

원자층 증착 활물질 코팅과 황화물 고체 전해질을 활용한 전고체 구조배터리 개발

김사무엘* · 김원빈* · 이하은* · 이민근* · 조동현* · 조재영* · 이준호* · 이상복**† · 김성수*†

Development of All-Solid-State Structural Battery using ALD Coating and Solid Sulfide Electrolyte

Samuel Kim*, Wonvin Kim*, Ha Eun Lee*, Mingeun Lee*, Donghyeon Cho*, Jaeyoung Jo*,
Junho Lee*, Sang Bok Lee**†, Seong Su Kim*†

ABSTRACT: Structural batteries have emerged as multifunctional energy storage systems capable of simultaneously providing mechanical load-bearing and electrochemical energy storage. However, conventional systems suffer from a trade-off between electrochemical performance and structural reliability due to non-uniform electrode coatings, weak interfacial adhesion, and the low ionic conductivity of polymer-based solid electrolytes. To overcome these limitations, we integrate ultrathin active material coatings deposited via atomic layer deposition (ALD) on carbon fiber current collectors with a sulfide-based solid electrolyte. A uniform vanadium oxide layer (~253 nm) enhanced interfacial stability. The ALD-coated cathodes delivered 85.4 mAh g⁻¹ with 93% capacity retention after 100 cycles in liquid cells, and 67.2 mAh g⁻¹ with stable cycling over 100 cycles in all-solid-state cells. These results demonstrate improved electrochemical performance and interfacial reliability, providing a viable pathway toward high-performance structural batteries for next-generation mobility and aerospace applications.

초 록: 구조배터리는 기계적 하중 지지 기능과 전기화학적 에너지 저장 기능을 동시에 수행할 수 있는 다기능 에너지 저장 시스템으로 주목받고 있다. 그러나 기존 시스템은 전극 코팅의 비균일성, 취약한 계면 접착력, 그리고 고분자 기반 고체 전해질의 낮은 이온전도도로 인해 전기화학적 성능과 구조적 신뢰성 사이에 상관관계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 탄소섬유 집전체 상에 원자층 증착을 통해 초박막 활성물질을 코팅하고, 황화물계 고체 전해질을 통합하였다. 평균 두께 약 253 nm의 균일한 바나듐 산화물 층이 형성되어 계면 안정성이 향상되었다. ALD 코팅된 양극은 액체 전해질 셀에서 초기 방전 용량 85.4 mAh g⁻¹과 100회 사이클 이후 93%의 용량 유지율을 보였으며, 전고체 셀에서는 초기 방전 용량 67.2 mAh g⁻¹과 100회 이상의 안정적인 사이클 특성을 나타냈다. 이러한 결과는 전기화학적 성능과 계면 신뢰성이 동시에 향상되었음을 보여주며, 차세대 모빌리티 및 항공우주 응용을 위한 고성능 구조배터리 개발의 가능성을 제시한다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 탄소섬유(Carbon fiber), 구조배터리(Structural battery), 전고체 배터리(All-solid-state battery)

Received 1 March 2026, received in revised form 11 May 2026, accepted 15 May 2026

*Department of Mechanical Engineering, KAIST

**Department of Chemistry and Biochemistry, UMD

†Corresponding authors (E-mail: slee@umd.edu (Sang Bok Lee), seongsukim@kaist.ac.kr (Seong Su Kim))

1. 서 론

전기차 (Electric vehicles, EV), 도심항공모빌리티 (Urban air mobility, UAM), 위성 및 차세대 로봇 시스템과 같은 첨단 시스템에서는 고에너지 밀도와 구조 경량화를 동시에 달성하는 것이 핵심적인 요구사항이다[1-4]. 그러나 상용 리튬이온 배터리는 우수한 전기화학적 성능에도 불구하고, 별도의 배터리 팩과 독립적인 기계적 지지 구조를 필수적으로 요구한다. 이러한 분리형 시스템은 필연적으로 중량 증가, 비효율적인 공간 활용성 등을 초래하며, 결과적으로 전체 시스템 성능 향상에 근본적인 한계를 부여한다.

