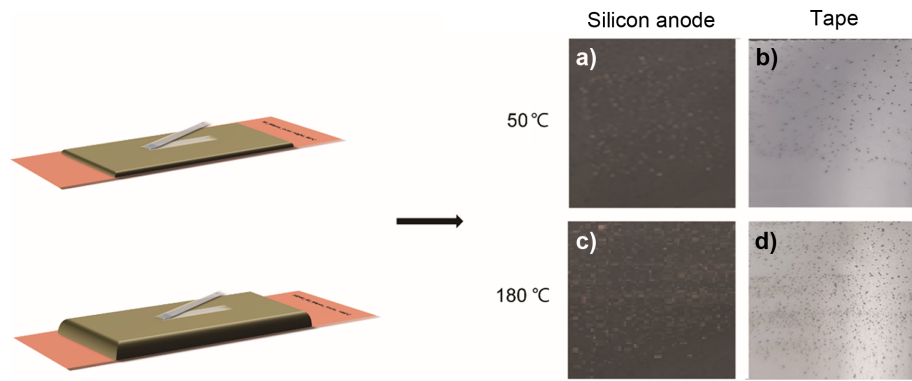


Fig. 2. Digital camera images of (a) silicon anode surface and (b) tape surface of 50 °C electrode after 90° peel test. Digital camera images of (a) silicon anode surface and (b) tape surface of 180 °C electrode after 90° peel test.

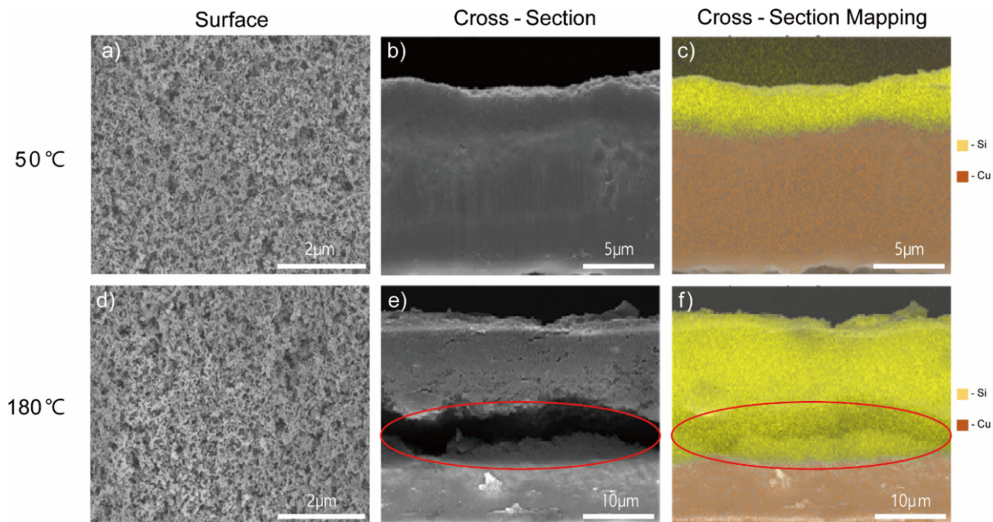


Fig. 3. SEM and EDS images of the surface and cross section of (a-c) 50 °C electrode and (d-f) 180 °C electrode before working.

확인하기 위하여, 50 °C 전극과 180 °C 전극이 포함된 반쪽 전지(Li half-cell) 실험을 시행하였다.

Formation 동안 50 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지는 180 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지 대비 높은 초기 방전 용량을 보였다. 50 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지의 경우 방전 용량은 3084 mAh g⁻¹의 방전 용량

을 보이며, 180 °C 전극의 방전 용량(2719 mAh g⁻¹) 대비 약 13% 높게 나타났다(Fig. 5a). Formation 구동이 끝난 반쪽 전지에 대한 EIS를 평가하였다(Fig. 5b). 50 °C 전극과 180 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지의 벌크(bulk) 저항은 큰 차이가 나지 않은 반면, 180 °C 전극의 전체 저항은 50 °C 전극 대비 매우 증

