



• 특집 • NetZero 2050 핵심 에너지 시스템을 위한 녹색 생산 기술  
(Green Manufacturing for Energy Systems in the era of NetZero 2050)

# 복합 반고체 전해질 기반 리튬 메탈 배터리의 덴드라이트 성장 억제 Dendrite Growth Suppression in Lithium Metal Batteries with Composite Quasi-solid Electrolytes

박정은<sup>1</sup>, 안진형<sup>1</sup>, 배지웅<sup>1,2,#</sup>  
Jeongeun Park<sup>1</sup>, Jinhyeong An<sup>1</sup>, and Jiwoong Bae<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 대학원 융합기계공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University)  
<sup>2</sup> 한양대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Hanyang University)  
# Corresponding Author / E-mail: [jwbae@hanyang.ac.kr](mailto:jwbae@hanyang.ac.kr), TEL: +82-2-2220-0438  
ORCID: 0000-0003-0759-908X

KEYWORDS: Quasi-solid electrolyte (반고체 전해질), Polymer (고분자), Dendrite (덴드라이트), Lithium metal battery (리튬 금속 배터리)

*Secondary batteries are crucial for eco-friendly systems, but existing technologies struggle with energy density and safety issues. This study aims to develop a next-generation battery utilizing quasi-solid electrolytes (QSE), which combine the advantages of both liquid and solid electrolytes. However, QSEs often lack the mechanical strength necessary to prevent lithium dendrite growth. To address this challenge, two strategies were proposed and experimentally validated. The first strategy involves creating a QSE-separator composite (QSE-PI) by integrating QSE with a polyimide (PI) separator. Among the various options, PI with a thickness greater than 20  $\mu\text{m}$  and a pore size of 2-5  $\mu\text{m}$  exhibited superior electrolyte absorption and dendrite suppression. This configuration allowed for rapid lithium plating/stripping, high ionic conductivity ( $1.7 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ ), and excellent Coulombic efficiency (99.94%). The second strategy incorporates silica ( $\text{SiO}_2$ ) as a ceramic filler in the QSE-PI to enhance mechanical strength and ion transport. The addition of  $\text{SiO}_2$  disrupted polymer crystallinity, increased the amorphous regions, and effectively suppressed dendrite formation. Notably,  $\text{SiO}_2$  particles larger than 10  $\mu\text{m}$  improved cycle stability, with the composite maintaining performance for over 50 cycles, compared to only 30 cycles for the version without filler.*

Manuscript received: August 13, 2025 / Revised: September 19, 2025 / Accepted: October 2, 2025

## 1. 서론

최근 가장 혁신적인 에너지 저장 시스템 중 하나인 이차 전지는 친환경적이고 지속 가능한 에너지 솔루션으로 주목받고 있다. 특히, 리튬 이온 배터리(Lithium-ion Batteries, LIB)는 긴 사이클 수명, 높은 에너지 밀도, 광범위한 적용성으로 인해 시장을 주도하고 있으며, 스마트폰, 노트북, 카메라 등 소형 전자기기부터 전기 차(Electric Vehicle, EV), 전기버스 등 운송 시스템에

이르기까지 다양한 분야에 사용되고 있다. 소비자 및 산업계의 더 높은 에너지 밀도, 향상된 안전성, 빠른 충전에 대한 요구가 지속적으로 증가함에 따라 이차 전지 산업은 급격한 성장을 이어나가고 있다[1]. 그러나 기존 LIB는 본질적인 에너지 밀도 한계에 직면해 있으며, 이를 극복하기 위한 차세대 배터리 기술 개발이 활발히 진행 중이다.

대표적인 차세대 배터리인 전고체 배터리(All-solid-state Batteries, ASSB), 리튬-금속 배터리(Lithium-metal Batteries, LMB), 리튬-황 배터리(Lithium-sulfur Batteries, Li-S), 리튬-공기 배터리(Lithium-

air Batteries, Li-air) 등은 높은 에너지 밀도를 지니고 있으나 전기화학적 성능 저하로 인한 상용화에 어려움을 겪고 있다[2]. 하지만 여전히 상당한 어려움에 직면해 있다. 예를 들어 전해질 소재에 따라 산화물, 황화물, 고분자 유형으로 분류되는 ASSB는 상온에서 낮은 이온전도도를 지니고 있으며, 전해질-전극 간의 계면 접촉이 불안정하다[3-5]. 또한, LMB는 액체 전해질 사용 시 리튬 덴드라이트 성장을 억제하기 위한 충분한 기계적 강도 확보가 어려워 단락 및 열폭주로 인한 안전성 문제가 발생한다[6-8]. 이로 인해 아직까지 단일 차세대 배터리 기술이 기존 LIB를 완전히 대체할 수 있는 종합적 솔루션으로 등장하지 못했으며, 고성능과 안전성을 동시에 확보하기 위한 추가 연구가 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 액체 전해질의 높은 이온전도도와 고체 전해질의 기계적 안정성을 결합한 하이브리드 반고체 전해질(Quasi-solid Electrolyte, QSE)을 기반으로, 분리막과 결합한 QSE-분리막 복합체를 개발하였다. 이를 통해 리튬 금속 배터리의 전기화학적 특성 변화를 관찰하고, 덴드라이트 억제 및 성능 향상 가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 복합 반고체 전해질 제작 방법