이와 같은 내재적 한계를 해결하기 위해, 하중 지지 구조가 기계적 지지와 전기화학적 에너지 저장 기능을 동시에 수행하는 구조배터리 (Structural battery)가 최근 큰 주목을 받고 있다. Fig. 1에 개략적으로 도시된 바와 같이, 구조배터리는 집전체이자 전극 역할을 동시에 수행하는 탄소섬유와, 리튬 이온 전달과 기계적 하중 전달을 동시에 가능하게 하는 고체 전해질로 구성된다. 이러한 다기능 통합 설계는 시스템 수준에서의 중량 및 부품 수 감소와 설계 자유도 향상을 가능하게 한다. 실제로 차량 차체 프레임이나 루프 패널과 같은 하중 지지 부재에 구조배터리를 적용할 경우, 기존 금속 기반 구조 대비 최대 약 62%의 중량 감소가 가능하다고 보고된 바 있다[5,6].

그럼에도 불구하고, 기존 구조배터리 시스템에서 높은

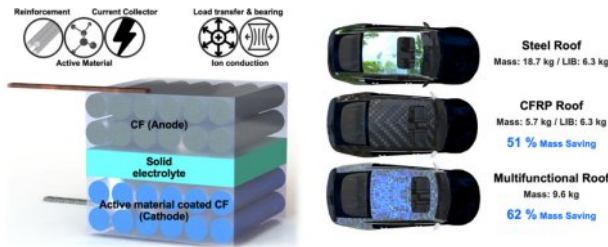


Fig. 1. Schematic of structural battery

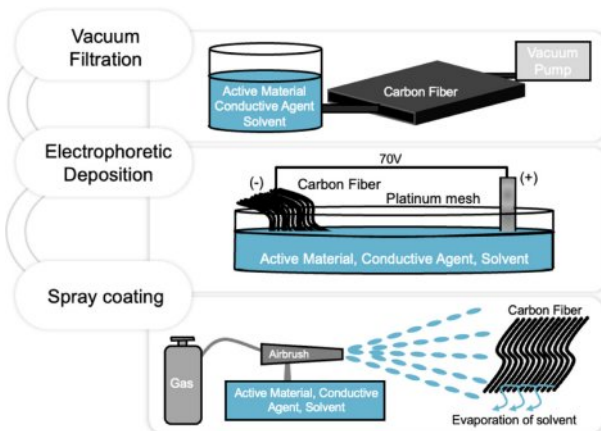
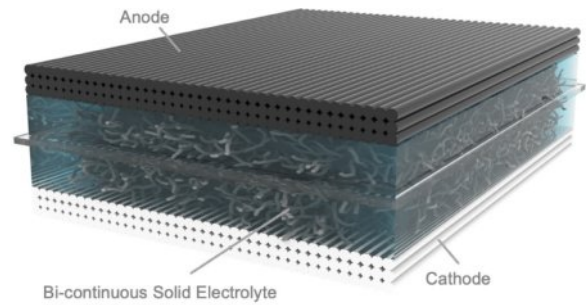


Fig. 2. Active material coating methods



- One phase is ionically conductive
- The other phase is mechanically supportive
- Both phases are co-continuous

Fig. 3. Bi-continuous solid electrolyte

전기화학적 성능과 우수한 구조적 건전성을 동시에 달성하는 것은 여전히 어려운 과제이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 진공 여과 (Vacuum filtration)[7], 전기영동 증착 (Electrophoretic deposition, EPD)[8], 스프레이 코팅 (Spray coating)[9]과 같은 기존 습식 전극 제조 공정은 탄소섬유 표면에서 코팅 두께 및 계면 균일성을 정밀하게 제어하는 데 한계를 가진다. 이러한 한계는 국부적인 기계적 응력 집중을 유발하며, 반복적인 충·방전 과정에서 계면 열화를 가속화하고, 궁극적으로는 탄소섬유-활성물질 계면 박리를 초래한다[10].