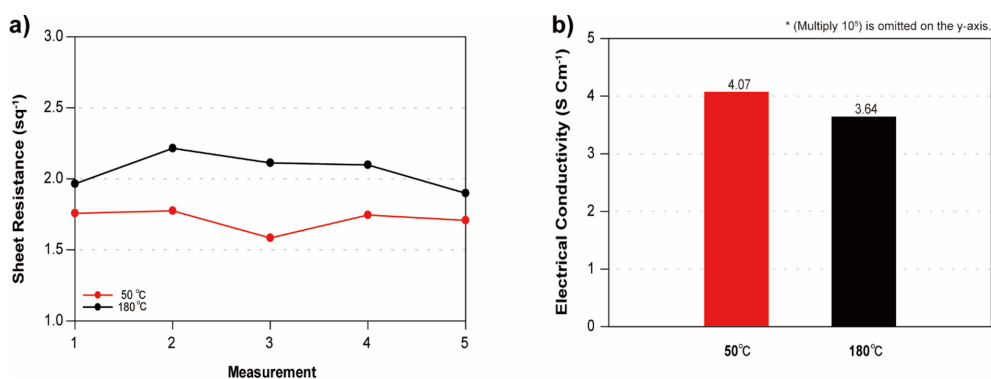


Fig. 4. (a) Sheet resistance and (b) electrical conductivity of electrodes at 50 °C and 180 °C.

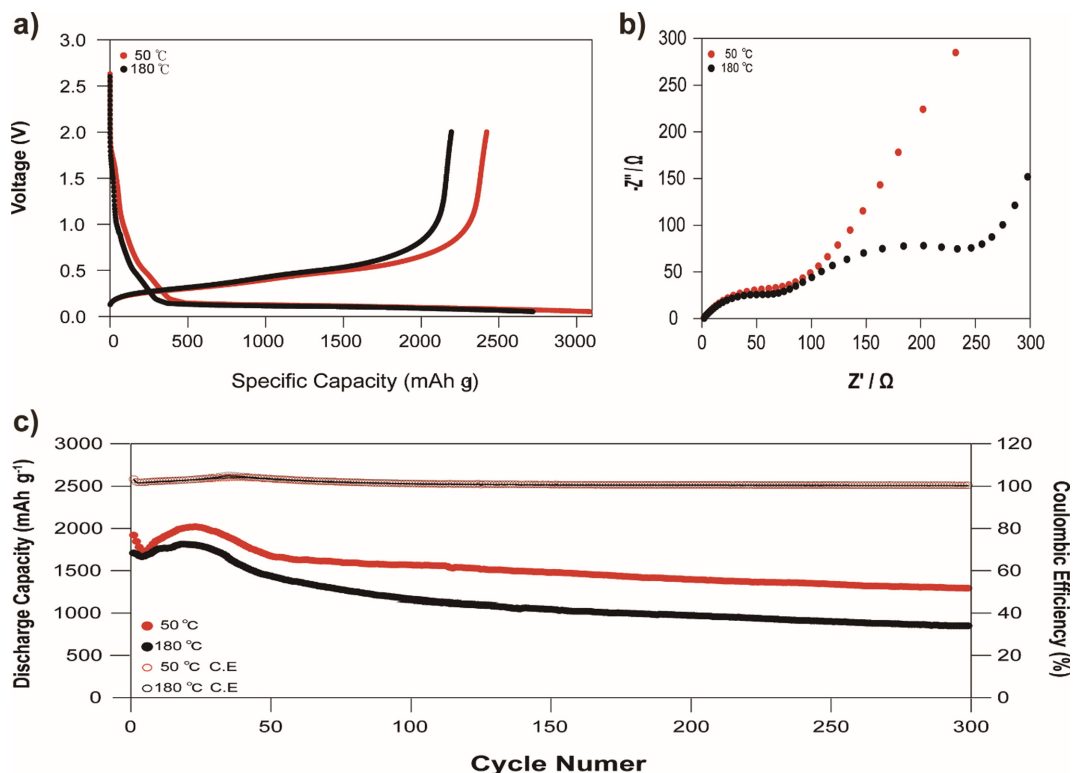


Fig. 5. (a) Voltage curve of the formation process of a half-cell containing the 50 °C electrode and the 180 °C electrode. (b) Impedance results after the formation process, and (c) room temperature lifecycle characteristics (charge and discharge current density = 1.2 A g⁻¹, voltage range = 0.05–2.0 V vs. Li/Li⁺).