LiFSI (Lithium Bis (Fluorosulfonyl) Imide, 99.9%, Sigma-aldrich)를 DME (1,2 Dimethoxyethane, 99.5%, Sigma-aldrich)에 몰비 1 : 2 (LiFSI : DME)로 첨가한 후, 50°C의 핫플레이트에서 완전히 용해될 때까지 교반하여 QSE 액체 전해질을 제작하였다.

반고체 전해질-PI 분리막(Quasi-solid Electrolyte-Polyimide Separator Composit, QSE-PSC) 제조를 위해, PEGDA (Poly(ethylene glycol) diacrylate, Mn = 3400, Sigma-Aldrich)와 SiO<sub>2</sub>를 앞서 제조한 LiFSI-DME 전해질에 질량비 20 : 70 : 10 (PEGDA : LiFSI-DME SiO<sub>2</sub>)으로 혼합하였다. 이후 PEGDA의 열경화를 유도하기 위해, 열개시제인 2,2'-azobis (2-methylpropionitrile) (AIBN, Sigma-aldrich)를 PEGDA 질량 기준 1 wt%를 첨가한 후, 완전히 용해될 때까지 교반하였다. 제조된 용액을 유리 기판 위에 있는 PI 분리막에 흡수시킨 뒤, 또 다른 유리 기판으로 덮어 평탄한 박막을 형성하였다. 이후 80°C에서 30분간 열경화 처리를 통해 QSE-PSC를 제작하였다. 두께는 두 유리 기판 사이 간격을 조절하여 40 μm 범위 내에서 제어하였다.

### 2.2 배터리의 전기화학적 성능 지표

배터리의 성능은 효율성, 수명, 신뢰성을 종합적으로 반영하는 다양한 전기화학 지표를 통해 평가된다. 주요 지표로는 용량, 전력, 에너지 밀도, 내부 저항, 전압 및 쿨롱 효율(Coulombic Efficiency, CE)이 포함된다. 용량은 mAh 또는 Ah로 측정되며 배터리가 저장할 수 있는 총 충전량을 나타내며 작동 시간에 직접적인 영향을 미친다. C-rate는 충전 및 방전 속도를 나타내며,

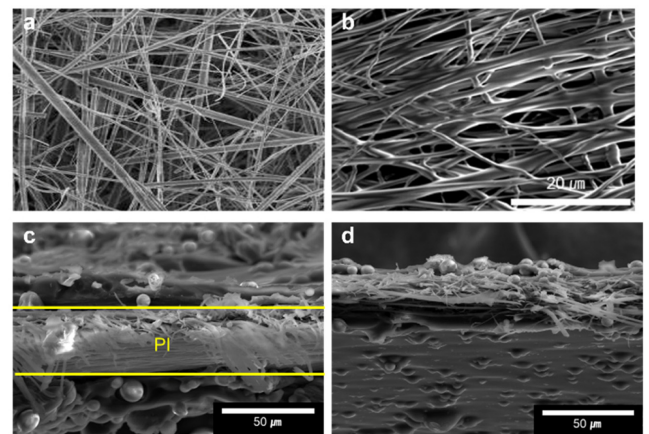


Fig. 1 SEM images to confirm the pore size of each separator: (a) Glass fiber (GF) separator, (b) Polyimide (PI) separator, and (c),(d) QSE-PSC with SiO<sub>2</sub>

속도 특성은 다양한 C-rate 조건에서의 성능 유지 능력을 평가한다. 전력은 전류와 전압의 곱이며, 전력 밀도(W/kg 또는 W/L)는 전류 밀도와 열/전기적 특성의 영향을 받는 단위 질량 또는 부피당 전달되는 전력을 의미한다. 이는 배터리의 고출력 특성을 평가하는 핵심 지표이다.