또한, 대부분의 구조배터리 설계는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 고분자 고체 전해질 또는 이중 연속 (bi-continuous) 고분자 기반 전해질에 의존하고 있다[11-14]. 그러나 고분자의 낮은 이온전도도 (10^{-8} – 10^{-6} S/cm)와 제한적인 기계적 강성 및 강도는 이온 수송과 구조적 신뢰성을 동시에 제한한다[15-17]. 그 결과, 실제 적용에 필요한 출력 밀도, 에너지 효율, 기계적 물성에는 못 미치는 성능을 보이고 있다.

이러한 핵심 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 원자층 증착 (Atomic layer deposition, ALD) 기반의 초박막·고균일 활성물질 코팅과 황화물계 고체 전해질을 결합한 구조배터리를 제안한다. ALD 공정은 자기 제한적 표면 반응 (Self-limiting surface reactions)을 통해 원자 수준의 두께 제어를 가능하게 하며, 복잡한 탄소섬유 집합체에서도 우수한 계면 균일성을 제공함으로써 코팅 두께 편차, 계면 결함을 억제할 수 있다. 한편, 본 연구에서 적용한 황화물계 고체 전해질은 고분자 전해질 대비 현저히 높은 리튬 이온 전도도를 제공함으로써, 기존 구조배터리의 출력 및 효율 한계를 효과적으로 완화한다.

결과적으로, ALD 기반 활성물질 코팅과 황화물계 고체 전해질의 통합은 기존 구조배터리에서 나타나는 전기화학적 안정성과 구조적 신뢰성 간의 근본적인 상충 관계를 극복할 수 있는 새로운 설계 방법을 제시한다. 이는 구조배터리

리를 단순한 경량 지지 구조에서 벗어나, 미래 모빌리티 및 항공우주 시스템에 적용 가능한 고성능 다기능 하중 지지 소재로 발전시키는 기반을 마련한다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료

본 연구에서는 구조배터리의 집전체로 PAN 계열 탄소섬유 (T800, Toray Industries, Japan)를 사용하였다. 탄소섬유 표면에 존재하는 사이징 (Sizing) 층을 제거하고 표면 작용기를 도입하기 위해 질산 (HNO_3 , 69%, Fisher Chemical, USA)을 사용하였다.

액체 전해질로는 1.0 M lithium hexafluorophosphate (LiPF_6)를 ethylene carbonate (EC)와 diethyl carbonate (DEC)의 혼합 용매 (중량비 1:1)에 용해한 탄산염 기반 전해질을 사용하였다. 고체 전해질로는 황화물계 전해질 분말 ($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$, LPSCl; MSE Supplies, USA)을 별도의 추가 처리 없이 사용하였으며, 이후 전기화학적 특성 평가를 위해 펠렛 형태로 냉간 압축하여 제조하였다.

2.2 탄소섬유 전처리

사이징 층을 제거하기 위하여 PAN 계열 탄소섬유를 56°C 의 아세톤에서 8시간 동안 환류 (reflux) 처리한 후, 클로로폼 (chloroform)에 침지하였다. 이후 건조된 탄소섬유는 표면에 산소 함유 작용기를 도입하기 위하여 80°C 의 질산에서 90분 동안 산화 처리하였다. 산화 처리 후 탈이온수로 세척하였으며, 이후 추가적인 특성 분석 및 증착 공정을 수행하기 전에 100°C 진공 오븐에서 8시간 동안 건조하였다.

2.3 푸리에 변환 적외선 분광 분석

탄소섬유의 산화 처리 전후 표면 작용기 형성 여부를 확인하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광 분석을 수행하였다. 측정은 FT-IR 분광기 (NEXUS 670, Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하여 $4,000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ 의 파수 범위에서 진행하였다. 신호 대 잡음비 (Signal-to-noise ratio)를 향상시키기 위하여 각 스펙트럼은 64회 스캔의 평균값으로 획득하였다.

2.4 주사전자현미경 분석

사이징 제거 전후 및 ALD 공정 이후 탄소섬유의 표면 형상 및 미세구조 특성을 관찰하기 위하여 주사전자현미경 (SU-70, Hitachi, Japan)을 사용하였다. 모든 이미지는 $5\text{--}10\text{ kV}$ 범위의 전압 조건에서 획득하였다.