가하였음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 EIS의 전체 저항(R_{tot})은 벌크 저항(R_b), SEI 층의 저항(R_{SEI}) 및 전하 이동 저항(R_{ct})으로 구성된다. 하지만 Si 및 Li 전극과 같이 충·방전 진행동안 전극의 형태 변화가 크게 동반되는 시스템에서는 상기 전체 저항의 세부 구성 요인 분석에 큰 어려움이 동반된다. 이러한 이유로 인하여 Equivalent circuit을 이용한 EIS 분석은 진행할 수 없었지만, 180 °C 전극의 높은 전체 저항은 formation 구동에서 보인 방전 용량 감소에 매우 큰 영향을 주었음을 유추할 수 있다.

50 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지는 180 °C 전극을 포함하는 반쪽 전지와 비교하여 향상된 수명주기를 보였다(Fig. 5c). 50 °C 전극을 포함하는 전지의 초기 방전 용량은 1917 mAh g⁻¹으로 180 °C 실리콘 전극을 포함하는 전지 초기 방전 용량(= 1705 mAh g⁻¹)보다 12% 더 높게 나타났다. 또한, 50 °C 실리콘 전극을 포함하는 반쪽 전지는 100회 주기 후에 1565 mAh g⁻¹의 용량을 유지했으나 180 °C 실리콘 전극을 포함하는 전지는 1163 mAh g⁻¹의 용량을 나타냈다. 이는 초기 방전 용량보다 큰 차이를 나타냈으며 300 회 주기 후에는 50 °C 실리콘 전극을 포함하는 전지의 경우 1287 mAh g⁻¹의 용량을 유지했으며, 180 °C 실리콘 전극을 포함하는 전지는 단지 844 mAh g⁻¹의 용량을 유지하여 50 °C 실리콘 전극을 포함하는 전지의 용량이 약 52.5% 더 높게 나타났다.

상기 전기화학특성 실험 결과를 종합해 볼 때, 50 °C 전극은 전극 콤포짓 구성 물질(Si 활물질, 도전재, 집전체 및 고분자 바인더) 간의 균일한 접촉 특성으로 인하여 180 °C 전극 대비 우수한 전기화학 특성을 보였다 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Si 전극의 건조 조건 차이에 따른 Si 전극의 물리적인 특성, 그리고 그로 인한 전기화학적 성능을 평가했다. 50 °C에서 건조된 전극은 균일하게 분포된 전극 구성 물질로 인해 180 °C 전극 대비 낮은 면 저항, 높은 전기전도도, 우수한 코팅 품질(높은 접착력)을 보였다. 반면 180 °C 전극은 건조 과정에서 발생하는 고분자 마이그레이션으로 인해 표면으로 바인더가 집중되며 코팅 품질 및 전지 내부 저항을 크게 증가시켰다. 이로 인해 50 °C에서 건조된 전극은 180 °C 전극 대비 초기 방전 용량 및 장기적인 수명 특성이 매우 크게 향상되었다. 해당 결과들은 전극을 만들 때 발생하는 여러 매개 변수 중에서 건조 조건이 전극 또는 전극을 포함하는 전지의 안정성 및 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

Acknowledgments

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2021R1I1A3059728). This work was also supported by the Technology Innovation Program (no. 20015759) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea), the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (no. 2018R1A6A1A03026005).

