3 리튬금속전지 안정성 및 성능 향상을 위한 덴드라이트 성장 제어 나노구조 소재 기술

글_**권혜민** 석사과정 | 성균관대학교 지능형팹테크융합전공 · **정형모** 교수 | 성균관대학교 기계공학부 & 지능형팹테크융합전공

1. 서론

고에너지밀도를 갖는 리튬이온전지와 같은 전기화학적 에너지 저장 장치는 스마트 전력망, 전기자동차 및 휴대용 전자기기의 주요 전원으로 활용되는 필수 에너지 저장 장치이다. 전자기기 및 전기자동차의 폭발적 수요와 성능 향상으로 인해, 기존 리튬이온전지는 에너지밀도, 사이클 수명 및 안정성과 같은 요구조건에 미치지 못하고 있다 [1,2]. 최근에는 리튬-황 및 리튬-공기 전지와 같은 리튬 금속을 음극으로 활용한 리튬금속전지가 차세대 전지로 많은 관심을 받고 있다 [3,4]. 리튬 금속을 음극으로 활용하면 흑연의 약 10배에 해당하는 매우 높은 용량(3,860 mAh g^{-1})을 확보할 수 있으며, 낮은 전기화학적 전위(표준수소전극 대비 -3.04 V)에 의해 전지의 에너지밀도를 극대화할 수 있기 때문에, 이를 구현할 수 있는 핵심 소재인 음극 소재에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 [1-5]. 그러나 리튬금속전지의 경우, 반복적인 충방전 과정에서 리튬 금속이 덴드라이트 형상으로 성장하며, 큰 부피팽창 등을 야기한다 [5-8]. 이러한 덴드라이트 형태의 리튬 금속 성장은 낮은 쿨롱 효율(Coulombic efficiecy)로 인한 사이클 수명을 크게 단축시킬 뿐만 아니라, 덴드라이트의 지속적인 성장으로 내부 단락을 일으켜 폭발 및 화재의 위험을 초래한다 [6-8]. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 리튬 금속의 성장을 제어하여 덴드라이트 성장을 억제해야 하며, 이에 대한 많은 연구가 계속해서 진행되고 있다. 대표적

인 예로, Solid electrolyte interphase (SEI) 막을 안정화시키기 위해 기능성 첨가제가 들어간 전해질을 사용하고 [9,10], 물리적인 보호층을 추가하거나 [11-13] 고체전해질을 사용하는 방법 [14-16] 및 리튬 호스트 역할이 가능한 나노구조 소재를 활용하는 연구가 진행 중이다. 특히, 나노소재의 구조적, 화학적 특성으로 균일한 리튬 이온 유량을 제어함으로써 균일한 리튬 증착/박리를 유도하는 방법이 고성능 리튬금속전지 구현을 위한 주요 전략으로 알려져 있다 [17,18].

본 기고에서는 저차원 탄소기반 나노소재 및 다공성 소재를 활용하여 리튬 금속의 성장을 제어하고 덴드라이트 성장을 억제하는 연구에 대한 최신 동향을 다루고자 한다.

2. 리튬금속전지용 전극 소재의 요구 특성

리튬금속전지의 경우, 삽입/탈리 구동을 하는 리튬이온전지와는 다르게 리튬 이온이 증착/박리와 같은 구동을 한다. 리튬의 덴드라이트 형성 및 성장 메커니즘에 대한 통상적인 실험적 모델인, Sand's model은 $\tau = \pi De^2 C_0^2 (1+\mu_c/\mu_a)^2 / 4J_{eff}^2$ 으로 나타난다. τ는 리튬 덴드라이트가 자라기 시작하는 시간으로, 이 sand's model에 의하면, 리튬 금속 음극의 국소전류밀도를 줄여 리튬 덴드라이트의 성장을 효과적으로 억제할 수 있다고 알려져 있다. 이와 관련하여 다공성 및 전도성 호스트 재료를 사용하여 리튬 이온 유량을 조절할 수 있다. 이러한 재료 중 대표적으로 탄소기반 나노구조를 가지는 소재와 다공성 소재가 집중적으로 연구되고 있다 [19,20].

탄소 기반 소재는 높은 전기 전도성, 우수한 기계적 및 화학적 안정성을 가지고, 가격 효율적이며 환경 친화적인 특징이 있어 전지 시스템을 포함한 많은 분야에 사용되고 있다 [21]. 그 중, 탄소나노섬유(carbon nanofiber, CNF), 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 다공성 탄소 및 그래핀과 같은 나노구조 소재들은 리튬금속전지에 대한 호스트 물질로 많이 알려져 있으며, 다공성 소재와 더불어 효과적으로 리튬 증착/박리를 제어할 수 있다고 알려져 있다. 그러나 일반적인 탄소 및 다공성 소재의 경우, 반 리튬친화적이며, 비정질 탄소의 경우 높은 표면적과 결함 사이트, 표면 기능성과 같은 호스트 재료로서의 좋은 특징을 갖고 있지만 리튬친화성이 작다는 특징을 갖는다. 그렇기 때문에 균일한 리튬 증착을 위해서는 나노구조 소재 표면에 추가적으로 리튬친화성 표면 개질이 필요하다 [18,22,23]. 리튬친화성 표면은 리튬 이온의 유량을 고르게 분포하도록 도와주며, 덴드라이트 성장을 억제하는데 중요한 역할을 한다 [24]. 이는 3장에서 자세히 다루고자 한다.