에너지 밀도는 Wh/kg(중량) 또는 Wh/L(부피)로 나타내며, 배터리가 단위 무게나 부피당 얼마나 많은 에너지를 저장할 수 있는지를 결정한다. 전압과 용량을 곱하고 질량이나 부피로 나누어 계산되며, 에너지 밀도가 높을수록 더 가볍고 콤팩트한 배터리를 만들 수 있다. 전기화학 임피던스 분광법(EIS)을 사용하여 분석할 수 있는 내부 저항은 에너지 손실과 충전/방전 속도에 영향을 미치며, 여기에는 오믹 저항( $R_{ohm}$ ), 전하 전달 저항( $R_{ct}$ ), 확산 저항( $W$ )과 같은 구성 요소가 포함된다. 마지막으로 쿨롱 효율(CE)은 방전 용량 대비 비율을 백분율로 표시하여 배터리가 에너지를 얼마나 효율적으로 순환하는지를 나타내며, CE가 100%에 가까울수록 높은 가역성과 안정성을 의미한다. 이러한 전기화학적 지표는 차세대 배터리의 성능 개선 및 실용화 가능성을 종합적으로 판단하는 기준으로 활용된다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 분리막 구조 분석

QSE가 고체 전해질에 비해 리튬 덴드라이트 성장을 효과적으로 억제하지 못하는 한계를 해결하기 위해, 다양한 분리막을 적용하여 덴드라이트 형성 완화 가능성을 평가하였다. 본 연구에서는 세 가지 분리막을 비교 분석하였다: (1) Celgard, (2) Glassfiber (GF), (3) PI (Polyimide). 각 분리막의 표면 및 구조는 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 결과는 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 셀gard 분리막은 나노미터 규모의 기공을 보였으며, 이는 QSE의 충분한 흡수를 저해하여

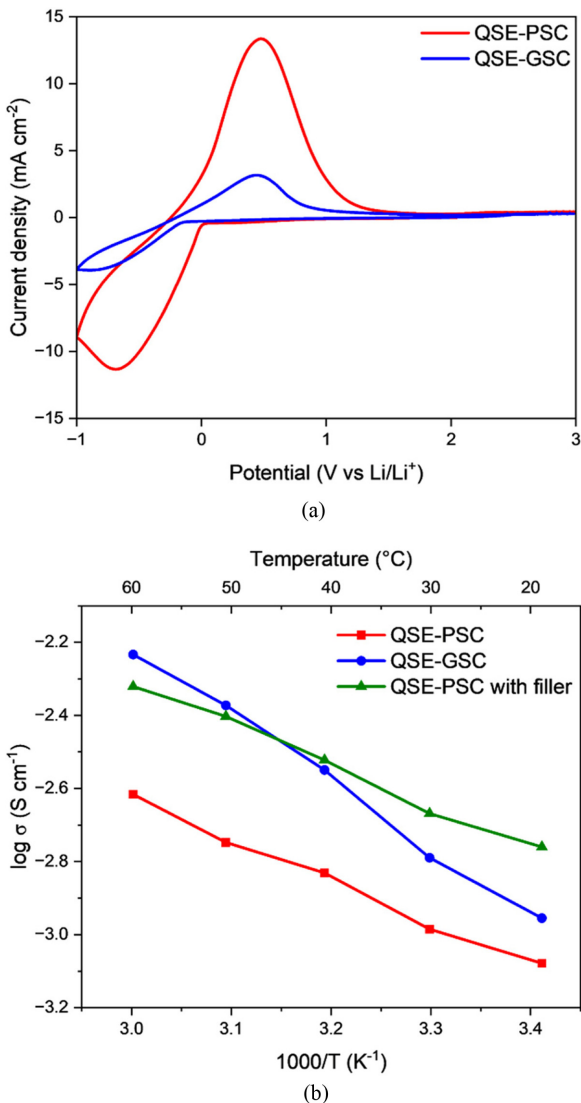


Fig. 2 (a) CV test results plot and schematics of Li<sup>+</sup> plating/stripping mechanism and (b) Ionic conductivity of QSE-SC based on PI separator and GF separator

QSE 기반 시스템에 비적합한 것으로 나타났다.

반면, Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 GF 분리막은 기공 크기 (≥10 μm)가 매우 커서 QSE를 잘 흡수할 수 있지만, 기계적 지지력이 부족해 사이클 테스트 중 Li 덴드라이트 성장으로 인해 단락이 발생하였다. 한편, Fig. 1(c)에서 볼 수 있듯이 PI 분리막은 중간 크기의 기공(2-5 μm)을 가져 QSE 흡수성과 덴드라이트 억제 효과를 동시에 확보하였다.

또한 PI 분리막의 두께는 약 20 μm으로, 셀가드(25 μm) 및 GF (200 μm)보다 얇아 비활성 물질의 비율을 최소화하고, 중량 및 부피 에너지 밀도 향상에 기여한다. 얇고 안정적인 분리막은 활성 물질 함량을 극대화할 수 있어, PI 분리막은 최적의 기공 구조와 기계적 안정성을 바탕으로 QSE와 결합해 복합 전해질 (QSE-PSC) 제조에 활용되었다.