2.5 원자층 증착

V_2O_5 는 높은 이론 용량, 다중 산화-환원 상태 ($\text{V}^{5+}/\text{V}^{4+}$), 그리고 박막 기반 리튬 저장 응용에 적합한 구조적 안정성을

가지기 때문에 양극 활물질로 선정되었다. 특히, 저온 증착 공정과의 우수한 적합성 (Conformality)으로 인해 탄소섬유 표면상에서 균일한 코팅이 가능하다는 장점이 있다. 이에 따라 VTOP을 바나듐 전구체로 사용하였으며, 산화제로는 오존 (O_3)을 적용하였다. 이때 VTOP은 ALD 공정에서 V source로 활용되며, 탄소섬유 표면에 흡착된 후 O_3 와의 산화 반응을 통해 V-O 결합을 형성한다. O_3 는 강한 산화력을 가지기 때문에 비교적 낮은 공정 온도에서도 산화물 형성을 효과적으로 유도할 수 있다. 질소 (N_2)는 전구체 및 산화제의 운반을 위해 사용되었으며, 각 반응 단계 후 잔류 전구체와 부산물을 제거하기 위한 퍼지 가스로도 사용하였다. 증착은 상용 ALD 장비 (TFS 500, Beneq, Finland)을 이용하여 170°C , 1,250 cycle 조건에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탄소섬유 양극 코팅

사이징 제거 전후 탄소섬유의 표면 형상은 각각 Fig. 4(a), (b) 및 Fig. 4(c), (d)에 나타내었다. 처리 전 탄소섬유 표면은 비균일하고 거친 형상을 나타내었으며, 처리 후에는 보다 매끄럽고 균일한 표면이 관찰되었다.

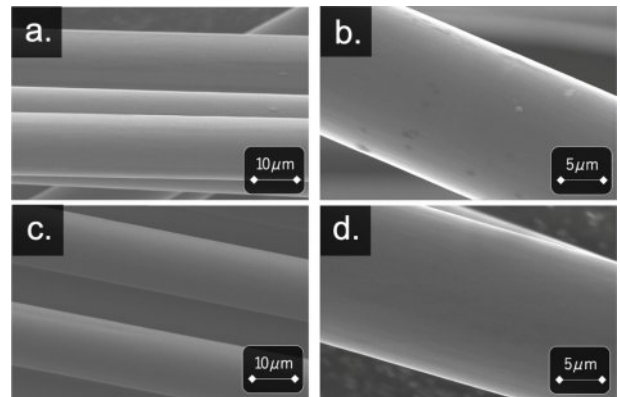


Fig. 4. a), b) Carbon fiber surface before desizing c), d) Carbon fiber surface after desizing

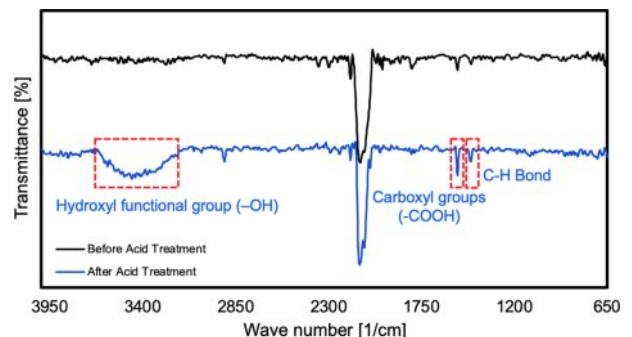


Fig. 5. FT-IR result of carbon fibers before and after acid treatment

질산 산화에 의해 유도된 표면 작용기 형성은 Fig. 5에 제시된 FT-IR 분석을 통해 확인하였다. $650\text{--}3950\text{ cm}^{-1}$ 범위에서 측정된 스펙트럼에서 수산기 ($-\text{OH}$) 및 카복실기 ($-\text{COOH}$)에 해당하는 특성 피크가 명확하게 관찰되었으며, 이를 통해 탄소섬유 표면에 산소 기능기가 성공적으로 도입되었음을 확인할 수 있다. 이러한 기능기들은 이후 증착되는 활물질과의 화학적 결합을 촉진하고 계면 접착력을 향상시키는 역할을 한다.