3. 나노소재를 이용한 리튬 금속 성장 제어 연구 동향

3.1 저차원 탄소소재기반 리튬 금속 성장 제어 기술

저차원 탄소기반 소재는 대표적으로 탄소나노섬유, 탄소나노튜브 그리고 그래핀 등이 있으며, 탄소나노섬유 및 탄소나노튜브는 1D 구조를, 그래핀은 2D 구조를 가진다. 탄소나노튜브의 경우 얽힌 네트워크를 갖고 있고, 낮은 환원 전위 및 높은 표면적을 가지고 있어 증착/박리 동안에 리튬 금속의 분산에 대한 충분한 공간을 수용할 수 있는 이상적 호스트로 알려져 있다 [25]. 상기 소재들의 경우 우수한 기계적 및 화학적 안정성을 갖고 있고, 또한 다공성이거나 유연한 3D 전극으로 만들 수 있다는 특징이 있다 [25]. 다음은 이 저차원 탄소기반 소재를 이용하여 3D 구조체로 만들어 리튬 덴드라이트의 성장 속도를 지연시킨 연구를 소개하고자 한다.

최근 탄소나노섬유에 탄소나노튜브를 탑재해 리튬금속전지에 적용한 연구가 진행되었다 [23]. 탄소나노섬유의 경우, 비표면적 제어가 용이하고, 유연하며 연속적으로 연결되어 있는 다공성 구조로서 리튬 금속 음극에 사용된다. 또한 탄소나노섬유 필름의 경우 효율적인 전자전달 및 리튬 금속의 부피팽창을 완화시킬 수 있는 공간을 제공하지만, 탄소나노섬유를 사용한 전극은 낮은 전기전도성을 갖는다는 문제점이 있다. 해당 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자, 탄소나노섬유와 탄소나노튜브를 결합하여 성능을 향상시켰다. 리튬 증착 지지체로서 사용될 때, 전기전도성이 향상되었으며 부피팽창도 억제되었다. 그림 1(a)는 탄소나노섬유와 탄소나노튜브의 복합체의 이미지이며, 그림 1(b)에서는 충방전 후에도 덴드라이트 없이 균일한 금속성 리튬이 증착된 것을 볼 수 있다. 그림 1(c)에서는 리튬

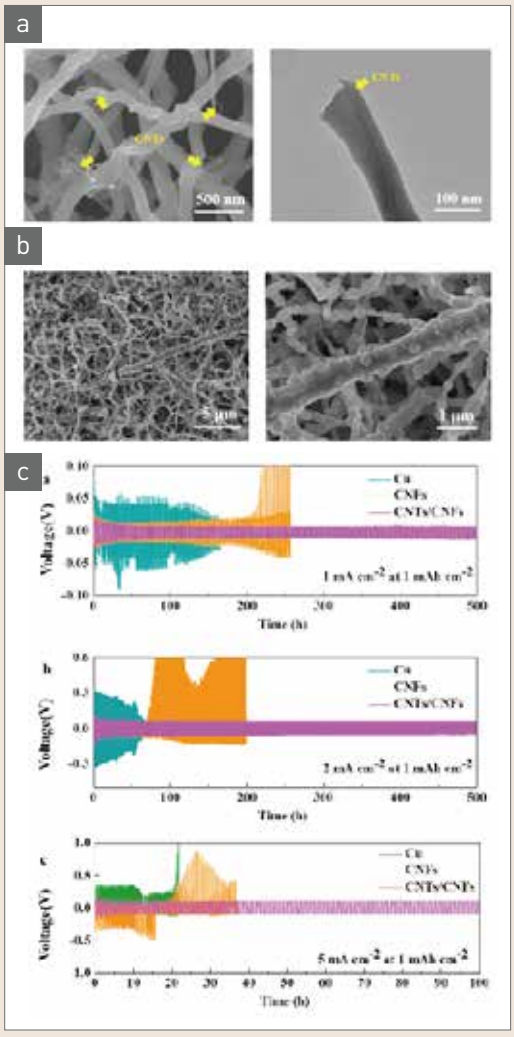

그림 1 ▸ (a) SEM and TEM CNTs/CNFs, (b) SEM images of Li plating CNTs/CNFs scaffolds and (c) Galvanostatic discharge/charge at different current density [23].

대칭셀을 이용하여 증착/박리 거동에 따른 전기화학 평가를 보여주며, 전류세기에 상관없이 탄소나노튜브/탄소나노섬유를 사용한 전지의 분극이 단일소재와 비교하였을 때 작게 나온 것을 볼 수 있다. 이는 탄소나노섬유 지지체에 리튬 분포가 균일하게 일어났다는 것을 의미하며, 이로써 탄소나노튜브와 탄소나노섬유를 이용하여 리튬 덴드라이트를 억제시키는 것을 보여주었다.