본 연구에서는 전기화학적 특성(CV, EIS)과 기계적 강도(인장

시험)까지 종합적으로 검토한 결과, QSE의 흡수성, 덴드라이트 억제 능력, 에너지 밀도 향상을 동시에 만족시키는 PI 분리막을 최종 선택하였다. Celgard는 상용화된 분리막으로 널리 사용되지만, 나노미터 수준의 미세 가공 때문에 QSE 용액이 충분히 스며들지 않아 복합체 형성이 어렵고, 이온 전도 경로가 제한되어 본 연구의 고이온전도, 고안정성 목표를 달성하기에는 부적합하다.

### 3.2 분리막 전기화학적 특성 분석

기존의 QSE는 낮은 기계적 강도로 인해 Li-덴드라이트 성장을 효과적으로 억제하지 못하고, 이로 인한 내부 파손이 발생한다. 이를 개선하기 위해 분리막을 추가하였으며, 본 연구에서는 PI 분리막 기반 QSE-PSC와 GF 분리막 기반 QSE-GSC (Quasi-Solid Electrolyte-glassfiber Separator Composite)의 전기화학적 및 기계적 특성을 비교 평가하였다.

Fig. 2(a)는 QSE-PSC 및 QSE-GSC에 대한 순환 전압전류법 (Cyclic Voltammetry, CV) 테스트 결과 및 리튬 도금/박리 메커니즘을 나타낸다. CV 곡선에서 확인할 수 있듯이, QSE-PSC는 QSE-GSC에 비해 더 높은 산화환원 피크 전류를 보이며, 이는 Li<sup>+</sup> 이온 이동성이 우수하고 활발한 전기화학 반응이 발생함을 시사한다. 결과적으로, PI 분리막 기반 QSE-PSC는 우수한 리튬 도금/박리 특성을 제공한다.

Fig. 2(b)는 QSE-GSC, QSE-PSC 및 SiO<sub>2</sub>가 첨가된 QSE-PSC의 이온 전도도에 대한 아레니우스 플롯을 제시한다. 두 개의 스테인리스 스틸(Stainless Steel, SUS) 전극이 있는 대칭 코인 셀을 사용하여 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 통해 이온전도도를 측정했다. 측정은 1 MHz에서 1 Hz의 주파수 범위와 25°C에서 60°C의 온도 범위에서 수행되었다. EIS 측정 결과는 표준 고체 전해질 계면 모델을 사용하여 해석하였다. 다음과 같은 등가회로로 피팅하였다.

$$R_s - (R_{SEI} \parallel CPE_{SEI}) - (R_{ct} \parallel CPE_{dl}) - Z_w$$

벌크 저항  $R_b$ 는 나이퀴스트 플롯의 고주파 영역에서의 절편 값으로부터 얻었으며, 전도도는 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma = \frac{L}{R_b \times A} \tag{1}$$

여기서 L은 분리막의 두께를, A는 전극 면적을 나타낸다. 이러한 조건에서 SiO<sub>2</sub> 첨가된 PI 기반 QSE-PSC는 상온에서 약  $1.7 \times 10^{-3}$  S cm<sup>-1</sup>의 이온전도도를 나타냈다. 이 값은 액체 전해질의 이온전도도 범위(10<sup>-2</sup>-10<sup>-3</sup> S cm<sup>-1</sup>)의 하한에 해당하며, 일반적인 반고체 전해질(10<sup>-4</sup>-10<sup>-6</sup> S cm<sup>-1</sup>)보다 높은 수준으로, 액체와 유사한 이온 전도 특성과 고체와 같은 기계적 안정성을 동시에 갖춘다는 것을 의미한다. 기울기 비교 결과, QSE-GSC는 QSE-PSC에 비해 더 가파른 기울기를 보여, 높은 에너지 장벽과 온도 의존성을 나타낸다. 반면, PI 분리막 기반 QSE-PSC는 낮은

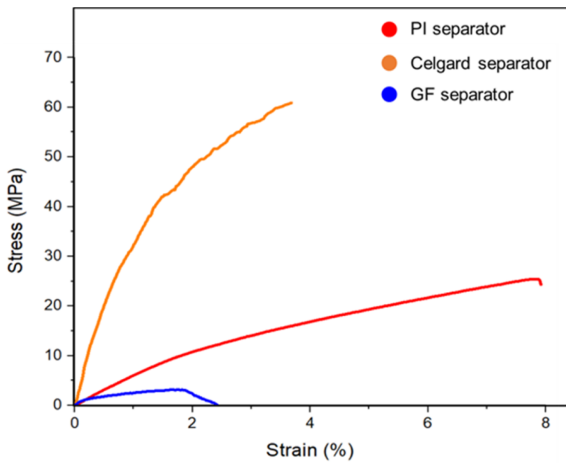


Fig. 3 Stress-strain curves of QSE-SC using PI separator, Celgard separator, and GF separator

에너지 장벽을 통해 보다 안정적이고 온도 변화에 강인한 이온 전도 특성을 보인다.