바나듐 기반 활물질은 산화 처리된 탄소섬유 표면에 ALD를 이용하여 증착하였다. 증착 공정은 250 nm 두께를 목표로 하여, $1,250\text{ cycle}$ 조건에서 5시간 동안 수행되었다. 활물질이 증착된 탄소섬유는 Fig. 6과 같이, 명확한 색상 변화가 관찰되었으며, 이는 바나듐 활물질이 성공적으로 코팅되었음을 의미한다.

코팅된 탄소섬유의 원소 조성 및 분포는 Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)를 통해 분석하였다. Fig. 7의 SEM 이미지에서는 탄소섬유 표면에 균일한 코팅층이 형성된 것이 확인된다. 대응되는 EDS 원소 맵핑에서는 기판인 탄소섬유로부터 기인한 강한 탄소 (C) 신호가 관찰되었으며, 바나듐 (V) 및 산소 (O) 신호가 섬유 표면을 따라 균일하게 분포하는 것이 확인되었다. 이때 바나듐과 산소의 중첩된 분포는 바나듐 산화물층이 성공적으로 형성되었음을 의미한다.

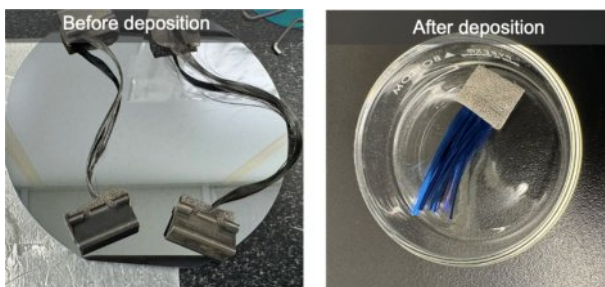


Fig. 6. Before and after vanadium active material deposition

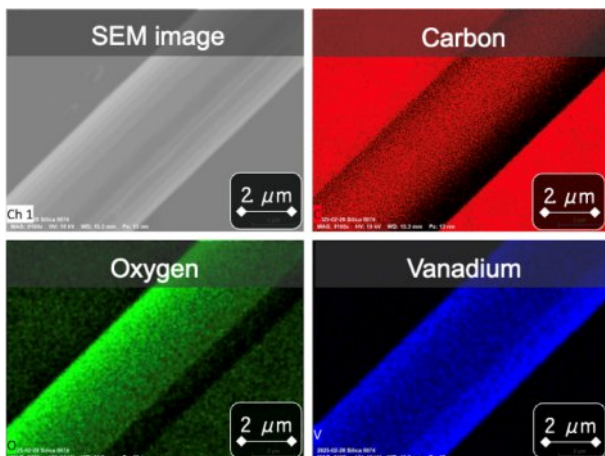


Fig. 7. EDS analysis results of the carbon fiber surface

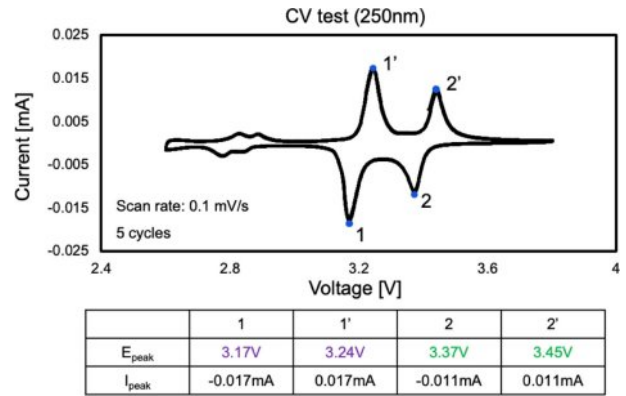


Fig. 8. CV test result of the V_2O_5 -coated carbon fiber electrode

3.2 액체 전해질 셀에서의 전기화학적 성능

순환 전압 전류법 (Cyclic voltammetry, CV) 분석은 반쪽 셀 (half-cell) 구성에서 0.1 mV s^{-1} 의 주사 속도로 수행하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이, 선택된 전압 구간 내에서 V_2O_5 의 가역적인 α - δ 상 영역에 해당하는 두 쌍의 뚜렷한 산화·환원 피크가 관찰되었다. 환원 피크는 약 3.17 V (Peak 1) 및 3.37 V (Peak 2)에서 나타났으며, 이에 대응하는 산화 피크는 각각 3.24 V (Peak 1') 및 3.45 V (Peak 2')에 위치하였다. 이러한 피크 위치는 리튬 삽입 과정에서의 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 및 $\epsilon \rightarrow \delta$ 상 전이와, 리튬 탈삽입 과정에서의 역상 전이에 해당하는 전형적인 거동과 일치한다. 