그림 2는 2D 그래핀을 이용하여 3D 그래핀@니켈 폼을 제조 및 집전체로 사용하여 덴드라이트가 없는 리튬 증착을 달성한 연구사례이다 [20]. 먼저 그림 2(a)에서는 구리 포일, 니켈 폼 및 3D 그래핀@니켈 폼의 리튬 증착 개략도가 나와있다. 구리 포일, 니켈 폼에서는 리튬 덴드라이트의 성장을 억제하지 못하였지만, 표면에 코팅된 그래핀의 경우, 덴드라이트 성장을 성공적으로 억제하였다. 그림 2(b)의 전기화학 평가에서는, 3D 그래핀@니켈 폼 적용 전지는 쿨롱효율이 100회 이후에도 96%이상으로 유지 되었으며, 이는 표면적이 큰 집전체를 도입하면 Sand's time(τ)을 늘리는 데 도움이 되 사이클 수명의 연장 및 리튬 덴드라이트의 성장을 지연할 수 있다는 것을 나타낸다. 반면에 그림 2(c)에서 일반적인 구리 포일과 니켈 폼의 경우, 사이클이 지속될수록 데드리튬이 형성되고, 그로 인해 빠르게 수명이 감소되었다. 반면 3D 그래핀@니켈 폼의 경우, 100회 이후에도 우수한 리튬 증착/박리 가역성을 보여준다. 결론적으로, 3D 그래핀@니켈 폼의 구조적 및 계면적 시너지를

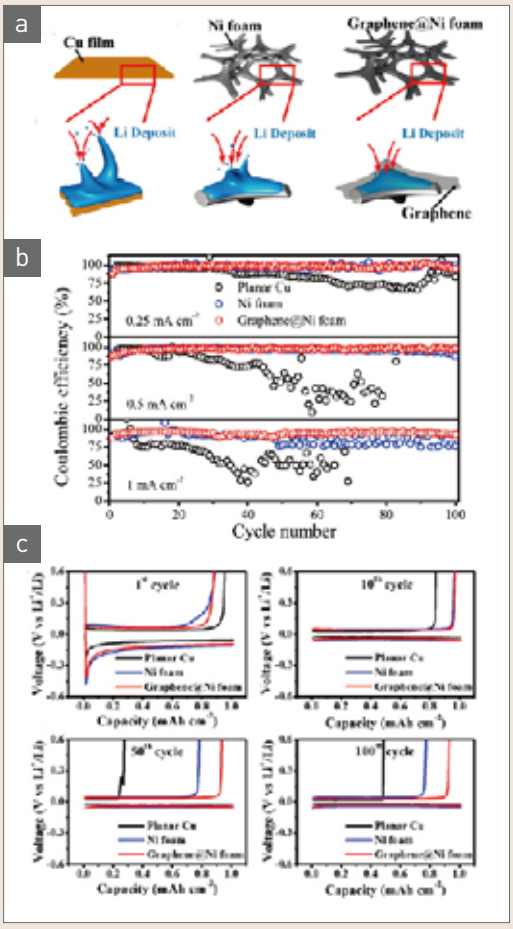

그림 2 ▸ (a) Schematic illustration of the Li deposition on bare Cu foil, Ni foam and 3D graphene@Ni foam, (b) cycling performances of bare Cu foil, Ni foam, and 3D graphene@Ni foam at various current densities and (c) galvanostatic cycling voltage profiles of bare Cu foil, Ni foam and 3D graphene@Ni foam at cycles [20].

활용하여 덴드라이트가 없는 리튬 증착을 달성했다는 것을 보여주고 있다.

이렇게 저차원 탄소소재들을 3D 복합 구조체 전극으로 이용함으로써 덴드라이트의 성장속도를 지연시키고 리튬금속전지의 성능을 향상시킬 수 있다.

3.2 3D 다공성 탄소소재기반 리튬 금속 성장 제어 기술

3D 다공성 탄소소재들은 탄소소재의 기본 특징들에 더하여 넓은 비표면적, 높은 기계적인 유연성을 가져 리튬 증착에 대한 우수한 호스트로서 여겨지고 있다. 또한 충방전 시 리튬의 증착에 대한 충분한 공간을 제공해줌으로써 무한한 부피팽창을 막을 수 있으며, 높은 비표면적을 가지기 때문에 3D 탄소소재는 전극의 국부전류밀도를 줄여 덴드라이트의 형성시작시간을 지연시키면서 덴드라이트가 없는 리튬 증착을 가능하게 한다 [27].

3D 다공성 탄소소재를 이용한 연구사례에 대해서 소개하고자 한다. 그림 3은 속이 빈 탄소 구조체(hollow carbon sphere)를 리튬금속전지에 적용하여 덴드라이트를 효과적으로 막은 연구 결과를 보여준다 [28]. 그림 3(a)의 경우, 리튬 증착/박리에 따른 개략도를 나타냈다. 속이 빈 탄소 구조체가 코팅된 구리 집전체의 경우, 리튬 증착 시 표면에서 안정적인 SEI막을 형성하는 반면, 코팅되어 있지 않은 일반적인 구리 집전체의 경우, 리튬 증착 시 불안정한 SEI막이 형성되며 덴드라이트가 생성되는 것을 보여준다. 그림 3(b)의 경우, 속이 빈 탄소 구조체가 코팅된 전극의 scanning electron microscope (SEM) 이미지를 보면 리튬이 코팅 층 안으로 균일하게 자라는 것을 보여주지만 코팅 되어있지 않은 구리 집전체의 경우, 리튬 덴드라이트가 자라는 것을 볼 수 있다. 그림 3(c)의 경우, 속이 빈 탄소 구조체를 코팅한 전극의 쿨롱효율이 높게 유지되며