이를 통해 PI 분리막이 QSE의 기계적 안정성과 전기화학적 성능을 동시에 향상시키며, GF 분리막 대비 우수한 리튬 금속 배터리 성능 구현에 기여할 수 있음을 입증한다.

3.3 분리막 기계적 특성 분석

분리막의 기계적 특성을 평가하기 위해 PI, 셀가드, GF 분리막의 인장시험을 수행하였으며, 결과는 Fig. 3의 응력-변형률 선도로 나타났다. 인장 강도는 재료가 파단되기 전 견딜 수 있는 최대 장력으로, 분리막의 강도를 나타내며, 연신율은 파단 전까지의 변형 정도로서 유연성을 평가한다. 일반적으로 높은 인장 강도와 연신율을 동시에 확보할 경우, 분리막의 리튬 덴드라이트 침투 저항성과 천공 저항성이 향상된다.

Fig. 3의 결과에 따르면, 셀가드 분리막은 가장 높은 인장 강도를 보였으나, 기공 크기가 매우 작아 QSE의 흡수가 제한적이다. 반면, PI 분리막은 우수한 기계적 강도와 적절한 연신율을 확보함과 동시에, 중간 크기의 기공 구조를 통해 QSE 흡수에 유리하다. 이러한 균형 잡힌 구조적 특성은 분리막의 덴드라이트 침투 억제 및 배터리의 안정성 향상에 기여한다.

3.4 셀 성능 분석

1C 조건에서의 사이클 성능은 Fig. 4에 나타났다. QSE-PSC와 QSE-GSC는 각각 99.94%와 99.79%의 높은 초기 용량 유지율을 보인다. 그러나 QSE-PSC는 100번째 사이클까지 100%의 용량을 유지하는 반면, QSE-GSC는 40번째 사이클 이후 급격한 용량 감소를 보인다. 이를 통해 QSE-PSC가 QSE-GSC에 비해 우수한 사이클링 안정성과 에너지 밀도 향상을 제공함을 확인하였다.

Fig. 5는 SiO<sub>2</sub> 첨가 여부에 따른 QSE-PSC의 셀 성능 변화를 비교한 것이다. Figs. 5(a)에 따르면 SiO<sub>2</sub>가 있는 QSE-PSC와 SiO<sub>2</sub>가

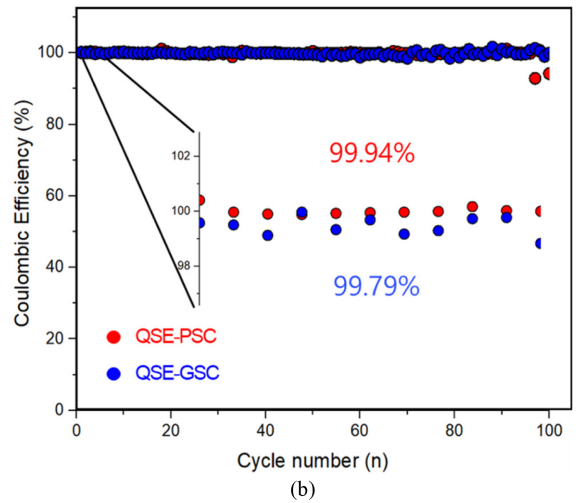
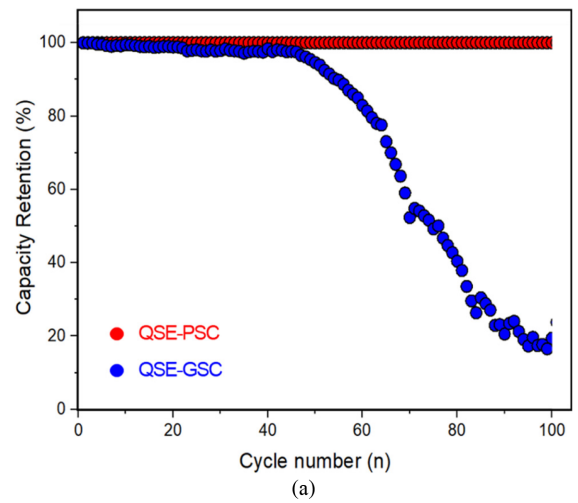


Fig. 4 Cell performance of QSE-PSC and QSE-GSC through charge-discharge tests: (a) Capacity retention (%) and (b) Coulombic efficiency (%).