References

1. K. Mukhopadhyay and O. Forssell, An empirical investigation of air pollution from fossil fuel combustion and its impact on health in India during 1973–1974 to 1996–1997, *Ecol. Econ.*, **55**(2), 235–250 (2005).
2. O. Schachter, The emergence of international environmental law, *J. Int. Aff.*, **44**(2), 457–493 (1991).
3. D. Sprinz and T. Vahtoranta, The interest-based explanation of international environmental policy. In: P. M. Hass (ed.), *International Environmental Governance*, Routledge, 131–159 (2017).
4. Z. Yang, Y. Liu, L. Wu, S. Martinet, Y. Zhang, M. Andre, and H. Mao, Real-world gaseous emission characteristics of Euro 6b light-duty gasoline-and diesel-fueled vehicles, *Transp. Res. D: Transp. Environ.*, **78**, 102215 (2020).
5. A. K. Agarwal and N. N. Mustafi, Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **137**, 110624 (2021).
6. F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development, *Energies*, **10**(8), 1217 (2017).
7. R. T. Yadlapalli, A. Kotapati, R. Kandipati, and C. S. Koritala, A review on energy efficient technologies for electric vehicle applications, *J. Energy Storage*, **50**, 104212 (2022).
8. B. Diouf and R. Pode, Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy* **2015**, 76, 375–380.
9. M. Wakihara, Recent developments in lithium ion batteries, *Mater. Sci. Eng. R: Rep.*, **33**(4), 109–134 (2001).
10. B. Kennedy, D. Patterson, and S. Camilleri, Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. *J. Power Sources*, **90**(2), 156–162 (2000).
11. G. E. Blomgren, The development and future of lithium ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, **164**(1), A5019 (2016).

12. F. Krause, J.-P. Ruiz, S. Jones, E. Brandon, E. Darcy, C. Iannello, and R. Bugga, Performance of commercial Li-ion cells for future NASA missions and aerospace applications. *J. Electrochem. Soc.*, **168**(4), 040504 (2021).
13. J. Oh, D. Jin, K. Kim, D. Song, Y. M. Lee, and M.-H. Ryou, Improving the cycling performance of lithium-ion battery Si/graphite anodes using a soluble polyimide binder, *ACS Omega*, **2**(11), 8438–8444 (2017).
14. C. Wölke, B. A. Sadeghi, G. G. Eshetu, E. Figgemeier, M. Winter, and I. Cekic-Laskovic, Interfacing Si-based electrodes: Impact of liquid electrolyte and its components, *Adv. Mater. Interfaces*, **9**(8), 2101898 (2022).
15. W. Zhang, T. H. Cai, and B. W. Sheldon, The impact of initial SEI formation conditions on strain-induced capacity losses in silicon electrodes, *Adv. Energy Mater.*, **9**(5), 1803066 (2019).
16. T. Yoon, M. S. Milien, B. S. Parimalam, B. L. Lucht, Thermal decomposition of the solid electrolyte interphase (SEI) on silicon electrodes for lithium ion batteries, *Chem. Mater.*, **29**(7), 3237–3245 (2017).
17. M. A. Rahman, G. Song, A. I. Bhatt, Y. C. Wong, and C. Wen, Nanostructured silicon anodes for high-performance lithium-ion batteries, *Adv. Funct. Mater.*, **26**(5), 647–678 (2016).
18. B. Liu, Y. Jia, J. Li, H. Jiang, S. Yin, and J. Xu, Multiphysics coupled computational model for commercialized Si/graphite composite anode, *J. Power Sources*, **450**, 227667 (2020).
19. X. Li, P. Yan, X. Xiao, J. H. Woo, C. Wang, J. Liu, and J.-G. Zhang, Design of porous Si/C–graphite electrodes with long cycle stability and controlled swelling, *Energy Environ. Sci.*, **10**(6), 1427–1434 (2017).
20. J.-H. Schünemann, H. Dreger, H. Bockholt, and A. Kwade, Smart electrode processing for battery cost reduction. *ECS Trans.*, **73**(1), 153 (2016).
21. Y. S. Zhang, N. E. Courtier, Z. Zhang, K. Liu, J. J. Bailey, A. M. Boyce, G. Richardson, P. R. Shearing, E. Kendrick, and D. J. Brett, A review of lithium-ion battery electrode drying: mechanisms and metrology, *Adv. Energy Mater.*, **12**(2), 2102233 (2022).
22. Son Seung Cheol; Song Yeong Jin; Park Hwa Sik; Hoang Ho Jung, Automatic System Development of 4-Point Probe for Sheet Resistance Measurement. *The Institute of Electronics and Information Engineers*, **8**(1), 218–220 (1990).