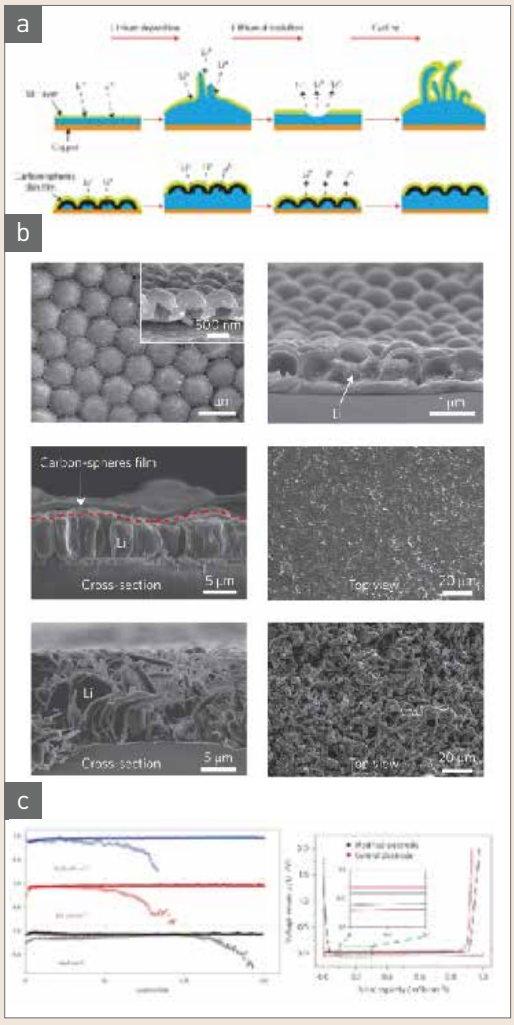

그림 3 ▸ (a) Schematic diagrams of the different Li anode structures, (b) SEM image of carbon-sphere film and Cu electrode, and (c) comparison of cycling performances of the hollow carbon nanosphere-modified electrode and the control Cu electrode at different current rates and Voltage profiles of the Li deposition/dissolution process with Li metal [28].

사이클 수명특성도 더 뛰어난 것을 보여준다. 결과적으로 3D 탄소소재를 이용하면 리튬 덴드라이트를 억제할 수 있음을 보여준다.

3.3 작용기를 활용한 다공성 소재기반 리튬 금속 성장 제어 기술

최근 여러 3D 구조를 가지는 재료들에 기능성 작용기들이나 리튬친화성 소재를 이용하여 균일한 리튬 증착을 유도해 덴드라이트를 억제시키는 접근법이 효과적으로 알려져있다 [29].

그림4는 3D 구조체인 금속 유기 골격체(metal organic framework, MOF)에 리튬친화성을 가진다고 알려진 질소(N) 사이트를 제공함으로써 균일한 리튬 핵생성을 유도하여 리튬 덴드라이트를 억제하고 리튬금속전지의 성능향상을 시킨 연구사례이다 [30]. 그림 4(a)는 구리 집전체와 리튬 이온의 부착 사이트를 가지는 3D 매트릭스 층에서 리튬 성장 거동의 그림을 보여준다. 리튬친화성을 가지는 질소의 배치는 리튬 성장을 균일하게 유도 하고, 부피팽창을 막은 반면, 일반 구리 집전체의 경우, 리튬 국부적인 핵 성장을 통해 덴드라이트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)의 SEM 이미지에서도 보여 지듯이, 리튬친화성을 가지는 탄소-질소 사이트가 존재하면 덴드라이트가 억제되는 것을 확인 할 수 있다. 하프셀 및 풀셀의 전기화학 평가에서도 탄소-질소사이트가 고르게 분포된 전지의 경우 더욱 긴 수명특성을 가지며, 안정적으로 사이클이 지속되는 것을 보여준다. 따라서 기능성 작용기를 가지는 소재와 3D 구조체를 활용하면, 성공적으로 덴드라이트 성장을 억제 할 수 있음을 보여준다.

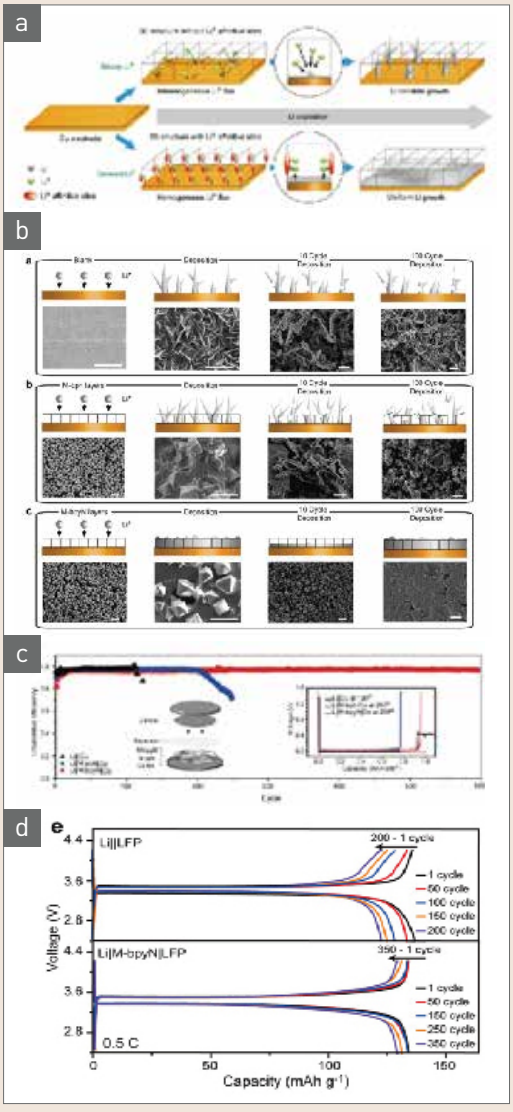

그림 4 ▸ (a) Schematic illustration of Li growth on a 3D matrix layer of Cu foil and 3D matrix layer with Li+affinitive sites, (b) Li growth behavior on M-bpyN|Cu and Li|Cu and SEM image, (c) Cycle performances and voltage profiles of the Li||Cu, Li|M-bph|Cu, and Li|M-bpyN|Cu half-cell, and (d) Charge–discharge profiles Li|M-bpyN|LFP and Li|LFP during repeated cycle at 0.5 C [30].