없는 QSE-PSC의 초기 방전 용량은 각각 130.63과 138 mAhg<sup>-1</sup>이다. SiO<sub>2</sub> 존재 여부에 상관없이 용량은 비슷하지만, 5(b)에서 쿨롱 효율에서 유의미한 차이를 볼 수 있다. SiO<sub>2</sub>를 첨가한 QSE-PSC는 사이클링 내내 99% 이상의 안정적인 효율을 유지한다. 반면, SiO<sub>2</sub>이 없는 QSE-PSC는 약 30 사이클 후 효율이 급격히 감소했으며, 50번째 사이클에서는 상당한 열화가 관찰되었다.

이러한 효율 감소는 Fig. 6의 전압 프로파일을 통해 설명할 수 있다. SiO<sub>2</sub>를 첨가한 QSE-PSC는 작동 중 안정적인 일관된 전압 곡선을 유지하였으며, 이는 우수한 계면 안정성과 구조적 신뢰성을 의미한다. 반면에, SiO<sub>2</sub>를 첨가하지 않은 QSE-PSC는 충전 과정에서 전압 불안정성이 뚜렷하게 나타났으며, 이로 인해 전기화학적 성능 저하 및 사이클 수명 열화가 발생하였다. 결과적으로, SiO<sub>2</sub> 첨가를 통해 QSE-PSC의 계면 안정성 및 사이클 신뢰성을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

약 30 사이클 후 SiO<sub>2</sub>가 없는 QSE-PSC에서 관찰된 급격한 쿨롱 효율 감소와 전압 변동은 폴리머 매트릭스의 불충분한

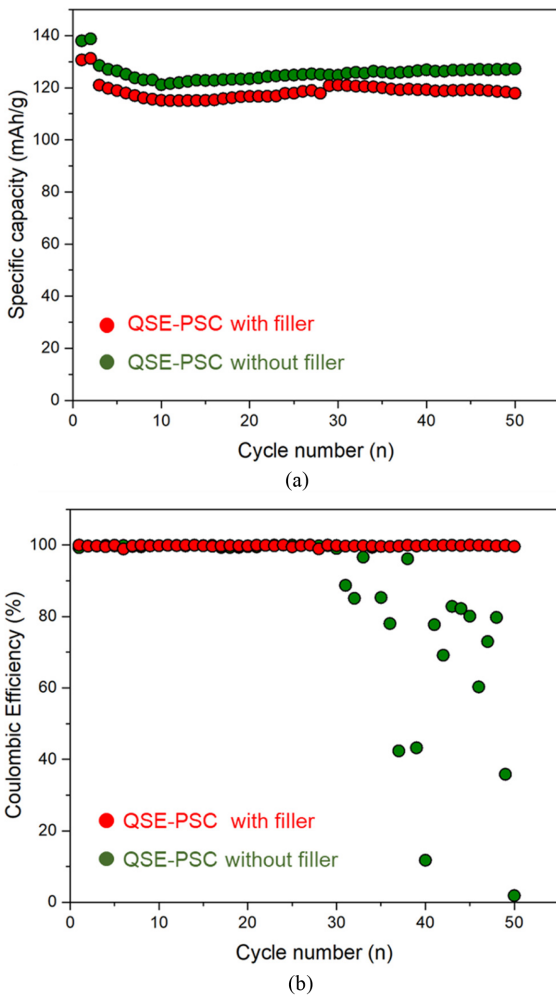


Fig. 5 Cell performance of QSE-PSC with and without SiO<sub>2</sub> added was evaluated through charge-discharge tests: (a) Specific capacity (mAh g<sup>-1</sup>) plot and (b) Coulombic efficiency (%) plot

기계적 강화로 인해 발생하며, 이는 리튬 덴드라이트가 분리막을 뚫고 전극을 간헐적으로 단락시킬 수 있게 한다. 단면 SEM과 충전-방전 프로파일은 반고체 전해질의 반복적인 파열과 재형성을 확인하여 불안정한 과전위와 비가역적인 리튬 손실을 초래한다. 대조적으로, 마이크로미터 규모의 SiO<sub>2</sub>의 첨가는 비압축성 세라믹 도메인과 풍부한 표면 -OH 그룹을 제공하여 폴리머 네트워크를 강화하고 국부적인 압축 응력을 생성하여 덴드라이트 전파를 기계적으로 억제하고 계면을 안정화시킨다. 그 결과, SiO<sub>2</sub>를 포함하는 셀은 50회 이상 CE가 99% 이상인 안정적인 전압 프로파일을 유지했다.

서로 다른 C-rate에서 수행된 추가 사이클링 테스트에서도 동일한 경향이 나타났다(Fig. 7). SiO<sub>2</sub>를 함유한 셀은 높은 효율과 용량을 유지한 반면, SiO<sub>2</sub>가 없는 셀은 여전히 초기 단락과 용량 감소를 보였다. 전류 밀도가 높을수록 단락 시간만 약간 단축되어 SiO<sub>2</sub> 첨가의 이점이 C-rate와 무관함을 확인했다.