또한, 5 회의 연속 사이클 동안 피크 전류가 안정적으로 유지되어, 제한된 전압 범위 내에서 리튬의 가역적인 삽입·탈삽입 거동이 이루어졌음을 확인하였다. 이러한 전기화학적 안정성은 작동 전압 창을 α - δ 상 전이 영역으로 제한함으로써 구조적 열화를 효과적으로 억제하면서도 안정적인 산화·환원 반응을 유지할 수 있음을 시사한다.

증착된 양극층의 두께 및 균일성은 Fig. 9에 제시된 SEM 분석을 통해 추가적으로 검증하였다. 단면 SEM 이미지를 통해 바나듐 산화물 층이 평균 두께 약 253 nm 로 균일하게 증착되었으며, 탄소섬유 표면 전체를 연속적으로 피복하고 있음을 확인하였다. 이는 ALD 공정이 우수한 두께 제어 특

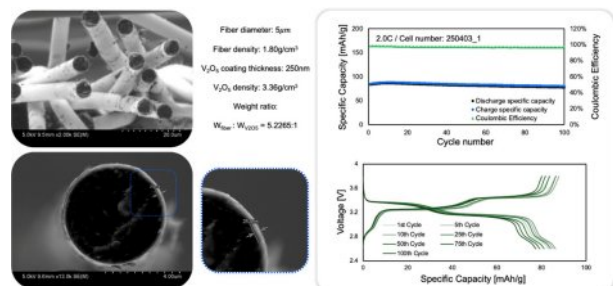


Fig. 9. Cross-sectional SEM images and electrochemical performance of liquid electrolyte half-cell

성을 제공함을 보여준다.

ALD로 코팅된 탄소섬유 양극, 리튬 금속 음극, 그리고 액체 전해질을 사용하여 코인 셀을 제작하였다. 전기화학적 성능 평가는 2.6–3.8 V의 전압 범위에서 수행하였다. 초기 방전 용량은 85.4 mAh g^{-1} 로 측정되었으며, 100 사이클 이후에도 약 93%의 용량 유지율을 나타내어 우수한 사이클 안정성을 확인하였다.

또한, 2.0 C-rate의 고속 충·방전 조건에서도 이론 용량 (147 mAh g^{-1})의 약 57%를 유지하여, 초박막 ALD 기반 활물질 코팅이 전자 및 이온 전달을 효과적으로 촉진함을 입증하였다.

3.3 고체 전해질 셀에서의 전기화학적 성능

구조배터리의 기계적 성능 요구 조건을 고려하여, 액체 전해질 대신 황화물계 고체 전해질을 적용한 전고체 배터리 시편을 제작하였다. 황화물계 전해질 펠렛은 0.18 g의 LPSCI 분말을 25°C에서 300 MPa의 일축 압력으로 냉간 압축하여 제조하였으며, 그 결과 직경 9 mm, 두께 약 870 μm 의 치밀한 펠렛이 형성되었다.

Fig. 10은 황화물계 고체 전해질 펠렛의 제조 공정과 전고체 구조배터리 셀의 조립 과정을 개략적으로 나타낸다. 제조된 고체 전해질 펠렛은, ALD로 코팅된 바나듐 산화물 탄소섬유 양극 (두께: 50 μm) 및 리튬 금속 음극 (두께: 300 μm)과 결합하여 전고체 구조배터리 시편을 구성하였다.