이와 비슷하게, 그림 5는 3D 구리 폼에 안티모니(Sb) 층을 코팅하는 방법을 통해 리튬 덴드라이트의 성장을 억제하는 내용을 보여준다 [31]. 그림 5(a)는 구리 폼에 안티모니를 코팅

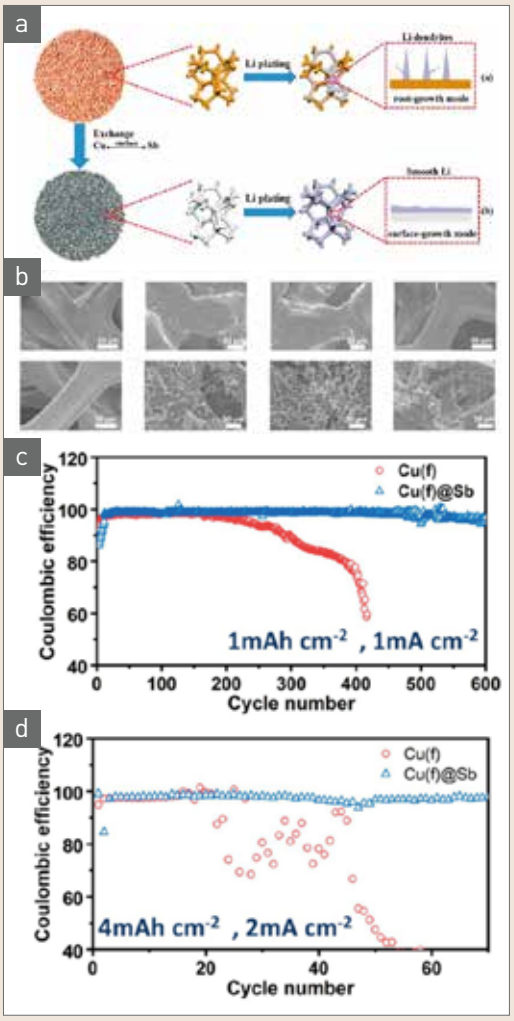

그림 5 ▸ (a) Schematic illustration of Li deposition on Cu foam and Cu foam@Sb, (b) SEM images of Cu foam and Cu foam@Sb after plating and stripping and (c), (d) Coulombic efficiencies of Li/Cu foam and Li/Cu foam@Sb half cells [31].

하면, 리튬 증착 후에 덴드라이트가 성장하지 않고 균일한 리튬 증착이 가능하다는 것을 보여주지만, 일반적인 구리 폼의 경우 리튬 증착 후에 덴드라이트가 성장한 것을 확인할 수 있다. 그림 5(c)의 SEM이미지에서 확인할 수 있듯이 안티모니가 코팅된 구리 폼의 경우 리튬 증착/박리 후에도 덴드라이트가 성장하지 않고 깨끗한 표면을 가지는 것을 보여준다. 또한 안티모니가 코팅된 구리 폼의 경우, 긴 사이클 동안 높은 쿨롱효율이 유지하는 것을 확인할 수 있다. 이로써, 전지 내 리튬친화성 소재를 활용하면 리튬 덴드라이트 성장을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 도핑을 통한 리튬 금속 성장 제어 기술

앞서 리튬 덴드라이트의 성장을 억제하기 위한 방법으로 리튬 호스트 역할을 하는 탄소기반 소재들을 소개했다. 탄소기반 소재들의 경우, 리튬 호스트역할을 함으로써 무한한 부피팽창을 줄여주며 균일한 리튬 증착을 얻을 수 있지만, 일반적으로 반 리튬친화성을 가지기 때문에 단독으로 쓰기에는 무리가 있다. 또한 리튬이 증착하는 과정에서 증착되는 마지막 형상은 처음 핵생성하는 거동에 따라 달라질 수 있는데, 이는 처음 핵생성 사이트를 조절함에 따라 덴드라이트의 성장을 제어할 수 있다는 것을 의미한다 [17]. 따라서, 덴드라이트의 성장을 더욱 효과적으로 억제하기 위해 다양한 차원의 탄소소재에 리튬친화성 소재들을 도핑하는 연구가 진행되고 있는데, 이를 대표하는 연구를 소개하고자 한다.