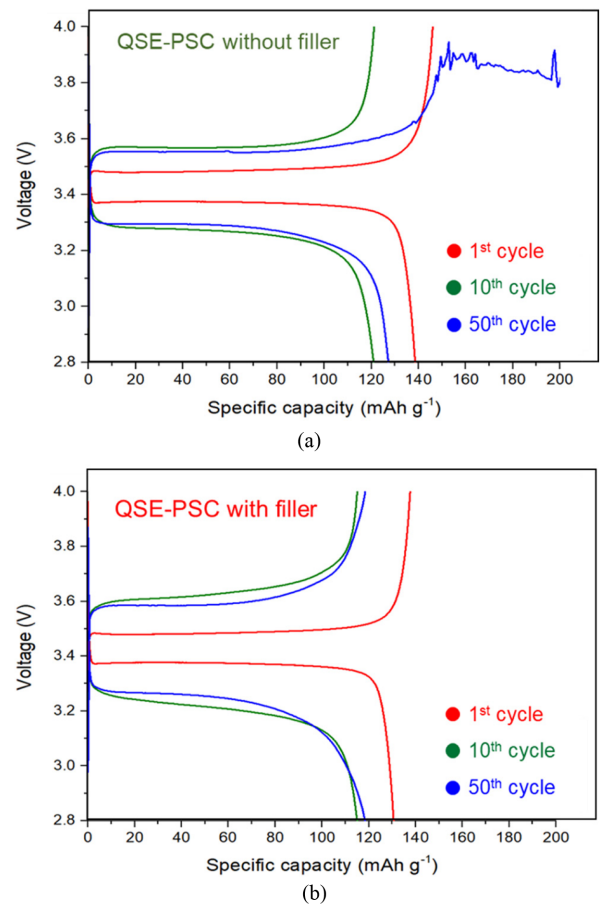


Fig. 6 Charge-discharge voltage profiles of QSE-PSC (a) without SiO<sub>2</sub> filler and (b) with SiO<sub>2</sub> filler

나노미터 규모의 필러의 잘 알려진 효과 외에도, 이 결과는 마이크로미터 규모의 SiO<sub>2</sub> 입자(>10 μm)가 QSE-PSC의 사이클링 안정성을 크게 향상시켰다는 것을 보여준다. 단면 SEM 관찰 결과(Fig. 1), 더 큰 입자들이 PI 분리막의 2-5 μm 기공 외부의 폴리머 매트릭스에 박혀 있으며, 이들은 단단한 세라믹 기둥 역할을 한다는 것이 확인되었다. 이로 인해 폴리머 덴드라이트 침투를 기계적으로 억제하는 동시에 폴리머 결정성을 방해하여 추가적인 비정질 이온 수송 채널을 생성한다. 이러한 결과는 마이크로미터 규모의 SiO<sub>2</sub>가 제공하는 기계적 보강 및 계면 안정화가 일반적으로 나노 크기의 필러와 관련된 표면적 이점을 능가한다는 것을 나타내며, 이 연구에서 관찰된 우수한 장기 안정성을 설명한다.

#### 4. 결론

반고체 전해질(QSE)은 리튬 금속 배터리의 이온 전도도와 안정성 측면에서 잠재력을 보이나, 단독으로는 리튬 덴드라이트 성장을 효과적으로 억제하기에 기계적 강도가 부족하다. 본 연구에서는 QSE의 기계적 및 전기화학적 성능을 강화하기