조립된 셀의 전기화학적 성능은 Fig. 11에 제시된 바와 같이 2.6–3.8 V의 전압 범위에서 1.0 C-rate 조건으로 평가하였다. 초기 방전 용량은 67.2 mAh g^{-1} 로 측정되었다. 초기 사이클 동안 일시적인 용량 감소가 관찰되었으나, 이후 사이클이 진행됨에 따라 용량이 회복되는 거동을 보였다. 이는 계면 재배열 및 기계적 완화 효과에 기인한 것으로 해석된

다. 특히, 100 사이클 이상 동안 유의미한 용량 열화 없이 안정적인 전기화학적 작동이 유지되었으며, 이는 ALD 기반 탄소섬유 양극과 황화물계 고체 전해질 사이에서 충분한 계면 적합성이 확보되었음을 입증한다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기화학적 성능과 구조적 신뢰성 간의 상충 관계를 극복하기 위하여, ALD 기반 초박막 활물질을 탄소섬유 집전체에 코팅하고 황화물계 고체 전해질을 통합한 구조배터리를 제안하였다. ALD 공정을 통해 바나듐 기반 양극층이 균일하고 정합적으로 증착되었으며, 그 결과 향상된 계면 안정성과 함께 액체 전해질 및 전고체 배터리 구성 모두에서 안정적인 전기화학적 성능을 확보할 수 있었다. 또한 황화물계 고체 전해질의 적용을 통해 전고체 셀에서 안정적인 사이클 특성이 구현되었다. 이를 기반으로 향후에는 기계적 하중 하에서의 전기화학적 거동 분석 및 장기 내구성 평가를 통해 구조-전기화학 연성 거동에 대한 심층적인 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 (KETEP) 및 대한민국 산업통상자원부(MOTIE)의 지원을 받아 수행되었으며(No. RS-2024-00402410), 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Ishfaq, A., Nguyen, S.N., Greenhalgh, E.S., Shaffer, M.S.P., Kucernak, A.R.J., Asp, L.E., Zenkert, D., and Zenkert, D., "Multifunctional design, feasibility and requirements for structural power composites in future electric air taxis," *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, No. 4, 2023, pp. 817-827.
2. Riboldi, C.ED., Lorenzo, T., and Fabio, B., "Structural batteries in aviation: A preliminary sizing methodology," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 33, No. 4, 2020, 04020031.
3. Karadotcheva, E., Nguyen, S.N., Greenhalgh, E.S., Shaffer, M.S., Kucernak, A.R., and Linde, P., "Structural power performance targets for future electric aircraft," *Energies*, Vol. 14, No. 19, 2021, 6006.
4. Johannisson, W., Zenkert, D., and Lindbergh, G., "Model of a structural battery and its potential for system level mass savings," *Multifunct. Mater.*, Vol. 2, 2019, 035002.
5. Johannisson, W., Dan, Z., and Göran, L., "Model of a structural battery and its potential for system level mass savings," *Multifunctional Materials*, Vol. 2, No. 3, 2019, 035002.
6. Moyer, K., Ait Boucherbil, N., Zohair, M., Eaves-Rathert, J., and Pint, C.L., "Polymer reinforced carbon fiber interfaces for high energy density structural lithium-ion batteries," *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 4, No. 6, 2020, pp. 2661-2668.