최근 질소가 도핑된 그래핀 매트릭스를 활용하여 전지의 성능을 향상시킨 연구가 진행되었다 [32]. 해당 연구에서는 질소가 도핑된 그래핀을 사용함으로써, 리튬 핵생성 크기와 사이트를 제어하고, 그로인해 리튬 덴드라이트 성장을 억제시켰다. 그림 6(a)는 구리 집전

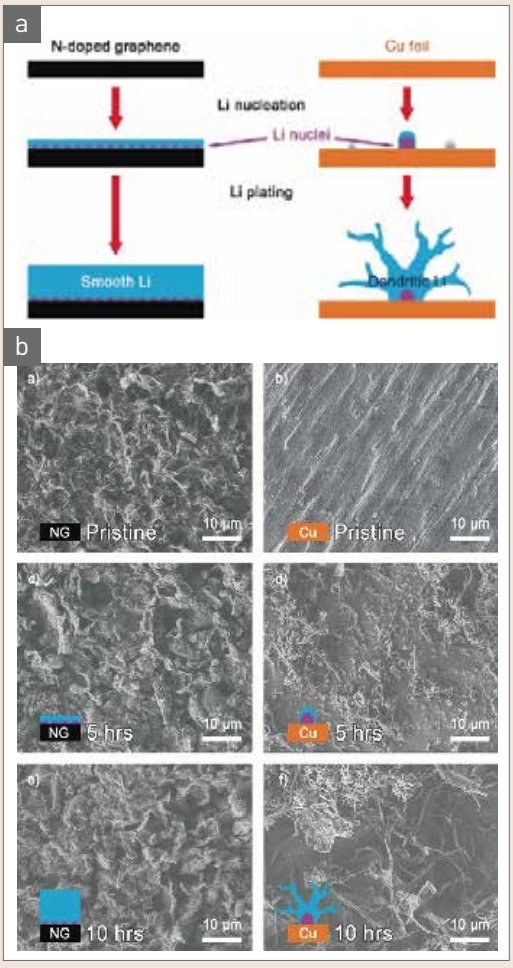

그림 6 ▸ (a) Schematic representation of the Li nucleation and plating process on N-doped graphene electrode and Cu foil electrode and (b) SEM images of metallic Li deposits on N-doped graphene electrode and Cu foil electrode [32].

체에 질소가 도핑된 그래핀을 사용 할 때 리튬 증착 거동을 보여준다. 일반적인 구리 집전체의 경우, 표면이 거칠고 리튬친화성이 없기 때문에 리튬 증착에 대한 핵생성 사이트는 무작위하게 분포가 된다. 또한 리튬 이온 증착은 주로 표면으로부터 한 방향으로 자라기 때문에 리튬 핵이 생성된 곳으로 계속해서 증착되며 결국 덴드라이트가 성장하게 된다. 반면 질소가 도핑된 그래핀의 경우, pyridinic, pyrrolic 및 quaternary 질소 사이트와 같은 리튬친화성 작용기가 존재하며, 이러한 작용기들은 균일한 핵생성 사이트를 제공함으로써, 금속성 리튬이 질소가 도핑된 그래핀 표면 위에 먼저 쌓이게 된다. 결과적으로 균일하고 비교적 편평한 리튬 증착 거동을 얻을 수 있다. 그림 6(b)에서와 같이 SEM을 통해서 표면을 관찰할 수 있다. 일반적인 구리 집전체의 경우, 시간이 지남에 따라 덴드라이트가 발생되는 것을 확인할 수 있지만, 질소가 도핑된 그래핀의 경우 시간이 지나도 핵생성 단계에서 금속성 리튬이 균일하게 증착되어 덴드라이트가 성장하지 않은 모습을 볼 수 있다. 이로써 리튬친화성을 가지는 질소를 도핑함으로써 덴드라이트의 성장을 더욱 효과적으로 억제한 것을 확인하였다.

이와 비슷한 맥락으로, 리튬친화적인 황(S) 원소가 도핑된 메조포러스 탄소 구에 대한 연구가 진행되었다 [18]. 그림 7(a)에서, 일반적인 구리 집전체 표면에서는 리튬 핵생성 사이트가 무작위로 분포하며, 한곳에서 집중적으로 핵 성장이 일어나 덴드라이트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 반면 황이 도핑된 메조포러스 탄소 구(S-doped ordered mesoporous carbon nanospheres, SMC)의 경우, 표면적이 넓고 균일하게 분포된 리튬친화성 사이트를 갖고 있기 때문에 표면과 내부로 균일한 리튬 핵생성이 유도된다. 그림 7(b), 7(c)는 대칭셀에서의 리튬 증착/박리 거동을 보여준다.

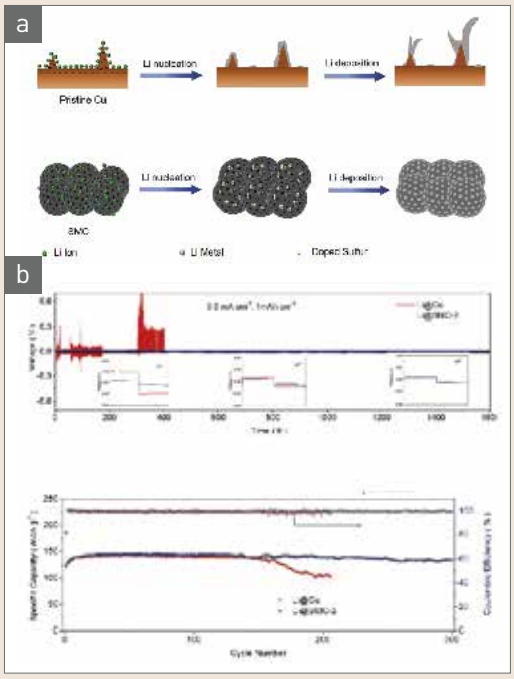

그림 7 ▸ (a) Schematic illustration of the lithium nucleation and deposition process on pristine Cu and SMC electrodes, (b) Voltage profiles of Li@Cu and Li@SMC-2 electrodes in symmetric cells and (c) cycling performance and Coulombic efficiency at 1C (c) of full cells [18].