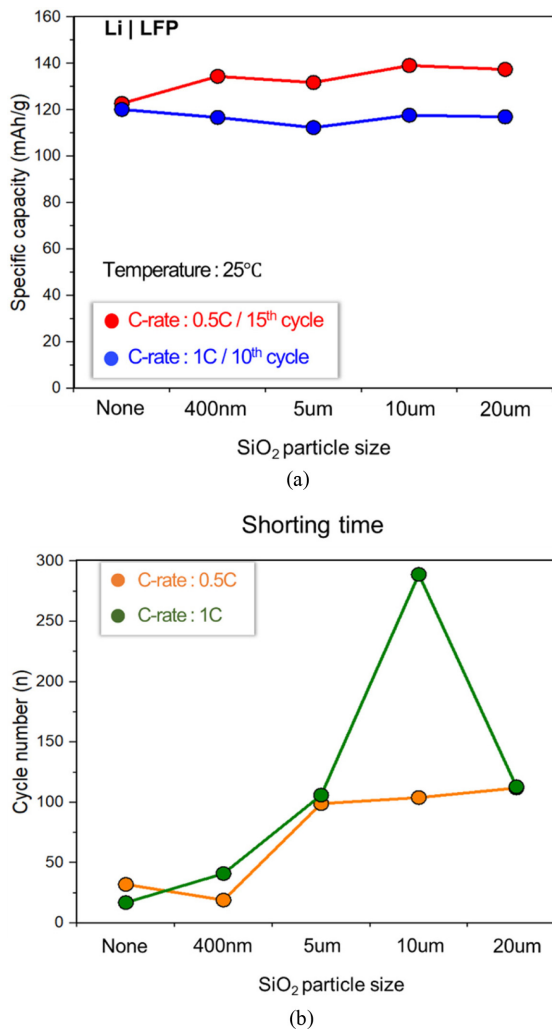


Fig. 7 Comparison plots of (a) specific capacity (mAh g<sup>-1</sup>) and (b) shorting time expressed in terms of cycle numbers (n) as function of SiO<sub>2</sub> particle sizes. Cycling tests were conducted with Li||LFP cells at room temperature, within a voltage range of 2.8 to 4.0V. C

위해 두 가지 전략을 적용하였다: (1) 적절한 두께(20 μm)와 기공 크기(2-5 μm)를 가진 폴리이미드(PI) 분리막 적용, (2) 무기 세라믹 필러(SiO<sub>2</sub>) 첨가. 두 가지 방법을 결합한 QSE-PSC복합체는 우수한 기계적 안정성과 함께 높은 이온전도도, 향상된 덴드라이트 억제 효과, 안정적인 사이클 수명 및 99% 이상의 쿨롱 효율을 확보하였다. 특히, SiO<sub>2</sub> 필러는 덴드라이트 침투를 효과적으로 억제하는 데 기여하였다. 결과적으로 얻어진 QSE-PSC는 안정적인 사이클링과 높은 쿨롱 효율을 보여, QSE의 기계적 한계를 극복하기 위해 분리막과 세라믹 필러를 사용하는 것의 중요성을 확인했다. 이는 차세대 리튬 금속 배터리의 안정성 확보 및 실용화 가능성을 높일 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2024-00442817).

## REFERENCES

- Liu, Y. K., Zhao, C. Z., Du, J., Zhang, X. Q., Chen, A. B., Zhang, Q., (2023), Research progresses of liquid electrolytes in lithium-ion batteries, *Small*, 19(8), 2205315.
- Vedhanarayanan, B., Seetha Lakshmi, K., (2024), Beyond lithium-ion: Emerging frontiers in next-generation battery technologies, *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*, 3, 1377192.
- Zhang, C., Niu, Z., Bae, J., Zhang, L., Zhao, Y., Yu, G., (2021), Polyeutectic-based stable and effective electrolytes for high-performance energy storage systems, *Energy & Environmental Science*, 14(2), 931-939.
- Shi, P., Ma, J., Huang, Y., Fu, W., Li, S., Wang, S., Zhang, D., He, Y.-B., Kang, F., (2021), A thin and high-strength composite polymer solid-state electrolyte with a highly efficient and uniform ion-transport network, *Journal of Materials Chemistry A*, 9(25), 14344-14351.
- Sung, J., Heo, J., Kim, D.-H., Jo, S., Ha, Y.-C., Kim, D., Ahn, S., Park, J.-W., (2024), Recent advances in all-solid-state batteries for commercialization, *Materials Chemistry Frontiers*, 8(8), 1861-1887.
- Bae, J., Qian, Y., Li, Y., Zhou, X., Goodenough, J. B., Yu, G., (2019), Polar polymer-solvent interaction derived favorable interphase for stable lithium metal batteries, *Energy & Environmental Science*, 12(11), 3319-3327.
- Lin, W., Liu, J., Xue, L., Li, Y., Yu, H., Xiong, Y., Chen, D., Ciucci, F., Yu, J., (2022), Nonflammable, robust and flexible electrolytes enabled by phosphate coupled polymer-polymer for Li-metal batteries, *Journal of Colloid and Interface Science*, 621, 222-231.
- Liao, Y., Xu, X., Luo, X., Ji, S., Zhao, J., Liu, J., Huo, Y., (2023), Recent progress in flame-retardant polymer electrolytes for solid-state lithium metal batteries, *Batteries*, 9(9), 439.



**Jeongeun Park**

M.S. Student in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. Her research interest is Semi/All Solid Battery.

E-mail: [pje0001@hanyang.ac.kr](mailto:pje0001@hanyang.ac.kr)



**Jinhyeong An**

M.S. Student in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interest is Semi-Solid Battery.

E-mail: [jinhyeong416@hanyang.ac.kr](mailto:jinhyeong416@hanyang.ac.kr)



**Jiwoong Bae**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interests are energy storage & conversion materials and devices in terms of manufacturing & sustainability.

E-mail: [jwbae@hanyang.ac.kr](mailto:jwbae@hanyang.ac.kr)