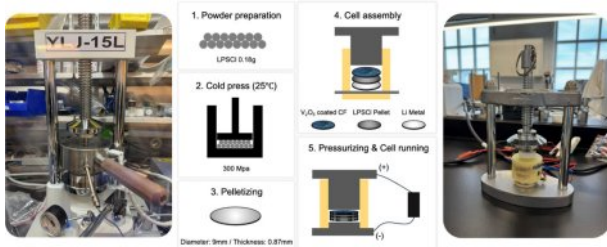


Fig. 10. Fabrication process of all-solid-state battery

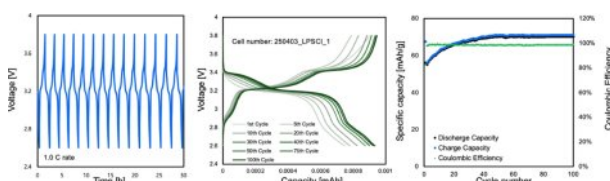


Fig. 11. Electrochemical performance of all-solid-state battery

7. Bouton, K., Schneider, L., Zenkert, D., and Lindbergh, G., "A structural battery with carbon fibre electrodes balancing multifunctional performance," *Composites Science and Technology*, Vol. 256, 2024, 110728.
8. Chaudhary, R., Xu, J., Xia, Z., and Asp, L.E., "Unveiling the Multifunctional Carbon Fiber Structural Battery," *Advanced Materials*, Vol. 36, No. 48, 2024, 2409725.
9. Han, Z., Zhu, J., Feng, Y., Zhang, W., Xiong, Y., and Zhang, W., "Manufacturing carbon fabric composite structural batteries using spray with high-pressure and high-temperature and vacuum-bag assisted infusion techniques," *Composites Science and Technology*, Vol. 245, 2024, 110321.
10. Ye, J., Ji, X., Liu, Z., Liu, K., Li, J., Wang, R., Wang, J., and Lei, Q., "Carbon fiber reinforced structural battery composites: Progress and challenges toward industrial application," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 277, 2024, 111411.
11. Raja, M.A., Lim, S.H., Jeon, D., Bae, S., Oh, W., Yang, I., Kang, D., Ha, J., Lee, H.E., Oh, I.K., Kim, S., and Kim, S.S., "Thin, Uniform, and Highly Packed Multifunctional Structural Carbon Fiber Composite Battery Lamina Informed by Solid Polymer Electrolyte Cure Kinetics," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 16, No. 43, 2024, pp. 59128-59142.
12. Raja, M.A., Lim, S.H., Jeon, D., Hong, H., Yang, I., Kim, S., and Kim, S.S., "An Investigation of Interfacial Strength in Epoxy-based Solid Polymer Electrolytes for Structural Composite Batteries," *Composites Research*, Vol. 36, No. 6, 2023, pp. 416-421.
13. Sutrisnoh, N.A.A., Lim, G.J., Chan, K.K., Raju, K., Teh, V., Lim, J.N., Fam, D.W.H., and Srinivasan, M., "Toward High-Capacity Carbon Fiber Cathodes for Structural Batteries using Electrophoretic Deposition: Effects of Oxidative Surface Treatment on Carbon Fibers," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 25, No. 23, 2023.
14. Asp, L.E., Bouton, K., Carlstedt, D., Duan, S., Harnden, R., Johannisson, W., Johansen, M., Johansson, M.K.G., Lindbergh, G., Liu, F., Peuvot, K., Schneider, L.M., Xu, J., and Zenkert, D., "A structural battery and its multifunctional performance," *Advanced Energy and Sustainability Research*, Vol. 2, No. 3, 2021, 2000093.
15. Tan, M.Y., Safanama, D., Goh, S.S., Lim, J.Y., Lee, C.H., Yeo, J.C.C., Thitsartarn, W., Srinivasan, M., and Fam, D.W.H., "Concepts and emerging trends for structural battery electrolytes," *Chemistry-An Asian Journal*, Vol. 17, No. 21, 2022, e202200784.
16. Lu, X., Wang, Y., Xu, X., Yan, B., Wu, T., and Lu, L., "Polymer-based solid-state electrolytes for high-energy-density lithium-ion batteries-review," *Advanced Energy Materials*, Vol. 13, No. 38, 2023, 2301746.
17. Sun, S.Y., Zhang, X.Q., Wang, Y.N., Li, J.L., Zheng, Z., and Huang, J.Q., "Understanding the transport mechanism of lithium ions in solid-electrolyte interphase in lithium metal batteries with liquid electrolytes," *Materials Today*, Vol. 77, 2024, pp. 39-65.