일반적인 구리 집전체에서는 불균일한 리튬 증착이 덴드라이트의 성장을 유도하여 내부 단락이 발하였으며, 큰 분극이 나타난다. 반면에 황 원소가 도핑된 메조포러스 탄소 구의 경우, 더 높은 쿨롱 효율, 상대적으로 긴 싸이클 수명특성 그리고, 비교적 작은 분극을 나타낸다 . 이렇게 여러 차원의 탄소 및 나노 소재들과 리튬친화성 소재들을 같이 사용하게 되면, 더욱 효과적으로 덴드라이트의 형성을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

차세대 전지의 기본 구성으로 각광받고 있는 리튬 금속 기반 전지는 리튬 금속의 전기화학적 성장 메커니즘에 의해 낮은 쿨롱 효율과 짧은 수명 특성 및 안정성 문제를 가지고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 리튬 금속의 성장을 제어하고 리튬의 덴드라이트 형상 성장을 억제하는 것이 매우 중요하다. 본 기고에서는 덴드라이트의 성장을 억제시키거나 지연시키기 위해 리튬 호스트 역할을 할 수 있는 소재에 대한 최신 연구 동향을 소개하기 위해, 탄소기반 나노소재와 더불어 다공성 소재를 활용한 대표적인 연구를 정리하였다. 구조적 특성을 가지는 탄소기반 나노소재는 표면 특성에 기인한 안정적 리튬 금속 성장 및 수용이 가능하며, 리튬친화성을 갖도록 이종원소 도핑 및 작용기를 부착하여 균일한 리튬 금속 성장을 유도함으로써 더욱 효과적으로 리튬의 덴드라이트 성장을 억제할 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 반복된 리튬 금속 형성 및 분해 반응은 불안정한 리튬 금속 성장을 어느 정도 지연할 수 있으나, 덴드라이트 및 데드리튬을 완전히 억제하지 못하는 한계점은 아직까지 개발해야 할 문제로 남아있다. 향후 리튬 금속 성장을 완전히 제어할 수 있는 소재가 개발된다면, 이는 리튬금속전지의 상용화를 앞당기는 핵심 기술이 될 것이며, 안전하고 고성능의 차세대 에너지저장장치를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 / 고 / 문 / 헌

[1] C. P. Yang, Y. X. Yin, S. F. Zhang, N. W. Li, and Y. G. Guo, *Nat. Commun.*, 6, 8058 (2015).
DOI: 10.1038/ncomms9058

[2] H. Huo, J. Gao, N. Zhao, D. Zhang, N. G. Holmes, X. Li, Y. Sun, J. Fu, R. Li, X. Guo, and X. Sun, *Nat. Commun.*, 12, 176 (2021).
DOI: 10.1038/s41467-020-20463-y

[3] Z. Li, J. Zhang, B. Guan, D. Wang, L. M. Liu, and X. W. Lou, *Nat. Commun.*, 7, 13065 (2016).
DOI: 10.1038/ncomms13065

[4] W. J. Kwak, S. J. Park, H. G. Jung, and Y. K. Sun, *Adv. Energy Mater.*, 8, 1702258 (2018).
DOI: 10.1002/aenm.201702258

[5] Y. J. Fang, S. L. Zhang. Z. P. Wu, D. Luan, and X. W. Lou, *Sci. Adv.*, 7, 3626 (2021).
DOI: 10.1126/sciadv.abg3626

[6] W. Xu, J. Wang, F. Ding, X. Chen, E. Nasybulin, Y. Zhang, and J. G. Zhang, *Energy Environ. Sci.*, 7, 513 (2014).
DOI: 10.1039/C3EE40795K

[7] Y. Zhou, X. Zhang, Y. Ding, L. Zhang, and G. Yu, *Adv. mater.*, 32, 2005763 (2020).
DOI: 10.1002/adma.202005763

[8] K. J. Harry, D. T. Hallinan, D. Y. Parkinson, A. A. MacDowell, and N. P. Balsara, *Nat. Mater.*, 13, 69 (2014).
DOI: 10.1038/nmat3793

[9] F. Qiu, X. Li, H. Deng, D. Wang, X. Mu, P. He, and H. Zhou, *Adv. Energy Mater.*, 9, 1803372 (2018).
DOI: 10.1002/aenm.201803372

[10] H. Dai, K. Xi, X. Liu, C. Lai, and S. Zhang, *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 17515 (2018).
DOI: 10.1021/jacs.8b08963

[11] H. Yuan, J. Nai, H. Tian, Z. Ju, W. Zhang, Y. Liu, X. Tao, and X. W. Lou, *Sci. Adv.*, 6, 3112 (2020).
DOI: 10.1126/sciadv.aaz3112

[12] H. Yuan, J. Nai, Y. Fang, G. Lu, X. Tao, X. W. Lou, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 59, 15839 (2020).
DOI: 10.1002/anie.202001989

[13] X. B. Cheng, M. Q. Zhao, C. Chen, A. Pentecost, K. Maleski, T. Mathis, X. Q. Zhang, Q. Zhang, J. Jiang, and Y. Gogotsi, *Nat. Commun.*, 8, 336 (2017).

[14] Y. Liu, D. Lin, Y. Jin, K. Liu, X. Tao, Q. Zhang, X. Zhang, and Y. Cui, *Sci. Adv.*, 3, 0713 (2017).
DOI: 10.1126/sciadv.aao0713

[15] D. J. Yoo, S. Yang, Y. S. Yun, J. H. Choi, D. Yoo, K. J. Kim, and J. W. Choi, *Energy Mater.*, 8, 1802365 (2018).
DOI: 10.1002/aenm.201802365

[16] M. S. Kim, Deepika, S. H. Lee, M. S. Kim, J. H. Ryu, K. R. Lee, L. A. Archer, and W. I. Cho, *Nat. Energy.*, 3, 889 (2018).
DOI: 10.1126/sciadv.aax5587

[17] A. Zhang, X. Fang, C. Shen, Y. Liu, and C. Zhou, *Nano Res.*, 9, 3428 (2016).
DOI: 10.1007/s12274-016-1219-2

[18] F. Zhang, X. Liu, M. Yang, X. Cao, X. Huang, Y. Tian, F. Zhang, and H. Li, *Nano Energy.*, 69, 104443 (2020).
DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104443

[19] K. C. Pu, X. Zhang, X. L. Qu, J. J. Hu, H. W. Li, M. X. Gao, H. G. Pan, and Y. F Liu, *Rare Metals.*, 39, 616 (2020).
DOI: 10.1007/s12598-020-01432-2

[20] K. Xie, W. Wei, K. Yuan, W. Lu, M. Guo, Z. Li, Q. Song, X. Liu, J. G. Wang, and C. Shen, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 8, 26091 (2016).
DOI: 10.1021/acsami.6b09031

[21] C. Jin, O. Sheng, J. Luo, H. Yuan, C. Fang, W. Zhang, H. Huang, Y. Gan, Y. Xia, C. Liang, J. Zhang, and X. Tao, *Nano Energy.*, 37, 177 (2017).
DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.05.015

[22] J. Y. Jeong, J. Y. Chun, W. G. Lim, W. B. Kim, C. S. Jo, and J. W. Lee, *Nanoscale.*, 12, 11818 (2020).
DOI: 10.1039/D0NR02258F

[23] X. Song, X. Zeng, J. Zou, F. Zhao, and H. Wu, *J. Alloys Compd.*, 854, 157122 (2021).
DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157122

[24] Y. Xu, L. Wang, W. Jia, Y. Yu, R. Zhang, T. Li, X. Fu, X. Niu, J. Li, and Y. Kang, *Electrochim. Acta.*, 301, 251 (2019).
DOI: 10.1016/j.electacta.2019.01.114

[25] Z. Y. Wang, Z. X. Lu, W. Guo, Q. Luo, Y. H. Yin, X. B. Liu, Y. S. Li, B. Y. Xia, and Z. P. Wu, *Adv. mater.*, 33, 2006702 (2021).
DOI: 10.1002/adma.202006702

[26] W. Weng, R. Kurihara, J. Wang, and S. Shiratori, *Compos. Commun.*, 15, 135 (2019).
DOI: 10.1016/j.coco.2019.07.005

[27] H. Liu, X. Cheng, R. Zhang, P. Shi, X. Shen, X. Chen, T. Li, J. Huang, and Q. Zhang, *Trans. Tianjin Univ.*, 26, 127 (2020).
DOI: 10.1007/s12209-020-00241-z

[28] G. Zheng, S. W. Lee, Z. Liang, H. W. Lee, K. Yan, H. Yao, H. Wang, W. Li, S. Chu, and Y. Cui, *Nat. Nanotechnol.*, 9, 618 (2014).
DOI: 10.1038/nnano.2014.152

[29] H, Yuan, J, Nai, H, Tian, Z, Ju, W, Zhang, Y, Liu, X. Tao, and X. W. Lou, *Sci. Adv.*, 6, 3112 (2020).
DOI: 10.1126/sciadv.aaz3112

[30] W. H. Sim, and H. M. Jeong, *Adv. mater.*, 8, 2002144 (2020).
DOI: 10.1002/advs.202002144

[31] J. R. Wang, M. M. Wang, X. D. He, S. Wang, J. M. Dong, F. Chen, A. Yasmin, and C. H. Chen, *ACS Appl. Energy Mater.*, 3, 7265 (2020).
DOI: 10.1021/acsaem.0c00055

[32] R, Zhang, X, R. Chen, X. Chen, X. B. Cheng, X. Q. Zhang, C. Yan, and Q. Zhang, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 56, 7764 (2017).
DOI: 10.1002/anie.201702099

저 / 자 / 약 / 력

성명 권 혜 민

학력
2020년 강원대학교 나노응용공학과 공학사
2020년 ~ 현재 성균관대학교 지능형팹테크융합전공 석사과정

성명 정 형 모

학력
2008년 성균관대학교 재료공학과 공학사
2014년 KAIST 신소재공학부 공학박사

경력
2014년 ~ 2015년 UC Berkeley, 화학부 박사후연구원
2017년 ~ 2019년 강원대학교 기계의용/메카트로닉스/재료공학부 조교수
2020년 ~ 현재 성균관대학교 기계공학부/지능형팹테크융합전공 조교수